



Łukasiewicz
Sieć Badawcza

Autonomia robotów pola walki i robotów specjalnego przeznaczenia

Autonomia robotów pola walki i robotów specjalnego przeznaczenia

Autorzy:

Prof. dr hab. inż. Cezary Zieliński^{5, 1, 2, 4},
Prof. dr hab. inż. Jarosław Arabas^{6, 2},
Prof. PP, dr hab. inż. Dominik Belter¹⁰,
Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Kasprzak⁵,
Prof. dr hab. inż. Zdzisław Kowalczyk^{9, 1},
Prof. dr hab. inż. Maciej Ławryńczuk⁵,
Prof. dr hab. inż. Michał Malinowski^{7, 3},
Prof. PWr, dr hab. inż. Alicja Mazur^{12, 1},
Prof. dr hab. inż. Wojciech Mazurczyk⁶,
Prof. dr hab. inż. Ewa Niewiadomska-Szynkiewicz^{5, 1},
Prof. PP, dr hab. inż. Dariusz Pazderski¹¹,
Prof. dr hab. inż. Piotr Skrzypczyński^{10, 1},
Prof. PW, dr hab. inż. Mariusz Sochacki⁷,
Prof. dr hab. inż. Jan Szmidt⁷,
Dr hab. inż. Piotr Szynkarczyk^{4, 1, 2},
Prof. PW, dr hab. inż. Wojciech Szynkiewicz⁵,
Płk rez. dr hab. inż. Józef Wrona⁴,
Prof. dr hab. inż. Teresa Zielińska^{8, 1, 2}

-
- ¹ Sekcja Robotyki Komitetu Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk,
² Centrum Badawcze Priorytetowego Programu Badawczego „Sztuczna Inteligencja i Robotyka” Politechniki Warszawskiej,
³ Polska Akademia Nauk,
⁴ Sieć Badawcza Łukasiewicz – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP,
⁵ Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej,
⁶ Instytut Informatyki Politechniki Warszawskiej,
⁷ Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki Politechniki Warszawskiej,
⁸ Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej,
⁹ Katedra Systemów Decyzyjnych i Robotyki Politechniki Gdańskiej,
¹⁰ Instytut Robotyki i Inteligencji Maszynowej Politechniki Poznańskiej,
¹¹ Instytut Automatyki i Robotyki Politechniki Poznańskiej,
¹² Katedra Cybernetyki i Robotyki Politechniki Wrocławskiej
-

ISBN 978-83-7789-788-1

© Copyright by: Sieć Badawcza Łukasiewicz – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów – PIAP, 2025

Opracowanie wydawnicze, druk i oprawa:



Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji
Wydawnictwo Naukowe
26-600 Radom, ul. K. Pułaskiego 6/10, tel. centr. (48) 364-42-41
e-mail: instytut@itee.lukasiewicz.gov.pl www.itee.lukasiewicz.gov.pl



Szanowni Państwo,

z przyjemnością pragnę przedstawić Państwu pracę, powstałą z inicjatywy Komitetu Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk, Centrum Badawczego Priorytetowego Obszaru Badawczego Sztuczna Inteligencja i Robotyka Politechniki Warszawskiej oraz Sieci Badawczej Łukasiewicz – Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów PIAP. Praca ta, opublikowana przez Sieć Badawczą Łukasiewicz, dotyczy potencjału polskiej nauki w zakresie rozwoju autonomicznych robotów pola walki oraz autonomicznych robotów specjalnego przeznaczenia. Została przygotowana przez grupę wybitnych naukowców reprezentujących wiodące instytucje polskiej nauki. Cieszę się, że jako Sieć Badawcza Łukasiewicz mogliśmy przyczynić się do jej powstania.

Autorzy publikacji koncentrują się na potrzebach sił zbrojnych w zakresie robotów autonomicznych, a także dotychczasowych przykładów ich wykorzystania. Omówienie obejmuje zarówno roboty lądowe, morskie, jak i powietrzne. Jego zasadnicza część przedstawia kluczowe technologie wykorzystywane w autonomicznych robotach pola walki, ich dostępność w Polsce oraz dotychczasowe sukcesy polskiej nauki w rozwoju robotów autonomicznych.

Doświadczenie wojny w Ukrainie jasno dowodzi, że systemy autonomiczne odgrywają kluczowe znaczenie we współczesnym konflikcie zbrojnym. **Analizy NATO wskazują, że rozwój systemów opartych na sztucznej inteligencji będzie jednym z kluczowych trendów technologicznych w obszarze obronności w ciągu najbliższych dwóch dekad.** Armie XXI wieku w coraz większym stopniu stawać się będą armiami opartymi na technologiach cyfrowych, a wymagania w zakresie obsługi nowoczesnych technologii stawiane żołnierzom i oficerom będą rosły. **Odpowiadając na ten trend, Ministerstwo Obrony Narodowej zapowiedziało powołanie wojsk dronowych.**

Niniejsze opracowanie jasno wskazuje, że polska nauka jest w stanie oferować innowacyjne produkty i technologie mogące wzmocnić bezpieczeństwo Polski. Już dziś roboty rozwijane przez Łukasiewicz – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, będący częścią Sieci Badawczej Łukasiewicz, wykorzystywane są przez Siły Zbrojne RP oraz służby mundurowe.

Stworzony w ciągu ostatnich lat potencjał w zakresie rozwoju robotów autonomicznych jest szansą nie tylko na wzmocnienie obronności Polski, ale również polskiego przemysłu zbrojeniowego i polskiej gospodarki. Wojska dronowe mogą być rozwijane w oparciu o polską myśl techniczną. Powstanie nowego sektora przemysłu zbrojeniowego jest szczególnie istotne dla państw, które do tej pory odgrywały ograniczoną rolę w globalnym przemyśle zbrojeniowym. Takim państwem jest Polska, musimy więc tę szansę wykorzystać.

Polska gospodarka osiągnęła już 80% przeciętnego europejskiego PKB per capita. Jej dynamiczny rozwój oraz wynikający z tego wzrost poziomu życia sprawiają, że polska gospodarka wytraca przewagę kosztową. Dla sukcesu polskiej konwergencji konieczny jest rozwój nowych przewag konkurencyjnych, pozwalających na dalszy rozwój krajowych przedsiębiorstw oraz poprawę ich pozycji w międzynarodowych łańcuchach wartości. W najbliższej dekadzie innowacyjność polskiej gospodarki będzie miała kluczowe znaczenie dla kontynuacji polskiego sukcesu gospodarczego i dalszego wzrostu naszego poziomu życia.

Roboty autonomiczne są doskonałym przykładem na to, że wzrost nakładów na obronność oraz proces modernizacji Sił Zbrojnych RP jest szansą na poprawę innowacyjności polskiej gospodarki. Badania naukowe wskazują, że podniesienie wydatków na B+R w obszarze obronności przyczynia się do wzrostu nakładów B+R w pozostałych sektorach gospodarki. Innowacyjne technologie rozwijane w obszarze obronności znajdują zastosowania również w gospodarce cywilnej. Roboty autonomiczne, które posiadają znaczny potencjał zastosowania także w innych sektorach, mają szansę stać się wiodącym przykładem polskich technologii podwójnego zastosowania.

Sieć Badawcza Łukasiewicz od lat prowadzi badania i wdraża technologie związane z autonomicznymi robotami. Co więcej, deklarujemy dalsze wsparcie rozwoju sektora robotów autonomicznych. Pełne wykorzystanie potencjału polskiej nauki w tym obszarze wymaga jednak systemowego podejścia instytucji państwowych, zwłaszcza Ministerstwa Obrony Narodowej. **Cieszę się, że w ostatnim roku istotnie rozwinęliśmy naszą współpracę z MON oraz przemysłem zbrojeniowym.** Wierzę i wiem, że dalszy rozwój tej współpracy pozwoli nam wykorzystać szansę, jaką stwarza potencjał polskiej nauki do budowy ważnych elementów łańcuchów wartości w oparciu o polską myśl technologiczną.

Z wyrazami szacunku

Hubert Cichocki

Prezes Centrum Łukasiewicz



Warszawa, 30 kwietnia 2025 r.

Streszczenie

Praca ta powstała z inicjatywy Komitetu Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk, Centrum Badawczego Priorytetowego Programu Badawczego „Sztuczna Inteligencja i Robotyka” Politechniki Warszawskiej oraz Sieci Badawczej Łukasiewicz – Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów PIAP. Autorzy tego opracowania są afiliowani w Politechnice Warszawskiej, Politechnice Poznańskiej, Politechnice Gdańskiej, Politechnice Wrocławskiej oraz Sieci Badawczej Łukasiewicz – Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP. Tak szerokie grono autorów i instytucji naukowych miało na celu zapewnienie w miarę szerokiego przeglądu technologii i zagadnień związanych z autonomią robotów pola walki.

Obserwacja konfliktów zbrojnych na świecie, a w szczególności w Ukrainie i na Bliskim Wschodzie wskazuje, że autonomiczne roboty zaczynają odgrywać w nich coraz większą rolę. Konsekwencją użycia autonomicznych robotów, korzystających ze sztucznej inteligencji, będzie nie tylko zwiększenie tempa prowadzenia operacji wojskowych, ale także strategii i taktyki związanej z działaniami wojennymi. Żołnierze w coraz mniejszym stopniu będą obsługiwali pojedyncze urządzenia, a w coraz większym systemy składające się z zespołów wielu urządzeń. Oczywiście przeciwnik też będzie dysponował takimi systemami, więc żołnierze będą musieli wiedzieć, jak się przed nimi bronić. Decyzje będą musiały być podejmowane na podstawie coraz większej ilości danych dostarczanych przez czujniki robotów. Dane nie tylko będą musiały być przetwarzane odpowiednio szybko, ale też chronione przed manipulacją. Konflikt w Ukrainie pokazuje, że drony używane na polu walki muszą być stale modyfikowane. Obecnie trwałość innowacji wynosi około miesiąca. Po tym czasie do dronów trzeba wprowadzić zmiany, bo przeciwnik znalazł już sposób obrony przed poprzednią wersją. Oznacza to, że kraj musi dysponować odpowiednim zapleczem badawczo-rozwojowym, by takie modyfikacje wprowadzać w odpowiednim tempie. Importowanie zmodyfikowanych wersji trwałoby zbyt długo.

Celem tego opracowania jest:

- określenie czym są roboty pola walki oraz roboty specjalnego przeznaczenia oraz przedstawienie niezbędnej taksonomii robotów,
- wskazanie, że autonomia nie jest cechą binarną tych urządzeń, ale powinna być stopniowana,
- opisanie jak siły zbrojne różnych krajów określają swoje potrzeby w zakresie autonomii robotów,
- przedstawienie przykładów aktualnie wykorzystywanych na świecie autonomicznych robotów pola walki,
- scharakteryzowanie kluczowych technologii wykorzystywanych w autonomicznych robotach pola walki,
- przeprowadzenie częściowego przeglądu technologii dostępnych w Polsce,
- ukazanie aspektów etycznych i prawnych związanych z użyciem robotów na polu walki.

Na podstawie przeprowadzonej analizy zaproponowano sposób postępowania prowadzący do zaspokojenia potrzeb sił zbrojnych w zakresie tworzenia i użytkowania autonomicznych robotów pola walki. Proponuje się utworzenie

w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP Centrum Zastosowań Sztucznej Inteligencji w Automatyce i Robotyce¹, którego zadaniem byłoby zintegrowanie badań i działalności wdrożeniowej oraz produkcyjnej w zakresie sztucznej inteligencji i robotyki, prowadzonej przez instytucje badawcze, podmioty gospodarcze oraz instytuty przemysłowe. Centrum stanowiłoby miejsce kontaktu dla wszystkich interesariuszy zainteresowanych wyposażeniem Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej w autonomiczne roboty krajowej produkcji. Prowadziłoby projekty skutkujące wdrożeniem w wojsku najnowocześniejszych technologii obronnych. Żołnierze współdziałający z autonomicznymi robotami muszą mieć do nich zaufanie, a więc muszą wiedzieć, jak się będą zachowywały. By tak było muszą posiadać podstawy wiedzy z zakresu technologii wykorzystywanych w takich robotach. Centrum mogłoby pełnić rolę szkoleniową w tym względzie.

Należy podkreślić, że przeprowadzona analiza wykazała, że technologie używane w autonomicznych robotach pola walki są tożsame z technologiami wykorzystywanymi w robotach cywilnego przeznaczenia. Technologie opracowywane dla celów wojskowych jednocześnie mogłyby być zastosowane w urządzeniach powszechnego użytku, co zwiększyłoby innowacyjność produktów naszego przemysłu.

¹ nazwa do dyskusji

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	11
2. Przyjęta klasyfikacja robotów	14
3. Poziomy autonomii	17
3.1. Poziomy autonomii dotyczące robotów wojskowych	18
3.2. Pojazdy autonomiczne	18
3.3. Autonomia robotów pola walki	19
4. Analiza potrzeb sił zbrojnych w zakresie autonomii robotów	22
4.1. Analiza potrzeb amerykańskich sił zbrojnych w zakresie autonomii robotów	22
4.2. Analiza potrzeb EDA	25
4.3. Rosyjska strategia	30
4.4. Analiza potrzeb Wojska Polskiego	31
4.5. Powody niechęci do wdrażania robotów autonomicznych w wojsku	34
4.6. Bariery i środki zaradcze	36
4.6.1. Stany Zjednoczone	36
4.6.2. Australia	36
4.6.3. Zjednoczone Królestwo	37
4.6.4. Chiny	37
4.6.5. Korea Południowa	38
4.6.6. Izrael	38
4.6.7. Singapur	38
4.6.8. Unia Europejska	39
4.6.9. Wnioski	39
5. Przykłady aktualnie wykorzystywanych autonomicznych robotów pola walki	41
5.1. Roboty pływające	41
5.1.1. Izraelskie drony morskie	41
5.1.2. Ukraińskie drony morskie	41
5.1.3. Amerykańskie drony morskie	42
5.1.4. Brytyjskie drony morskie	43
5.1.5. Chińskie drony morskie	43
5.1.6. Polskie drony morskie	43

5.2. Roboty lądowe	44
5.2.1. Roboty na gąsienicach	44
5.2.2. Roboty na kołach	44
5.2.3. Maszyny kroczące	44
5.3. Roboty latające – drony	46
5.3.1. Tureckie drony	46
5.3.2. Izraelskie drony	48
5.3.3. Polskie drony	48
5.3.4. Ukraińskie drony	50
5.3.5. Chińskie drony	50
5.3.6. Rosyjskie drony	50
5.3.7. Węgierskie drony	51
5.3.8. Amerykańskie drony	51
5.3.9. Niemieckie drony	53
5.3.10. Irańskie drony	53
5.3.11. Antydrony	53
5.3.12. Pociski manewrujące	54
5.4. Roboty hybrydowe	55
5.5. Roboty o nietypowych konstrukcjach	56
5.6. Grupy robotów	56
6. Kluczowe technologie wykorzystywane w autonomicznych robotach pola walki	57
6.1. Sztuczna inteligencja	57
6.1.1. Detekcja i rozpoznawanie obiektów	58
6.1.2. Predykcja	59
6.1.3. Celowe działanie	59
6.2. Sterowanie	60
6.2.1. Sterowanie automatyczne	60
6.2.2. Sterowanie predykcyjne	60
6.2.3. Historia i rozwój sterowania predykcyjnego	62
6.2.4. Zastosowania sterowania predykcyjnego	63
6.2.5. Wybrane zastosowania sterowania predykcyjnego w robotyce	64
6.3. Mapy terenu	65
6.3.1. Struktury map terenu	65
6.3.2. Budowa map terenu dla robotów lądowych	66

6.4.	Lokalizacja robotów lądowych w środowiskach o ograniczonym dostępie do nawigacji satelitarnej	68
6.5.	Planowanie ruchu	71
6.6.	Bezpieczne planowanie ruchu w systemach autonomicznej nawigacji	72
6.7.	Analiza pojedynczych obrazów i ich sekwencji	74
6.7.1.	Estymacja pozy sylwetki człowieka	74
6.7.2.	Zastosowania automatycznej estymacji pozy	75
6.7.3.	Analiza akcji i interakcji osób w sekwencji wideo	76
6.8.	Komunikacja człowiek-maszyna w języku naturalnym	76
6.8.1.	Przetwarzanie języka naturalnego	76
6.8.2.	Duże modele językowe – LLM	79
6.8.3.	Automatyczne rozpoznawanie mowy	83
6.8.4.	Narzędzia, biblioteki, zbiory danych i zasoby dla praktyków	85
6.9.	Bezprzewodowe sieci czujników	86
6.9.1.	Projektowanie bezprzewodowych sieci czujników	86
6.9.2.	Rozmieszczanie czujników	87
6.10.	Cyberbezpieczeństwo autonomicznych robotów pola walki	89
6.11.	Fotonika — strategiczna technologia dla systemów bezzałogowych	92
6.11.1.	Fotoniczne technologie sensoryczne	93
6.11.2.	Stabilizatory i żyroskopy optyczne	94
6.11.3.	Komunikacja optyczna	94
6.11.4.	Techniki światłowodowe	95
6.11.5.	Specjalizowane układy fotoniczne do nawigacji robotów	96
6.11.6.	Zasilanie bezprzewodowe	96
6.12.	Dostarczanie energii elektrycznej	97
6.13.	Egzoszkielety	102
7.	Kluczowe technologie dostępne w Polsce	104
7.1.	Doświadczenia Politechniki Poznańskiej (PP)	104
7.1.1.	Nawigacja oparta na systemach wizyjnych	104
7.1.2.	Planowanie ruchu	105
7.1.3.	Metody lokalizacji na podstawie danych z sensora LiDAR	106
7.1.4.	Metoda budowy mapy wysokości terenu	108
7.1.5.	Inne możliwości budowy map dla robotów lądowych	110
7.1.6.	Fuzja danych z użyciem grafów czynnikowych	111
7.1.7.	Metody sterowania ruchem robotów oraz monitoringu środowiska	114

7.1.8. Kampus Kąkolewo Politechniki Poznańskiej – centrum badań nad systemami bezzałogowymi	118
7.2. Doświadczenia Sieci Badawczej Łukasiewicz – Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów PIAP	120
7.3. Doświadczenia Politechniki Warszawskiej (PW)	127
7.3.1. Metodyka projektowania systemów sterowania robotami	127
7.3.2. Algorytmy sterowania predykcyjnego	130
7.3.3. Sterowanie zespołem autonomicznych maszyn koczujących	132
7.3.4. Analiza obrazu i wideo	134
7.3.5. Przetwarzanie sygnału mowy	137
7.3.6. Wyznaczanie pozycji czujników w sieci	138
7.3.7. Cyberbezpieczeństwo	140
7.3.8. Technologie fotoniczne	141
7.3.9. Zasilanie elektryczne	142
7.4. Doświadczenia Politechniki Gdańskiej (PG)	144
7.4.1. Emocje	146
7.4.2. Model psychologii poznawczej	147
7.4.3. Postrzeganie	148
7.4.4. Postrzeganie wrażeń	148
7.4.5. Postrzeganie odkryć	149
7.4.6. Implementacje ISD	150
7.5. Doświadczenia Politechniki Wrocławskiej (PWr)	151
8. Etyka i prawo związane z użyciem robotów pola walki	153
8.1. Etyka robotów	153
8.2. Aspekty prawne	158
9. Proponowane działania	162
10. Podsumowanie	167
Bibliografia	169
Skorowidz	209
Biogramy autorów	215

ROZDZIAŁ 1

Wstęp

Celem tego opracowania jest przedstawienie zagadnień technicznych, organizacyjnych, etycznych i prawnych związanych z projektowaniem, konstruowaniem, wdrażaniem i wykorzystaniem autonomicznych robotów pola walki. Według najlepszej wiedzy autorów tego opracowania jest to pierwsze w Polsce tak całościowe opracowanie dotyczące tych zagadnień. Jest ono szczególnie istotne w kontekście konfliktu toczącego się za wschodnią granicą naszego kraju. Wojna w Ukrainie pokazuje, że w przyszłości w coraz większym stopniu konflikty zbrojne będą rozstrzygane przez broń działającą w dużej mierze autonomicznie. Opracowanie jest skierowane przede wszystkim do decydentów określających sposób rozwoju uzbrojenia Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej. Zapewne zainteresuje ono zarówno wojskowych jak i naukowców zajmujących się uzbrojeniem, a w szczególności robotami autonomicznymi.

W tym opracowaniu autonomia odnosi się do stopnia i zakresu, w jakim system jest zdolny do działania bez nadzoru człowieka. Ściśle powinno się mówić o poziomie lub stopniu autonomii, gdyż nie jest to cecha binarna. Zdolność do autonomicznego funkcjonowania pozwala systemom osiągać zadane im cele nawet w niedeterministycznych i nieustrukturyzowanych środowiskach. Systemy autonomiczne posiadają wiele zalet w stosunku do tych sterowanych bezpośrednio przez ludzkiego operatora:

- systemy autonomiczne, w odróżnieniu od żołnierzy wypełniających te same zadania, nie wymagają ani szkolenia ani treningu,
- koszt utraty urządzenia jest o wiele mniejszy niż koszt utraty człowieka wraz z obsługiwaniem przez niego urządzeniem,
- zmniejszają ryzyko utraty życia przez użytkowników, gdyż zazwyczaj są oni odsunięci od teatru bezpośrednich działań zbrojnych,
- są mniejsze niż urządzenia załogowe, więc trudniej je trafić,
- w ekstremalnych warunkach pogodowych nie trzeba załodze zapewniać komfortowych warunków, co umożliwia albo miniaturyzację urządzenia albo zwiększenie jego możliwości przenoszenia ładunku,
- nie są podatne na błędy związane ze zmęczeniem,
- mogą przetwarzać dane z dużo większej liczby źródeł niż może to robić człowiek,
- do pewnego stopnia są odporne na odchylenia od spodziewanego planu realizacji misji,
- szybciej podejmują decyzje i wykonują zadania,
- zwykle zmniejszają zapotrzebowanie na zdalną komunikację z operatorem,
- jeden operator może nadzorować więcej autonomicznych urządzeń niż tych pozbawionych zdolności do autonomicznego działania,
- interakcja operatora z urządzeniem autonomicznym jest prostsza, ponieważ formułowanie zadania nie musi być szczegółowe,
- ich gotowość do działania przewyższa tę, którą wykazują ludzie,

- nie są podatne na strach, zmęczenie, nudę, odrzę lub inne emocje,
- zazwyczaj wymagają mniejszych umiejętności od operatora.

Korzyści te łączą się jednak ze złożonymi kwestiami prawnymi i etycznymi oraz tworzą wiele wyzwań związanych z projektowaniem, implementacją, testowaniem i produkcją takich systemów. Różnorodność i liczność kwestii technicznych stanowi tu niebagatelny problem. Należy podkreślić, że obecnie nie tylko systemy stosowane przez wojsko są obdarzane autonomią, ale także, a może przede wszystkim, te znajdujące zastosowania cywilne, np. samochody. Technologie wykorzystywane w obu przypadkach są w dużym stopniu tożsame. Trzeba sobie też zdawać sprawę, że sama autonomia nie jest odrębną dyscypliną naukową, ale efektem zastosowania bardzo wielu technologii rodem z różnych dziedzin. Stąd niebagatelną rolę pełni tu wiedza na temat integracji wielu technologii w jedną spójną całość. Autonomiczne urządzenia wymagają odpowiednich metod projektowania, czyli właściwej inżynierii systemowej. Nie cała wiedza i nie wszystkie technologie są aktualnie dostępne, więc potrzebny jest dodatkowy wysiłek badawczy, by ten stan zmienić. Część ze wspomnianej wiedzy i technologii jeszcze nie istnieje, a część zapewne nie jest ujawniona. Ponadto na podkreślenie zasługuje fakt, że wspomniana wiedza jest potrzebna nie tylko by konstruować takie urządzenia, ale również by się skutecznie przed nimi chronić. Ilustracją rosnącego zainteresowania robotami wojskowymi są liczne projekty poświęcone tej tematyce. Szacuje się, że w ponad dziewięćdziesięciu krajach funkcjonują programy wspierające rozwój robotów bojowych, zarówno ofensywnych, jak i defensywnych, ze szczególnym uwzględnieniem dronów [457].

Mimo, że roboty pola walki i te specjalnego przeznaczenia wykorzystują podobne, a niekiedy nawet tożsame technologie, to jednak z uwagi na realizację innych zadań konieczne jest ich rozróżnienie. Roboty pola walki biorą udział w konfliktach zbrojnych. Podstawowym ich zadaniem jest niszczenie sprzętu przeciwnika albo siły żywej, ale mogą też być używane, między innymi, do prowadzenia rozpoznania, zabezpieczenia logistycznego i wsparcia medycznego. Roboty specjalnego przeznaczenia wykorzystywane są przede wszystkim przez takie służby, jak: policję, straż pożarną, straż graniczną, służby lotniskowe lub ratownicze. Zadania tych robotów powinny być wykonywane tak, aby minimalizować potencjalne szkody, w szczególności zadawanie ran. Wiele ich zadań wymaga interakcji z poszkodowanymi ludźmi, co wiąże się z potrzebą wzbogacenia architektur sterujących robotami o mechanizmy zachowań społecznych. Dlatego muszą one wykazywać empatię, odpowiednio reagować na emocje interlokutorów, jednocześnie skutecznie realizując zlecone im zadania.

Niniejsze opracowanie stara się opisać problemy wynikające z obdarzania urządzeń autonomią, naświetlając te problemy z różnych punktów widzenia. Aby uporządkować dyskusję rozdział 2 klasyfikuje roboty według kryteriów istotnych dla zastosowań wojskowych. Rozdział 3 omawia różne podejścia do określania poziomów autonomii. Oba te rozdziały można potraktować jako wprowadzenie w tematykę będącą przedmiotem tego opracowania. Rozdział 4 analizuje potrzeby sił zbrojnych w zakresie autonomii robotów. Koncentruje się na potrzebach armii amerykańskiej, Europejskiej Agencji Obrony oraz Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej, jako najbardziej istotnych z perspektywy Polski. Ponadto wnika

w przyczynie oporu przejawianego przez różne armie świata do obdarzania robotów pola walki autonomią. Przykłady aktualnie wykorzystywanych autonomicznych robotów pola walki przedstawione są w rozdziale 5. Do uporządkowania materiału wykorzystano klasyfikację przedstawioną w rozdziale 2. Materiał zgromadzony w rozdziale 5 opisuje wszystkie kategorie robotów, ale nie omawia wszystkich robotów pola walki dostępnych na świecie – niestety jest ich zbyt wiele. Rozdział 6 zajmuje się kluczowymi technologiami wykorzystywanymi w autonomicznych robotach pola walki. Skoncentrowano się w nim na pokazaniu różnorodności technologii, które muszą być opanowane, aby stworzyć skutecznego robota pola walki. Omówienie to jest w miarę szerokie, ale nie głębokie – stanowi rodzaj wprowadzenia w tematykę. Wiedzę na ten temat można pogłębić korzystając z odnośników do literatury. Rozdział 7 przedstawia niektóre z istotnych dla omawianej tematyki technologii dostępnych w Polsce. W żadnej mierze nie jest to kompletny katalog. Przedstawiono tylko niektóre z wyników badań i to jedynie pięciu polskich instytucji naukowych: Politechniki Poznańskiej, Politechniki Warszawskiej, Politechniki Gdańskiej, Politechniki Wrocławskiej oraz Sieci Łukasiewicz – Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów PIAP. Należy tu jeszcze raz podkreślić, że nie są to jedyne instytucje naukowe zajmujące się autonomią robotów bądź technologiami niezbędnymi do zbudowania takich robotów, a ponadto asortyment badań prowadzonych w tym zakresie w wymienionych instytucjach jest o wiele szerszy. Skonstruowanie autonomicznego robota pola walki nie wyczerpuje związanych z tym problemów. Urządzenia tego typu przeznaczone są do działań destruktywnych w związku z czym należy przy ich konstrukcji i wykorzystaniu uwzględnić zarówno aspekty etyczne jak i prawne. Wprowadzenie w te zagadnienia stanowi rozdział 8. Zarówno badania jak i działalność konstrukcyjna dotycząca robotów pola walki jest w Polsce rozproszona i nieskoordynowana. Rozdział 9 przedstawia propozycję zaradzenia tej sytuacji i wykorzystania synergii działań dla przyspieszenia prac badawczych i wdrożeniowych. Całość przedstawionego materiału podsumowano w rozdziale 10. Opracowanie uzupełniono skrótem, dzięki któremu łatwo można znaleźć odsyłacze do używanych w tekście akronimów i podstawowych pojęć.

ROZDZIAŁ 2

Przyjęta klasyfikacja robotów

Istnieje wiele kryteriów klasyfikacji robotów. Dla potrzeb tego opracowania jedynie niektóre są użyteczne. Z tego punktu widzenia najistotniejszym kryterium jest rodzaj środowiska, w którym działają, a więc mamy do czynienia z robotami:

- pływającymi:
 - podwodnymi (zwane także podwodnymi dronami morskimi),
 - nawodnymi (zwane także nawodnymi dronami morskimi),
- lądowymi,
- latającymi,
 - w powietrzu – drony,
 - w próżni – kosmicznymi (prawdopodobnie międzynarodowe konwencje zabraniają umieszczania broni w przestrzeni kosmicznej, a więc i dronów kosmicznych),
- hybrydowymi, czyli o zdolności do operowania w co najmniej dwóch z powyżej wymienionych środowisk, np. roboty amfibie.

Powyższa dwoistość terminologii wymaga komentarza. Termin „dron” pochodzi z języka angielskiego. Słownik Webstera podaje jako pierwotne znaczenie tego słowa męską pszczołę bez żądła, czyli trutnia. Zapewne bzyczenie tych pszczoł przypominało dźwięk wydawany przez małe jednostki latające. Stąd dronami nazywano roboty latające. Wszakże w literaturze fachowej i ten termin został rozszerzony i słownik Webstera definiuje go jako: „bezzałogowy statek powietrzny lub jednostka wodna sterowana zdalnie lub za pomocą komputerów pokładowych” albo „bezzałogowy wojskowy statek powietrzny lub okręt”. Widać, że termin ten dotyczy zarówno jednostek latających jak i pływających, ale nie lądowych. W tym opracowaniu drony bezprzymiotnikowe to jednostki latające, natomiast te pływające są określane jako drony morskie. Oczywiście można by obyć się bez terminu „dron”, ale wszedł on na tyle głęboko do języka polskiego, że byłaby to walka z wiatrakami. Ponieważ w prasie, w tym w periodykach naukowych, jest stale obecny, uznano że w tym opracowaniu należy zachować go, objaśniając w jakiej jest relacji do ściślej terminologii.

Każda z powyżej wymienionych klas może podlegać dalszej dekompozycji ze względu na różne kryteria, np. dla robotów lądowych istotnym kryterium jest typ lokomocji:

- kołowa,
- gąsienicowa,
- nożna (pedipulacja),
- ręczna (brachiacja)
- etc.

Wśród technologii kluczowych dla robotów pola walki istotne są rozwiązania dotyczące:

- mechanizmów,
- napędów,
- zasilania,
- łączności,
- nawigacji (w szczególności bez GPS),
- podejmowania decyzji,
- sposobu formułowania zadania,
- percepcji, a w tym czujników,
- ochrony własnej (np. cyberbezpieczeństwo),
- uzbrojenia,
- interoperacyjności (komunikacji i współdziałania pomiędzy robotami różnych rodzajów i ich użytkownikami).

Ponadto warto rozróżnić systemy wielorobotowe koordynowane oraz roje (bez koordynatora): systemy koordynowane (koordynator może być autonomiczny, bądź może nim być operator) oraz roje. Systemy koordynowane wymagają, by między jednostką nadrzędną a indywidualnymi robotami istniała komunikacja, natomiast członkowie roju mogą działać bez niej – zazwyczaj korzystają ze stygmergii. Stygmergia [52] to porozumiewanie się poprzez zostawianie śladów w środowisku, tak jak to czynią np. mrówki zostawiając ślady feromonowe. Utrata kilku członków roju zazwyczaj degradowe jakość wykonania zadania, ale go nie uniemożliwia. W systemach koordynowanych unicestwienie koordynatora unicestwia cały system. Niestety zdefiniowanie zadania dla roju poprzez określenie działania poszczególnych jego członków jest niezmiernie trudne – zadanie systemu jest cechą emergentną. Emergencja, czyli wyłanianie się nowych cech w systemie, ponad te właściwe dla jego części składowych, jest dość powszechne. Przykładowo, szkoła zbudowana z cegieł, ma tę cechę, że można w niej uczyć dzieci, ale żadna z cegieł nie ma w sobie zaszytej ani tej funkcji ani jej części. Zdolność budynku do prowadzenia w nim zajęć szkolnych wynika z relacji między cegłami – zostały one ze sobą powiązane cementem według planu architektonicznego, którego realizacja stworzyła budynek szkolny. Wszakże ten plan architektoniczny powstał w głowie architekta. W przypadku konstrukcji termitier taki architekt nie istnieje, a termyty tworzą na sawannie budowle, które są tak doskonałe wentylowane, że w dzień zapobiegają usmażeniu owadów, natomiast w nocy ich przechłodzeniu. Prowadzone są badania nad stworzeniem takich robotów-termitów, które byłyby w stanie np. zbudować most przez rzekę, bez z góry dostarczonego planu budowy. Pewnym ułatwieniem w rozwiązaniu tego problemu jest wprowadzenie do systemów sterowania robotów wchodzących w skład roju powszechnych reguł postępowania [124]. Przykładem są kierowcy przestrzegający reguł zawartych w kodeksie drogowym, co umożliwia bezkolizyjne uczestniczenie w ruchu. Natomiast w przypadku systemów koordynowanych stosuje się dobrze znane mechanizmy dekompozycji zadania, co nie rodzi problemów w jego sformułowaniu.

Niezależnie od tego, czy grupa robotów jest koordynowana czy działa jako rój, może być jednorodna (homogeniczna) lub niejednorodna (heterogeniczna).

W tym pierwszym przypadku składa się z robotów tego samego typu, podczas w tym drugim przypadku członkami grupy są roboty różnego typu. Należy się spodziewać, że na polu walki częściej będą tworzone grupy heterogeniczne. Przykładowo roboty latające będą dostarczać informacji na temat celów, a roboty nawodne lub lądowe będą te cele niszczyć.

Powyższe kryteria klasyfikacji robotów dotyczą przede wszystkim środowiska, w którym one działają, oraz ich konstrukcji. Powszechnie rozróżnia się roboty ze względu na rodzaj zadań, które wykonują, np. przemysłowe, medyczne, usługowe, rolnicze. Z punktu widzenia tego opracowania istotne jest wyróżnienie robotów pola walki oraz tych, które wykorzystywane są przez służby specjalne, np. ratownicze, policję, straż pożarną. Odróżnienie tych dwóch kategorii jest istotne, gdyż te pierwsze uczestniczą w konfliktach zbrojnych, natomiast te drugie nie. Konflikty zbrojne powodują intencjonalne straty ludzkie, natomiast działania służb specjalnych dążą do maksymalnego ograniczenia liczby ofiar. Wszakże należy zaznaczyć, że autonomiczne roboty o przeznaczeniu wojskowym, nawet w trakcie wojny, mogą stanąć wobec konieczności wzięcia jeńców lub mogą napotkać cywilów bądź rannych niezaangażowanych w działania na polu walki. Wtedy ich działania stają się pokrewne tym prowadzonym przez np. służby ratownicze. Obie wymienione tu kategorie autonomicznych robotów muszą przestrzegać prawa i zachowywać się etycznie. Oznacza to, że muszą przewidywać intencje ludzi, ich emocje, i reagować adekwatnie do powstałej sytuacji.

ROZDZIAŁ 3

Poziomy autonomii

Obecnie powszechnie dąży się do tego, aby roboty realizowały swoje zadania autonomicznie, a więc bez pomocy człowieka. Rozróżnić można dwa typy autonomii: energetyczną i decyzyjną. Pierwszy typ określa, czy źródło zasilania robota w energię znajduje się na jego pokładzie, czy nie. Drugi wskazuje, czy uczestnictwo człowieka jest potrzebne podczas realizacji zadania. W tym przypadku należy raczej mówić o stopniu lub poziomie autonomii, w zależności od istotności wpływu operatora na czynności proste. Możemy tu mieć do czynienia z urządzeniami teleoperowanymi, gdy człowiek jest odpowiedzialny za sterowanie ruchem urządzenia, lub o dużym stopniu autonomii, gdy całe zadanie jest realizowane bez udziału operatora. Zarówno robot chirurgiczny da Vinci [50], jak i łazik marsjański Sojourner [91] są urządzeniami teleoperowanymi. W przypadku w pełni autonomicznych urządzeń operujących w złożonym lub zmiennym środowisku, zdolności operatora muszą zostać zastąpione szeroko pojętą sztuczną inteligencją, zaś projektant systemu decyduje w jakim stopniu urządzenie będzie autonomiczne. Przy podejmowaniu tej decyzji poza przesłankami prawnymi, etycznymi, technicznymi i społecznymi bierze się pod uwagę [495]:

- zakres decyzji przekazywanych maszynie,
- sposób interakcji człowieka z maszyną,
- rodzaj środowiska, w którym ma działać maszyna,
- stopień ryzyka ponoszonego w przypadku podjęcia przez maszynę błędnej decyzji,
- korzyści płynące z uczynienia niektórych funkcji autonomicznymi (np. zwiększenie precyzji i szybkości działania, czy zmniejszenie ryzyka dla personelu),
- czy urządzenie ma być zdolne do działania w różnorodnych warunkach, czy ma być zoptymalizowane dla konkretnych warunków,
- gdzie mają być podejmowane decyzje czyniące urządzenie autonomicznym – na jego pokładzie, czy gdzieś zdalnie; tj. jak mają być rozlokowane zasoby obliczeniowe.

Wprawdzie istnieją dokumenty dotyczące robotów o przeznaczeniu wojskowym, które próbują określać poziomy autonomii [527], ale podane tam definicje są nader ogólnikowe. W tym opracowaniu odniesiemy się do nich i podejmiemy próbę podania definicji bardziej precyzyjnych, sformułowanych na podstawie tych, które wykorzystywane są przez przemysł motoryzacyjny [284]. Analiza literatury dotyczącej robotów pola walki pokazuje, że zarówno opracowania zbiorcze, jak i informacje pochodzące od producentów robotów nie odnoszą się bezpośrednio do autonomii działania tych urządzeń. Prawdopodobnie jest to związane z tym, że obecnie większość z tych robotów ma jeszcze niski, niezadowalający poziom autonomii. Niemniej jednak, mówiąc o autonomii, warto korzystać ze stopniowania autonomiczności, aby dyskusja była jednoznaczna.

3.1. Poziomy autonomii dotyczące robotów wojskowych

Armia australijska również przyjęła, że autonomia działania urządzenia nie jest cechą binarną [527], ale obejmuje cztery poziomy:

- zdalnego sterowania,
- działania automatycznego, w przypadku gdy człowiek tylko monitoruje działanie robota i interweniuje w razie konieczności,
- częściowej autonomiczności, kiedy człowiek określa zadanie do wykonania, a następnie nadzoruje system, pozostając elementem decyzyjnym,
- integralnej autonomiczności, gdy operator jedynie zleca wykonanie zadania, ale system potem wykonuje je już samodzielnie.

W dokumencie [498], stworzonym na potrzeby Europejskiej Agencji Obrony (European Defence Agency – EDA), wyróżniono jedynie trzy poziomy autonomii bezzałogowych pojazdów lądowych (BPL):

- zdalnie sterowany – BPL reaguje na polecenia operatora dotyczące napędów; operator jest odpowiedzialny za podejmowanie wszystkich decyzji,
- półautonomiczny – BPL jest w stanie samodzielnie podejmować pewne decyzje i działania z nich wynikające. Złożone decyzje są zwykle podejmowane przez operatora. Częściowa autonomia może obejmować ograniczenie alternatywnych działań do kilku, z których operator wybierze jedno z zasugerowanych działań,
- w pełni autonomiczny – BPL decyduje o wszystkim i działa bez ingerencji człowieka. W takim przypadku może być konieczne sporadyczna interakcja z operatorem, który ogólnie określi cel misji i ewentualnie zatwierdzi plan jej realizacji.

3.2. Pojazdy autonomiczne

Istniejąca klasyfikacja stopnia autonomii w pojazdach drogowych jest znacznie bardziej rozbudowana, a więc warta przedyskutowania. Międzynarodowe stowarzyszenie SAE (Society of Automotive Engineers), zajmujące się między innymi standaryzacją, zdefiniowało sześć poziomów autonomii samochodów, traktując je jak roboty mobilne. Poziomy autonomii pojazdów ponumerowano od 0 do 5 [284].

- Samochody przypisane poziomowi 0 są pod pełną kontrolą kierowcy i co najwyżej informują go o niebezpieczeństwie.
- Na poziomie 1 człowiek i system sterowania współkierują pojazdem, np. kierownicą zawiaduje człowiek, a prędkość regulowana jest przez automat.
- Na poziomie 2 system sterowania w pełni kieruje pojazdem, ale człowiek stale musi czuwać nad sytuacją panującą na drodze i natychmiast przejąć sterowanie, o ile zauważy, że dzieje się coś niepokojącego.
- Poziom 3 autonomii zezwala kierowcy odwrócić uwagę od sytuacji na drodze, bo w tym przypadku to samochód jest odpowiedzialny za wykrywanie sytuacji niepokojących i wezwania kierowcy, by przejął kontrolę nad po-

jazdem. Ten poziom autonomii umożliwia automatyczne kierowanie w korku lub na autostradzie.

- Na poziomie 4, gdy spełnione są odpowiednie warunki drogowe, udział człowieka w kierowaniu nie jest wymagany, więc może się on zająć dowolną inną aktywnością. Samochód może wezwać kierowcę do interwencji, wszakże jeżeli ten nie zareaguje, to pojazd może uruchomić procedurę parkowania. Taka sytuacja może powstać, np. gdy warunki pogodowe zmieniają się drastycznie.
- Pojazdy sklasyfikowane na poziomie 5 nie wymagają uczestnictwa kierowcy w sterowaniu pojazdem niezależnie od warunków drogowych.

Wyższe poziomy autonomii są obecnie przedmiotem badań. IEEE pracuje nad standardem dotyczącym bezpieczeństwa pojazdów autonomicznych (P2846 Draft Standard for Assumptions for Models in Safety-Related Automated Vehicle Behavior). Zarys standardu P2846 określa zbiór założeń dla dających się przewidzieć scenariuszy, które należy brać pod uwagę przy tworzeniu modeli związanych z bezpieczeństwem pojazdów sterowanych automatycznie. Standard jest tworzony, aby wszystkie firmy produkujące autonomiczne samochody, niezależnie od użytych technologii, tak samo interpretowały bezpieczne zachowanie pojazdu na drodze. Z punktu widzenia konsumentów standard wprowadza jednoznaczność. Kupujący nie będzie musiał zastanawiać się, który samochód wybrać z punktu widzenia reguł bezpieczeństwa.

3.3. Autonomia robotów pola walki

Autonomia pojazdów dotyczy oczywiście ich zachowania na drodze. Innymi słowy, funkcją autonomii w tym przypadku jest wpływ na prowadzenie pojazdu, a w konsekwencji ułatwienie jazdy oraz zwiększenie bezpieczeństwa transportu. W przypadku robotów bojowych autonomia może wiązać się z dwoma aspektami ich działania:

- nawigowania robotem,
- realizacji zadania bojowego.

Przy czym, zadanie bojowe może dotyczyć:

- rozpoznania sytuacji na polu walki,
- wskazania celów,
- monitorowania terenów podatnych na sabotaż,
- rozminowywania,
- likwidacji zagrożenia, a w szczególności zniszczenia umocnień, sprzętu lub siły żywej przeciwnika,
- pilnowania granic państwa, przejazdów kolejowych, mostów etc. np. przez monitorowanie podejrzenie regularnego pojawiania się osób blisko nich,
- etc.

W zakresie nawigacji klasyfikacja robotów bojowych może być tożsama z klasyfikacją autonomii pojazdów:

- Roboty przypisane poziomowi 0 są pod pełną kontrolą operatora, który steruje napędami urządzenia.
- Roboty przypisane poziomowi 1 kierowane są wspólnie przez operatora i system sterowania, np. operator wskazuje cel i prędkość ruchu, a system sterowania powoduje przelot do tego celu z zadaną prędkością.
- Na poziomie 2 system sterowania w pełni nawiguje robotem (w szczególności omija przeszkody zarówno ruchome, jak i nieruchome), ale operator musi czuwać nad ruchem i natychmiast przejmować sterowanie, o ile zauważy, że dzieje się coś niepokojącego.
- Na poziomie 3 operator może odwrócić uwagę od sposobu manewrowania, gdyż w tym przypadku to robot jest odpowiedzialny za wykrywanie sytuacji niepokojących i wezwania operatora do przejęcia kontroli nad robotem.
- Na poziomie 4, gdy spełnione są odpowiednie warunki w otoczeniu robota, udział operatora w sterowaniu nie jest wymagany; może on zatem zająć się dowolną inną aktywnością. Robot może wezwać operatora do interwencji, ale jeżeli ten nie zareaguje, to robot może się zatrzymać, powrócić do bazy lub dokonać samodestrukcji. Taka sytuacja może powstać, gdy warunki pogodowe zmieniają się drastycznie albo zostanie wykryte, że robot może zostać zniszczony bądź przechwycony przez wroga.
- Roboty sklasyfikowane na poziomie 5 nie wymagają uczestnictwa operatora w sterowaniu niezależnie od warunków, w jakich robot operuje.

Z punktu widzenia realizacji zadań bojowych klasyfikacja robotów może być następująca:

- Na poziomie 0 za realizację zadania odpowiedzialny jest żołnierz – mamy tu do czynienia z teleoperacją.
- Na poziomie 1 operator wyznacza szczegółowe cele proste, a system sterowania realizuje je (np. dla drona mogą to być: startuj, wznies się na wysokość 100 m, leć na północ z prędkością 80 km/h, znajdź czerwony samochód, śledź czerwony samochód etc.).
- Na poziomie 2 operator wskazuje cel ogólny (np. znajdź i śledź czerwony samochód), a robot ten cel realizuje, wszakże operator nadzoruje wykonanie zadania i albo przerywa misję albo udziela dodatkowych instrukcji (np. śledzenie dotyczy czerwonego samochodu osobowego, a nie czerwonej ciężarówki). Misja realizowana jest w sprzyjających warunkach, np. pogodowych i terenowych.
- Na poziomie 3 operator formułuje zadanie w podobny sposób, jak na poziomie 2, ale w tym przypadku robot powinien go przywołać, jeżeli uzna, że realizacja zadania nie przebiega właściwie (na poziomie 2, to operator wykrywa nieprawidłowość, a na poziomie 3 robi to robot). Misja realizowana jest w sprzyjających warunkach pogodowych i terenowych.
- Na poziomie 4 operator formułuje zadania w sposób ogólny, zaś robot je wykonuje. Misja może być realizowana w niesprzyjających warunkach pogodowych lub terenowych. Jeżeli robot zdecyduje, że nie jest w stanie wykonać zadania, wzywa operatora. Jeżeli operator nie zareaguje, robot wraca do bazy albo dokonuje samodestrukcji.

- Na poziomie 5 operator również formułuje zadania w sposób ogólny, a robot w pełni autonomicznie je realizuje. Nie przewiduje się tu ingerencji operatora. Robot ma taką inteligencję wspartą wbudowanymi zasadami etycznego postępowania, że potrafi podejmować właściwe decyzje niezależnie od panujących warunków.

Jak widać, w tej klasyfikacji istotną rolę odgrywa sposób sformułowania zadania, co wymaga odniesienia się do ontologii [559], która leży u podstaw sposobu określania celu działania robota. Zatem i sama klasyfikacja silnie zależy od poziomu ontologicznego wyrażania zadania. Im ten poziom jest wyższy tym inteligencja robota musi być wyższa, tj. baza wiedzy musi być większa i sposób wnioskowania bardziej zaawansowany. Aktualnie roboty poziomu 5 należy uznać za science fiction. Pytanie, czy należy dążyć do tworzenia robotów tego poziomu jest ciągle zasadne.

Celowo obie klasyfikacje są zbliżone do siebie. W przyszłości, jeżeli uznamy za celowe, można je sprowadzić do wspólnej klasyfikacji. Wszakże chwilowo wydaje się, że bezpieczniej jest oddzielić nawigację od realizacji zadania. Nawigacja jest neutralna etycznie, natomiast realizacja zadania już niekoniecznie (np. unicestwienie przeciwnika).

Powyższa klasyfikacja dotyczy pojedynczego robota, natomiast prawdopodobne jest, że wojsko będzie operować zgrupowaniami robotów. Dla grup, w których operator pełni rolę koordynatora, powyższa klasyfikacja jest właściwa. Natomiast dla rojów [559], które z definicji działają bez koordynatora, wstępnie należy przyjąć, że ich zadania formułowane są na wyższych poziomach klasyfikacji, a stawiane im wymagania dotyczą każdego z osobników roju indywidualnie. Systemy wielorobotowe są bardziej odporne na zniszczenie przez przeciwnika części robotów. Rój po utracie części osobników nadal realizuje swoje zadania, co najwyżej mniej efektywnie.

Ponadto autonomia robota musi być rozpatrywana w kontekście współdziałania z człowiekiem. Niższe poziomy wymagają szczegółowych instrukcji, natomiast przy wyższych robot musi poradzić sobie z bardzo ogólnymi instrukcjami. Operator, aby móc ingerować w realizację misji, musi mieć nie tylko wiedzę o aktualnym stanie robota, ale również musi być w stanie przewidzieć, co robot będzie robił w przyszłości. Aby to było możliwe, operator musi mieć głęboką wiedzę o sposobie działania robota. To zaś będzie wymagało odpowiednich kwalifikacji, wiążących się z odpowiednim szkoleniem.

ROZDZIAŁ 4

Analiza potrzeb sił zbrojnych w zakresie autonomii robotów

4.1. Analiza potrzeb amerykańskich sił zbrojnych w zakresie autonomii robotów

Departament Obrony Stanów Zjednoczonych opracował plan działania na lata 2013-2038 dotyczący systemów bezzałogowych [103]. Wprawdzie w 2013 roku Departament Obrony prognozował zmniejszenie budżetu w 2014 roku na wydatki związane z systemami bezzałogowymi, ale nadal uważał ich rozwój za bardzo istotny i w związku z tym sugerował intensywne prace nad tym zagadnieniem, przy jednoczesnym zwróceniu uwagi na możliwe oszczędności w tym procesie. Dokument wskazuje, że akceptacja tego typu systemów przez wojsko zależy od:

- bardziej efektywnego zapewnienia zdolności bojowych dzięki takim atrybutom jak: modularność, interoperacyjność, integracja z systemami załogowymi i wykorzystanie zaawansowanych technologii,
- zwiększenia efektywności ich działania dzięki wzrostowi stopnia automatyzacji, powiększeniu wydajności oraz elastyczności wykorzystania ich możliwości,
- wzrostu zdolności do przetrwania w trudnych warunkach dzięki ulepszonej i odpornej komunikacji, zwiększonemu bezpieczeństwu dzięki uodpornieniu na majstrowanie przy systemie przez osoby nieupoważnione, co można uzyskać przez odpowiednie projektowanie,
- zdolności systemów bezzałogowych do działania w bardziej złożonych środowiskach, biorąc pod uwagę różnorodność pogody i terenu oraz dużą odległość do miejsc wykonywania operacji, przy jednoczesnym zapewnieniu szeroko zakrojonej koordynacji z wojskiem własnym oraz sojusznikami,
- zmniejszenie zapotrzebowania na siłę roboczą w zakresie obsługi i utrzymania systemów bezzałogowych.

Obecnie sytuacja zmieniła się radykalnie, jeżeli chodzi o zasoby techniczne i finansowe związane z badaniami nad autonomią, natomiast powyższe wytyczne merytoryczne pozostały w mocy, a nawet zwiększyły swoją istotność. W szczególności wzrosły wymagania dotyczące bezpieczeństwa użytkowania systemów bezzałogowych, a ponadto pojawiły się potrzeby obrony przed systemami bezzałogowymi (Uncrewed Systems – UxS) [102]. Od tych systemów wymaga się zaawansowanej autonomii i wykorzystania najnowszych zdobyczy w zakresie sztucznej inteligencji [48]. Zwrócono uwagę, że niebezpieczeństwo związane jest nie tylko z systemami latającymi, ale również z tymi działającymi na lądzie i akwenach. W szczególności poszukiwane są technologie, które będą zdolne do:

- przeciwdziałania skutecznemu funkcjonowaniu autonomicznego roju składającego się z bezzałogowych systemów poprzez wpływanie na zdolność

poszczególnych UxS do wykrywania, przykładowo: wabików oraz kamuflażu, a w szczególności zaburzania ich wizji,

- utrudniania nawigacji UxS poprzez pasywne i aktywne czynniki, np. bariery lub sztucznie zmodyfikowany teren,
- zapobiegania lub szybkiego odzyskiwania sprawności po fizycznych i elektronicznych uderzeniach na UxS, poprzez wykonanie własnych ataków: kinetycznych, ukierunkowaną energią lub na środki komunikacji, w celu pokonania pojedynczej lub wielu platform UxS w krótkim odstępie czasu bez wyczerpywania własnych możliwości defensywnych.

Widać zatem, że nie tylko systemy przeznaczone do ataku, ale również te do obrony są przedmiotem zainteresowania najlepiej wyposażonej armii świata. Zapewnienie autonomii działania jest tylko jednym aspektem problemu, a obrona przed takimi systemami jest niemniej ważna. Poza zapewnieniem wymienionych zdolności istotne są również możliwości oceny skuteczności proponowanych podejść. Przedmiotem szczególnej troski są systemy uczące się. Jeżeli uczenie ma zachodzić w trakcie wykonywania misji, to jaką pewność można mieć, że to czego nauczy się maszyna jest zachowaniem bezpiecznym? Kiedy i w jaki sposób ma być zweryfikowane bezpieczeństwo takiego systemu? Aby odpowiedzieć na pytania tego typu, trzeba prowadzić badania nad sposobami konstruowania robotów autonomicznych. Jedynie głęboka wiedza na ten temat umożliwi opracowanie środków zaradczych.

Departament Obrony wydał również dyrektywę dotyczącą bezpieczeństwa przy korzystaniu z takich urządzeń [367]. Mówi ona, że należy minimalizować prawdopodobieństwo i konsekwencje awarii autonomicznych systemów uzbrojenia, aby uniknąć niezamierzonych starć. Podkreśla, że takie systemy muszą być projektowane w taki sposób, aby umożliwić dowódcom i operatorom dokonywanie odpowiednich ocen związanych z użyciem siły. W związku z tym interfejs z operatorem musi być przejrzysty, stan urządzenia właściwie przekazywany operatorowi, a w szczególności jasno musi być określone, jakie operacje system wykona. Ogólnie zakłada się, że urządzenie ma operować autonomicznie, ale ma być nadzorowane przez człowieka. Na podstawie przekazywanych danych operator powinien być świadomy, jakie czynności są podejmowane i dlaczego. W szczególności dotyczy to wykorzystania sztucznej inteligencji i wyjaśniania podejmowanych przez nią decyzji. Urządzenia muszą być też odporne na próby przejęcia kontroli nad nimi przez wroga. W związku z tym systemy takie muszą podlegać skrupulatnej weryfikacji i walidacji w realistycznych warunkach działania, wliczając w to nieprzyjazne działania wroga.

Departament Obrony Stanów Zjednoczonych ogłosił w sierpniu 2023 roku, że w ciągu dwóch lat dostarczy wielozadaniowe systemy autonomiczne, w których utrata części osobników jest dopuszczalna (all-domain attritable autonomous systems – ADA2)¹. Ma to być odpowiedź na potrzeby przyszłego pola walki, gdy przeciwnik będzie dysponował olbrzymimi liczbami załogowych i bezzałogowych

¹ <https://www.diu.mil/replicator>

urządzeń². Program ma zapewnić współpracę sektora komercyjnego z publicznym przy tworzeniu systemów broni autonomicznych, które można wytwarzać bardzo szybko. Początkowo skoncentrowano się na trzech typach systemów: bezzałogowych systemach lądowych (uncrewed surface vehicles – USV), bezzałogowych systemach latających (uncrewed aerial systems – UAS) oraz systemach przeciwdziałających bezzałogowym robotom latającym (counter-uncrewed aerial systems – c-UAS).

Dotychczasowe działania amerykańskich sił zbrojnych dotyczące sprzętu bezzałogowego zostały uznane za niewystarczające [345]. Wskazano, że przewagi w przyszłych wojnach nie zdobędzie ten, kto zgromadzi więcej żołnierzy, będzie miał lepsze samoloty, czołgi i okręty, ale ten, kto będzie dysponował większą liczbą systemów autonomicznych działających pod nadzorem sztucznej inteligencji. Do tej konkluzji autorzy artykułu [345] doszli analizując współczesne konflikty zbrojne. Ukraińskie drony morskie wygoniły rosyjską flotę czarnomorską z Morza Czarnego [88]. Obie strony tego konfliktu intensywnie wykorzystują drony latające, z druzgocącym skutkiem dla infrastruktury. W Myanmarze i Sudanie powstańcy używają dronów w atakach na wojska rządowe. Podobnie czynią Huti w Jemenie, którzy blokują ruch morski na Morzu Czerwonym. Azerbejdżan dzięki tureckim i izraelskim dronom przejął kontrolę nad enklawą Nagorno-Karabach. Izraelskie siły zbrojne używają tysięcy dronów w Strefie Gazy. Rosja i Chiny szybko rozbudowują swój potencjał w tym zakresie. Chiny zdominowały globalny rynek dronów komercyjnych. Chińska firma DJI ma 70% udział w sprzedaży tych urządzeń. Chińskie siły zbrojne wdrożyły program o nazwie „wielodzielnicowe precyzyjne działania wojenne”, którego celem jest użycie zaawansowanych metod zbierania danych oraz pojawiających się nowych technologii do koordynowania siły ognia. W połączeniu z rakietami hipersonicznymi mogą one odegrać istotną rolę w niszczeniu amerykańskich lotniskowców.

Wprawdzie dotychczas koncentrowano wysiłki na tworzeniu dronów latających i morskich, ale przewiduje się, że rola robotów lądowych znacznie wzrośnie [345]. Rosjanie dysponują robotami lądowymi uzbrojonymi w rakiety przeciwczołgowe, miotacze granatów oraz wyrzutnie dronów. Ukraińcy wykorzystywali roboty do ewakuacji rannych oraz rozminowywania. W przyszłości atak piechoty będzie poprzedzany rozpoznaniem bojem wykonanym przez roboty. Roboty będą szukały odcinków frontu łatwych do penetracji i rozminowywały podejścia do wroga. Szczególnie będą przydatne do patrolowania długich linii frontu. Wcześniejsze konflikty rozgrywały się głównie na terenach rzadko zaludnionych. Obecnie należy przygotować się do walki miejskiej, gdzie gęstość zaludnienia jest wysoka, np. Strefa Gazy czy Liban południowy. Roboty mogą zmniejszyć straty wśród ludności cywilnej. Roje dronów latających oraz robotów lądowych mogą dostarczyć akuratannej informacji na temat rozlokowania przeciwnika.

Roboty są względnie tanie, więc można je wytwarzać w olbrzymich ilościach. Dron MQ-9 Reaper kosztuje jedną czwartą tego, co myśliwiec F-35, a jest to jeden z bardziej kosztownych robotów latających. Dużo tańsze drony są wykorzy-

² <https://www.armscontrol.org/act/2023-10/news/pentagon-plans-mass-autonomous-weapons-deployment>

stywane w Ukrainie do osaczania i niszczenia rosyjskich czołgów. Czołg za 10 milionów \$ może być zniszczony przez drona kamikaze za 500 \$. Dwie trzecie rosyjskich czołgów w Ukrainie została tak zniszczona. Obrona przed zmasowanym atakiem roju dronów jest bardzo trudna. Irański atak dronami na Izrael w kwietniu 2024 r. kosztował 100 milionów \$, natomiast obrona przed nim kosztowała 2 miliardy \$.

W [345] zwrócono też uwagę na sposób zawierania kontraktów na uzbrojenie w USA. Większość umów jest zawieranych z tradycyjnymi dużymi firmami (Lockheed Martin, RTX, General Dynamics, Boeing, Northrop), natomiast mniejsze firmy, bardziej innowacyjne niż te wielkie, miały trudności z pozyskiwaniem zamówień.

4.2. Analiza potrzeb EDA

EDA (European Defence Agency) opracowała plan działań w zakresie systemów autonomicznych (Action Plan on Autonomous Systems – APAS)³ [122]. Celem APAS jest wspieranie państw członkowskich w przyspieszeniu rozwoju systemów o wysokim stopniu autonomii, w celu uzyskania skutecznych, wydajnych i niezawodnych robotów autonomicznych, służących operacjom lądowym, powietrznym i morskimi. Celem jest uzyskanie bezzałogowych platform wykonujących działania wspierające realizację zadań przydzielanych zwykle urządzeniom załogowym i żołnierzom.

Ponadto powołano ASCI (Autonomous Systems Community of Interest)⁴, czyli grupę rządowych i pozarządowych ekspertów, których zadaniem jest wsparcie państw członkowskich w przyspieszaniu rozwoju skutecznych, wydajnych i niezawodnych systemów autonomicznych. Plan został zatwierdzony w styczniu 2024 r. Obejmując lata 2023-2039, ma on na celu wspieranie państw członkowskich Unii Europejskiej w rozwoju systemów autonomicznych do operacji lądowych, powietrznymi, morskimi i mieszanych. Plan ten sugeruje osiągnięcie TRL 2-4 (Technology Readiness Level) do roku 2024, a więc skorzystanie ze wstępnie już opracowanych technologii. W latach 2030-2031 ma być osiągnięty poziom TRL 5-6. Zaś do 2035 ma być osiągnięty poziom TRL 9, a następnie do 2039 roku przemysł ma wytworzyć autonomiczne uzbrojenie, tak aby umożliwić jego wdrażanie w wojsku. Wyróżniono następujące obszary badań dotyczących robotów autonomicznych: percepcja (czujniki), podejmowanie decyzji, współpraca (praca zespołowa), poruszanie się, działanie, samoochrona, samonadzór, samonaprawa. Wskazano nate technologie, których brak albo które są niedostatecznie rozwinięte, więc w konsekwencji tworzą luki w możliwości skonstruowania w pełni operacyjnych systemów autonomicznych. Jako działania pomocnicze wyróżniono opracowanie zaleceń do działań w zakresie: weryfikacji i walidacji systemów, ich certyfikacji, ram prawnych i etycznych oraz finansowych. Podstawowymi celami EDA są:

³ https://www.linkedin.com/posts/european-defence-agency_eda-asci-land-activity-7213911401667399680-UDb-

⁴ [https://eda.europa.eu/news-and-events/events/2024/11/13/default-calendar/1st-autonomous-systems-community-of-interest-\(asci\)-conference](https://eda.europa.eu/news-and-events/events/2024/11/13/default-calendar/1st-autonomous-systems-community-of-interest-(asci)-conference)

- Zwiększenie efektywności działania poszczególnych systemów bezzałogowych,
- Rozwój i rozszerzenie możliwości systemów autonomicznych do współpracy ze sobą nawzajem oraz z systemami załogowymi.

Aby osiągnąć powyższe cele proponuje się:

- Odkrywanie, rozwijanie i integrowanie technologii w celu zwiększenia zdolności systemów autonomicznych do czucia, decydowania, poruszania się, działania, pracy zespołowej, samoobrony i samokontroli,
- Udoskonalanie technologii wspomagających, takich jak: sztuczna inteligencja, infrastruktura sieciowa (dająca możliwość przesyłania danych, ich przechowywania i udostępniania oraz wykorzystywania w różnych procesach i celach) oraz modułowa i otwarta architektura systemowa – aby zapewnić interoperacyjność, opłacalność ekonomiczną i kompatybilności ze starszym sprzętem,
- Pokonywanie wyzwań nietechnologicznych mających wpływ na technologię, takich jak testowanie, walidacja i weryfikacja, certyfikacja, taksonomia (dzięki której ułatwione będzie wspólne rozumienie poszczególnych terminów), prawo, etyka, standaryzacja i rozwój nowych koncepcji,
- Wdrożenie zwinnej metodyki implementacji w celu szybkiego uzyskania innowacji przyrostowych,
- Zwiększenie spójności i synchronizacji między działaniami w zakresie systemów autonomicznych między EDA, a działaniami: Europejskiego Funduszu Obronnego (European Defence Fund – EDF), Preparatory Action on Defence Research (PADR), European Defence Industrial Development Programme (EDIDP), Permanent Structured Cooperation (PESCO), odpowiednimi instytucjami European Defence Technology and Industrial Base (ED-TIB) oraz innymi właściwych podmiotów UE i działaniami NATO.

Zwrócono uwagę, że autonomia poszczególnych rodzajów systemów bezzałogowych jest na różnym poziomie rozwoju. O ile autonomia robotów latających jest względnie dobrze poznana, to autonomia robotów nawodnych i podwodnych jest nieco mniej rozwinięta, natomiast robotów lądowych jest najgorzej zbadana. Stąd różne są oczekiwania w stosunku do tempa rozwoju autonomii działania dla poszczególnych kategorii robotów.

Postanowiono stworzyć EUPAS (Europejską Platformę dla Autonomicznych Systemów – EU Platform for Autonomous Systems), która ma na celu wspieranie państw członkowskich w rozwoju wyżej wymienionych systemów autonomicznych dla operacji lądowych, powietrznych, morskich i hybrydowych. Podstawowym jej celem ma być opracowanie stosownych procedur gwarantujących odpowiednią jakość budowanych systemów autonomicznych. Ponadto wskazano liczne podstawowe obszary zainteresowania:

- wykrywanie improwizowanych urządzeń wybuchowych (Improvised Explosive Device – IED);
- bezzałogowe mobilne systemy lądowe (Unmanned Ground System – UGS);
- modułarna i skalowalna architektura elektrycznych pojazdów bezzałogowych;

- wysoce mobilne bezzałogowe systemy lądowe działające w różnych warunkach terenowych;
- autonomiczne urządzenia dostawcze działające w pobliżu frontu;
- autonomiczne systemy ewakuacji zaginionych i rannych (Combat Search and Rescue – CSAR / Casualty Evacuation – CASEVAC);
- wielozadaniowe bezzałogowe pojazdy;
- autonomiczne zaopatrzenie w strefie przyfrontowej;
- modułarne lekkie bezzałogowe trałowce (okręty przeznaczone do usuwania min za pomocą holowanych trałów, a niekiedy także do stawiania min);
- bezzałogowe bojowe systemy morskie;
- ofensywne i defensywne heterogeniczne roje morskie;
- skalowalne bezzałogowe systemy podwodne;
- wielozadaniowe współpracujące bezzałogowe podwodne pojazdy (Unmanned Underwater Vehicle – UUV);
- podwodne systemy rozpoznania i identyfikacji celów ISTAR (Intelligence Surveillance Target Acquisition and Reconnaissance);
- morskie roje bojowych załogowych i bezzałogowych jednostek (Maritime Manned-Unmanned Teaming – MUM-T);
- urządzenia do wodowania i odzyskiwania autonomicznych podmorskich jednostek (AUV Launch and Recovery System – LARS);
- średniej wielkości półautonomiczne statki nawodne;
- roje bezzałogowych jednostek morskich (UMS) do operacji ofensywnych i defensywnych;
- wielozadaniowy bezzałogowy transport lotniczy;
- nawigacja dronów w obliczu braku łączności satelitarnej (GNSS);
- systemy przeciwdziałające operacjom powietrznych systemów bezzałogowych;
- roje mini-, mikro- i nano-dronów dla operacji wywiadowczych, obserwacji i rozpoznania (Intelligence, Surveillance and Reconnaissance – ISR);
- tanie drony,
- urządzenia do startu i lądowania dronów (LARS);
- autonomia misji dla złożonych scenariuszy;
- autonomiczne systemy precyzyjnego zrzutu;
- bezzałogowe bojowe systemy latające;
- wałęsające się roje (loitering swarm system);
- zapewnienie zdolności do współpracy systemów załogowych i bezzałogowych (Manned- Unmanned Teaming – MUM-T);
- hybrydowe roje do stałej obserwacji i rozpoznania, wykonywania operacji wywiadowczych
- (ISR) oraz wykrywania i likwidacji min morskich (Maritime Mine Counter-Measures – MMCM);
- hybrydowe autonomiczne systemy do operacji logistycznych;
- technologie ułatwiające integrację ruchu statków bezzałogowych z ruchem załogowych pojazdów latających (Air Traffic Integration – ATI), w szczególności z zastosowaniem sztucznej inteligencji;

- zdalnie sterowane systemy latające zdolne do operowania na średnim pułapie i długotrwale utrzymujące się w powietrzu (Medium Altitude Long Endurance Remotely Piloted Aircraft System – MALE RPAS);
- małe zdalnie sterowane systemy powietrzne;
- ciężkie wielozadaniowe drony do rozminowywania;
- lądowy współpracujący autonomiczny system inżynierii bojowej;
- współpraca dronów z samolotami pilotowanymi przez człowieka;
- autonomiczny system tankowania w powietrzu;
- roje nano-dronów do rozpoznania i identyfikacji celów (ISTAR);
- zorientowane na cel przydzielanie zadań rojom dronów (UAV) działających w przestrzeni powietrznej objętej konfliktem zbrojnym;
- współpraca w walce na lądzie i w powietrzu;
- autonomiczny system precyzyjnego zrzutu z powietrza;
- wielozadaniowy bezzałogowy statek powietrzny do transportowych operacji wojskowych;
- statek-matka (mothership) dla dronów (UAV).

Wobec występowania tak wielu tematów wybrano trzy referencyjne, umożliwiające prezentację opracowywanych technologii:

- projekt heterogenicznego roju zdolnego trwale prowadzić inteligentną obserwację i rozpoznanie (ISR) bądź zwalczać okręty podwodne (ASW) albo stanowić morskie środki przeciwdziałania minom (MMCM),
- projekt autonomicznego systemu do operacji logistycznych,
- przykład współpracy systemów załogowych i bezzałogowych (MUM-T).

Nie oznacza to, że wyżej wymienione liczne tematy nie są istotne dla EDA. Co więcej, EDA wskazuje, że 15 istniejących Grup Technologii i Zdolności (GTZ) (CapTechs – Capability Technology Groups) w obszarach, które są przedmiotem ich zainteresowania, powinno rozwijać technologie wspomagające, nie wykluczając ich integracji na rzecz systemów autonomicznych.

Łukasiewicz – PIAP uczestniczył w 2015 r. w projekcie realizowanym dla EDA. Opracowanie [498] będące efektem realizacji tego projektu dotyczyło informacji na temat różnych aspektów projektowania i wytwarzania bezzałogowych pojazdów lądowych (BPL). Zadaniem projektu było:

- zidentyfikowanie zadań wojskowych odpowiednich dla BPL i opracowanie zestawu wymagań operacyjnych dla nich,
- określenie konsekwencji dla struktur wojskowych wynikających z powyższych wymagań,
- wskazanie kluczowych implikacji prawnych i etycznych związanych z wykorzystaniem bezzałogowych platform lądowych (BPL) w operacjach wojskowych,
- przeprowadzenie przeglądu technologicznego, który stworzy obraz współczesnego stanu w dziedzinie BPL,
- opracowanie planów działań mających na celu zniwelowanie istniejących luk (technologicznych i nietechnologicznych),
- zaproponowanie mapy drogowej rozwoju przyszłych rozwiązań BPL zgodnie z zaproponowanymi planami działania.

Z jednej strony dokument ten jest zogniskowany na BPL, ale z drugiej zajmuje się tymi robotami w szerszym kontekście. Wskazuje jak powinno się postępować, aby stworzyć odpowiednią technologię i wykorzystać ją w produktach potrzebnych wojsku.

Do istotnych zadań BPL zaliczono:

- tworzenie węzłów mobilnej sieci komunikacyjnej,
- patrolowanie obszarów i przekazywanie informacji o zaobserwowanych zdarzeniach,
- zwiad,
- poszukiwanie, dostarczenie środków pierwszej pomocy, transport i ewakuacja rannych do bezpiecznych obszarów,
- rozpoznanie chemiczne, biologiczne, radiologiczne i nuklearne (CBRN),
- przenoszenie ciężkiego sprzętu,
- wykrywanie i unieszkodliwianie materiałów wybuchowych,
- eskortowanie i dystrybucja zaopatrzenia,
- udrażnianie przejść.

W 2015 r. zakładano, że te zadania będą do zrealizowania za pomocą BPL w ciągu 15 lat. Ponadto przewidywano, że BPL zostaną uzbrojone i będą wykonywać zadania bojowe. Wojna w Ukrainie pokazała, że tak się stało.

Wskazano, że do realizacji powyższych zadań potrzebne będą następujące funkcje:

- czucie, czyli zbieranie danych z otoczenia,
- percepcja, czyli przetwarzanie i interpretacja danych sensorycznych,
- komunikacja, czyli przekazywanie danych,
- sterowanie, czyli wykonanie zadania na podstawie danych sensorycznych i tych uzyskanych dzięki komunikacji,
- planowanie ruchu, które pozwala na jawne uwzględnienia ograniczeń w przestrzeni konfiguracyjnej i fazowej oraz optymalizację sposobu przemieszczania się,
- poruszanie/przemieszczanie się BPL,
- manipulacja, czyli chwytanie i przemieszczanie obiektów,
- zasilanie.

W rozważaniach wyróżniono platformę i ładunek BPL. Platforma stanowi niezmienną część BPL, która jest elementem niezależnym od wykonywanej misji, natomiast ładunek (w tym urządzenia pokładowe) stanowi część zależną od konkretnie wykonywanego zadania. Ponadto dokument rozpatruje zarówno implikacje, jakie BPL będą miały dla organizacji wojska, jak i czynniki etyczne i prawne związane z ich użyciem.

W 2015 r. jako technologie niedostatecznie rozwinięte, aby roboty mogły działać w dużym stopniu autonomicznie, wskazano:

- efektywne rozpoznawanie środowiska (percepcja),
- interfejs człowieka z maszyną, dla potrzeb interakcji operatora z robotem, co przy wyższych stopniach autonomii pociąga za sobą implementację złożonych ontologii i metod wnioskowania,
- systemy komunikacji odporne na zakłócenia,

- zapewnienie etycznego i zgodnego z prawem działania autonomicznych robotów.

Wprawdzie od tego czasu technologia znacznie się rozwinęła, ale obecnie nadal potrzebne są udoskonalenia w tym względzie.

4.3. Rosyjska strategia

Raport opracowany przez Rand Corporation [527] wskazuje, że niektórzy rosyjscy strategowie ds. skowii twierdzą, iż rosyjska armia nie powinna starać się dorównywać możliwościom przeciwników; zamiast tego powinna znaleźć asymetryczny sposób reakcji poprzez rozwój zdolności, które uczynią zaawansowaną technologicznie broń przeciwników zbyt drogą w stosowaniu. W ostatnich latach w Rosji rośnie przeświadczenie, że wykorzystanie sztucznej inteligencji i robotyki umożliwi stworzenie stosunkowo tanich, ale wydajnych sił. Na tym ma polegać asymetryczna reakcja na rozwój robotów bojowych na Zachodzie. To podejście Rosjan do rozwoju broni autonomicznej jest wynikiem obserwacji sytuacji na froncie w Ukrainie. Niska bitność żołnierzy rosyjskich ma być zastąpiona tanimi systemami autonomicznymi. Przy czym mówi się o autonomicznym podejmowaniu decyzji dotyczących unicestwienia siły żywej.

Niechęć do powierzenia decyzji dotyczących zabicia wroga autonomicznym maszynom zrodziła na Zachodzie strategię, która opiera się na założeniu, iż autonomiczne roboty mają jedynie wspomagać żołnierzy własnych. Natomiast wygląda na to, że strategia Rosyjska dopuszcza powierzenie tej decyzji robotom. Kraje NATO starają się opracować listę ograniczeń dotyczących tego, co broń autonomiczna może, a czego jej nie wolno. Obecnie decyzję o unicestwieniu ludzi musi podjąć człowiek, a nie maszyna. Jednak nie jest pewne, czy inne kraje, a w szczególności Rosja, będą respektować takie zasady. Jednocześnie oficjalnie Rosja będzie dążyć do ustanowienia międzynarodowego prawa ograniczającego autonomię urządzeń bojowych w celu utrudnienia państwu NATO prac nad autonomią robotów bojowych.

Celem wykorzystania robotów przez rosyjską armię jest zwiększenie efektywności prowadzenia walki, czyli wzrost szybkości osiągania celów taktycznych i strategicznych. W związku z tym Rosja dąży do zastąpienia ludzkich żołnierzy robotami. Na ile osiągnięcie tego celu przez nich jest możliwe w krótkim czasie pozostaje jedynie w sferze domysłów. Nacisk na taniość rozwiązań wynika z sankcji ekonomicznych nałożonych na Rosję po ataku na Ukrainę. Jeżeli w istocie uda się Rosjanom opracować takie systemy autonomiczne, wzrośnie ich inklinacja do używania siły w osiąganiu swych celów politycznych. Ciekawym jest, że Rand Corporation sugeruje pozyskanie z Rosji uzdolnionych inżynierów, by przeciwdziałać zdolności tego kraju do stworzenia armii autonomicznych robotów, w ten sposób ograniczając potencjał intelektualny zdolny do realizacji tego ambitnego celu. Ponadto sugeruje dalsze ograniczenie współpracy naukowej między Rosją i Zachodem w zakresie sztucznej inteligencji.

Pomimo, że aktualnie Rosjanie głównie korzystają z dronów, wygląda na to, iż w przyszłości zapewne skoncentrują się na robotach lądowych, a nie latających.

Wynika to z wielkiego doświadczenia walki na lądzie, szczególnie w miastach. Celem jest opracowanie robotów sprawnie penetrujących uszkodzone budynki. Aktualnie nacisk kładziony jest na rozpoznanie, a w szczególności pomiar skażenia terenu, zarówno chemicznego, jak i radiacyjnego, oraz przekazywanie informacji o aktualnym stanie działań na polu walki. Zakłada się współdziałanie robotów lądowych i latających. Roboty latające mogą przeprowadzać rekonesans na dużych dystansach, natomiast te lądowe mogą przekazywać informacje w bezpośrednim kontakcie z przeciwnikiem. Po rekonesansie wykonanym przez autonomiczne urządzenia oraz ewentualnie dodatkowym przeprowadzeniu przez nie operacji rozminowywania, na pole walki mają być wprowadzane roboty uzbrojone, będące w stanie niszczyć żołnierzy i sprzęt przeciwnika. Dopiero na tak wstępnie oczyszczone pole walki wprowadzane będą jednostki, w skład których będą wchodzić ludzie. Ten scenariusz należy traktować jako ogólną wizję i projekcję celu wyznaczonego dla ośrodków badawczych w Rosji. Z informacji dostępnych publicznie wydaje się, że prace nad nawodnymi i podwodnymi robotami są najmniej rozwinięte w Rosji.

Mimo że dziesięć lat temu Rosja pozostawała w tyle, jeśli chodzi o robotykę i systemy autonomiczne, obecnie zintensyfikowała inwestycje i wysiłki w tym obszarze (ds. dziesięć lat temu w Rosji istniało ledwie 200 dronów; przed wojną w Ukrainie rzekomo mieli 2000 i mogli zwiększać tę liczbę o 300 każdego roku) [122]. Obecnie ich wysiłki zmierzają w kierunku rozwoju systemów autonomicznych. Rozwój technologii cyfrowych, robotyki, systemów bezzałogowych i walki elektronicznej jest priorytetem, dlatego rząd rosyjski zatwierdził program rozwoju zaawansowanych robotów wojskowych do 2025 r., wraz z planem rozmieszczenia robotów wojskowych do 2030 r. Wojskowa Komisja ds. Przemysłu wyznaczyła również ambitny cel, aby 30% rosyjskiego sprzętu wojskowego do 2025 r. stanowiły roboty.

4.4. Analiza potrzeb Wojska Polskiego

Instytut Sobieskiego opracował raport pt. „Jak uzbroić Polskę? Odstraszanie, armia, przemysł, odporność państwa” [64]. Jego celem jest wskazanie kluczowych zadań dotyczących obronności kraju, jakie rząd powinien zrealizować. Za kluczowe uznano dokonanie zmian w polskim wojsku, konieczność wzmocnienia potencjału przemysłowego i zbudowanie efektywnego systemu obrony cywilnej. Wyodróżniono pięć obszarów:

- zwiększenie odporności państwa na atak zewnętrzny [63],
- zintensyfikowanie współpracy z NATO [477],
- wzmocnienie kadrowe polskich Sił Zbrojnych [459],
- budowanie zaplecza przemysłowego, pozwalającego na prowadzenie wojny przez dłuższy czas [446],
- dokonanie zmian organizacji obrony cywilnej [391].

W artykule [63] sugeruje się, że zwiększenie odporności państwa na zagrożenia zewnętrzne powinno zostać osiągnięte przez wprowadzenie na uzbrojenie sił zbrojnych większej liczby systemów autonomicznych. Należy się spodziewać, że

ułatwią one prowadzenie walk na terenach miejskich. Należy dążyć do skrócenia cyklu powstawania bezzałogowców oraz zintensyfikowania szkolenia operatorów systemów bezzałogowych. Ponadto należy zwiększyć odporność społeczeństwa na trudy walki zbrojnej, a szczególnie na wojnę hybrydową. Zwrócono uwagę na problem z rekrutacją żołnierzy w krajach NATO. Odwrót od poboru powszechnego zaostriął ten problem.

Z kolei wywiad [477] dostrzega problem dualizmu władzy nad wojskiem. Odrębna zwierzchność w czasie pokoju i w trakcie wojny nie ułatwia dowodzenia wojskiem. Słaba współpraca między wojskiem a instytucjami cywilnymi pogłębia ten problem. Sugeruje się zacieśnienie współpracy z NATO. Uznano za korzystne naciski Amerykanów na Europejczyków, by zwiększyli nakłady na swoje własne armie. Polska dobrze wywiązuje się ze swych zobowiązań w tym względzie. Wskazano, że liczy się nie tylko jakość, ale również ilość ludzi i posiadanego sprzętu. Dlatego położono nacisk na systemy oparte na dronach, szczególnie tych zdolnych do prowadzenia rozpoznania, oraz na amunicję krążącą. Zwrócono uwagę na stopniowe zacieranie granicy między amunicją krążącą a pociskami manewrującymi. Sugeruje się opracowanie technologii tanich i łatwych do uzupełnienia, opartych na dronach i pociskach manewrujących czy połączeniu tych dwóch zdolności. Tu wskazano konieczność rozwoju systemów typu WARMATE i GLADIUS produkowanych przez Grupę WB. Należy tu jednak dodać, że po napaści Rosji na Ukrainę w 2022 r. doceniono rolę, jaką odgrywają roboty latające na polu walki, w związku z czym Wojsko Polskie zaczęło się dozbrajać w ten rodzaj broni. We wrześniu 2023 r. zamówiono w Grupie WB 1700 dronów [296]. Ponadto za bardzo istotne uznano wzmocnienie logistyki i osiągnięcie zdolności do długotrwałego prowadzenia wojny. Ważny jest również sprzęt dla działań radioelektrycznych oraz produkcja na masową skalę tańszych czujników dla potrzeb robotów pola walki. Ciekawym jest, że cyberzagrożenia uznano za przerysowane. Zwrócono uwagę na bolączkę wszystkich armii, a w szczególności naszej, że wewnętrznym interesem wojska jest rozwój linearny, czyli oparty na status quo – najlepiej zamawiać więcej tego samego, co już mamy, co najwyżej trochę unowocześnionego. Problemem jest brak w Polsce odpowiedniego systemu zbierania danych i ich analizy. Ponadto ponownie podkreślono, że odejście od poboru było błędem.

W artykule [459] szczegółowo przedstawiono historię redukcji stanu osobowego Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej po transformacji ustrojowej. Zarówno w Polsce, jak i w krajach sojuszniczych, nadmiernie optymistycznie oceniono rozwój sytuacji geopolitycznej. Postulowano profesjonalizację armii przy jednoczesnym zredukowaniu jej stanu osobowego z 400 tys., w czasach Układu Warszawskiego, do 120 tys. W chwili przystąpienia Polski do NATO nasze Siły Zbrojne liczyły 226 tys. żołnierzy. Ponadto brak poboru oznacza też brak wyszkolonych rezerw i osłabienie więzi ze społeczeństwem. Obecnie ten trend został odwrócony, ale problemem jest nieadekwatność infrastruktury szkoleniowej oraz brak instruktorów. Postuluje się, że docelowy stan osobowy Sił Zbrojnych powinien osiągnąć w 2035 r. 300 tys., w tym żołnierzy zawodowych, dobrowolnej zasadniczej służby wojskowej i terytorialnej służby wojskowej. Obecnie jest ich nieco ponad 200 tys. Wniosek, jaki można z tego wyciągnąć, to konieczność wprowa-

dzenie szerszego szkolenia rezerw, ale również postawienie na autonomiczne roboty, które przynajmniej częściowo zastąpią braki kadrowe. Ciekawe, że w artykule [459] nie zwraca się uwagi na tę drugą możliwość szeroko opisywanych problemów z poborem. Z tym artykułem współgra praca [391], w której wskazano, że błędem było zaniedbanie systemu ochrony ludności. Jeżeli państwo ma być odporne na długotrwały konflikt, to instytucje wojskowe i cywilne muszą mieć odpowiednie plany działania na tę okoliczność. Zadaniem obrony cywilnej są organizacja i wspomaganie następujących działań: ostrzeganie o zagrożeniach, ewakuacja ludności, przygotowanie schronów, ratownictwo, pierwsza pomoc, gaszenie pożarów, wykrywanie i oznaczanie stref niebezpiecznych, odkażanie, organizacja doraźnych pomieszczeń i zaopatrzenia, utrzymanie porządku, przywrócenie działań służb użyteczności publicznej, grzebanie zmarłych, pomoc w ratowaniu dóbr niezbędnych dla przetrwania etc. W artykule [391] skoncentrowano się na aspektach prawnych, a w szczególności przygotowaniu odpowiednich ustaw dotyczących obrony cywilnej. Pomija aspekty techniczne, a w szczególności, jakie środki są niezbędne do prowadzenia wyliczonych działań.

W artykule [446] wskazano, że polski przemysł nie jest dostosowany do potrzeb naprawy i serwisowania nabytego z zagranicy sprzętu wojskowego, co uniemożliwi prowadzenie długotrwałych walk. W tym kontekście postuluje się, aby przestawić się w maksymalnym stopniu na zaspokajanie potrzeb wojska przez przemysł krajowy, co pociąga za sobą nie tylko zadbanie o serwis, ale także rodzimą produkcję. Co więcej krajowy przemysł powinien być uprzednio przygotowany do funkcjonowania w warunkach wojennych. Przywołano przykład Egiptu i Arabii Saudyjskiej, które kupowały sprzęt nie dbając o przeniesienie produkcji i jej doskonalenie w kraju, oraz Szwecji, Izraela, Korei Południowej i Turcji, które pozyskały niezbędną wiedzę i obecnie samodzielnie są w stanie wytwarzać broń zaawansowaną technologicznie. W szczególności dotyczy to najnowocześniejszych samolotów. Niestety przepisy unijne dotyczące zamówień publicznych zazwyczaj eliminują dostawców o technologicznie mniej zaawansowanych produktach. Unia Europejska w latach 2021-2027 wdrożyła program Europejskiego Funduszu Obrony (European Defence Fund – EDF), w kwocie 8 mld euro, z których 2.7 mld euro przeznaczono na wspólne badania w dziedzinie obronności, natomiast pozostała kwota jest do wykorzystania na wspólne projekty rozwoju zdolności produkcyjnych [122]. Ta ostatnia kwota powinna być powiększona o współfinansowanie narodowe. Można utyskiwać na politykę unijną, która promuje silnych graczy na rynku uzbrojenia, ale w tym kontekście również można zadać pytanie, czemu w Polsce nie doprowadzono do utworzenia konsorcjów przemysłowo-badawczych, w których polskie instytucje naukowe i firmy wspólnie występowałyby o te środki? Wtedy firmy polskie mogłyby konkurować z potentatami niemieckimi, szwedzkimi, włoskimi i francuskimi na wspólnym rynku unijnym. Wprawdzie Ustawa o obronie Ojczyzny z 2022 r. nakłada na Radę Ministrów obowiązki uwzględniania w projektach ustaw budżetowych wydatków na badania naukowe i prace rozwojowe w dziedzinie obronności, ale nie zawiera wskaźnika procentowego określającego te wydatki, więc chętnie są one minimalizowane.

W pracy [446] sugeruje się utworzenie na wzór amerykański partnerstwa prywatno-państwowego GOCO (Government Owned, Contractor Operated), gdzie

fabryka jest własnością państwa, ale zarządzana jest przez przedsiębiorstwo prywatne. W takiej fabryce wytwarzane są produkty według specyfikacji będącej własnością państwa. Tak są produkowane, przykładowo, czołgi Abrams. Niewątpliwie taka organizacja produkcji byłaby właściwa dla tworzenia systemów autonomicznych.

Podsumowując, raport Instytutu Sobieskiego sugeruje dokonanie głębokich zmian w sposobie funkcjonowania państwa, koncentrację władzy nad wojskiem w jednym ręku, zmianę funkcjonowania przedsiębiorstw produkujących na cele obronne oraz stworzenie systemu wykorzystującego dane, który umożliwi podejmowanie trafnych decyzji w zakresie obronności. Zwraca uwagę na: liczebność wojska, konieczność inwestowania w roboty pola walki, przywrócenie jakiejś formy poboru, ponowną organizację obrony cywilnej etc. Zwraca uwagę, że Polska przede wszystkim powinna polegać na własnych zasobach. To przemysł krajowy powinien produkować większość niezbędnego uzbrojenia, w szczególności tego, które szybko się zużywa. Trudno się nie zgodzić z wszystkimi tymi postulatami. Jednakże, aby do tego doprowadzić potrzebne są rodzime projekty, a te powinny być opracowane przez polskie instytucje badawcze we współpracy z firmami zbrojeniowymi. Stopniowo powinno się zastępować import produkcją krajową opartą na innowacyjności polskiego środowiska naukowego. Niekompatybilność ośrodków naukowych i firm zbrojeniowych może być złagodzona przez pośrednictwo instytutów Sieci Badawczej Łukasiewicz. Instytuty te powinny pośredniczyć między naukowcami, a firmami produkcyjnymi, przekształcając projekty na poziomie gotowości technologicznej (Technology Readiness Level) TRL 4 lub 5, które są efektem działań uczelni, na prototypy będące na poziomie TRL 9, których oczekuje przemysł.

4.5. Powody niechęci do wdrażania robotów autonomicznych w wojsku

W opracowaniu [527] przeanalizowano między innymi, dlaczego Australijskie Siły Obrony, mimo pozytywnych doświadczeń w Afganistanie z wykorzystaniem zakupionych dronów, później dość powolnie pozyskiwały nowe jednostki i nie wdrożyły intensywnego programu konstrukcji własnych maszyn. Wymieniono następujące powody.

- Zapewnienie bliskiego wsparcia powietrznego za pomocą uzbrojonych bezzałogowych statków powietrznych nie zostało wskazane jako krytyczne zadania dla Royal Australian Air Force i w związku z tym nie było traktowane priorytetowo.
- Tego typu środki nie były wystarczająco promowane, co spowodowało że nie udało się zagwarantować na nie funduszy w procesie planowania uzbrojenia sił zbrojnych.
- Istniała kulturowa niechęć do uzbrojonych bezzałogowych statków powietrznych oraz obawy etyczne związane z ich użyciem.
- Związki między rodzajami wojsk (np. między armią a lotnictwem), a raczej ich słabość, spowodowały, że poszczególne służby najsilniej opowiadały się

za konwencjonalnymi platformami, które spełniają podobne funkcje (takimi jak śmigłowce szturmowe i wielozadaniowe samoloty Super Hornet).

- Projekty dotyczące zaawansowanej technologicznie broni często składały wygórowane obietnice i ich nie spełniały.
- Systemy złożone, a takimi są roboty autonomiczne, wymagają wyrafinowanej technologii, a ta rzadko jest odporna na brud i brutalne traktowanie.
- Cyberbezpieczeństwo takich systemów jest traktowane jako problem.
- Wysoki koszt projektowania i badania sprawności bojowej autonomicznych robotów.
- Ogólnie rzecz biorąc, stosowanie droższych technologii spotyka się z większym oporem niż użycie tańszych, a roboty autonomiczne są drogie zarówno w opracowaniu, jak i wdrożeniu.
- Ponieważ takie systemy działają w oparciu o sztuczną inteligencję, pojawia się problem wyjaśnialności (explainability). Co więcej, uczenie sieci neuronowych tak, by były w stanie działać w dowolnym otoczeniu i w dowolnych warunkach pogodowych, wymaga masy danych, oraz wielkich mocy obliczeniowych i energii.
- Istnieją duże trudności z testowaniem, weryfikacją i walidacją systemów wykorzystujących sztuczną inteligencję.
- Mały stopień wykorzystania robotów o wysokim poziomie autonomii do celów cywilnych zniechęca inwestorów prywatnych. W ogólności roboty wojskowe są dużo cięższe i mają większy udźwig, co czyni je jeszcze droższymi, co również zniechęca inwestorów cywilnych.
- Wykorzystanie w wojsku innowacyjnych technologii wiąże się z nieuchronnymi zmianami instytucjonalno-organizacyjnymi. Instytucje o długich tradycjach są znane z niechęci do takich zmian. W szczególności personel związany z tradycyjnym sposobem działania będzie niechętny wprowadzaniu innowacji.

Aby zaradzić obiekcyjom dotyczącym wykorzystania sztucznej inteligencji w systemach autonomicznych, sugeruje się pracę nad nimi w przedsięwzięciach komercyjnych, które mają zastosowania cywilne. Jeżeli technologia ta okaże się skuteczna w zastosowaniach niemilitarnych, można ją będzie uznać za dostatecznie dojrzałą, by zastosować ją w robotach bojowych. Przykładowym polem doświadczalnym mogłoby być rolnictwo precyzyjne [54]. Innymi słowy, mamy tu odwrócenie historycznego trendu, zgodnie z którym technologie opracowane na potrzeby wojska stopniowo przenikały do sfery cywilnej. Wojsko w niektórych krajach utworzyło specjalne jednostki badawcze, aby eksperymentować z wykorzystaniem systemów autonomicznych. Rozumowanie jest takie: jeżeli ta technologia okaże się skuteczna i niezawodna, łatwiej będzie ją rozpowszechnić w innych jednostkach wojskowych. Ważne jest też, aby skutecznie i konsekwentnie wypracowywać tzw. świadomość robotyczną zarówno w środowisku cywilnym jak i wojskowym.

4.6. Bariery i środki zaradcze

4.6.1. Stany Zjednoczone

USA niewątpliwie mają najbardziej rozbudowany program prac nad autonomicznymi robotami. Powołano Joint Artificial Intelligence Center (JAIC), którego celem jest identyfikacja, ustalanie priorytetów i wdrażanie wyników badań w zakresie sztucznej inteligencji w jednostkach podległych Departamentowi Obrony (DoD) [527]. Pomimo olbrzymich zasobów badawczych, którymi dysponują Stany Zjednoczone, ich wysiłki są spowalniane przez silne wątpliwości niektórych przedstawicieli świata nauki, co do niebezpieczeństw związanych z wykorzystaniem sztucznej inteligencji. Sugeruje się, że ludzkość jest na progu osiągnięcia tzw. osobliwości technologicznej. Nazwa związana jest z podziałem na dwa okresy oddzielone od siebie osobliwością. W pierwszym z nich, na podstawie obecnej wiedzy, jesteśmy w stanie przewidywać dalszy rozwój nauki i technologii. Jednakże po przekroczeniu osobliwości takie przewidywania stają się już niemożliwe. Ma to być związane z osiągnięciem przez maszyny poziomu inteligencji przewyższającej ludzką. Od tego momentu dalszy rozwój nie będzie zależał od ludzi, tylko od maszyn. W takiej sytuacji ludzie nie będą w stanie przewidzieć dokąd może prowadzić rozwój. Może powstanie hybryda ludzko-maszynowa? Napisano wiele prac przewidujących, kiedy i jak zostanie osiągnięta osobliwość. Najbardziej znane są książki Raymonda Kurzweila [256, 257, 258], które wywołały w środowisku naukowym ożywioną dyskusję dotyczącą możliwości, prawdopodobieństwa i ewentualnego terminu osiągnięcia osobliwości [502, 162, 363]. Niestety, pomimo upływu wielu lat od owych publikacji, nadal trudno jest zweryfikować tę hipotezę. Niemniej jednak należy brać ją pod uwagę, choćby ze względu na nastroje społeczne.

Tradycyjnie wojsko amerykańskie zawsze zwracało szczególną uwagę na niezawodność nabywanego sprzętu oraz jego rygorystyczne testowanie, a ponadto chętnie akceptowało rozwiązania złożone technologicznie. Niemniej jednak, od momentu dostrzeżenia potrzeby do momentu wdrożenia innowacyjnej broni mijają lata. Wprowadzie ten fakt jest dostrzegany, ale nacisk na bezpieczeństwo oraz czynniki etyczne pozostaje znaczący, więc środki zaradcze widziane są w odpowiednich zmianach organizacyjnych w wojsku i Departamencie Obrony.

4.6.2. Australia

Doświadczenie Australian Defence Forces (ADF) z robotami bojowymi rozpoczęło się od użycia dronów w Afganistanie, a następnie, by zwiększyć innowacyjność w tym zakresie ustanowiono w 2018 r. centrum badawcze Trusted Autonomous System Defence Cooperative Research Centre (TAS-DCRC) [527]. Wraz ze wzrostem doświadczenia ze zdalną obsługą głównie powietrznych systemów, siły ADF coraz częściej sięgają po bardziej wyrafinowane platformy, które wykorzystują zdolność autonomicznego działania. Australia świadoma swych ograniczonych funduszy nie zakłada rozwijania wszystkich rodzajów autonomicznych robotów bojowych. Ciała doradcze sugerują skoncentrowanie się na wybranych rodzajach, natomiast zaspokojenie pozostałych potrzeb zapewnić przez zakupy od sojuszników. Jako jedną z głównych barier w stosowaniu w pełni autonomicznych robo-

tów bojowych postrzega się opór moralny społeczeństwa australijskiego. Dlatego ADF konsultuje swoje działania z etykami. Inną dostrzeganą barierą jest niechęć wojskowych do inwestowania w innowacyjne, ale niesprawdzone technologie. Traktuje się to podejście jako strategię wysokiego ryzyka. Wszakże obserwując, co dzieje się w różnych konfliktach wojennych, oraz zbierając własne doświadczenia, ta niechęć do systemów autonomicznych stopniowo maleje.

4.6.3. Zjednoczone Królestwo

Rząd Zjednoczonego Królestwa od lat deklaruje ogromne zainteresowanie wdrażaniem sztucznej inteligencji zarówno w gospodarkę, również poprzez rozwój zdolności obronnych. Systemom autonomicznym przypisano zdolność do rozumienia intencji wyższego poziomu [527]. W ten sposób stopień autonomii powiązano ze złożonością ontologii, wykorzystywanej do interakcji pomiędzy człowiekiem a maszyną. Wielka Brytania inwestuje najwięcej w Europie w badania nad technologiami militarnymi. Istotną część poświęca się badaniom autonomicznych systemów i możliwością ich wykorzystania. Jednak pomimo bardzo silnych ośrodków badawczych, tutaj również opór niektórych środowisk względem stosowania sztucznej inteligencji, spowalnia rozwój autonomicznych broni. W związku z tym postanowiono podjąć zobowiązanie do powstrzymania się od tworzenia lub używania systemów, które działałyby bez znaczącego zaangażowania człowieka przez cały cykl ich życia. Oznacza to, iż urządzenie może działać autonomicznie, ale kluczowe decyzje musi jednak podejmować człowiek.

4.6.4. Chiny

Wnioski z analizy dokumentu [122] wskazują, że Chiny przyjęły za cel zostanie liderem innowacji do 2030 r., szczególnie w obszarach wojskowej sztucznej inteligencji i broni autonomicznej. Są one w stanie osiągnąć ten cel, ponieważ:

- poczyniły wczesne inwestycje w roboty i sztuczną inteligencję, które od 2014 r. uznawano za kluczowe dla rozwoju Chin, a w szczególności ich zdolności obronnych. W ostatniej dekadzie Chiny sfinansowały dużą liczbę projektów związanych ze sztuczną inteligencją, dotyczących zaawansowanej robotyki na potrzeby: dowodzenia, sterowania, łączności, komputerów, wywiadu, nadzoru i rozpoznania, wspomagania decyzji, eksploracji danych i systemów autonomicznych,
- szybko się uczą interakcji z maszynami dzięki ogromnej ilości danych wytwarzanych przez 1,4 miliarda obywateli.

Chiny, w oficjalnych wypowiedziach swych wysokich urzędników, wymieniają autonomię i sztuczną inteligencję jako czynniki, które mają przewyższyć technologiczną wyższość wojsk amerykańskich [527]. Wprawdzie Chiny, tak jak i inne państwa, deklarują potrzebę zakazu użycia sztucznej inteligencji w broni, dopóki nie zapewni się determinizmu działania urządzeń zawierających algorytmy AI, ale ich praktyczne działania nie wskazują, że deklaracja ta może być traktowana poważnie. Przedstawiciele Chińskiej Armii Ludowo-Wyzwoleńczej (ChALW) wykazują duże zainteresowanie bronią używającą takie algorytmy. Od 2017 r. uniwersytety chińskie zaczęły dorównywać amerykańskim instytucjom naukowym w rankingach dotyczących sztucznej inteligencji, a nakłady inwestycyjne w tej sferze

w Chinach stopniowo zaczynają dorównywać tym amerykańskim. Uważa się, że ChALW nie będzie skłonna podporządkować się globalnym zakazom etycznym dotyczącym stosowania sztucznej inteligencji. Z drugiej strony wiadomo, że ściśle hierarchiczna i scentralizowana struktura zarządzania nie sprzyja wdrażaniu innowacji, gdyż w tego typu strukturach skłonność do podejmowania ryzyka niepowodzenia przedsięwzięcia jest niska, a to hamuje postęp.

4.6.5. Korea Południowa

Systemy autonomiczne są kluczowe dla strategii Innowacji Obronnych 4.0 (Defence Innovation 4.0) ogłoszonej w lutym 2023 r. przez Koreę Południową [527]. Jednym z kluczowych elementów tej strategii jest opracowanie bezzałogowych złożonych systemów bojowych. Strategia ta ma być realizowana we współpracy z sojusznikami. Korea Południowa od lat intensywnie inwestuje w systemy autonomiczne i sztuczną inteligencję. Opór społeczny wobec stosowania zabójczych autonomicznych systemów uzbrojenia (LAWS) jest niski, a potencjał badawczy tego kraju jest bardzo wysoki, zatem istnieje tam potencjał do rozwijania tego typu technologii. Jest to też skutkiem dużego nasycenia gospodarki koreańskiej robotami, gdyż ludzie mają osobiste dobre doświadczenie w korzystaniu z tych urządzeń. Niemniej jednak rząd Korei opracował dokument dotyczący etycznego wprowadzania w życie sztucznej inteligencji. Autonomiczne roboty postrzegane są jako istotny czynnik odstraszania, powstrzymujący Koreę Północną od ataku na południowego sąsiada. Niemniej jednak niechęć do ryzyka jest czynnikiem hamującym wdrażanie systemów autonomicznych w wojsku koreańskim.

4.6.6. Izrael

Izrael jest istotnym dostawcą dronów sterowanych przez operatorów [527]. Należy się spodziewać, że tamtejsi inżynierowie intensywnie pracują nad uczynieniem ich autonomicznymi. Izrael jest jednym z niewielu krajów, które szeroko używają autonomicznych robotów mobilnych. Robot Guardium⁵ został opracowany przez Israel Aerospace Industries i Elbit Industries do patrolowania granicy ze Strefą Gazy. Pojazd, prócz bogatego zestawu czujników, uzbrojony jest w broń zarówno zdolną do niszczenia atakujących sił i środków, jak i obezwładniającą. Głównym jego przeznaczeniem jest patrolowanie. Pojazdy te potrafią też w większej grupie współpracować ze sobą.

Świadomość „obleżonej twierdzy”, duży stopień nasycenia społeczeństwa ludźmi o wykształceniu technicznym oraz podwyższona skłonność do akceptacji ryzyka, powoduje, że innowacje wprowadzane są do użytku, nawet jeżeli nie są jeszcze w pełni przetestowane. Główną barierą do wprowadzania autonomii są ograniczone fundusze, związane z wielkością kraju.

4.6.7. Singapur

Biorąc pod uwagę niewielki obszar kraju, rząd Singapuru uznaje, że zapewnienie bezpieczeństwa jest możliwe jedynie przez zachowanie stałej przewagi technologicznej nad krajami ościennymi [527]. Stąd duże zainteresowanie zarówno wy-

⁵ <https://en.wikipedia.org/wiki/Guardium>

tworzeniem własnych urządzeń, jak i importowanie systemów autonomicznych. W ślad za tym sformułowano Next-Generation SAF (Singapore Armed Forces) Transition Plan (plan przekształcenia Singapurskich Sił Zbrojnych w siły zbrojne nowej generacji), w którym nacisk położono na urządzenia autonomiczne. W odróżnieniu od większych krajów, Singapur bardziej się koncentruje na autonomizacji broni, którą już posiada, niż na tworzeniu systemów od zera. Tradycyjnie Singapurczycy stawiają też bardziej na ewolucję niż na rewolucję, stąd nacisk na doskonalenie broni. By zmodyfikować to podejście powołano do życia Future Technology and Systems Directorate, aby zachęcić do innowacyjnego myślenia w SAF.

4.6.8. Unia Europejska

EDA w dokumencie dotyczącym APAS [122] zwraca uwagę, że zastosowanie obecnych systemów autonomicznych na polu walki wiąże się z następującymi problemami:

- Pomimo że bezzałogowe systemy osiągnęły już znaczny poziom autonomii, wciąż nie są w stanie zmniejszyć wymagań dotyczących obsady i obciążenia poznawczego żołnierzy, ani przyspieszyć działań operacyjnych.
- Zazwyczaj każdy system sterowany jest indywidualnie i nie potrafi współpracować z innymi systemami, co zwiększa potrzeby kadrowe.
- Mało jest robotów, które są w stanie bezpośrednio brać w działaniach bojowych – wykonują jedynie czynności pomocnicze.
- Różne środowiska wymagają różnych konstrukcji robotów – mała uniwersalność istniejących robotów. W największym stopniu dotyczy to robotów lądowych.
- Brak jest rozwiązań, w których heterogeniczny rój autonomicznych robotów samodzielnie wykonuje skomplikowaną misję.

Konkluzją dokumentu jest wskazanie, że należy zintensyfikować badania nad systemami autonomicznymi, by usunąć powyższe niedomagania, natomiast do osiągnięcia odpowiedniego stanu rozwoju zdolności obronnych z udziałem tych systemów należy rozwijać technologie związane z teleoperacją i roboty autonomiczne, sprawdzone w środowisku operacyjnym tak, aby były przygotowane do produkcji i zarządzania w całym ich cyklem życia. Systemy te powinny być interoperacyjne na polu walki. Stąd duży nacisk na standaryzację w APAS. W dalszych pracach ASCI w ramach APAS należy zwrócić uwagę na konieczność opracowania narzędzi do logistycznego zabezpieczenia działań robotów mobilnych na polu walki, jako elementu zarządzania cyklem życia tych maszyn, z uwzględnieniem digitalizacji tych procesów i użycia sztucznej inteligencji

4.6.9. Wnioski

Z powyższej analizy wynika, że takie kraje jak USA, Zjednoczone Królestwo czy Australia są bardziej narażone na protesty przeciwko użyciu autonomicznych systemów uzbrojenia niż te położone na wschodzie, co może spowolnić prace nad tymi systemami na Zachodzie. Przynajmniej jednak zwiększa to wrażliwość na skutki użycia tego typu urządzeń i służy pracom nad zagadnieniami etycznymi i prawnymi związanymi z wykorzystaniem uzbrojonych robotów. Jednocześnie

prace te współgrają z kształceniem uniwersyteckim, w obszarze STEM⁶, którego poziom zależy od jakości i liczby prowadzonych badań w tej dziedzinie. Brak własnej wykwalifikowanej kadry naukowo-technicznej w razie wybuchu konfliktu uniemożliwi opracowywanie niezbędnych rozwiązań. Skłonność do inwestowania w autonomiczne roboty pola walki należy więc rozważyć na szerszym tle – przygotowanie do konfliktu zbrojnego powinno obejmować rozwój własnych kadr naukowych. Przykładem może służyć rola polskich naukowców w rozpracowaniu sposobu działania i konstrukcji hitlerowskich rakiet V-2 [186] oraz rozszyfrowaniu depesz maszyny szyfrującej Enigma [467, 243, 186], co wpłynęło na przyspieszenie zakończenia II Wojny Światowej. Limitowanie badań naukowych skutkuje niskim poziomem wykształcenia studentów, a co za tym idzie także kadr przemysłowych. Konflikt zbrojny zwykle przecina lub znacznie wydłuża drogi doświadczeń, co osłabia zdolność do obrony. Bardzo istotnym czynnikiem są też fundusze przeznaczane na badania, produkcję i akwizycję sprzętu. Zatem z jednej strony niskie nakłady, to słabe przygotowanie do konfliktu zbrojnego, a w związku z tym prowokowanie wrogów do ataku, a z drugiej strony duży potencjał gospodarczy, nowoczesny sprzęt bojowy i dobre wykształcenie żołnierzy to najlepszy środek odstraszający. Osiągnięcie odpowiedniego stanu w tym zakresie zależy także od skłonności rodzimego wojska do wykorzystania nowoczesnych technologii. Kraje dalekowschodnie coraz bardziej inwestują w nowoczesne technologie wojskowe. Dzieje się to pomimo w niektórych przypadkach występujących sztywności struktur gospodarczych i wojskowych oraz ich niechęci do podejmowania ryzyka. Sztywność działań oraz niechęć do ryzyka stanowią istotny czynnik hamujący transfer technologii do sfery militarnej. Z finansowego punktu widzenia należy opracować listę priorytetów uwzględniającą już istniejące kompetencje polskich podmiotów przemysłowych i naukowych, na której niewątpliwie wysoką pozycję powinny zajmować prace nad robotami autonomicznymi. Z analiz dotyczących również wojny na Ukrainie wynika, że przewaga na współczesnym polu walki zależy od przewagi technologicznej.

⁶ Science, Technology, Engineering, Mathematics

ROZDZIAŁ 5

Przykłady aktualnie wykorzystywanych autonomicznych robotów pola walki

5.1. Roboty pływające

5.1.1. Izraelskie drony morskie

Firma Elbit Systems zbudowała robota nawodnego Seagull¹ (Unmanned Surface Vessel – USV) do zwalczania celów nawodnych i podwodnych. Uzbrojenie zamontowane na łodzi zależy od rodzaju misji, którą robot ma wykonać. Mogą to być systemy: do zwalczania min (umieszczonych na dnie morza, przycumowanych lub unoszących się na wodzie), łodzi podwodnych, prowadzenia działań zapewniających bezpieczeństwo na obszarach wodnych, walki elektronicznej lub hydrografii. Dwunastometrowa łódź, której kadłub zbudowany jest z aluminium i kompozytów, może być transportowana w standardowym kontenerze. Osiąga maksymalną prędkość 60 km/h i może działać samodzielnie do 4 dni. Wyposażona jest w różne rodzaje sonarów: holowany sonar z syntetyczną aperturą, boczny, zanurzany, aktywne/pasywne sonary oraz sonary dalekiego zasięgu. Posiada karabin maszynowy kalibru 12,7 mm i uaktywniane zdalnie wyrzutnie torped oraz system do neutralizacji nurków. Łódź może być sterowana zdalnie lub nawigować samodzielnie omijając przeszkody. Operator korzysta albo z łączności satelitarnej (SATCOM) albo z komunikacji w bezpośredniej linii widzenia.

5.1.2. Ukraińskie drony morskie

W artykule [88] przedstawiono prawdopodobne parametry nawodnych i podwodnych robotów (dronów morskich) projektowanych i wytwarzanych w Ukrainie pod presją działań wojennych. Łódź Sea Baby, zaopatrzona w pędniki strumieniowe (napęd strugowodny), ma 6 m długości, przenosi do 850 kg ładunków wybuchowych, porusza się z prędkością do 90 km/h i ma zasięg do 1000 km. Zaopatrzono ją w antenę do odbioru sygnałów nawigacji satelitarnej, w szczególności z sieci satelitów Starlink. Posiada obrotową głowicę z kamerą termowizyjną oraz kamerą działającą przy niskiej jasności światła, a ponadto dalmierz laserowy. Podejrzewa się, że ma również radar. Operator sterujący robotem korzysta z gogli AR (augmented reality – rozszerzona rzeczywistość), czyli okularów, przez które widać obraz z kamery, na który nałożona jest, generowana w czasie rzeczywistym, grafika trójwymiarowa. Sea Baby musi być odholowana przez większy statek do rejonu działań, z którego jest w stanie osiągnąć cel. Ukraińskie drony morskie produkowane są w zakładach ukrytych pod ziemią. Powstały we współpracy wojskowych i cywilnych inżynierów [190]. Najnowsza wersja Sea Baby została wyposażona w wyrzutnię rakiet.

¹ <https://elbitsystems.com/product/seagull-usv/>

Innym robotem nawodnym zaprojektowanym w Ukrainie jest Magura V5. Dron ten przenosi ładunek wybuchowy o masie 300 kg i także jest wyposażony w kamerę termowizyjną. Przeznaczony jest do ataku grupowego na jednostki pływające przeciwnika. Jednocześnie atak dezorientuje obronę atakowanego okrętu. Dron ten korzysta w łączności za pomocą satelitów Starlink, używa GPS i dociera w pobliże celu autonomicznie i wówczas sterowanie przejmuje operator, który uzyskuje obraz z kamery zamontowanej na łodzi. Napędzane są przez silnik strumieniowy, podobny do tego wykorzystywanego przez skuter Sea-Doo, dzięki czemu mogą osiągnąć prędkość 42 węzłów [194].

5.1.3. Amerykańskie drony morskie

Stany Zjednoczone przed konfliktem w Ukrainie koncentrowały swoje wysiłki na większych robotach pływających. DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) i Marynarka Wojenna (Navy) zainwestowały w dwie łodzie: Sea Hunter i Sea Hawk [88]. Są to 130-tonowe jednostki zdolne przewożenia wielotonowych ładunków oraz do samodzielnego przebywania na morzu do 70 dni. Ich głównym zadaniem jest wykrywanie, śledzenie i niszczenie łodzi podwodnych. Program budowy takich systemów został rozszerzony przez Marynarkę Wojenną i Strategic Capabilities Office Pentagonu, co zaowocowało dużymi jednostkami Ranger i Mariner, zdolnymi przewozić ładunek wielkości kontenera morskiego. W skład ładunku mogą wchodzić wyrzutnie rakiet, różnorodne czujniki oraz urządzenia zakłócające działanie systemów elektronicznych nieprzyjaciela. Ranger i Mariner odbyły samodzielne rejsy z Kalifornii do Japonii, na Hawaje oraz do Australii. W trakcie tych rejsów musiały przestrzegać prawa morskiego. Bogate oczujnikowanie oraz duża moc obliczeniowa komputerów pokładowych umożliwiają wykorzystanie sztucznej inteligencji, ale tej wytłumaczalnej (XAI – explainable artificial intelligence). Ten wymóg wyłącza możliwość użycia głębokich sieci neuronowych. Sukces relatywnie małych ukraińskich dronów morskich przyciągnął uwagę Marynarki Wojennej Stanów Zjednoczonych, co spowodowało inwestycje w roboty tego typu. Rozpatruje się użycie baterii słonecznych bądź żagli do napędzania tego typu łodzi, dzięki czemu będą one w stanie przebywać na morzu miesiącami, bez zawijania do portów w celu tankowania. Od ponad 10 lat firma Liquid Robotics (własność firmy Boeing) eksploatuje roboty SHARC prowadzące obserwacje nawodne i podwodne na rzecz Marynarki Wojennej. Nowsze roboty, takie jak Saildrone Voyager czy Ocius Blue Bottle korzystają z energii słonecznej wspomagającej silniki diesla by przewozić radary, zagłuszarki, atrapy lub aktywne sonary. Natomiast robot OceanAero Triton jest zdolny do nawigacji nie tylko na powierzchni, ale i pod wodą. Dzięki temu może atakować z ukrycia, unikać wykrycia, co pozwala mu również prowadzić działania wywiadowcze.

Obecnie mamy do czynienia ze zmianą taktyki wojny morskiej. Dotychczas polegano na jednym rodzaju czujnika wykrywającego okręty wroga, np. radarze, i jednym typie rakiety niszczącej. Teraz za bardziej skuteczną taktykę uznaje się użycie roju różnych małych i tanich dronów, które obezwładnią dużą jednostkę przeciwnika swoją liczebnością i jednocześnie prowadzenia ataku (nec hercules contra plures). Amerykańscy wojskowi ze szczególną uwagą przyglądają się zarówno budowanym przez Ukraińców dronom morskim, jak i taktyce ich użycia.

Jest to istotne ze względu na konieczność obrony Cieśniny Tajwańskiej przed potencjalnym desantem ze strony Chin. Duża liczba takich dronów jest czynnikiem odstrasającym, umożliwiającym zniszczenie floty inwazyjnej. Sprawdziły się one w praktyce, przepłaszając rosyjską flotę czarnomorską, w konsekwencji odblokowując ukraiński eksport drogą morską. Ponadto istotnie uszkodziły most nad Cieśniną Kerczeńską. Dlatego Rosjanie zatopili w pobliżu filarów tego mostu barki, wzmocnili jego obronę artyleryjską oraz zagłuszają sygnały GPS oraz z satelitów Starlink.

Po II Wojnie Światowej koncentrowano się na obronie okrętów przez samolotami i rakietami. Obecnie istotne jest chronienie ich przed zmasowanym atakiem robotów latających, nawodnych i podwodnych. Drony morskie są potencjalnie bardziej niebezpieczne dla okrętów niż te latające.

Wiąże się to z miejscem uszkodzenia statku – pod wodą lub na linii wodnej. Zwraca się uwagę na autonomię działania tych jednostek, ze względu na przewidywanie zakłócania łącz radiowych. Rój dronów może się porozumiewać lokalnie ze sobą. Zastosowanie protokołu internetowego IP i sieci TTNT lub Silvus dzięki wielości tras połączeń umożliwi zachowanie komunikacji, co najmniej lokalnie. Drony morskie mogą też być stosowane, tak jak miny, biernie czekając na pojawienie się wrogiego okrętu w strefie ochrony. Należy się spodziewać, że przeciwnik opracuje antydrony morskie. Zaistnieje wówczas konieczność ochrony swych własnych dronów morskich.

5.1.4. Brytyjskie drony morskie

Koncern BAE Systems we współpracy z kanadyjską firmą Cellula Robotics zbudował demonstrator podwodnego drona morskiego Herne XLAUV (eXtra Large Autonomous Underwater Vehicle) [192]. Robot przeznaczony jest do długotrwałej podwodnej pracy patrolowej. W zależności od konfiguracji może być wyposażony w sonar holowany, radar lub głowicę optoelektroniczną z kamerą czującą na światło widzialne bądź termowizyjną.

5.1.5. Chińskie drony morskie

Chiny zbudowały bezzałogowy okręt wojenny JARI-USV-A, znany jako Killer Whale [2]. Jego parametry to: długość 58 m, szerokość 23 m, zanurzenie 4 m, wyporność 500 t, maksymalna prędkość 42 węzły, ładowność 70 t i zasięg: 4000 mil morskich. Napędzany jest silnikami Diesla i elektrycznymi. Wyposażony jest w karabiny maszynowe, pociski przeciwokrętowe i przeciwlotnicze oraz torpedy. Ponadto dysponuje platformą umożliwiającą start i lądowanie wiroplątów. Współpraca z dronami wydawnie zwiększa możliwości bojowe tej jednostki. Może prowadzić misje ratownicze, zwalczać jednostki podwodne i nawodne oraz patrolować akweny.

5.1.6. Polskie drony morskie

Politechnika Gdańska wspólnie z Wojskową Akademią Techniczną i Instytutem Technicznym Wojsk Lotniczych opracowuje jednostkę o napędzie turbośmigłowym zdolną do unoszenia się nad wodą na wysokości do kilku metrów [86].

Drozd, bo tak nazywa się ta jednostka pływająco-latająca wykorzystująca efekt przypowierzchniowy, ma być sterowany przez operatora, ale stopień jej autonomii ma być zwiększony w miarę postępu prac. Kadłub ma być wykonany z włókien szklanych i węglowych. Jednostka ma ważyć do 400 kG. Drozd ma startować z wody, wykonywać loty na minimalnej wysokości nad jej powierzchnią przenosząc ładunki.

Ponadto na Politechnice Gdańskiej opracowano robota podwodnego Głuptak o długości 1,5 m i kształcie przypominającym torpedę. System obrony przeciwminowej OPM Głuptak wyposażony jest w silniki elektryczne napędzające śruby. Robot przenosi ładunek wybuchowy przeznaczony do niszczenia min morskich. Jest zdalnie sterowany. Operuje na głębokościach od 5 do 200 m.

5.2. Roboty lądowe

5.2.1. Roboty na gąsienicach

Turecka firma Aselsan zaprojektowała zdalnie sterowany opancerzony pojazd gąsienicowy ZMA-X². Wykorzystano podwozie opancerzonego transportera żołnierzy ACV-15. Przeznaczeniem ZMA-X jest wspieranie ogniem pojazdów załogowych oraz piechoty, a ponadto prowadzenie rozpoznania i transport materiałów niezbędnych do prowadzenia walki. Do nawigacji w terenie stosuje lidary dalekiego zasięgu oraz kamery. Jego 300-konny silnik wysokoprężny umożliwia jazdę z prędkością 65 km/h na odległość do 490 km. W obrotowej wieżyczce zamontowano działko automatyczne Nefer kalibru 25 mm, stabilizowane żyroskopowo.

5.2.2. Roboty na kołach

Amerykańska firma L3Harris zbudowała autonomicznego robota kołowego Diamondback³ do celów obserwacyjno-rozpoznawczych, który jest rekonfigurowalny [410]. Diamondback ma konstrukcję modułową zaprojektowaną z użyciem podejścia MOSA (Modular and Open System Approach). Dzięki temu można dostosować go do konkretnych misji, w szczególności można wymieniać uzbrojenie oraz systemy ochrony. Istotna jest możliwość dostosowania do warunków geograficznych — od pustyń po tereny góryste. Dzięki swoim systemom łączności może współdziałać z innymi pojazdami autonomicznymi albo załogowymi. Może też mieć na pokładzie drona, z którym będzie współdziałał. Jest wyposażony w urządzenia zarówno do komunikacji w zasięgu jak i poza zasięgiem wzroku.

5.2.3. Maszyny kroczące

Maszyny kroczące są zdolne do pokonywania terenu niedostępnego dla pojazdów kołowych bądź gąsienicowych. Mogą one nie tylko kroczyć lecz wspinać się, prze-

² <https://www.msn.com/pl-pl/motoryzacja/wiadomosci/v%3%ADdeo-turcja-prezentuje-l%C4%85dowego-drona-bojowego-zma-x/ar-AA1rHCqs?ocid=entnewsntp&pc=U531&cvid=18a0ca791c23407bb7cbaa2d4cdb6b5f&ei=120> oraz <https://gagadget.pl/514300-turecka-firma-aselsan-zaprezentowala-drona-do-atakow-naziemnych-opartego-na-acv-15-bmp/>

³ <https://www.l3harris.com/all-capabilities/diamondback-vehicle>

kraczać przeszkody, pełzać a nawet pływać. Niektóre mogą się rekonfigurować. Ich kończyny mogą być wykorzystane jako manipulatory, a rekonfiguracja kończyn, czy też korpusu, pozwala zająć mniej miejsca, dopasować się do ograniczonej przestrzeni albo zwiększyć pojemność transportową. Możliwość wymiany stóp pozwala na dostosowanie się do np. grząskiego, śliskiego lub piaszczystego podłoża. Mogą się przemieszczać w ruinach, po schodach, bezdrożach lub w terenie o zróżnicowanym ukształtowaniu ze znacznymi stromizmami. Maszyny te są zwinne i utrzymują stabilną posturę nawet przy nieoczekiwanej zmianie charakteru podłoża. W przypadku przewrócenia się, są w stanie aktywnie powrócić do właściwej postury. Możliwa jest też reaktywna rekonfigurowalność w czasie upadku czy koziółkowania.

Maszyny kroczące mogą być stosowane jako środek transportowy, do zwiadu lub prowadzenia walki. Rozmiary tych urządzeń mogą być bardzo zróżnicowane, od miniaturowych do bardzo dużych. Większe maszyny mogą służyć do transportu rannych, a małe są dobrym narzędziem zwiadowczym.

Czteronożny BigDog [421] został opracowany przez firmę Boston Dynamics z myślą o wsparciu wojska. Zaprezentowany został po raz pierwszy w 2005 roku. Urządzenie było przeznaczone do transportu ładunków. BigDog może chodzić i biegać po terenie kamienistym, nierównym, mokrym bądź pokrytym śniegiem. Maszyna krocząca Spot⁴ (2016), tej samej firmy, to mniejsza, bardziej zwinna wersja robota BigDog. Firma Boston Dynamics testuje robota w różnych scenariuszach wojskowych, w tym w ewakuacji rannych czy inspekcji. Ponadto firma Boston Dynamics opracowała na zlecenie DARPA w 2012 r. LS3⁵ (Legged Squad Support System). Należy zaznaczyć, że pomimo współpracy z wojskiem Boston Dynamics odżegnuje się od wyposażania swoich robotów w broń.

Czteronożne Bezzałogowe Pojazdy Lądowe Q-UGV (Quadruped Unmanned Ground Vehicle) firmy Ghost Robotics, zwane robotycznymi psami, są uzbrojonymi robotami wykorzystywanymi przez 325 Dywizjon Sił Bezpieczeństwa w bazie Tyndall US Air Force (USAF) do zapewnienia jej bezpieczeństwa⁶ (2021). Q-UGV są powszechnie używane do ćwiczenia armii amerykańskiej w prowadzeniu misji wojskowych wspieranych przez roboty [104].

Czteronożne maszyny kroczące robo-wilki (robo-wolves) opracowane przez China South Industries Group Corporation (CSGC) w 2024 roku są zdolne do prowadzenia walki w trudnym terenie. Jako ich zastosowania podaje się misje wywiadowcze, walkę, niszczenie, inspekcję i ochronę⁷.

Zakłada się, że dwunożne roboty o posturze człowieka mogą również być wykorzystane jako maszyny pola walki. Superszybki dwunożny robot Cassie⁸ (2016) opracowany przez Oregon State University Dynamic Robotics Laboratory obecnie

⁴ <https://robotsguide.com/robots/spot>

⁵ <https://www.darpa.mil/research/programs/legged-squad-support-system>

⁶ <https://www.army-technology.com/features/robot-dogs-quadrupedal-military-ghost-robotics-boston-dynamics/?cf-view>

⁷ <https://www.globaltimes.cn/page/202411/1322840.shtml>

⁸ <https://news.oregonstate.edu/news/bipedal-robot-developed-oregon-state-achieves-guinness-world-record-100-meters>

nie jest jeszcze przeznaczony bezpośrednio do prowadzenia walki, ale technologie opracowane do jego konstrukcji mogą być użyteczne w przyszłości, w szczególności do prowadzenia misji zwiadowczych lub ewakuacyjnych.

Brytyjska firma Brit Alliance, zajmująca się kompleksowym zapewnianiem bezpieczeństwa zarówno pracownikom indywidualnym, jak i firmom działającym w obszarach konfliktów, w trakcie trwania wojny w Ukrainie dostarczała armii tego kraju drony, natomiast w połowie 2024 roku przekazała czteronożne maszyny kroczące BAD One przeznaczone do zwiadu i wykrywania min [451, 66, 428] (być może wkrótce zostanie przekazany także model Two⁹). Roboty te wyposażone są w kamery termowizyjne, a same posiadają też antytermiczny kamuflaż. Mają radar pokładowy. Do łączności używają kodowania MILSPEC (standard kodowania wykorzystywany przez amerykańskie siły zbrojne). Bez doładowywania baterii mogą pracować przez 3 godziny. Ich maksymalny zasięg to 30 km, a maksymalna prędkość wynosi 13 km/h. Mogą przenosić ładunki o masie 7,5 kg. Operator zdalnie steruje robotem. W razie przejęcia przez wroga operator kasuje dane krytyczne znajdujące się w pamięci robota. Ukraińskie drony Baba Jaga są w stanie przenieść ponad linią frontu roboty BAD, więc można ich użyć do prowadzenia rozpoznania na tyłach nieprzyjaciela. W marcu 2024 r. Minister Transformacji Cyfrowej Ukrainy Mykhailo Fedorov ogłosił program masowej produkcji robotów lądowych do celów bojowych [6].

Amerykańska firma Throwflame produkuje czteronożne maszyny kroczące Thermonator¹⁰ wyposażone w miotacze płomieni. Pierwotnym ich zastosowaniem było zwalczanie pożarów przez prewencyjne wypalanie oraz topienie śniegu, ale obecnie mogą też być stosowane na polu walki [428]. Jego cena, wynosząca 9420 \$, jest zaskakująco niska. Zasięg płomienia to 9 m. Czas pracy robota po naładowaniu baterii to 1 godzina. Robot wyposażony jest w LiDAR umożliwiający tworzenie map terenu. Operator steruje robotem w trybie FPV (First Person/Pilot View), czyli mając wyświetlony przed swoimi oczyma obraz z kamery umieszczonej na robocie, więc czuje się jakby w nim siedział. Najczęściej obraz wyświetlany jest na wideookularach.

5.3. Roboty latające – drony

5.3.1. Tureckie drony

Ze względu na konflikt w Ukrainie najbardziej znanymi tureckimi robotami latającymi są drony Bayraktar TB2 [492]. Jest to dron typu MALE (Medium-Altitude Long-Endurance). Jego udźwig to 150 kG, jego długość to 6,5 m, a rozpiętość skrzydeł to 12 m, wznosi się na wysokość do 8 km, osiąga maksymalną prędkość 200 km/h. Podczas misji uderzeniowych może korzystać z laserowo kierowanych bomb MAM-L i MAM-C, które ważą odpowiednio 22 kG i 7 kG. Może być wyposażony jest w moduł obserwacyjny zawierający albo kamerę termowizyjną albo radarem typu AESA (active electronically scanned array), w których kierunek emisji

⁹ <https://bad-2.com/>

¹⁰ <https://throwflame.com/products/thermonator-robodog/?srsltid=AfmBOopTIYuWRBLq4XvTu442XpZBmckqzIuees1VcG11ekVR67IGSq1e>

wiązki promieniowania sterowany jest elektronicznie, a sama antena pozostaje nieruchoma. Dzięki temu w zależności od przenoszonego ładunku, może pełnić misje szturmowe, gdy jest uzbrojony, lub obserwacyjno-zwiadowcze. Ponieważ rosyjska obrona powietrzna została udoskonalona, obecnie na Ukrainie głównie stosowany jest do obserwacji w celu kierowania ogniem artylerii rakietowej.

Turecka firma STM Savunma Teknolojileri, Muhendislik ve Ticaret A.S.¹¹, produkuje czterowirnikowe drony Kargu przeznaczone do uderzania w stacjonarne i ruchome cele zarówno w dzień jak i w nocy. Drony te pracują pod nadzorem operatora. Misje planowane są w mobilnym centrum dowodzenia STM. Konstrukcja drona utrudnia jego wykrycie za pomocą radaru. Posiada zdolność autonomicznego rozpoznawania celu. Może być wyposażony w wiele głowic bojowych. Dron jest składany do transportu. Osiąga maksymalną prędkość 72 km/h. Misje mogą być realizowane przy dopuszczalnej prędkości wiatru wynoszącej 10 m/s. Czas lotu z pełnym obciążeniem to 30 min. Masa pojazdu zależy od wyposażenia i wynosi do 7,8 kg. Zasięg zależny jest od wykorzystanej anteny i może dochodzić do 10 km.

Innym czterowirnikowcem tej samej firmy jest Togan. Jego przeznaczeniem jest rozpoznanie. Dron wyposażony jest w kamerę elektrooptyczną z 30-krotnym zoomem oraz kamerę na podczerwień. Może śledzić obiekty szybko poruszające się i trudno widoczne dla ludzkiego oka, dzięki algorytmom rozpoznawania i klasyfikacji obrazów. Ponadto może określać współrzędne tych celów. Jest trudny do wykrycia dla radarów i może działać zarówno w dzień jak i w nocy. Wraz z ładunkiem waży 7,5 kG, jego czas lotu to 45 min, zaś prędkość maksymalna wynosi 72 km/h. Może operować przy prędkości wiatru dochodzącej do 10 m/s. Stacja naziemna jest w stanie nadzorować jego lot w promieniu 10 km.

Ponadto STM produkuje płatowce Alpagu, które stanowią bezzałogowe pojazdy latające zdolne do przeprowadzania lotów zwiadowczych i misji bojowych. Mogą one działać autonomicznie lub pod nadzorem operatora i zwalczają cele statyczne lub ruchome zarówno w dzień jak i nocą. W skład systemu prócz drona wchodzi naziemna stacja nadzoru oraz wyrzutnia drona. W razie niebezpieczeństwa samolot może dokonać autodestrukcji. Waży poniżej 2kG, porusza się z prędkością przelotową 21 m/s, natomiast jego prędkość maksymalna wynosi 28 m/s. Operuje na wysokości od 80 do 200 m, przy maksymalnej prędkości wiatru dochodzącej do 12 m/s. Maksymalny czas lotu to 15 min. Wykorzystuje kamery elektrooptyczne oraz podczerwieni (EO/IR). Może przenosić głowice bojowe o masie do 270 g. Stacja naziemna może jednocześnie monitorować wiele płatowców typu Alpag, ale muszą one znajdować się w odległości nie większej niż 8 km od niej.

Czterowirnikowiec Boyga jest wyposażony w mechanizm zrzucania pocisków moździerzowych kalibru 81 mm, o masie 1,8 kg. Cel dla pocisku może być wskazany przez podanie współrzędnych GNSS albo odpalany przez operatora, który uzyskuje informacje o estymowanym miejscu ataku. Można również zlecić trafienie obiektu ruchomego, który śledzony jest przez drona i może poruszać się z prędkością 54 km/h, przy masie pojazdu do 17 kg oraz prędkości wiatru do-

¹¹ <https://www.stm.com.tr/en/kargu-autonomous-tactical-multi-rotor-attack-uav>

chodzącej do 10 m/s. Zasięg nadzoru wynosi 10 km. Boyga wyposażony jest w kamerę elektrooptyczną z dziesięciokrotnym zoomem.

Płatowiec Alpagut to wspólny projekt STM i ROKETSAN. Przeznaczony jest do zwalczania celów lądowych i morskich zarówno w dzień, jak i w nocy. Jego zasięg to 60 km. Maksymalny czas przelotu to 60 min. Wyposażony jest w system obrazowania w podczerwieni (Imaging Infra Red – IIR), który wykorzystywany jest przez operatora do wyboru celu. Po odpaleniu, rakietę leci do celu autonomicznie. Dron może działać bez GPS, posiada mechanizm autodestrukcji, waży 55 kG przenosząc do celu raketę o masie 11 kg.

Na powyższych dronach może być zainstalowane oprogramowanie Kerkes, które umożliwia im działanie (w tym ustalenie położenia wykrytego obiektu) bez łączności radiowej oraz bez dostępu do sygnału GPS. Dodatkowe oprogramowanie Bumin umożliwia dronom działanie jako roju. Dzięki niemu drony mogą się komunikować ze sobą oraz wykrywać i śledzić wskazane obiekty. Ponadto rój może tworzyć formacje. Ponadto STM dysponuje systemami naprowadzającymi na źródła fal radiowych, takie jak radiostacje czy radary (własne i wroga). Korzystając z nich dron może nawigować do celu i z powrotem do bazy.

W Turcji prowadzone są prace nad współdziałaniem dronów z pilotowanymi samolotami [343]. Zademonstrowano uruchomienie broni drona ANKA-3 przez pilota myśliwca. Dron ANKA-3 został wykonany w technologii utrudniającej wykrycie przez radary (stealth). Przeznaczony jest do zwiadu, rozpoznania oraz prowadzenia precyzyjnych ataków. Może latać na wysokości do 12 km z prędkością poddźwiękową.

5.3.2. Izraelskie drony

System Orbiter Mini UAV to lekki bezzałogowy statek powietrzny produkowany przez Aeronautics Defense Systems przeznaczony do zastosowań wojskowych. Jest używany w misjach zwiadowczych, konfliktach o niskiej intensywności i operacjach wojny miejskiej, a także we wszystkich misjach ISTAR bliskiego zasięgu. Jest produkowany przez izraelską firmę Aeronautics Defense Systems. Dron przystosowany jest do przenoszenia ładunku wybuchowego o masie 2 kg. Pełni rolę tzw. amunicji krążącej. Może być sterowany przez operatora lub mieć zadany punkt orientacyjny oraz niezależnie skanować obszar w celu wykrycia i zniszczenia celu (nieruchomego lub ruchomego). Jeśli cel nie zostanie wykryty, Orbiter może powrócić do bazy i wylądować (w celu ponownego użycia). Orbiter może latać przez 2-3 godziny. Wyposażony jest w kamerę elektrooptyczną i na podczerwień oraz głowicę bojową, która jest trudna do wykrycia ze względu na niską sygnaturę akustyczną – jest wykrywana dopiero po dwóch sekundach od rozpoczęcia nurkowania.

5.3.3. Polskie drony

Reprezentant grupy WB, Remigiusz Wilk, oświadczył, że do 2022 r., a więc do chwili wybuchu pełnoskalowego konfliktu zbrojnego w Ukrainie, firma ta produkowała około 100 dronów rocznie, natomiast obecnie jest to około 8000 egzemplarzy [296]. Liczba zamówień wzrosła drastycznie. Głównie zamawia te maszyny

wojsko polskie i ukraińskie. Jest zapotrzebowanie na drony różnego typu, ale wszystkie one są sterowane przez operatora, gdyż poziom autonomii tych urządzeń jest niski. Zygmunt Trzaskowski, prezes firmy Hertz New Technologies, zwraca uwagę, że równie istotne, co same drony, są środki do ich zwalczania [296]. Zapotrzebowanie na ten typ aparatury ostatnio znacznie wzrosło. Drony kamikaze lub takie, które zrzucają ładunki wybuchowe są relatywnie tanie w porównaniu z czołgami, haubicami i radarami, które niszczą. Można sobie pozwolić na wysłanie roju dronów przeciwko ważnemu celowi. Oczywiście przeciwnik może postąpić tak samo, stąd pilna konieczność opracowania skutecznych metod obrony. Różne utrudnienia, w tym wrogie zakłócanie łączności między operatorem a dronem, wymagają zastosowania metod sztucznej inteligencji, w celu realizacji misji autonomicznie.

Grupa WB produkuje zarówno drony obserwacyjne, jak i uzbrojone. Latające aparaty obserwacyjne wskazują cele dla artylerii lub dronów uzbrojonych. Gładius¹² jest systemem poszukiwawczo-uderzeniowym, który składa się z grupy liczącej do 6. dronów różnego typu. Są one w stanie same rozpoznać cel (do tego służą drony FT-5 wyposażone w głowice optyczne szerokiego spektrum), następnie uderzyć w niego (to uczynią drony BSP-U) i jeszcze sprawdzić skutek ataku (tu ponownie wykorzystane zostaną drony FT-5). Napęd tych dronów jest albo elektryczny albo hybrydowy. Napęd hybrydowy pozwala dronowi utrzymywać się w powietrzu do 14. godzin. Drony BSP-U mogą być wyposażone w głowice bojowe: odłamkowo-burzące, termobaryczne lub kumulacyjne. Drony te startują z wyrzutni umieszczonej na pojeździe. Zebrane dane dostarczane są do systemu kierowania i wsparcia dowodzenia Topaz [516]. Ponadto Grupa WB produkuje amunicję krążącą WARMATE, która charakteryzuje się: lekką konstrukcją, cichym napędem, dużą celnością, możliwością operowania w dzień i w nocy, zdolnością działania w roju, łatwością w obsłudze, zasięgiem do 30 km, prędkością operacyjną do 80 km/h i maksymalną w trakcie ataku dochodzącą do 150 km/h, oraz gotowością do startu w ciągu 5 minut. Dwóch żołnierzy przenosi drona WARMATE do miejsca akcji, montuje go, wystrzeliwuje i zdalnie nim steruje. WARMATE wykorzystywany jest z powodzeniem przez polskie oraz zagraniczne siły zbrojne.

Firma Hertz New Technologies opracowała technologię GPS wojskowego, która obecnie stosowana jest przez państwa NATO. System wykorzystuje odpowiednie algorytmy kryptograficzne. Opracowała też system Hawk do ochrony infrastruktury krytycznej przed dronami. Hawk¹³ wykrywa, wizualizuje i precyzyjnie śledzi drony, które wtargnęły w chronioną przestrzeń. Identyfikuje miejsce ich startu, trasę lotu oraz pozycję operatora. Może też je zneutralizować. System może być rozbudowany o stacje zakłócające łączność. Może także włamać się do komputera sterującego dronem komercyjnym, aby zmusić go do lądowania. Istnieje również możliwość fałszowania sygnału GPS, co zwykle zdezorientuje wrogiego drona.

¹² <https://www.portal-mundurowy.pl/index.php/innowacje-i-biznes/nawosci-grupy-wb-system-rozpoznawczo-uderzeniowy-gladius>

¹³ <https://www.hertzn.eu/pl>

5.3.4. Ukraińskie drony

Drony kamikaze wymagają specyficznej elektroniki, która obecnie jest trudna do pozyskania. Dlatego Ukraińcy testują drony FPV wielokrotnego użytku uzbrojone w granatnik przeciwpancerny RPG-22 [193]. Ponadto uzbrajają niektóre swoje drony w ładunki zawierające termit [293]. Termit jest mieszanką aluminium i tlenku żelaza, która to pali się w temperaturze około 2200°C, a więc wystarczająco wysokiej, aby przetopić pancerz czołgu bądź transportera opancerzonego. Ukraińcy ponadto wyposażają swoje drony w miotacze płomieni [428].

Rosjanie nadali ogólną nazwę Baba Jaga ukraińskim dronom [169]. Nazwa ta odnosi się w rzeczywistości do takich robotów latających jak Vampire, R18, Nemesis czy Kazhan (Kazań). Ich zasięg wynosi do 20 km. Wyposażone są w od czterech do ośmiu silników napędzających śmigła i przenoszą ładunki wybuchowe o masie do 18 kg. Zazwyczaj przenoszą miny przeciwpancerne TM-62 przystosowane do zrzucania z powietrza. Czasami ich ładunkiem są pociski moździerzowe kalibru 82 mm i 120 mm. Ze względu na ich niską prędkość przelotową są łatwym celem w dzień, więc najczęściej operują nocą, w związku z czym zostały wyposażone w kamery noktowizyjne.

5.3.5. Chińskie drony

Chińczycy pracują nad dronem Cloud Shadow CS-5000T [301, 137], który ma kształt latającego skrzydła, czyli brak mu ogona oraz wydzielonego kadłuba. Taka konstrukcja ogranicza opór powietrza w trakcie lotu, a co za tym idzie umożliwia zwiększenie jego prędkości maksymalnej oraz utrudnia wykrycie przez radar (technologia stealth). Jego parametry są utrzymywane w ścisłej tajemnicy przez wojsko chińskie. W związku z tym trudno powiedzieć, w jakim stopniu może on działać autonomicznie.

Ponadto Chiny wytwarzają uzbrojone bezzałogowe statki powietrzne z rodziny Rainbow i Wing Loong przeznaczone do misji uderzeniowych oraz CH-6, 8-tonowy dron mogący długo pozostawać w powietrzu na wysokości do 15 km, mający ładowność około 500 kG [122]. Ponadto opracowano bojowe latające skrzydło w technologii stealth GJ-11 Sharp Sword (combat UAV – CUAV) o udźwigu do około 2 t. Jego rakiety są zdolne do rażenia celów na 100 km. Może być katapultowany z ziemi bądź pokładów lotniskowców. Opracowano też bezzałogowy pojazd latający Feihong FH-97, [292], który stanowi samolot wsparcia dla załogowych myśliwców, ale także rzekomo jest zdolny do rozmieszczania rojów dronów przenoszonych ładowni. Nadto, stworzono wielozadaniowy śmigłowiec bezzałogowy, który może być wyposażony w karabin maszynowy, latać samodzielnie lub w ramach grupy, bez ludzkiego operatora i autonomicznie atakować cele.

5.3.6. Rosyjskie drony

Dron Suchoj S-70¹⁴ „Okhotnik” (łowca) jest jednym z najnowszych osiągnięć rosyjskich [478]. Przeznaczony jest do rozpoznania i precyzyjnych ataków. Został zaprojektowany jako latające skrzydło. Napędzany jest turbowentylatoro-

¹⁴ https://pl.wikipedia.org/wiki/S-70_Ochotnik

wym silnikiem odrzutowym. Ma długość 14 m i rozpiętość skrzydeł 19 m. Waży 25 ton, osiąga prędkość 1400 km/h, lata na pułapie do 10,5 km i ma zasięg 6000 km i może przenosić do 2 ton uzbrojenia, np. w niekierowane bomby swobodnie spadające o masie 500 kg. Maszyna sterowana jest albo ze stacji naziemnej albo wykonuje lot autonomicznie.

Innym dronem eksploatowanym przez rosyjskie siły zbrojne od 2022 roku jest Supercam S350¹⁵. Kompozytowy kadłub i skrzydła napędzane są silnikiem elektrycznym. Jego rozpiętość skrzydeł wynosi 3,2 m, długość 1,5 m, a wysokość 0,3 m. Masa startowa tego drona to 15,5 kg. Może przenosić ładunki o masie do 2,5 kg. Jego zasięg wynosi 240 km, pułap maksymalny 5000 m, ale zazwyczaj operuje na wysokości 150m z prędkością między 65 a 120 km/h. Startuje przy użyciu katapulty, natomiast ląduje korzystając ze spadochronu. W powietrzu może przebywać do 4,5 godziny. Jest przeznaczony do nadzoru terenu i fotografii lotniczej. Może przekazywać sygnał wideo na odległość do 100 km. Korzysta ze stabilizowanych żyroskopowo kamer pasma widzialnego z zoomem optycznym i podczerwieni. Wersja S350M może działać jako wzmacniacz sygnału radiowego, co umożliwia transmisję pośrednią sygnału do dronów o większym zasięgu. Dron sterowany jest przez operatora. Kompletny zestaw, zawierający wyposażenie i części zamienne, jest wyceniany na około 1,6 mln zł [452].

5.3.7. Węgierskie drony

Węgierska firma Uaviator opracowała ciężkiego drona PHANTOM¹⁶ [346]. Jego zasięg wynosi 10 tys. km, masa 600 kg, udźwig 500 kG, rozpiętość skrzydeł 14 m, a pułap 6000 m. Zbudowano go w konfiguracji latającego skrzydła. Jego zdolność do szybowania umożliwia skradanie się do celu. Dzięki modułowej konstrukcji może być dostosowany do realizacji konkretnej misji. Jego konstrukcja utrudnia wykrycie za pomocą radarów oraz kamer termowizyjnych.

5.3.8. Amerykańskie drony

Najbardziej znanym amerykańskim dronem jest Predator MQ-1 produkowany przez General Atomics Aeronautical Systems. Po raz pierwszy został wykorzystany w 1999 r. do prowadzenia rozpoznania nad Serbią w trakcie konfliktu bałkańskiego. Jego masa własna to 512 kg, natomiast z ładunkiem 1020 kg. Prędkość maksymalna wynosi ponad 200 km/h, a zasięg 700 km. Może być uzbrojony w kierowane pociski rakietowe klasy powietrze-ziemia lub powietrze-powietrze. Obecnie używana jest unowocześniona wersja Predator B (MQ-9 Reaper Hunter/Killer). Wyposażony jest w niezawodne łącze komunikacji z operatorem.

Firma Shield AI opracowała drona V-BAT¹⁷ [497, 342]. Jedną z istotnych cech odróżniających V-BAT od innych samolotów zdolnych do pionowego startu i lądowania (VTOL – Vertical Take-Off and Landing) jest zastosowanie wentylatora kanałowego (ducted fan) dającego wektoryzowany ciąg. W lotnictwie wentylator kanałowy to wentylator lub śmigło generujące ciąg, zamontowane w cylindrycz-

¹⁵ https://pl.wikipedia.org/wiki/Supercam_S350

¹⁶ <https://uaviatordrone.com/drone-family/phantom/#>

¹⁷ <https://shield.ai/v-bat/>

nym kanale lub osłonie. Osłona V-BAT zwiększa ciąg wytwarzany przez śmigło o ponad 80% przy równoważnej mocy silnika, umożliwiając start i lądowanie przy użyciu jednego zespołu napędowego i osiągnięcie dużego współczynnika masy ładunku (12 kg) do masy drona wraz z paliwem (60 kg) oraz zasięgu do 550 km. Może on latać bądź szybować do 10 godzin, osiągając pułap 6000 m. Jego rozpiętość skrzydeł to 3 m przy długości kadłuba 2,7 m. Uruchomienie drona V-BAT zajmuje dwóm osobom nie więcej niż 20 min. Po złożeniu mieści się z tyłu pickupa. Jego inną bardzo pożądaną cechą jest mała podatność na elektroniczne zakłócanie łączności. Dzięki temu mógł przeniknąć głęboko za linię frontu, aby dostarczyć ukraińskim wyrzutniom HIMARS dane, dzięki czemu udało się przeprowadzić udany atak na pozycje Rosjan [342]. Startując 40 km przed linią frontu przeleciał 140 km, aby zlokalizować skład pocisków dla rosyjskiego systemu obrony przeciwlotniczej Buk, który następnie zniszczyły HIMARSy. W tej akcji istotna była zdolność do długotrwałego przebywania w powietrzu, aby wypatrzeć cel. Odporność na zakłócanie elektroniczne komunikacji jest ważna dla dronów sterowanych przez operatorów oraz tych, które muszą przekazać zwrotnie informację o celach dla artylerii. Obecnie badane są uzbrojone wersje V-BATa. Testowana jest amunicja o masie 3 kg firmy Northrop Grumman o nazwie Hatchet¹⁸, która do naprowadzania używa GPS i systemu inercyjnego, a w przyszłości także lasera.

Firma Kratos Defense & Security Solutions opracowała drona XQ-58A Valkyrie,¹⁹ który stanowi wsparcie dla samolotów F-35 [358]. System nawigacji Autonomy Core System (ACS) zawierający algorytmy sztucznej inteligencji umożliwia dronowi autonomiczne działanie. Bezzałogowiec ten radzi sobie z utratą łączności i wykonaniem misji bez kontaktu z bazą – samodzielnie odnajduje drogę do celu i bezpiecznie powraca do miejsca lądowania. Jego parametry to: długość 8,8 m, rozpiętość skrzydeł 6,7 m, masa przenoszonego uzbrojenia 260 kg, prędkości maksymalna 1050 km/h i zasięg 5,5 tys km. XQ-58A jest jednosilnikowym średniopłatem z kadłubem o trapezowym przekroju, skośnych skrzydłach z usterzeniem motylkowym i niskim współczynnikiem odbicia promieni radarowych. Wlot powietrza do silnika umieszczono na grzbiecie samolotu.

Firma Kratos Defence and Security opracowała prototyp drona typu stealth (bez klasycznego ogona) o nazwie Thanatos [221], czyli grecki bóg śmierci. Jego podstawowym zadaniem jest wsparcie myśliwców F-15, F-16 oraz F-35, ale może być także wykorzystany do rozpoznania bądź walki elektronicznej. Jest relatywnie lekki dzięki zastosowaniu materiałów kompozytowych. Thanatos tworzony jest zgodnie z amerykańskim programem Collaborative Combat Aircraft (CCA), którego zadaniem jest opracowanie autonomicznych dronów wspierających pilotowane samoloty w realizacji złożonych misji. Drony CCA zwiększają bezpieczeństwo operowania myśliwcami czwartej i piątej generacji dzięki swoim możliwościom walki elektronicznej. Wcześniejsze konstrukcje Kratos były wykorzystywane jako cele ćwiczebne dla artylerii różnego typu [44].

¹⁸ <https://www.northropgrumman.com/what-we-do/advanced-weapons/guided-projectiles-and-precision-weapons/hatchet>

¹⁹ https://pl.wikipedia.org/wiki/Kratos_XQ-58_Valkyrie

5.3.9. Niemieckie drony

Firma Helsing, dotychczas zajmująca się oprogramowaniem, rozpoczęła produkcję dronów HX-2²⁰ [251]. Jest to jednostka latająca o masie 12 kg, napędzana czterema silnikami, mająca cztery skrzydła ułożone w konfiguracji X. Jej prędkość to 220 km/h, natomiast zasięg to 100 km. Może używać amunicji różnego typu. Jej istotną cechą jest zdolność do nawigacji bez dostępu do sygnału GPS i odporność na zakłócenia elektromagnetyczne. Może działać w ramach roju. W tym celu korzysta z oprogramowania Altra. Kamera umożliwia tworzenie map i nawigowanie według ich wskazań.

5.3.10. Irańskie drony

Firma Iran Aircraft Manufacturing Industries Corporation produkuje drony Shahed 136²¹, które są wykorzystywane przez Rosjan w konflikcie ukraińskim. Shahedy mają czterocylindrowy tłokowy benzynowy silnik dwusuwowy, dzięki któremu rozwijają prędkość do 185 km/h i wznoszą się na pułap do 4000 m. Ważą wraz z ładunkiem o masie do 200 kg. Dron leci do celu, po z góry zaplanowanej trasie. Atakuje jedynie cele nieruchome, których pozycja znana jest przed startem. Shahed startuje z wyrzutni ustawionej siłownikami hydraulicznymi pod kątem na naczepie ciężarówki. Start wspomagany jest przez silnik rakietowy. Do nawigacji wykorzystuje GPS (GLONASS), a w przypadku zagłuszenia jego sygnału, używa czujnika inercyjnego. Trafia w cel z dokładnością do kilku metrów. Skonstruowano również dron Shahed 238 wyposażony w silnik turboodrzutowy.

5.3.11. Antydrony

Drony latają dużo wolniej od samolotów, dlatego można ciężkie drony przeciwnika, obciążone dużymi ładunkami wybuchowymi, można zwalczać własnymi dronami, ale małymi i szybkimi [252]. Wojska ukraińskie eksperymentują z takimi antydronami z dużym sukcesem. Podobnie robią Rosjanie, którzy polują na drony ukraińskie, zwane Babą Jagą. Obecnie takie maszyny sterowane są przez operatorów, ale z dużym prawdopodobieństwem należy przyjąć, że wkrótce stopień autonomii ich zostanie powiększony.

Początkowo walka między dronami polegała na tym, że kiedy szybki dron dostrzegł powolny statek powietrzny przeciwnika, to próbował go staranować. Zazwyczaj odbywało się to poprzez zrównanie prędkości, a następnie opadnięcie z zamiarem zahaczenia o śmigła wroga. Czasem udawało się strącić przeciwnika doznając drobnych szkód własnych, ale zwykle było to działanie samobójcze. Kiedy celem mniejszego rosyjskiego drona Mavica była Baba Jaga, taranowanie wówczas nie odnosiło skutku ze względu na różnicę rozmiarów. Lepszym rozwiązaniem okazało się zrzucanie małych bomby lub siatki. Wszakże takie działania wymagały wysokiego kunsztu operatora. Ponadto ze względu na masę atakowanego drona trudno było go unicestwić.

Antydron samobójca kosztuje około tysiąc dolarów, a więc dużo mniej niż ręczny zestaw przeciwlotniczych PPZR Piorun lub 9K333 Verba [191]. Niemniej jednak

²⁰ <https://helsing.ai/hx-2>

²¹ https://pl.wikipedia.org/wiki/Shahed_136

ze względu na restrykcje nałożone na Rosję utrata maszyny jest dużą stratą. Stąd dążenie Rosjan do konstrukcji antydronów wielokrotnego użycia, co spowodowało wykorzystanie pomysłu zarzucania siatki. Ponadto, aby przeciwdziałać antydronom Rosjanie zaczęli na swych dronach montować zagłuszarki zakłócające sygnał wizyjny atakującego robota latającego.

W kwietniu 2023 r. rząd Ukrainy założył organizację²² BRAVE¹ mającą na celu wspieranie innowacyjnych rozwiązań zbrojeniowych²³. Do organizacji tej zaproszono międzynarodowych partnerów, którzy chcą realizować projekty na potrzeby przemysłu zbrojeniowego i zaawansowanych technologii. Zgłosiła ona zapotrzebowanie na myśliwski dron typu FPV. Sterowanie dronami typu FPV różni się tym od sterowania zwykłymi dronami, że w przypadku FPV obraz z kamery umieszczonej na dronie wyświetlany jest na ekranie gogli, które operator ma na oczach (w przypadku tradycyjnym obraz ten wyświetlany jest na ekranie komputera). Wyświetlanie informacji na goglach pilota jest stosowane w nowoczesnym lotnictwie wojskowym. Jako podstawowe wymogi dotyczące zamawianego drona wskazano zdolność przechwytywania celów lecących do 150 km/h na wysokości do 1,5 km. Realizując swoje zadania dron i jego operator mają otrzymywać informację o celu z zewnętrznego źródła (np. radar).

Polska firma Advanced Protection Systems (APS)²⁴ oferuje naziemne stacjonarne i mobilne systemy do wykrywania i zwalczania wrogich dronów. Do ich namierzania wykorzystuje radary 3D MIMO MHT (Multi Hypothesis Tracking) oraz czujniki wizyjne, które mogą śledzić wiele celów jednocześnie. Na podstawie danych sensorycznych algorytmy sztucznej inteligencji odróżniają drony od nieszkodliwych obiektów latających, np. ptaków. Wykrycie drona wyzwala proces zagłuszania w 20 pasmach (ISM, VHF, UHF, GSM, UMTS, LTE, GNSS, WiFi, UKF). Dron firmy APS do zwalczania intruzów ma działać w dużym stopniu autonomicznie [442]. Taki nieuzbrojony antydron lokalizuje wrogie drony na podstawie informacji z systemu wykrywania, a następnie taranuje je, wykorzystując swą energię kinetyczną.

Brytyjczycy skonstruowali rodzaj działa emitującego wysokoenergetyczny promień elektromagnetyczny o częstotliwości radiowej (RFDEW – Radio Frequency Directed Energy Weapon) [217]. Wytworzone fale radiowe są w stanie zakłócić pracę lub uszkodzić elementy wewnątrz urządzeń elektronicznych, takich jak drony. Zasięg tej broni wynosi 1 km. Urządzenie emitujące promień może być montowane na samochodzie ciężarowym lub jednostce pływającej. Pojedynczy strzał kosztuje mniej niż 10 pensów.

5.3.12. Pociski manewrujące

Pociski manewrujące cechują się dużym stopniem autonomii. Stanowią bezpilotowe obiekty latające przenoszące głowice bojowe. Są jednorazowego użytku. W odróżnieniu od rakiet napędzane są na całej trasie lotu przez wbudowane źródło napędu. Przykładem takiego pocisku jest Storm Shadow produkowany przez

²² <https://brave1.gov.ua/en/>

²³ <https://en.wikipedia.org/wiki/Brave1>

²⁴ <https://apsystems.tech/>

brytyjsko-francuskie konsorcjum MBDA. Jest to pocisk sterowany kategorii „fire and forget”, programowany przed wystrzeleniem, po czym nie jest już nadzorowany z zewnątrz. Cechuje się niską wykrywalnością, a jego zasięg wynosi od 300 do 500 km w zależności od wersji. Pocisk leci na wysokości od 40 do 150 m i jest w stanie trafić w cel z dokładnością 3 m. Jego masa wynosi 1300 kg, z czego 450 kg, to masa głowicy BROACH (Bomb Royal Ordnance Augmented CHarge). Pozostałą masę stanowi silnik turboodrzutowy oraz paliwo. Leci z prędkością 1000 km/h. Do autonomicznego lotu używa systemu nawigacji bezwładnościowej, odbiornika GPS oraz systemu TERPROM (Terrain Profile Matching) umożliwiającego porównywanie profilu powierzchni ziemi z zapamiętaną mapą. Przed zaatakowaniem celu, z głowicy pocisku odpada pokrywa kamery termowizyjnej (IIR) o wysokiej rozdzielczości, dzięki czemu jest on identyfikowany. Pociski te używane są również przez ukraińskie siły zbrojne [247].

Pierwszymi pociskami manewrującymi były niemieckie rakiety V-1 wykorzystywane w trakcie II wojny światowej [186]. Obecnie co najmniej kilkanaście krajów wytwarza rakiety manewrujące. Różnią się prędkością lotu: poddźwiękową, supersoniczną lub hipersoniczną; zasięgiem, rodzajem przenoszonej głowicy oraz miejscem, z którego są odpalane: łodzi podwodne, okręty, samoloty, wyrzutnie stacjonarne bądź umieszczone na samochodach. Najbardziej znanym pociskiem tego rodzaju jest Tomahawk²⁵ napędzany silnikiem odrzutowym. Do nawigacji wykorzystuje czujniki inercyjne, GPS oraz porównanie konturu obserwowanego terenu z zapamiętaną mapą. Istnieje wiele wariantów tej rakiety. Niektóre mogą wykorzystywać do osiągnięcia celu dodatkowe informacje z dronów, przekazywane przez żołnierzy z pola walki bądź uzyskiwane ze współdziałających: samolotów, czołgów lub okrętów.

5.4. Roboty hybrydowe

Amerykańska firma Onyx Industries wyposaża czteronożne maszyny kroczące firmy GhostRobotics w specjalny napęd umożliwiający im pływanie²⁶. NAUT (Nautical Autonomous Unmanned Tail) może napędzać pojazdy zdolne do unoszenia się na wodzie. Czteronożne maszyny kroczące w wersji wodoodpornej wyposażone są w pływaki, aby spełnić to wymaganie. NAUT stanowi wektoryzowany napęd strumieniowy. Może być sterowany drogą radiową, ale może również działać autonomicznie przemieszczając jednostkę pływającą do zadanych punktów. Czteronożna maszyna krocząca Vision 60 Q-UGV firmy Ghost Robotics może się przemieszczać w trudnym terenie w dowolnych warunkach pogodowych. Pokładowy komputer sterujący ARM wspomagany jest przez GPU (Graphic Processing Unit) NVIDIA Xavier, który ułatwia stosowanie algorytmów sztucznej inteligencji. Nogi o 3 stopniach swobody napędzane są przekładniowymi silnikami elektrycznymi. Ich podatność zapewniana jest przez oprogramowanie, bez konieczności stosowania czujników sił i momentów sił. Do stabilizacji chodu wykorzystuje czujnik inercyjny (IMU – Inertial Measurement Unit). Robot może przejść do 9,6 km na jednym ładowaniu. Standardowo przemieszcza się z prędkością 1 m/s, ale może

²⁵ [https://en.wikipedia.org/wiki/Tomahawk_\(missile_family\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Tomahawk_(missile_family))

²⁶ <https://youtu.be/OQhYJ6I9c1I?si=rGJknLe8pi4jDvPo>

tez biec z prędkością 3 m/s. Jest się w stanie sam podnieść w razie upadku. Sprzedawany jest z otwartym układem sterowania, dzięki czemu użytkownik może go rozbudowywać korzystając z języka C/C++. Można go wyposażyć w GPS, kamery RGB, kamery termowizyjne, dalmierze, manipulator.

Szwajcarska uczelnia Ecole Polytechnique Federale de Lausanne prowadzi badania nad dronami z nogami i skrzydłami [10]. RAVEN (Robotic Avian-inspired Vehicle for multiple ENvironments) jest sztucznym ptakiem. Dzięki możliwości szybowania jest o wiele cichszy od swoich śmigłowych odpowiedników, a poza tym może się przemieszczać na ziemi nie wznosząc się, więc jest trudniejszy do wykrycia. Startuje podskakując, tak jak to czynią ptaki. Dzięki podskokowi początek lotu jest o wiele stabilniejszy, niż gdyby start odbywał się bezpośrednio z ziemi.

5.5. Roboty o nietypowych konstrukcjach

Warto też wspomnieć o nietypowych konstrukcjach. W roku 2024 w Chinach pokazano toczącego się robota Rotunbot RT-G, wspomagającego działania policji [46]. Został opracowany przez firmę Logon Technology z siedzibą w Shenzhen. RT-G to sferyczny robot o masie 125 kg, osiągający prędkość 35 km/h. Robot może poruszać się po lądzie i w wodzie. Kula porusza się dzięki zastosowaniu żyroskopu w układzie sterowania i mimośrodowemu przemieszczaniu masy wewnątrz sfery. Wykorzystuje metody sztucznej inteligencji do rozpoznawania ludzi. Wyposażony jest w broń obezwładniającą, ale nie powodującą śmierci. Na marginesie warto dodać, że na Politechnice Wrocławskiej opracowano robota o podobnej konstrukcji [195], wszakże do wspomagania terapii dzieci autystycznych.

5.6. Grupy robotów

Obecnie wysiłek badawczy wkładany jest w tworzenie grup robotów realizujących wspólnie zadanie bojowe. Szczególnie interesujące są heterogeniczne grupy robotów. Rzecznik ukraińskiej brygady, walczącej na froncie w obwodzie charkowskim, przekazał 20 grudnia 2024 r., że strona ukraińska przeprowadziła swój pierwszy atak na lądzie wyłącznie przy użyciu bezzałogowych pojazdów naziemnych (UGV) i dronów FPV [5]. W tym ataku piechota nie została użyta. Do starcia doszło w pobliżu wsi Łypci na północ od Charkowa. Ataku dokonało kilkadziesiąt robotów lądowych wyposażonych w karabiny maszynowe. Jednocześnie oczyściły przedpole walki z min. Jest to przykład rekompensowania niedoboru ludzi za pomocą przewagi technologicznej.

W boju używa się też heterogenicznych grup robotów [194]. Siły zbrojne Ukrainy wykorzystały swoje roboty nawodne Magura V5,, na pokładzie których umieścili drony FPV lub Baba Jaga, które po starciu z ich pokładów zniszczyły dwa rosyjskie zestawy przeciwlotnicze Pancyr-S1 w obwodzie chersońskim. Wprawdzie w robotyce stosowano roboty torbacze (marsupials), gdzie duży robot lądowy przewoził małe roboty zwiadowcze, ale dotychczas roboty nawodne nie były stosowane, jako lotniskowce dla autonomicznych robotów latających. Widać wyraźnie, że taktyka użycia robotów stale ewoluuje.

ROZDZIAŁ 6

Kluczowe technologie wykorzystywane w autonomicznych robotach pola walki

W dokumencie [103] zwrócono uwagę, że aby stworzyć bezzałogowe systemy akceptowane przez wojsko trzeba:

- zapewnić ich interoperacyjność i modularność;
- opracować systemy komunikacji w odpowiednim paśmie, odporne na zakłócenia;
- dać gwarancję bezpieczeństwa, a w szczególności zapewnić ochronę wyników badań naukowych i technologii wykorzystanych w systemie;
- uzyskać trwałą i niezawodną odporność;
- zagwarantować autonomię działania, w szczególności w zakresie zachowania poznawczego systemu;
- wyposażyć je w odpowiednie uzbrojenie.

Podkreśla się konieczność opracowania standardów w tych obszarach.

Są to wymagania użytkowe, których zapewnienie jest niezmiernie istotne dla skutecznego wykorzystania autonomicznych systemów. Niemniej jednak, w pierwszej kolejności należy określić, jaka fundamentalna wiedza niezbędna jest do stworzenia systemów, które będą sprawnie działały na polu walki. Temu właśnie poświęcony jest ten rozdział. Niestety nie jest to obraz kompletny. Stanowi on opis zbioru wybranych istotniejszych technologii niezbędnych do stworzenia systemów autonomicznych. Pełny opis wymagałby szerszego opracowania. Mimo to, przedstawiony rozdział pozwala na naświetlić złożoność zagadnienia, jakim jest autonomia działania robotów.

6.1. Sztuczna inteligencja

Obecnie sztuczna inteligencja w urządzeniach wojskowych używana jest przede wszystkim do [65]:

- rozpoznawania i identyfikacji celów, co wiąże się z przetwarzaniem danych uzyskanych z czujników,
- oceny zagrożenia i priorytetyzacji celów,
- autonomicznej nawigacji i planowania ścieżek,
- wspomagania decyzji, a w szczególności tworzenia rekomendacji, co do dalszego działania,
- obrony przed cyberatakami,
- walki informacyjnej, czyli zaburzania komunikacji przeciwnika,
- logistyki i zarządzania łańcuchem dostaw.

W sztucznej inteligencji i robotyce często autorzy odwołują się do pojęcia agenta [436, 381, 183, 365, 60, 74]. Niestety termin ten nie jest ściśle zdefiniowany. Większość autorów jedynie wskazuje zestaw cech, które taki twór powinien po-

siadać. Wprawdzie te zbiory mają część wspólną, ale też zawierają podzbiory rozłączne. Dla potrzeb tego opracowania przyjmijmy, że agent to twór postrzegający swoje środowisko oraz oddziałujący na nie, a ponadto posiadający wewnętrzny imperatyw do realizacji pewnych zadań. Dla robotów środowiskiem jest świat rzeczywisty [58, 59], w jakim funkcjonują, natomiast dla agentów programowych jest to wirtualne środowisko tworzone przez dane umieszczone w komputerze lub sieci komputerów [524]. Robotycy często odwołują się do agenta upostaciowionego (embodied agent), który posiada fizyczne ciało, w odróżnieniu od agentów programowych. Istnieją również systemy składające się z obu rodzajów agentów [556]. Robot w prostych przypadkach może być reprezentowany pojedynczym agentem upostaciowionym, ale systemy złożone zazwyczaj wymagają wiele takich agentów [558].

Wszelkiego rodzaju autonomia działania wiąże się z diagnozą obecnego stanu agenta i środowiska, predykcją ich możliwych przyszłych stanów, podziałem środowiska na elementy skupiające uwagę i tło oraz realizacją celu działania. Wszystkie te zagadnienia w sposób ścisły wiążą się z szeroko pojętą sztuczną inteligencją, zarówno z obszarami maszynowego uczenia, jak i optymalizacji [436, 352, 353]. Sztuczna inteligencja jest w stanie podejmować różnorodne decyzje, ale problemem jest wyjaśnienie, dlaczego takie decyzje podjęła. Odpowiedzią na to pytanie zajmuje się wyjaśnialna sztuczna inteligencja (explainable AI XAI) [376].

6.1.1. Detekcja i rozpoznawanie obiektów

Detekcja i rozpoznawanie obiektów to fundamentalne zagadnienia maszynowego uczenia, związane z analizą wzorców, bazujących zarówno na danych z kamer (w paśmie widzialnym lub podczerwonym) [522], jak i z lidarów [570], radarów (w tym pasywnych i szumowych), a także z systemów obrazowania medycznego, w tym USG i rezonansu magnetycznego. Ze względu na największą dostępność publicznych danych, większość prac prowadzonych jest związanych z rozpoznawaniem obiektów w paśmie widzialnym oraz obrazowaniem medycznym [377].

W ostatnim okresie, dominującą techniką rozpoznawania obiektów są głębokie sieci neuronowe [274]. Ich użycie jest stosunkowo proste, jednak wiąże się ze znacznym nakładem obliczeń i wymaga bardzo dużej ilości danych uczących. Wymagania te można zredukować, jeśli zastosuje się podejście „transfer learning” (uczenia transferowego, transfer uczenia), polegającego na tym, że sieć głęboka jest uczona na danych z podobnej dziedziny zastosowania (np. rozpoznawania obiektów sfotografowanych w otoczeniu pasa drogowego), które są łatwo dostępne w dużej liczbie, a następnie uczona rozpoznawania znaków drogowych [382]. Możliwość uczenia transferowego wynika z tego, że w głębokich sieciach neuronowych następować może rodzaj specjalizacji przetwarzania danych — część struktury sieci specjalizować się będzie w tworzeniu cech obrazu, które mają charakter uniwersalny w rozpoznawaniu obiektów (rodzaj wstępnego przetwarzania danych). Wykorzystanie tej wyspecjalizowanej części w innej sieci, działającej w tym samym kontekście, jednak związanej z analizą innych obiektów, pozwala na pominięcie procesu ponownego wyłaniania uniwersalnych cech obrazu.

Innym podejściem rozpoznawania obiektów jest wyprowadzenie cech charakteryzujących dane poza proces modelowania, np. dokonanie transformacji obrazu pierwotnego na cechy z użyciem wiedzy dziedzinowej, za pomocą innych modeli, np. transformacji Fouriera [438] lub falkowej. Tak przekształcony obraz jest następnie poddawany analizie w sposób analogiczny do użycia sieci głębokiej, tj. poprzez dopasowanie modelu do danych uczących. Różnica polega jednak na tym, że model jako swoje wejście przyjmuje przekształcone poprzez transformację dane uczące, co oznacza, że model może być prostszy, a dzięki temu, ilość danych uczących może być mniejsza. Można również sięgnąć po modele, których działanie jest łatwiej dostępne dla ludzkiej intuicji, np. drzewa decyzyjne lub lasy losowe.

6.1.2. Predykcja

Techniki predykcyjne są rozwijane w zasadniczych dwóch kierunkach. Pierwszy z nich wiąże się z symulacją fizyczną i zakłada, że opis zmian położenia obiektu jest realizowany poprzez model fizyczny, którego parametry są przedmiotem analizy na podstawie wcześniejszych obserwacji. Co ciekawe, ten sposób postępowania jest bliski symulacji fizycznej w świecie gier komputerowych. W drugim sposobie prognozowania nie zakłada się znajomości modelu fizycznego badanego układu lub przyjmuje się, że jego symulacja byłaby zbyt kosztowna obliczeniowo. Wówczas stosuje się model o postaci ogólnej, np. w formie sieci neuronowej, oraz dostraja się jego parametry na podstawie zebranych wcześniej danych pomiarowych. Co do zasady, zagadnienia i techniki uczenia modeli predykcyjnych nie odbiegają zbyt mocno od modeli używanych do analizy obiektów, znajdują również zastosowanie zarówno techniki uczenia transferowego, jak i uczenia opartego o cechy wyprowadzone poza modelem.

6.1.3. Celowe działanie

Możliwość predykcji przyszłych stanów agenta i środowiska daje możliwość analizy różnych scenariuszy działania, ich oceny oraz wyboru najlepszego z nich. Typowe zadanie rozwiązywane w ten sposób wiąże się z wyborem sekwencji przemieszczeń, w celu osiągnięcia docelowego punktu w jak najkrótszym czasie, jak najkrótszej drodze, lub jak najniższym wydatkiem energetycznym. Inne charakterystyczne zadanie to planowanie sekwencji decyzji zmierzających do osiągnięcia pewnej wartości zadanej, np. utrzymania założonej prędkości obrotowej silnika [485, 269].

W przypadku zadań związanych z sekwencją podejmowanych decyzji, których cel jest osiągnięty dopiero na końcu sekwencji, zastosowanie znaleźć mogą algorytmy bazujące na efektywnych szacowaniach optymalizowanej funkcji zysku lub kosztu, takie jak np. algorytm A*, lub algorytmy bazujące na analizie drzew gry (np. gry Stackelberga) [200, 303], jeśli zakłada się istnienie strony przeciwnej prowadzącej aktywne przeciwdziałanie. Z kolei gdy w zadaniu podejmowania decyzji można wskazać wartości pożądane na każdym etapie procesu decyzyjnego, wachlarz technik optymalizacyjnych jest dość szeroki i obejmuje zarówno metody kojarzone z „tradycyjnymi” technikami optymalizacji, jak np. liniowy sympleks, metody największego spadku oraz zmiennej metryki, jak również metody opty-

malizacyjne [460] lokujące się w obszarze szeroko pojętej sztucznej inteligencji, takie jak algorytmy ewolucyjne [21] czy techniki inteligencji roju [52].

6.2. Sterowanie

6.2.1. Sterowanie automatyczne

Aby uczynić roboty autonomicznymi, można się odwołać do rozwiązań wywodzących się z klasycznej automatyki i teorii sterowania. Zdefiniujmy cel algorytmu regulacji automatycznej (regulatora). Na podstawie pomiarów aktualnych wartości sygnałów wyjściowych procesu, zwanych zmiennymi regulowanymi, regulator wyznacza aktualne wartości sygnałów wejściowych procesu, zwanych zmiennymi manipulowanymi. Wartości zadane sygnałów wyjściowych mogą zmieniać się w czasie, co oznacza, że regulator ma za zadanie śledzenie trajektorii (zadanie nadążania lub serwomechanizmu). Wartości zadane mogą być stałe lub zmieniać się rzadko, ale zakłócenia mogą wpływać na proces, co oznacza, że celem regulatora jest kompensacja wpływu zakłóceń (zadanie kompensacji zakłóceń lub regulacji przemysłowej). Śledzenie trajektorii zadanych i kompensacja wpływu zakłóceń mogą być konieczne jednocześnie. Wartości, a czasami również szybkość zmian, sygnałów sterujących są zwykle ograniczone, a więc regulator powinien mieć możliwość uwzględnienia istniejących ograniczeń.

Klasyczne jednopętlowe regulatory proporcjonalno-całkująco-różniczkujące (Proportional-Integral-Derivative, PID) są stosowane w większości zastosowań przemysłowych [445]. Algorytm PID jest zwykle dostrajany eksperymentalnie przy użyciu prostych reguł. Wymieńmy kilka istotnych ograniczeń regulatora PID:

1. Algorytm PID jest liniowy, co oznacza, że jakość sterowania może być niewystarczająca w przypadku procesów nieliniowych.
2. Regulator PID działa niezadowolająco, gdy opóźnienie procesu jest duże.
3. Możliwe jest wymuszenie ograniczeń wartości i szybkości zmian sygnałów sterujących, ale uwzględnienie innych ograniczeń, np. związanych ze zmiennymi wyjściowymi, jest niemożliwe.
4. Regulator PID jest zwykle stosowany w przypadku procesów jednowymiarowych, tj. takich, w których występuje jedno wejście i jedno wyjście (Single Input Single Output, SISO). W przypadku procesów wielowymiarowych, z wieloma wejściami i wieloma wyjściami (Multiple Input Multiple Output, MIMO), zazwyczaj stosuje się szereg jednopętlowych regulatorów PID, ale jakość regulacji może być niezadowolająca.

Powyższe niedogodności doprowadziły do rozwoju innych algorytmów sterowania.

6.2.2. Sterowanie predykcyjne

Algorytmy regulacji predykcyjnej (Model Predictive Control – MPC), to rodzina zaawansowanych metod regulacji, wyróżniająca się bezpośrednim (online) zastosowaniem modelu matematycznego (dynamiki) regulowanego procesu [68, 297, 485]. Model procesu można oczywiście zastosować do syntezy niektórych algorytmów regulacji, np. regulatora liniowo-kwadratowego (Linear Quadratic Regu-

lator, LQR) [369] czy nawet regulatora PID, ale jest on stosowany jedynie offline, w trakcie projektowania. Cechą szczególną algorytmów MPC jest zastosowanie modelu procesu online w celu prognozowania (predykcji) sygnałów wyjściowych procesu. Drugim elementem algorytmów MPC jest procedura optymalizacji, która w każdej dyskretniej chwili próbkowania wyznacza online wartości sygnałów sterujących procesem. Celem algorytmów MPC jest zwykle minimalizacja przyszłych (prognozowanych) uchybów regulacji, np. w postaci sumy kwadratów uchybów na pewnym horyzoncie czasowym, zwanym horyzontem predykcji. Ponieważ sygnały sterujące są wyznaczone w wyniku minimalizacji, istnieje możliwość łatwego uwzględnienia różnego rodzaju ograniczeń, a także dodatkowych wymagań, np. minimalizacja kosztu funkcjonowania procesu.

Algorytmy regulacji predykcyjnej mają następujące zalety:

1. Sformułowanie regulacji predykcyjnej jest bardzo ogólne. W szczególności, można wykorzystać różne typy modeli, w tym modele liniowe lub nieliniowe, co oznacza, że algorytmy MPC można zastosować do procesów o właściwościach liniowych (w przybliżeniu) lub nieliniowych.
2. Jeśli proces charakteryzuje się opóźnieniem, należy uwzględnić opóźnienie w modelu, co pozwoli otrzymać dobrą jakość regulacji.
3. W zadaniu optymalizacji MPC można łatwo uwzględnić różne rodzaje ograniczeń.
4. Algorytmy MPC mogą regulować zarówno procesy jednowymiarowe, jak i wielowymiarowe. Liczba zmiennych wejściowych nie musi być równa liczbie zmiennych wyjściowych.
5. Strojenie algorytmów MPC jest proste, natomiast parametry mają oczywistą interpretację.
Trzeba mianowicie dobrać długość horyzontu predykcji (czas, na jaki przewidywane jest działanie procesu) i sterowania, (czas, na jaki wystawiane jest sterowanie), zdefiniować ograniczenia oraz wagi odpowiadające prognozowanym uchybom poszczególnych wyjść, a także wagi ograniczające duże zmiany sygnałów sterujących poszczególnych wejść.
6. Algorytmy MPC umożliwiają wykorzystanie mierzonego (lub estymowanego) zakłócenia, co może znacząco poprawić jakość regulacji.

W porównaniu z regulatorem PID, widzimy, że wielką zaletą algorytmów MPC jest możliwość sterowania systemami wielowymiarowymi, nieliniowymi, z opóźnieniami oraz w obecności ograniczeń. Należy jednak podkreślić, że warunkiem prawidłowego działania algorytmu MPC jest konieczność użycia dokładnego modelu oraz skutecznej procedury optymalizacji, działającej online. Ponieważ modele robotów wszelkiego typu są nieliniowe, stąd duże zainteresowanie zastosowaniem MPC do ich sterowania.

Podstawy regulacji predykcyjnej opisano w [68, 297, 431, 485, 507], natomiast zagadnienia bardziej teoretyczne, takie jak stabilność i odporność są omawiane w [153, 424]. Starsze prace przeglądowe to [138, 168, 347], natomiast przegląd zorientowany na zastosowania został przedstawiony w [416]. Artykuł [444] zawiera najnowszy przegląd z perspektywy inżynierskiej. Praca [317] omawia zagadnienia stabilności.

6.2.3. Historia i rozwój sterowania predykcyjnego

Dostępność komputerów cyfrowych pozwoliła zastosować w praktyce zaawansowane algorytmy sterowania. Pierwsze dwa słynne algorytmy MPC zostały niezależnie opracowane i zastosowane w praktyce pod koniec lat 70-tych ubiegłego wieku. Był to algorytm Model Heuristic Predictive Control (MHPC), oparty na modelach odpowiedzi impulsowej [427], a także algorytm Dynamic Matrix Control (DMC), wykorzystujący modele odpowiedzi skokowej [94]. Oba algorytmy zostały wykorzystane, i w dalszym ciągu są wykorzystywane, w przemyśle, szczególnie chemicznym, petrochemicznym i przetwórczym, umożliwiając efektywną regulację procesów wielowymiarowych. W latach 80-tych opracowano algorytm GPC (Generalized Predictive Control), wykorzystujący modele w postaci transmissji dyskretnych [89], oraz algorytm wykorzystujący modele w przestrzeni stanów [297, 485]. Podkreślimy, że wszystkie wymienione algorytmy wykorzystują modele liniowe.

Dwie cechy algorytmów MPC sprawiły, że odniosły one wielki praktyczny sukces. Po pierwsze, modele liniowe, szczególnie odpowiedzi impulsowe i skokowe, można stosunkowo łatwo wyznaczyć eksperymentalnie. Po drugie, zastosowanie modelu liniowego oznacza, że ogólne zadanie optymalizacji MPC staje się problemem programowania kwadratowego. Takie sformułowanie ma następujące zalety: poprawnie zdefiniowane problemy optymalizacji kwadratowej mają tylko jedno globalne optimum, zadania takie są obliczeniowo proste i mogą być szybko rozwiązane, dostępne są szybkie i niezawodne solwery (program znajdujący rozwiązanie zadania optymalizacji). Gdy ograniczenia nie występują lub są celowo pomijane, optymalna polityka sterowania jest obliczana analitycznie bez konieczności zastosowania online optymalizacji numerycznej.

Modele nieliniowe są wykorzystywane w algorytmach MPC od lat 90-tych ubiegłego wieku. Rozwój algorytmów MPC przebiega wielotorowo:

1. Modele liniowe nie są w stanie dobrze aproksymować właściwości procesów nieliniowych. Gdy algorytmy MPC oparte na modelach liniowych są stosowane do regulacji procesów nieliniowych, otrzymana jakość regulacji może być zła. Oczywiście, istnieje możliwość zastosowania do predykcji modeli nieliniowych, ale otrzymuje się wówczas zadanie optymalizacji nieliniowej, które musi być rozwiązywane w każdej chwili dyskretniej. Optymalizacja nieliniowa jest dużo bardziej złożona i czasochłonna w porównaniu z optymalizacją kwadratową.

Co ważne, algorytm optymalizacji nieliniowej może wyznaczyć płytkie minimum lokalne, co wiąże się z niewielką jakością regulacji. Aby rozwiązać opisywany problem opracowano rodzinę efektywnych obliczeniowo algorytmów MPC z cykliczną (online) linearyzacją modelu lub trajektorii prognozowanej [265, 485]. Pomimo zastosowania nieliniowego modelu, algorytmy te wymagają rozwiązania zadania optymalizacji kwadratowej, analogicznie jak najprostsze struktury oparte na modelach liniowych.

2. Oprócz algorytmów z cykliczną linearyzacją opracowano inne podejścia prowadzące do zagwarantowania efektywności obliczeniowej. Jako przykłady można podać rozwiązania bazujące na operatorze Koopmana [222]

(algorytm MPC wymaga optymalizacji kwadratowej) lub modeli wypukłych [269] (algorytm MPC wymaga optymalizacji wypukłej).

3. Stabilność i odporność MPC stały się ważnymi tematami badań teoretycznych [153, 424].
4. Sformułowano złożone postacie algorytmów MPC, w tym algorytmy MPC z optymalizacją punktu pracy [485], ekonomiczne MPC [118], rozproszone MPC [85] i algorytmy odporne na uszkodzenia [385].

6.2.4. Zastosowania sterowania predykcyjnego

Regulacja predykcyjna jest uważana za jedyną zaawansowaną technikę sterowania, definiowaną jako bardziej zaawansowana niż klasyczny regulator PID, która znalazła szerokie zastosowanie praktyczne [416]. Przytoczmy kilka typowych zastosowań algorytmów MPC. Tradycyjnie algorytmy MPC mogą być z powodzeniem stosowane do sterowania następującymi procesami przemysłowymi:

- reaktory chemiczne [173, 482],
- kolumny destylacyjne [26, 178],
- procesy spalania węgla w kotłach pyłowych (w elektrowniach) [164],
- szklarnie [152],
- elektrownie słoneczne [22, 135],
- oczyszczalnie ścieków [350],
- młyny [370],
- piece do wypalania cementu [461].

Zazwyczaj okres próbkowania algorytmów MPC stosowanych w sterowaniu procesami przemysłowymi jest dość długi, rzędu sekund, dziesiątek sekund lub nawet minut. Do implementacji algorytmów MPC w sterowaniu procesami przemysłowymi wykorzystywane są programowalne sterowniki logiczne (Programmable Logic Controller – PLC) oraz specjalizowane komputery przemysłowe.

Dzięki dostępności szybkich mikrokontrolerów, możliwe jest opracowanie algorytmów MPC dla szybkich procesów dynamicznych (wtedy wykorzystuje się systemy wbudowane). W przeciwieństwie do zastosowań przemysłowych, wymagają one krótkich czasów próbkowania, krótszych niż jedna sekunda, zazwyczaj rzędu milisekund. Przykładowe zastosowania szybkich algorytmów MPC obejmują:

- ogniwa paliwowe [151],
- systemy aktywnego tłumienia wibracji [483],
- silniki spalinowe [197, 423],
- drony [16, 374],
- roboty [72, 75, 357],
- serwonapędy [76],
- sterowce stratosferyczne [286],
- konwertery [528],
- falowniki elektryczne [287],
- maszyny indukcyjne [120].

Wiele prac badawczych dotyczy zastosowań motoryzacyjnych. Kilka przykładów to: autonomiczna jazda [282], autonomiczna jazda z przewidywaniem zachowa-

nia kierowcy w trakcie jazdy [81], autonomiczne wyścigi [14], kontrola trakcji [295].

Ważne zastosowania MPC dotyczą sterowania budynkami (Heating, Ventilation and Air Conditioning, HVAC). Zazwyczaj rozważana jest tylko stabilizacja temperatury wewnętrznej (stabilizacja pomimo zmian temperatury zewnętrznej, która jest zakłóceniem) [146, 468]. W bardziej zaawansowanych rozwiązaniach celem algorytmu MPC jest zapewnienie i utrzymywanie komfortu cieplnego. Algorytmy MPC mogą współpracować online z optymalizacją energetyczną, co prowadzi do minimalizacji zużycia energii [24].

Oprócz aplikacji przemysłowych i systemów wbudowanych, warto wspomnieć o kilku oryginalnych i rzadziej spotykanych zastosowaniach, w których algorytmy MPC również okazują się bardzo skuteczne:

- sieci transportu wody pitnej [384],
- systemy chłodnicze w supermarketach [440],
- ruch drogowy na autostradach [36],
- akceleratorzy fizyki wysokich energii [47],
- zarządzanie zapasami w szpitalach [298].

Warto podkreślić, że wszystkie omawiane powyżej zastosowania dotyczą rzeczywistych procesów, a nie symulacji komputerowych.

6.2.5. Wybrane zastosowania sterowania predykcyjnego w robotyce

6.2.5.1. Drony

Bezzałogowe statki powietrzne (UAV) znajdują wiele zastosowań: fotogrametria (odtworzenie kształtów, rozmiarów i wzajemnego położenia obiektów w terenie na podstawie zdjęć) [425], zdalna inspekcja [316], dostarczanie paczek [171], usuwanie skutków katastrof [17] oraz operacje poszukiwawcze i ratownicze [400]. Duże znaczenie mają drony charakteryzujące się możliwością pionowego startu i lądowania (VTOL). W pracy [375] omówiono oryginalną konstrukcję kompaktowego drona tego typu, który został zaprojektowany, zbudowany i przetestowany na Politechnice Warszawskiej. Dron został zaprojektowany z myślą o misjach dalekiego zasięgu, ma możliwość długiego zawisu, również z dużym obciążeniem. Charakteryzuje się dużą zwrotnością.

Należy podkreślić dwie cechy dronów. Po pierwsze, ze swojej natury (poruszają się w przestrzeni trójwymiarowej) i są wielowymiarowymi obiektami automatyki. Po drugie, uwzględniając zależności fizyczne, są obiektami nieliniowymi. Pomimo tego, ze względu na swoją prostotę najczęściej do sterowania dronami stosuje się klasyczne, jednopętlowe regulatory PID [288]. W celu skompensowania wpływu nieliniowości, można zastosować jeden z wielu nieliniowych regulatorów PID [348]. Przegląd możliwych wersji nieliniowych regulatorów PID w zastosowaniu do sterowania dronami, np. regulatorów rozmytych [111], podano w pracy [288].

Niestety, klasyczne liniowe lub nieliniowe regulatory PID nie pracują optymalnie biorąc pod uwagę wielowymiarowość dronów. Dlatego też świetne wyniki można

uzyskać stosując do sterowania dronów algorytmy MPC. Zalety sterowania MPC w porównaniu z klasycznym regulatorem

PID, zarówno z punktu widzenia jakości regulacji, jak i zużywanej energii przedstawiono w [374]. Istnieje możliwość zastosowanie algorytmów MPC do sterowania zespołu dronów [542]. Jak już wspomniano, zasadniczym i nieodzownym elementem algorytmów MPC jest model. Efektywność różnych typów struktur modeli w zastosowaniu do modelowania dronów, w tym kilku wersji sztucznych sieci neuronowych, omówiono w pracy [373].

6.2.5.2. Roboty

Klasyczne metody sterowania robotami wykorzystują opis fizyczny konstrukcji oraz rozwiązanie odwrotnego zadania kinematyki [92, 291, 458]. Analogicznie jak drony, również roboty są obiektami wielowymiarowymi i nieliniowymi. Z tego też powodu, zastosowanie klasycznych regulatorów PID może nie pozwalać na osiągnięcie bardzo dobrych rezultatów [71]. Do projektowania regulatora opartego na rozwiązaniu odwrotnego zagadnienia kinematyki można zastosować metody inteligencji obliczeniowej [20, 170].

Różne wersje algorytmów MPC są stosowane w robotyce mobilnej [411, 533, 505]. Algorytm MPC wykorzystujący model neuronowy robota przedstawiono w pracy [198]. Metody inicjalizacji procedury optymalizacji, rozwiązującej zadanie MPC w każdej dyskretniej chwili próbkowania, omówiono w pracy [272]. Sieć neuronowa może również pełnić rolę inteligentnego sterownika, zastępującego klasyczny algorytm regulacji MPC, wymagającego cyklicznej predykcji i optymalizacji prowadzonej online [415].

6.3. Mapy terenu

6.3.1. Struktury map terenu

Autonomiczne dotarcie do celu określonego w nieznanym środowisku jest możliwe dzięki mapie. Autonomiczne roboty używają wielu rodzajów map, w zależności od scenariusza działania. W przypadku pojazdu autonomicznego poruszającego się wewnątrz budynku lub w środowisku miejskim, wystarczające jest wykorzystanie map zajętości [496]. Na takiej mapie każda komórka struktury 2D przechowuje informację o prawdopodobieństwie, że odpowiadający jej fragment środowiska jest zajęty. Modyfikacja przedstawiona w pracy [496] pozwala na budowanie map wielowarstwowych niezbędnych do poprawnej reprezentacji na mapie obiektów, takich jak mosty, kanały i tunele. W przypadku nierównego terenu stosowanie mapy zajętości nie jest wystarczające, ponieważ nie pozwala ona robotom kroczącym, gąsienicowym i kołowym na pełne wykorzystanie ich możliwości do pokonywania nierówności terenu. W takiej sytuacji najbardziej przydatne są mapy wysokościowe (elevation maps) [41]. Pozwalają one na odzwierciedlenie wysokości poszczególnych przeszkód w modelu otoczenia. Dzięki temu podczas planowania ruchu możliwa jest autonomiczna ocena możliwości pokonania tych przeszkód przez robota.

Mapy zajętości i mapy wysokościowe jednak nie oddają pełnego kształtu 3D przeszkód w otoczeniu robota. Dlatego opracowano mapy 3D, które zwykle równomiernie dzielą przestrzeń 3D, a dane o obiektach przechowują w voxelach (komórkach trójwymiarowych). Przykładem powszechnie używanej reprezentacji 3D jest Octomap [172], w której wykorzystano drzewa ósemkowe w celu zmniejszenia zajętości pamięci. W ostatnich latach opracowano ulepszoną metodę nazywaną UFOMap, dzięki której jest możliwe przetwarzanie w czasie rzeczywistym dużych obszarów, przy użyciu dużej liczby voxelów o małych rozmiarach, dzięki czemu uzyskano dużą szczegółowość modelu [114]. Dodatkową modyfikację wprowadzono do reprezentacji NDT-OM (Normal Distributions Transform Occupancy Maps), w której kształt obiektów (odwzorowany z dystrybucji pomiarów) modelowany jest za pomocą elipsoid reprezentowanych macierzą kowariancji, co pozwala na zachowanie większej liczby szczegółów kształtów znajdujących się na mapie otoczenia robota.

Modele o wyższej rozdzielczości, takie jak generowane online siatki, powierzchnie lub chmury punktów, są rzadko używane do planowania ruchu ze względu na konieczność czasochłonnego sprawdzania ograniczeń dla ruchu robota. Ostatnio opracowane neuronowe reprezentacje sceny, takie jak NeRF [341] lub NeuS [508], które wykorzystują funkcję odległości do modelowania powierzchni obiektów, przyciągnęły uwagę środowiska zajmującego się wizją komputerową i robotyką. Oryginalna metoda pokazuje, że prosta sieć MLP (Multi Layer Perceptron) może reprezentować scenę z dużą dokładnością, gdy jest trenowana tylko na obrazach RGB. Metoda NeRF została opracowana do generowania obrazów sceny widzianych z nowych pozycji kamery. Wyniki pokazują jednak, iż sieć taka mimo, że nie jest trenowana w tym celu, przekazuje również informację o geometrii sceny. Główną wadą NeRF w zastosowaniach robotycznych jest konieczność wstępnego trenowania sieci neuronowej dla sceny, która została wcześniej zarejestrowana z wielu punktów widzenia. Procedura ta jest czasochłonna i nieakceptowalna w większości scenariuszy związanych z pojazdami autonomicznymi. W przypadku innej metody, nazwanej InstantNGP, czas trenowania sieci został znacznie skrócony, przy użyciu kodowania mieszającego (hash encoding) [351]. Alternatywą dla metod wykorzystujących modele neuronowe – w wielu sytuacjach szybszą i bardziej intuicyjną – jest metoda Gaussian Splatting [215], która korzysta ze zbioru elipsoid do modelowania sceny, które w odróżnieniu od wyżej wymienionych map NDT-OM, nie są powiązane z voxelami.

6.3.2. Budowa map terenu dla robotów lądowych

Istnieje wiele metod budowy mapy terenu używanych w systemach nawigacji robotów lądowych (UGV – Unmanned Ground Vehicle – bezzałogowy pojazd naziemny). Różnią się one:

- źródłem informacji – czujnikami, które dostarczają dane,
- rodzajem algorytmu łączącego dane (podejście klasyczne: geometryczne lub probabilistyczne, albo oparte na uczeniu maszynowym)
- zastosowaniem – część technik mapowania powiązana jest z systemami jednoczesnej lokalizacji i budowy mapy (SLAM), natomiast część tworzy mapy przeznaczone głównie do oceny przejezdności (traversability) terenu.

Takie mapy, nazywane niekiedy mapami kosztu (cost map) służą jako podstawa do planowania ścieżek robotów mobilnych. Mapy związane z algorytmami SLAM dość często są zoptymalizowane tylko dla tego problemu i nie tworzą „gęstej reprezentacji” terenu przydatnej w planowaniu ruchu. W związku z tym tutaj koncentrujemy się na dedykowanych metodach tworzenia mapy przejezdności terenu, zakładając, że pozycja (położenie i orientacja) pojazdu jest znana. Zazwyczaj jest ona wyznaczana przez inny algorytm, którego dokładność lokalizacji ma jednak wpływ na jakość budowanej mapy.

Do budowy mapy 3D można użyć tradycyjne kamery RGB oraz wykorzystać sztuczne sieci neuronowe do estymacji głębi [543] lub skanerów laserowych o wysokiej rozdzielczości kątowej ze zwiększoną liczbą punktów pomiarowych [175]. Uzyskane pomiary głębi przetworzone na „gęstą” chmurę punktów są następnie używane do budowania szczegółowego modelu otoczenia. Opracowany w ten sposób model otoczenia może być następnie wykorzystany do planowania bezkolizyjnego ruchu robota.

Metody mapowania terenu oparte na jego wyglądzie wykorzystują przetwarzanie obrazów z kamer oraz mapy cech generowane na podstawie danych wizyjnych, aby stworzyć mapy kosztu przejezdności. Na przykład, w pracy [110] zastosowano sieci konwolucyjne (CNN), które przekształcają obrazy wejściowe w mapy kosztów używane następnie do planowania trasy w czasie rzeczywistym. Podejście to pozwoliło na skuteczne nawigowanie w środowiskach o znacznej zmienności, takich jak tereny z różnorodnymi przeszkodami czy zmienną topografią. W przypadku bardziej zaawansowanych metod stosowane są również algorytmy segmentacji semantycznej, które klasyfikują różne obszary terenu na podstawie cech tekstury i barwy [430]. Jednakże metody te, choć szybkie, mogą być mniej dokładne w ocenie szczegółowych cech geometrycznych terenu niż metody oparte na danych z sensorów odległości, co ogranicza ich zastosowania.

Techniki geometryczne opierają się na analizie fizycznych właściwości terenu, takich jak nachylenie, nierówność (roughness), czy różnice wysokości. W pracy [80] wprowadzono algorytm probabilistycznego mapowania relatywnego (RPM), który dzielił środowisko na komórki (tzw. mapę rastrową) i analizował cechy takie jak wariancja wysokości w poszczególnych komórkach. Użycie filtracji Kalmana do aktualizacji danych pomiarowych pozwalało na tworzenie dokładnych map wysokości (elevation map) w czasie rzeczywistym, co było szczególnie przydatne w nawigacji w niestrukturalnych środowiskach. Innym przykładem jest metoda wykorzystująca dane z kamer Time- of-Flight (ToF) w celu generowania chmur punktów 3D oraz modelowania dynamicznych parametrów pojazdu, takich jak przyspieszenie pionowe [520]. Metody te cechują się dużą skutecznością, ale mogą wymagać większych zasobów obliczeniowych.

Podejścia mieszane łączą dane wizyjne i geometryczne, co pozwala na bardziej kompleksową ocenę przejezdności terenu. W pracy [430] połączono dane z kamer i czujników LiDAR, tworząc mapy semantyczne w oparciu o segmentację obrazów oraz analizę chmury punktów. Takie mapy umożliwiały dokładne odwzorowanie terenu i lepsze planowanie tras w złożonych środowiskach. W innym podejściu użytym w [545] wykorzystano sieci neuronowe do analizy danych wizyj-

nych w połączeniu z oceną trajektorii, co pozwoliło na bardziej precyzyjne modelowanie trudnego terenu, w takich środowiskach jak lasy czy tereny skaliste. Dodatkowo, fuzja danych wizyjnych i geometrycznych umożliwia dynamiczne aktualizowanie map przejezdności w czasie rzeczywistym, co jest kluczowe w zmieniających warunkach środowiskowych.

Jednym z bardziej obiecujących nowych podejść opartych na łączeniu danych z różnych sensorów oraz wykorzystaniu uczenia maszynowego jest Bird's Eye View (BEV). Metoda ta została wykorzystana w systemie TerrainNet [321] do mapowania terenu dla autonomicznej nawigacji w trudnym terenie. Podejście to łączy przetwarzanie obrazu w celu modelowania zarówno semantyki, jak i geometrii terenu w przestrzeni BEV, co umożliwia precyzyjne planowanie tras. Ważnym elementem jest proces projekcji cech obrazu na przestrzeń BEV. System TerrainNet wykorzystuje tzw. operację „lift-splat”, w której pikselowe cechy obrazu są najpierw przenoszone do przestrzeni 3D na podstawie głębokości (użytkiwanej ze stereo kamer lub sensorów LiDAR), a następnie rzutowane na płaską mapę BEV przy użyciu miękkiej kwantyzacji. Miękka kwantyzacja eliminuje błędy projekcji, pozwalając na bardziej precyzyjne mapowanie w czasie rzeczywistym. Dane wejściowe pochodzą z kamer wizyjnych w układzie mono i stereo, co zapewnia bogate informacje semantyczne i geometryczne. Algorytm wprowadza też uzupełnianie głębokości (depth completion), które koryguje błędy oraz wypełnia luki w danych o głębokości, co jest kluczowe w środowiskach o złożonej topografii. Uzyskane mapy BEV składają się z warstw semantycznych i geometrycznych, które obejmują nie tylko powierzchnię gruntu, ale również elementy nadziemne, takie jak gałęzie drzew.

Integracja różnych technik mapowania, takich jak metody geometryczne, wizyjne oraz mieszane, jest kluczowa dla skutecznej oceny przejezdności terenu w niestrukturalnych środowiskach. Taka integracja pozwala na tworzenie systemów nawigacji robotów lądowych, które są bardziej niezawodne i zdolne do adaptacji w trudnych warunkach terenowych.

6.4. Lokalizacja robotów lądowych w środowiskach o ograniczonym dostępie do nawigacji satelitarnej

Zazwyczaj roboty lądowe nawigują korzystając z systemów satelitarnych GNSS (Global Navigation Satellite System). W wielu zastosowaniach cywilnych (rolnictwo, logistyka) lokalizacja na dużych obszarach opiera się na systemach nawigacji satelitarnej GNSS, takich jak NAVSTAR, Galileo, GLONASS czy Beidou, powszechnie określanych jako GPS (Global Positioning System) [31]. Precyzyjna lokalizacja wymaga zastosowania GPS różnicowego (DGPS – differential GPS), gdzie sygnały korekcyjne transmitowane są ze stacji naziemnej, osiągając dokładność do jednego metra. Niemniej, przeszkody terenowe, takie jak lasy czy korony drzew, mogą ograniczać widoczność satelitów, obniżając dokładność nawet w obecności sygnału DGPS. Zaawansowane warianty GNSS, takie jak Real-Time Kinematic (RTK) oraz Precise Point Positioning (PPP), są powszechnie stosowane, pozwalając osiągnąć dokładność na poziomie centymetrów, co jest

istotne w niektórych zastosowaniach [361]. Pomimo swoich możliwości, systemy GNSS nadal są narażone na szereg ograniczeń technicznych i środowiskowych, zwłaszcza w środowisku miejskim, gdzie takie czynniki jak zaniki sygnału, wielodrogowość oraz celowe zakłócanie sygnału (spoofing) mogą być przyczyną istotnych błędów w pozycjonowaniu [119]. Potencjał do poprawy precyzji nawigacji lądowej tkwi w integracji danych GNSS z danymi z innych sensorów, co pozwala na optymalne połączenie informacji o położeniu i ruchu pojazdu z różnych źródeł. Dzięki tej fuzji, jeśli jest skutecznie stosowana, uzyskujemy niezawodne rozwiązanie dla zastosowań wymagających precyzyjnej nawigacji w kontekstach cywilnych i wojskowych oraz w sytuacjach o wysokim poziomie ryzyka operacyjnego.

Zaawansowane techniki RTK i PPP umożliwiają precyzyjne i szybkie uzyskiwanie danych o położeniu, co okazuje się niezwykle przydatne w takich obszarach, jak autonomiczne systemy transportowe, rolnictwo precyzyjne oraz usługi geolokalizacyjne [236]. RTK wykorzystuje dodatkowe dane do korekty sygnałów satelitarnych, zazwyczaj poprzez stacje bazowe, aby zapewnić szybkie i bardzo dokładne pozycjonowanie, podczas gdy PPP opiera się na precyzyjnych korektach zegara satelitów i ich znanych orbit, osiągając podobny poziom precyzji bez potrzeby lokalnych stacji bazowych [19]. Metody RTK i PPP, w połączeniu z udoskonalonymi rozwiązaniami sprzętowymi, pozwalają na uzyskanie dokładnych systemów pozycjonowania spełniających wymagania wielu systemów. Pozostają jednak istotne ograniczenia. Wymagane są odbiorniki GPS o podwójnej częstotliwości i multi-konstelacyjne, a także sygnał korekcyjny ze stacji naziemnej [310]. Choć systemy RTK z pojedynczą częstotliwością są tańsze, ich niezawodność spada, gdy liczba widocznych satelitów jest niewystarczająca lub sygnał korekcyjny jest okresowo tracony. Dodatkowo, jakość sygnału korekcyjnego obniża się na większych odległościach od stacji bazowej, a jego transmisja przez sieć GSM zwiększa koszty i zależność od zasięgu i sprawności tej sieci.

Te ograniczenia sprawiają, że lokalizacja z wykorzystaniem GNSS i korekcji zewnętrznej jest odpowiednim rozwiązaniem głównie w przypadku kosztownych pojazdów działających w „przyjaznym” środowisku, np. w logistyce. Mniejsze roboty mobilne lub pojazdy działające w środowisku silnie niesprzyjającym (gęsty las, wysokie zabudowania, obecność celowych zakłóceń) wymagają tańszych i łatwiejszych w utrzymaniu rozwiązań, mniej zależnych od zewnętrznej infrastruktury.

Coraz częściej systemy GNSS są integrowane z systemami inercyjnymi (INS – Inertial Navigation System) i innymi czujnikami, takimi jak kamery i skanery laserowe (LiDAR), tworząc odporne na zakłócenia systemy nawigacyjne. Fuzja danych GNSS z INS, znana jako zintegrowane systemy GNSS-INS, pozwala na zwiększenie dokładności i niezawodności pozycjonowania, szczególnie w środowiskach, w których sygnały GNSS są chwilowo blokowane przez budynki, drzewa lub inne przeszkody [150]. Integracja systemów GNSS-RTK z czujnikami INS znacząco zwiększa niezawodność i odporność na zakłócenia sygnału, co sprawia, że rozwiązania te są odpowiednie dla dynamicznych i wymagających środowisk [51].

W sytuacjach, gdy pomiary GNSS są niedostępne lub zakłócone, alternatywą mogą być algorytmy SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) lub odome-

trii wizyjnej (Visual Odometry) umożliwiające lokalizację robota naziemnego. W metodach SLAM robot buduje mapę otoczenia jednocześnie określając swoje położenie na tej mapie, natomiast odometria wizyjna jest prostsza, ponieważ określa jedynie trajektorię robota na podstawie estymaty ruchu pojazdu pomiędzy kolejnymi obserwacjami, bez globalnej mapy. Mimo użycia technik optymalizacji nieliniowej w SLAM, a co za tym idzie rozwoju metod opartych na grafach [255], zastosowanie SLAM w robotach lądowych operujących w zróżnicowanym terenie jest rzadkie. Wysoki koszt sensorów typu LiDAR oraz ich nadal znaczna wielkość i pobór energii ograniczają ich zastosowanie w niektórych klasach robotów i scenariuszach użycia. Z drugiej strony, brak wyrazistych cech oraz zmienność pokrytych roślinnością terenów zmniejsza skuteczność metod opartych na odometrii wizyjnej i wizualnym SLAM, które w innych obszarach zastosowań są uważane za efektywne [454]. Podstawową słabością metod SLAM, zarówno wizyjnego jak i laserowego w rozważanym tu kontekście aplikacji militarnych i pokrewnych jest brak dowiedzionej skuteczności podczas długotrwałego, autonomicznego działania. Z drugiej jednak strony, integracja pomiarów pozycji absolutnej GNSS z danymi z systemu SLAM może ograniczyć dryf estymowanych trajektorii robota także w rozwiązaniach GNSS-INS.

W scenariuszach użycia o wysokich wymaganiach, takich jak operacje wojskowe i działania ratownicze, gdzie niezawodność pozycjonowania GNSS jest kluczowa, wykorzystywane są dedykowane rozwiązania sprzętowe. Urządzenia, takie jak odbiorniki GNSS z podwójną częstotliwością oraz układy wieloantenowe, stosowane są do niwelowania błędów wielodrogowości i ataków typu spoofing [355]. Wojskowe odbiorniki GNSS często wyposażone są w specjalne moduły przeciwdziałania zagłuszaniu i spoofingowi, co podnosi ich odporność w środowiskach, w których sygnały GNSS mogą być celowo zakłócone [435]. Ponadto zaawansowane odbiorniki PPP z obsługą podwójnych lub wielokrotnych częstotliwości oraz funkcjami fuzji dodatkowych sensorów zapewniają większą dokładność i niezawodność pozycjonowania [115].

W przypadku zastosowań pojazdów autonomicznych w zadaniach ratownictwa, gdzie dokładność pozycjonowania jest kluczowa dla koordynacji pojazdów (robotów) poszukiwawczych i zespołów pomocniczych, systemy oparte na GNSS odgrywają znaczącą rolę. Zintegrowane rozwiązania GNSS umożliwiają niezawodne lokalizowanie pojazdów ratunkowych i odnalezionych ofiar, nawet w obszarach o ograniczonej dostępności sygnału GNSS, takich jak ruiny w mieście czy w gęstych lasach. Ponadto niezawodne pozycjonowanie oparte na GNSS jest istotne dla mapowania i oceny obszarów dotkniętych katastrofą [180]. Fuzja danych GNSS z innymi sensorami zapewnia ciągłość pozycjonowania, co pozwala ratownikom na efektywną nawigację w trudno dostępnych terenach i wspiera operacje, w których czas odgrywa kluczową rolę.

Wczesne prace nad poprawą lokalizacji satelitarnej pojazdów opierały się na fuzji danych z GNSS i SLAM z użyciem skanerów laserowych 2D oraz filtracji Kalmana [185]. Na przykład stosowano rozszerzony filtr Kalmana (EKF – Extended Kalman Filter) [504] lub bezśladowy filtr Kalmana (UKF) [82] do łączenia danych GNSS z estymatami pozycji z systemów SLAM wykorzystujących LiDAR oraz pomiary inercyjne.

Systemy lokalizacji luźno sprzęgające GNSS i LiDAR, takie jak opisanie w [165] i [278], oparte są często na rozwiązaniach SLAM dla sensora LiDAR wywodzących się ze znanego algorytmu LOAM (Lidar Odometry and Mapping) [539], ale wymagają zewnętrznych korekt (RTK w [165] oraz PPP w [278]). System LIO-SAM [450], stosuje luźną integrację pozycji GNSS w celu poprawy spójności globalnej, lecz uzyskuje większą dokładność przy ścisłej integracji surowych pomiarów GNSS. W pracy [514] podkreślono korzyści wynikające ze ścisłej integracji, w której wykorzystywane są surowe pomiary, takie jak pseudoodległości i przesunięcie Dopplera, w przeciwieństwie do metod luźnych, opartych na estymacji pozycji przez odbiornik GNSS. Ścisła integracja w ramach filtru Kalmana łączącego GNSS z LiDAR była wykorzystywana m.in. w [279], a optymalizacja grafowa z danymi inercyjnymi w [513], ze SLAM wizualnym w [285] oraz z LiDAR SLAM w [78]. Metoda opisana w pracy [78] bazuje na surowych pomiarach GNSS, lecz nie nadaje się do dużych środowisk miejskich, a także wymaga specjalistycznego sprzętu do integracji pomiarów inercyjnych.

Alternatywą dla filtrów Kalmana i podejść luźnych jest graf czynnikowy (factor graph), który lepiej radzi sobie z reprezentacją optymalizacji nieliniowych problemów najmniejszych kwadratów, choć nadal zakłada zakłócenia gaussowskie. Dla pomiarów GNSS pozbawionych widoczności satelitów (NLOS – Non Line of Sight), metoda [512] stosuje model mieszanin gaussowskich do identyfikacji odchylenia od rozkładu Gaussa. W pracy [95] problem ten rozwiązano prostszą metodą, wykorzystującą filtrację opartą na ograniczeniach prędkości pojazdu, którą szacuje się na podstawie estymaty ruchu uzyskanej z LiDAR SLAM. Badania [514] wskazują, że optymalizacja oparta na grafie czynnikowym jest skuteczniejsza od EKF w przypadku integracji GNSS z pomiarami inercyjnymi, eliminując problemy z odchyleniami (bias) i błędami linearyzacji.

6.5. Planowanie ruchu

Metody planowania ruchu są silnie powiązane ze scenariuszem misji. Jeżeli dostępna jest pełna mapa środowiska i można założyć, że istotne elementy tej mapy nie ulegną zmianie, to globalna ścieżka może zostać zaplanowana na podstawie utworzonej mapy rastrowej, a ruch można zaplanować korzystając z algorytmu A* [163] lub metod geometrycznych, takich jak diagram Voronoja, graf widoczności czy podział na komórki (cell decomposition) [264]. W przypadku znacznych zmian w mapie, możliwe jest replanowanie pierwotnej ścieżki np. z użyciem metody D*-Lite [465].

W typowym scenariuszu misji najwięcej zmian wymagających ponownego planowania ruchu zachodzi w bliskim otoczeniu robota. Takie planowanie ruchu robota autonomicznego może być oparte na mapie uzyskanej dzięki czujnikom pokładowym. W zależności od rodzaju robota, wybranej mapy i scenariusza działania można stosować algorytmy należące do dwóch grup: metod wykorzystujących równomierny podział przestrzeni oraz metod próbujących tę przestrzeń. W pierwszym przypadku zastosowanie ma graf utworzony na podstawie mapy rastrowej, a ścieżkę ruchu znajduje się korzystając z metod przeszukiwania grafu, takich jak A* lub D*-Lite. Zaletą tej grupy algorytmów jest gwarancja znale-

zienia ścieżki ruchu robota o najmniejszym koszcie dla mapy o danej rozdzielczości. Wadą tego podejścia jest kwestia rozmiaru komórek mapy, ponieważ zmniejszanie tego rozmiaru prowadzi do znacznego wydłużenia czasu przeszukiwania grafu.

W sytuacji, gdy mapa rastrowa nie ma wystarczającej rozdzielczości lub czas planowania jest zbyt długi, możliwe jest wykorzystanie metod próbkujących przestrzeń poszukiwań. Do tej grupy należą algorytmy takie jak Probabilistic Roadmap (PRM) [213], Rapidly-exploring Random Trees (RRT i wersja RRT-Connect) [263, 254] czy RRT* [199], które tworzą graf lub drzewo na podstawie losowo wybranych punktów. Można tu oczekiwać płynniejszych ruchów robota, nieograniczonego skutkami dyskretyzacji przestrzeni, oraz precyzyjnego spełnienia ograniczeń nałożonych na ruch robota, takich jak kolizje z przeszkodami oraz stabilność statyczna i dynamiczna robota. Choć metody te nie gwarantują znalezienia najkrótszej ścieżki w skończonym czasie, to jednak z praktycznego punktu widzenia, uzyskane ścieżki ruchu cechują się dużą przydatnością.

W ostatnim czasie dużą popularnością cieszą się też metody neuronowe planowania ruchu. Przykładem takiej metody jest MPNet (Masked and Permuted Pre-training), w której sieć neuronowa określa iteracyjnie kolejne pozycje robota na podstawie mapy [418]. Innym przykładem jest wykorzystanie sieci neuronowej do planowania trajektorii ruchu robota z użyciem funkcji sklepanych B-Spline [216]. Są też metody hybrydowe, które łączą klasyczne metody próbkowania przestrzeni poszukiwań z metodami neuronowymi. W tym przypadku sieć neuronowa służy jako narzędzie przyspieszające przeszukiwanie przestrzeni poprzez wskazywanie na mapie miejsc bezpiecznych dla robota [506].

6.6. Bezpieczne planowanie ruchu w systemach autonomicznej nawigacji

Jednym z istotnych aspektów bezpieczeństwa systemów autonomicznych jest ich odporność na wszelkiego rodzaju zakłócenia, w tym również częściowe awarie sprzętu oraz celowe działania takie, jak cyberataki. Bezpieczeństwo autonomicznych robotów można zdefiniować jako spełnienie ograniczeń na stan (ograniczenia dotyczące pozycji i prędkości oraz unikanie kolizji) na nieskończonym horyzoncie czasowym bez przekraczania dopuszczalnych wartości sterowania. Bardzo szybki rozwój metod, w szczególności technik głębokiego uczenia maszynowego spowodował, że systemy sterowania i autonomicznej nawigacji robotów mobilnych, które je wykorzystują, stają się coraz bardziej skuteczne i wydajne. Metody te są stosowane w samochodach autonomicznych [540], robotach poszukiwawczo-ratowniczych [362] oraz dronach [18, 79]. Jednakże, skuteczność i wydajność jest osiągana kosztem przejrzystości struktury, braku gwarancji bezpieczeństwa lub stabilności, niezawodności oraz odporności na zakłócenia tychże systemów. Ponadto zagwarantowanie bezpieczeństwa przed wdrożeniem robotów może być trudne ze względu na nieoczekiwane zakłócenia, które mogą pojawić w czasie działania robota.

Wiele pożądaných właściwości systemów dynamicznych, w tym stabilność, bezpieczeństwo i odporność na zakłócenia można udowodnić za pomocą tzw. funkcji certyfikacji. Najbardziej znanymi z nich są funkcje Lapunowa, funkcje bariery sterowania oraz metryki kontrakcji [101, 179]. Metody Lapunowa są używane do analizy stabilności systemów dynamicznych wokół punktu pracy, natomiast metody bariery dotyczą określenia gwarancji, że trajektorie systemu pozostają w bezpiecznym obszarze przestrzeni stanu. Metody metryki kontrakcji z kolei umożliwiają formalne wykazanie, że para trajektorii zbiega do siebie w określony sposób [139].

Planowanie ruchu jest jednym z podstawowych zadań systemu autonomicznej nawigacji. Zazwyczaj, aby uprościć projektowanie algorytmów planowania ruchu, zakłada się, że zaplanowana trajektoria jest śledzona dokładnie, co jest nierealistycznym założeniem w wielu rzeczywistych scenariuszach, aw szczególności w środowisku pola walki. Niepewność związana z zakłóceniami może spowodować, że rzeczywista trajektoria robota będzie znacznie odbiegać od trajektorii zadanej, powodując kolizje, zwłaszcza gdy nominalna trajektoria jest wykonywana w pętli otwartej.

Jednym z możliwych rozwiązań tego problemu jest planowanie ruchu ze sprzężeniem zwrotnym [300, 541]. Ma ono na celu złagodzenie wpływu niepewności przez zastosowanie regulatora nadążnego, który śledzi zadaną trajektorię. Zapewnienie bezpieczeństwa robota wymaga zaprojektowania takiego regulatora oraz obliczania tzw. „tuby” (tube) lub „leja” (funnel) wokół trajektorii zadanej, który gwarantuje, że rzeczywista trajektoria jest w nim zawarta pomimo występowania zakłóceń [300]. Podejście to umożliwia odporne planowanie lokalnej trajektorii ruchu, jednakże liczba dostępnych trajektorii jest z góry określona.

W pracach [302, 541, 453] tuby są obliczane z wykorzystaniem tzw. „metryk kontrakcji sterowania”. Metryki te, będące uogólnieniem funkcji Lapunowa, są wykorzystywane do syntezy odpornych regulatorów nadążnych. Metryka kontrakcji umożliwia przeprowadzenie dowodu, że system sterowania jest w stanie wykładniczo stabilizować każdą dynamicznie wykonalną, nominalną trajektorię ruchu. Do obliczenia metryk kontrakcji mogą być wykorzystane metody optymalizacji wypukłej, np. sekwencyjnego programowania kwadratowego [139, 453]. Z kolei tuby dla regulatorów nadążnych można wyznaczyć na podstawie związanych z nimi współczynników kontrakcji oraz założonych maksymalnych wartości zakłóceń. Funkcje bariery sterowania są również wykorzystywane do syntezy sterowników robotów odpornych na błędy czujników i cyberataki [538]. Autorzy opracowali nową klasę funkcji barier sterowania nazywanych odpornymi na błędy neuronowymi funkcjami barier sterowania.

Wyżej wymienione metody koncentrują się na generowaniu trajektorii odpornych na zewnętrzne zakłócenia lub niemodelowane siły (np. wiatr, tarcie), nie uwzględniają jednak potencjalnych zmian parametrów modelu robota podczas działania, takich jak zmiany masy lub przemieszczenia środka masy.

Podejście zaproponowane w pracy [12] uwzględnia wrażliwość układu sterowania z pętlą zamkniętą zarówno na niepewność parametrów modelu jak i stanu początkowego systemu. Wrażliwość ta jest wykorzystywana do obliczenia tuby wo-

kół trajektorii nominalnej/zadanej, która uwzględnia najgorszy przypadek biorąc pod uwagę rozważne niepewności. Tuba ta ogranicza obwiednię wszystkich zaburzonych trajektorii. Zakładając zatem, że odchylenia od trajektorii nominalnej są ograniczone, to generowane trajektorie są zawarte w tubie i odporne na oba rodzaje niepewności.

Większość opracowanych algorytmów obliczania certyfikatów bezpieczeństwa wymaga dużych nakładów obliczeniowych np. rozwiązywania wielowymiarowych różniczkowych równań cząstkowych. Z kolei ręczne poszukiwanie funkcji certyfikujących dla konkretnych systemów wymaga dużo wysiłku. Zatem tradycyjne metody analizy bezpieczeństwa mogą być trudne do zastosowania w systemach robotycznych, gdzie dynamika i interakcje są złożone. Dlatego też pojawiły się podejścia polegające na zastosowaniu technik opartych na uczeniu maszynowym, takich jak sieci neuronowe, do generowania certyfikatów, które mogą być używane do oceny stabilności i bezpieczeństwa systemów sterowania i nawigacji robotów [101, 529].

6.7. Analiza pojedynczych obrazów i ich sekwencji

Robot do zadań specjalnych, stosowany do tłumienia rozruchów lub uczestniczący w konflikcie zbrojnym, musi być w stanie rozpoznać intencje uczestników tych zajęć. Aby reagować adekwatnie do zachowań ludzi, unikając nieuzasadnionego stosowania siły, musi rozpoznawać aktualne działania osób i wnioskować o ich przyszłych zachowaniach na podstawie informacji niewerbalnej. Najlepszym źródłem takiej informacji jest obraz. Wszakże trzeba w nim rozpoznać sylwetki osób i na tej podstawie określić ich intencje.

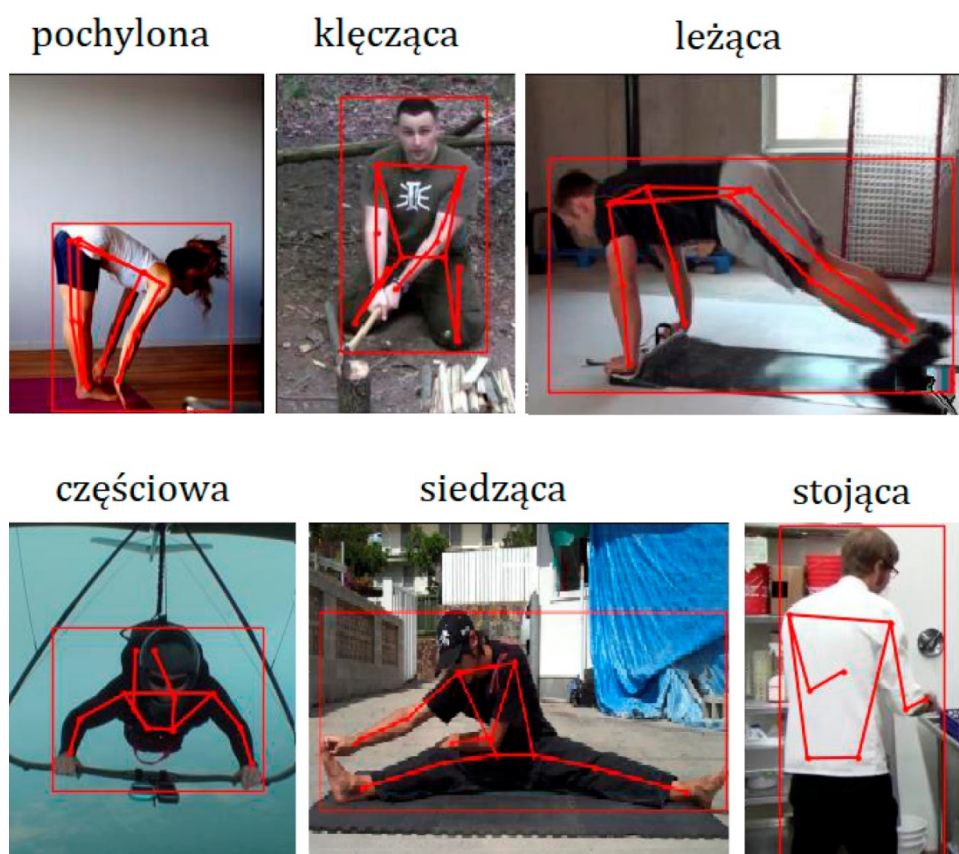
6.7.1. Estymacja pozy sylwetki człowieka

W ostatnich latach techniki głębokiego uczenia są często stosowane do analizy obrazu, w tym do wykrywania i analizy ułożenia ludzkiego ciała. YOLO (You Only Look Once) [426] to jedna z najskuteczniejszych i najszybszych technik wykrywania obiektów, która została zaadaptowana do wielu zadań, w tym do wykrywania i rozpoznawania znaków drogowych, bądź predykcji pozycji szkieletu ludzkiego. YOLO-Pose [299] to rozszerzenie tej techniki, które umożliwia wykrywanie szkieletu na podstawie częściowo widocznej sylwetki. Porównanie modelu YOLO-Pose, będącego częścią nowszej wersji sieci neuronowej YOLOv8¹ z innymi znanymi modelami estymacji pozy, takimi jak OpenPose [70] czy HRNet [474], wskazuje na wyższą skuteczność metody YOLO.

Dane szkieletowe mogą być elementem systemu rozpoznawania gestów, akcji dynamicznych lub interakcji dwóch osób. Mogą też posłużyć bezpośrednio do klasyfikacji samej pozy człowieka. Przykładem są klasy póz wyróżnione w zbiorze LSP/MPII-MPHB [67]: sylwetka pochylona – co najmniej jedna część ciała jest zgięta, klęcząca – co najmniej jedno kolano dotyka podłoża, leżąca – w pozycji horyzontalnej i na plecach, częściowa – przysłonięta przez inne obiekty, tylko

¹ <https://github.com/ultralytics/ultralytics>

część szkieletu jest widoczna, siedząca – pośladki czegoś dotykają, wyprostowana – stojąca, bez żadnych zgięć (rys. 6.1).



Rysunek 6.1. Klasy póz sylwetki w zbiorze LSP/MPII-MPHB

6.7.2. Zastosowania automatycznej estymacji pozy

Automatyczne, skuteczne i szybkie rozwiązanie problemu estymacji pozy może być niezwykle pomocne w wielu zastosowaniach autonomicznych agentów zaopatrzonych w sztuczną inteligencję. W diagnostyce medycznej pozwala na wczesne wykrywanie wad postawy u dzieci i młodzieży [466]. W sporcie wyczynowym estymacja taka wspomaga szkolenie zawodników poprzez analizę ułożenia sylwetki podczas treningu czy zawodów. Można jej używać do sterowania maszyną za pomocą poleceń wydawanych przez użytkownika poprzez przyjmowanie póz statycznych lub dynamicznych [161]. W tym drugim przypadku odtwarzana jest sekwencja póz (gesty dynamiczne). Pozwala to na automatyzację reakcji systemów bezpieczeństwa z wideo-monitoringiem. Oprócz wykrywania osób w scenie, system taki może także wspierać identyfikację potencjalnego zagrożenia wykrywając osoby nieupoważnione do przebywania w danym miejscu lub podejmujące podejrzane działania. Pozwala też na szybsze reagowanie na zdarzenia i wypadki [93]. W autonomicznej robotyce usprawnia nawigowanie w środowisku ludzkim, które wymaga omijania ludzi lub wyboru osoby, którą ma obsłużyć. Innym zastosowaniem estymacji pozy jest uczenie robota humanoidalnego wykonywania czynności przez ich demonstrowanie przez człowieka.

6.7.3. Analiza akcji i interakcji osób w sekwencji wideo

Klasyfikacja aktywności ludzkich w sekwencji wideo polega na detekcji sylwetek osób w obrazie, ich śledzeniu w czasie i przypisaniu wykrytej sekwencji pól do jednej ze znanych klas. W ostatnich latach mocno rozwijanym rozwiązaniem jest korzystanie z danych szkieletowych sylwetki w analizowanych klatkach wideo. Najnowsze rozwiązania wykorzystują sieci grafowo-splotowe (np. ST-GCN [532, 544]) oraz łączą wstępnie przetworzone klatki wideo RGB z danymi szkieletowymi dla tych ramek (np. PoseConv3D [113]). Korzystając z grafowej struktury danych szkieletowych, sieci grafowo-splotowe mogą uczyć się wyznaczania cech zarówno w przestrzeni, jak i w czasie, w celu efektywnej reprezentacji i klasyfikacji akcji (rys. 6.2).

6.8. Komunikacja człowiek-maszyna w języku naturalnym

Aby zapewnić interoperacyjność robotów, czyli zdolność do współdziałania z innymi systemami bądź żołnierzami, muszą one być w stanie komunikować się z pozostałymi uczestnikami działań. Najłatwiej będzie ludziom komunikować się z robotami za pomocą języka naturalnego, tak jak to robią żołnierze między sobą. Stąd zainteresowanie przetwarzaniem języka naturalnego (NLP – Natural Language Processing).

6.8.1. Przetwarzanie języka naturalnego

Przetwarzanie języka naturalnego (NLP) to obszar informatyki, który zajmuje się komunikacją międzyludzką i ma na celu pomóc maszynom rozumieć, interpretować i generować ludzki język. Tradycyjne metodyki NLP oparte są na językoznawstwie, budują rozwiązanie na podstawie podstawowej semantyki i elementach składniowych języka, takich jak części mowy [187]. Nowoczesne podejścia „głębokiego uczenia” mogą omijać potrzebę stosowania uznanych elementów pośrednich i mogą uczyć się własnych reprezentacji.

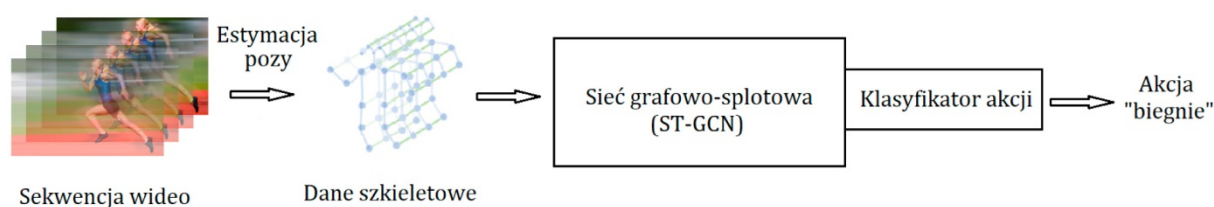
6.8.1.1. Era językoznawstwa w NLP

Za pierwszy ważny kamień milowy metod NLP uznaje się eksperyment IBM Georgetown z 1954 roku, w którym zaprezentowano tłumaczenie maszynowe około 60 zdań z języka rosyjskiego na angielski [176]. Odkryto wtedy niektóre z wyzwań związanych z syntaktyczną, semantyczną i językową różnorodnością wyrażen języka i podjęto próbę rozwiązania tego problemu.

W 1957 roku Noam Chomsky opublikował książkę *Syntactic Structures*, w której podkreślił znaczenie składni zdania w rozumieniu języka [83]. Próby realizacji w 1958 roku tzw. „testu Turinga” za pomocą języka, takiego jak LISP Johna McCarthy’ego, i ELIZA (pierwszy chatbot) wywarły ogromny wpływ nie tylko na NLP, ale na całą dziedzinę AI.

Lata 1960–1970 to okres, w którym kładziono nacisk na semantykę, a nie na struktury składniowe. Gramatyki, takie jak „gramatyka przypadków” (case grammar), która badała relacje między rzeczownikami i czasownikami, odegrały

istotną rolę. Rozszerzone sieci przejścia (Augmented Transition Networks, ATN) to technika polegająca na poszukiwaniu najlepszej składni dla frazy zdaniowej. Znaczącym osiągnięciem była również „zależność pojęciowa” („conceptual dependency”) Schanka, która wyrażała język w kategoriach prymitywów semantycznych bez przetwarzania składni [443]. Jego system SHRDLU rozumiał podstawowe pytania i odpowiadał na nie w języku naturalnym przy użyciu składni, semantyki i rozumowania. LUNAR autorstwa Woodsa [523] był pierwszym systemem odpowiadania na pytania, który łączył rozumienie języka naturalnego z systemem opartym na logice. Sieci semantyczne, które ujmują wiedzę w postaci grafu, stały się elementem wielu pracach tej epoki [417], [49], [131]. Na początku lat osiemdziesiątych rozpoczęła się faza gramatologiczna, w której językoznawcy opracowali różne struktury gramatyczne i zaczęli kojarzyć znaczenie w wyrażeniach dotyczących intencji użytkowników. Stworzono wiele popularnych narzędzi i programów takich jak Alvey NLP, SYSTRAN, METEO itp., przeznaczonych do analizy, tłumaczenia i wyszukiwania informacji [56], [177].



Rysunek 6.2. Struktura sieci grafowo-splotowej do klasyfikacji akcji

Lata dziewięćdziesiąte XX wieku były erą statystycznego przetwarzania języka, w której w większości systemów NLP zastosowano wiele nowych pomysłów na gromadzenie danych, takich jak wykorzystanie korpusu słów do przetwarzania językowego lub rozumienie słów na podstawie ich występowania i współwystępowania przy użyciu podejść probabilistycznych [305]. Duża ilość danych w różnych językach, dostępna za pośrednictwem sieci WWW, zainicjowała duże zapotrzebowanie na badania w takich dziedzinach jak wyszukiwanie informacji, tłumaczenie maszynowe, podsumowania, modelowanie tematyczne i klasyfikacja [304]. Wzrost pamięci i szybkości przetwarzania w komputerach umożliwiły powstanie oprogramowania do przetwarzania tekstu i mowy w praktyce. Zasoby lingwistyczne, w tym kolekcje z adnotacjami, takie jak Penn Treebank, British National Corpus, Prague Dependency Treebank i WordNet, miały korzystny wpływ na rozwój badań naukowych i zastosowań komercyjnych [306], [157], [344]. Klasyczne podejścia, takie jak N-gramy i reprezentacja „plecakowa” („bag-of-words”) były stosowane w połączeniu z algorytmami uczenia maszynowego, takimi jak wielomianowa regresja logistyczna, maszyna wektorów nośnych, sieci bayesowskie lub maksymalizacja oczekiwań (expectation-maximization, EM) [61], [305]. Baker i in. zrealizowali projekt FrameNet, w którym „ramki” reprezentowały semantykę mającą postać jednostek i relacji, co prowadziło do etykietowania semantycznych ról [30].

6.8.1.2. Era uczenia głębokiego w NLP

W 2000 roku Bengio i inni zaproponowali pierwszy neuronowy model językowy, który wykorzystywał mapowanie N poprzednich słów za pomocą tabeli „look-up” stanowiącej warstwę ukrytą w sieci jednokierunkowej generującej dane wyjściowe, wygładzane następnie warstwą softmax w celu prognozowania słowa [43]. Stanowiło to pierwsze w historii NLP zastosowanie gęstej reprezentacji wektorowej zamiast wektora pojedynczego ciepła („one-hot vector”) lub modelu plecakowego dla słów. W kolejnych latach, wiele modeli językowych opartych zostało na rekurencyjnych sieciach neuronowych (RNN) i sieciach „pamięci długokrótkotrwałej” (LSTM Long Short-Term Memory), stając się przez szereg lat standardem techniki [337], [147].

Mikolov i inni [337] poprawili efektywność trenowania modeli słów zaproponowaną przez Bengio i inni [43], usuwając warstwę ukrytą i stosując przybliżony cel uczenia się, który dał początek wydajnej technologii word2vec [339], [335]. Word2vec występuje w dwóch implementacjach: (a) ciągłego worka słów (CBOW Continuous Bag of Words), który przewiduje środkowe słowo na podstawie pobliskich słów, oraz (b) skip-gramu, który na odwrót przewiduje pobliskie słowa. Dzięki uczeniu się na dużym korpusie danych model uchwycił różne znaczenia (semantykę) i relacje słów w języku. Takie wstępne trenowanie modeli kodujących słowa na podstawie dużych korpusów językowych dla dowolnej architektury sieci neuronowych stało się typową praktyką. Dalsze trenowanie tych modeli danymi z różnych języków i dostosowywanie do różnych zastosowań odbywa się metodą uczenia transferowego (transfer learning).

W swojej pracy doktorskiej, Sutskever wprowadził optymalizator pozbawiony potrzeby wyznaczania Hessianu, przeznaczony do efektywnego trenowania rekurencyjnych sieci neuronowych na długoterminowych zależnościach, co stanowiło kamień milowy w zastosowaniu sieci RNN w problematyce NLP [475]. Wykorzystanie konwolucyjnych sieci neuronowych w tekście znacznie wzrosło po pracach [196], [219]. Sieci CNN są obecnie szeroko stosowane w wielu zadaniach NLP ze względu na ich zależność od kontekstu lokalnego i zrównoleglenie obliczeń. Rekurencyjne sieci neuronowe, które nadają zdaniom rekurencyjną hierarchiczną strukturę i są inspirowane podejściem lingwistycznym, stały się kolejną ważną architekturą neuronową w NLP [290]. Sutskever i in. zaproponowali metodykę uczenia się typu „sekwencja-sekwencja” dla struktury sieci neuronowej składającej się z 1) kodera sekwencji – sieci neuronowej przetwarzającej sekwencję danych wejściowych, 2) sieci dekodera – przewidującej wyjścia na podstawie stanów sekwencji wejściowej i bieżących stanów wyjściowych [476]. Ten sukces spowodował, że Google zastąpił swoje monolityczne modele tłumaczenia maszynowego oparte na frazach neuronowymi modelami typu „sekwencja-sekwencja” [526].

Mechanizm uwagi (atencji) autorstwa Bahdanau i in. [29] to kolejny przełom w architekturach sieci neuronowych stosowanych dla NLP i rozpoznawania mowy.

Innym popularnym kierunkiem badań stało się rozszerzanie modeli sieci neuronowych o pamięci różnych typów, takich jak sieci pamięci, sieci pamięci typu end-to-end i dynamiczne sieci pamięci [515], [473], [149]. Ich przewidywany

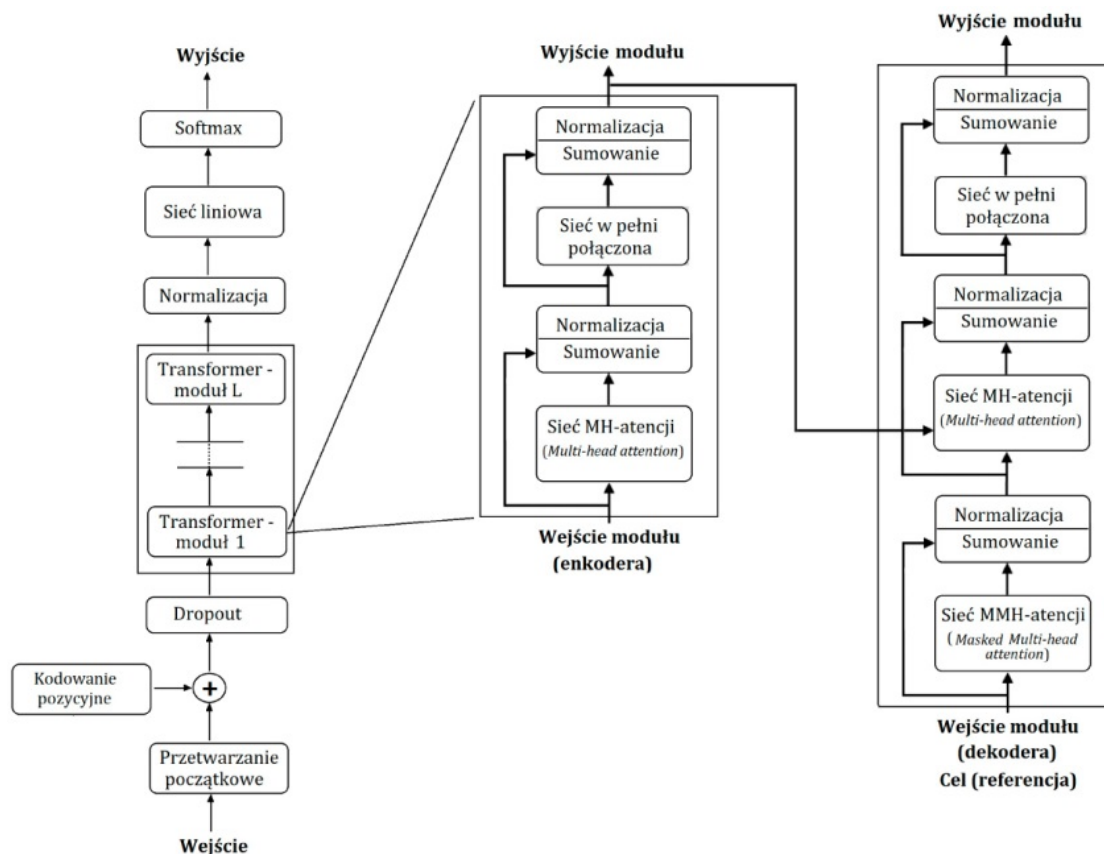
obszar zastosowań to złożone zadania rozumienia języka naturalnego i tworzenia modeli w języku naturalnym.

Uczenie się przeciwstawne (adversarial learning) i uczenie przez wzmocnianie (reinforcement learning) to kolejne dwie dziedziny głębokiego uczenia, które znajdują zastosowanie w NLP. Używanie przykładów przeciwstawnych służy do zrozumienia rozkładów danych, testowania niezawodności modeli i uczenia transferowego [184], [136]. Uczenie przez wzmocnianie ma w NLP zastosowanie tam, gdzie występują zależności czasowe i nieróżniczkowalne obszary optymalizacji, w których zawodzą metody oparte na gradientach. Korzyści płynące z technik wzmocniania stosowane są w modelowaniu systemów dialogowych, tłumaczeniu maszynowym, streszczaniu tekstu i wizualnym opowiadaniu historii [509], [387].

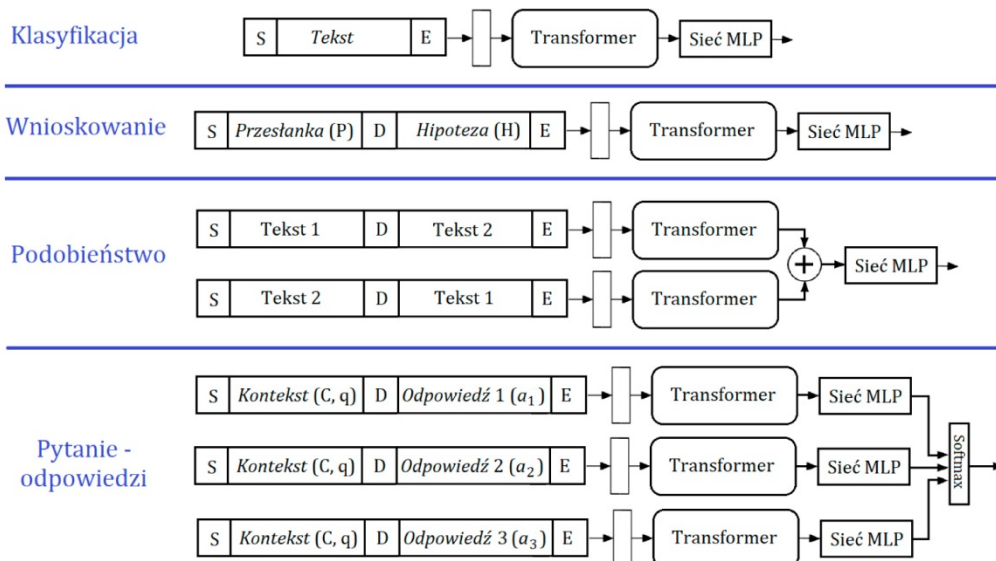
6.8.2. Duże modele językowe – LLM

W ostatnich latach dużą popularność uzyskało nowe narzędzie ChatGPT, oparte na modelu językowym GPT (generative pre-trained transformer) [420] i służące do inteligentnej konwersacji z ludźmi w języku naturalnym. Kolejne wersje GPT ogłaszane były w latach 2018–2024. GPT jest implementacją metodyki LLM (Large Language Model) w postaci głębokiej sieci neuronowej przetwarzającej teksty wyrażone w języku naturalnym. Przetwarza sekwencję danych (tekst) w inną sekwencję danych. Modele GPT, od GPT-1 do GPT-4o, zostały stworzone przez laboratorium badawcze firmy OpenAI Inc., założonej w 2015 roku [379]. Produkty te są komercjalizowane od 2019 roku przez spółkę zależną OpenAI Limited Partnership, w którą zainwestował Microsoft (podobno ponad 1 mld \$). Dzięki dostępowi do olbrzymich zasobów danych i nowym technologiom uczenia maszynowego, możliwe stało się przełamanie ograniczeń wcześniejszych systemów dialogowych i przetwarzania języka naturalnego. GPT jest siecią typu Transformer, która jest wstępnie uczona w trybie półnadzorowanym na dużych zbiorach danych. Celem tego uczenia jest wyznaczenie statystyk (prawdopodobieństw) zachodzenia sekwencji tokenów (np. słów) w danym języku. Brak jest etykiety dla próbki uczącej, ale znany jest zbiór tokenów oraz zbiór tekstów w wybranym języku. Po lewej stronie rys. 6.3 jest sieć typu Transformer, a po prawej struktura jednej warstwy bloku Transformer, która ma wyjaśniać mechanizm wielokrotnej koncentracji uwagi (atencji), z różnymi krokami dla kontekstu tokenów w sekwencji. Mechanizm atencji oznacza tworzenie zanurzeń w kontekście lokalnym lub globalnym (pełnego wejścia danych) i zastępuje on mechanizm przetwarzania sekwencji danych stosowany przez sieć rekurencyjną lub CNN. Tak więc, Transformer jest nowym typem głębokiej sieci neuronowej przetwarzającej naraz całą sekwencję danych wejściowych [500].

Dla ułatwienia komunikacji, bezpośredni kontakt pomiędzy maszyną a człowiekiem powinien odbywać się nie w formie tekstowej, ale za pomocą mowy i obrazu. Dlatego też na znaczeniu zyskują stale doskonalone technologie głosowe, dotyczące rozpoznawania i syntezy mowy, oraz wizyjne, związane z analizą i syntezą obrazu i sygnałów wideo.



Rysunek 6.3. Ogólna struktura blokowa sieci GPT



Rysunek 6.4. Przykładowe rodzaje zadań dla GPT

Struktura sieci GPT (rys. 6.3) zasadniczo składa się z bloków stanowiących elementy typu Transformer, które zostały specjalnie zaprojektowane do przetwarzania sekwencji danych [500]. GPT jest wstępnie trenowany (uczony) na ogromnym zbiorze tekstowym, aby nauczyć się reguł danego języka naturalnego. Następnie sieć jest douczana w trybie nadzorowanym do konkretnych zadań. W fazie aktywnej pracy, GPT potrafi generować sensowne i poprawne gramatycznie kontynuacje zdania, podanego na jego wejście, a w przypadku zapytania, potrafi wytworzyć sensowne odpowiedzi (rys. 6.4).

Zastosowanie modelu GPT wymaga przekształcenia danych wejściowych specyficznych dla zadania. W przypadku zadania klasyfikacji tekstu, model bezpośrednio dostosowywany jest zgodnie z powyższym opisem. Inne zadania, takie jak odpowiadanie na pytania lub tłumaczenie tekstu, mają ustrukturyzowane dane wejściowe, takie jak uporządkowane pary zdań lub wiele alternatywnych dokumentów, dokumenty zapytania i odpowiedzi. Takie dane wejściowe są przekształcane w uporządkowaną sekwencję, którą model może przetwarzać. Wszystkie przekształcenia obejmują dodanie tokenów dla losowo zainicjowanego startu (S) i końca (E). W przypadku zadania wnioskowania (np. kontynuacji zadanego tekstu) przesłanka (P) łączona jest z hipotezą (H) ogranicznikiem (D). W przypadku zadania wyznaczania podobieństwa, wejściowa sekwencja modyfikowana jest tak, aby zawierała obie możliwe kolejności zdań połączonych ogranicznikiem (D). Obie kolejności są przetwarzane niezależnie – dwie uzyskane reprezentacje są dodawane element-do-elementu przed wprowadzeniem do liniowej warstwy wyjściowej. Dla zadań polegających na odpowiadaniu na pytania (a ogólnie zdroworozsądkowego rozumowania) otrzymujemy kontekst (dokument C) z pytaniem q i zestaw możliwych odpowiedzi a_k . Kontekst i pytanie łączony jest z każdą możliwą odpowiedzią, dodając ogranicznik pomiędzy nimi. Każda z tych sekwencji jest przetwarzana niezależnie za pomocą modelu GPT, a na koniec wyniki są normalizowane za pomocą warstwy Softmax, aby uzyskać rozkład prawdopodobieństwa dla możliwych odpowiedzi.

W najnowszych wersjach GPT (po 2023 r.) pojawiły się też dane multimedialne. Wersja GPT-4o, wydana 13 maja 2024 roku, może przetwarzać i generować tekst, obrazy i dźwięk [380].

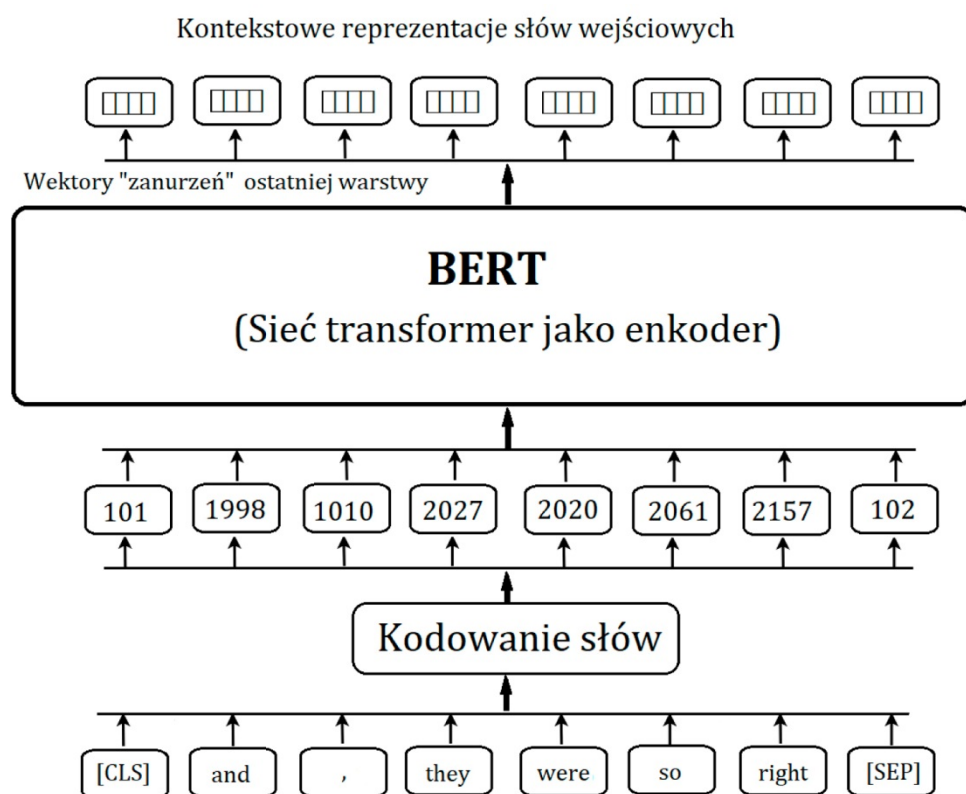
Konkurentem ChatGPT jest Gemini, kolejny chatbot korzystający z metodyki LLM, udostępniony w 2023 r. przez Google LLC². Badacze Google opublikowali w 2018 r. model językowy o nazwie „Bidirectional encoder representations from transformers” (BERT) [106, 105] który był podstawowym narzędziem do przetwarzania języka naturalnego (NLP) jeszcze przed modelem GPT. Jego architekturę stanowi enkoder zbudowany z sieci typu Transformer, który przetwarza text na sekwencję wektorów danych. Sieć ta uczona jest w trybie samonadzorowanym [429]. Na rysunku 6.5 przedstawiono blokową strukturę systemu BERT. Na wejście podawany jest tekst, który dzielony jest na tokeny, czyli słowa. Uzupełniany jest tokenami specjalnymi, a po przypisaniu tokenom liczb sekwencja taka podawana jest na wejście sieci enkodera o architekturze transformera. Stany ostatniej warstwy stanowią kontekstowe zanurzenia (embeddings) słów, przetwarzane na koniec zależnie od zastosowania.

Warto też wspomnieć o poprzednim typowym rozwiązaniu w obszarze NLP, jakim jest enkoder słów word2vec, który generował zanurzenia dla każdego słowa sekwencji oddzielnie. Oczywiście to proste rozwiązanie nie dawało następnie takiej efektywności w wyszukiwaniu informacji, adekwatnej do zapytania, jaką dają BERT czy GPT. Word2vec zamienia słowo na wysokowymiarowy wektor cech w taki sposób, aby zbliżone kody oddawały semantyczną bliskość słów. Pomysł polegał na tym, że słowa pojawiające się w podobnym kontekście odwzorowane

² <https://gemini.google.com/?hl=pl>

są na zbliżone do siebie wektory cech. W ten sposób wyrażana się semantyczną bliskość słów, które są tekstowo nawet oddalone od siebie, np. „ale” i „jednak” lub „Warszawa” i „Polska”. Początkowo Autorzy tego rozwiązania stosowali sieć rekurencyjną [338], natomiast w docelowym rozwiązaniu użyto dwie „płaskie” sieci z dwiema warstwami ukrytymi. Do trenowania pierwszej z nich stosowano koncepcję „pomiń-gramu” (skip-gram), w nawiązaniu do N-gramu, zakładającego, że wektor kodujący dane słowo powinien być bliski wektorowi każdego z jego sąsiadów. Zaś druga sieć wyraża ideę „ciągłości worka słów” (continuous bag-of-words, CBOW) zakładającą, że ważona średnia wektorów dla sąsiednich słów jest zbliżona do wektorowego reprezentanta danego słowa [336, 340].

W maju 2023 roku pojawił się chatbot TRURL.AI, stworzony przez polską spółkę Voice- Lab.AI³. Natomiast efektem pracy społeczności entuzjastów sztucznej inteligencji z Akademii Górniczo-Hutniczej, przy wsparciu fundacji SpeakLeash, jest polski chatbot Bielik⁴. Bielik v2 opiera się na architekturze transformera i obejmuje wyłącznie bloki typu dekodery. Został opracowany na bazie modelu Mistral-7B⁵ – modelu o 7.3 mld parametrów, posiadającego otwarty kod. Bielik stanowi jeden z najpotężniejszych modeli językowych (11 mld parametrów, okno kontekstowe o rozmiarze 32000 tokenów) stworzonych w Polsce. Do treningu Bielika v2 wykorzystano mocne komputery Helios i Athena należące do AGH. Pierwsze recenzje Bielika (z września 2024 r.) wskazują jednak, że przed Autarami chatbota pozostaje jeszcze dużo pracy, po to by stworzyć konkurencję dla istniejących, już dojrzałych rozwiązań.



Rysunek 6.5. Ogólna struktura blokowa systemu BERT

³ <https://voicelab.ai/>

⁴ <https://bielik.ai/>

⁵ <https://mistral.ai/>

LLM jest używany nie tylko do transformacji lub generowania tekstów. Na bazie LLM powstał LBM (Large Behaviour Model) [117]. LBM na podobnej zasadzie, co LLM, generuje zamiast tekstów zachowania robotów. W tym przypadku do nauki wykorzystywane są nie tylko teksty, ale także obserwacje zdarzeń zachodzących w środowisku. Toyota Research Institute (TRI) opracowuje duże modele zachowań (LBM) dla robotów wykonujących zadania wymagające zręczności [11]. Czasami wystarczy jedynie kilkanaście pokazów wykonanych przez człowieka, a przy nauce innej umiejętności może to być kilka tysięcy [457]. Wykorzystuje się telemanipulację, a więc jest to uczenie przez imitację. Do tego uzupełnia się to opisem celu realizacji zadania w języku naturalnym. W ten sposób robot uczy się wykonywać złożoną umiejętność manipulacji, np. obierać ziemniaki. Proces uczenia zajmuje kilka godzin. Wykonywany jest na danych multimodalnych, pochodzących z wielu źródeł (różnych typów czujników). Podejście TRI opiera się na dyfuzji, która jest generatywną techniką sztucznej inteligencji [125]. Zachowania robotów planowane są w sposób adaptacyjny, co jest szczególnie przydatne przy demonstracjach prowadzonych przez ludzi.

6.8.3. Automatyczne rozpoznawanie mowy

Obecnie systemy automatycznego rozpoznawania mowy (ASR – Automatic Speech Recognition) szybko stają się podstawą interakcji człowiek-komputer. Większość używanych obecnie narzędzi ma możliwość rozpoznawania mowy dla różnego rodzaju zadań dyktowania treści, niezależnie od tego, czy chodzi o tworzenie wiadomości tekstowej, odtwarzanie muzyki za pośrednictwem urządzenia czy nawet zamiany tekstu na mowę.

6.8.3.1. Początki ASR

Badania i rozwój metod ASR rozpoczęły się w połowie XX wieku. W 1952 roku Bell Laboratories stworzyło system do rozpoznawania mowy izolowanych cyfr pochodzącej od jednego mówcy, wykorzystując analizę częstotliwości formantów (obserwowane w ludzkiej mowie lokalne maksyma energii, odpowiadające silnym dźwiękom) w spektrum mocy sygnału mowy. Wiele instytucji badawczych zbudowało systemy do rozpoznawania określonych sylab i samogłosek dla pojedynczego mówcy [189]. W latach sześćdziesiątych XX wieku, badania dotyczyły rozpoznawania słów z ograniczonych słowników i cechach akustyczno-fonetycznych mowy, prowadząc do powstania wielu technik korzystających z programowania dynamicznego i analizy częstotliwości. Firma IBM opracowała system Shoebox zdolny do rozpoznawania cyfry i nazw operacji arytmetycznych w sygnale mowy. Naukowcy z University College London potrafili analizować fonemy w celu rozpoznania samogłosek i spółgłosek. W latach siedemdziesiątych XX wieku badania przesunęły się w kierunku zadań dotyczących słowników średniej wielkości i rozpoznawania mowy ciągłej. Dominującymi technikami były różnego rodzaju algorytmy rozpoznawania wzorców i grupowania. Opracowano technikę dynamicznego marszczenia czasu (DTW – Dynamic Time Warping) w celu dostosowywania ze sobą dwóch sekwencji o różnej długości. Na Carnegie Mellon University opracowano system HARPY, który rozpoznawał mowę złożoną z 1011 słów. Jednym z głównych osiągnięć tej pracy było zastosowanie wyszukiwania w skończonej sieci stanów wspartej zestawem reguł, w celu dekodowania leksykalnych repre-

zentacji słów [289]. System Tangora [182], stworzony przez IBM, miał być podstawą maszyny do pisania aktywowanej głosem. Stawiano w nim nacisk na obszerne słownictwo i gramatykę generującą sekwencję słów, co stanowiło wprowadzenie modeli językowych do rozpoznawania mowy. Również firma AT&T odegrała w tym czasie znaczącą rolę w rozwoju ASR, koncentrując się głównie na uniezależnieniu rozpoznawania mowy od charakterystyki mówcy. Rozwinięto modele akustyczne mowy w wyniku analizy wzorców mowy dla różnych mówców. Zaczęto stosować Ukryte Modele Markowa (HMM – Hidden Markov Model) do modelowania wariacji spektralnych mowy.

6.8.3.2. Era HMM

W latach osiemdziesiątych XX wieku opracowano statystyczne podejście do ASR w oparciu o konkretne modele HMM służące do modelowania przejść między stanami. Z czasem modelowanie HMM-GMM stało się dominującą techniką ASR (i pozostaje jedną z najbardziej znanych do dziś). Zaczęto również proponować sieci neuronowe, w szczególności do modelowania akustycznego w miejsce GMM, jednocześnie polegając na HMM w zakresie reprezentacji sekwencji tokenów mowy (np. sieć neuronowa z opóźnieniem czasowym – Time Delay Neural Net (TDNN) [503]). Pod koniec lat 80 i w latach 90 stworzono popularne zestawy narzędzi do tworzenia systemów ASR, takie jak Sphinx [275], DECIPHER [354] w SRI i HTK [GW01] [145] w Cambridge. W latach dziewięćdziesiątych XX wieku dostępne stały się komercyjne programy, takie jak Dragon, który miał słownik zawierający 80 tys słów i możliwość trenowania oprogramowania dostosowując go do głosu użytkownika.

6.8.3.3. Era modeli DNN

W XXI wieku zaczęły dominować w badaniach i praktyce ASR głębokie sieci neuronowe (DNN – Deep Neural Network). W pierwszej dekadzie XXI wieku głębokie sieci neuronowe stosowano jedynie do modelowania akustycznego pozostawiając HMM do modelowania sekwencji symboli, a model hybrydowy DNN/HMM stał się dominującym podejściem (np. ograniczona Maszyna Boltzmana i sieć głęboka DBN [143], hybryda DNN z zależnym od kontekstu HMM [98]). Od 2006 r. uczenie głębokie zaczęło stosować także do sekwencyjnej części zadania ASR, zastępując w tym celu HMM siecią dekodera tokenów i końcowym dopasowywaniem sekwencji. Przykłady takich rozwiązań to: CTC, [148] i przetwornik RNN-T [15].

Od 2012 r. nowo proponowane systemy ASR przyjmują postać kompleksowych modeli sieci głębokich, o architekturze typu „sekwencja-sekwencja”, podobnej do NLP, w których możliwe jest jednoczesne uczenie lub douczanie pre-trenowanych modułów (end-to-end training). Wiele nowoczesnych technik uczenia głębokiego trafiło do modeli ASR, takich jak: przetworniki RNN-T z mechanizmem uwagi (atencji) [84], [218] i transformery [109], [402]. Zastosowanie architektury sieci typu „sekwencja-sekwencja” i uwzględnienie dużych zestawów danych pozwala modelom stosowanym w ASR uczyć się jednocześnie zależności akustycznych i językowych bezpośrednio na podstawie danych, co poprawia skuteczność rozpoznawania mowy. Jednak w praktyce przemysłowej architektury hybrydowe nadal pozostają bardziej popularne ze względu na przydatność modeli słownikowych na etapie dekodowania mowy.

6.8.4. Narzędzia, biblioteki, zbiory danych i zasoby dla praktyków

Istnieje olbrzymia ilość zasobów typu open source dostępnych dla programistów zainteresowanych: NLP, głębokim uczeniem lub analizą mowy. Poniżej przedstawiono listę bardziej popularnych bibliotek i zestawów danych – nie jest to w żadnym wypadku wyczerpująca lista.

6.8.4.1. Głębokie uczenie

Poniżej przedstawiono popularne platformy typu open source do tworzenia sieci neuronowych:

- TensorFlow – jest to biblioteka do obliczeń macierzowych (i tensorowych) oparta na grafach przepływu danych. Grafy te mają węzły reprezentujące operacje matematyczne i krawędzie reprezentujące tensory, które przepływają między nimi. Napisany w Pythonie, TensorFlow został opracowany przez zespół Google Brain.
- Keras – jest to wysokopoziomowa biblioteka Pythona opracowana, aby umożliwić szybkie prototypowanie i eksperymentowanie. Może korzystać z TensorFlow i CNTK. Teraz jest częścią podstawowej biblioteki TensorFlow. Keras zawiera implementacje typowych komponentów sieci neuronowych oraz liczne przykłady architektury.
- PyTorch – jest to pakiet języka Python do szybkiego prototypowania sieci neuronowych. Jest oparty na Torch, szybkiej strukturze obliczeniowej i zapewnia dynamiczne obliczanie grafów w czasie wykonywania. PyTorch został opracowany przez zespół badawczy Facebook AI.
- Caffe – jest to wysokowydajna platforma C++ do tworzenia architektur głębokiego uczenia, która umożliwia wykonywanie rozproszone i z wieloma procesorami GPU. Obecna wersja, Caffe2, jest używana przez Facebooka w produkcji.
- CNTK – przemianowany na Microsoft Cognitive Toolkit, CNTK to platforma obliczeniowa oparta na skierowanych grafach. Obsługuje języki Python, C# lub C++ i została opracowana przez firmę Microsoft Research.
- MXNet – jest to wysokowydajna platforma obliczeniowa napisana w języku C++ obsługująca procesory graficzne, opracowana w projekcie Apache.
- Chainer – jest to oparta na Pythonie programowa struktura ramowa (framework) z dynamicznymi możliwościami grafów obliczeniowych definiowanymi w czasie wykonywania.

6.8.4.2. Przetwarzanie języka naturalnego

Poniższe zasoby to niektóre z bardziej popularnych zestawów narzędzi typu open source do przetwarzania języka naturalnego:

- Stanford CoreNLP – oparty na Javie zestaw narzędzi do analizy językowej do przetwarzania tekstu w języku naturalnym. CoreNLP został opracowany przez Uniwersytet Stanforda.
- NLTK – Natural Language Toolkit to zestaw bibliotek typu open source do symbolicznego i statystycznego przetwarzania języka naturalnego dla języka angielskiego. Został opracowany przez University of Pennsylvania.

- Gensim – oparty na Pythonie zestaw narzędzi typu open source, który koncentruje się na przestrzeni wektorowej i modelowaniu tematycznym dokumentów tekstowych.
- spaCy – wysokowydajny zestaw narzędzi oparty na języku Python do zaawansowanego przetwarzania języka naturalnego. SpaCy jest oprogramowaniem typu open source i jest obsługiwany przez Explosion AI.
- OpenNLP – zestaw narzędzi do uczenia maszynowego typu open source do przetwarzania tekstu w języku naturalnym. OpenNLP jest sponsorowany przez Apache Project.
- AllenNLP – biblioteka badawcza NLP zbudowana w PyTorch.

6.8.4.3. Rozpoznawanie mowy

Poniższe zasoby to niektóre z bardziej popularnych zestawów narzędzi typu open source do rozpoznawania mowy:

- Sphinx – zestaw narzędzi ASR opracowany przez Carnegie Mellon University, służący do produkcji i rozwoju oprogramowania do rozpoznawania mowy.
- Kaldi – platforma ASR C++ o otwartym kodzie źródłowym, stworzona do przetwarzania mowy ukierunkowana na badania, a także do użytku profesjonalnego.
- ESPnet – kompleksowa platforma ASR oparta na głębokim uczeniu, zainspirowana przez Kaldi i napisana za pomocą funkcji PyTorch i Chainer.
- SoX – zestaw narzędzi i biblioteka do przetwarzania dźwiękiem. Implementuje wiele formatów plików i jest przydatny do odtwarzania, konwertowania i manipulowania plikami audio.
- LibROSA – pakiet Pythona do analizy dźwięku, powszechnie używany do ekstrakcji cech i przetwarzania sygnałów cyfrowych (DSP).
- KenLM – wysokowydajny zestaw narzędzi do modelowania języka (N-gram), często zintegrowany z platformami ASR.

6.9. Bezprzewodowe sieci czujników

6.9.1. Projektowanie bezprzewodowych sieci czujników

Bezprzewodowe sieci czujników, tworzone zarówno z urządzeń statycznych, jak też mobilnych mogą istotnie wspierać proces podejmowania decyzji przez centrum dowodzenia, jak też bezpośrednio autonomiczne roboty operujące na polu walki. Tworzenie takich sieci wymaga rozwiązania szeregu problemów [13, 456, 359, 174, 90]. Jednym z kluczowych zadań jest lokalizacja urządzeń tworzących sieć.

Lokalizacja stanowi wyzwanie, zarówno podczas projektowania, realizacji oraz działania operacyjnego bezprzewodowych sieci sensorycznych. Ogólnie rzecz ujmując, obejmuje zarówno rozlokowanie urządzeń tworzących sieć w przestrzeni roboczej, jak też wyznaczenie pozycji urządzeń. Odpowiednie rozmieszczenie czujników decyduje o skuteczności i efektywności działania sieci. Z drugiej strony, w przypadku wielu zastosowań, w szczególności wojskowych, takich jak mo-

monitorowanie czy działania na polu walki brak informacji o położeniu czujników, z których pochodzą pomiary sprawia, że stają się one bezużyteczne.

Pod pojęciem lokalizacja kryją się dwie zupełnie różne usługi realizowane w różnych etapach tworzenia i działania sieci. Obie wymagają rozwiązania często bardzo skomplikowanych zadań. Optymalne rozlokowanie czujników w przestrzeni roboczej to zadanie, które jest rozwiązywane na etapie projektowania sieci. Do tego celu wykorzystuje się zazwyczaj różnego rodzaju metody pokryć przestrzeni. Trudność zadania zależy od wymiaru sieci oraz charakteru środowiska w jakim działa. Drugim problemem jest metoda rozłożenia czujników. W wielu zastosowaniach opracowanie efektywnego, skutecznego i odpornego sposobu umieszczania urządzeń w wyznaczonych lokalizacjach może być poważnym wyzwaniem [249].

Kolejną usługą jest geolokalizacja, czyli wyznaczanie współrzędnych geograficznych położenia urządzeń sieci o nieznanym położeniu [13, 359]. Usługa ta uaktywnia się w momencie uruchomienia operacyjnego oprogramowania wykorzystującego sieć sensoryczną. Dotyczy to przede wszystkim sieci, w których liczne urządzenia pomiarowe są rozmieszczane losowo, np. zrzucone z samolotów, przenoszone przez drony, roboty itd. W systemach monitorujących jest to usługa konieczna. Dodatkowo, dostępność nawet przybliżonej informacji o położeniu węzłów w przestrzeni roboczej pozwala na organizację efektywnej komunikacji międzywęzłowej. Ponadto można wydzielić podsieci wykorzystując odpowiednie techniki grupowania węzłów i zastosować specjalizowane energooszczędne protokoły trasowania. Stosując mechanizmy efektywnego zarządzania zasobami energetycznymi i obliczeniowymi urządzeń tworzących sieć wydłużamy czas jej bezawaryjnego funkcjonowania [359, 371, 383, 534]. Znajomość aktualnego położenia czujników jest szczególnie ważna w systemach zbudowanych z urządzeń mobilnych.

6.9.2. Rozmieszczanie czujników

Efektywne rozłożenie czujników w przestrzeni roboczej jest podstawowym zadaniem przy budowie sieci sensorycznych przeznaczonych do zbierania danych pomiarowych i monitorowania pola walki. Tworzony system spełnia swoje zadania pod warunkiem, że zbierane dane mogą być przekazane do centrum decyzyjnego. Projektant sieci musi podjąć szereg decyzji obejmujących m.in. liczbę i typ urządzeń pomiarowych użytych do budowy sieci oraz przede wszystkim, sposób rozmieszczania dostosowany do warunków środowiska i planowanego zastosowania. W literaturze prezentowane są różne podejścia do wyznaczania optymalnych położenia węzłów sieci. Wykorzystywane są metody pokryć, teoria grafów, optymalizacja numeryczna, w tym różnego rodzaju heurystyki oraz symulacja komputerowa [90, 174, 434, 359]. Czujniki mogą być rozrzucone, rozkładane manualnie, ale też montowane na platformach jezdnych, tj. pojazdach bezzałogowych, robotach mobilnych lub dronach, i przemieszczane w docelowe miejsca.

Tworzone w ten sposób sieci muszą spełniać szereg wymagań, które zazwyczaj zależą od planowanych zadań oraz warunków środowiska, w którym działają.

Można podać kilka podstawowych wskaźników, których spełnienie warunkuje przydatność systemu pomiarowego:

- zachowanie stałej łączności z centrum dowodzenia lub inną jednostką centralną (connectivity), – pokrycie pomiarami interesującego obszaru,
- odpowiednia jakość transmisji bezprzewodowej,
- odporność na ataki cybernetyczne.

W wielu zastosowaniach rozważa się rozmieszczanie czujników przy wykorzystaniu platform jezdnych i bezzałogowych statków powietrznych [34, 434, 360, 249]. Tego typu podejście komplikuje proces projektowania. Konieczne jest rozwiązanie kilku dodatkowych problemów. Najważniejsze z nich to: lokalizowanie węzłów w przypadku zmieniającej się topologii sieci, utrzymywanie łączności i efektywne zarządzanie zasobami energii. Do śledzenia położenia przestrzennego węzłów wykorzystuje się systemy GPS lub wyspecjalizowane schematy lokalizacji. Aby utrzymać stałą łączność komunikacyjną, każdy czujnik musi pozostawać w zasięgu transmisji co najmniej jednego innego węzła, niezależnie od strategii przemieszczania się. Trajektorie ruchu powinny zapewniać szybkie osiągnięcie punktu docelowego, przy minimalnych kosztach energetycznych. Kolejnym problemem do rozwiązania jest wyznaczenie takich ścieżek ruchu, przy których czujniki eksplorują całą przestrzeń roboczą i omijając przeszkody osiągają pozycje docelowe.

Przemieszczanie się czujników do punktów docelowych może być realizowana na dwa sposoby:

- rozmieszczanie jednoetapowe,
- rozmieszczanie wieloetapowe.

W pierwszym przypadku wyznaczany jest cel i trajektoria ruchu od punktu początkowego do docelowego. Urządzenie, w miarę możliwości, realizuje tę trajektorię. W drugim wariantcie przyjmuje się, że grupa czujników zmienia jednocześnie swoje pozycje. Trajektoria ruchu składa się z wielu cząstkowych odcinków. Na bieżąco, zgodnie z przyjętym wzorcem, obliczane są nowe punkty dla urządzeń i każde z nich przemieszcza się w kierunku tych punktów, zbliżając się z czasem do założonych pozycji docelowych. Pozycje czujników są zadawane lub czujniki samodzielnie organizują się w sieć.

W przypadku zastosowań na polu walki, gdzie dynamika zmian w monitorowanym obszarze często wyklucza wstępną konfigurację sieci, na bazie aktualnych obserwacji urządzenia same tworzą topologię, która daje jak najlepsze możliwości pomiarowe, przy zachowaniu stałej komunikacji. Czujniki autonomicznie podejmują decyzje poruszając się i omijając przeszkody, tworzą sieć typu multi-hop utrzymującą stałą łączność z centrum dowodzenia. Możliwe są również rozwiązania hybrydowe, w których proces rozmieszczania czujników jest podzielony na dwa etapy. W pierwszym centralny dyspozytor wyznacza punkty w przestrzeni, do których urządzenia mają się przemieścić. W drugim następuje przełączenie czujników w tryb samoorganizacji, aby dostosować topologię sieci do aktualnej sytuacji w monitorowanym obszarze.

6.10. Cyberbezpieczeństwo autonomicznych robotów pola walki

Cyberbezpieczeństwo autonomicznych robotów pola walki to kluczowy problem w kontekście nowoczesnych konfliktów zbrojnych. Zasadniczo, co do istoty zagadnienia, problem ten nie jest znacząco inny od typowych problemów związanych z zapewnianiem bezpieczeństwa w cyberprzestrzeni. Ze względu na różne rozwiązania technologiczne i środowiska, w których roboty te się poruszają (np. powietrze, woda, ląd) wykorzystywane są różne protokoły, inna jest charakterystyka i sposób komunikacji oraz wykorzystane komponenty programowe i sprzętowe, ale związane z tym zagrożenia są podobne jak w innych systemach autonomicznych czy komputerowych [159, 144]. Oczywistym jest, że przełamanie zabezpieczeń robotów pola walki może mieć daleko większe konsekwencje niż naruszenie cyberbezpieczeństwa typowych urządzeń w sieci Internet.

Poniżej scharakteryzowano najważniejsze grupy problemów zagrożeń cyberbezpieczeństwa autonomicznych robotów stosowanych na polu walki oraz omówiono pokrótce sposoby przeciwdziałania im. Jest to szeroki zakres zagadnień, które wpływają na integralność, dostępność oraz poufność danych i operacji tych systemów. Warto zauważyć, że jako przykłady podano podatności i zagrożenia potwierdzone jedynie w komercyjnych urządzeniach cywilnych (np. dronach), gdyż nie ma w literaturze zbyt dużo źródeł potwierdzających rzeczywiste luki w autonomicznych robotach pola walki. Również zaproponowane metody ochrony odnoszą się do standardowych rozwiązań stosowanych obecnie w sieciach teleinformatycznych. Biorąc pod uwagę powyższe, obecnie w literaturze wyróżnia się kilka kluczowych grup aspektów cyberbezpieczeństwa robotów autonomicznych ([99, 439, 499, 158, 447, 531]):

- Ataki na systemy komunikacji i łączności: roboty bojowe polegają na komunikacji bezprzewodowej z jednostkami nadzorującymi. Słabości tych systemów mogą prowadzić do przechwytywania, modyfikacji lub blokowania przesyłanych wiadomości. Ataki takie jak jamming (zakłócanie sygnału) i spoofing (podszywanie się pod sygnały GPS) mogą prowadzić do utraty zdolności do sterowania lub dezinformacji. Przykładem realizacji takiego zagrożenia były ataki GPS spoofing na drony DJI Phantom 4, które doprowadziły do przejęcia kontroli nad systemem poprzez wprowadzenie fałszywego sygnału GPS [158, 447]. Środki przeciwdziałania tego typu zagrożeniom uwzględniają głównie zastosowanie rozwiązań kryptograficznych w celu ochrony komunikacji i zapobiegania podszywaniu, stosowanie mechanizmów wykrywania anomalii poprzez automatyczne identyfikowanie i blokowanie nieautoryzowanego dostępu oraz wykorzystanie technik anty-jammingu np. skanowania częstotliwości czy dynamiczną alokację pasma.
- Manipulacja danymi sensorycznymi: autonomiczne roboty na polu walki często polegają na systemach wizyjnych i czujnikach, które pomagają im w nawigacji i identyfikacji celów. Atakujący mogą stosować techniki wpływające na ich sensory, np. oślepiać kamery czy manipulować sygnałami GPS, żeby zakłócić orientację i świadomość sytuacyjną robota [530, 100]. Przykładem tego typu zagrożeń są ataki na czujniki bezzałogowych stat-

ków powietrznych poprzez manipulację danymi GPS za pomocą takich narzędzi jak LabSat3. Są to tanie, przenośne i wszechstronne symulatory GPS obsługujące wiele konstelacji umożliwiające nagrywanie rzeczywistych danych oraz ich odtwarzanie w warunkach laboratoryjnych. Dzięki temu atakujący jest w stanie zakłócić lokalizację drona [447]. Ochrona przed tego typu zagrożeniami wykorzystuje głównie redundancję systemów sensorycznych poprzez łączenie danych z wielu czujników w celu weryfikacji poprawności odczytów, wykorzystanie algorytmów sztucznej inteligencji do identyfikowania fałszywych danych oraz fizyczne zabezpieczanie czujników np. z użyciem osłon odpornych na uszkodzenia mechaniczne.

- Wykorzystanie podatności na poziomie systemów sterowania: systemy sterowania autonomicznych robotów są jednym z najbardziej narażonych na ataki komponentów, gdyż pełnią kluczową rolę w zarządzaniu ruchem, decyzjami i wykonaniem misji [531]. Ataki mogą obejmować manipulację protokołami komunikacyjnymi, przejęcie kontroli nad algorytmami sterującymi lub wykorzystanie błędów w kodzie oprogramowania. Przykładowo, badania nad dronami Parrot AR Drone i DJI Phantom 4 wykazały, że wykorzystanie niezabezpieczonego protokołu telnet oraz pozostawienie otwartych portów umożliwiło przejęcie kontroli nad systemami sterowania i wykonanie nieautoryzowanych operacji, takich jak zmiana trasy lotu lub zatrzymanie silników [447, 158]. Jeśli chodzi o środki pozwalające przeciwdziałać tego typu zagrożeniom, to zazwyczaj wykorzystuje się bezpieczne protokoły komunikacyjne oraz mechanizmy kryptograficzne (np. szyfrowanie komunikacji między systemami sterującymi a urządzeniami zewnętrznymi oraz uwierzytelnianie i autoryzację użytkowników), okresowe przeprowadzanie audytu kodu źródłowego i oprogramowania w celu wykrycia potencjalnych luk bezpieczeństwa i weryfikacji poprawności działania algorytmów sterujących oraz zastosowanie mechanizmów wykrywania manipulacji pozwalających na monitorowanie integralności systemów sterujących w czasie rzeczywistym.
- Problem utrzymania autonomii i bezpieczeństwa decyzji AI: autonomiczne roboty na polu walki wyposażone są w algorytmy sztucznej inteligencji, które wspierają podejmowanie decyzji w dynamicznie zmieniających się warunkach otoczenia. Ataki na modele AI takie jak adversarial attacks (atak antagonistyczny) [77], mogą wprowadzać celowe błędy w procesie decyzyjnym np. zmieniać wyniki klasyfikacji obiektów, doprowadzając robota do podejmowania błędnych decyzji. Badania wykazały możliwość zmiany rozpoznawania znaków drogowych przez algorytmy AI poprzez wprowadzenie niewielkich zmian wizualnych [525, 158]. Wśród potencjalnych zabezpieczeń proponuje się typowo przeprowadzanie tzw. adversarial training, czyli szkolenie algorytmów sztucznej inteligencji na przykładach potencjalnych ataków, ich regularną analizę podatności oraz wykorzystanie modeli umożliwiające zrozumienie podejmowanych decyzji XAI (Explainable AI) [448].
- Ataki odmowy usługi: ataki typu Denial of Service (DoS) lub ich rozproszona wersja Distributed DoS (DDoS) mogą zakłócić działanie systemu, np. poprzez przeciążenie systemu komunikacyjnego lub zasobów oblicze-

niowych, co uniemożliwia realizację misji robota [469]. W warunkach bojowych takie zakłócenia mogą stanowić zagrożenie dla życia żołnierzy, dla których wsparcie robotów jest kluczowe. Przykładowo, atak DoS przeprowadzony na drona Parrot AR Drone 2.0 za pomocą pakietów powodujących całkowite rozłączenie drona z siecią sterującą [447]. Wśród możliwych metod ochrony przed tego typu atakami wyróżnia się użycie systemów wykrywania anomalii w ruchu sieciowym do identyfikacji nieautoryzowanych działań czy metody zapobiegania przeciążeniom.

- Zagrożenia wynikające ze złośliwego oprogramowania i nieautoryzowanego dostępu: autonomiczne systemy bojowe są podatne na ataki z wykorzystaniem złośliwego oprogramowania, które może być stosowane w celu uzyskania dostępu do systemów sterowania, zmiany funkcji robota czy nawet wyłączenia go w kluczowych momentach [27, 144]. Problem ten szczególnie dotyczy systemów, które korzystają z rozwiązań komercyjnych, często bardziej narażonych na podatności. W tym przypadku metodą ochrony przed tego typu zagrożeniami są regularne aktualizacje oprogramowania, co pozwala na usuwanie znanych luk bezpieczeństwa. Innym sposobem jest stosowanie systemów detekcji intruzów (Intrusion Detection System – IDS), dzięki czemu możliwe jest monitorowanie i blokowanie prób nieautoryzowanego dostępu. Ostatnią metodą jest tzw. air-gapping krytycznych systemów, czyli fizyczne oddzielenie systemów od sieci publicznych.

Do efektywnego zapewnienia cyberbezpieczeństwa autonomicznych robotów pola walki niezbędne jest zmierzenie się z szeregiem wyzwań. Jednym z nich jest fakt, iż złożoność systemów wojskowych zwiększa liczbę możliwych wektorów ataku, a ich zabezpieczenie wymaga zaawansowanych narzędzi do monitorowania i wykrywania potencjalnych nadużyć. Ponadto typowo wdrożenie zabezpieczeń na poziomie systemów sterowania wymaga dużych zasobów, zarówno w zakresie mocy obliczeniowej, jak i projektowania sprzętu (np. wdrożenie zaawansowanych modeli xAI może obniżyć efektywność operacyjną w warunkach bojowych), a same systemy sterowania są często dostosowane do konkretnych operacji, co ogranicza ich elastyczność wobec nowych zagrożeń. Konieczne jest zatem opracowanie bardziej odpowiednich i adaptacyjnych mechanizmów ochrony.

Podsumowując, cyberbezpieczeństwo autonomicznych robotów pola walki stanowi istotny element strategii obronnych współczesnych armii. Wymaga ono wszechstronnego podejścia, obejmującego zarówno technologie ochronne, jak i działania organizacyjne, takie jak szkolenia operatorów i audyty systemów. Wdrożenie takich działań jest kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa misji wojskowych w obliczu dynamicznie zmieniających się zagrożeń. W miarę postępu technologicznego i rosnącej autonomii systemów bojowych konieczne staje się ciągłe doskonalenie zabezpieczeń oraz rozwijanie regulacji prawnych, aby zapewnić odpowiedzialne i etyczne wykorzystanie tych technologii w konfliktach zbrojnych.

6.11. Fotonika — strategiczna technologia dla systemów bezzałogowych

Rozwój współczesnej cywilizacji technicznej jest w coraz większym stopniu determinowany zaawansowanymi technologiami elektronicznymi i informatycznymi. Ostatnie dekady przyniosły gwałtowny rozwój kolejnej technologii o olbrzymim potencjale — fotoniki. Fotonika jest dziedziną nauki i techniki, która staje się wszechobecna, odgrywa istotną rolę, począwszy od systemów komunikacyjnych, energetycznych, technologicznych, metrologicznych, aplikacji medycznych, robotycznych, technologii kosmicznych po systemy związane z obronnością i bezpieczeństwem państwa [403]. Integracja elementów elektronicznych i fotonicznych otwiera nowe możliwości dla współczesnych przyrządów i systemów, jednocześnie umożliwiając zmniejszenie ich rozmiaru, wagi i zużycia energii. W związku z tym układy elektroniki i fotoniki scalonej (Electronic Integrated Circuits (EIC) oraz Photonic Integrated Circuits (PIC)) będą kluczowymi elementami przyszłych generacji autonomicznych robotów. W zaleceniu Komisji Europejskiej (EU) 2023/2113⁶ zamieszczonym w punkcie 16.1.a czytamy: „Technologie w zakresie zaawansowanych półprzewodników: półprzewodniki, mikroelektronika i fotonika są zasadniczymi elementami urządzeń elektronicznych w krytycznych obszarach, takich jak systemy i zastosowania w dziedzinie łączności, informatyki, energii, zdrowia, transportu oraz obrony i kosmosu. Ze względu na ogromny prorozwojowy i transformacyjny charakter tych technologii oraz ich wykorzystywanie do celów cywilnych i wojskowych utrzymanie pozycji lidera w budowaniu i dalszym rozwoju tych technologii ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa gospodarczego” [123].

Najnowsza generacja komponentów fotonicznych, która jest obecnie opracowywana, będzie ukierunkowana na zintegrowane produkty i technologie o wyższej wartości. W ostatnich latach układy zintegrowanej fotoniki zrewolucjonizowały rynek telekomunikacji optycznej i centrów danych, a po dwóch dekadach nieprzerwanego rozwoju wkraczają na kolejne obszary zastosowań, związane przede wszystkim z szeroko rozumianymi technologiami czujnikowymi, a w szczególności z rynkiem IoT. Jednocześnie, obserwuje się w praktyce trend do integrowania rozwiązań mikroelektronicznych i fotonicznych, co pozwala na agregowanie zalet obu technologii i uzyskiwanie efektów synergii.

Optyka i fotonika ma w istocie wpływ na każdy aspekt nowoczesnych systemów bezpieczeństwa i obronności, nawet tych nie bazujących bezpośrednio na technologiach optycznych. Z punktu widzenia robotów autonomicznych szczególnie istotny jest rozwój następujących technologii i systemów fotonicznych:

- Technologie sensoryczne,
- Stabilizatory i żyroskopy optyczne,
- Komunikacja optyczna,
- Technologie światłowodowe,
- Zasilanie,
- Specjalizowane układy foniczne do nawigacji.

⁶ https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202302113

6.11.1. Fotoniczne technologie sensoryczne

Kamery i czujniki podczerwieni umożliwiają pojazdom bezzałogowym nawigowanie oraz prowadzenie obserwacji w różnych zakresach widmowych, co ma znaczenie w misjach rozpoznawczych i namierzających. Powszechnie używanymi czujnikami nawigacyjnymi dronów są obecnie czujniki GPS, barometryczne, akcelerometryczne i żyroskopowe. Kamery pracujące w zakresie widzialnym są wykorzystywane w fotografii powietrznej oraz wykrywaniu i śledzeniu celów. Kamery termowizyjne pracujące w zakresie podczerwieni (Short Wavelength Infrared (SWIR), Medium Wavelength Infrared (MWIR), Long Wavelength Infrared (LWIR)) są powszechnie używane do nadzoru, poszukiwań i akcji ratunkowych (surveillance, search and rescue (SAR)) oraz inspekcji przemysłowych. Optyka odgrywa kluczową rolę w ulepszaniu kamer stosowanych w dronach. Postęp w obiektywach umożliwia dronom rejestrowanie ujęć lotniczych z wyjątkową wyrazistością, szczegółowością i perspektywą, zmieniając sposób, w jaki patrzymy i dokumentujemy świat z góry. Podczas gdy zwiększanie rozdzielczości detektorów może poprawić zdolności systemów obrazowania, dalszy, znaczny postęp w tej dziedzinie wymaga poprawy jakości układów optycznych. Niezbędne jest doskonalenie technologii soczewek o minimalnych aberracjach, długich ogniskowych. Kamery Time-of-Flight (ToF), znane również jako kamery głębi 3D, umożliwiają pomiar odległości w czasie rzeczywistym i umożliwiają uzyskanie informacji o odległości od obiektu. Ponadto, powszechnie instalowane na bezzałogowych statkach powietrznych kamery mogą być również bogatym źródłem informacji o ruchu względnym pojazdu, na którym są zainstalowane. W Wojskowej Akademii Technicznej opracowywano nowy termowizyjny czujnik pozycjonujący, który ma na celu nie tylko zwiększenie dokładności i niezawodności systemu nawigacyjnego, ale dodatkowo umożliwi akwizycję obrazów termowizyjnych jako danych uzupełniających świadomość sytuacyjną w całkowitej ciemności, trudnych warunkach pogodowych lub w pomieszczeniach [45].

Lidar i sonary to zaawansowane systemy sensoryczne umożliwiające dronom skanowanie terenu i tworzenie precyzyjnych map i modeli 3D z dokładnością do centymetra i wykrywania szczegółów, które byłyby niewidoczne przy użyciu mniej zaawansowanych metod, co jest niezbędne w przypadku misji wymagających precyzyjnego rozpoznania. LiDAR (Light Detection and Ranging) emituje z dużą częstotliwością impulsy laserowe, które następnie odbijają się od powierzchni i wracają do odbiornika. Umożliwia to niezwykle dokładny pomiar odległości, nawet w przypadku obiektów w ruchu. W przypadku dronów i autonomicznych pojazdów LiDAR pracujący w zakresie podczerwieni umożliwia szczegółową obserwację otoczenia, nawet w złych warunkach pogodowych oraz w nocy, w warunkach zapylenia, kurzu, mgły i innych czynników środowiskowych, które zwykle blokują światło widzialne umożliwiając bezpieczniejsze i bardziej niezawodne działanie. LiDAR stał się przełomową technologią szczególnie w połączeniu z dronami. To połączenie zmusiło przemysł do zredefiniowania systemu akwizycji, mapowania i analizy danych. Ostatecznie wzrasta dokładność pomiaru odległości, wykrywania obiektów, analizy przestrzennej i modelowania terenu. LiDARy dla dronów spełniają następujące wymagania:

- mapowanie terenu pod wegetacją,
- mapowanie obszarów trudno dostępnych,
- uzyskiwanie danych w czasie rzeczywistym,
- dokładność w zakresie 2,5–10 cm.

Czujniki antykolizyjne umożliwiają dronom omijanie przeszkód w powietrzu, co jest istotne przy misjach w zatłoczonych obszarach miejskich lub w trudnym terenie. Czujniki termiczne umożliwiają detekcję źródeł ciepła, co jest niezbędne w akcjach poszukiwawczo-ratowniczych, a także w działaniach bojowych, gdzie wykrycie ciepła może wskazywać na obecność jednostek wroga.

6.11.2. Stabilizatory i żyroskopy optyczne

Te elektroniczne elementy pomagają dronom utrzymywać stabilność w powietrzu, nawet w trudnych warunkach atmosferycznych. Przekłada się to na ich skuteczność w działaniu. Żyroskopy światłowodowe stosowane obecnie w najnowocześniejszych dronach zawierają szpule nici światłowodowych o długości kilku kilometrów. Obecnie czułość i stabilność żyroskopu należy zasadniczo porównać z jego rozmiarem i wagą. W miarę jak drony i satelity stają się coraz mniejsze i wszechobecne, zapotrzebowanie na kompaktowe żyroskopy do celów nawigacyjnych stanie się krytyczne. Żyroskop optyczny to narzędzie umożliwiające utrzymanie równowagi, dzięki któremu drony mogą wykonywać precyzyjne manewry i utrzymywać zadany kurs [276]. Jego ideą jest wykorzystanie wiązki laserowej do pomiaru prędkości i kierunku obrotu [294]. W żyroskopie laserowym wiązki spójnego światła z lasera obiegają rezonator pierścieniowy w przeciwnych kierunkach; obrót urządzenia w płaszczyźnie rezonatora powoduje zmianę częstotliwości w obu wiązkach (efekt Dopplera: częstotliwość wiązki obiegającej rezonator w kierunku zgodnym z obrotem zmniejsza się, w przeciwnym – rośnie), a powstała różnica częstotliwości jest proporcjonalna do prędkości kątowej. W fotodetektorze, umieszczonym na wyjściu urządzenia, w wyniku nałożenia się obu wiązek otrzymuje się sygnał różnicowy, który może być użyty np. do automatycznego utrzymania obiektu nawigacyjnego na właściwym kursie. Naukowcy z Uniwersytetu w Rochester opracowują układy fotoniczne, które wykorzystują technikę kwantową zwaną „wzmacnianiem słabej wartości” w celu zastąpienia żyroskopów dotychczas stosowanych w dronach, umożliwiając im przemieszczanie się tam, gdzie sygnały GPS są zablokowane lub niedostępne. Współczesne drony, działające jednocześnie w tej samej przestrzeni powietrznej, muszą unikać kolizji. Badacze z MIT (Massachusetts Institute of Technology) opracowali system MADER (Multi-Agent and Dynamic Environments tRajectory planner), który pozwala dronom planować optymalne trajektorie lotu bez ryzyka kolizji [493]. W rzeczywistości jednak, opóźnienia w komunikacji między dronami mogą prowadzić do potencjalnych kolizji. Dlatego też wprowadzono ulepszony system, Robust MADER uwzględniający opóźnienia w komunikacji i zapewniający 100% skuteczności w generowaniu trajektorii bezkolizyjnych.

6.11.3. Komunikacja optyczna

Technologia laserowej łączności bezprzewodowej, (optical wireless communications – OWC) stanowi perspektywiczny kierunek rozwoju systemów łączności).

Szybkość transmisji, zwiększony poziom bezpieczeństwa danych oraz brak ograniczeń pasma sygnałowego to niezaprzeczalne atuty OWC. Technologie optyczne mają ogromny potencjał wojskowy. Oferują niezwykle trudną do wykrywania formę komunikacji, która może działać nawet w bezpośrednim kontakcie z przeciwnikiem. Układy OWC umożliwiają efektywną wymianę informacji między różnymi obiektami, np. samolotami, dronami czy łodziami podwodnymi [280, 107]. Obecnie Ukraińcy pracują nad dronem, do którego przymocowan światłowód dzięki czemu stanie się on bardziej odporny na zakłócenia elektroniczne [5].

6.11.4. Techniki światłowodowe

W niektórych rozwiązaniach drony prowadzone są przy pomocy rozwijanego kabla światłowodowego w celu zapewnienia komunikacji z operatorem. Na przykład rosyjski dron kamikadze FPV (drony-kamikadze klasy FPV (First Person View, dron pilotowany z widokiem na żywo z kamery pokładowej)), korzystał z takiego rozwiązania w celu uniknięcia zakłóceń radiowych. Rozwiązanie to ma jednak więcej wad niż zalet, przede wszystkim ograniczając bezzałogowcom zdolności manewrowe, jak również zwiększając koszty aparatu, który jest z założenia jednorazowego użytku.

Żyroskopy światłowodowe Fibre Optic Gyroscopes (FOGs) są wykorzystywane w nawigacji i systemach prowadzenia wojskowego wielu pojazdów, włączając samoloty i łodzie podwodne. FOG są precyzyjne w określaniu zmian kątowych i przyspieszenia, co jest kluczowe dla autonomicznej nawigacji i celnego namierzania, szczególnie w sytuacjach interferencji elektronicznych zakłócających nawigację satelitarną. Dodatkowo, FOG są krytycznymi komponentami systemów kontroli ognia, zapewniając stabilność układów celowania i strzału, np. w uzbrojonych helikopterach. Te cechy zapewniają, że systemy uzbrojenia dokładnie przeprowadzają poszukiwanie, celowanie, śledzenie oraz strzał podczas ruchu. Ostatnie osiągnięcia w technologii wytwarzania układów optoelektroniki zintegrowanej (PICs – Photonic Integrated Circuits) na podłożach półprzewodnikowych zainspirowało badania i prace zmierzające do opracowania żyroskopu optycznego w technologii fotonicznego układu scalonego.

Pojęcie awioniki w obronności odnosi się do wykorzystania elektroniki i systemów optycznych w samolotach wojskowych i innych pojazdach latających. Obejmuje on integrację czujników, systemów nawigacyjnych, sprzętu komunikacyjnego i innej elektroniki w celu zapewnienia samolotowi i jego załodze informacji niezbędnych do wykonania misji. Aby sprostać zmieniającym się potrzebom operacji wojskowych i dotrzymać kroku postępowi technologicznemu, systemy awioniki stale ewoluują. Rozwój nowych systemów awioniki nadal jest przedmiotem badań i inwestycji w przemyśle obronnym. Światłowody są w coraz większym stopniu stosowane w awionice pojazdów wojskowych z powodu korzyści rozmiarowych, wagowych i mocy zasilania (size, weight, and power (SWaP)) oraz możliwości uzyskania szybkiego przepływu danych. Są kluczowe dla transmisji sygnałów kontrolnych i danych z czujników w zaawansowanych systemach awioniki, z racji na wysokie przepływności binarne i odporność na zakłócenia elektromagnetyczne. Wykorzystanie światłowodów w awionice ma charakter przełomowy.

Światłowodowe czujniki drgań, temperatury, ciśnienia oraz naprężeń wzdłuż włókna dostarczają w czasie rzeczywistym informacji o potencjalnych zagrożeniach lub nieautoryzowanym dostępie. Konieczność zapewnienia odporności na zakłócenia elektromagnetyczne i trudne warunki środowiskowe powodują, że czujniki światłowodowe wypierają w wielu zastosowaniach, a szczególnie zastosowaniach wojskowych, czujniki tradycyjne.

6.11.5. Specjalizowane układy fotoniczne do nawigacji robotów

Stale rozwijająca się fotonika zintegrowana umożliwia budowę coraz większych i bardziej złożonych układów optycznych na jednym podłożu – chipie. Część tych układów zostaje zaprojektowana z myślą o konkretnym przeznaczeniu, na przykład do zastosowania w czujnikach lub systemach telekomunikacyjnych. W związku z tym zintegrowana fotonika i hybrydowa optoelektronika⁷ będą kluczowymi elementami przyszłych generacji autonomicznych robotów. Dzisiejsze narzędzia projektowe w dużej mierze zajmują się albo elektroniką albo fotoniką, co w konsekwencji powoduje utratę części granicznych efektów optoelektronicznych. Realizowany przy wsparciu programu działania „Maria Skłodowska-Curie” projekt DRIVE-In dostarczył narzędzi projektowych do tworzenia zintegrowanej fotoniki. Firma One Silicon Chip Photonics (OSCP) z Montrealu specjalizująca się w wytwarzaniu zintegrowanych czujników optycznych (przyśpieszenia, drgań, żyroskopów) zaanonsowała, iż opracowała optyczny inercyjny system o dokładności czujników nawigacyjnych dla zastosowań w przestrzeni powietrznej i kosmicznej wielokrotnie taniej. Dzięki temu, że czujniki te nie posiadają ruchomych części wykazują większą dokładność w stosunku do powszechnie stosowanych Micro-Electro-Mechanical Systems Inertial Measurement Units (MEMS IMUs) oraz zapewniają precyzyjną nawigację nawet bez dostępu do sygnału GPS [4]. OSCP jest partnerem francuskiej firmy Thales, która rozwija autonomiczny system kolejowy i testuje w warunkach rzeczywistych prototypy OSCP.

6.11.6. Zasilanie bezprzewodowe

Każdy typ dronów, niezależnie od ich przeznaczenia i rozmiaru napotyka te same ograniczenia związane ze skończonym czasem lotu. Okazuje się, że znalezienie długo funkcjonującego źródła zasilania, wykorzystującego łatwo dostępne i tanie zasoby, mającego dobry stosunek magazynowanej energii do wagi, wytwarzającego mało hałasu i drgań, które mogłoby być łatwo i szybko wymieniane, nie jest łatwe. Jednym z proponowanych rozwiązań jest wykorzystanie ładowania bezprzewodowego. Ładowanie bezprzewodowe ma za zadanie umożliwić ładowanie akumulatorów zasilających dron bez konieczności ładowania. Systemy ładowania typu ziemia-powietrze pozwalają operatorowi na uzyskanie prawie nieograniczonego czasu lotu [494]. Obecnie można wskazać dwie różne technologie na wczesnym, eksperymentalnym etapie rozwoju. Pierwsza wykorzystuje pole elektromagnetyczne do ładowania. Umiejscowione na ziemi anteny nadawcze wytwarzają pola elektromagnetyczne umożliwiające ładowanie akumulatorów drona wyposażonego w specjalne anteny odbiorcze. Druga to fotowoltaiczne i laserowe sys-

⁷ Integrated Photonics for the next generation of autonomous vehicles using InP technologies, CORDIS – EU research results: <https://doi.org/10.3030/860763>

temy ładowania, w których światło słoneczne bądź silna wiązka laserowa jest odbierana przez specjalnie zaprojektowany moduł konwersji fotoelektrycznej zamieniający energię świetlną na energię elektryczną, która trafia bezpośrednio do silników albo ładuje akumulatory. Ograniczeniami funkcjonowania tego typu systemów są odległość między laserem a dronem oraz warunki atmosferyczne. Technologia fotowoltaiczna rozwija się szybkim tempie, osiągając sprawność paneli fotowoltaicznych na poziomie 175 W/m². Zasilanie dronów wyłącznie energią słoneczną wymaga pokrycia znacznej części powierzchni statku, na przykład całej górnej powierzchni skrzydeł, panelami. Tak więc, po starcie dron mógłby przebywać w powietrzu tak długo jak świeci słońce. Dlatego systemy hybrydowe bateryjno-solarne zdobywają na znaczeniu z powodu zadziwiającej trwałości. W ostatnim roku, zademonstrowano lot drona z systemem hybrydowym trwający 25 dni. Zespół naukowców z Australii zademonstrował możliwość wykorzystania lekkiej, elastycznej, ultra-cienkiej perowskitowej technologii solarnej (jednozłazowe ogniwo o sprawności 20,1%) do napędu niewielkiego autonomicznego drona, potwierdzając tym samym stabilność i potencjał pozyskiwania energii powyższej technologii [156, 7]. Naukowcy z Northwestern Polytechnical University (NPU) w Chinach opracowali sprzęt potrzebny do zapewnienia dronom nieograniczonego czasu lotu z wykorzystaniem wysokoenergetycznych wiązek laserowych [441]. Pierwszym krokiem było opracowanie algorytmu śledzenia dronów, który okazał się skuteczny w różnych środowiskach, warunkach oświetleniowych i pogodowych. Opracowano również technologię adaptacyjnego kształtowania wiązki lasera, będącą pod kontrolą algorytmu, odpowiadającego za regulację jej intensywności zależnie od odległości lasera od drona tak, aby np. nie zniszczyć go zbyt intensywną wiązką energii świetlnej. Firma PowerLight Technologies z Waszyngtonu opracowała laserowy system zasilania dronów ustanawiając trzy światowe rekordy i zdobywając kontrakt z NASA. PowerLight pracuje również nad rozwojem technologii, która ma wykorzystywać kabel światłowodowy jako medium służące do transmitowania energii laserowej⁸ [422]. Nowe medium ma tę przewagę nad klasycznym okablowaniem miedzianym, że jest dużo lżejsze i cechuje je nieporównanie większa sprawność energetyczna.

6.12. Dostarczanie energii elektrycznej

Rozwój robotów pola walki jest silnie powiązany z najnowocześniejszymi osiągnięciami technologicznymi w zakresie pozyskiwania, przetwarzania i magazynowania energii elektrycznej, także, a być może przede wszystkim, w warunkach ograniczonego dostępu do sieci elektroenergetycznej. Mobilne systemy autonomiczne, zasilane najczęściej z akumulatorów, muszą korzystać i być w pełni kompatybilne z mobilnymi systemami szybkiego ładowania o najwyższej niezawodności. Technologie związane z systemami zasilania muszą być wyodrębnione jako oddzielny obszar badawczo-rozwojowy ze względu na charakter zmian zachodzących w ostatnich latach w systemach zasilania dla zastosowań krytycznych. Poza koniecznością wysokowydajnego magazynowania energii w systemach autonomicznych pola walki, kolejnym fundamentalnym zagadnieniem jest

⁸ <https://powerlighttech.com/power-over-fiber/>

miniaturyzacja takich systemów, a w szczególności zmniejszanie wymiarów i masy układów zasilających. Jednoczesne osiągnięcie trzech podstawowych celów definiowanych jako wysoka sprawność energetyczna, niezawodność oraz stopień miniaturyzacji w zasadzie nie jest możliwy bez wdrażania najnowszych rozwiązań z obszaru półprzewodnikowych przyrządów mocy najnowszych generacji wytwarzanych w dostępnych aktualnie dwóch nowych technologiach: węglika krzemu – SiC oraz azotku galu – GaN. Ich zastosowanie zależy od wymagań związanych z wartością napięcia pracy, przetwarzanej mocy oraz maksymalnej częstotliwości pracy [260]. Pewne jest, że współczesne pole walki nie będzie funkcjonowało bez nieporównywalnie wyższych niż do chwili obecnej zasobów energii elektrycznej. Strategiczne znaczenie systemów autonomicznych w dużej mierze zależy od umiejętności tworzenia nowoczesnych systemów zasilania o wysokim poziomie rozproszenia i zapewnienia specjalizowanych środków ochrony dla systemów zasilania przy jednoczesnych działaniach na rzecz ograniczenia możliwości wykrywania pracy takich systemów w warunkach polowych.

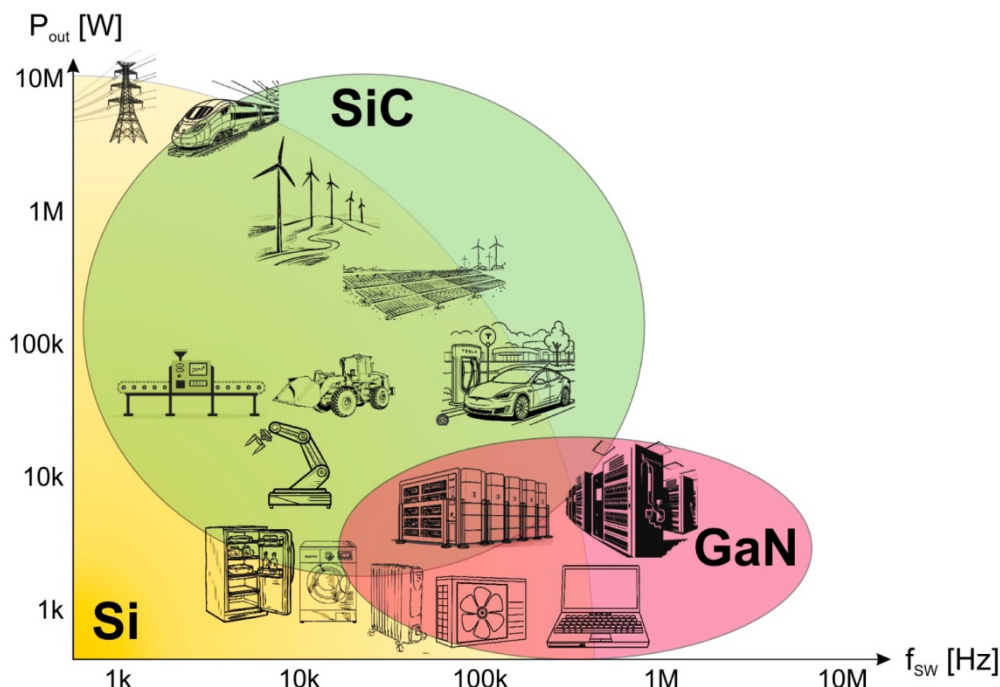
Z wielu powodów, nie tylko podyktowanych względami ekonomicznymi, projektanci systemów wojskowych coraz częściej sięgają po rozwiązania dostępne komercyjnie (COTS – Commercial Off-The-Shelf). W przypadku zagadnień związanych z przetwarzaniem energii elektrycznej bardzo dobrym polem doświadczalnym jest produkcja bateryjnych pojazdów samochodowych (BEV – Battery Electric Vehicle) oraz hybrydowym (HEV – Hybrid Electric Vehicle). Firmy motoryzacyjne od ponad dekady zderzają się z problemami konieczności zwiększenia gęstości mocy w napędach elektrycznych, stosowania wysokowydajnych systemów chłodzenia urządzeń energoelektronicznych, zarządzania przepływem/odprowadzaniem ciepła, a jednocześnie koniecznością przestrzegania pewnej, zestandaryzowanej architektury, która przyspiesza rozwój i wdrażanie nowoczesnych technologii półprzewodnikowych w aplikacjach motoryzacyjnych. Odniesienie się do przemysłu motoryzacyjnego nie jest w zasadzie przypadkowe, bowiem dążenie do autonomicznego funkcjonowania pojazdów samochodowych jest naturalnym, ogólnie znanym trendem. Miniaturyzacja magazynów energii oraz napędów elektrycznych ma kluczowe znaczenie w projektach motoryzacyjnych, przez co cele tych rynków wydają się być w wielu obszarach całkowicie zbieżne. Certyfikacja przyrządów i modułów półprzewodnikowych do rygorystycznych norm związanych z produkcją pojazdów samochodowych powinna wręcz sprzyjać adaptacji wielu gotowych opracowań i rozwiązań w zastosowaniach wojskowych. Oba rynki charakteryzują się wyraźnym wzrostem elektryfikacji systemów napędowych, systemów pokładowych, zaawansowanych systemów czujnikowych. Każdy z takich systemów wymaga zastosowania dedykowanych i niezawodnych źródeł głównych i zapasowych bardzo wysokiej jakości energii, projektowanych z wykorzystaniem najnowszych osiągnięć w zakresie wytwarzania przyrządów półprzewodnikowych mocy [132].

Z uwagi na koszty, dojrzałość technologiczną oraz doświadczenie projektantów w zakresie urządzeń zasilających, krzemowe przyrządy półprzewodnikowe mocy jeszcze przez jakiś czas utrzymają swoją wiodącą pozycję rynkową. Rosnące wymagania związane z zasilaniem systemów militarnych będą jednak prowadziły nieuchronnie do zmian rynkowych. Nowe technologie półprzewodnikowe pozwa-

lają na pracę układów przekształtnikowych przy wyższych częstotliwościach, co bezpośrednio przekłada się na miniaturyzację współpracujących elementów biernych (kondensatory i elementy indukcyjne) prowadząc do zwiększenia gęstości mocy. Straty mocy w nowej generacji przyrządów półprzewodnikowych przy pracy na wyższych częstotliwościach są bez wątpienia znacznie niższe niż w przypadku przyrządów krzemowych o analogicznych parametrach [455]. W związku z powyższym podstawowym ograniczeniem wykorzystania technologii krzemowych przyrządów półprzewodnikowych jest możliwość dalszej miniaturyzacji układów zasilania. W związku z powyższym miniaturyzacja systemów mobilnych będzie wymuszała stopniową adaptację i docelowe przejście na przyrządy półprzewodnikowe wytwarzane w nowych technologiach [378].

Półprzewodniki z szeroką przerwą energii zabronionych charakteryzują się zasadniczo o rząd wielkości wyższą wartością maksymalnego natężenia pola elektrycznego. Dzięki wyższej odporności materiału półprzewodnikowego na przebicie obszar aktywny półprzewodnikowego przyrządu mocy może być cieńszy i mniej rezystywny, co przekłada się w oczywisty sposób na drastyczną redukcję statycznych strat mocy przy przewodzeniu prądu o wysokiej wartości natężenia. Ładunek gromadzony w złączu półprzewodnikowym (pojemność złączowa) jest w tym przypadku znacznie niższy w porównaniu z możliwościami technologii krzemowej, co przekłada się bezpośrednio na niskie straty mocy przy przełączaniu przyrządów półprzewodnikowych nowej generacji. Ekstremalnie mała wartość koncentracji samoistnej nośników prądu w temperaturach zbliżonych do temperatury pokojowej powoduje, że charakterystyki elektryczne przyrządów półprzewodnikowych mocy praktycznie nie ulegają żadnym istotnym zmianom w zakresie temperatury od -55°C do $+200^{\circ}\text{C}$, dzięki czemu można zapewnić bardzo wysoki poziom niezawodności w przypadku pracy przyrządów w podwyższonych temperaturach i w niekorzystnych warunkach otoczenia, przy ograniczonych nakładach na systemy chłodzenia urządzeń zasilających. Co więcej, półprzewodniki z szeroką przerwą energetyczną są znacznie bardziej odporne na działanie wysokoenergetycznego promieniowania elektromagnetycznego. Nowe technologie pozwalają jednocześnie na zmniejszenie powierzchni zajmowanej przez przyrządy półprzewodnikowe w określonej klasie napięciowej w porównaniu z technologią krzemową, a gęstość prądu przekracza zdecydowanie wartość 1 kA/cm^2 . Na rysunku 6.6 przedstawiono schematycznie zakresy przenoszonych mocy oraz częstotliwości pracy przyrządów półprzewodnikowych wykonanych w technologii krzemowej, SiC oraz GaN. Prezentowane dane wskazują, że uzyskanie zadowalającego kompromisu pomiędzy napięciem pracy, rezystancją w stanie włączenia, prędkością przełączania oraz maksymalną temperaturą pracy przyrządu półprzewodnikowego nie jest możliwe w przypadku krzemowych przyrządów półprzewodnikowych mocy. Doskonałe od kilku dekad standardowe, wysokonapięciowe tranzystory MOSFET będą miały problem z uzyskaniem wysokiej wydajności prądowej. Poprawę tego parametru można uzyskać w krzemowych technologiach SJ (super junction), ale niestety kosztem ograniczenia maksymalnego napięcia pracy takich konstrukcji tranzystorów. Krzemowe tranzystory bipolarne z izolowaną bramką (IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor) pozwalają na osiągnięcie wysokich prądów przewodzenia, niestety kosztem drastycznego obniżenia wartości parametrów związanych z prędkością ich przełączania. Dynamiczny rozwój miniatury-

zowanych urządzeń zasilających dużej mocy nie jest z tego powodu możliwy bez adaptacji nowych technologii półprzewodnikowych, podobnie jak możliwości drastycznego ograniczenia wymiarów i masy urządzeń zasilających małej mocy. Straty dynamiczne generowane przez krzemowe przyrządy półprzewodnikowe mocy przy pracy z dużą częstotliwością przełączania są nieakceptowalnie wysokie z punktu widzenia rozwoju lekkich, mobilnych systemów autonomicznych.



Rysunek 6.6. Porównanie użyteczności półprzewodnikowych przyrządów mocy wytwarzanych w różnych technologiach w zależności od poziomu mocy oraz częstotliwości pracy układów przekształtnikowych [511]

Praca przy wyższych częstotliwościach musi docelowo prowadzić do zwiększenia stopnia integracji urządzeń zasilających z uwagi na konieczność ograniczenia wpływu rozproszonych składowych pasożytniczych, głównie o charakterze indukcyjnym. Stosowane w technologii krzemowej przestarzałe technologie montażu przyrządów półprzewodnikowych stały się wąskim gardłem na pewnym etapie rozwoju nowoczesnych technologii półprzewodnikowych. Obserwowany jest aktualnie silny i dynamiczny trend w kierunku opracowywania nowoczesnych, nisko-indukcyjnych obudów dla przyrządów półprzewodnikowych nowej generacji. Występujące, zidentyfikowane efekty pasożytnicze powodują stopniowe odejście od przyrządów mocy w obudowach dyskretnych, na rzecz specjalizowanych, dedykowanych modułów mocy rozwijanych głównie na rzecz producentów przyrządów półprzewodnikowych w technologiach SiC oraz GaN. Wszystkie wymienione czynniki wskazują na nadejście ery zintegrowanych modułów mocy, w których większe elementy układów przekształtnikowych, czasami nawet z elementami sterowania, będą integrowane w postaci modułu mocy zawierającego odpowiednio połączone z punktu widzenia funkcjonalnego diody oraz tranzystory montowane na wspólnym podłożu. Nowe podejście do projektowania modułów mocy staje się również nowym obszarem badawczym i wyzwaniem w zakresie rozwiązań zapewniających odprowadzanie ciepła i zapobiegających kumulowaniu się strat mo-

cy w niewielkich obszarach i przestrzeniach, co w znaczący sposób prowadzi do stopniowej degradacji przyrządów półprzewodnikowych i ograniczenia ich niezawodności. Z tego punktu widzenia konstruktorzy i producenci autonomicznych robotów pola walki już dzisiaj powinni myśleć z wyprzedzeniem o zapewnieniu infrastruktury do integracji i produkcji dedykowanych modułów mocy nowej generacji. Strategiczne znaczenie niezawodnego dostępu do energii elektrycznej o odpowiedniej jakości na współczesnym polu walki powinno z jednej strony stymulować rozwój krajowego przemysłu w tym zakresie, ale z drugiej strony należy stworzyć odpowiednie warunki do harmonijnego rozwoju tej tematyki w Polsce. Wzorem projektów motoryzacyjnych należy mieć na względzie indywidualny, niepowtarzalny charakter dedykowanych systemów zasilania dla konkretnych rozwiązań w sprzęcie wojskowym.

Koszty wdrażania nowych technologii półprzewodnikowych powinny być rozpatrywane w ujęciu systemowym. Przyrządy półprzewodnikowe mocy nowej generacji będą w początkowym okresie adaptacji rynkowej wyraźnie droższe od przyrządów krzemowych. Poza uzasadnianymi powyżej korzyściami wynikającymi z perspektywicznych możliwości miniaturyzacji systemów zasilania należy brać między innymi pod uwagę korzyści wynikające z podwyższonej niezawodności przy pracy w niekorzystnych warunkach otoczenia, a także chociażby ograniczenie nakładów na systemy chłodzenia pasywnego, aktywnego, w tym urządzeń klimatyzacyjnych w przypadku systemów większej mocy. Poziom inercji związanej z przyjmowaniem się nowych rozwiązań jest uwarunkowany poziom świadomości, wiedzy i doświadczenia projektantów urządzeń zasilających. Wdrażanie nowych technologii wiąże się bowiem z wykorzystaniem nowych narzędzi, modeli oraz zasad projektowania. Pełne wykorzystanie potencjału nie jest bowiem możliwe poprzez bezpośrednie zastąpienie przyrządów krzemowych przyrządami nowej generacji. Z uwagi na specyfikę nowych rozwiązań, a głównie z powodu podwyższenia częstotliwości pracy układów przekształtnikowych, całe urządzenie zasilające wymaga przeprojektowania i doboru komponentów pasywnych dopasowanych do wymagań nowego projektu. Zwiększenie częstotliwości pracy urządzeń przekształtnikowych ma także wiele następstw w postaci odpowiedniego podejścia do projektowania wielowarstwowych obwodów drukowanych pracujących przy wyższych częstotliwościach i zawierających coraz częściej komponenty wbudowane. Wyższa częstotliwość pracy zmienia też sposób postrzegania zagadnień związanych z emisją pola elektromagnetycznego i szeroko rozumianą kompatybilnością elektromagnetyczną urządzeń zasilających. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że urządzenia takie przełączają często napięcia przekraczające 1 kV oraz prądy osiągające wartość co najmniej kilkudziesięciu amperów z częstotliwością przekraczającą 100 kHz. Praca z takimi sygnałami wymaga często stosowania nowych rozwiązań w zakresie sterowników bramkowych, topologii przekształtników energoelektronicznych oraz algorytmów sterowania, które są specyficzne dla technologii półprzewodnikowych nowej generacji. Podwyższona częstotliwość pracy stawia też znacznie wyższe wymagania elementom systemu pomiarowego pozwalającego na wiarygodną charakteryzację parametrów wyjściowych i funkcjonalnych urządzeń zasilających.

6.13. Egzoszkielety

Wprawdzie egzoszkielety nie są uznawane ani za roboty ani za urządzenia autonomiczne, ale należy na nie spojrzeć przez pryzmat współdziałania robotów i ludzi na polu walki. Mogą stanowić alternatywę dla robotów autonomicznych wspomagających żołnierzy w wielu zadaniach przez nich realizowanych. Stąd duże zainteresowanie wojska tego typu urządzeniami. Ponadto należy zwrócić uwagę, że z punktu widzenia sterowania egzoszkielety wykorzystują te same technologie, co manipulatory i maszyny kroczące. Dla kompletności kreślonego obrazu zdecydowano się w tym opracowaniu na krótki opis ich możliwości.

Egzoszkielety do zastosowań militarnych są zasilanymi konstrukcjami lub skafandrami, w które ubiera się żołnierz, aby zwiększyć wydolność fizyczną swego organizmu. Aktywnie wspomagając ruchy żołnierza, egzoszkielety umożliwiają przenoszenie ciężkich ładunków na dużych odległościach. Mogą też wspomagać stabilizację pozycji rąk, umożliwiać pokonywanie trudnych przeszkód (np. szerokich rowów czy wysokich ścian). Pokrywające całe ciało egzoszkielety-skafandry stanowią ochronę kuloodporną. Mogą być one zintegrowane z odpowiednią bronią. Jest wiele sytuacji w trakcie prowadzenia działań bojowych, gdy bezpośrednia obecność człowieka jest konieczna, np. w celu udzielenia pomocy medycznej rannym żołnierzom lub naprawy cennego sprzętu.

Badania nad egzoszkieletami do zastosowań wojskowych rozpoczęły się ponad pięćdziesiąt lat temu, w ramach prac nad projektem HARDIMAN. Egzoszkielet HARDIMAN został zbudowany w ramach projektu General Electric o nazwie „Human Augmentation Research and Development Investigation”⁹. HARDIMAN był wyposażony w silniki hydrauliczne i elektryczne. Nie odniósł on sukcesu, ponieważ zdarzało się, że sterowanie napędów generowało gwałtowne i niekontrolowane ruchy.

W 2001 roku DARPA rozpoczęła własne badania nad egzoszkieletami, uruchamiając program „Exoskeletons for Human Performance Augmentation” [214]. Celem programu było zaprojektowanie egzoszkieletów zwiększających siłę użytkownika. Między innymi firma Sarcos została wyznaczona jako realizator tego projektu. W 2006 roku DARPA zaakceptowała prototyp egzoszkieletu opracowany przez tę firmę, a w 2010 roku firma Sarcos dostarczyła egzoszkielet XOS. XOS to egzoszkielet całego ciała, który zwiększa siłę użytkownika dzięki siłownikom hydraulicznym. XOS ułatwia noszenie kuloodpornego pancerza i innych ciężkich przedmiotów. Firma poczyniła dalsze postępy, co doprowadziło do stworzenia zaawansowanego egzoszkieletu Guardian XO, przeznaczonego dla robotników [9]. Wykorzystuje czujniki siły do wykrywania każdego ruchu, który wykonuje ubrany w niego żołnierz, a następnie porusza się płynnie dopasowując się do jego ciała. Prototyp został zaprezentowany w 2019 roku, a powodowane przez niego zwiększenie możliwości fizycznych człowieka uczyniło go przedmiotem zainteresowania wojska.

Kolejnym przykładem projektów wspieranych przez DARPA jest Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX). Projekt ten został rozpoczęty w 2000 roku, tuż

⁹ <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/AD0739735.pdf>

po rozpoczęciu programu „Exoskeletons for Human Performance Augmentation”. BLEEX umożliwiał żołnierzowi noszenie ciężkich ładunków na długich dystansach. Siłowniki zwiększające siłę stawów nóg oraz pas biodrowy pozwalały na odpowiednie rozłożenie ładunków przenoszonych przez żołnierzy. Przykładem częściowego egzoszkieletu jest ONYX, który rozbudowywano zaczynając od aktywnego stabilizatora kolana. Jest to projekt firmy Lockheed Martin finansowany przez amerykańskie Centrum Badań, Rozwoju i Inżynierii Żołnierzy Natic¹⁰ (U.S. Army Natick Soldier Systems Center) (NSRDEC¹¹). W ramach tego projektu, rozpoczętego w 2018 roku, podstawowa wersja została rozbudowana do zaawansowanego egzoszkieletu. Ten egzoskielet kończyn dolnych jest lekki i łatwy do noszenia. Wykorzystuje on metody sztucznej inteligencji do przewidywania ruchów żołnierza, a w efekcie do wspomagania tych ruchów.

Obecne trendy rozwojowe koncentrują się na lekkich, elastycznych urządzeniach o dużej wytrzymałości. Takie cechy ma np. egzoskielet ExoAtlet. Można podać wiele innych przykładów egzoszkieleto¹²ów, budowanych z zamiarem wspomagania możliwości fizycznych żołnierzy. Na szczególną uwagę zasługuje amerykański Tactical Light Operator Suit (TALOS). Jest to jedno z najbardziej zaawansowanych rozwiązań, stanowiące kuloodporny skafander zwiększający siłę użytkownika. Wykorzystuje rozszerzoną rzeczywistość (Visual Augmentation System – VAS), gdzie przed oczyma żołnierza oprócz widoku otoczenia ukazują się dodatkowe informacje generowane komputerowo. Wyposażony jest w broń. Projekt badawczy rozpoczął się w 2013 roku i trwał do 2019 roku¹².

Obecnie prace nad egzoszkielecikami nakierowane są na zmniejszenie hałasu generowanego przez napędy i zasilanie.

¹⁰ <https://www.army.mil/natick>

¹¹ https://www.army.mil/article/216966/nsrdec_now_the_ccdc_soldier_center_has_a_new_name_and_a_bright_future

¹² <https://www.builtbyproper.com/ussocom-talos-c4i-engineer>

ROZDZIAŁ 7

Kluczowe technologie dostępne w Polsce

Poniżej przedstawiono wybór istotnych technologii niezbędnych do stworzenia autonomicznych robotów pola walki. Skoncentrowano się na kilku polskich ośrodkach badawczych. To, co tu przedstawiono, nie wyczerpuje ani zestawu niezbędnych technologii ani możliwości wybranych ośrodków. Ponadto należałoby uwzględnić możliwości innych polskich instytucji badawczych. Stworzenie rzetelnego i pełnego wykazu wymaga czasu i odpowiedniego finansowania.

7.1. Doświadczenia Politechniki Poznańskiej (PP)

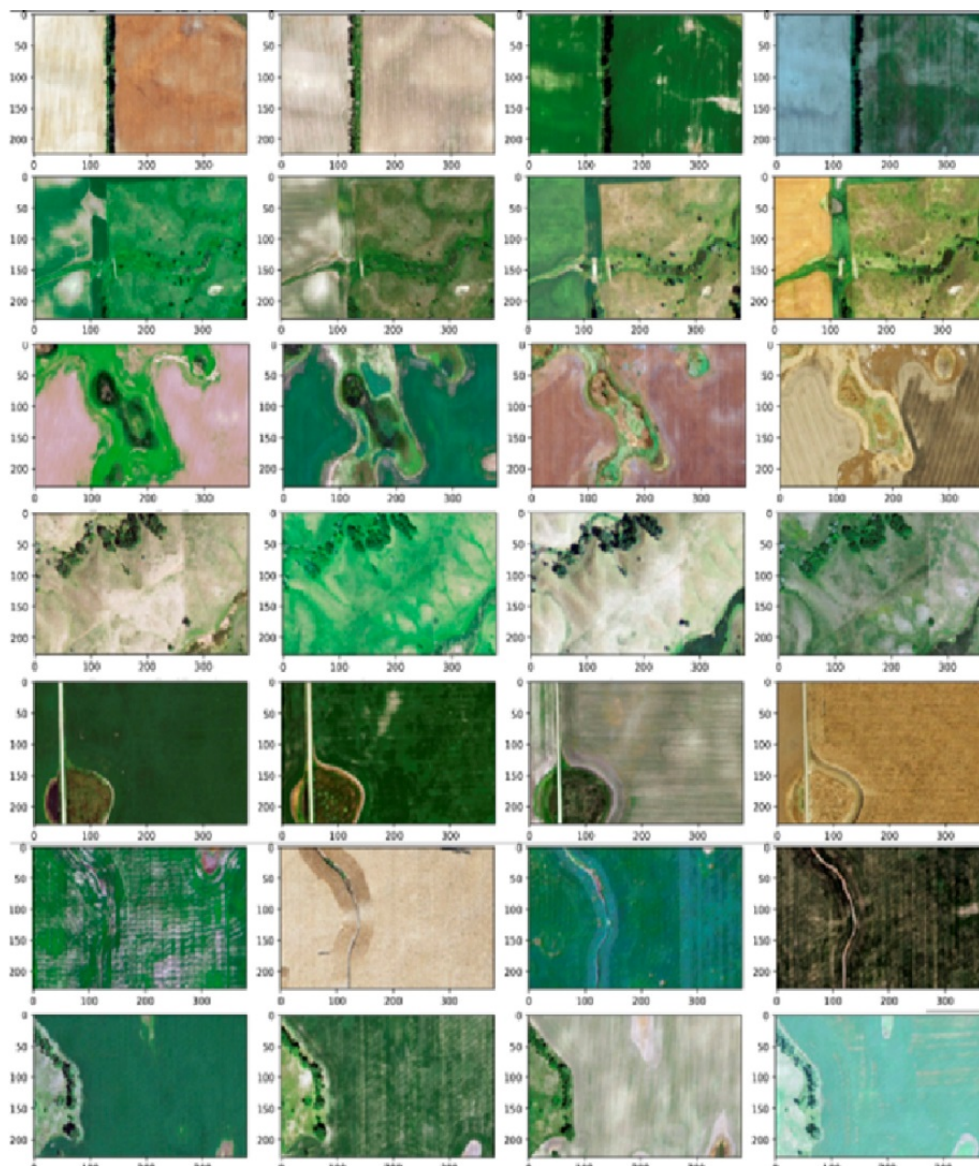
7.1.1. Nawigacja oparta na systemach wizyjnych

Politechnika Poznańska zajmuje się systemami wymagającymi nawigacji. Wykorzystują one systemy wizyjne, opracowane w celu zwiększenia możliwości pozycjonowania bezzałogowych statków powietrznych (UAV), usuwające ograniczenia tradycyjnych globalnych systemów nawigacji satelitarnej (GNSS). Dostrzegając podatność GNSS na zakłócenia, takie jak zagłuszanie i podszywanie się (spoofing), proponuje się alternatywę dającą możliwość działania nawet przy braku sygnału GNSS. Rozwiązanie wykorzystuje zaawansowane algorytmy metrycznego uczenia do tworzenia wektorów własnościowych miejsc z obrazów zarejestrowanych przez skierowaną w dół kamerę zamontowaną na UAV, w połączeniu z informacją z sensorów bezwładnościowych i kompasu. Technologia umożliwia identyfikację lokalizacji na podstawie wskazówek wizualnych przez porównanie wyznaczanych wektorów własnościowych ze stworzoną wcześniej mapą. Zastosowanie sekwencyjne metod Monte Carlo i wnioskowania warunkowego dodatkowo zwiększają efektywność rozwiązania.

Dzięki niezależności od sygnału GNSS możliwe jest działanie nawet w warunkach pozaziemskich, o ile tylko dostępne jest uprzednie zobrazowanie powierzchni, które umożliwia skonstruowanie referencyjnej mapy.

Tworzone były systemy zoptymalizowane pod kątem integracji z istniejącą elektroniką UAV, zapewniając płynną pracę i przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym bez konieczności wprowadzania rozległych modyfikacji sprzętowych.

Przykłady działania technologii przedstawiono na rysunku 7.1. Widoczna jest odporność na zmienne warunki pogodowe i zmienność pór roku. Mimo zmian wyglądu miejsca system nadal rozpoznaje je prawidłowo.



Rysunek 7.1. Lotnicze zdjęcia terenu w różnych porach roku

7.1.2. Planowanie ruchu

Politechnika Poznańska posiada doświadczenie w zakresie budowania map wysokościowych przez roboty autonomiczne poruszające się w nieznanym a priori środowisku [38, 40]. Cechą charakterystyczną takiego scenariusza jest niepełna wiedza robota o środowisku. W celu rozwiązania tego problemu zespół PP opracował metodę nazwaną GuidedRRT [40], która wykorzystuje dwie mapy. Pierwsza mapa jest budowana z wykorzystaniem danych z czujników o dużym zasięgu i zawiera zgrubne informacje o przeszkodach. Druga mapa jest mapą precyzyjną i pozwala na określenie, w jaki sposób przeszkody mają być ominięte przez robota. Planowanie ruchu robota odbywa się dwuetapowo. Najpierw algorytm A* planuje zgrubną ścieżkę ruchu, a następnie algorytm RRT-Connect precyzyjnie planuje ruch robota. Proces ten przebiega naprzemiennie, a robot wykonuje zaplanowany ruch po aktualizacji map otoczenia przez czujniki pokładowe robota. Metodę tę wdrożono i przetestowano na robotach koczujących. Jednak można ją stosować również na innych robotach autonomicznych.

Metoda planowania ścieżki ruchu robotów GuidedRRT była wykorzystana w wielu scenariuszach. W pracy [42] przedstawiono nową metodę klasyfikacji terenu, która jest powiązana z planerem ruchu umożliwiającym omijanie obszarów potencjalnie niebezpiecznych i zwiększającym efektywność lokomocji. Zaproponowano też ulepszony algorytm Informed Guided Rapidly-Exploring Random Trees*-Connect [37], który wykorzystując właściwość asymptotycznie optymalnego algorytmu RRT* znajduje krótsze ścieżki ruchu niż oryginalny algorytm GuidedRRT. Dodatkowo zastosowano tu technikę ograniczania przestrzeni poszukiwań w fazie optymalizacji ścieżki, w celu przyspieszenia procesu jej optymalizacji.

7.1.3. Metody lokalizacji na podstawie danych z sensora LiDAR

W ramach prac prowadzonych w Instytucie Robotyki i Inteligencji Maszynowej PP zweryfikowano dokładność systemów lokalizacji open-source dostępnych w ROS (Robot Operating System) oraz ich przydatność jako źródeł estymaty pozycji robota podczas budowy mapy terenu. Pierwszym z testowanych systemów był LOAM [539]¹, który jest zaawansowanym rozwiązaniem bazującym na danych z sensora LiDAR.

Przetwarzanie danych w LOAM jest podzielone na kilka kroków: ekstrakcję cech, odometrię, mapowanie oraz integrację. System działa z wykorzystaniem cech płaszczyznowych i krawędziowych, co umożliwia redukcję dużego strumienia danych pochodzącego ze skanera laserowego 3D. Cechy 3D są dopasowywane pomiędzy aktualnym a poprzednim skanem. W tym kroku estymowana jest poza robota o sześciu stopniach swobody (6DoF) $\mathbf{x} = [x \ y \ z \ \theta \ \phi \ \psi]^T$ przy użyciu ograniczeń wynikających z dopasowanych cech. System zakłada ciągłe skanowanie podczas ruchu sensora. Po etapie odometrii punkty są przeliczane do układu współrzędnych związanych z początkiem procesu skanowania, tworząc poprawioną geometrycznie chmurę punktów. Ta poprawiona chmura jest wykorzystywana w procedurze mapowania, gdzie optymalizowana jest zgodność z globalną mapą, co pozwala uzyskać bardziej precyzyjną estymację pozycji niż na etapie odometrii laserowej. Optymalizacja mapy wykonywana jest rzadziej (2 Hz) niż odometria (10 Hz), ponieważ jest bardziej wymagająca obliczeniowo. Ostateczny krok lokalizacji łączy wyniki optymalizacji mapy z odometrią, zapewniając najlepszą dostępną estymację pozycji.

System LOAM działa bez szczególnych założeń co do charakteru ruchu sensora LiDAR. W przypadku naziemnych pojazdów bezzałogowych można założyć, że poruszają się one po powierzchni terenu, która jest lokalnie płaska. Założenie to doprowadziło do opracowania rozszerzenia systemu LOAM o nazwie LeGO-LOAM [449]². LeGO-LOAM wprowadza procedurę określania płaszczyzny gruntu (lokalnego terenu) oraz rozróżniania cech znajdujących się na ziemi od tych umieszczonych na przeszkodach. Cechy płaszczyznowe są wykorzystywane do estymacji wysokości z względem gruntu oraz kątów pochylenia i przechylenia (ϕ, ψ). Te częściowe estymaty pozy pojazdu umożliwiają dopasowanie cech krawędziowych, które następnie wykorzystywane są do określenia pozycji na płaszczyźnie 2D

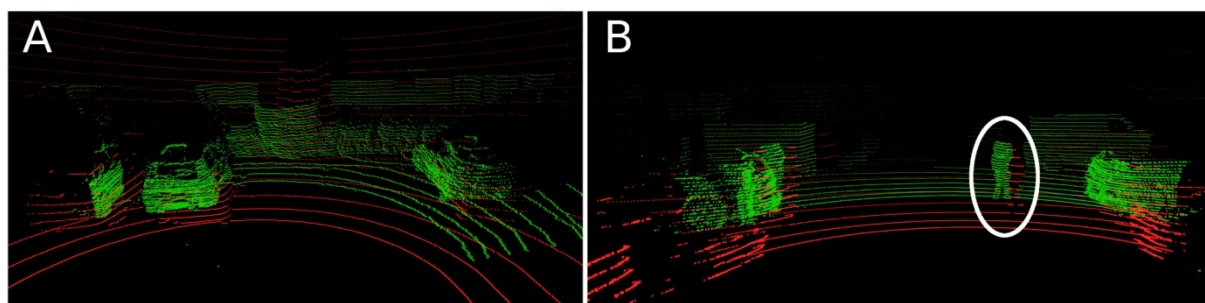
¹ https://github.com/laboshini/loam_velodyne

² <https://github.com/RobustFieldAutonomyLab/LeGO-LOAM>

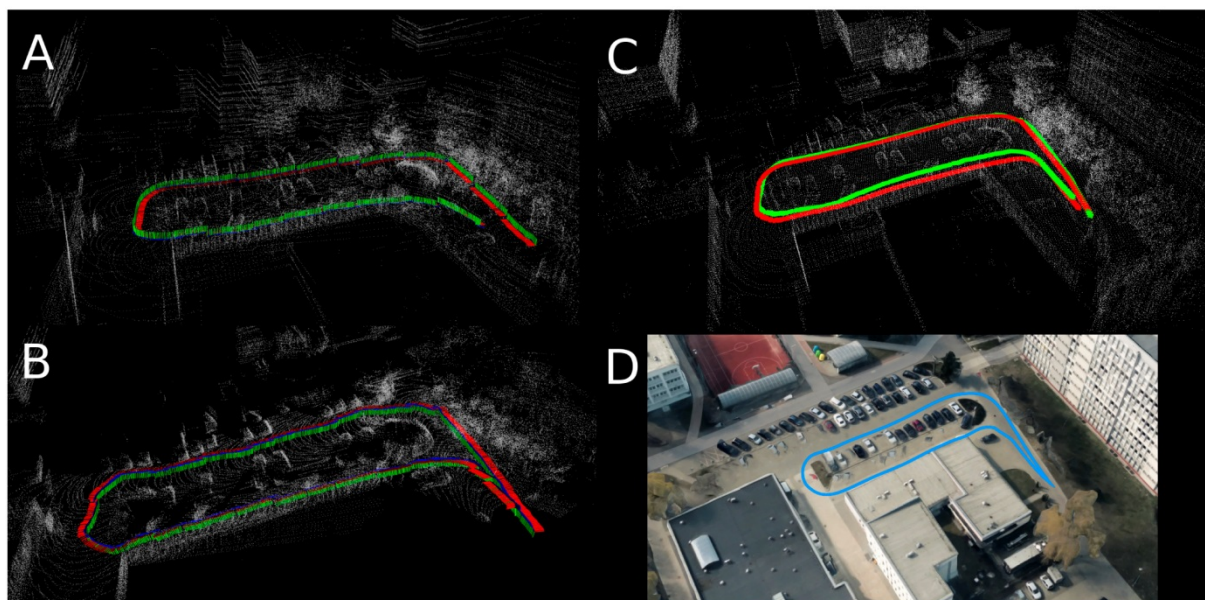
kąta obrotu: $\mathbf{x}^{2D} = [x \ y \ \theta]^T$. Dzięki tym modyfikacjom LeGO-LOAM wykorzystuje dodatkowo wiedzę o ruchu pojazdu, co pozwala na uzyskiwanie stabilniejszych wyników lokalizacji w trudnych warunkach.

Oba systemy, LOAM i LeGO-LOAM, zostały zaprojektowane do pracy z LiDAR-em Velodyne VLP-16. W naszych eksperymentach dane pozyskiwano także z sensora Sick MRS 6124 (rys. 7.2), co wymagało modyfikacji systemów, aby działały z tym sensorem. Wprowadzone zmiany obejmowały dostosowanie parametrów związanych z różnymi kątami obserwacji poziomej i pionowej oraz zmiany w założeniach dotyczących sposobu akwizycji punktów, aby poprawnie reprezentować pomiary na podstawie bieżących estymacji ruchu.

System lokalizacji oparty na technologii laserowej został zweryfikowany przy użyciu robota mobilnego wyposażonego w LiDARy Velodyne VLP-16 oraz Sick MRS 6124. Robot poruszał się na terenie kampusu Politechniki Poznańskiej, co można zobaczyć bardziej szczegółowo na rys. 7.3D.



Rysunek 7.2. Przykładowe widoki z Velodyne VLP-16 (czerwony) i Sick MRS 6124 (zielony) podczas dwóch scenariuszy: obserwacja pojazdów (A) oraz pojawienie się osoby przed robotem (B)



Rysunek 7.3. Porównanie trajektorii uzyskanych za pomocą LOAM z użyciem Velodyne VLP-16 (A) i Sick MRS 6124 (B), LeGO-LOAM (C) z użyciem Velodyne VLP-16 (czerwony) i Sick MRS 6124 (zielony), oraz widok z satelity z podobnego kąta obserwacji z Google Earth z przybliżoną ścieżką ruchu robota (D)

Najmniej dokładne oszacowanie trajektorii uzyskano dla systemu LOAM, gdy użyto sensora Velodyne VLP-16 (rys. 7.3A), ponieważ trajektoria dryfuje w kierunku pionowym. Jest to spowodowane brakiem ograniczeń w części z sześciu stopni swobody. Co zaskakujące, trajektoria uzyskana za pomocą systemu LOAM i sensora Sick MRS 6124 (rys. 7.3B) nie wykazuje dryfu pionowego, co można przypisać większej gęstości pomiarów z tego sensora. Trajektorie uzyskane za pomocą systemu LeGO-LOAM są podobne dla obu sensorów i przewyższają system LOAM dzięki zastosowaniu dodatkowych ograniczeń wynikających z wykrycia płaszczyzny gruntu. Wyniki te sugerują także, że znane i dostępne jako otwarte oprogramowanie algorytmy odometrii laserowej lub SLAM są wystarczające do lokalizacji pojazdów podczas tworzenia lokalnej mapy terenu, nawet bez wsparcia GNSS.

7.1.4. Metoda budowy mapy wysokości terenu

W przypadku robotów lądowych dane z sensorów LiDAR mogą być rejestrowane w mapie wysokości terenu, aby wspomagać planowanie trajektorii oraz umożliwiać wykrywanie przeszkód w pobliżu pojazdu. Wykorzystywana jest mapa wysokości z podwójną siatką komórek (lokalną i globalną), podobnie jak w pracy [39], składająca się z lokalnej siatki poruszającej się razem z pojazdem, aktualizowanej bezpośrednio na podstawie danych z sensorów, oraz globalnej siatki opisującej całe środowisko, aktualizowanej pośrednio na podstawie zawartości siatki lokalnej.

System mapowania terenu oparty jest na pakietach ROS: grid map oraz elevation mapping³.

Pakiet grid map tworzy siatki komórek, które mogą mieć wiele warstw danych. Pakiet elevation mapping buduje mapę wysokości z uwzględnieniem niepewności pomiarów sensora i pozycji pojazdu. Pomiarzy są rejestrowane w lokalnej mapie raw_map, gdzie każda komórka opisana jest przez wysokość, wariancję wysokości, wariancję poziome, czas ostatniej aktualizacji oraz parametry potrzebne do weryfikacji widoczności poszczególnych komórek o danej wysokości metodą śledzenia promieni. W wątku równoległym, o niższej częstotliwości, przeprowadzany jest proces fuzji, łączący wartości wysokości z uwzględnieniem niepewności pozycji sensora, co skutkuje globalną mapą fused_map zawierającą oszacowania wysokości wraz z ich niepewnościami. Kolejny wątek usuwa niezweryfikowane (uznane za błędne lub nieaktualne) wartości wysokości zgodnie z ograniczeniami widoczności.

Każdy pomiar z LiDAR-a 3D reprezentowany jako punkt $\mathbf{p}_s = [x_s, y_s, z_s]^T$ w układzie współrzędnych sensora przekształcany jest do lokalnego układu mapy O_M :

$$\mathbf{p}_m = {}^M_S \mathbf{T} \mathbf{p}_s,$$

gdzie ${}^M_S \mathbf{T}$ jest macierzą transformacji określoną przez kąty obrotu ϕ_r i ψ_r uzyskane z czujników inercyjnych lub lokalizacji laserowej oraz skalibrowane prze-

³ https://github.com/ANYbotics/elevation_mapping

sunięcie wysokości. Niepewność przestrzenna punktu $\mathbf{p}_m$ określona jest przez macierz kowariancji $\mathbf{C}_{p_m}$:

$$\mathbf{C}_{p_m} = \mathbf{J}_s \mathbf{C}_s \mathbf{J}_s^T + \mathbf{J}_p \mathbf{C}_p \mathbf{J}_p^T,$$

gdzie $\mathbf{J}_s$ i $\mathbf{J}_p$ są Jakobianami transformacji względem pozycji sensora $\mathbf{x}_s$ i współrzędnych punktu $\mathbf{p}_s$.

Punkty z kolejnych skanów są integrowane w lokalnej siatce wysokości za pomocą statycznego filtra Kalmana w każdej komórce siatki:

$$\mathbf{K} = \mathbf{C}_{h(k)}^{[i,j]} \left(\mathbf{C}_{h(k)}^{[i,j]} + \mathbf{C}_{p_m(k+1)} \right)^{-1}, \quad (7.1)$$

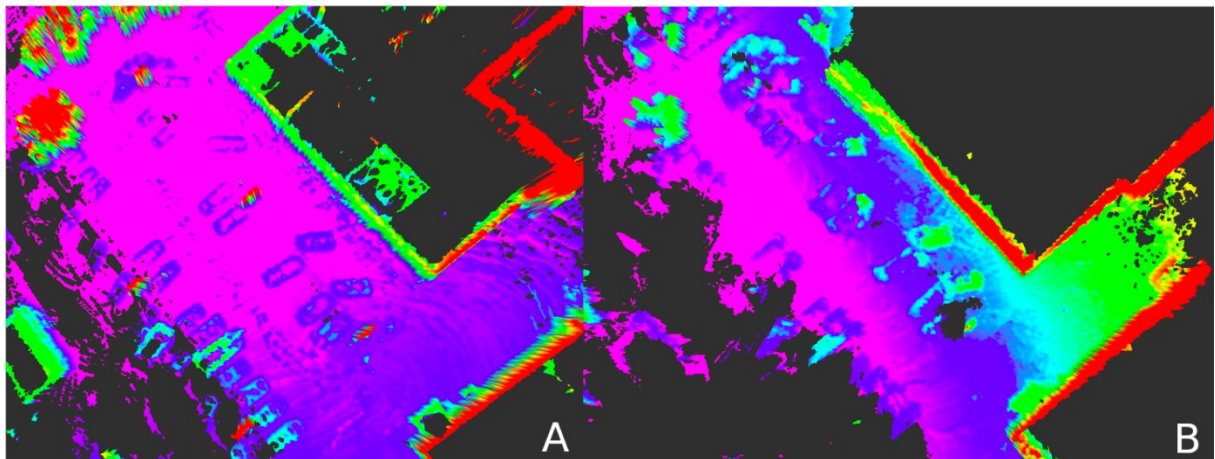
$$\mathbf{p}_{h(k+1)}^{[i,j]} = \mathbf{p}_{h(k)}^{[i,j]} - \mathbf{K} \left(\mathbf{p}_{h(k)}^{[i,j]} - \mathbf{p}_{p_m(k+1)} \right), \quad (7.2)$$

$$\mathbf{C}_{h(k+1)}^{[i,j]} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}) \mathbf{C}_{h(k)}^{[i,j]},$$

gdzie $\mathbf{p}_{h(k)}^{[i,j]} = [x_h \ y_h \ z_h]^T$ reprezentuje wysokość w danej komórce, $\mathbf{C}_{h(k)}^{[i,j]}$ to jej niepewność, a $\mathbf{K}$ jest wzmocnieniem Kalmana. Globalne oszacowania wysokości obliczane są jako sumy ważone:

$$\hat{h}^{[i,j]} = \frac{\sum_{a,b \in \mathcal{C}} w_{a,b} h_{a,b}}{\sum_{a,b \in \mathcal{C}} w_{a,b}}, \quad \hat{\sigma}_h^{2[i,j]} = \frac{\sum_{a,b \in \mathcal{C}} w_{a,b} (\sigma_{h(a,b)}^2 + h_{a,b}^2)}{\sum_{a,b \in \mathcal{C}} w_{a,b}} - \hat{h}^{2[i,j]}$$

gdzie $h_{a,b}$ $\sigma_{h(a,b)}^2$ to wysokość oraz wariancja w sąsiedniej komórce, a $w_{a,b}$ są wagami definiującymi wpływ sąsiednich komórek na podstawie ich odległości i niepewności pozycji pojazdu.



Rysunek 7.4. Porównanie map elewacji uzyskanych z danych Velodyne VLP-16 (A) i Sick MRS 6124 (B) zarejestrowanych z trajektoriami z systemu LeGO-LOAM.

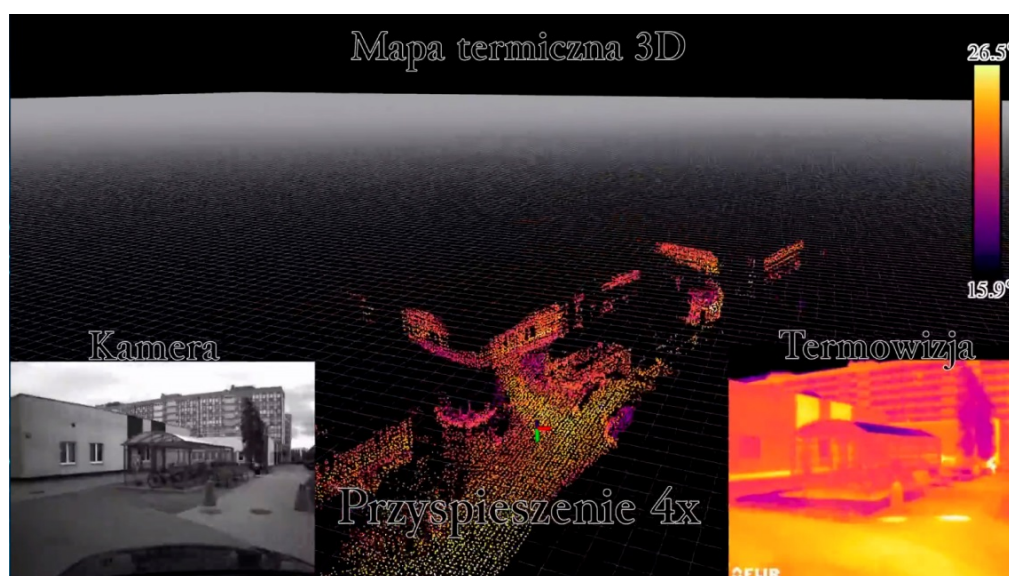
Rysunek 7.4 przedstawia mapy wysokości utworzone podczas tego eksperymentu. Mapa wygenerowana na podstawie danych z sensora Sick jest wystarczająco duża, aby mapować teren do planowania ruchu. Nie ma potrzeby akwizycji danych na elewacjach powyżej poziomu sensora. Natomiast mapa elewacji wygenerowana z chmur punktów z sensora Velodyne reprezentuje obiekty znajdujące się

powyżej poziomu sensora. Chociaż mapa Velodyne może wyglądać bardziej naturalnie, przetwarzanie większej chmury punktów wymaga większych zasobów obliczeniowych, a w zastosowaniu do środowiska miejskiego nie przyczynia się do lepszego odwzorowania terenu.

Podczas tworzenia mapy wysokości terenu przewagą MRS 6124 jest większa gęstość uzyskanej chmury punktów, co pozwala robotowi na dokładniejsze mapowanie przeszkód. Z drugiej strony, ograniczone poziome pole widzenia sensora stanowi wyzwanie, gdy robot zbliża się do ściany, ponieważ boczne ograniczenia zanikają. Innym aspektem jest wykrywanie intruzji w scenie, np. osoby przechodzącej przed pojazdem. Rysunek 7.2B pokazuje, że MRS 6124 rejestruje osobę za pomocą znacznie większej liczby linii skanowania, podczas gdy VLP-16 tylko wykrywa sylwetkę.

7.1.5. Inne możliwości budowy map dla robotów lądowych

Poza metodami budowy map wysokości lub przejezdności terenu dla robotów lądowych możliwe jest wykorzystanie algorytmów SLAM (Simultaneous Localisation And Mapping) w zastosowaniach wspomagających nawigację pojazdów w terenie otwartym lub umożliwiających realizację pewnych specyficznych zadań. Przedstawiamy dwa przykłady takich zastosowań zrealizowanych w Instytucie Robotyki i Inteligencji Maszynowej Politechniki Poznańskiej.



Rysunek 7.5. Widok podczas budowania mapy termicznej 3D

- Trójwymiarowa mapa ciepła rozległego terenu budowana on-line z pokładu robota lądowego. Jest to pełna mapa 3D reprezentowana jako chmura punktów (point cloud), gdzie każdy z punktów ma określoną temperaturę. Daje to możliwość przeprowadzenia analizy termicznej z dowolnego punktu widzenia. Mapa została utworzona przy pomocy algorytmu LiDAR SLAM oraz skalibrowanych wzajemnie sensorów LiDAR (Ouster OS1) i kamery termowizyjnej. Demonstracja dostępna jest w postaci klipu filmowego⁴.

⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=43e9mPy7M6A>



Rysunek 7.6. Mapa Kampusu Warta Politechniki Poznańskiej oparta na surfelach 3D, zbudowana na podstawie danych z sensora LiDAR przenoszonego przez autonomiczny UAV wirnikowy

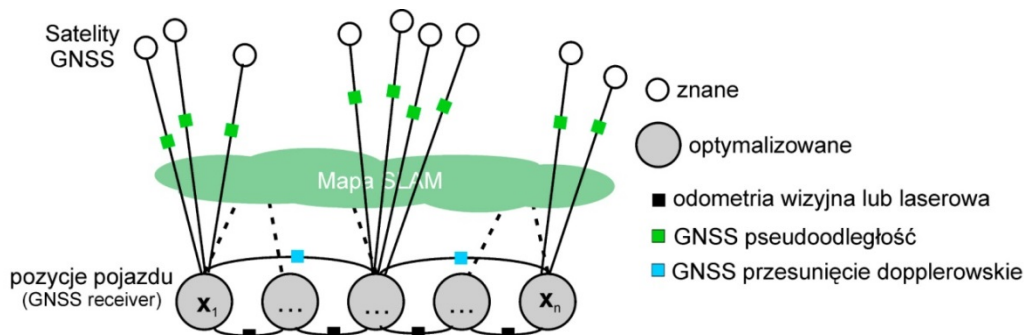
- Mapowanie terenów miejskich na dużą skalę z wykorzystaniem technologii robotycznych. Opracowane w Instytucie Robotyki i Inteligencji Maszynowej algorytmy tworzenia map o reprezentacji surfelowej umożliwiają zbieranie danych za pomocą UAV, UGV lub ręcznych LiDAR-ów. Obecnie oprogramowanie umożliwia planowanie miejskie i architektoniczne oraz może być wykorzystane w projektach Smart City i Digital Twins, w tym dotyczące zagadnień bezpieczeństwa w miastach. Może być także stosowane poza terenami miejskimi, reprezentując dowolne środowiska, w tym pokryte gęstą roślinnością.

7.1.6. Fuzja danych z użyciem grafów czynnikowych

W pracy [95] zespół Instytutu Robotyki i Inteligencji Maszynowej Politechniki Poznańskiej przedstawił nowoczesne rozwiązanie integracji algorytmu odometrii laserowej lub laserowego SLAM z surowymi pomiarami GNSS, wykazując poprawę dokładności trajektorii oraz odporność na długie przerwy w dostępie do sygnału GNSS w środowiskach miejskich. Rozwiązanie to wykorzystuje ograniczenia nałożone na ruch odbiornika przez pomiary GNSS: pseudoodległości i przesunięcie dopplerowskie, implementując ścisłą integrację danych za pomocą grafu czynników (Factor Graph Optimization – FGO). Koncepcja ta może zostać zastosowana do lokalizacji robotów w scenariuszach innych niż miejskie – rolniczych, logistycznych i militarnych. Ponieważ zaawansowane LiDAR-y, jak te zastosowane w [95], są nadal zbyt kosztowne dla wielu zastosowań, np. w rolnictwie, w pracy [361] przedstawiono wariant rozwiązania opartego na FGO wykorzystujący SLAM wizyjny, który jest najbardziej dostępną i uniwersalną metodą lokalizacji w nieznanym środowisku.

W celu rozwiązania problemu lokalizacji pojazdu z odbiornikiem GPS i kamerą zaimplementowano graf ograniczeń nałożonych przez obserwacje na pozycje tego pojazdu. Graf ten jest następnie optymalizowany z użyciem biblioteki g²o [255], aby uzyskać trajektorię minimalizującą błędy resztkowe. Podejście to jest uniwersalne względem implementacji systemu SLAM, chociaż do eksperymentów wykorzystano najnowszą wersję ORB-SLAM3 opartą na cechach punktowych

[69]. W SLAM lokalne asocjacje między obserwacjami ograniczają pozycje robota wzdłuż trajektorii. W grafie czynników pozycje te są węzłami, natomiast względne transformacje między pozycjami są traktowane jako krawędzie z czynnikami (faktorami) reprezentującymi obserwacje. Każdy węzeł optymalizacyjny reprezentuje i -tą pozycję robota $\mathbf{X}_i$. Węzły niepoddawane optymalizacji reprezentują pozycje satelitów GNSS znane w momencie pomiaru.



Rysunek 7.7. Struktura grafu czynnikowego (factor graph) dla problemu lokalizacji pojazdu na podstawie ograniczeń z pomiarów GNSS i systemu SLAM (wizyjnego lub laserowego)

Reprezentację węzłów i ograniczeń grafu czynników można wyrazić jako:

$$E(\mathbf{X}) = \sum_{k \in \mathcal{G}} \sum_{n \in \mathcal{N}} e(\mathbf{X}_k, \mathbf{r}_n^s, e_k^p) \Omega_p e(\mathbf{X}_k, \mathbf{r}_n^s, e_k^p) + \sum_{k \in \mathcal{G}} e(\mathbf{X}_k, \mathbf{X}_{k+1}, (e_{k,k+1}^D)^T) \Omega_D e(\mathbf{X}_k, \mathbf{X}_{k+1}, e_{k,k+1}^D) + \sum_{i \in \mathcal{S}} e(\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_{i+1}, (e_{i,i+1}^s)^T) \Omega_s e(\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_{i+1}, e_{i,i+1}^s)$$

gdzie $e(\cdot)$ oznacza funkcję błędu skalarną lub wektorową, różną dla każdego komponentu, natomiast $\mathcal{G}$, $\mathcal{N}$ i $\mathcal{S}$ to odpowiednio: zbiór wszystkich węzłów z pomiarami GNSS, zbiór wszystkich obserwowanych satelitów z wszystkich konstelacji oraz zbiór wszystkich węzłów posiadających pomiary odometrii SLAM.



Rysunek 7.8. Przykładowe wyniki zastosowania podejścia do lokalizacji pojazdu w środowisku miejskim opartego na GNSS i SLAM laserowym ze ścisłą integracją w strukturze grafu czynnikowego

Pozycja satelity jest obliczana przy użyciu transmitowanych danych za pomocą open-source'owej biblioteki RTKLIB [484]. Procedury RTKLIB są stosowane do wyznaczenia współrzędnych n -tego satelity $\mathbf{r}_n^s$, przesunięcia zegara satelity δ_n^s , opóźnienia jonosferycznego d_n^{ion} i opóźnienia troposferycznego d_n^{trop} . Użyto błędu pomiaru pseudoodległości GNSS jako ograniczenia grafu czynników:

$$e_i^p = p_{i,n} - [\rho_{i,n} - (\delta_{i,n}^s - \delta_{i,n}^r) \cdot c + d_{i,n}^{ion} + d_{i,n}^{trop} + \epsilon_{i,n}^p] \quad (7.3)$$

gdzie i to indeks węzła w grafie, n to indeks satelity (dla wszystkich konstelacji), natomiast p_{in} oznacza odległość od n -tego satelity do odbiornika, obliczoną na podstawie znanej pozycji tego satelity, zgodnie z opisem w pracy [95]. Pozostałe parametry, to ϵ_n^p reprezentujący błąd multipath, oraz przesunięcia δ_n^s i δ_n^r , które są obliczane na podstawie danych GNSS. Aby wyznaczyć przesunięcie zegara odbiornika δ_n^r , konieczne są przynajmniej cztery wartości pseudoodległości do satelitów tej samej konstelacji [95]. Macierz informacyjna $\mathbf{\Omega}_p$ w (7.1.6) jest wartością skalarną, ponieważ ograniczenia pseudoodległości są również skalarne i obliczane za pomocą procedur RTKLIB. W przeciwieństwie do pseudoodległości, ograniczenia wynikające z przesunięcia dopplerowskiego to translacje o 3 stopniach swobody wyliczone na podstawie prędkości odbiornika $\mathbf{v}^r i$ i czasu między kolejnymi pomiarami GNSS. Prędkość węzła $\mathbf{v}^r i$ jest wyznaczana na podstawie przesunięcia dopplerowskiego za pomocą RTKLIB. Wówczas funkcja błędu dla ograniczeń wynikających z przesunięcia dopplerowskiego w grafie czynników przyjmuje postać:

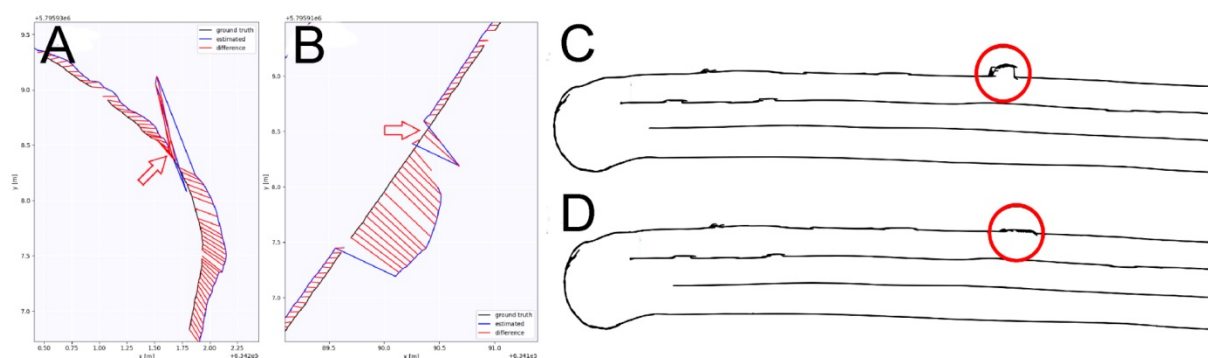
$$\mathbf{e}_{i,i+1}^D = \mathbf{r}_{i+1}^r - \mathbf{r}_i^r - \mathbf{v}_{i,i+1}^{rD} \cdot t_{i,i+1}, \quad (7.4)$$

gdzie $\mathbf{r}^r$ jest pozycją odbiornika (część translacyjna), a $\mathbf{v}^{rD} i, i+1$ oraz $t_{i,i+1}$ są średnią prędkością i czasem pomiędzy i -tą a $i+1$ -szą pozycją. Macierz informacyjna (3×3) $\mathbf{\Omega}_D$ związana z ograniczeniami wynikającymi z przesunięcia dopplerowskiego jest obliczana za pomocą procedur RTKLIB.

Wdrażanie metod opartych na FGO w systemach nawigacyjnych zwiększa możliwości detekcji zakłóceń sygnału, jednocześnie pozwalając na utrzymanie wysokiej precyzji nawigacji w warunkach rzeczywistych. Rozwój zaawansowanych rozwiązań GNSS opartych na technikach FGO niesie ze sobą liczne korzyści dla szerokiego spektrum zastosowań, od autonomicznych systemów transportowych, przez rolnictwo precyzyjne, aż po roboty mobilne, w tym militarne. Dzięki możliwości integracji danych z różnych sensorów, takich jak IMU (zintegrowany sensor INS), kamery czy LiDAR, oraz wdrożeniu zaawansowanych metod optymalizacji grafów czynnikowych, możliwe jest znaczące zwiększenie precyzji i niezawodności systemów nawigacyjnych.

Zespół badawczy Instytutu Robotyki i Inteligencji Maszynowej Politechniki Poznańskiej oferuje innowacyjne, wielosensoryczne rozwiązania nawigacyjne, które mogą być stosowane w autonomicznych pojazdach, rolnictwie precyzyjnym, zaawansowanych systemach robotycznych, w tym militarnych. IRIM posiada doświadczenie w rozwijaniu zaawansowanych systemów nawigacyjnych bazujących na GNSS i uzupełnianych przez dodatkowe sensory, takie jak IMU/INS, kamery

oraz LiDAR. W ramach projektów, w których korzystano z systemów GNSS dla pojazdów miejskich (ADAS z firmą Solaris Bus & Coach, [121]), LiDAR SLAM zintegrowanego z pomiarami GNSS dla lokalizacji pojazdów w warunkach miejskich [95] oraz we współpracy z Łukasiewicz-PIT (Poznański Instytut Technologiczny) [361] opracowano i sprawdzono eksperymentalnie rozwiązania z tego obszaru. Przykładowe wyniki estymacji trajektorii pojazdu w centrum dużego miasta (Hong Kong, dane ze zbioru UrbanNav) przedstawiono na rys. 7.8, natomiast przykładowe wyniki estymacji trajektorii dużego robota mobilnego udostępnionego przez Łukasiewicz-PIT w terenie otwartym przedstawia rys. 7.9. Kluczowym elementem tych rozwiązań była ścisła fuzja danych GNSS z danymi inercyjnymi oraz sygnałami z LiDAR lub kamer, co znacząco zwiększyło dokładność i niezawodność systemów nawigacyjnych.



Rysunek 7.9. Przykładowe wyniki zastosowania podejścia do lokalizacji pojazdu w terenie otwartym opartego na GNSS i wizyjnym SLAM ze ścisłą integracją w strukturze grafu czynnikowego: A), B) przykłady błędów pozycjonowania RTK GPS spowodowanych utratą sygnału korekcyjnego ze stacji naziemnych, C), D) przykładowa korekta estymowanej trajektorii pojazdu z użyciem podejścia FGO

7.1.7. Metody sterowania ruchem robotów oraz monitoringu środowiska

Instytut Automatyki i Robotyki (IAR) PP od wielu lat specjalizuje się w szeroko rozumianych metodach sterowania ruchem robotów mobilnych i manipulacyjnych, które stanowią jeden z kluczowych komponentów funkcjonalnych w architekturze systemów autonomicznych. Prowadzone prace badawcze dotyczą m.in. projektowania algorytmów sterowania ruchem dla robotów nieholonomicznych oraz systemów transportowych oraz rozwoju technik adaptacyjno-odpornych oraz nieliniowych w sterowaniu układów mechanicznych w robotyce. Nurt badań obejmuje zarówno zagadnienia podstawowe, dotyczące modelowania matematycznego i formalnego badania właściwości algorytmów, jak i prace doświadczalne, których celem jest weryfikacja eksperymentalna metod, co najmniej w warunkach laboratoryjnych. To holistyczne podejście pozwala na zachowanie kompromisu pomiędzy dążeniem do uzyskania wyników ściśle badawczych, a opracowaniem rozwiązań inspirowanych przez problemy rzeczywiste i uwzględniających ograniczenia technologiczne.

Ważnym osiągnięciem zespołu IAR było opracowanie autorskiej metodyki orientowania pól wektorowych (Vector Field Orientation – VFO), dla której jedną z przesłanek projektowych było zaprojektowanie algorytmu sterowania robotem

o kinematyce monocykla (kinematyce takiej, jak pojazdu jednokołowego), zapewniającego dobrą jakość sterowania w stanach przejściowych zarówno w zadaniu zbieżności do punktu zadanego jak i śledzeniu trajektorii referencyjnej [322]. Metodyka ta w dalszej kolejności została użyta m.in. do rozwiązania zadania śledzenia ścieżki [323], przejazdu przez uporządkowany zbiór punktów [140] oraz unikania kolizji przy użyciu funkcji sztucznego potencjału [240]. Pokazano też jej adaptację do bardziej złożonych struktur kinematycznych robotów kołowych, w tym kinematyki samochodowej [327] i pojazdów z przyczepami [325]. Rozszerzono również jej zastosowanie na klasę niedosterowanych obiektów latających/pływających w przestrzeni 3D [262].

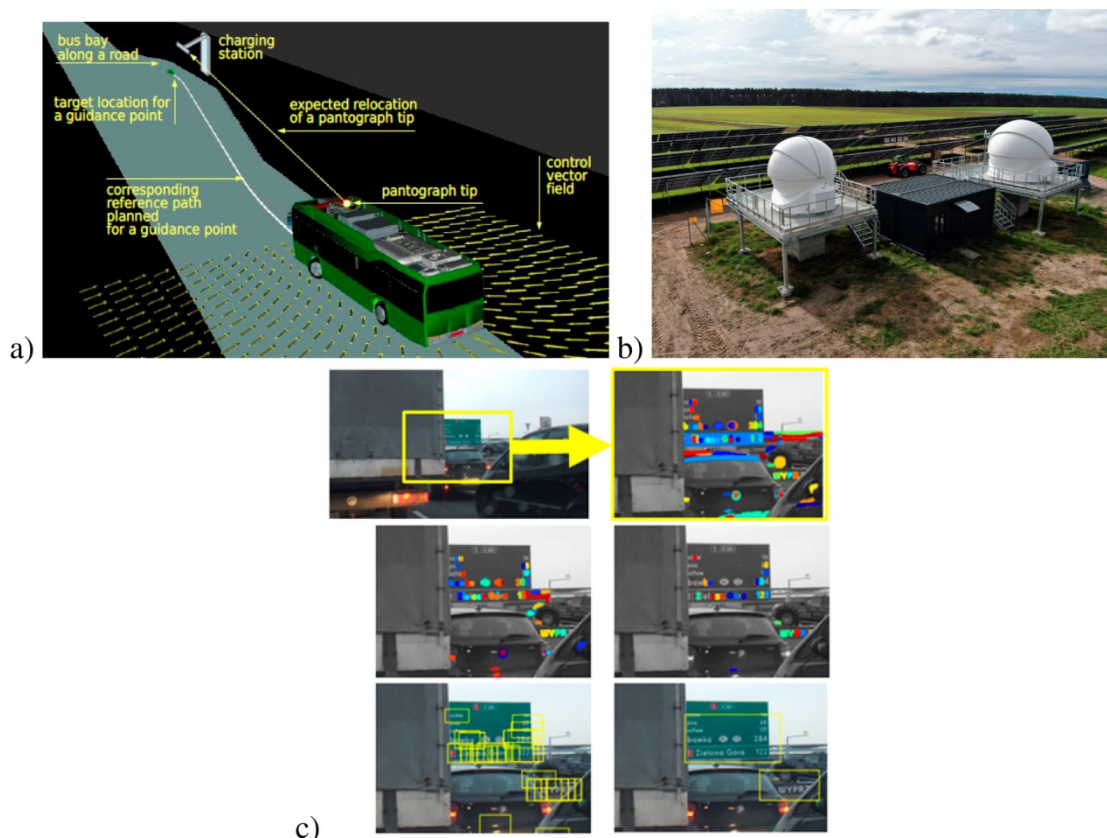
Alternatywnym podejściem do sterowania układów nieholonomicznych, badanym w Instytucie są techniki częstotliwościowe wywodzące się z teorii sterowania nieliniowego oraz geometrii różniczkowej. Podstawowe wyniki uzyskano dla metody tzw. funkcji transversalnych [349], proponując nowe podejście do syntezy algorytmów i ich strojenia, z uwzględnieniem przesłanek wynikających z praktycznych scenariuszy ruchu w robotyce mobilnej. Pokazano, że możliwe jest zaprojektowanie uniwersalnego stabilizatora, który pozwala na efektywną realizację zadań ruchu w warunkach rzeczywistych [393]. Zaprojektowano też odporne wersje metod nawigacji w warunkach występowania szumów pomiarowych [394] oraz przeszkód statycznych w środowisku [392]. Wskazano na szczególne przypadki, gdzie użycie tej metodyki pozwala na rozwiązanie nietrywialnych problemów sterowania ruchem [396, 395].

Oryginalnym wynikiem badawczym było opracowanie metodyki sterowania ruchem dla kołowych pojazdów przyczepowych. Zaproponowano modułową koncepcję modelowania dla uniwersalnego modelu pojazdu z N-przyczepami o różnym typie mocowania (osiowo i pozaosiowo) [328] oraz zaproponowano koncepcję projektowania skalowalnego algorytmu sterowania takim obiektem w różnych scenariuszach ruchu [329, 333].

Warto też zwrócić uwagę na alternatywne zastosowania przywołanych wyników badawczych. Mogą one stanowić inspirację w metodach kinodynamicznego planowania ruchów pojazdów nieholonomicznych, [142, 141] pozwalając na efektywne wyznaczanie dopuszczalnych ścieżek. Ponadto zaproponowano algorytm obliczania dopuszczalnej trajektorii złączowej (w przestrzeni konfiguracyjnej) dla ogólnego przypadku pojazdu N-przyczepowego, wykorzystując bazę funkcji harmonicznych [334]. Opracowano też nowe modele kinematyczne pojazdów z przyczepami [332], które mogą zostać wykorzystane jako predyktory ruchu wspomagające zadanie lokalizacji oraz zaproponowano metodę identyfikacji parametrów kinematycznych modeli takich pojazdów [330]. W [331] rozważono koncepcję systemu wspomagającego manewry dla pojazdu wieloprzyczepowego. Koncepcja stanowiła podstawę do opracowania modułów planowania ruchu/sterowania prototypowego systemu ADAS do wspomagania kierowcy autobusu miejskiego, którego efektywność potwierdzono eksperymentalnie prowadząc testy w warunkach rzeczywistych (rys. 7.10a) [324].

Z punktu widzenia autonomizacji ruchu istotne są wyniki badawcze uzyskane dla systemów wielorobotowych. IAR posiada doświadczenie w zakresie metod stero-

wania holonomicznymi i nieholonomicznymi platformami mobilnymi opartych m.in. na koncepcji funkcji sztucznych potencjałów [240, 238] i funkcji nawigacji [239, 242]. Prowadzone są badania symulacyjne i eksperymentalne dotyczące budowania formacji robotów [244], zmian kształtu formacji, ruchu formacji pojazdów przy użyciu metod śledzenia lidera oraz wirtualnej struktury, a także unikania kolizji między robotami za pomocą funkcji sztucznych potencjałów. Koncentrowano się na szybkiej realizacji ruchu przez nieholonomiczną platformę mobilną w środowisku z przeszkodami, z użyciem nowych algorytmów sterowania [235, 241], oraz optymalizacji zadań dla wielu robotów z wykorzystaniem komunikacji bezprzewodowej [234, 188]. Ponadto prowadzono badania dotyczące realizacji konkurencyjnych zadań przez grupy robotów mobilnych [237].



Rysunek 7.10. a) symulator sterowania ruchem autobusu miejskiego, b) zautomatyzowane stanowiska obserwacyjne w Kąkolewie, c) systemy rozpoznawania znaków dla kierowców

W przypadku robotów autonomicznych bardzo ważnym zagadnieniem jest percepcja otoczenia. W IAR od wielu lat prowadzone są badania w zakresie systemów wizyjnych, które są jednymi z najważniejszych technik wykorzystywanych do percepcji otoczenia. Obecnie większość najdokładniejszych rozwiązań wykorzystuje w tym obszarze głębokie splotowe sieci neuronowe (CNN, deep convolutional neural network), które uzyskują bardzo dobre rezultaty. Należy mieć jednak na uwadze ograniczenia mocy obliczeniowej urządzeń (w tym robotów) mobilnych, często pracujących jako systemy wbudowane. W tym zakresie prowadzono badania w zakresie optymalizacji doboru mobilnych platform obliczeniowych, takich jak Raspberry Pi, NVIDIA Jetson Nano i Xavier AGX do realizacji autonomicznych systemów wizyjnych pracujących w czasie rzeczywistym [409, 471]. Zapropono-

wane rozwiązania w zakresie odpowiedniego doboru i dostrojenia klasyfikatorów wykorzystywanych np. do rozpoznawania obiektów, w tym ACF (aggregated channel feature), SVM (support vector machine), a także CNN, pozwoliły na zwiększenie precyzji przy równoczesnym obniżeniu wymagań sprzętowych [406]. Z kolei zaawansowane algorytmy kompresji bezstratnej i stratnej umożliwiają redukcję ilości danych do zapamiętania i przetworzenia bez wpływu lub istotnego wpływu na jakość dalszego przetwarzania danych [390, 389].

W ramach prac badawczych i projektowych w IAR opracowano wiele wydajnych algorytmów przetwarzania obrazów i systemów wizyjnych, w tym: wyznaczanie tzw. map cieplnych do reprezentowania aktywności poruszających się ludzi lub innych obiektów [471], wydajne algorytmy wykrywania pieszych i innych obiektów w nocy lub przy niedostatecznym oświetleniu z wykorzystaniem pasywnych kamer termowizyjnych [405], panoram cylindrycznych do analizy szybkozmiennych i wolnozmiennych obszarów w otoczeniu kamery [388], technik wizyjnych z użyciem czujników o dużej dynamice (HDR, high dynamic range sensors), pozwalających na dokładne działanie przy obrazach o bardzo dużym kontraście (rozwiązanie dedykowane do systemów ADAS) [404], technik stereowizyjnych pozwalających na trójwymiarową analizę otoczenia [32] i wielu innych. Prowadzono też prace badawcze w ramach europejskiego projektu INDECT, w których opracowano techniki wizualizacji dla systemów automatycznej i wspomaganej analizy obrazów dla nowoczesnych usług telewizji przemysłowej (CCTV, close-circuit television) w inteligentnych miastach, w celu zapobiegania zagrożeniom bezpieczeństwa [388]. Ostatnio opracowano urządzenie będące elementem autonomicznego ciągnika, które wspomaga opryski w sadach. Jego głównym elementem jest system ekspercki, korzystający m.in. z sieci głębokich, w celu analizy obrazów drzew owocowych w czasie rzeczywistym [155]. Innym rozwiązaniem jest system ADAS do automatyzacji kontroli lamp lotniskowych, który wspiera kierowcę pojazdu i określa jego lokalizację na pasie startowym oraz umożliwia diagnostykę stanu poszczególnych lamp, a ponadto detekcję obiektów zanieczyszczających pas. Rozwiązanie to obejmuje zarówno metody sztucznej inteligencji, jak i klasyczne metody przetwarzania sygnału wizyjnego [472, 470].

IAR dysponuje również zaawansowaną bazą laboratoryjną, pozwalającą na wsparcie prac eksperymentalnych w zakresie kołowych pojazdów autonomicznych. Wymienić tutaj należy precyzyjne wielokamerowe systemy lokalizacji przestrzennej Optitrack, zestawy robotów laboratoryjnych o różnych kinematykach i wielkościach (roboty o małych gabarytach autorskiej konstrukcji: 50 sztuk robotów dwukołowych MTracker [245], 4 roboty o kinematyce samochodowej, 2 roboty z zestawem przyczep, [326]; roboty o większych gabarytach: 1 robot dwukołowy do zadań transportowych i 1 robot z czterokołowym napędem ślizgowym), zestawy czujników RGB-D, kamery termowizyjne, kamery inteligentne, np. Cognex, specjalizowane oprogramowanie (w tym profesjonalne środowisko TrackSim, do modelowania, identyfikacji i walidacji algorytmów zapewniające precyzyjne oddanie warunków rzeczywistych).

Od blisko dziesięciu lat w IAR prowadzone są badania w zakresie precyzyjnego sterowania manipulatorami, które można wykorzystywać do zadań wspomagan

obserwacji naziemnych. Inspirację stanowiły tutaj zastosowania w astronomii oraz obszaru Space Surveillance and Tracking, polegające m.in. na wsparciu obserwacji obiektów orbitujących Ziemię i obiektów klasy NEO (Near Earth Object) (rys. 7.10b). W wyniku tych badań opracowane zostały nowe metody sterowania wykorzystujące podejście adaptacyjno-odporne w paradygmacie aktywnego odrzucania zaburzeń (Active Disturbance Rejection Control – ADRC) [386]. Ponadto opracowano konstrukcje tzw. montażu astronomicznych wykorzystujących napędy bezpośrednie bez przekładni mechanicznych oraz zaprojektowano autorską architekturę sterującą [246]. Architektura ta obejmuje zarówno niskopoziomowe sterowanie ruchem, ale też uwzględnia rozwiązania na wyższym poziomie abstrakcji, pozwalając na planowanie i automatyzację procesu obserwacyjnego [33]. Przeprowadzone prace eksperymentalne pokazały dużą dynamikę i precyzję śledzenia trajektorii w przestrzeni zadania w ramach opracowanej technologii [248]. Od 2024 roku IAR dysponuje unikatową bazą obserwatoriów wyposażonych w autorskie rozwiązania montażu astronomicznych, które pozwalają na pozycjonowanie wielu instrumentów optycznych jednocześnie. Perspektywiczne są badania dotyczące aktywnego precyzyjnego pozycjonowania tych instrumentów z użyciem sensora wizyjnego, jako źródła informacji w sprzężeniu zwrotnym. Warto też podkreślić możliwość użycia opracowanych metod i technologii do monitorowania środowiska, namierzania obiektów i wsparcia zadań związanych z ochroną infrastruktury krytycznej w przestrzeni otwartej.

7.1.8. Kampus Kąkolewo Politechniki Poznańskiej – centrum badań nad systemami bezzałogowymi

Kampus Kąkolewo⁵, zarządzany przez Politechnikę Poznańską, jest nowoczesnym ośrodkiem badawczo-rozwojowym, stworzonym do testowania i oceny systemów bezzałogowych (UAV, UGV). Kompleks posiadając otwarte przestrzenie umożliwia testy terenowe. Ma też zaawansowane laboratoria, w których w kontrolowanych warunkach prowadzi się badania w rzeczywistym środowisku.

7.1.8.1. Sprzęt

Kampus dysponuje szeroką gamą urządzeń i technologii, wspierających realizację projektów badawczych:

- Roboty latające (UAV). Różnorodne platformy latające, w tym wielowirnikowce i stałopłatowce, mogą być wykorzystywane do mapowania terenu, monitorowania środowiska, a także realizacji misji rozpoznawczych.
- Roboty lądowe (UGV). Jednostki naziemne wyposażone w zaawansowane czujniki, zdolne do autonomicznego działania w zróżnicowanych warunkach terenowych, są stosowane w zadaniach takich jak inspekcja, transport czy wsparcie logistyczne.
- Systemy obrazowania powierzchni Ziemi. Projekt Obrazowanie Powierzchni Ziemi (OPZ)⁶ realizowany jest w ośrodku w Kąkolewie. Dotyczy badań nad zaawansowanymi technologiami obrazowania wykorzystującymi kamery multispektralne i hiperspektralne oraz systemy LiDAR, umożliwiające pozy-

⁵ <https://put.poznan.pl/artukul/kampus-kakolewo>

⁶ <https://put.poznan.pl/obrazowanie-powierzchni-ziemi>

skiwanie precyzyjnych danych przestrzennych i spektralnych za pomocą bezzałogowych i załogowych statków powietrznych.

- Sensory środowiskowe. Urządzenia pozwalające na akwizycję danych dotyczących zanieczyszczeń, wilgotności czy temperatury, co jest kluczowe zarówno w kontekście monitorowania środowiska, jak i analiz prowadzonych na potrzeby wojska.

7.1.8.2. Możliwości badawcze

Kampus umożliwia prowadzenie badań w obszarach takich jak:

- Testy współpracy robotów. Infrastruktura pozwala na badania nad integracją i współpracą systemów UAV i UGV w ramach grup i zespołów mieszanych, co ma zastosowanie w operacjach militarnych, poszukiwawczo-ratowniczych oraz logistycznych.
- Analiza danych środowiskowych i militarnych. Połączenie technologii obrazowania i analizy danych umożliwia adaptację metod stosowanych w rolnictwie precyzyjnym i monitoringu środowiskowym do celów wojskowych, takich jak rozpoznanie czy wykrywanie zagrożeń.
- Badania nad autonomią. Możliwość testowania algorytmów nawigacji, omijania przeszkód i podejmowania decyzji w czasie rzeczywistym w złożonych scenariuszach terenowych.

7.1.8.3. Infrastruktura badawcza

Kampus oferuje:

- Rozległe tereny otwarte umożliwiające symulację działań w rzeczywistych warunkach środowiskowych.
- Budynki i laboratoria przystosowane do testów w środowiskach kontrolowanych.
- Systemy przetwarzania danych i infrastruktura obliczeniowa do analizy złożonych danych przestrzennych i spektralnych.

7.1.8.4. Zastosowania praktyczne

Badania rozwijane w ośrodku Kampus Kąkolewo Politechniki Poznańskiej znajdują zastosowanie zarówno w obszarach wojskowych, takich jak rozpoznanie i operacje taktyczne, jak i w sektorze cywilnym, obejmującym monitorowanie środowiska, zarządzanie zasobami naturalnymi oraz precyzyjne rolnictwo. Kampus Kąkolewo może stanowić ważny ośrodek wspierający rozwój technologii robotycznych i systemów bezzałogowych, przyczyniając się do tworzenia innowacyjnych rozwiązań odpowiadających na potrzeby współczesnych wyzwań w sektorze militarnym i cywilnym.

7.2. Doświadczenia Sieci Badawczej Łukasiewicz – Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów PIAP

Historia robotów lądowych polskiej produkcji przeznaczonych do celów pirotechnicznych rozpoczęła się w 1999 roku, kiedy powstał pierwszy (opracowany w instytucie Łukasiewicz-PIAP) prototyp robota SR-10 Inspector (rys. 7.11). Od 2000 roku roboty te były sukcesywnie wprowadzane na wyposażenie oddziałów pirotechnicznych polskiej policji i wojska dając jednocześnie podłoże przyszłym konstrukcjom [480]. Przez lata dzięki wprowadzanim innowacjom, udało się zaprojektować oraz wprowadzić na rynek krajowy i zagraniczny urządzenia dostosowane do szerokiej gamy wymagań służb specjalnych. Obecnie Łukasiewicz-PIAP może pochwalić się konstrukcjami przystosowanymi do działań przez wiele rodzajów służb.

Sukces robotów klasy Inspector zachęcił konstruktorów Łukasiewicz-PIAP do tego, aby bazując na dotychczasowych doświadczeniach podjąć się zaprojektowania i wdrożenia nowego robota SMR-100 Expert (rys. 7.12) [479, 480]. Zakres zastosowań Experta jest praktycznie taki sam jak robota Inspector, niemniej jednak Expert został zaprojektowany z myślą o wykorzystaniu go w ciasnych przestrzeniach, tam gdzie większy robot nie mógłby wjechać. Takie przestrzenie istnieją przede wszystkim w środkach transportu: samolotach, autobusach czy wagonach kolejowych oraz w budynkach (np. korytarze między fotelami na stadionie). Założenie o pracy wewnątrz środków transportu, a przede wszystkim w samolotach, narzuciło ostre wymagania dotyczące rozmiarów bazy mobilnej (powinna być mała) oraz samego manipulatora (powinien być duży).



Rysunek 7.11. Robot SR-10 Inspector

Inną konstrukcją Łukasiewicz-PIAP jest Taktyczny Robot Miotany (PIAP TRM®) (rys. 7.13), który został zaprojektowany do aktywnej teleobserwacji w zastoso-

waniach militarnych, policyjnych i ratowniczych. Jest on odpowiedzią na zagrożenia, jakie niesie ze sobą rozpoznanie terenu prowadzone przez jednostki specjalne przed przystąpieniem do akcji. PIAP TRM[®] to urządzenie, które może być wprowadzane do obiektu ze znacznej odległości, a następnie w sposób teleoperowany przemieszczany do miejsca dokonania rozpoznania. Umieszczona w urządzeniu kamera, mikrofon oraz mobilne zdolności robota powodują, że jest to znakomite urządzenie rozpoznawcze znacząco ograniczające ryzyko utraty zdrowia lub życia członków grup specjalnych i sekcji szturmowych wykonujących akcje w niebezpiecznym terenie. PIAP TRM[®] w założeniach może być wyposażony w dodatkowe urządzenia zewnętrzne, które pozwalają na przenoszenie specjalizowanych ładunków: oślepiających, ogłuszających, sygnalizacyjnych oraz wybuchowych. Wyposażenie dodatkowe umożliwia wykorzystanie PIAP TRM[®] do akcji bezpośrednich, takich jak np. odwracanie uwagi przeciwnika od kierunku szturm, czy krótkotrwałej dezorganizacji jego działań. Ważną cechą PIAP TRM[®] jest funkcja, dzięki której staje się on wyposażeniem dodatkowym dla większych robotów produkcji Łukasiewicz – PIAP. W takim przypadku może on zostać dowieziony przez większy pojazd na miejsce operacji bojowej lub może zostać wykorzystany jako dodatkowa ruchoma kamera do wspomagania skomplikowanej akcji wykonanej przez większego robota (PIAP SCOUT, PIAP GRYF[®] lub PIAP IBIS[®]).



Rysunek 7.12. Robot PIAP SMR-100 Expert

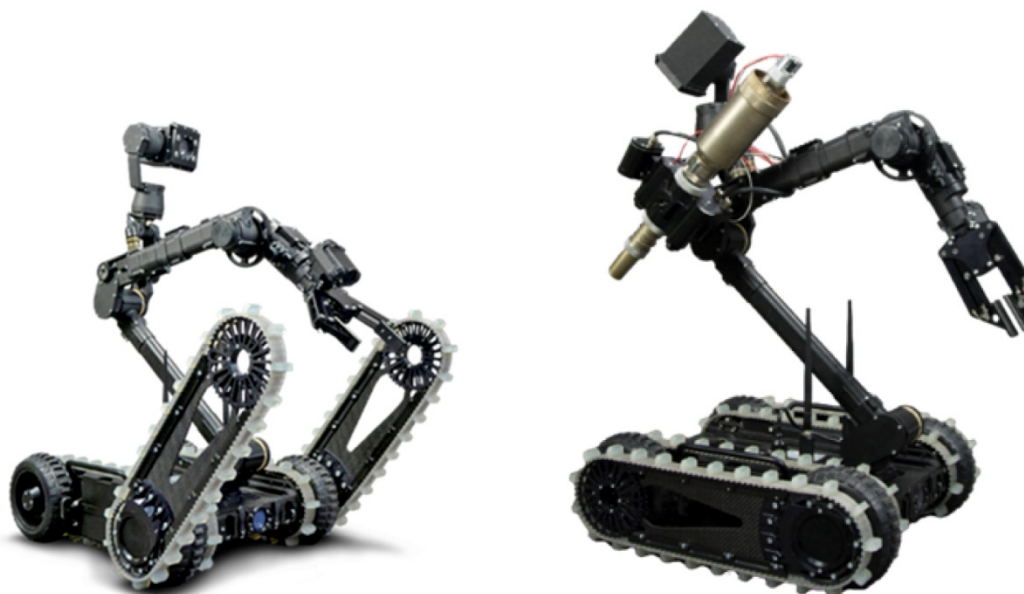


Rysunek 7.13. Robot PIAP TRM[®]

Obecnie najlżejszym oraz najmniejszym robotem oferowanym przez Łukasiewicz-PIAP jest robot PIAP FENIX[®]. Jest to robot o masie 18 kg służący do wykrywania i neutralizacji ładunków wybuchowych (EOD – Explosive Ordnance Disposal). Idealny do prowadzenia rozpoznania terenu w miejscach trudno dostępnych dla człowieka. Na tle innych konstrukcji Łukasiewicz – PIAP wyróżnia go długi czas operacyjny (ok. 5 godzin) oraz jego znakomita trakcja dzięki zastosowaniu systemu kołowo-gąsienicowego, który zapewnia łatwe przemieszczanie się robota po powierzchniach utwardzonych, gruntowych czy bezdrożach, ale również poradzi sobie w terenie zurbanizowanym. Może podjeżdżać po schodach oraz pokonywać wysokie krawężniki. Przeznaczony jest do pracy z akcesoriami, takimi jak wyrzutniki pirotechniczne, systemy rentgenowskie i nawijarka światłowodowa, dzięki czemu staje się konstrukcją wielozadaniową. W zależności od potrzeb może być przeznaczony do obserwacji i nasłuchu, podejmowania i neutralizacji niebezpiecznych ładunków, transportowania środków dywersyjnych. Dzięki swoim niewielkim wymiarom i niskiej wadze można przenosić go w plecaku bądź transportować samochodem.

Robot lądowy PIAP GRYF[®] (rys. 7.15) jest kolejną konstrukcją przeznaczoną do celów pirotechnicznych. Jest już cięższym pojazdem (w porównaniu do robota PIAP FENIX[®]) wykorzystywanym do rozpoznania terenu i miejsc trudnodostępnych. Jego cechą szczególną jest doskonała manewrowość oraz możliwość pokonywania nierówności, przeszkód i wzniesień o kącie nachylenia do 45°. Dzięki modułowej konstrukcji można szybko i łatwo zmienić wyposażenie robota. Przykładowymi jego akcesoriami są rentgen jak również wyrzutnik pirotechniczny. Mimo swojej wagi wynoszącej 47 kG jest łatwy w transporcie czy przenoszeniu przez człowieka. Robot ten posiada możliwość autonomicznej wymiany narzędzi przenoszonych w zasobniku.

Inną konstrukcją zaprojektowaną przez instytut Łukasiewicz – PIAP na bazie starszych urządzeń jest robot PIAP PATROL[®] (rys. 7.16) o masie 95 kg. Stworzony do działań w trudnych warunkach zewnętrznych jak i wewnątrz budynków. Może zastępować lub wspomagać funkcjonariuszy w niebezpiecznych zadaniach. Konstrukcja robota zapewnia montaż i wykorzystanie kilku akcesoriów jednocześnie umożliwiając jednoczesną wielozadaniowość. Lekki panel sterowania robota PIAP PATROL[®] obsługuje zarówno mobilne systemy rentgenowskie jak i czujniki CBRN czy wyrzutniki pirotechniczne. Za pomocą manipulatora można podejmować i transportować ładunki o masie do 8 kg (przy w pełni wyciągniętym manipulatorze) oraz do 40 kg (z przodu robota). Manipulator ma 2 m wysięgu i duży zakres ruchu w każdej płaszczyźnie. Jego wymiary oraz kompaktowa i modułowa budowa umożliwia jego transport nawet w samochodzie osobowym. Obecnie wykorzystywany jest przez krajowe i zagraniczne służby bezpieczeństwa. Robot ten posiada możliwość autonomicznej wymiany narzędzi zgromadzonych w zasobniku.



Rysunek 7.14. Robot PIAP FENIX®



Rysunek 7.15. Robot PIAP GRYF®



Rysunek 7.16. Robot PIAP PATROL®

Łukasiewicz – PIAP pochwalić się może również nieco cięższymi pojazdami, między innymi robotem PIAP IBIS® (rys. 7.17) o masie 320 kg. Jest on przeznaczony do działań pirotechnicznych i rozpoznania, a po zamontowaniu dodatkowych akcesoriów może służyć także do neutralizacji niebezpiecznych ładunków, rozpoznania chemicznego czy działań ratowniczych w miejscach niebezpiecznych. PIAP IBIS® jest robotem szybkim, porusza się z prędkością do 10 km/h, a jednocześnie stabilnym oraz zwrotnym, co sprawia, że pokonywanie dużych nierówności terenu, również piaszczystego, skalnego czy rumowiska nie stanowi dla niego problemu. Dzięki wysuwanemu ramieniu (o zasięgu ponad 3 m) PIAP IBIS® jest w stanie podnosić ładunki o masie do 50 kg, co wyróżnia go spośród innych konstrukcji. Przystosowany jest do współpracy z wyrzutnikami pirotechnicznymi, czujnikami skażeń chemicznych i radioaktywnych, magistralą do zdalnej detonacji ładunków wybuchowych, systemem negocjacyjnym, nożycami do cięcia drutu, wiertarkami, urządzeniami rejestrującymi i bronią strzelecką.



Rysunek 7.17. Robot PIAP IBIS®

Na bazie konstrukcji robota PIAP IBIS® powstał PIAP IBIS TRANSPORT® (rys. 7.18). Służy on do działań transportowych i ewakuacji medycznej. To 6-kołowa platforma z indywidualnie napędzanymi kołami i zawieszeniem adaptującym się do pokonywanego podłoża, co zapewnia mu mobilność oraz dobrą przyczepność przy poruszaniu się w trudnym terenie. W miejscu gdzie standardowo znajduje się manipulator został zamontowany kosz dostosowany do zamocowania noszy do przewożenia rannych. Na burtach kosza zamontowane zostały panele systemu MOLLE umożliwiające montaż różnorodnego wyposażenia (np. plecak medyczny). Po obu bokach robota umieszczone są składane półki powiększające powierzchnię ładunkową. Dostosowany do wszelkiego rodzaju transportu ekwipunku, zaopatrzenia i amunicji jest nie tylko ładowny (do 200 kG w zależności od rodzaju misji i terenu), ale i szybki, rozwija prędkość maksymalną do 10 km/h. Robot ten jest przystosowany do współpracy z urządzeniami zapewniającymi autonomiczną jazdę po bezdrożach.

Najnowszym urządzeniem zaprojektowanym oraz wyprodukowanym w Łukasiewiczu – PIAP jest robot bojowy PIAP Hunter (rys. 7.19). Jest to bezzałogowy pojazd lądowy służący do obserwacji i patrolowania granic, terenów wojskowych czy miejskich oraz do wsparcia ogniowego i osłony kolumn wojskowych zmechanizowanych lub lekkiej piechoty w czasie działań obronnych. Wyposażony w kamery dzień i termowizyjne pozwala na dobrą obserwację terenu, jak i równie doskonale wykrywanie przeciwnika w czasie akcji terenowej. Posiada także sys-

tem komunikacji radiowej zapewniając stałą łączność. Mimo sporych wymiarów PIAP Hunter osiąga prędkość maksymalną nawet do 50 km/h, a dzięki zastosowaniu napędu hybrydowego, w którego skład wchodzi generator prądotwórczy i trakcyjne silniki elektryczne, zachowuje przy tym stabilność i zwrotność, a co najważniejsze bezgłośnie, wydajny i długi czas pracy. Wyposażony jest w zawieszenie zależne typu 3-link z drążkiem Panharda, ze sprężynami śrubowymi i amortyzatorami o sterowanym tłumieniu. Dzięki układowi napędowemu 4 × 4 pokonuje trudnodostępne tereny, wysokie wzniesienia czy piaszczyste podłoże. Systemy wizyjne zastosowane w bezzałogowej wieży AREX ZMU-03 dodatkowo mogą wspomagać operatora przy sterowaniu i wykrywaniu przeciwnika. Wieżę AREX ZMU-03 bez problemu można uzbroić dając Hunterowi możliwość wykonywania działań strzeleckich. Robot ten jest przystosowany do współpracy z urządzeniami zapewniającymi autonomiczną jazdę po terenie.



Rysunek 7.18. Robot IBIS TRANSPORT®



Rysunek 7.19. Roboty PIAP Hunter i PIAP IBIS®

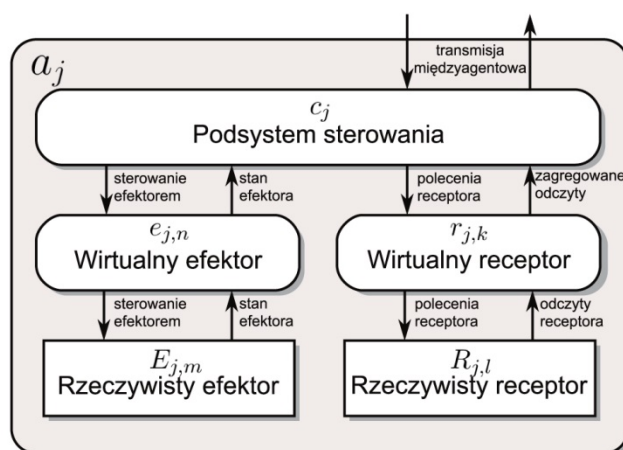
7.3. Doświadczenia Politechniki Warszawskiej (PW)

7.3.1. Metodyka projektowania systemów sterowania robotami

Projektowanie dowolnego systemu sterowania robota, a w szczególności robota autonomicznego, wymaga zarówno odpowiedniej wiedzy jak i narzędzi, ze względu na złożoność tego typu systemów oraz fakt, że są to systemy czasu rzeczywistego. Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej PW od ponad 30 lat rozwija metodykę projektowania takich systemów oraz weryfikuje jej skuteczność na różnorodnych przykładach. Badania te doprowadziły do sformułowania dwóch rodzajów metamodeli, które stanowią podstawę do tworzenia systemów sterowania dla dowolnych robotów.

Metamodel stanowi wzór, według którego konstruowany jest model systemu, który powstaje poprzez dostarczenie odpowiednich parametrów. Rezultatem takiego przekształcenia jest formalna specyfikacja pożądanego systemu sterowania robota lub ich grupy. Model określa między innymi, co konkretnie takie roboty mają robić. W opisywanym przypadku system sterowania budowany jest z agentów upostaciowionych. Każdy z nich zawiera swój podsystem sterowania oraz dowolną liczbę efektorów i receptorów (rys. 7.20) [548, 558]. Receptory, takie jak kamery, GPS, sonary, akcelerometry, jednostki inercyjne, kompasy lub czujniki dotyku, zbierają informacje o stanie środowiska. Natomiast efekторы oddziałują na fizyczne otoczenie zmieniając jego stan (są to np. manipulatory, chwytaki, napędy dronów, silniki napędzające koła lub gąsienice robotów mobilnych, siłowniki poruszające nogami maszyn koczujących, silniki napędzające śruby jednostek nawodnych lub podwodnych) zbierają informacje o stanie środowiska. Zarówno efekторы, jak i receptory dzieli się na te rzeczywiste (sprzętowe) oraz wirtualne (programowe). Wirtualne podsystemy są wykorzystywane do przetwarzania danych. Mogą agregować dane otrzymane z wielu receptorów rzeczywistych, lub przekształcać wysokopoziomową informację sterującą w jej niskopoziomowy odpowiednik (np. realizują odwrotne zagadnienie kinematyki dla manipulatora). Podsystemy tworzące strukturę agenta upostaciowionego przekazują sobie nawzajem informacje za pomocą buforów. Podobnie jak w przypadku wszelkich układów dynamicznych dysponują pamięcią wewnętrzną. Bufory wejściowe i pamięć wewnętrzną stanowią argumenty funkcji przejścia, która wyznacza wartości wprowadzane do buforów wyjściowych i tejże pamięci. Pojedynczy cykl pracy podsystemu obejmuje następujące operacje: wprowadzenie danych do buforów wejściowych, obliczenie funkcji przejścia i wysłanie obliczonych danych z buforów wyjściowych. Czas wykonania tych operacji stanowi okres działania podsystemu (czas próbkowania, sampling rate). Oczywiście podsystemy mogą mieć inny okres działania. Zachowaniem podsystemu nazywamy iteracyjne wykonanie tego cyklu, aż do spełnienia warunku końcowego. Zachowanie stanowi sparametryzowany wzorzec. Spełnienie warunku końcowego wymaga wyboru kolejnego zachowania z inną funkcją przejścia i innym warunkiem końcowym. Automat skończony wybiera kolejne zachowanie do wykonania. W ten sposób automat ten definiuje zdanie wykonywane przez podsystem. Zadanie agenta definiowane jest poprzez zadania realizowane przez jego podsystemy oraz interakcje między nimi. W systemach składających się z wielu agentów powstaje kolejny

poziom abstrakcji, związany z integracją zadań agentów składowych i komunikacją między nimi. Hierarchia ta stanowi jednocześnie wskazówkę dla projektanta, jak dekomponować system, przy czym komunikacja między podsystemami jest zdefiniowana, jako dodatkowy element, który wymaga użycia dodatkowych predykatów. Właściwym narzędziem do tworzenia jednolitego opisu opartego na pojedynczym pojęciu matematycznym jest hierarchiczna sieć Petriego [401]. Przy tym podejściu wszystkie 9 sposobów komunikacji między podsystemami można wyrazić za pomocą jednego wzorca sieci [128]. Nadawca informacji może ją wysłać: blokując swoje dalsze działanie do chwili jej odbioru, nie blokując swojej aktywności bądź blokując ją na określony czas (timeout). Podobnie odbiorca może być zablokowany do chwili uzyskania informacji lub być nieblokowanym albo blokowanym na jakiś czas. Ponieważ sposób działania podsystemu jako nadawcy i odbiorcy definiowane są niezależnie powstaje $3 \times 3 = 9$ możliwości. Biorąc pod uwagę, że każdy podsystem działa z własną częstotliwością oraz że stosowane są różne sposoby komunikacji, kwestia synchronizacji pracy całego systemu nie jest trywialna. Stąd konieczność wykorzystania metod matematycznych w celu weryfikacji prawidłowości działania całości.



Rysunek 7.20. Struktura wewnętrzna agenta upostaciowionego

Na podstawie metamodeli stworzono narzędzia do implementacji różnorodnych systemów robotycznych, w szczególności struktury ramowe programowania (programming framework): RORC (Research Oriented Robot Controller) [551], MRROC (Multi-Robot Research Oriented Controller) [552, 564], MRROC++ (MRROC wersja w C++) [553, 555, 568, 569] oraz język RSSL (Robotic System Specification Language) [129]. Narzędzia te zostały zastosowane do budowy wielu systemów.

- Wczesne wersje MRROC++ zostały przetestowane przy projektowaniu sterownika robota przemysłowego z manipulatorem o strukturze szeregowo-równoległej [565, 562].
- Następnie doświadczenia praktyczne, zweryfikowane za pomocą MRROC++, umożliwiły stworzenie teoretycznych podstaw agenta upostaciowionego [555], co umożliwiło budowę systemów wieloagentowych [554].
- Struktura ramowa MRROC++ została użyta do stworzenia systemu z dwoma manipulatorami wyposażonymi w kamery i czujniki si-

ły/momentów, który potrafi ułożyć podaną mu kostkę Rubika [566]. W tym eksperymencie każdy manipulator miał własny sterownik sprzętowy, w związku z tym system wymagał koordynatora i oddzielnych podsystemów sterowania, co pokazało, że wprowadzenie koncepcji agenta upostaciowionego jest użyteczne.

- Przebadano różnorodne definicje funkcji przejścia i ich iteracyjne kompozycje – zachowania. Badania przeprowadzono konstruując sterowniki dla manipulatorów wykorzystujących sterowanie pozycją i siłą [568], robotów mobilnych [181], robotów wykorzystujących serwomechanizmy wizyjne [464, 223] oraz ze integrowanym widzeniem ze sterowaniem siłą [463].
- Analizowano również skuteczność komunikacji stygmergicznej [52] w systemie wielorobotycznym [567].
- Opracowano złożony system wielorobotyczny zastępujący suport w obróbce części lotniczych, przy użyciu podejścia opartego na agencie upostaciowionym [561]. Każdy z dwóch robotów podpierających obrabiany detal składał się z 3 agentów upostaciowionych, które sterowały: równoległym manipulatorem, ruchomą bazą na nogach oraz głowicą o zmiennej sztywności. Ponadto użyto agenta sterującego bazą, po której kroczyły roboty. System obejmował także agenta offline odpowiedzialnego za planowanie ruchów robotów na podstawie specyfikacji CAD elementu obrabianego i specyfikacji CAM maszyny CNC obrabiającej taki detal [550].
- Oprócz badania systemów sterowania o stałej strukturze, rozważano także systemy o zmiennej strukturze [563], które są niezbędne, gdy liczba zadań do wykonania jest nieznana i duża, co wymaga wprowadzania modułów zadaniowych z repozytorium w chmurze i kasowania tych już zbędnych. System ten musi być zarządzany przez wymieniane moduły posiadające wiedzę o zadaniu. Poza wymianą modułów zachodzi też potrzeba delegowania odpowiedzialności nadzorczych, co zwiększa złożoność systemu. System wdrożono dla dwóch różnych typów robotów, tj. humanoidalnego robota NAO i mobilnego robota Electron. Podejście wykorzystujące agenta upostaciowionego zawierającego automaty skończone (FSAs/FSMs) i wzorce zachowań okazało się bardzo przydatne w specyfikacji i wdrażaniu takich złożonych systemów.
- W [224] opisano wykorzystanie agentów upostaciowionych, automatów skończonych i diagramów przepływu danych do stworzenia systemu sterowania robotem wyposażonym w kamerę i czujnik siły/momentu siły do chwytania wybranych obiektów spośród wielu znajdujących się w nieładzie.
- Uniwersalność agentów upostaciowionych przedstawiono w [557, 130, 560], gdzie badano implementację komunikacji między automatami skończonymi przy użyciu tablicy (whiteboard). Doprowadziło to do wniosku, że potrzebna jest jedna metoda modelowania systemów, która zastąpiłaby różnorodne częściowe rozwiązania. Hierarchiczne Sieci Petriego spełniły to wymaganie. Dalsza praca doprowadziła do powstania języka RSSL [129], który umożliwia półautomatyczną generację kodu sterownika.
- Wykorzystanie koncepcji hierarchicznych automatów skończonych do specyfikacji systemów robotycznych przedstawiono w [557]. Koncepcja hierarchii stosowana przez RSHPN (Robotic System Hierarchical Petri Net)

opisuje jednak różnorodne typy komunikacji (synchroniczne/asynchroniczne) w bardziej naturalny sposób, gdyż są one osadzone w strukturze sieci, podczas gdy w przypadku hierarchicznych automatów skończonych konieczne jest użycie dodatkowych zmiennych (rodzaj semaforów).

- Podstawą projektowania wszelkich systemów jest dekompozycja, która wymaga określenia sposobu komunikacji między uzyskanymi modułami [397]. Na bazie dwurękiego robota Velma [521] zbudowano system [397], który planował wykonanie zleconych mu zadań. Do jego zaprojektowania użyto binarnej dekompozycji oraz komunikacji według standardu FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents).
- Ciekawym systemem zaprojektowanym z użyciem RSHPN jest robot zbierający piłki pingpongowe z podłogi, na której znajdują się liczne przedmioty i przeszkody [127, 126, 128], który może wykonywać swoje zadanie autonomicznie albo być sterowany głosem przez operatora.
- Podejście do projektowania systemów oparte na agencie upostaciowionym zostało przetestowane również na systemie nierobotycznym. W tym przypadku utworzono interfejsy człowiek-komputer do wizualizacji zdarzeń w cyberprzestrzeni [481, 211]. Doświadczenie to pokazuje, że użyteczność tego podejścia wykracza daleko poza robotykę.

Przedstawione powyżej metodyka, dzięki swojej matematycznej formalizacji, świetnie nadaje się nie tylko do projektowania systemów autonomicznych, ale również do ich analizy. W szczególności metamodel wykorzystujący hierarchiczną sieć Petriego (RSHPN), dzięki specyficznej strukturze tej sieci znacznie upraszcza i przyspiesza badanie, czy w takiej sieci nie występuje zakleszczenie (deadlock). To oraz inne właściwości matematyczne tej sieci ma istotne znaczenie dla systemów uzbrojonych, które przez swoje błędne działanie mogą wyrządzić duże szkody. Modularny sposób opisu systemu i wewnętrznej struktury agenta umożliwia tworzenie różnych struktur architektonicznych. Z jednej strony projektant systemu może przeprowadzać różne eksperymenty architektoniczne, z drugiej strony ograniczenia narzucone na wewnętrzną strukturę agenta dostarczają wskazówek, jak tworzyć systemy o przejrzystej strukturze, co znacznie ułatwia ich implementację. Mamy tu do czynienia z pożądanym zachowaniem równowagi pomiędzy swobodą wyboru, a jej ograniczeniem (freedom-of-choice vs. freedom-from-choice) [462].

7.3.2. Algorytmy sterowania predykcyjnego

Wszystkie roboty wymagają algorytmów sterowania napędów. Jedną z technik sterowania stosowanych w robotach jest sterowanie predykcyjne (podrozdział 6.2.2). W Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej (IAiIS) Politechniki Warszawskiej prace związane z algorytmami MPC są prowadzone od wielu lat. Główne kierunki prac są następujące:

1. Algorytmy MPC bazujące na liniowych modelach w przestrzeni stanu z oryginalnym mechanizmem modelowania niemierzalnych zakłóceń [487].
2. Algorytmy MPC bazujące na nieliniowych modelach w przestrzeni stanu z oryginalnym mechanizmem modelowania niemierzalnych zakłóceń [267, 273, 488, 489].

3. Efektywne obliczeniowo nieliniowe algorytmy MPC, wymagające optymalizacji kwadratowej pomimo zastosowania nieliniowego modelu. W najprostszym przypadku wykonywana jest cykliczna linearyzacja modelu. W bardziej zaawansowanych wersjach stosuje się cykliczną linearyzację trajektorii prognozowanej. Opracowano ogólne wersje takich algorytmów oraz wersje dla różnych struktur modeli.
4. Nieliniowe algorytmy MPC wykorzystujące do predykcji modele rozmyte, wymagające rozwiązywanie prostych zadań optymalizacji kwadratowej [313, 312, 311].
5. Wielowarstwowe struktury regulacji predykcyjnej i optymalizacji punktu pracy procesów [485, 486].

Z uwagi na ich liczne zalety, szczególnym zainteresowaniem cieszą się algorytmy MPC bazujące na modelach neuronowych. Opracowano następujące rozwiązania:

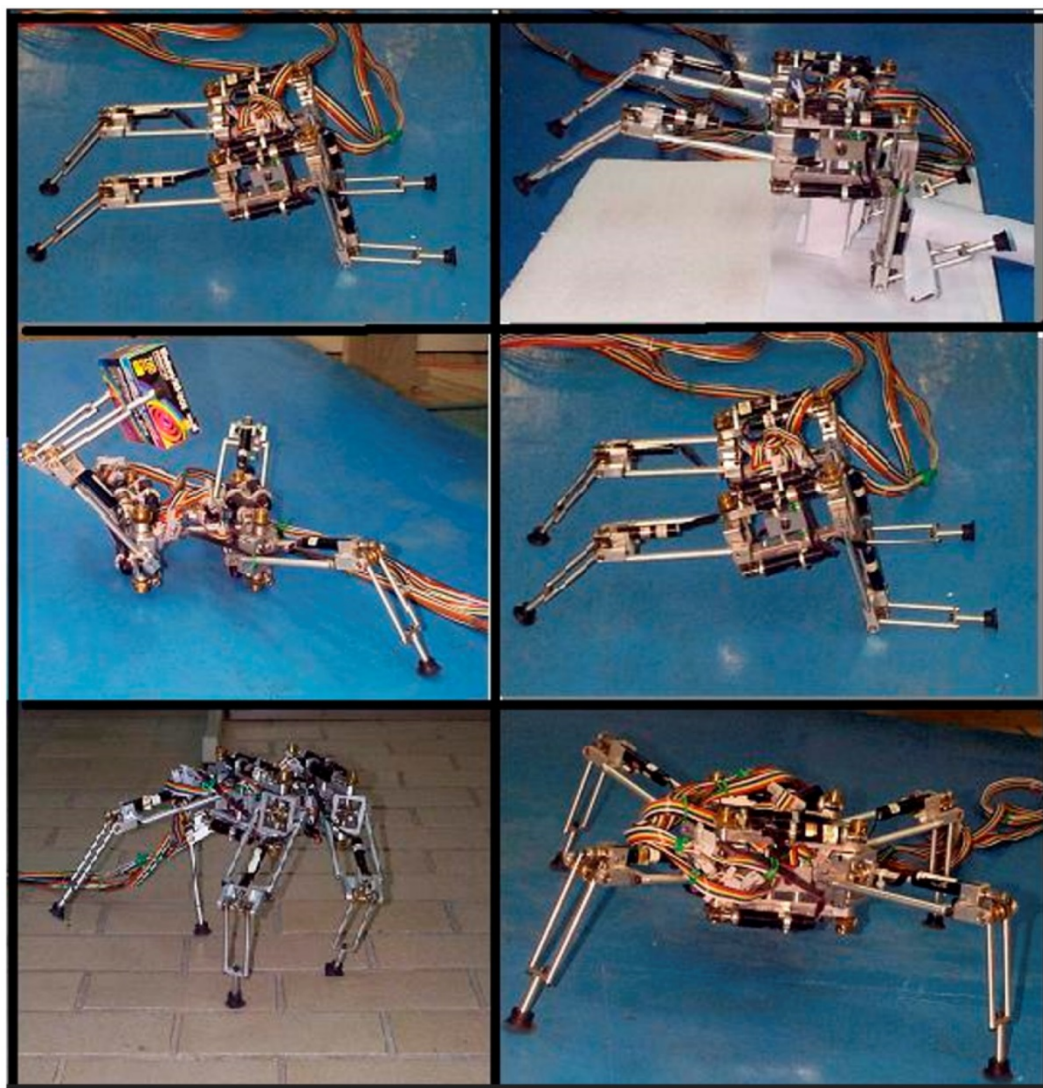
1. Algorytmy wykorzystujące specjalnie zaprojektowane struktury wypukłych multi-modeli neuronowych, co gwarantuje otrzymanie wypukłego zadania optymalizacji (w ogólności nie kwadratowego, ale znacznie prostszego niż ogólnego zadania optymalizacji nieliniowej) [268].
2. Efektywne obliczeniowo nieliniowe algorytmy MPC z cykliczną linearyzacją dla różnych struktur modeli neuronowych, w tym klasycznych sieci perceptronowych [265], neuronowych modeli Wienera [269] oraz sieci neuronowych typu Long Short-Term Memory (LSTM) [536].
3. Algorytmy wykorzystujące specjalnie zaprojektowane struktury modeli afinicznych, co gwarantuje otrzymanie kwadratowego zadania optymalizacji [270].
4. Algorytmy wykorzystujące specjalnie zaprojektowane struktury multi-modeli, w których wykorzystano operator Koopmana, co gwarantuje otrzymanie kwadratowego zadania optymalizacji [271].
5. Algorytmy analityczne z aproksymacją neuronową prawa sterowania, w których nie ma potrzeby bieżącej optymalizacji, ponieważ sygnały sterujące wyznacza się ze wzoru analitycznego [266].
6. Algorytmy wykorzystujące specjalnie zaprojektowane struktury modeli hybrydowych (łączyjących prawa fizyki oraz modele empiryczne). Stosuje się cykliczną linearyzację, co gwarantuje otrzymanie kwadratowego zadania optymalizacji [537].

Należy podkreślić, że pracownicy Politechniki Warszawskiej mają doświadczenie w projektowaniu i implementacji algorytmów MPC sterujących rzeczywistymi dronami [374] oraz robotami [75, 272, 357]. Serwomechanizm wizyjny zawierający algorytm MPC umożliwia głowie robota śledzenie statycznych i ruchomych obiektów [75]. W algorytmie MPC zastosowano specjalnie zaprojektowany model o strukturze Hammersteina-Wienera. Zaprezentowano wyniki świadczące o lepszej jakości zaprojektowanego algorytmu MPC w porównaniu z rozwiązaniem bazowym, wykorzystującym jednopętlowe regulatory PID. Stworzono też robota z manipulatorem śledzący ruchome obiekty za pomocą kamery obrotowej [357]. Celem systemu jest utrzymanie śledzonego wizualnie obiektu w środku obrazu. Jednocześnie ogólny serwomechanizm wizyjny rozpoznaje i śledzi obiekt, moż-

liwiając jego uchwycenie przez ramię robota. Zastosowanie algorytmu MPC umożliwia przewidywanie działania kamery na określonym horyzoncie czasu zgodnie z wcześniej zdefiniowanymi celami śledzenia.

7.3.3. Sterowanie zespołem autonomicznych maszyn koczających

Zespół z Instytutu Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej posiada doświadczenie w projektowaniu i sterowaniu maszynami koczającymi i robotami humanoidalnymi [546]. Opracowano małą czteronożną maszynę koczającą [547] (rys. 7.21) oraz zespół sześcionożnych maszyn koczających wykonujących samodzielnie zadanie inspekcji otoczenia zgodnie ze współrzędnymi geograficznymi zadawanymi przez operatora drogą radiową (rys. 7.22). Maszyny korzystają m.in. z systemu GPS, kompasu i inklinometrów samodzielnie omijając przeszkody, wybierając trajektorie ruchu i dostosowując chód do warunków terenu [549]. Przekazują drogą radiową wyniki inspekcji terenu. Opracowano i zaimplementowano generatory ich chodu, system sterujący czasu rzeczywistego oraz metodę nawigacji. Urządzenia przeszły z powodzeniem testy w rzeczywistym terenie.



Rysunek 7.21. Czworonożna maszyna koczująca w różnych konfiguracjach

7.3.4. Analiza obrazu i wideo

7.3.4.1. Sferyczny wielokamerowy system wizyjny

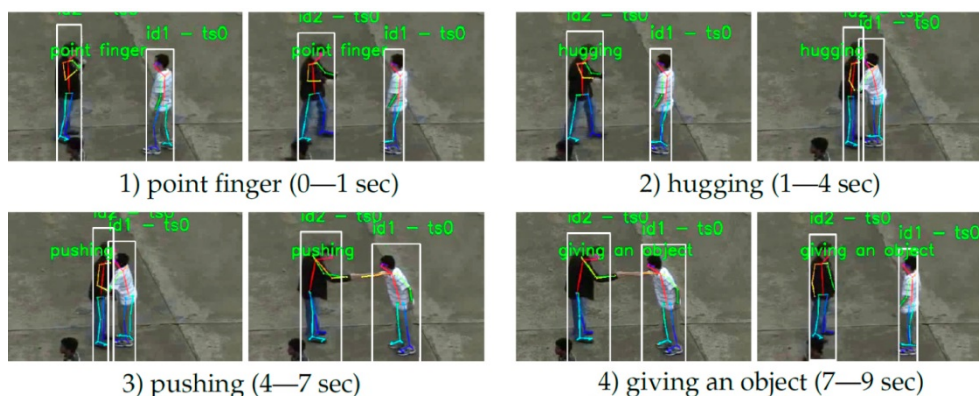
W Instytucie Informatyki (II) PW zrealizowano oprogramowanie do kalibracji sferycznego wielokamerowego systemu wizyjnego. Opracowano oprogramowanie do rekonstrukcji modelu 3D statycznego obiektu na podstawie zbioru obrazów z zestawu sferycznie rozmieszczonych kamer. Wykonano analizy możliwości powiązania jakości rekonstrukcji ze sposobem rozmieszczenia kamer.

7.3.4.2. Lokalizacja wizualna z użyciem map Google

Projekt Tango, realizowany w II PW, dotyczy wydajnych metod wyszukiwania najbliższych sąsiadów. Technologia Tango daje urządzeniu mobilnemu możliwość nawigowania w świecie fizycznym w sposób podobny do tego, jak robimy to jako ludzie. Tango przenosi nowy rodzaj percepcji przestrzennej na platformę mobilną Android, dodając zaawansowaną technologię wizji komputerowej, przetwarzania obrazu oraz specjalne czujniki wizyjne. Jednym z głównych elementów technologii Tango jest rozpoznawanie wcześniej odwiedzonych miejsc przy użyciu geolokalizacji wizualnej. W przypadku Tango, geolokalizacja odbywa się dwuetapowo: najpierw zbierane są zdjęcia dotyczące otoczenia, na podstawie których tworzone są mapy 3D, a później porównywane są one z nadchodzącymi obrazkami. Otoczenie reprezentowane jest modelami złożonymi z chmur punktów 3D, które stworzone są przy użyciu algorytmów SfM (structure-from-motion). Ponieważ SfM rekonstruuje każdy punkt 3D z wielu obrazów, każdy z tych punktów związany jest ze zbiorem deskryptorów lokalnych. W przypadku pojawienia się nowego zdjęcia, lokalizacja jest określana na podstawie zależności między wyekstrahowanymi ze zdjęcia deskryptorami, a deskryptorami punktów 3D. Żeby jednak wyszukać najbardziej pasujące do deskryptorów z przychodzącego zdjęcia deskryptory z map 3D, potrzebne są wydajne mechanizmy wyszukiwania podobieństw w przestrzeni deskryptorów. Ponieważ najbardziej wydajne w ekstrakcji i używane w projekcie Google Tango są deskryptory binarne, opracowano wydajne algorytmy wyszukiwania najbliższych sąsiadów właśnie w przestrzeniach binarnych.

7.3.4.3. Klasyfikacja aktywności człowieka

W projekcie APAKT (System reagujący na zagrożenia bezpieczeństwa dzieci w cyberprzestrzeni ze szczególnym uwzględnieniem pornografii dziecięcej, 2020–2023), realizowanym w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej PW, opracowano rozwiązania oparte na nisko-poziomowych cechach obrazu lub danych szkieletowych pochodzących z detektora pozy, które są następnie przetwarzane przez sieci głębokie i przekazywane do klasyfikacji akcji i interakcji osób w nagraniu wideo (rys. 7.24). Uzyskano 90% dokładność (accuracy) przy przyporządkowywaniu ruchu i akcji pojedynczych osób do 40 klas [205] oraz dokładność wynoszącą 94% przy klasyfikacji interakcji 2. osób do 11. klas [413] (na bazie wideo NTU RGB+D), przy wykorzystaniu jedynie danych 2D, co mieści się wśród 10 najlepszych wyników znanych z literatury.

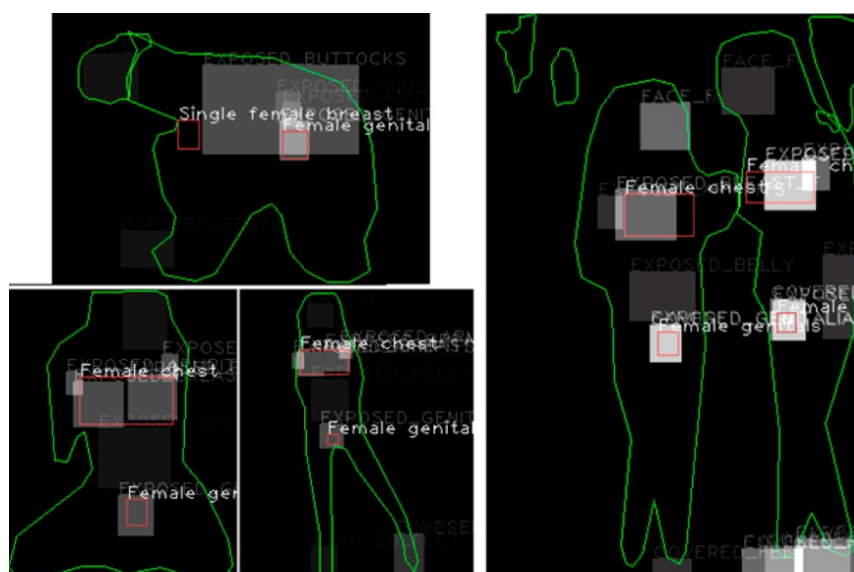


Rysunek 7.24. Przykłady rozpoznawania interakcji między dwiema osobami

Efektem działań badawczych były algorytmy i modele sieci neuronowych służące do klasyfikowania aktywności osoby lub interakcji dwóch osób widocznych w nagraniu wideo oraz do klasyfikowania przedziału wiekowego mówcy i jego stanu emocjonalnego na podstawie analizy sygnału mowy. Cechą wspólną proponowanych rozwiązań jest wstępna detekcja osób w ramach wideo i ich reprezentacja w postaci szkieletowej. Dla każdego typu sieci neuronowej (CNN, LSTM, Transformer, MLP) użytej w dalszej analizie, opracowano odpowiadający jej algorytmy wstępnego przetwarzania danych szkieletowych. Do trenowania sieci i testowania modeli zastosowano m.in. międzynarodową bazę NTU RGB+D, co pozwoliło na obiektywne porównanie dokładności klasyfikacji z wynikami innych wiodących ośrodków.

7.3.4.4. Klasyfikacja obrazów zawierających osoby

W ramach wspomnianego wcześniej projektu APAKT opracowano rozwiązania oparte na modelach głębokich sieci neuronowych, przeznaczone do klasyfikacji obrazów pod względem zawartości nielegalnej treści, w szczególności pornografii dziecięcej. Uwzględniono ekstrakcję szeregu cech obrazu i wytrenowano kilka neuronowych klasyfikatorów obiektów w celu automatycznej detekcji osób i ich wrażliwych, nagich części ciała (rys. 7.25).



Rysunek 7.25. Przykłady wyników detekcji osób i ich wrażliwych, odsłoniętych części ciała w obrazach

7.3.4.5. Zabezpieczanie autentyczności fotografii twarzy

W projekcie Bio-Pki (Techniki Biometryczne oraz PKI w nowoczesnych dokumentach tożsamości i ochronie systemów informacyjnych, 2011–2013), realizowanym w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej PW, analizowano problem zabezpieczania autentyczności fotografii twarzy umieszczanych na fizycznych dokumentach tożsamości. Aby osiągnąć ten cel, opracowano metody steganografii obrazu [207], przetestowano ich skuteczność, w tym ich wpływ na poprawność weryfikacji osoby, dla trzech komercyjnych systemów weryfikacji twarzy [208]. Średnia wartość

EER (Equal Error Rate) dla tych systemów uzyskiwana na podstawie posiadanej bazy danych dotyczących obrazów twarzy pogarszała się jedynie o ok. 1.2%. W późniejszych pracach zastosowano jedną z opracowanych metod do zabezpieczania autentyczności obrazów elektronicznych w bazie zdjęć tęczówki oka [96].

7.3.4.6. Analiza obrazów RGB i RGB-D

W pracach dotyczących analizy obrazów korzystamy z wieloletniego dorobku zespołu z Instytutu Automatyki i Informatyki Stosowanej PW, uzyskanego podczas realizacji wcześniejszych projektów badawczych, dotyczących segmentacji i rozpoznawania obiektów w obrazach RGB, IR (podczerwień) i RGB-D, w szczególności na potrzeby autonomicznej nawigacji robotów mobilnych [518], [210] i rozpoznawania obiektów [517], [209].

7.3.4.7. Sterowanie za pomocą gestów

W projekcie NPC (Narodowa Platforma Cyberbezpieczeństwa, 2017-2020), realizowanym w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej PW, rozważano problem detekcji sylwetki i rozpoznawania gestów dłoni w strumieniu danych wideo uzyskanych z kamery w trybie on-line [206, 414]. Opracowano odpowiednie rozwiązania oparte na detekcji punktów charakterystycznych dłoni i model neuro nowej sieci splotowej [204], korzystając z własnego dorobku dotyczącego rozpoznawania gestów dłoni w strumieniu wideo [212].

7.3.4.8. Analiza monitoringu wideo

W projekcie BioWiz (Opracowanie i stworzenie systemu mającego na celu identyfikację osób (sprawców przestępstw) na podstawie wizerunku utrwalonego na zdjęciu lub materiałach video, 2016-2018) zajmowano się re-detekcją osób w nagraniach wideo pochodzących z monitoringu. Uwzględniane były cechy sylwetki (elementy ubioru) i twarzy osoby zarejestrowanej uprzednio przez Policję jako potencjalny sprawca. Oprogramowanie opracowane w IAIS PW na potrzeby policji zawiera funkcje analizy wideo [519].

7.3.4.9. Baza danych testowych dla pojazdów autonomicznych

Celem aktualnie realizowanego w II PW projektu DARTS jest opracowanie autorskiej bazy scenariuszy testowych dla pojazdów autonomicznych (AV), uwzględniających warunki drogowe charakterystyczne dla Polski. Baza będzie stanowić podstawę do testowania systemów percepcji pojazdów L3-L5 wg. SAE J3016 i zostanie udostępniona zainteresowanym podmiotom na zasadzie non-profit, tak

aby wzmacniać potencjał polskiej gospodarki. Ogólnodostępna baza umożliwi projektowanie, tworzenie oraz ewaluację systemów percepcji pojazdów na różnych poziomach autonomii. Innowacyjność projektu wynika z charakteru danych referencyjnych odznaczających się dużą różnorodnością i wysokim poziomem detali. Baza będzie zawierać dane dostarczone przez różne sensory: IMU, GPS, kamery, radary, lidary. Dane te po odpowiedniej obróbce zostaną poddane adnotacji. W procesie tworzenia adnotacji danych oraz badania ich jakości zostaną wykorzystane algorytmy sztucznej inteligencji oraz zaawansowane metody obróbki danych cyfrowych, m.in. fuzja danych, automatyczna detekcja i śledzenie obiektów oraz algorytmy aktywnego uczenia. Odcinki testowe zostaną dobrane ze szczególnym uwzględnieniem scenerii charakterystycznych dla Polski, w tym miejsc o dużej wypadkowości. Baza będzie zawierać odcinki dróg wszystkich klas i kategorii, a także uwzględni organizację ruchu, znaki, sygnalizację świetlną oraz innych uczestników ruchu (pojazdy, pieszych, rowerzystów, inne formy transportu na drodze). Przeprowadzone badania terenowe uwzględnią różne warunki drogowe, np. korki, wypadki bądź roboty drogowe, w tym także przy ograniczonej widoczności np. mgła. Realizacja projektu dostarczy narzędzie niezbędne do wdrażania AV (autonomous vehicle).

7.3.5. Przetwarzanie sygnału mowy

7.3.5.1. Rozpoznawanie mowy i mówcy

W ramach projektu APAKT współrealizowanego przez IAIS PW opracowano rozwiązania oparte o modelach sieci głębokich do klasyfikacji osób ze względu na wiek (uwzględniono do 7 przedziałów wiekowych; użyto bazy nagrań CommonVoice) i stan emocjonalny mówcy (6–8 stanów emocjonalnych; korzystano z 4 publicznych baz nagrań). Uzyskano 70,8% i 86,1% dokładność (accuracy) dla klasyfikacji wieku przy 6 względnie 3 przedziałach wiekowych i przy znajomości płci mówcy, na podzbiorze języka angielskiego zbioru CommonVoice z 2023 r. [364]. Osiągnięto też 71,9% dokładności F1 dla klasyfikacji stanu emocjonalnego w bazie RAVDESS i 65,2% dokładności F1 w czterech połączonych publicznych baz danych ze stanami emocjonalnymi mówców [203], co w obu przypadkach jest porównywalne z najlepszymi wynikami w literaturze. Program rozpoznawania mowy typu „speech-to-text” został opracowany przy użyciu modelu neuronowego CTC (Connectionist Temporal Classification), który osiągnął dokładność detekcji słów na poziomie ponad 80% w bazie danych TIMIT, co odpowiada wynikowi rozwiązania referencyjnego.

W projekcie NPC (Narodowa Platforma Cyberbezpieczeństwa, 2017-2020) rozpoznawanie komend głosowych i weryfikację mówcy były przeprowadzone on-line. Opracowano rozwiązania klasycznych algorytmów używających HMM-GMM i UBM-GMM dla obu zagadnień [204], korzystając z własnych prac z zakresu rozpoznawania mowy, m.in. dotyczących normalizacji sygnału mówcy [133] i reguł konwersji reprezentacji grafemu do fonemu [412].

7.3.5.2. Lokalizacja i separacja źródeł dźwięku

Doświadczenia badawcze dotyczą też analizy sygnałów akustycznych nagrywanych jednocześnie przez wiele (2, 3, 5) mikrofonów. Oparto się na założeniu

WDO⁷ (W-disjoint orthogonal frequency) i technice DOA (difference of arrival) do wyznaczania kierunku w przestrzeni, z którego nadchodzi dźwięk [202], [160]. W przypadku wielu źródeł dźwięku jednocześnie aktywnych dokonano rekonstrukcji sygnałów źródłowych stosując technikę analizy składowych niezależnych ICA (independent component analysis) [372].

7.3.6. Wyznaczanie pozycji czujników w sieci

Bezprzewodowe sieci czujników służą wspieraniu procesu decyzyjnego przez centrum dowodzenia bądź autonomiczne roboty operujące na polu walki. Kluczowym problemem jest lokalizacja urządzeń tworzących sieć.

W przypadku wielu zastosowań nie można wyznaczyć położenia węzła sieci pomiarowej wyposażając go w układ GPS. Dodanie modułu GPS powoduje wzrost kosztów oraz ciężaru urządzenia pomiarowego oraz stanowi dodatkowy wydatek energii potrzebny do zasilenia tego układu. Ponadto, wyniki obliczeń uzyskane za pomocą podstawowego układu GPS często są obciążone dość dużym błędem i nie spełniają wymagań zadania. Sygnał GPS może też być zakłócony lub niedostępny. W takich sytuacjach konieczne jest zaproponowanie innych rozwiązań, które pozwalają na wyznaczenie położenia węzłów na podstawie pomiarów różnych wielkości fizycznych charakterystycznych dla transmisji bezprzewodowej.

W sieciach czujników pozycje węzłów w przestrzeni są zazwyczaj wyznaczane na podstawie wzajemnej relacji lokalizowanych węzłów względem nielicznych węzłów o znanym położeniu, znajdujących się w zasięgu transmisji. Węzły te są nazywane referencyjnymi. Wspomniane relacje określamy przez wyznaczenie kątów padania sygnałów radiowych bądź odległości między węzłami. Obliczenie tych miar wymaga nawiązania komunikacji i przetworzenia danych o poziomie mocy odbieranych sygnałów, czasach propagacji czy kierunkach padania sygnałów [534, 371, 359]. Dokładność oszacowania odległości międzywęzłowej wyznaczonej za pomocą popularnych modeli propagacji fal radiowych w znacznym stopniu zależy od jakości pomiaru poziomu mocy odbieranych sygnałów. Podobnie niskiej jakości rezonatory kwarcowe wykorzystywane w zegarach wpływają na niedokładność pomiaru czasu.

Lokalizacja węzłów sieci sensorowej może być realizowana w dwóch scenariuszach, zależnie od możliwości do pozyskania danych. Pierwszy z nich obejmuje takie sytuacje, w których dostępne są tylko informacje o bliskości sąsiednich węzłów, a konkretnie każdy węzeł dysponuje jedynie informacją, które węzły znajdują się w jego zasięgu komunikacyjnym, ale nie zna kierunku i odległości w jakiej się znajdują. W drugim scenariuszu informacja o bliskości jest wzbogacona o znajomość odległości między węzłami znajdującymi się w zasięgu radiowym, często wyznaczaną z ograniczoną dokładnością. W ogólności efektem rozwiązania zadania lokalizacji jest mapa z rozlokowanymi urządzeniami tworzącymi sieć sensorową. Przy czym, w zależności od oczekiwań oraz dostępnych danych pomiarowych jest to mapa położenia względnych lub bezwzględnych. W pierwszym

⁷ Możliwe jest ślepe rozdzielenie dowolnej liczby źródeł dźwięku, mając do dyspozycji tylko dwie mieszaniny bezechowe, pod warunkiem, że reprezentacje czasowo-częstotliwościowe źródeł nie nakładają się, co nazywane jest ortogonalnością W-rozłączną.

przypadku wynikiem jest rozlokowanie węzłów w dwu lub trójwymiarowej przestrzeni z zachowaniem jedynie relacji sąsiedzkich jakie występują w lokalizowanej sieci. Mapa nie dostarcza dokładnych informacji o położeniach bezwzględnych węzłów w rozważanej przestrzeni. Często konieczne jest wyznaczenie mapy bezwzględnej, które polega na obliczeniu bezwzględnych współrzędnych geograficznych wszystkich węzłów. Jest to niezbędne w takich zastosowaniach jak monitorowanie, odkrywanie czy śledzenie celu.

W literaturze proponowanych jest wiele systemów do lokalizacji węzłów rozległych sieci sensorowych, w których stosuje się różne metody, np. statystyki matematycznej, geometrii, przetwarzania sygnałów, optymalizacji numerycznej [13, 437, 501]. Zespół z IAIS PW opracował metody geolokalizacji węzłów, w których zakłada się znajomość położenia niewielkiej liczby węzłów oraz wymianę informacji pomiędzy wszystkimi węzłami sieci. Problem lokalizacji jest formułowany w postaci zadania programowania nieliniowego, do rozwiązania którego są stosowane popularne algorytmy heurystyczne: symulowane wyżarzanie lub algorytm genetyczny [21]. Odległości międzywęzłowe są wyznaczone na podstawie mocy odbieranego sygnału, przy wykorzystaniu klasycznych modeli propagacji fali. Algorytm oferuje dodatkowo autorskie rozwiązanie problemu odbitego węzła, czyli niejednoznaczności typu flip ambiguity. Liczne badania symulacyjne i eksperymenty przeprowadzone na rzeczywistych urządzeniach w otwartej przestrzeni (rys. 7.26) pokazują przewagę rozwiązania w porównaniu z wynikami metod proponowanych w literaturze. Warto podkreślić, że metoda nie zakłada wyposażania węzłów w dodatkowe moduły do wyznaczania odległości międzywęzłowych. Szczegółowy opis metody lokalizacji i analiz porównawczych zawierają prace [308, 307, 359].



Rysunek 7.26. Lokalizacja węzłów – wybrana topologia sieci.

Ponadto zespół z IAIS PW opracował i przebadął symulacyjnie metodę rozmieszczania bezprzewodowych węzłów pomiarowych w przestrzeni i tworzenia sieci spójnych przy wykorzystaniu platform jezdnych. Do planowania ruchu samoorganizujących się urządzeń stosujących komunikację radiową i wykonujących

wspólnie zlecone zadanie wykorzystany jest model sztucznego pola potencjału oraz oddziaływań międzycząsteczkowych w ciekłych kryształach. Kolejne pozycje węzłów sieci są wyznaczone w wyniku rozwiązywania zadań optymalizacji, w których funkcja kryterialna (funkcja potencjału) jest inspirowana modelem Lennarda-Jonesa. Urządzenia pomiarowe są modelowane jako bryły sztywne poddane działaniu sił w polu potencjalnym. Kolejne położenia węzłów są wyznaczone w sposób iteracyjny. Algorytm uwzględnia inne poruszające się obiekty oraz przeszkody statyczne. Szczegółowy opis rozwiązania oraz przykład tworzenia spójnej sieci do monitorowania chmury gazów ciężkich zawierają prace [360, 249, 359].

7.3.7. Cyberbezpieczeństwo

Grupa Bezpieczeństwa Systemów Komputerowych działająca w Instytucie Informatyki na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych zajmuje się zagadnieniami szeroko pojętego obszaru cyberbezpieczeństwa, czego efektem są liczne publikacje, udział w międzynarodowych projektach badawczych oraz bogata współpraca międzynarodowa.

Obecnie koncentruje się głównie na następujących obszarach badawczych:

- analizie złośliwego oprogramowania. Przykładowo przeprowadzone zostały badania wielu rodzin zagrożeń typu ransomware, których wyniki zostały przekazane m.in. polskiej policji oraz przedstawione w siedzibie Europolu,
- analizie bezpieczeństwa protokołów sieciowych IT/OT,
- ukrytych kanałach sieciowych, metodach steganografii⁸ sieciowej oraz sposobach jej wykrywania – aktualnie Zespół prowadzi badania nad tym zagadnieniem w ramach projektu CoCo-De (Covert Channels Detection) finansowanego przez Air Force Office of Scientific Research (AFOSR).
- programowalnych sieciach komputerowych – SDN (Software-Defined Networking) – zespół rozwija możliwości wykrywania różnego rodzaju ataków sieciowych za pomocą aplikacji SDN działających bezpośrednio w kontrolerze SDN (modułów bezpieczeństwa).

Członkowie grupy badawczej koordynują również, stworzoną we współpracy z Europolem, inicjatywę CUIng (Criminal Use of Information Hiding), której celem jest podnoszenie świadomości dotyczącej technik ukrywania informacji oraz integracja ekspertów pochodzących z różnych środowisk (naukowców, ekspertów z firm i instytucji). Obecnie w ramach CUIng współpracuje ponad 300 ekspertów z ponad 30 krajów z całego świata.

W ramach tych zagadnień zespół współorganizuje także międzynarodowe warsztaty 5G-NS (5G Networks Security) oraz CUING (Criminal Use of Information Hiding), które odbywają się razem z konferencją ARES (International Conference on Availability, Reliability and Security). Ponadto grupa współorganizuje także warsztaty International Workshop on Traffic Measurements for Cybersecurity (WTMC).

⁸ Metoda komunikacji ukrywająca fakt jej prowadzenia; nie polega na szyfrowaniu wiadomości

W ciągu ostatnich lat zainteresowania grupy badawczej obejmowały również inne zagadnienia bezpieczeństwa dotyczące m.in. systemów automatyki przemysłowej, Internetu rzeczy (IoT), Visible Light Communication (VLC) oraz technologii blockchain.

Zespół realizuje badania oraz projekty, prowadząc bogatą współpracę międzynarodową z ośrodkami naukowymi z Niemiec, Francji, Włoch, Wielkiej Brytanii i innych krajów. Posiada także dostęp niezbędnej infrastruktury badawczej w tym do serwerów i systemów bezpieczeństwa w sieci Instytutu Informatyki np. sieci systemów HoneyPot oraz dedykowanych systemów dynamicznej analizy złośliwego oprogramowania. Oferuje usługi badawczo-rozwojowe w zakresie szeroko rozumianego cyberbezpieczeństwa, w tym:

- analizę zagrożeń bezpieczeństwa oraz projektowanie i badanie skuteczności mechanizmów zabezpieczeń,
- analizy i ekspertyzy w zakresie bezpieczeństwa sieciowego i informacyjnego.

Ponadto w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej PW prowadzone są prace dotyczące cyberbezpieczeństwa systemów automatyki, w tym dotyczące metod wykrywania ataków [407], również przy wykorzystaniu sieci neuronowych [535].

7.3.8. Technologie fotoniczne

Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki Politechniki Warszawskiej dysponuje dużym doświadczeniem w projektowaniu i wykonaniu urządzeń fotonicznych. Poniżej wyszczególniono przykładowe technologie, które są przedmiotem zainteresowania tego instytutu.

7.3.8.1. Technologie sensoryczne

Zakład Technologii Mikrosystemów i Materiałów Elektronicznych zajmuje się wytwarzaniem i charakteryzacją:

- heterostruktur oraz przyrządów heterozłączowych do fotodetekcji promieniowania UV, widzialnego, gamma oraz cząstek (ZnO, SiC, GaN, AlN i innych),
- czujników światłowodowych, a w szczególności: współczynnika załamania, ciśnienia, temperatury,
- biosensorów.

Ponadto pracuje nad wykorzystaniem technik osadzania z fazy gazowej w wytwarzaniu warstw do zastosowań czujnikowych.

Natomiast Zakład Optoelektroniki koncentruje swoje prace nad:

- wytwarzaniem i charakteryzacją czujników światłowodowych,
- zastosowaniami fotonicznych układów scalonych (ASPIC) w czujnikach – wytwarza ultrakompaktowe optyczne przetworniki i interogatory,
- rozwojem metod przetwarzania i analizy obrazu dla potrzeb systemów monitoringu wizyjnego w systemach bezpieczeństwa,
- projektowaniem i badaniem systemów obrazowania w zakresie VIS-IR-THz (spektrum widzialne, podczerwień i częstotliwości terahercowe).

Technologie te zostały szerzej opisane w podrozdziale [6.11.1](#).

Jeden ze zrealizowanych projektów dotyczył hybrydowych platform czujnikowych zintegrowanych układów fotonicznych na bazie materiałów ceramicznych i polimerowych. Inny dotyczył przestrajalnych metamateriałów hiperbolicznych na potrzeby nowej generacji przyrządów fotonicznych. Ponadto opracowano uniwersalną platformę oświetleniowo-sensoryczną.

7.3.8.2. Stabilizatory i żyroskopy optyczne

Zakład Optoelektroniki zajmuje się technologiami opisanymi w podrozdziale [6.11.2](#). W szczególności przedmiotem jego zainteresowania jest projektowanie i charakteryzacja układów fotoniki scalonej (ASPIC – Application Specific Photonic Integrated Circuit). W tym zakładzie skonstruowano żyroskop optyczny w eksperymentalnej technologii fotoniki scalonej.

7.3.8.3. Komunikacja optyczna

Ponadto ten sam zakład projektuje i charakteryzuje materiały, elementy i systemy komunikacji optycznej omówione w podrozdziale [6.11.3](#). W szczególności obecnie zajmuje się układami fotoniki scalonej do zastosowań w systemach komunikacji w wolnej przestrzeni.

7.3.8.4. Technologie światłowodowe

Technologie będące przedmiotem rozważań podrozdziału [6.11.4](#) są przedmiotem zainteresowań Zakładu Optoelektroniki. W szczególności zakład ten zajmuje się:

- projektowaniem i charakteryzacją elementów fotoniki światłowodowej (pasywnych i aktywnych) oraz systemów światłowodowych,
- wytwarzaniem i charakteryzacją czujników światłowodowych.

Opracowano światłowodowy system czujnikowy zasilany zdalnie mocą optyczną.

7.3.8.5. Zasilanie bezprzewodowe

Zakład Optoelektroniki ma doświadczenie dotyczące technologii przedstawionych w podrozdziale [6.11.6](#). W szczególności zajmował się:

- projektowaniem i badaniem systemów fotowoltaicznych,
- zdalnym zasilaniem za pomocą promieniowania laserowego.

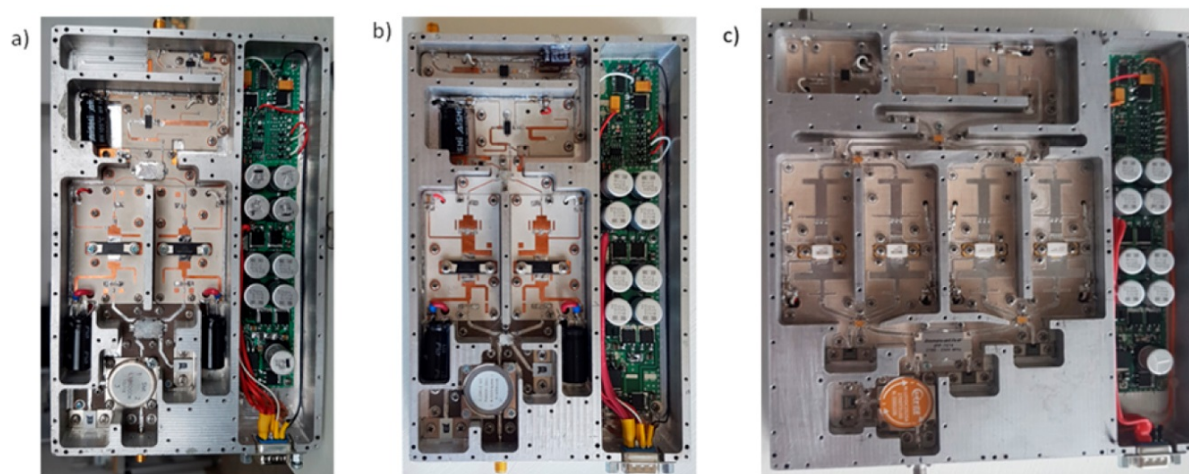
Jednym ze zrealizowanych projektów było zdalne zasilanie dronów promieniowaniem laserowym. Wykorzystano struktury na bazie półprzewodnika CIGS do konwersji promieniowania laserowego. Ponadto zajmowano się zastosowaniem materiału hiperbolicznego na potrzeby zwiększenia uzysku energetycznego modułów fotowoltaicznych.

7.3.9. Zasilanie elektryczne

Podstawowa wiedza na temat rozwoju i wykorzystania nowoczesnych technologii półprzewodnikowych w energoelektronice (rozdział [6.12](#)) skupiona jest zasadniczo w czterech polskich jednostkach badawczych, które od wielu lat prowadzą w różnych konfiguracjach wiodące projekty w zakresie opisywanej tematyki: Politechnika Warszawska (PW), Politechnika Wrocławska (PWr), Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki (SBŁ-IMiF) oraz Instytut Wysokich

Ciśnien Polskiej Akademii Nauk (IWC PAN). W IWC PAN od wielu lat rozwijane są krystalizacja objętościowych kryształów azotku galu (GaN) oraz wzrost struktur epitaksjalnych w technologii GaN do produkcji najnowszej generacji przyrządów półprzewodnikowych, dzięki czemu IWC PAN jest od wielu lat w czołówce światowych osiągnięć w zakresie wytwarzania nowoczesnych materiałów półprzewodnikowych. Pozostałe trzy ośrodki realizowały w latach 2017-2021 duży projekt badawczy Technologie materiałów półprzewodnikowych dla elektroniki dużych mocy i wysokich częstotliwości w ramach programu strategicznego TECHMATSTRATEG finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. W ramach tego projektu opracowane zostały lateralne tranzystory AlGaN/GaN/Si HEMT w klasie napięciowej 600 V oraz diody PiN w technologii węgla krzemu (SiC) w klasie napięciowej 1,7 kV [490]. W tym samym projekcie w ramach prezentacji możliwości nowoczesnych przyrządów półprzewodnikowych zespoły badawcze Politechniki Warszawskiej opracowały wzmacniacze nadawcze awionicznych systemów radionawigacyjnych i radiolokacyjnych, takich jak system IFF, radar na pasmo L oraz radar PSR (rys. 7.27) [253], a także nowoczesne moduły przekształtników na bazie tranzystorów GaN z wykorzystaniem których powstały następujące rozwiązania:

- Przekształtnik energoelektroniczny SRM zaprojektowany dla maszyny re-luktancyjnej przełączalnej czterofazowej,
- Przekształtnik energoelektroniczny AR będący prostownikiem aktywnym, zasilanym z trójfazowej sieci publicznej,
- Czterogłęziowy przekształtnik DC/AC,
- Dwugłęziowy przekształtnik DC/DC
- Przekształtnik energoelektroniczny MMC będący modularnym przekształtnikiem wielopoziomowym,
- Przekształtnik energoelektroniczny DAB zaprojektowany w celu zasilania przekształtników SRM, MMC oraz zewnętrznych odbiorników DC,
- Sześciogłęziowy przekształtnik DC/DC.



Rysunek 7.27. Zdjęcia zmontowanych i uruchomionych wzmacniaczy mocy 200 W a) do systemu IFF, b) do radaru na pasmo L oraz c) do radaru PSR

Znaczącą wartością dodaną z punktu widzenia możliwości wdrażania nowej generacji systemów energoelektronicznych w kraju jest zrozumienie nowoczesnych technologii półprzewodnikowych od poziomu właściwości elektro-fizycznych sto-

sowanych materiałów poprzez proces projektowania i wytwarzania wysokonapięciowych przyrządów i modułów mocy, na demonstratorach urządzeń zasilających kończąc [154, 419]. Konstrukcja nowoczesnych urządzeń przekształtnikowych będzie z całą pewnością wymagała w niedalekiej przyszłości stosowania rozwiązań o coraz wyższej skali integracji, co wymaga stałej współpracy ekspertów od technologii mikroelektronicznych, materiałowych, mechatronicznych oraz mechanicznych [220]. Umiejętność zarządzania dużymi zespołami multidyscyplinarnymi została efektywnie i skutecznie wypracowana w ostatnich latach, chociażby podczas realizacji projektu w programie TECHMATSTRATEG, w którym brało udział ponad 100 osób, w tym zespoły reprezentujące trzy wydziały Politechniki Warszawskiej (Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Wydział Elektryczny, Wydział Inżynierii Materiałowej).

Czynnikiem spowalniającym w sposób zdecydowany rozwój krajowych technologii w opisywanym zakresie jest brak ciągłości finansowania wynikający z braku jakiegokolwiek strategii rozwoju krajowego przemysłu półprzewodnikowego. Wszelkie działania w zakresie rozwoju tych technologii są oddolną inicjatywą wymienionych na wstępie zainteresowanych jednostek badawczych. W kwietniu 2024 r. Chips Joint Undertaking, działając w ramach European Chips Act, wybrało zespół w skład którego wchodzi IWC PAN oraz SBŁ-IMiF do realizacji jednej z czterech ogólnoeuropejskich linii pilotażowych w zakresie zaawansowanych technologii półprzewodnikowych. Budowa linii ma rozpocząć się w 2025 roku, a na realizację założonych celów w Polsce przeznaczono kwotę 50 mln EUR [3]. Podobnie jak w przypadku wszystkich poprzednich perspektyw finansowania Polska kolejny raz dostaje szansę na rozwój najnowocześniejszych światowych technologii. Dynamika wzrostu i udział polskich podmiotów w rozwoju nowoczesnej energoelektroniki jest przede wszystkim uzależniony od dofinansowania po polskiej stronie dużych projektów badawczo-rozwojowych dotyczących chociażby wykorzystania nowoczesnych systemów zasilania w aplikacjach militarnych. Rozwój takich systemów, zgodnie z przedstawianymi trendami, nie jest możliwy bez wykorzystania najnowszych osiągnięć w zakresie wytwarzania nowoczesnych materiałów i struktur półprzewodnikowych (SiC, GaN, Ga2O3). Jeżeli nie będziemy w stanie wykorzystać wypracowanego w ostatnich latach w Polsce potencjału badawczo-rozwojowego w tym zakresie, to polskie siły zbrojne będą i tak zmuszone do zakupu tych technologii od zagranicznych dostawców wraz ze wszystkimi ograniczeniami wynikającymi z takiego scenariusza, do których należy przede wszystkim zaliczyć obniżony poziom bezpieczeństwa zasilania elektrycznego urządzeń wojskowych. Uwzględniając dynamiczny wzrost elektryfikacji współczesnych systemów pola walki wszelkie krajowe inicjatywy związane z rozwojem nowoczesnych systemów zasilania dla aplikacji wojskowych powinny wpisywać się w ogólnokrajową strategię działań na rzecz Strategii Bezpieczeństwa Narodowego.

7.4. Doświadczenia Politechniki Gdańskiej (PG)

Politechnika Gdańska od wielu lat rozwija Inteligentny System podejmowania Decyzji (ISD), który opierając się na sposobie funkcjonowania ludzkiego umysłu jest w stanie pełnić rolę centralnego systemu sterowania autonomicznym robo-

tem poruszającym się w dowolnym/nieznany otoczeniu – odbierając bodźce i adaptacyjnie budując model semantyczny postrzeganego otoczenia oraz podejmując decyzje związane z realizacją przypisanych mu zadań. Znajomość kontekstu, w którym działa autonomiczny robot, jest konieczna nie tylko do sprawnego wykonania zadania, ale również do interakcji z ludźmi znajdującymi się w jego otoczeniu. Postrzeganie kontekstu potrzebne jest wszystkim robotom autonomicznym, natomiast zdolność do wchodzenia w interakcje z ludźmi niezbędne jest przede wszystkim robotom specjalnego przeznaczenia, np. tym, które niosą pomoc poszkodowanym w katastrofach. Ponadto robot autonomiczny musi realizować swoje cele etycznie i zgodnie z prawem. W związku z tym konieczne jest wbudowanie w jego system sterowania racjonalnego czynnika emocjonalnego, a to pociąga za sobą budowę złożonych układów percepcji, poznania i podejmowania decyzji. W robotach emocje realizowane są jako reguły, które stosowane są zależnie od kontekstu [124]. To podejście jest szczególnie użyteczne w zastosowaniu do robotów wchodzących w skład roju. Każdy osobnik stosuje wbudowane reguły w kontakcie z innymi robotami, aby rój, jako całość, realizował swoje zadanie.

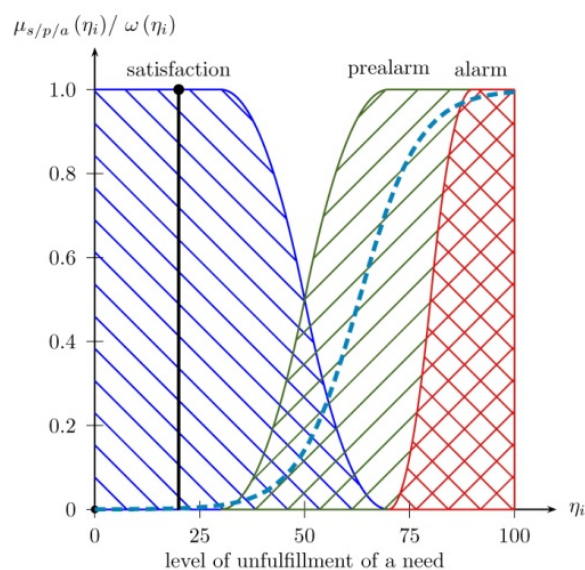
Z użyciem ISD opracowano już wiele autonomicznych modeli i systemów dla różnych zastosowań robotów. Niektóre z nich mają charakter humanoidalny [229] i są przeznaczone do użytku w takich obszarach jak rozpoznanie, walka z terroryzmem, gaszenie pożarów, wędrowanie po terenie o różnorodnym ukształtowaniu itp. Z drugiej strony istnieje wiele projektów związanych z modelowaniem oddzielnych części ludzkiego umysłu, dotyczących motywacji i emocji, nabywania umiejętności społecznych i rozwijania różnych aspektów technicznych, na przykład robotyki behawioralnej [57, 97, 227] lub współpracy w obrębie populacji autonomicznych agentów [250]. Wśród takich prac znaleźć można projekty zajmujące się matematycznym modelowaniem całego ludzkiego umysłu, znane jako architektury poznawcze. Pozornie jedną z najważniejszych różnic między ludźmi a robotami są emocje. Istnieją jednak projekty, które biorą pod uwagę wyrażanie emocji przez robota, np. Kismet [55], Mexia, iCube, Emys [259] itd. Opracowano również kilka obliczeniowych modeli emocji, które próbują naśladować te ludzkie [309]. Jednak sednem problemu nie jest działanie emocjonalne, ale konieczność uwzględnienia odpowiednich czynników motywujących działanie/sterowanie i podejmowanie decyzji [232].

ISD – Inteligentny System postrzegania, wnioskowania i podejmowania Decyzji. Koncepcje psychologiczne dobrze wpisują się w obecne trendy badawcze związane z robotyką i sztuczną inteligencją. Biologicznie inspirowane architektury poznawcze są niezwykle przydatne w budowie agentów i robotów, a to jest jedno z najważniejszych wyzwań współczesnej nauki. Dlatego dalekosiężnym celem badań i inżynierii systemów są wirtualni agenci i autonomiczne roboty, które naśladują ludzkie zachowania w rozwiązywaniu znanych i nieznanych problemów. Politechnika Gdańska zaproponowała, na symbolicznym, wysokim poziomie podejścia do zagadnienia, operacyjny cybernetyczny model ludzkiego umysłu, opracowany przy użyciu starannie dobranych idei zaczerpniętych z wiedzy psychologicznej, łącząc rozległą wiedzę zaczerpniętą z teorii rozwojowej psychologii poznawczej i teorii motywacji. Matematycznie opracowane elementy operacyjne

systemu ISD tworzą spójny i funkcjonalny system podejmowania decyzji zawierający wszystkie elementy niezbędne w autonomicznej robotyce w celu podejmowania decyzji w różnych warunkach środowiskowych w oparciu o wewnętrzne stany potrzeb i emocji.

Centrum systemu ISD zbudowano na zsyntetyzowanym modelu teorii motywacji człowieka, który pokazuje, jak ucieleśniony umysł wpływa na wewnętrzne emocje i inne czynniki decyzyjne oraz wyjaśnia zewnętrzne zachowanie jednostki. Uznając znaczenie takich motywatorów, rozróżniamy ich dwa podstawowe typy: potrzeby i emocje. Potrzeby są głównym składnikiem napędowym (ludzkiego) systemu motywacyjnego, manifestującym się w normalnym trybie działania. Jednak w niektórych przypadkach „myślący” podmiot/agent musi szybko wyprowadzić odpowiedź z samej emocji. Taka dualność/splątanie jest zgodne z obecnie akceptowanymi modelami myślenia [399]. Ponadto, jak wykazano [97], architektura ISD umożliwia implementację emocji jako czynnika napędowego, który również wpływa na system potrzeb.

W architekturze ISD [226, 97, 230] stan pojedynczej potrzeby jest modelowany przy użyciu logiki rozmytej. Poziom satysfakcji (nie)zadowolenia związanego z potrzebą jest reprezentowany przez zmienną lingwistyczną, która ma trzy wartości (stany): satisfaction s , prealarm p i alarm a . Ich funkcje przynależności są zilustrowane na rys. 7.28.



Rysunek 7.28. Model potrzeby i jej wartości rozmyto-lingwistyczne [227]. Symbol η_i odpowiada poziomowi tej (i -tej) niezaspokojonej potrzeby, μ symbolizuje funkcje przynależności dla satysfakcji (μ_s), prealarmu (μ_p) i alarmu (μ_a). Funkcja wagowa ω jest pokazana jako przerywana niebieska linia, a przykładowa bieżąca wartość potrzeby jest oznaczona ciągłym czarnym odcinkiem linii

7.4.1. Emocje

Istnieją różne definicje emocji. W podejściu fizjologicznym postuluje się, że emocje wyewoluowały z procesu homeostazy. Zgodnie z teoriami cybernetycznymi, emocje same w sobie są homeostatem, którego celem jest „utrzymanie równowagi funkcjonalnej układu autonomicznego” [319] poprzez przeciwdziałanie

przepływowi informacji i energii, który redukuje możliwość jego wpływu na środowisko. Innymi słowy, emocje faworyzują te zachowania agenta, które najlepiej służą pożądanej reakcji na bodźce życiowe ze środowiska w danym kontekście.

Procesy emocjonalne spełniają cztery funkcje: informacyjną, aktywizującą, metapoznawczą i modulacyjną. W przypadku projektów robotycznych główną użytecznością jest modulacja, która jest funkcją nastroju i odpowiada za zwiększenie lub zmniejszenie uczucia satysfakcji. Funkcja metapoznawcza dodaje informację o postrzeganym obiekcie, co ułatwia jego klasyfikację. Funkcja informacyjna zabrania lub pozwala agentowi przyjrzeć się bliżej postrzeganemu obiektowi. Prymitywy emocjonalne — pre-emocje, sub-emocje i sub-qualia odpowiadają funkcjom metapoznawczym i informacyjnym. Ta ostatnia funkcja jest także powiązana z klasycznymi jakościami emocjonalnymi i systemowymi. Niektóre akcje można odblokować dopiero wtedy, gdy klasyczna emocja znajdzie się w określonym stanie (np. w stanie rage można odblokować reakcję impact) [229].

Teoria Plutchika stanowi dobry punkt odniesienia dla proponowanego, w pełni funkcjonalnego modelu [232], w którym projektant może dowolnie kształtować etykiety emocji oraz ich rozmyte funkcje przynależności, pogrupowane według podobieństwa. Na przykład żal, smutek i zaduma tworzą wspólną grupę. Dla każdej grupy pozytywnie interpretowanych emocji istnieje grupa przeciwna, np. dla rodziny smutek przeciwną grupą jest radość (w tym ekstaza, radość i spokój). Intensywność każdej emocji można odwzorować za pomocą czterech wartości językowych; Na przykład, rozważając emocje związane z radością, mamy ekstazę, radość, pogodę ducha (spokój) i (wspólny) stan neutralności. Opracowany model motywacyjny, oparty na wybranych teoriach potrzeb Maslowa [315] i emocji Plutchika [408], redukuje te czynniki motywacyjne do zmiennych wewnętrznych, wyrażalnych w postaci funkcji rozmytych, które zaimplementowano w odpowiednich ramach poznawczych.

7.4.2. Model psychologii poznawczej

Oprócz odrębnego przetwarzania potrzeb i emocji, teoria psychologii poznawczej daje solidne podstawy do wspierania budowy autonomicznie działających rzeczywistych robotów i wirtualnych agentów. Chociaż teoria jest obszerna, niepewna i niespójna pod wieloma względami, mądrze wyjaśnia różne formy przetwarzania informacji i związek między pamięcią a bodźcami. Pokazuje również, jak podejmujemy decyzje, myślimy itp. Szczególnie interesujące jest odwzorowanie tego, co dzieje się między pojawieniem się bodźca a reakcją człowieka. Z perspektywy inżynierskiej psychologia poznawcza reprezentuje wysokopoziomowy (symboliczny) archetyp białej skrzynki do budowy autonomicznych systemów robotycznych. Wiedza leżąca u podstaw podejmowania decyzji nie jest tworzona przez pasywne gromadzenie i przechowywanie danych, ale raczej przez aktywne i równoległe przetwarzanie danych. W szczególności rozpoznane struktury ludzkich procesów poznawczych dostarczają solidnego argumentu za możliwością matematycznego modelowania całości procesów podejmowania decyzji przez myślące byty [283].

Procesy poznawcze odpowiadają za czynności prowadzące do zdobywania wiedzy o rzeczywistości [314, 366], które można podzielić na procesy elementarne (percepcja, uwaga, pamięć) i procesy złożone (myślenie, rozwiązywanie problemów,

podejmowanie decyzji, język). Z punktu widzenia modelowania (funkcjonalnego i strukturalnego) obserwacje można podzielić na: sensoryczne, wrażenia i odkrycia, podczas gdy uwagę można wyizolować jako świadomą (umyślną, jawną, wyraźną, odgórną) i nieświadomą (nieumyślną, ukrytą, oddolną) [226]. WISD łączy procesy poznawcze i ich powiązania w jeden wspólny proces myślowy (bez aspektów językowych).

Działanie jednostki może być podejmowane na niemal każdym poziomie przetwarzania informacji. Nieświadoma reakcja działa jako odruch oparty na bodźcu. Podświadoma reakcja może być wyuczona wskutek wielokrotnego powtarzania działań opartych na tym samym zestawie postrzeganych obiektów. Rozwiniętym, ale powolnym typem reakcji jest świadome działanie dobierane na podstawie doświadczenia agenta i jego wiedzy o otoczeniu.

Bodźce pojawiają się w receptorach. Ciągły przepływ informacji przechodzących przez układ percepcyjny [366] umożliwia odkrycie, modelowane jako wyróżniony obiekt, który jest następnie przetwarzany przez uwagę oraz analizowany przez myślenie w celu opracowania decyzji/reakcji.

7.4.3. Postrzeganie

Pierwszy etap zbierania danych polega na percepcji sensorycznej pokazanej na rys. 7.29, która odbiera bodźce z receptorów odpowiedzialnych za różne zmysły, takie jak wzrok, słuch, smak, węch, dotyk, równowaga, temperatura, kinestetyka i ból [366]. Percepcja sensoryczna obejmuje kolejne fazy związane z bodźcami dystalnymi (reprezentującymi rzeczywiste obiekty) i proksymalnymi (obrazy obiektów w receptorach) [314]. Bodźce proksymalne są krótkotrwale przechowywane w pamięci sensorycznej, gdzie podlegają wstępnej filtracji. Zgodnie z koncepcją gotowości, receptory mogą również skupić się na rozpoznawaniu wybranych obiektów [62].

7.4.4. Postrzeganie wrażeń

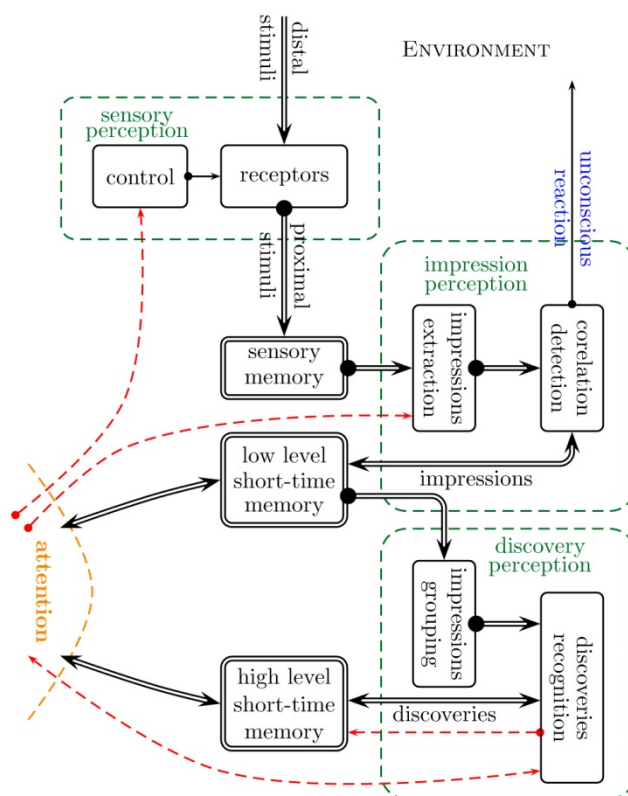
Celem percepcji wrażeń jest wydobycie wrażeń zawartych w bodźcach proksymalnych. Wrażenie jest prostą cechą obiektu (reprezentującą kolor, fakturę itp.), która wynika z aktywności wstępujących ścieżek pochodzących z receptorów [167]. Tutaj znajdują się detektory cech (kształty proste i złożone, takie jak cała twarz), które mogą być implementowane na wiele sposobów, na przykład w formie filtra Haara [281].

W ISD [228] istnieją cztery grupy wrażeń: pojedyncze (składnikowe, elementarne) — wrażenia ukazujące inherentne pierwotne cechy obiektów fizycznych; multipleksowe (złożone, wewnętrzne, abstrakcyjne, rozmyte) — cechy związane ze złożonymi, kompletnymi cechami; funkcjonalne (systemowe, abstrakcyjne) — inne cechy związane z funkcjonowaniem architektury ISD; rozpoznane (znane) — stałe atrybuty używane w modelach systemowych wyuczonych odkryć.

Pojedyncze wrażenia mogą mieć określone znaczenie fizyczne lub geometryczne (np. kropki, paski, twarz lub antropomorfizm) lub mogą reprezentować jakąś abstrakcyjną klasę (piękno, rudowłosa itp.). Takie cechy funkcjonalne (wrażenia) mogą odnosić się do różnych obserwacji agenta, ale również odgrywają ważną

rolę w funkcjonowaniu systemu. Mogą reprezentować uczucia (kontekst sub-/emocjonalny), potrzeby (obiektywny kontekst motywacyjny) lub inne abstrakcyjne cechy (takie jak kategorie czasowe, np. zjawiska monumentalne, trwałe, tymczasowe), które są systemowo ważne. Oczywiście struktury multipleksowe, bardzo przydatne w kontekście ewaluacyjnym, mogą również odnosić się do właściwości funkcjonalnych. Rozpoznane wrażenia (wrażenia), które ułatwiają identyfikację postrzeganych obiektów, odnoszą się do cech już wbudowanych w modele odkrywczcze (znane, doświadczone lub wyuczone) przechowywane w pamięci agenta.

W ten sposób, gdy wrażenie (pojedyncze lub złożone/wielokrotne) zostanie wyizolowane, jest ono porównywane ze znanymi cechami/wrażeniami w celu dalszej identyfikacji percepcji (poza możliwością natychmiastowej nieświadomej reakcji). Wielokrotnie postrzegane, znane, choć jeszcze nierozpoznane, wrażenia są przechowywane w pamięci krótkotrwałej niskiego poziomu (L-STM). Ponadto, z systemowego punktu widzenia musimy wziąć pod uwagę istnienie dwóch typów wrażeń: rozpoznanych (znanych) i nowych (jeszcze nieznanymi).



Rysunek 7.29. Proces postrzegania

7.4.5. Postrzeganie odkryć

Odkrycie jako abstrakcyjna reprezentacja postrzeganego obiektu jest syntetyzowane przez grupowanie rozpoznanych wrażeń (L-STM) według ich lokalizacji w scenie percepcyjnej (może mieć wady nieformalnego modelu). Zawiera listę wrażeń (pojedynczych, wielokrotnych i funkcjonalnych) związanych z tym obiektem, logogenem tego obiektu i relacjami z innymi odkryciami, które można traktować jako stwierdzenia/twierdzenia. Ogólnie rzecz biorąc, istnieją dwa rodzaje percepcji: odkrycia abstrakcyjne i instancyjne, których szczegółowy opis można

znaleźć na przykład w [231]. Odkrycie abstrakcyjne (sklasyfikowane) reprezentuje kategorię obiektów. Proces percepcji (rozpoznawania) polega na porównaniu postrzeganego, ale niesklasyfikowanego obiektu z odkryciami abstrakcyjnymi. Każde odkrycie ma swoją własną etykietę, listę wrażeń je opisujących oraz listę skojarzeń z innymi odkryciami. Ponadto może mieć również wrażenia funkcjonalne z kontekstem motywacyjnym (potrzeby i podemocje). Faktycznie rozpoznane przypadki znanych odkryć abstrakcyjnych nazywane są odkryciami instancyjnymi. Zasadniczo mają one taką samą strukturę jak odkrycia abstrakcyjne, ale z poziomem aktywności wyrażającym częstotliwość ich występowania.

Proces percepcji odkryć dostarcza różnorodnych aspektów semantycznych, wykazując różnicowanie, identyfikację, kategoryzację i orientację percepcyjną, które pozwalają się wyrazić w postaci specyficznych sieci pamięci, przydatnych w procesie rozpoznawania odkryć. Dopasowanie odkrycia jest klasyfikowane przy użyciu określonego minimalnego progu. Gdy liczba trafień dla nierozpoznanego odkrycia osiągnie pewien poziom, odkrycie zostaje przekształcone w nowe odkrycie instancyjne i przeniesione do pamięci semantycznej oraz tymczasowa nazwa nadawana jest temu odkryciu w wyniku procesu kreatywnego myślenia. Gdy pojawia się wiele podobnych przypadków, tworzone jest uogólniające odkrycie abstrakcyjne.

Percepcja sensoryczna, sterowana przez nieświadomą uwagę, odpowiada za gotowość do postrzegania oczekiwanego obiektu [62]. Ułatwia to szybkie znajdowanie określonych obiektów w bezpośrednim otoczeniu. Takie natychmiastowe rozpoznanie występuje w kilku przypadkach: zawężenie do małego zestawu kategorii rzeczowych (np. tylko jedzenie, bezpieczeństwo lub niebezpieczeństwo); pojawienie się nowej motywacji dla danego agenta; dostrzeżone silne powiązanie między kategoriami. Sytuacja może być również odwrotna, kiedy gotowość jest osłabiana, co pozwala agentowi ignorować pewne obiekty (tj. stać się odpornym) [320]. Osłabiając skupienie na większości postrzeganych obiektów, agent łatwiej rozpoznaje nowe obiekty.

Inne szczegóły procesów percepcji, semantycznego rozpoznawania obiektów, uwagi, pamięci semantycznej i sekwencyjnej oraz myślenia można znaleźć w publikacjach [226, 227, 231].

7.4.6. Implementacje ISD

Architektura ISD jest wynikiem dogłębnego modelowania psychologii człowieka (z podwójnym systemem motywacyjnym) i uwzględnia większość aspektów zuniifikowanego standardowego modelu umysłu [261]. Z tego punktu widzenia można ją porównać jedynie z architekturą Soar. Poprawność przyjętych założeń i koncepcji oraz efektywność projektu ISD zostały już częściowo dowiedzione w różnych praktycznych zastosowaniach.

System ISD był implementowany głównie w Pythonie, z wykorzystaniem bibliotek zewnętrznych, takich jak scikit-fuzzy i numpy. Normy rozmyte i inne operatory matematyczne zostały zaprogramowane przy użyciu tablic numpy. W celach demonstracyjnych użyto bibliotek PyQt i matplotlib.

Proste wdrożenie realnego mikrorobota μ – robot pokazało, że ISD może działać jako system autonomiczny [226, 73]. Badanie symulacyjne prototypu agenta xDriver wykazało, że ISD może z łatwością działać jako autonomiczny kierowca samochodu na drodze, wykonując podstawowe zadania bezpieczeństwa i sterowania prędkością [97, 277].

Również inne awatary stworzone w naszych laboratoriach są w stanie wykazać przyjazną dla człowieka użyteczność [87, 233]. Przyjazny dla człowieka aspekt robotów odpowiada również idei rozmytych emocji [398, 201, 53]. W tym kontekście inny opracowany system zawężony tylko do rozpoznawania twarzy [225] okazuje się dobrym kandydatem do kolejnej części architektury ISD.

Koncepcja zbiorów rozmytych wydaje się być najbardziej naturalna do opisu zmiennych stanu (potrzeb i emocji) i pozwala na skuteczną interpretację pomiarów. Lingwistyczna interpretacja tych zmiennych stanu jest absolutnie niezbędna w praktycznej implementacji. Zastosowany mechanizm rozumowania rozmyto-neuronalnego (w kategoriach potrzeb) przeszedł testy funkcjonalne autonomicznego sterownika [97].

7.5. Doświadczenia Politechniki Wrocławskiej (PWr)

Zakres prac badawczych i praktycznych, którymi zajmują się pracownicy Katedry Cybernetyki i Robotyki, mających istotne znaczenie dla autonomii robotów pola walki, obejmuje roboty latające i jeżdżące, w tym szczególnie manipulatory mobilne, czyli manipulatory zamontowane na kołowych platformach jezdnych [108]. Kompetencje zespołu dotyczą projektowania, implementacji oraz wdrożenia układów elektronicznych, w tym systemów wbudowanych, algorytmów sterowania napędami oraz łączenia (fuzji) danych pochodzących z różnych czujników. Jeśli chodzi o techniki analizy otoczenia, to zespół stosuje systemy wizyjne do detekcji i klasyfikacji obiektów, następnie tworzy modele sztucznej inteligencji do analizy obrazu oraz lokalizacji. W tym celu buduje mapy 3D w wysokiej rozdzielczości za pomocą integracji map 3D z wielu robotów [112], z wykorzystaniem klasycznych metod dopasowania cech. W praktyce pozwala to efektywnie mapować pole walki, przy wykorzystaniu deskryptorów i technik dopasowania cech opartych na modelach maszynowego uczenia. Innym wątkiem do budowania autonomii obiektów mobilnych mogłoby być użycie krzywoliniowej parametryzacji nieortogonalnej Serreta-Freneta [318] lub Bishopa, która to technika pozwala na śledzenie przemieszczającego się obiektu, np. za pomocą dalmierza laserowego, oraz użycie sterowania śledzącego obiekt w celu asymptotycznego zbliżenia się do niego.

Kolejnym zagadnieniem, które mogłoby być rozwijane przez pracowników katedry, jest sterowanie i automatyczna synteza systemów wielorobotowych [432], w szczególności do koordynacji ruchu grup robotów mobilnych [433], odpowiednio w przestrzeniach ustrukturyzowanych typu przestrzenie fabryczne/magazynowe oraz w przestrzeniach bez struktury (lasy, kopalnie itp.). Prace trwają nad zbudowaniem choć częściowej autonomii w przypadku jednego lub

wielu robotów, także z niepełną wiedzą o systemie i z uwzględnieniem błędów komunikacji i zaburzeń danych, np. pochodzących z etapu określania lokalizacji.

Katedra Cybernetyki i Robotyki w ostatnich 25 latach była i jest wiodącym ośrodkiem w Polsce w dziedzinie szeroko rozumianej robotyki społecznej. W związku z tym stworzono metody komunikowania się w sposób niewerbalny z robotami, które są wyposażone w model komputerowy umysłu. W takim przypadku istnieje możliwość komunikowania się z autonomicznym obiektem za pomocą kart (zawierających symbole lub znaki) lub ruchów rąk, co jest szczególnie ważne w przypadku konieczności zachowania ciszy w eterze. Aby uniknąć przejęcia robota przez osoby nieautoryzowane, istnieje możliwość nauczania robota identyfikacji osób uprawnionych np. poprzez rozpoznawanie głosu lub rozpoznawanie obrazu (postaci).

ROZDZIAŁ 8

Etyka i prawo związane z użyciem robotów pola walki

8.1. Etyka robotów

Filozofowie zajmują się etyką i moralnością od wieków. Bez wnikania w rozróżnienie tych dwóch terminów można powiedzieć, że odnoszą się one albo do właściwego postępowania albo do bycia dobrym, czyli albo określania, jakie reguły prowadzą do właściwego działania, albo jak jednostka powinna się zachowywać, by można jej życie było uznać za właściwe [8]. To pierwsze podejście wymaga sformułowania zestawu reguł, które zagwarantują właściwe postępowanie. Niestety dotychczas nie udało stworzyć uniwersalnego zestawu nakazów i zakazów, które wszyscy uznaliby za moralne. Skoro nie udało się to w stosunku do ludzi, czemu miałyby się to udać w stosunku do robotów? Problemem jest kontekst. To, co jest słuszne w jednym kontekście, może nie być właściwe w innym, np. skaleczenie kogoś nożem uważamy za naganne, ale jeżeli robi to chirurg, to zmieniamy zdanie. Możemy ocenić skutek zamiast samego czynu, ale pojawia się pytanie, czy wszystkie środki prowadzące do pożądanego celu można uznać za dopuszczalne? Wracając do kwestii dobra, można spojrzeć na moralność z punktu widzenia ogólnego charakteru osoby, a nie słuszności jej poszczególnych czynów. Osobę dążącą do bycia prawą i obdarzoną cnotami można uznać za moralną. Niestety w różnych społecznościach prawość i cnotliwość są różnie rozumiane. Ponieważ raczej nie można liczyć na moralność jednostek, powstają grube kodeksy praw i obowiązków. Można się spodziewać, że w przypadku robotów konieczne będzie stworzenie kodeksów określających ich prawa i obowiązki. Należy zwrócić uwagę, że w przypadku ludzi moralne zachowania wymuszane są przez edukację oraz dezaprobatę społeczną, która np. prowadzi do ostracyzmu. W przypadku robotów byłoby to nieskuteczne. Badania nad moralnością robotów są coraz powszechniejsze, ale koncentrują się głównie na formułowaniu zestawu problemów do rozważenia. Zestaw taki sformułował George Bekey [35], który zaproponował rozważenie następujących dylematów:

- Jeżeli robot-kompan może wejść do dowolnego pomieszczenia w mieszkaniu, np. by wspomóc osobę niepełnosprawną, to jak zapewnić prywatność mieszkańcom?
- Jak robot ma rozpoznać polecenie prowadzące do nieetycznych zachowania, takiego jak kradzież?
- Jakie prawa i obowiązki powinny mieć roboty?
- Jak roboty powinny reagować na emocjonalne zachowania ludzi, np. złość?
- Jak roboty powinny reagować na jednoczesne polecenia od różnych domowników?
- Jak zapobiegać wysyłaniu intymnych zdjęć zrobionych kamerą robota do osób trzecich?
- Jak reagować na szkody wyrządzone przez robota?

Oczywiście to tylko przykład problemów – lista nie jest w żadnym przypadku zamknięta i z pewnością będzie dużo dłuższa. Należy zwrócić uwagę, że jest to lista dla robotów-kompanów, a co z robotami do użytku militarnego? W tej dyskusji skupiono się na problemie relacji między ludźmi a robotami, natomiast pominięto zasady zachowania między samymi robotami, które też są ważne.

Naukowcy zadają sobie pytanie, co to znaczy, że robot jest dobry [491, 510]? Chociaż być może istotniejsze pytanie brzmi, jak skonstruować dobrego robota? Autorzy [510] zwracają uwagę na wieloznaczność tego pojęcia. Ich zdaniem, a trudno się z nim nie zgodzić, jako dobrego robota można uznać urządzenie, które:

- funkcjonuje poprawnie, a więc wykonuje czynności, do których jest przeznaczone, funkcjonuje odpowiednio długo i nie wymaga nadmiernych zabiegów konserwacyjnych,
- jest moralnie dobre, więc jego zachowanie oraz konsekwencje jego czynów są przynajmniej akceptowalne dla społeczeństwa,
- nie krzywdzi, nie obraża i nie wzbudza lęku w ludziach.

Z praktycznego punktu widzenia nawet dobry robot nie jest w stanie „rozumieć”, w ludzkim słowa tego znaczeniu, czego od niego oczekujemy, ale ważne jest, aby jego działania realizowały nasze żądania [356]. Z technicznego punktu widzenia istotne jest, aby robot w zalewie informacji, która jest dostępna, np. na stronach WWW, był w stanie wyselekcjonować niezbędne minimum danych do podejmowania decyzji w czasie rzeczywistym. Chodzi o zdolność wyczuwania kontekstu, w którym działa robot oraz o ciągłe doskonalenie jego umiejętności poprzez zdobywanie nowej wiedzy. W przypadku pełnej autonomii dobry robot powinien przewidywać, czego się od niego oczekuje, bez wydawania mu szczegółowych poleceń. Obecna technologia daje nadzieję na spełnienie tych oczekiwań w niedalekiej przyszłości. Generalnie uwzględnienie moralności w systemie sterowania robotem jest niezwykle trudne z powodu wątpliwości, co do wyborów moralnych, którymi miałby kierować się taki robot.

Jak pokazano w [134] na podstawie wielu przykładów, w których dobre intencje prawodawców doprowadziły do tragicznych konsekwencji, lepiej jest brać pod uwagę jakość niż dobroć robotów. W tym celu warto zastosować trzy kryteria oceny prakseologicznej, dotyczącej teorii sprawnego działania:

- etykę, czyli stopień przestrzegania norm etycznych,
- efektywność, czyli jak dobrze służy celowi, do którego został przeznaczony,
- sprawność, czyli stosunek uzyskanych wyników do wykorzystanych zasobów.

Sam autor [134] przyznaje jednak, że kryteria te nie są jednoznacznie określone, ale niewątpliwie ułatwiają dyskusję. Co więcej, w zależności od funkcji oceniającego, kryteria te mogą być różnie interpretowane i oceniane. Inaczej robota ocenia dyrektor przedsiębiorstwa produkującego roboty, inaczej prezes korporacji używających tych produktów, jeszcze inaczej indywidualni użytkownicy, a zupełnie inaczej osoby postronne, zwłaszcza te, które będą doświadczać skutków działania robota.

By określić uniwersalne zasady moralne, przeprowadzono ciekawy eksperyment, wykorzystujący internetową ankietę na temat moralnych preferencji ludzi [28]. Na MIT stworzono platformę nazwaną Moral Machine, dzięki której zebrano 40 milionów odpowiedzi na pytania dotyczące dylematów moralnych. Respondenci z 233 krajów i terytoriów odpowiadali na pytania dotyczące podejmowania decyzji w sytuacjach ekstremalnych, takich jak wybór ofiary w przypadku nieuchronnego wypadku. W szczególności pytano, czy respondenci wolą by zginęła kobieta czy mężczyzna, osoba młodsza czy starsza, więcej czy mniej osób, ludzie o wyższym czy niższym statusie społecznym, a ponadto badano zachowania w przypadku osoby przechodzącej przez „zebrę” bądź poza nią. Decyzje dotyczyły zagrożenia dla osób zarówno w samochodzie, jak i na zewnątrz. Analiza danych potwierdziła, że statystycznie ludzie raczej wolą ratować: życie innych ludzi niż zwierząt, więcej ludzkich istnień niż mniej, dzieci niż dorosłych. Co ciekawe, respondenci azjatyccy znacznie rzadziej chcieli oszczędzać osoby młode niż starsze, co pokazuje, że różnice kulturowe też mają wpływ na podejmowanie skrajnych decyzji. Członkowie społeczności indywidualistycznych reagują inaczej niż społeczeństw kolektywnych. Respondenci z krajów, w których prawo nie jest rygorystycznie przestrzegane, nie zwracali dużej uwagi na to, czy ofiara była na pasach, czy przechodziła w niedozwolonym miejscu.

Dokument [495] zwraca uwagę, że zalecenia prawa nie zawsze są etyczne (np. niewolnictwo było prawnie dopuszczalne jeszcze w XIX w., czy apartheid w Południowej Afryce pod koniec XX w.). Dlatego tworząc i użytkując systemy autonomiczne należy się kierować nie tylko prawem, ale także etyką. Analizę etyczną projektowania i wykorzystania systemów autonomicznych należy przeprowadzać biorąc pod uwagę cztery kryteria: skutki potencjalnej awarii, konsekwencje niewłaściwego użycia, niezamierzone skutki uboczne oraz uzyskane korzyści. Teoria Sprawiedliwej Wojny [1] głosi, że atakować można tylko tych, którzy biorą udział w konflikcie. Z tej zasady wynika zatem, że cywile nie powinni być dotknięci działaniami wojennymi. Niestety jest to pogląd dość idealistyczny, niemający odzwierciedlenia w praktyce. Istnieją jednak uzasadnione wątpliwości, czy algorytm sterujący urządzeniem będzie w stanie ocenić, czy stopień szkód ubocznych jest dopuszczalny. Ponadto występuje problem przypisania winy w przypadku awarii systemu autonomicznego. Jeśli zostanie wyrządzona szkoda, kto za nią ponosi odpowiedzialność: projektant, operator czy dowódca? Ponadto, czy nadać maszynom prawo do obrony własnej i czy w takim samym stopniu jak ludziom? Należy także wziąć pod uwagę, że systemy autonomiczne mogą być wykorzystywane do działań nielegalnych. Zmniejszone ryzyko dla osób korzystających z takich systemów może zachęcać je do popełniania takich czynów. Kontrolę nad takimi systemami mogą przejąć cyberprzestępcy lub inne wrogie siły (z nieobliczalnymi konsekwencjami). Zastosowanie systemów autonomicznych zmieni postawę żołnierza, ponieważ odwaga i honor stracą swoje dotychczasowe znaczenie, a żołnierz będzie mógł wykonywać swoje zadania „zza biurka”, zamiast bezpośrednio narażać swoje życie.

Oczywiście należy się spodziewać, że dobrze zaprojektowane systemy autonomiczne będą miały wbudowane hamulce etyczne, które pozwolą im w sposób bardziej precyzyjny niż żołnierze zaangażowani w działania wojenne odróżnić

uczestników konfliktu od tych, którzy w nim nie uczestniczą. Determinizm oraz odporność na zmęczenie powinny skutkować mniejszą skłonnością do podejmowania nieracjonalnych decyzji. Obecnie państwa nie są skłonne wysyłać swych żołnierzy do stref konfliktów, które ich nie dotyczą, nawet jeśli dochodzi tam do ludobójstwa. Użycie systemów autonomicznych zmniejsza ryzyko interwencji humanitarnych. Należy również wziąć pod uwagę, że wiele zadań, które nie wiążą się z użyciem siły, można wykonać autonomicznie, zmniejszając ryzyko ponoszone przez ludzi zaangażowanych w niebezpieczne operacje. Autonomiczne roboty uczestniczące w misjach poszukiwawczo-ratowniczych mogą nawiązać kontakt z przedstawicielami innych grup etnicznych łatwiej niż ludzie, dzięki automatycznym translatorom i odpowiednim interfejsom głosowym. Ważna jest bowiem efektywna komunikacja z osobami, którym niesie się pomoc, oraz przyjazny wygląd.

Powyższe ogólne rozważania miały na celu wskazanie bogactwa problemów związanych z etyką robotów. Sprawa staje się jeszcze bardziej skomplikowana, gdy weźmiemy pod uwagę roboty o przeznaczeniu militarnym. Chociaż niektórzy naukowcy mają wątpliwości, czy w ogóle takie urządzenia powinny być przedmiotem rozważań naukowych. Warto wziąć pod uwagę ich wątpliwości, ale należy również zwrócić uwagę, na następujących pięć kwestii.

- Szefowie Organizacji Narodów Zjednoczonych i Międzynarodowego Czerwonego Krzyża obawiając się, że użycie robotów bojowych obniży próg eskalacji konfliktów poprzez dehumanizację użycia siły, w 2023 r. wezwali światowych przywódców do opracowania odpowiednich wytycznych dotyczących stosowania autonomicznych broni¹. Wszakże dotychczasowe długotrwałe obrady dotyczące tej kwestii zaowocowały jedynie opracowaniem standardu promującego znaczącą kontrolę człowieka nad wszystkimi krytycznymi funkcjami (niezależnie od korzyści płynących z automatyzacji) oraz zobowiązaniem do dalszej pracy nad tym zagadnieniem². Z tego wynika, że prace nad autonomią będą kontynuowane, ale ostateczna decyzja o użyciu śmiertelnej broni zostanie pozostawiona człowiekowi. Naturalna bezwładność charakterystyczna dla każdego wojska zyskuje tutaj dodatkowy argument, aby się powstrzymać od wprowadzania systemów autonomicznych. Niemniej jednak autonomia jest potrzebna w niewielkim stopniu do bezpośrednich działań na polu walki, a w dużym stopniu do pozyskiwania informacji o sytuacji panującej na terenie działań zbrojnych. Zatem ten aspekt powinien być podkreślany podczas przekonywania o korzyściach płynących z używania systemów autonomicznych.
- Jest bardzo prawdopodobne, że najwięksi gracze na arenie międzynarodowej wyprodukują swoje autonomiczne roboty, po czym zostaną podpisane umowy dyplomatyczne. Może skończy się, jak z użyciem broni chemicznej: jeżeli druga strona jej nie użyje, my również powstrzymamy się od tego, niemniej jednak jest ona potrzebna jako element odstraszania, i to działa

¹ <https://www.un.org/sg/en/content/sg/note-correspondents/2023-10-05/note-correspondents-joint-call-the-united-nations-secretary-general-and-the-president-of-the-international-committee-of-the-red-cross-for-states-establish-new>

² <https://documents.un.org/doc/undoc/ltd/n23/302/66/pdf/n2330266.pdf>

od zakończenia I Wojny Światowej. Na marginesie warto zauważyć, że zestrzelenie autonomicznego drona szpiegowskiego, gdy zostanie strącony przez przeciwnika, nie powoduje takich samych reperkusji dyplomatycznych, jak zestrzelenie samolotu załogowego. Potwierdzeniem tego jest notatka PAP z 14 marca 2023 r.: „Rosyjski myśliwiec Su-27 przechwycił i uderzył w amerykańskiego drona MQ-9 Reaper w międzynarodowej przestrzeni powietrznej nad Morzem Czarnym, powodując jego runięcie i zniszczenie – podało we wtorek Dowództwo Europejskie USA (EUCOM). Rzecznik Departamentu Stanu Ned Price oznajmił, że resort wezwał rosyjskiego ambasadora w USA, by przekazać mu «silne obiekcje» dotyczące niebezpiecznych manewrów rosyjskich samolotów, które spowodowały strącenie amerykańskiego bezzałogowca”. Na tym się cała sprawa skończyła.

- Czy bardziej etyczne jest wysłanie robota, który ma unicestwić wroga, czy wysłanie tam człowieka, który ma zrobić to samo, ale sam będzie narażony na śmierć? Jako społeczeństwo utrzymujemy armię ludzi, których zadaniem jest walka z potencjalnym agresorem, przy jednoczesnym narażeniu swego życia. Czy etyczne jest żądanie od ludzi, by ryzykowali swoje życie i zdrowie? Czy etyczne jest wymaganie od takich ludzi, by sami zabijali innych? Dobrze byłoby powołać w Polsce organ, który zająłby się profesjonalnym rozstrzygnięciem tych problemów. Oczywiście w jego skład powinni wchodzić etycy, wojskowi, prawnicy i inżynierowie.
- Zadaniem polityków jest ustalenie, czy nie inwestować w tę technologię i wysyłać ludzi przeciwko robotom, czy też lepiej mieć roboty zdolne do walki z urządzeniami przeciwnika. Podjęcie takiej decyzji powinno być wysoce racjonalne. Ponadto, jeżeli nie będziemy pracować nad autonomią robotów, nie będziemy wiedzieć, jak działają, a zatem nie będziemy w stanie się przed nimi bronić. Oczywiście, brak prac nad techniką wojskową w kraju nie oznacza, że Polska takich robotów będzie pozbawiona. Będziemy po prostu musieli je importować, płacąc za nie fortunę, co zuboży państwo i nie pozostawi żadnego know how w kraju. Czy jest to racjonalne działanie? Na marginesie można tu dodać, że zarówno policja, jak i wojsko używa zwierząt do realizacji misji bojowych. W szczególności psy są powszechnie szkolone do walki z napastnikiem, tymczasem pełna kontrola nad psem, który walczy z człowiekiem, nawet jeśli ten pies jest dobrze wyszkolony, jest dość iluzoryczna. Niemniej jednak w tym przypadku nie są podnoszone żadne zastrzeżenia etyczne.
- Istotą tego problemu politycznego jest to, kto i jak ma zamierza użyć tej broni. W państwach demokratycznych taką decyzję podejmuje społeczeństwo, wybierając swoje władze. Niestety, graniczymy z państwami, które nie są demokratyczne, a władzę tam sprawują autokraci o średniowiecznej mentalności. Rezygnując ze środków odstraszania, narażamy się na działania potencjalnego agresora.

Mając na względzie powyższe zastrzeżenia Departament Obrony Stanów Zjednoczonych wydał dokument dotyczący zasad bezpieczeństwa, którymi należy się kierować przy projektowaniu i użytkowaniu systemów bezzałogowych [368]. Bezpieczeństwo odnosi się tam do zapobiegania sytuacjom, które mogą spowo-

dować śmierć, obrażenia, chorobę zawodową, uszkodzenie lub utratę sprzętu lub mienia albo szkodę dla środowiska. Opracowanie to koncentruje się na: analizie głównych problemów związanych z bezpieczeństwem maszyn bezzałogowych (UxS) oraz ocenie stanu wiedzy w zakresie sztucznej inteligencji (AI) i zdolności autonomicznych, które, jeśli są odpowiednio zintegrowane, mogą spowodować osiągnięcie odpowiedniego poziomu: autonomii, interakcji człowieka z maszyną oraz dowodzenia i sterowania. W wyniku analizy problemu stworzono trzy zestawy zasad:

- dotyczących bezpieczeństwa oprogramowania – wytyczne dotyczące takiego zarządzania cyklem życia oprogramowania, by bezpieczeństwo jego działania było zawsze zagwarantowane,
- dotyczących bezpieczeństwa operacyjnego – określające bezpieczne działanie systemu poprzez wskazanie, jakich zasad należy przestrzegać podczas użytkowania systemu,
- formułujących wytyczne dotyczące projektowania systemów bezzałogowych, które mają na celu zwiększenie bezpieczeństwa systemu i zminimalizowanie ewentualnych zagrożeń; mają one na celu wpływanie na konkretne rozwiązania projektowe, ale nie dyktowanie ich.

Wspomniane zasady są stosowane poprzez przeprowadzenie szczegółowej analizy, czy konkretny tryb pracy projektowanego/użytkowanego systemu jest bezpieczny w danym jego stanie. Przykładowo, stan „broń załadowana” i tryb „transport robota” stanowią niebezpieczną parę, ale ten sam stan z trybem „walka” są traktowane jako bezpieczne, oczywiście nie dla przeciwnika.

Ponadto istnieje strona WWW³ przedstawiająca wątpliwości związane z budową maszyn, które będą samodzielnie decydować o życiu lub śmierci ludzi. Opisywane są tam również możliwości najnowszych wojskowych systemów autonomicznych. W pracy [495] zalecono, aby rządy państw NATO prowadziły otwartą dyskusję ze swymi społeczeństwami, precyzyjnie informując o zaletach i potencjalnych ryzykach wynikających ze stosowania broni autonomicznej. Dyskusje te powinny opierać się na rzetelnej wiedzy, aby w ich wyniku można było podjąć racjonalne decyzje.

8.2. Aspekty prawne

Ankieta opracowana w MIT pokazuje ludzkie preferencje etyczne. Nie podważając jej wyników, autorzy podkreślają jednak, że przy opracowywaniu algorytmów sterujących samochodami autonomicznymi, ostateczną decyzję powinni podejmować eksperci w dziedzinie etyki. Co więcej, sytuacje na drodze muszą być wiele bardziej niuansowane niż binarne decyzje przedstawione w ankiecie. W każdym razie, jeśli roboty mają współistnieć z ludźmi, muszą stosować te same zasady moralne, aby być przewidywalnymi i akceptowalnymi dla ludzi. A skoro tak, to można spekulować, że te superinteligentne roboty będą miały wbudowane zasady moralne, które są zgodne z trzema prawami robotyki sformułowa-

³ <https://autonomousweapons.org/>

nymi w 1942 roku przez Isaaca Asimova w opowiadaniu „Zabawa w berka” („Runaround” [25]):

- Robot nie może skrzywdzić człowieka, ani poprzez zaniechanie działania dopuścić, aby stała mu się krzywda.
- Robot musi wykonywać rozkazy wydawane mu przez ludzi, chyba że są sprzeczne z Prawem Pierwszym.
- Robot musi chronić swoje istnienie, chyba że takie postępowanie byłoby sprzeczne z Prawem Pierwszym lub Drugim.

W [134] Prawa Robotyki sformułowane przez Asimova zostały poddane znaczącej krytyce, której podstawą jest stwierdzenie, że wywodzą się one z myślenia życzeniowego. Co miałyby powstrzymać trend konstruowania robotów, takich jak wojskowe, w celu walki z ludźmi? Nie ma też żadnej instytucji, która mogłaby egzekwować zakaz produkcji groźnych robotów. Jeśli jednak założymy, że robot ma być posłuszny człowiekowi, pytanie brzmi – któremu? W jaki sposób robot ma odróżnić osoby działające w dobrej wierze od tych działających w złej wierze? Dalej, czy roboty będą działały w interesie autorytarnej władzy, czy w interesie społeczeństwa? Zachowanie robotów zależy oczywiście od ich projektantów, ale czy oni są w stanie przewidzieć wszystkie możliwości? Czy zatem roboty powstrzymają się od eksterminacji rodzaju ludzkiego? Raczej nikt przy zdrowych zmysłach nie będzie chciał zaprogramować w robocie imperatywu niszczenia ludzkości. Nawet przy założeniu złej woli, roboty z takim potencjałem nie powstaną z dnia na dzień. Ludzkość zgodziła się na moratoria na testowanie i użycie broni jądrowej. Dotychczas były one przestrzegane, ale czy nadal tak będzie? Z pozytywnego punktu widzenia można założyć, że podobne umowy mogą zostać stworzone dla zrobotyzowanej broni. Ogólnie rzecz ujmując, widać wyraźnie, że jest to problem polityczny i prawny do rozwiązania na wysokim szczeblu. Podsumowując, Prawa Asimova można krytykować, wszakże każde ustanowione prawo jest łamane. Więzienia są pełne tych, którzy nie przestrzegają prawa. Nikt jednak nie sugeruje, abyśmy w związku z tym spalili kodeksy. Raczej dążymy do doskonalenia prawa. W przypadku robotów najprawdopodobniej czeka nas dokładnie taka sama droga.

Pomimo wątpliwości, co do tego, co powinien zawierać kodeks moralnego postępowania robota, trwają prace nad metodami wbudowywania hamulców moralnych w systemy nimi sterujące, a także formalizacją tego zagadnienia [23]. Ponieważ mówimy o militarnych zastosowaniach robotów, dobrym punktem wyjścia są regulaminy armii USA i sił ONZ, które są zbiorczo znane pod nazwą Rules of Engagement – ROE. Mają one na celu zapewnienie, że:

- nałożono ograniczenia na przestrzeń bodźców, które mogą skutkować działaniami powodującymi śmierć,
- sprawdzono, czy reakcja nie niesie ze sobą groźnych skutków i jeśli tak, czy jest etyczna,
- wykrycie nieetycznego zachowania powoduje jego unieważnienie lub zastąpienie działaniem akceptowalnym,
- dla czynności, która niesie ze sobą ryzyko śmierci musi istnieć w ROE specjalne polecenie jej wykonania,

- reakcja robota musi być proporcjonalna do zagrożenia i wykluczać niszczenie cywili.

Można się spodziewać [23], że żołnierz-robot będzie się zachowywał na polu walki bardziej etycznie niż żołnierz-człowiek. Patrząc na to, jak zachowują się niektóre armie, może to być postęp w etyce prowadzenia walki.

Niezmiernie ważne pytanie brzmi, kto ponosi odpowiedzialność za działania robota? Na przykład, samochód autonomiczny poziomu 5 SAE uczestniczy w wypadku, a policja orzeka, że wina leży po jego stronie. Czy za zdarzenie odpowiada samochód, właściciel, pasażer czy producent samochodu? A jeśli wszyscy, to w jakim stopniu i w jaki sposób? Na te i podobne pytania trzeba odpowiedzieć zanim roboty staną się powszechne. To zadanie ewidentnie należy do prawników.

Dokument [495] dotyczący systemów autonomicznych został opracowany przez Kwaterę Główną NATO, w ramach Wielonarodowej Kampanii Na Rzecz Rozwoju Zdolności (Multinational Capability Development Campaign – MCDC, 2013-2014), prowadzonej pod auspicjami Naczelnego Dowódcy Sił Sojuszniczych NATO ds. Transformacji (HQ SACT). Zawarte w nim wytyczne mają na celu ułatwienie planowania i przygotowania do projektowania, zakupu i eksploatacji systemów o zdolnościach autonomicznych, poprzez skupienie się na kluczowych kwestiach prawnych, etycznych oraz wojskowych związanych z uzbrojonymi systemami autonomicznymi. Ponadto dokument ten przedstawia wytyczne dla przyszłych badań i rozwoju zdolności autonomicznych. Wnioski dotyczące aspektów prawnych są następujące:

- Prawo międzynarodowe nie zabrania ani nie ogranicza delegowania decyzji, które normalnie podejmowane są przez wojskowych, do systemów autonomicznych, pod warunkiem że systemy te są wykorzystywane w pełnej zgodności z obowiązującym prawem międzynarodowym.
- Państwa są zobowiązane do oceny pozyskiwanej technologii wojskowej pod kątem zgodności z prawem międzynarodowym, a w szczególności z zasadami Prawa Konfliktów Zbrojnych (Law of Armed Conflict), tj. zapewnienia, że używana broń będzie się stosowała do zasad: rozróżniania, zachowania ostrożności i proporcjonalnej reakcji, oraz przestrzegania Praw Człowieka (International Human Rights Law). Duże zaniepokojenie budzi fakt, że taka broń może nie być w stanie odróżnić celów wojskowych od obiektów chronionych.
- Autorzy [495], na podstawie analizy dokumentów, doszli do wniosku, że zasady prawa międzynarodowego w sposób wystarczający określają zarówno odpowiedzialność państw, jak i indywidualną odpowiedzialność karaną za skutki szkodliwych działań będących wynikiem stosowania systemów autonomicznych.

Należy zauważyć, że fundamentalny dokument [495] wyraźnie odróżnia Prawo Konfliktów Zbrojnych od praw człowieka, które powinny być stosowane przez siły porządkowe. Pierwsze z tych praw zezwala na niszczenie obiektów i ludzi na podstawie oceny ich statusu w konflikcie, natomiast drugie zezwala na użycie siły wyłącznie na podstawie oceny zachowania się osoby branej na cel. Zatem roboty wojskowe muszą reagować inaczej niż roboty używane przez siły porządkowe.

Systemy autonomiczne muszą być również w stanie określić, czy mniej drastyczne środki wyczerpano. W tak złożonej sytuacji przydatna może być sugestia, że system autonomiczny powinien przechowywać dane o swych działaniach, jak czarna skrzynka w samolotach, na podstawie których będzie można zweryfikować, czy jego działania były zgodnie z prawem (międzynarodowym).

ROZDZIAŁ 9

Proponowane działania

W Polsce istnieje wystarczająco rozwinięte zaplecze zarówno badawcze jak i przemysłowe, aby stworzyć dla naszych sił zbrojnych odpowiedni sprzęt o możliwościach odstraszających potencjalnych agresorów. Nowoczesny sprzęt oraz lokalna zdolność do jego produkcji i szybkiego zastępowania w razie otwartego konfliktu uczynią nasze wojsko i społeczeństwo zdolnym do sprostania zmasowanemu i długotrwałemu atakowi. Należy się przygotować do konfliktu podobnego do tego, z którym mamy do czynienia obecnie w Ukrainie. Niniejsze opracowanie wskazuje, że istnieją w kraju instytucje naukowe, wdrożeniowe i produkcyjne zdolne do wytworzenia takiego sprzętu. Wszakże opracowanie to nie jest kompletne. Zarysowuje ono jedynie sytuację globalną i na tym tle wskazuje niektóre ośrodki badawcze posiadające odpowiednią wiedzę i doświadczenie, aby rozwinąć niezbędne zdolności. Opracowanie to powinno być rozwinięte i pogłębione. Takie prace wymagają koordynacji instytucjonalnej.

W związku z tym proponuje się powołanie do życia Centrum Zastosowań Sztucznej Inteligencji w Automatyce i Robotyce¹, związanego organizacyjnie z istniejącym i mającym doświadczenie w robotyce instytutem Sieci Badawczej Łukasiewicz. Najlepiej do tego przygotowanym instytutem jest Sieć Badawcza Łukasiewicz – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP. Centrum zamawiałoby na uczelniach i w instytutach badawczych opracowanie niezbędnych technologii, samodzielnie przekształcało wyniki uzyskane w trakcie badań na gotowe i przetestowane prototypy i dalej przekazywałoby je do produkcji przez polski przemysł, zarówno państwowy jak i prywatny. W tej drugiej sytuacji państwo nadal byłoby właścicielem technologii, natomiast podmiot prywatny produkowałby sprzęt sprzedając go siłom zbrojnym. Można też rozważyć propozycję opisaną w [446], wzorowaną na rozwiązaniach amerykańskich, gdzie fabryki broni powstają za pieniądze państwowe, ale są zarządzane przez podmioty prywatne. Centrum bezpośrednio współpracowałoby z Ministerstwem Obrony Narodowej i wskazanymi przez nie podmiotami wojskowymi, wskazującymi pożądane kierunki rozwoju uzbrojenia. Dotychczasowe doświadczenie pokazuje, że bezpośrednia współpraca wojska z uczelniami oraz firm produkcyjnych z uczelniami jest trudna. Instytucje badawcze są w stanie opracowywać technologie na niskich poziomach TRL (TRL 4-5), natomiast zarówno wojsko jak i przemysł oczekują technologii na wyższych poziomach rozwoju (TRL-9). Postulowane Centrum stanowiłoby brakujące ogniwo pośrednie w tym łańcuchu. Odpowiadałoby między innymi za takie działania jak:

- Harmonizacja działań Centrum z APAS (Action Plan on Autonomous Systems) [122],

¹ Alternatywne nazwy: Centrum Rozwoju Autonomicznych Robotów (CRAR), Centrum Autonomicznych Robotów / Center for Autonomous Robots (CAR), Centrum Systemów Autonomicznych (CSA).

- Przeprowadzenie rozmów z interesariuszami (ministerstwa, wojsko, przemysł, instytucje badawcze etc.) – wskazanie pożądanych rodzajów i własności autonomicznych robotów pola walki,
- Określenie we współpracy z MON i wojskiem rodzajów i pożądanych cech autonomicznych robotów pola walki. Tu należy skorzystać z istniejących bądź stworzyć nowe koncepcje użycia (CONOPsy – Concept of Operations) wraz ze scenariuszami wykorzystania systemów opisanych z punktu widzenia ich użytkownika,
- Opracowanie miar spełnienia wymagań, co ułatwi weryfikację i walidację opracowywanych systemów,
- Przeprowadzenie całościowej inwentaryzacji technologii rozwijanych zagranicą, niezbędnych do budowy autonomicznych robotów pola walki,
- Przeprowadzenie całościowej inwentaryzacji prowadzonych w kraju badań niezbędnych do budowy autonomicznych robotów pola walki,
- Określenie luk technologicznych,
- Wypracowanie zasad etycznych i regulacji prawnych dotyczących autonomicznych robotów pola walki (Lethal Autonomous Weapon Systems – LAWS) – to powinno być zgodne z zaleceniami sformułowanymi w APAS,
- Stworzenie przez Centrum we współpracy z MON mapy drogowej prowadzącej do stworzenia pożądanych autonomicznych robotów pola walki,
- Zlecenie ośrodkom badawczym przeprowadzenie badań i opracowanie technologii, które są niezbędne do wdrożenia produkcji krajowych robotów pola walki,
- Przekształcenie wyników badań w prototypy przygotowane do produkcji. Wymaga to dostosowania i integracji pozyskanych technologii, tak aby powstały prototypy. Prototypy musiałyby przejść pozytywnie testy poligonowe i zostać zaakceptowane przez wojsko, co wymaga odpowiednich procedur,
- Zorganizowanie produkcji sprzętu opracowanego przez Centrum i przekazania go wojsku,
- Zorganizowanie systemu zarządzania cyklem życia dostarczonego wojsku sprzętu.

Propozycja powołania do życia Centrum nie jest oryginalna. Kraje, które dysponują nowoczesnymi armiami utworzyły takie centra już wcześniej:

- W Stanach Zjednoczonych powołano Joint Artificial Intelligence Center (JAIC), które obecnie weszło w skład Chief Digital and Artificial Intelligence Office² (CDAO). CDAO jest odpowiedzialne za przyspieszenie wdrażania przez Departament Obrony (DoD) procesu wdrażania sprzętu: zbierania wysokiej jakości danych, szybkich i precyzyjnych analiz oraz wykorzystania sztucznej inteligencji w procesie decyzyjnym, od wstępnego planowania aż do wykorzystania na polu walki, aby w konsekwencji uzyskać przewagę decyzyjną. Biuro podkreśla, że sztuczna inteligencja musi być wykorzystywana w sposób etyczny (Responsible AI).

² <https://www.ai.mil/>

- W Zjednoczonym Królestwie powstało UK's Defence Artificial Intelligence Centre³ (DAIC). Jego zadaniem jest współpraca z rządem, przemysłem, środowiskiem akademickim i państwami sojusznymi na rzecz uzyskania strategicznej przewagi brytyjskich sił zbrojnych. Ma działać jako wizjonerskie centrum, przyspieszające spójne zrozumienie, rozwój i wykorzystanie możliwości sztucznej inteligencji. W tym celu ma szybko opracowywać, realizować i dostosowywać projekty w zakresie sztucznej inteligencji, które powinny generować przełomowe osiągnięcia prowadzące do przewagi strategicznej.

Prócz zadań badawczych i wdrożeniowych proponowane Centrum mogłoby pełnić rolę szkoleniową dla personelu wojskowego. Żołnierze muszą mieć zaufanie do sprzętu, którym się posługują, a tym bardziej do takiego, z którym współdziałają, jako z partnerami. Takie zaufanie wynika z wiedzy o sposobie działania robotów autonomicznych. Wiedza ta umożliwia przewidywanie ich działań i reakcji na polu walki. Żołnierze muszą być odpowiednio przeszkoleni by nabrać zaufania do takiego sprzętu i sprawnie z nim współdziałać. W ramach szkolenia trzeba będzie żołnierzom przekazać niezbędne wiadomości z zakresu technologii wykorzystywanych przez roboty autonomiczne. Centrum mogłoby pełnić rolę ośrodka szkoleniowego w tym zakresie.

Należy podkreślić, że większość technologii tworzonych dla potrzeb autonomicznych robotów bojowych jest podwójnego zastosowania. Te same technologie mogą być wykorzystane w robotach przeznaczonych do realizacji zadań cywilnych. Tak więc, działania te doprowadzą do, z jednej strony, wzmocnienia potencjału obronnego kraju, a z drugiej strony, zwiększenia konkurencyjności gospodarki narodowej. Co więcej, postuluje się standaryzację, która powinna prowadzić do wykorzystania pewnych podzespołów i algorytmów w wielu typach robotów, co w konsekwencji spowoduje redukcję kosztów produkcji tego sprzętu.

Zazwyczaj wyznaczenie technologii krytycznych dla danego zastosowania stanowi duży problem, szczególnie jeżeli się to usiłuje robić bez prowadzenia prac nad konkretnymi systemami. Wszakże Łukasiewicz – PIAP ma duże doświadczenie w tym względzie. Co więcej uczestniczył w 2015 r. w projekcie realizowanym dla EDA [498], który miał za zadanie wskazać luki technologiczne i technologie krytyczne związane z projektowaniem i wytwarzaniem bezzałogowych pojazdów lądowych (BPL). Wtedy wskazano następujące obszary zainteresowania:

- sztuczna inteligencja,
- systemy sterowania,
- sensory, dedykowane platformom bezzałogowym działającym w trudnych warunkach środowiskowych, umożliwiające autonomiczną detekcję, klasyfikację i identyfikację poszukiwanych obiektów,
- fuzja danych z różnych źródeł,
- systemy obrazowania wizyjnego umożliwiającego zwiększenie percepcji operatora, systemy skanowania 3D, systemy wizyjne oparte na kamerach ToF,

³ <https://www.gov.uk/government/groups/defence-artificial-intelligence-centre>

- efekторы, a w szczególności manipulatory, dedykowane platformom bezzałogowym działającym w trudnych warunkach środowiskowych, umożliwiającym autonomiczne/zdalne wykonywanie czynności, zgodnie z opracowanym scenariuszem zdefiniowanym przez użytkownika,
- wysokowydajne układy zasilania i napędu,
- nowoczesne materiały,
- konstrukcje mechaniczne robotów mobilnych, w tym technologie układów jezdnych (lub innych) o wysokiej mobilności,
- intuicyjne w obsłudze interfejsy człowiek-maszyna,
- systemy transmisji danych zwiększające zasięg łączności, szybkość transmisji, odporność na zakłócenia, możliwość pracy wielu urządzeń w jednym obszarze, sieci łączności ad-hoc,
- nawigacja,
- manipulacja, w tym sterowanie haptyczne, tj. wykorzystujące siłowe sprzężenie zwrotne pozwalające na odczuwanie sił i momentów sił interakcji manipulatora z otoczeniem.

W dokumencie [498] stworzono macierz łączącą 58 zidentyfikowanych luk technologicznych z odpowiednimi wymaganiami operacyjnymi, czyli krokami, które należy podjąć, by lukę zmniejszyć albo całkiem zlikwidować. Wymagania operacyjne zawierały następujące informacje:

- nazwę akcji/operacji,
- opis akcji,
- uzasadnienie, czemu należy tę akcję podjąć,
- kto powinien zrealizować akcję,
- priorytet akcji (niski, normalny, wysoki),
- faza rozwoju BPL, w której należy podjąć akcję,
- powiązane typy BPL lub powiązane zdolności operacyjne.

Na tej podstawie zbudowano wykresy Gantta wskazujące kiedy poszczególne akcje powinny być podjęte. W szczególności wskazywały kiedy poszczególne poziomy gotowości technologicznej (TRL) powinny zostać osiągnięte. Wykresy te przedstawiają prognozę kończąc ją na poziomie TRL- 7. Ponieważ były to wskazówki przeznaczone dla wszystkich krajów Unii Europejskiej, należałoby sprawdzić, na ile te rekomendacje zostały spełnione w UE. Jeżeli nie osiągnięto wtedy wskazywanych celów, to należałoby sprawdzić, co było tego przyczyną i czy można to narzędzie wykorzystać w działaniach APAS.

Oczywiście od 2015 r. wiele się zmieniło, jeżeli chodzi o rozwój technologii w wymienionych obszarach. W związku z tym należałoby przeprowadzić kolejny przegląd, aby uaktualnić ówczesne dane. Ponadto należałoby rozszerzyć zakres tamtego raportu o inne rodzaje robotów autonomicznych. Co więcej, mając dwa przeglądy w odstępie około 10 lat, można by się pokusić o określenie tempa zmian technologicznych, a to umożliwi predykcję ich stanu za kolejne kilka lat. Wskazanie luk technologicznych w połączeniu z przeglądem możliwości instytucji badawczych w Polsce powinno doprowadzić do wskazania najbardziej kompetentnych zespołów, które w najkrótszym czasie uzupełnią zidentyfikowane braki.

Procedura prowadząca do opracowania autonomicznych robotów różnych rodzajów powinna obejmować następujące działania.

- Definicję zestawu misji (zadania, które ma realizować robot – definiując misje należy wziąć pod uwagę aspekty etyczne i prawne).
- Określenie technologii, które są niezbędne do stworzenia robota realizującego wybrane misje.
- Określenie miar spełnienia wymagań przez poszczególne technologie.
- Wskazanie tych technologii, które nie są wystarczająco dojrzałe (określenie luk technologicznych).
- Wskazanie zespołów badawczych, które mogą udoskonalić niedojrzałe technologie.
- Sprawdzenie w testach poligonowych, czy osiągnięto wystarczającą dojrzałość technologii odnosząc się do wcześniej zdefiniowanych miar.
- Integracja technologii z robotem.
- Testowanie robota w warunkach poligonowych, sprawdzając czy realizuje misje (scenariusze), które mu przypisano, biorąc pod uwagę aspekty etyczne i prawne.
- Przekazanie do produkcji prototypu wraz z odpowiednią dokumentacją.

W rozdziale 6 przedstawiono niektóre z kluczowych technologii niezbędnych do stworzenia autonomicznych robotów pola walki, natomiast w rozdziale 7 wskazano przykładowe rozwiązania polskie. Ponieważ oba rozdziały nie obrazują całości zagadnienia, należy je uzupełnić, realizując powyższe działania. W pracach prowadzonych w ramach APAS [122] podkreśla się, że bliskość i ścisłe powiązania między sektorem gospodarczym, akademickim i obronnym, a także prężny sektor prywatny, który poświęca się rozwijaniu nowych i przełomowych technologii, takich jak sztuczna inteligencja, to istotne czynniki, które są kluczem do sukcesu w opracowaniu i wdrożeniu systemów autonomicznych (na marginesie, zapewne także innych systemów). Jako kraje, które ostatnio zintensyfikowały rozwój własnych autonomicznych systemów wymieniono: Stany Zjednoczone, Chiny, Rosję i Ukrainę. Polska, ze względu na swoje położenie geopolityczne, też powinna stworzyć warunki do powstania prężnego przemysłu wytwarzającego systemy autonomiczne. Katalizatorem takiego procesu mogłoby być utworzenie postulowanego Centrum.

ROZDZIAŁ 10

Podsumowanie

Wnioski z przeprowadzonej analizy są następujące:

- Roboty autonomiczne, a w szczególności te przeznaczone do wykorzystania na polu walki, są urządzeniami niezmiernie złożonymi, wymagającymi do ich konstrukcji bardzo wielu zaawansowanych technologii. Część z nich przedstawiono w tym opracowaniu.
- Obserwacja konfliktu w Ukrainie i na Bliskim Wschodzie wskazuje, że pole walki będzie w coraz większym stopniu należało do autonomicznych robotów. Szybki rozwój tego typu robotów w Stanach Zjednoczonych, Chinach i wielu innych krajach wzmacnia to twierdzenie.
- Analiza jawnych materiałów na temat robotów pola walki wskazuje, że względnie łatwo jest znaleźć dane konstrukcyjne oraz osiągi tych maszyn. Natomiast bardzo trudno jest tą drogą uzyskać informacje na temat stopnia autonomii tych urządzeń oraz sposobu ich działania lub używanych metod komunikacji z nimi. Te informacje są skrzętnie skrywane.
- Oznacza to, że trzeba polegać na badaniach własnych, aby wiedzieć jak te maszyny działają, a w konsekwencji jak się przed nimi bronić.
- Wyraźny jest trend do zastępowania żołnierzy przez maszyny.
- Przebieg wojny w Ukrainie pokazuje, że ilość sprzętu traconego jest tak duża, że nie można polegać jedynie na imporcie – trzeba produkować w kraju i to tanio i dużo.
- Pomimo że przeprowadzone rozpoznanie stanu wiedzy w Polsce na temat robotów autonomicznych było jedynie częściowe, to wyraźnie wskazuje, że krajowy potencjał badawczy jest wystarczający, by wytworzyć prototypy tych urządzeń. Potencjał produkcyjny też istnieje. Wszakże, aby przekroczyć tzw. „dolinę śmierci”, usytuowaną między prototypem a produktem nadającym się do wykorzystania przez wojsko, potrzebny jest odpowiedni pośrednik. Zaproponowano wykorzystanie do tego celu jednego z instytutów Sieci Badawczej Łukasiewicz, a konkretnie Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów PIAP, który ma duże doświadczenie w projektowaniu, wytwarzaniu i sprzedaży robotów specjalnego przeznaczenia. Jednocześnie instytut ten ma doskonałe relacje zarówno z instytucjami badawczymi jak i przemysłem. Powołanie w nim Centrum zajmującego się automacją robotów pola walki byłoby ze wszech miar korzystne.
- Utworzone Centrum stanowiłoby forum wymiany informacji pomiędzy wszystkimi interesariuszami: ministerstwami, wojskiem, instytucjami badawczymi i przemysłem.
- Proponowane Centrum mogłoby pełnić rolę szkoleniową dla żołnierzy, przekazując im niezbędną wiedzę z zakresu technologii wykorzystywanych przez roboty autonomiczne, by mogli oni przewidywać ich działania i reakcje na polu walki.

- Proponowana integracja działań przyspieszy osiągnięcie postawionych przez wojsko celów, dzięki synergii i koncentracji wysiłku. Oczywiście trzeba zapewnić odpowiednie fundusze na realizację tego przedsięwzięcia.
- Dobrze uzbrojone i wyszkolone siły zbrojne oraz wysokie zdolności produkcyjne stanowią istotny czynnik odstraszający agresorów. Ważne jest także przygotowanie społeczeństwa do długotrwałej obrony. Jeżeli będą spełnione te warunki, to wtedy można także liczyć na sojuszników, ale oni muszą mieć czas, by zareagować.
- Przy konstrukcji oraz wykorzystaniu autonomicznych robotów istotne jest uwzględnienie zasad etyki i wymogów prawa międzynarodowego dotyczącego konfliktów zbrojnych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J.B. Elshtain, redaktor, Just War Theory. NYU Press, 1992.
- [2] Chiny prezentują największy na świecie bezzałogowy okręt wojenny. Transito e metro, 18 listopada 2024.
- [3] Dorobek i perspektywy branży produkcji półprzewodników w Polsce. Raport portalu tek.info.pl, 2024.
- [4] New chip from One Silicon Chip Photonics to assist drone navigation. Electronic Products and Technology, June 5, 2024.
- [5] Przełom w ukraińskiej armii. Pierwszy taki atak. Wydarzenia.interia.pl, 21 grudnia 2024.
- [6] Ukraine deploys over 30 British robot dogs in Donbas combat. The New Voice of Ukraine, August 14, 2024.
- [7] A. Abidali, S. Agha, A. Munjiza, M. Shaheed. Development of a solar powered multicopter micro aerial vehicle. Scientific Reports, 14, March 2024.
- [8] K. Abney. Robotics, Ethical Theory, and Metaethics: A Guide for the Perplexed. P. Lin, K. Abney, G. Bekey, redaktorzy, Robot Ethics: The Ethical and Social Implications of Robotics, strony 35-52. MIT Press, 2011.
- [9] E. Ackerman. Sarcos Demonstrates Powered Exosuit That Gives Workers Super Strength. It won't make you look like Iron Man but the Guardian XO allows you to lift 200 pounds without breaking a sweat. IEEE Spectrum, December 10, 2019.
- [10] E. Ackerman. Drones with Legs Can Walk, Hop, and Jump into the Air – Birds use their legs for all kinds of clever things, and now drones can too. IEEE Spectrum, December 24, 2024.
- [11] E. Ackerman. Boston Dynamics and Toyota Research Team Up on Robots. The partnership will bring Atlas useful new skills. IEEE Spectrum, January 2025.
- [12] A. Afifi, T. Belvedere, A. Pupa, P. Giordano, A. Franchi. Safe and robust planning for uncertain robots: A closed-loop state sensitivity approach. IEEE Robotics and Automation Letters, 9(11):9962-9969, 2024.
- [13] I. Akyildiz, M. Vuran. Wireless Sensor Networks. John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, UK, 2010.
- [14] E. Alcalá, V. Puig, J. Quevedo, U. Rosolia. Autonomous racing using linear parameter varying-model predictive control (LPV-MPC). Control Engineering Practice, 95:104270, 2020.
- [15] G. Alex. Sequence Transduction with Recurrent Neural Networks, 2012.

- [16] K. Alexis, G. Nikolakopoulos, A. Tzes. Switching model predictive attitude control for a quadrotor helicopter subject to atmospheric disturbances. *Control Engineering Practice*, 19:1195-1207, 2011.
- [17] M. Aljehani, M. Inoue. Performance evaluation of multi-UAV system in post-disaster application: Validated by HITL Simulator. *IEEE Access*, 7:64386-64400, 2019.
- [18] F. AlMahamid, K. Grolinger. Autonomous unmanned aerial vehicle navigation using reinforcement learning: A systematic review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 115:105321, 2022.
- [19] X. An, R. Ziebold, C. Lass. From rtk to ppp-rtk: towards real-time kinematic precise point positioning to support autonomous driving of inland waterway vessels. *GPS Solutions*, 27(1):86, 2023.
- [20] M. Anschober, R. Edlinger, R. Froschauer, A. Nuchter. Inverse kinematics of an anthropomorphic 6R robot manipulator based on a simple geometric approach for embedded systems. *Robotics*, 12(4):101, 2023.
- [21] J. Arabas. *Wykłady z algorytmów ewolucyjnych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2001.
- [22] M. Arahali, M. Berenguel, E. Camacho. Neural identification applied to predictive control of a solar plant. *Control Engineering Practice*, 6:333-344, 1998.
- [23] R. Arkin. *Governing Lethal Behavior in Autonomous Robots*. CRC Press, 2009.
- [24] F. Ascione, N. Bianco, C. De Stasio, G. Mauro, G. Vanoli. Simulation-based model predictive control by the multi-objective optimization of building energy performance and thermal comfort. *Energy and Buildings*, 111:131-144, 2016.
- [25] I. Asimov. Runaround. *Astounding science fiction*, 29(1):94-103, 1942.
- [26] A. Assandri, C. de Prada, A. Rueda, J. Luis Martinez/. Nonlinear parametric predictive temperature control of a distillation column. *Control Engineering Practice*, 21:1795-1806, 2013.
- [27] S. Aurangzeb, M. Aleem, M. Khan, H. Anwar, M. Siddique. Cybersecurity for autonomous vehicles against malware attacks in smart-cities. *Cluster Computing*, 27(3):3363-3378, Jun 2024.
- [28] E. Awad, S. Dsouza, R. Kim, J. Schulz, J. Henrich, A. Shariff, J-F. Bonnefon, I. Rahwan. The moral machine experiment. *Nature*, strona 1476—4687, October 2018.
- [29] D. Bahdanau, Cho K.-H, Y. Bengio. Neural machine translation by jointly learning to align and translate, 2016.
- [30] C. Baker, C. Fillmore, J. Lowe. The Berkeley FrameNet project. 36th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and 17th International Conference on Computational Linguistics, Volume 1, strony

86-90, Montreal, Quebec, Canada, Sierpień 1998. Association for Computational Linguistics.

- [31] T. Bakker, K. van Asselt, J. Bontsema, J. Muller, G. van Straten. Autonomous navigation using a robot platform in a sugar beet field. *Biosystems Engineering*, 109(4):357-368, 2011.
- [32] J. Balcerak, P. Pawłowski, A. Koniec/ka, A. Dąbrowski. Detection of defective products using stereovision. *2019 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)*, strony 313-318, 2019.
- [33] P. Bartkowiak, R. Patelski, M. Kwiatkowska, D. Pa/derski. System Architecture for Development and Supervision of Robotic Astronomical Telescope. *Pomiary Automatyka Robotyka*, (4):43-51, 2022.
- [34] S. Basagni, M. Conti, S. Giordano, I. Stojmenovic. *Mobile Ad Hoc Networking: Cutting Edge Directions*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2013.
- [35] G. Bekey. *Current Trends in Robotics: Technology and Ethics*. P. Lin, K. Abney, G. Bekey, redaktor/y, *Robot Ethics: The Ethical and Social Implications of Robotics*, strony 35-52. MIT Press, 2011.
- [36] T. Bellemans, B. De Schutter, B. De Moor. Model predictive control for ramp metering of motorway traffic: A case study. *Control Engineering Practice*, 14:757-767, 2006.
- [37] D. Belter. Informed guided rapidly-exploring random trees-connect for path planning of walking robots. *2022 17th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, strony 709-714, 2022.
- [38] D. Belter, P. Łabecki, P. Fankhauser, R. Siegwart. Rgb-d terrain perception and dense mapping for legged robots. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 26(1):81-97, 2016.
- [39] D. Belter, P. Łabecki, P. Skrzypczyński. Estimating terrain elevation maps from sparse and uncertain multi-sensor data. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, strony 715-722, Guangzhou, 2012.
- [40] D. Belter, P. Labecki, P. Skrzypczyński. Adaptive motion planning for autonomous rough terrain traversal with a walking robot. *J. Field Robotics*, 33:337-370, 2016.
- [41] D. Belter, P. Skrzypczyński. Rough terrain mapping and classification for foothold selection in a walking robot. *Journal of Field Robotics*, 28(4):497-528, 2011.
- [42] D. Belter, J. Wietrzykowski, P. Skrzypczyński. Employing natural terrain semantics in motion planning for a multi-legged robot. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 93(3-4):337-370, 2016.
- [43] Y. Bengio, R. Ducharme, P. Vincent. A neural probabilistic language model. *Proceedings of the 13th International Conference on Neural Infor-*

mation Processing Systems, NIPS'00, strony 893–899, Cambridge, MA, USA, 2000. MIT Press.

- [44] G. Bernacchi. Kratos Flight-Tests New 'Thanatos' Combat Drone: Report. The Defense Post, December 18, 2024.
- [45] G. Bieszczad, K. Sawicki, S. Gogler, A. Ligienza, M. Mścichowski. Kamera termowizyjna wspomagająca nawigację pojazdów uav. *Pomiary Automatyka Robotyka*, 25(3):43–50, 2021.
- [46] L. Blain. Chinese police trial amphibious crime-fighting robot sphere. New Atlas, December 15, 2024.
- [47] E. Blanco, C. de Prada, S. Cristea, J. Casas. Nonlinear predictive control in the lhc accelerator. *Control Engineering Practice*, 17:1136-1147, 2009.
- [48] L. Blinde. DoD issues needs statement to counter UxS threat. *Intelligence Community News*, April 2023.
- [49] D.G. Bobrow, A. Collins. Representation and Understanding: Studies in Cognitive Science. Academic Press, Inc., 1975.
- [50] J. Bodner, iin. The da Vinci robotic system for general surgical applications: a critical interim appraisal. *Swiss Medical Weekly*, 135:674-748, 2005.
- [51] N. Boguspayev, D. Akhmedov, A. Raskaliyev, A. Kim, A. Sukhenko. A comprehensive review of gnss/ins integration techniques for land and air vehicle applications. *Applied Sciences*, 13(8), 2023.
- [52] E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz. Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems. Oxford University Press, New York, Oxford, 1999.
- [53] A. Bonarini. Can my robotic home cleaner be happy? Issues about emotional expression in non-bio-inspired robots. *Adaptive Behavior*, 24(5):335–349, 2016.
- [54] A. Botta, P. Cavallone, L. Baglieri, G. Colucci, L. Tagliavini, G. Quaglia. A review of robots, perception, and tasks in precision agriculture. *Applied Mechanics*, 3(3):830-854, 2022.
- [55] C. Breazeal. Emotion and sociable humanoid robots. *International Journal of Human- Computer Studies*, 59:119-155, 07 2003.
- [56] T. Briscoe, i in. A formalism and environment for the development of a large grammar of english. *Proceedings of the 10th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, wolumen 2, strony 703-708. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1987.
- [57] R. Brooks. A robot that walks; emergent behaviors from a carefully evolved network. *Robotics and Automation*, number 1091 serii International Conference, strony 692-696, Scottsdale, A., 1989. MIT AI Lab.
- [58] R. Brooks. Intelligence without reason. *Artificial intelligence: critical concepts*, 3:107-163, 1991.

- [59] R. Brooks. Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, 47(1-3):139-159, January 1991.
- [60] R. Brooks. New approaches to robotics. *Science*, 253:1227–1232, September 1991.
- [61] P. Brown, V. Della Pietra, P. deSouza, J. Lai, R. Mercer. Class-based n-gram models of natural language. *Computational Linguistics*, 18(4):467-480, 1992.
- [62] J. Bruner. *Beyond the information given: Studies in the psychology of knowing*. W.W. Norton & Company Incorporated, New York, 1973.
- [63] M. Budzisz. Strategia Rzeczypospolitej w nowej epoce rywalizacji mocarstw. Jak uzbroić Polskę? Odstraszenie, Armia, Przemysł, Odporność Państwa, strony 9-13. Instytut Sobieskiego, 2024.
- [64] M. Budzisz, T. Pawłuszko, F. Seredyński, M. Stachowski, T. Szatkowski. Jak uzbroić Polskę? Odstraszenie, armia, przemysł, odporność państwa. Instytut Sobieskiego, 2024.
- [65] A. Bugeja. Robot Wars. *Artificial Intelligence and the New Age of Warfare*. Traffikoo, 2024.
- [66] A. Bęben. Mechaniczny pies BAD One wspomże rozminowanie Ukrainy. AI na froncie przyda się. Portal Obronny, 11 Sierpnia 2024.
- [67] Y. Cai, X. Tan. Weakly supervised human body detection under arbitrary poses. 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), strony 599-603, 2016.
- [68] E. Camacho, C. Bordons. *Model Predictive Control*. Springer, London, 2007.
- [69] C. Campos, R. Elvira, J. J. G. Rodríguez, J. M. M. Montiel, J. D. Tardós. Orb-slam3: An accurate open-source library for visual, visual-inertial, and multimap slam. *IEEE Transactions on Robotics*, 37(6):1874-1890, 2021.
- [70] Z. Cao, T. Simon, S. Wei, Y. Sheikh. Realtime Multi-person 2D Pose Estimation Using Part Affinity Fields. 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), strony 1302-1310, 2017.
- [71] R. Carmona, H. Sung, Y. Kim, H. Vazquez. Stable PID control for mobile robots. 2018 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), Singapore, strony 1891-1896, 2018.
- [72] L. Castaneda, L. Guzman-Vargas, I. Chairez, A. Luviano-Juarez. Output based bilateral adaptive control of partially known robotic systems. *Control Engineering Practice*, 98:104362, 2020.
- [73] A. Castro-Gonzalez, M. Malfaz, J. Gorostiza, M. Salichs. Learning behaviors by an autonomous social robot with motivations. *Cybernetics and Systems*, 45(7):568–598, 2014.

- [74] K. Cetnarowicz. Inteligencja wokół nas. Współdziałanie agentów softwa-
reowych, robotów, inteligentnych urządzeń, wolumen 15, rozdział I M-
agent, strony 137-167. EXIT, 2010.
- [75] P. Chaber, P. Domański, P. Marusak, R. Nebeluk, D. Seredyński, K. Za-
rzycki, C. Zieliński. On the simplification of the internal nonlinear robot
models for the MPC-based visual servoing. *Nonlinear Dynamics*,
112:13047–13071, 2024.
- [76] P. Chaber, M. Ławryńczuk. Fast analytical model predictive controllers
and their implementation for STM32 ARM microcontroller. *IEEE Transac-
tions on Industrial Informatics*, 15:4580-4590, 2019.
- [77] A. Chahe, C. Wang, A. Jeyapratap, K. Xu, L. Zhou. Dynamic adversarial
attacks on autonomous driving systems, 2024.
- [78] L. Chang, X. Niu, T. Liu, J. Tang, C. Qian. Gnss/ins/lidar-slam integrated
navigation system based on graph optimization. *Remote Sensing*,
11(9):1009, 2019.
- [79] Y. Chang, Y. Cheng, U. Manzoor, C. Murray. A review of uav autonomous
navigation in gps-denied environments. *Robotics and Autonomous Sys-
tems*, 170:104533, 2023.
- [80] C. Chen, Y. He, F. Gu, C. Bu, J. Han. A real-time relative probabilistic
mapping algorithm for high-speed off-road autonomous driving. *Proceed-
ings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Sys-
tems (IROS)*, 2015.
- [81] Y. Chen, C. Hu, J. Wang. Human-centered trajectory tracking control for
autonomous vehicles with driver cut-in behavior prediction. *IEEE Trans-
actions on Vehicular Technology*, 68:8461-8471, 2019.
- [82] A. Chiella, H. Machado, B. Teixeira, G. Pereira. Gnss/lidar-based naviga-
tion of an aerial robot in sparse forests. *Sensors*, 19(19):4061, 2019.
- [83] N. Chomsky. Syntactic structures. Mouton and Co., 1957.
- [84] J. Chorowski, D. Bahdanau, D. Serdyuk, K. Cho, Y. Bengio. Attention-
based models for speech recognition. C. Cortes, N. Lawrence, D. Lee,
M. Sugiyama, R. Garnett, redaktorzy, *Advances in Neural Information
Processing Systems*, wolumen 28. Curran Associates, Inc., 2015.
- [85] P. Christofides, R. Scattolini, D. Munoz de la Pena, J. Liu. Distributed
model predictive control: A tutorial review and future research directions.
Computers & Chemical Engineering, 51:21-41, 2013.
- [86] T. Chudzyński. Unikatowy dron z Politechniki Gdańskiej ma być wykorzy-
stywany przez Siły Zbrojne RP. *Dziennik Bałtycki*, 18 listopada 2024.
- [87] A. Chybiński. Lingubot – presentation avatar with verbal communication.
MSc Thesis (supervised by Z. Kowalczyk), Gdańsk University of Technol-
ogy, ETI, 2012.
- [88] B. Clark. Ukraine’s Sea Drones Revise Naval Warfare. *IEEE Spectrum*,
61(10):28-33, October 2024.

- [89] D. Clarke, C. Mohtadi, P. Tuffs. Generalized predictive control-Part I. The basic algorithm. *Automatica*, 23:137-148, 1987.
- [90] T. Collier, C. Taylor. Self-organization in sensor networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 64(4):866-873, 2004.
- [91] B. Cooper. Driving on the surface of mars using the rover control workstation. *Proc. Int. Conf. Space Operations, SpaceOps'98*, June 1-5 1998.
- [92] P. Corke. *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms In MATLAB*. Springer, Cham, 2017.
- [93] M. Cormier, A. Clepe, A. Specker, J. Beyerer. Where are we with human pose estimation in real-world surveillance? 2022 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision Workshops (WACVW), strony 591-601, 2022.
- [94] C. Cutler, B. Ramaker. Dynamie matrix control-a Computer control algorithm. *Proceedings of the AIChE National Meeting*, Houston, Texas, USA, 1979.
- [95] K. Ćwian, M. R. Nowicki, P. Skrzypczyński. Gnss-augmented lidar slam for accurate vehicle localization in large scale urban environments. 17th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), 2022.
- [96] A. Czajka, W. Kasprzak, Wilkowski A. Verification of iris image authenticity using fragile watermarking. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 64(4):807-819, 2016.
- [97] M. Czubenko, Z. Kowalczuk, A. Ordys. Autonomous driver based on intelligent system of decision-making. *Cognitive Computation*, 7(5):569-581, 2015.
- [98] G. Dahl, D. Yu, L. Deng, A. Acero. Context-dependent pre-trained deep neural networks for large-vocabulary speech recognition. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 20(1):30-42, 2012.
- [99] D. Danks. Adversarial attacks on ai systems in military contexts. *IEEE Spectrum*, 2020.
- [100] D. Davidson, H. Wu, R. Jellinek, V. Singh, T. Ristenpart. Controlling UAVs with sensor input spoofing attacks. 10th USENIX Workshop on Offensive Technologies (WOOT 16), Austin, TX, Sierpie/n 2016. USENIX Association.
- [101] C. Dawson, S. Gao, C. Fan. Safe control with learned certificates: A survey of neural lyapunov, barrier, and contraction methods for robotics and control. *IEEE Transactions on Robotics*, 39(3):1749-1767, 2023.
- [102] Immediate Office of the Secretary of Defense Department of Defence. Counter Multi-Domain Uncrewed Systems: Counter-Autonomy/Counter-Artificial Intelligence Needs Statement, 2023.

- [103] Office of the Under Secretary of Defense (Acquisition Technology Department of Defence, Washington DC Logistics). Unmanned Systems Integrated Roadmap, FY 2013-2038. Reference Number: 14-S-0553, 2014.
- [104] J. Detsch. America's Next Soldiers Will Be Machines. *Foreign Policy*, April 6, 2024.
- [105] J. Devlin, M. Chang. Open sourcing bert: State-of-the-art pre-training for natural language processing.
- [106] J. Devlin, M. Chang, K. Lee, K. Toutanova. Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding, 2019.
- [107] J. Ding, H. Mei, C. I, H. Zhang, W. Liu. Frontier progress of unmanned aerial vehicles opticalwireless technologies. *Sensors*, 20(19), 2020.
- [108] W. Domski, A. Mazur. Slippage influence in skid-steering platform trajectory tracking quality with unicycle approximation. 24th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, strony 70-75, August 26-29, Międzyzdroje, Poland, 2019.
- [109] L. Dong, S. Xu, B. Xu. Speech-transformer: A no-recurrence sequence-to-sequence model for speech recognition. 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), strony 5884-5888, 2018.
- [110] P. Drews, G. Williams, B. Goldfain, E.A. Theodorou, J.M. Rehg. Aggressive deep driving: Model predictive control with a cnn cost model. *arXiv*, arXiv:1707.05303, 2017.
- [111] D. Driankov, H. Hellendoorn, M. Reinfrank. *An Introduction to Fuzzy Control*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1993.
- [112] M. Drwiega, E. Roszkowska. Multi-robot mapping based on 3d maps integration. *IntechOpen*, redaktor, *Autonomous Mobile Mapping Robots*. 2023.
- [113] H. Duan, Y. Zhao, K. Chen, D. Lin, B. Dai. Revisiting skeleton-based action recognition, 2022.
- [114] D. Duberg, P. Jensfelt. Ufomap: An efficient probabilistic 3d mapping framework that embraces the unknown. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(4):6411-6418, 2020.
- [115] P. Dutta, T. Halder, S. Banerjee, A. Basak, S. Nanda, D. Chakravarty. Analysis of jamming and anti jamming techniques for galileo gnss. *Materials Today: Proceedings*, 58:489-495, 2022.
- [116] V. Dutta, T. Zielinska. Prognosing human activity using actions forecast and structured database. *IEEE Access*, 8:6098-6116, 2020.
- [117] L. Eliot. Large Behavior Models Surpass Large Language Models To Create AI That Walks And Talks. *Forbes*, November 10, 2024.

- [118] M. Ellis, H. Durand, P. D. Christofides. A tutorial review of economic model predictive control methods. *Journal of Process Control*, 24:1156-1178, 2014.
- [119] P.K. Enge. The global positioning system: Signals, measurements, and performance. *International Journal of Wireless Information Networks*, 1:83-105, 1994.
- [120] T. Englert, K. Graichen. Nonlinear model predictive torque control and setpoint computation of induction machines for high performance applications. *Control Engineering Practice*, 99:104415, 2020.
- [121] I. Esfandiyar, K. Ćwian, M. Nowicki, P. Skrzypczyński. Gnss-based driver assistance for charging electric city buses: Implementation and lessons learned from field testing. *Remote Sensing*, 15(11), 2023.
- [122] European Defence Agency. Action Plan on Autonomous Systems. EDA, 2024.
- [123] Komisja Unii Europejskiej. Zalecenie Komisji UE 2023/2113 w sprawie obszarów technologii krytycznych dla bezpieczeństwa gospodarczego UE, na potrzeby pogłębionej oceny ryzyka z udziałem państw członkowskich. *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej*, 2023.
- [124] A. Fagiolini, G. Dini, F. Massa, L. Pallottino, A. Bicchi. Distributed misbehavior monitors for socially organized autonomous systems. *The International Journal of Robotics Research*, 11 2024.
- [125] S. Feng, B. Burchfiel, T. Albina, R. Tedrake. TRI's Robots Learn New Manipulation Skills in an Afternoon. Here's How. *Medium*, September 14, 2023.
- [126] M. Figat, C. Zieliński. Methodology of designing multi-agent robot control systems utilising Hierarchical Petri Nets. 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), strony 3363-3369, May 2019.
- [127] M. Figat, C. Zieliński. Robotic System Specification Methodology Based on Hierarchical Petri Nets. *IEEE Access*, 8:71617-71627, 2020.
- [128] M. Figat, C. Zieliński. Parameterised robotic system meta-model expressed by Hierarchical Petri nets. *Robotics and Autonomous Systems*, 150, April 2022.
- [129] M. Figat, C. Zieliński. Synthesis of robotic system controllers using robotic system specification language. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(2):688-695, 2023.
- [130] M. Figat, C. Zieliński, R. Hexel. FSM based specification of robot control system activities. 2017 11th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo), strony 193–198, July 2017.
- [131] N.V. Findler. *Associative Networks: The Representation and Use of Knowledge by Computers*. Academic Press, Inc., 1979.
- [132] M. Fuentes. What is silicon carbide in the semiconductor industry? *Power Electronics News*, September 23, 2024.

- [133] K. Fujimoto, N. Hamada, W. Kasprzak. Estimation and tracking of fundamental, 2-nd and 3-d harmonic frequencies for spectrogram normalization in speech recognition. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 60(1):71-81, 2012.
- [134] Z. Gackowski. Unorthodox Thoughts about Good Robots Viewed Pragmatically and Praxiologically. K. Tchoń, W. Gasparski, redaktorzy, *A Treatise on Good Robots*, strony 39-53. Transaction Publishers, 2014.
- [135] A. Gallego, G. Merello, M. Berenguel, E. Camacho. Gain-scheduling model predictive control of a Fresnel collector field. *Control Engineering Practice*, 82:1-13, 2019.
- [136] Y. Ganin, i in. *Domain-adversarial training of neural networks*, 2016.
- [137] N. Garbarek. Nagle pojawił się na niebie. *Tajemnicza broń Chin. WP Tech*, 4 września 2024.
- [138] C. Garda, D. Prett, M. Morari. Model predictive control: Theory and practice—a survey. *Automatica*, 25:335-348, 1989.
- [139] K. Garg, J. Usevitch, J. Breeden, M. Black, D. Agrawal, H. Parwana, D. Panagou. Advances in the theory of control barrier functions: Addressing practical challenges in safe control synthesis for autonomous and robotic systems. *Annual Reviews in Control*, 57:100945, 2024.
- [140] T. Gawron, M. Michałek. Planning the Waypoint – Following Task for a Unicycle – Like Robot in Cluttered Environments. *Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems – JAMRIS*, 9(1):77-90, 2015.
- [141] T. Gawron, M.M. Michałek. A G3-continuous extend procedure for path planning of mobile robots with limited motion curvature and state constraints. *Applied Sciences*, 8(11):2127-1-2127-15, 2018.
- [142] T. Gawron, M.M. Michałek. The VFO-driven motion planning and feedback control in polygonal worlds for a unicycle with bounded curvature of motion. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 89(1):265-297, 2018.
- [143] E. Geoffrey. Deep belief networks. *Scholarpedia*, 4:5947, 2009.
- [144] A. Giannaros, A. Karras, L. Theodorakopoulos, C. Karras, P. Krnias, N. Schizas, G. Kalogeratos, D. Tsolis. Autonomous vehicles: Sophisticated attacks, safety issues, challenges, open topics, blockchain, and future directions. *Journal of Cybersecurity and Privacy*, 3(3):493-543, 2023.
- [145] J. Glass, E. Weinstein. Speechbuilder: facilitating spoken dialogue system development. *7th European Conference on Speech Communication and Technology (Eurospeech 2001)*, strony 1335-1338, 2001.
- [146] D. Gorni, (del Mar Castilla). An efficient modelling for temperature control of residential buildings. *Building and Environment*, 103:86-98, 2016.
- [147] A. Graves. *Generating sequences with recurrent neural networks*, 2014.
- [148] A. Graves, S. Fernandez, F. Gomez, J. Schmidhuber. Connectionist temporal classification: labelling unsegmented sequence data with recurrent

- neural networks. Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning, ICML '06, strony 369–376, New York, NY, USA, 2006. Association for Computing Machinery.
- [149] A. Graves, G. Wayne, M. Reynolds, i in. Hybrid computing using a neural network with dynamic external memory. *Nature*, 538:471-476, 2016.
 - [150] P. Groves. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. Artech House, 2013.
 - [151] J. Gruber, M. Doll, C. Bordons. Design and experimental validation of a constrained MPC for the air feed of a fuel cell. *Control Engineering Practice*, 17:874-885, 2009.
 - [152] J. Gruber, J. Guzman, F. Rodrigue/, C. Bordons, M. Berenguel, J. Sanchez. Nonlinear MPC based on a volterra series model for greenhouse temperature control using natural ventilation. *Control Engineering Practice*, 19:354-366, 2011.
 - [153] L. Grune, J. Panek. Nonlinear Model Predictive Control: Theory and Algorithms, wolumen 3 serii Communications and Control Engineering. Springer, London, 2007.
 - [154] D. Gryglewski, W. Wojtasiak, E. Kamińska, A. Piotrowska. Characterization of Self-Heating Process in GaN-Based HEMTs. *Electronics*, 9(8), 2020.
 - [155] P. Góral, P. Pawłowski, K. Piniarski, A. Dąbrowski. Multi-Agent Vision System for Supporting Autonomous Orchard Spraying. *Electronics*, (13, 494), 2024.
 - [156] B. Hailegnaw, S. Demchyshyn, C. Putz, i in. Flexible quasi-2D perovskite solar cells with high specific power and improved stability for energy-autonomous drones. *Nature Energy*, 9:677-690, June 2024.
 - [157] E. Hajicova, I. Kruijff-Korbayova, P. Sgall. Prague dependency treebank: Restoration of deletions. V. Matousek, P Mautner, J. Ocelikova, P Sojka, redaktorzy, Text, Speech and Dialogue, strony 44-49, Berlin, Heidelberg, 1999. Springer Berlin Heidelberg.
 - [158] B. Hall. Autonomous weapons systems safety. *Joint Force Quarterly*, 86(3rd Quarter):86-93, 2017.
 - [159] M. Hamad, S. Steinhorst. Security challenges in autonomous systems design, 2023.
 - [160] N. Hamada, W. Kasprzak, P. Przybysz. Auditory scene analysis by time-delay analysis with three microphones. Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012), number 230-1, strony 1-8, 2012.
 - [161] S. Han, S. Liu, L. Ren. Application of human-computer interaction virtual reality technology in urban cultural creative design. *Scientific Reports*, 13, 2023.

- [162] R. Hanson. Economics of the singularity. *IEEE Spectrum*, 45:37-42, June 2008.
- [163] P. Hart, N. Nilsson, B. Raphael. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2):100-107, 1968.
- [164] V. Havlena, J. Findejs. Application of model predictive control to advanced combustion control. *Control Engineering Practice*, 13:671-680, 2005.
- [165] G. He, X. Yuan, Y. Zhuang, H. Hu. An integrated gnss/lidar-slam pose estimation framework for large-scale map building in partially gnss-denied environments. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70:1-9, 2021.
- [166] X. He, T. Zielinska, V. Dutta, T. Matsumaru, R. Sitnik. From seeing to recognising-an extended self-organizing map for human postures identification. *IEEE Robotics and Automation Letters*, PP:1-8, July 2024.
- [167] D. Hebb. *Textbook of psychology*. Philadelphia: Saunders, London, 1958.
- [168] M. Henson. Nonlinear model predictive control: current status and future directions. *Computers & Chemical Engineering*, 23:187-202, 1998.
- [169] W. Henszel. Ukraina ma broń, która pogrąża Rosję. Fakt, 15 stycznia 2025.
- [170] J. Hernandez-Barragan, G. Martinez-Soltero, J. Rios, C. Lopez-Franco, A. Alanis. A metaheuristic optimization approach to solve inverse kinematics of mobile dual-arm robots. *Mathematics*, 10:4135, 2022.
- [171] M. Heutger, M. Kuckelhaus. Unmanned aerial vehicles in logistics.
- [172] A. Hornung, K. Wurm, M. Bennewitz, C. Stachniss, W. Burgard. OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees. *Journal of Field Robotics*, 34:189-206, 2013.
- [173] M. Hose, M. Hussain, F. Mjalli. Control of polystyrene batch reactors using neural network based model predictive control (NNMPC): An experimental investigation. *Control Engineering Practice*, 19:454-467, 2011.
- [174] W.-J. Hsu, T. Spyropoulos, K. Psounis, A. Helmy. Modeling spatial and temporal dependencies of user mobility in wireless mobile networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 17(5):1564-1577, 2009.
- [175] J. Hu, C. Fan, X. Guo, L. Zhou, T. Lam. Self-supervised single-line lidar depth completion. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(11):7320-7327, 2023.
- [176] W.J. Hutchins. The georgetown-ibm experiment demonstrated in january 1954. Machine translation: from real users to research. 6th conference of the Association for Machine Translation in the Americas, AMTA 2004, strony 102-114. Springer Verlag, Berlin, 2004.

- [177] W.J. Hutchins, H.L. Somers. An introduction to machine translation. Academic Press, Inc., 1992.
- [178] B. Huyck, J. De Brabanter, B. De Moor, J. Van Impe, F. Logist. Online model predictive control of industrial processes using low level control hardware: A pilot-scale distillation column case study. *Control Engineering Practice*, 28:34-48, 2014.
- [179] S. Hwang, I. Jang, D. Kim, H. Kim. Safe motion planning and control for mobile robots: A survey. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 22(10):2955-2969, Oct 2024.
- [180] A. Jangral. Multi-gnss assisted navigation for disaster management: A comprehensive review. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 12:5752-5758, 2024.
- [181] M. Janiak, C. Zieliński. Control system architecture for the investigation of motion control algorithms on an example of the mobile platform Rex. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences*, 63(3):667-678, 2015.
- [182] T. Jelinek, L.R. Bahl, R.L. Mercer. Design of a linguistic statistical decoder for the recognition of continuous speech. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 21:250-256, 1975.
- [183] N. Jennings, K. Sycara, M. Wooldridge. A roadmap of agent research and development. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 1(1):7-38, Stycze/n 1998.
- [184] R. Jia, P. Liang. Adversarial examples for evaluating reading comprehension systems. Martha Palmer, Rebecca Hwa, Sebastian Riedel, redaktorzy, *Proceedings of the 2017 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, strony 2021-2031, Copenhagen, Denmark, Wrzesie/n 2017. Association for Computational Linguistics.
- [185] M. Joerger, B Pervan. Autonomous ground vehicle navigation using integrated gps and laser-scanner measurements. *IEEE/ION Position, Location, and Navigation Symposium*, strony 988-997, 2006.
- [186] B. Johnson. *Sekrety Drugiej Wojny Światowej – Wojna mózgów*. Zysk i S-ka, Poznań, 1997.
- [187] K. S. Jones. Natural language processing: A historical review. *Current Issues in Computational Linguistics: In Honour of Don Walker*, strony 3-16. Springer Netherlands, 1994.
- [188] A. Joon, W. Kowalczyk. Computationally effective approximation of integral curves lengths for target assignment of mobile robots moving in task-space with obstacle. 2024 28th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), strony 381-386. IEEEExplore, 2024.

- [189] B.H. Juang, L.R. Rabiner. Automatic speech recognition – a brief history of the technology development. Encyclopedia of Language and Linguistics, number 11, strony 806-819. Elsevier, New York, 2005.
- [190] P. Juraszek. Ukraińcy pokazali „Sea Baby”. To ten dron zaatakował most Krymski. WP Tech, 17 sierpnia 2023.
- [191] P. Juraszek. Antydron po rosyjsku. Może sprawić Ukraińcom problemy. WP Tech, 30 października 2024.
- [192] P. Juraszek. Brytyjczycy pokazali drona podwodnego. Może pilnować podwodnych kabli. WP Tech, 26 listopada 2024.
- [193] P. Juraszek. Skynet już tu jest. Ukraińcy testują broń rodem z Terminatora. WP Tech, 13 września 2024.
- [194] P. Juraszek. Ukraińcy mają już bezzałogowy lotniskowiec. Użyli go do zniszczenia obrony Krymu. WP Tech, 8 stycznia 2025.
- [195] M. Kabała. Układy sensoryczne i wykonawcze w robocie kulistym wspierającym terapię dzieci autystycznych. K. Tchoń, redaktor, Postępy robotyki, Warszawa, 2005. WKŁ.
- [196] N. Kalchbrenner, E. Grefenstette, P. Blunsom. A convolutional neural network for modelling sentences. K. Toutanova, H. Wu, redaktorzy, Proceedings of the 52nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, wolumen 1, strony 655-665, Baltimore, Maryland, June 2014. Association for Computational Linguistics.
- [197] A. Kaleli. Development of the predictive based control of an autonomous engine cooling system for variable engine operating conditions in SI engines: design, modeling and real-time application. Control Engineering Practice, 100:104424, 2020.
- [198] E. Kang, H. Qiao, J. Gao, W. Yang. Neural network-based model predictive tracking control of an uncertain robotic manipulator with input constraints. ISA Transactions, 109:89-101, 2021.
- [199] S. Karaman, E. Frazzoli. Sampling-based algorithms for optimal motion planning. The International Journal of Robotics Research, 30(7):846-894, 2011.
- [200] J. Karwowski, J. Mandziuk, A. Zychowski. Sequential Stackelberg Games with bounded rationality. Applied Soft Computing, 132:109846, 2023.
- [201] C. Karyotis, F. Doctor, R. Iqbal, A. James, V. Chang. A fuzzy computational model of emotion for cloud based sentiment analysis. Information Sciences, 433:448–463, 2018.
- [202] W. Kasprzak, N. Ding, N. Hamada. Relaxing the wdo assumption in blind extraction of speakers from speech mixtures. Journal of Telecommunications and Information Technology, 2010(4):50-58, 2010.
- [203] W. Kasprzak, M. Hryciów. Gender-aware speaker’s emotion recognition based on 1-d and 2-d features. Annals-CSIS, wolumen 35, strony 1011-1015. PTI, 2023.

- [204] W. Kasprzak, i in. Agent-based approach to the design of a multimodal interface for cybersecurity event visualisation control. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, 68(5):1187-1205, 2020.
- [205] W. Kasprzak, B. Jankowski. Light-weight classification of human actions in video with skeleton-based features. *Electronics*, 11(14-2145):1-20, 2022.
- [206] W. Kasprzak, P. Piwowarski. Skeleton-based human activity classification in sparse image sequences. *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 17(3):1-14, 2023.
- [207] W. Kasprzak, M. Stefańczyk, Popiołkiewicz J. The print-scan problem in printed steganography of face images. *CORES 2013, AISC 226*, strony 491-500. Springer International Publishing Switzerland, 2013.
- [208] W. Kasprzak, M. Stefańczyk, A. Wilkowski. Printed steganography applied for the authentication of identity photos in face verification. *2015 IEEE 2nd International Conference on Cybernetics (CYBCONF)*. IEEE Xplore, 2015.
- [209] W. Kasprzak, W. Szyrkiewicz, Ł. Czajka. Rubik's cube reconstruction from single view for service robots. *Machine Graphics & Vision, International Journal*, 16(2/3):451-459, 2006.
- [210] W. Kasprzak, W. Szyrkiewicz, M. Karolczak. Global color image features for discrete selflocalization of an indoor vehicle. *International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns*, 2005.
- [211] W. Kasprzak, W. Szyrkiewicz, M. Stefańczyk, W. Dudek, M. Węgierek, D. Seredyński, M. Figat, C. Zieliński. Agent-based approach to the design of a multimodal interface for cyber-security event visualisation control. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 68(5):1187–1205, 2020.
- [212] W. Kasprzak, A. Wilkowski, K. Czapnik. Hand gesture recognition based on free-form contours and probabilistic inference. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science (AMCS)*, 22(2):437-448, 2012.
- [213] L. Kavraki, P. Svestka, J-C. Latombe, M. Overmars. Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(4):566-580, 1996.
- [214] H. Kazerooni. The berkeley lower extremity exoskeleton. P. Corke, S. Sukkariah, redaktorzy, *Field and Service Robotics*, strony 9-15, Berlin, Heidelberg, 2006. Springer Berlin Heidelberg.
- [215] B. Kerbl, G. Kopanas, T Leimkuhler, G. Drettakis. 3d gaussian splatting for real-time radiance field rendering. *ACM Transactions on Graphics*, 42(4), July 2023.

- [216] P. Kicki, P. Liu, D. Tateo, H. Bou-Ammar, K. Walas, P. Skrzypczyński, J. Peters. Fast kinodynamic planning on the constraint manifold with deep neural networks. *IEEE Transactions on Robotics*, 40:277-297, 2024.
- [217] E. Kielak. Takiej broni do niszczenia dronów jeszcze nie było. Jest przełomowa i „tańsza od ciastek”. *Gazeta.pl*, 24 grudnia 2024.
- [218] S. Kim, T. Hori, S. Watanabe. Joint ctc-attention based end-to-end speech recognition using multi-task learning. 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), strony 4835-4839, 2017.
- [219] Y. Kim. Convolutional neural networks for sentence classification. A. Moschitti, B. Pang, W. Daelemans, redaktorzy, *Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*, strony 1746-1751, Doha, Qatar, 2014. Association for Computational Linguistics.
- [220] R. Kisiel, M. Guziejewicz, A. Taube, M. Kaminski, M. Sochacki. Development of assembly techniques for connection of AlGaIn/GaN/Si chips to DBC substrate. *Circuit World*, 47(2):146-152, 2021.
- [221] KMO. Thanatos, czyli „śmierć”. Potężny dron z USA odbył pierwszy lot. *WP Tech*, 13 grudnia 2024.
- [222] M. Korda, I. Mezić. Linear predictors for nonlinear dynamical systems: Koopman operator meets model predictive control. *Automatica*, 93:149-160, 2018.
- [223] K. Kornuta, C. Zieliński. Robot control system design exemplified by multi-camera visual servoing. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 77(3-4):499-524, 2013.
- [224] T. Kornuta, C. Zieliński, T. Winiarski. A universal architectural pattern and specification method for robot control system design. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, (1), 2020.
- [225] Z. Kowalczyk, P. Chudziak. Identification of emotions based on human facial expressions using a color-space approach. wolumen 635 serii *Advances in Intelligent Systems and Computing*, strony 291—303. Springer IP AG, Cham, 2018.
- [226] Z. Kowalczyk, M. Czubenko. Interactive cognitive-behavioural decision making system. *Artificial Intelligence and Soft Computing Lecture Notes in Computer Science*, wolumen 6114 (II) serii *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, strony 516—523. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2010.
- [227] Z. Kowalczyk, M. Czubenko. Intelligent decision-making system for autonomous robots. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 21(4):621—635, 2011.
- [228] Z. Kowalczyk, M. Czubenko. Cognitive memory for intelligent systems of decision-making, based on human psychology. wolumen 230 serii *Ad-*

vances in Intelligent Systems and Computing, strony 379–389. Springer, Berlin – Heidelberg, 2014.

- [229] Z. Kowalczyk, M. Czubenko. Computational approaches to modeling artificial emotion — an overview of the proposed solutions. *Frontiers in Robotics and AI*, 3(21):1–12, 2016.
- [230] Z. Kowalczyk, M. Czubenko. Emotions embodied in the SVC of an autonomous driver system. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):3744–3749, jul 2017.
- [231] Z. Kowalczyk, M. Czubenko. Cognitive motivations and foundations for building intelligent decision-making systems. *Artificial Intelligence Review*, 56(4):3445-3472, 2023.
- [232] Z. Kowalczyk, M. Czubenko, T. Merta. Interpretation and modeling of emotions in the management of autonomous robots using a control paradigm based on a scheduling variable. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 91:103562, 2020.
- [233] Z. Kowalczyk, J. Klimczak. A system of intelligent navigation through the internet service, controlled by voice. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, 59(7):644–647, 2013.
- [234] W. Kowalczyk. Formation Control and Distributed Goal Assignment for Multi-Agent Non-Holonomic Systems. *Applied Sciences*, 9(7):1311-1-1311-23, 2019.
- [235] W. Kowalczyk. Rapid Navigation Function Control for Two-Wheeled Mobile Robots. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 93(3-4):687-697, 2019.
- [236] W. Kowalczyk, T. Hadas. A comparative analysis of the performance of various gnss positioning concepts dedicated to precision agriculture. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 117:11-20, 2024.
- [237] W. Kowalczyk, A. Joon. Distributed Control for Teams of Non-holonomic Mobile Robots Executing Competitive Tasks. 2023 27th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 22-25 August 2023, Międzyzdroje, Poland, strony 484-489. IEEEExplore, 2023.
- [238] W. Kowalczyk, K. Kozłowski. Formation of two-wheeled mobile robots moving in the task space with static obstacles – numerical verification for bounded controls. 2019 24th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), strony 275-280, 2019.
- [239] W. Kowalczyk, K. Kozłowski. Control of the Differentially-driven Mobile Robot in the Environment with a Non-Convex Star-Shape Obstacle: Simulation and Experiments. *Acta Polytechnica Hungarica*, 13(1):123-135, 2016.
- [240] W. Kowalczyk, K. Kozłowski, M. Michałek. Trajectory tracking control with obstacle avoidance capability for unicycle-like mobile robot. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 60(No 3):537-546, 2012.

- [241] W. Kowalczyk, M. Przybyła, K. Kozłowski. Rapid navigation function control for omnidirectional mobile platform, strony 137-140. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2017.
- [242] W. Kowalczyk, M. Przybyła, K. Kozłowski. Set-point Control of Mobile Robot with Obstacle Detection and Avoidance Using Navigation Function – Experimental Verification. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 85(3-4):539-552, 2017.
- [243] W. Kozaczuk. *W kręgu Enigmy*. Wiedza i Życie, Warszawa, 1986.
- [244] K. Kozłowski, W. Kowalczyk. *Control of Two-wheeled Mobile Robots Moving in Formation*, 2020.
- [245] K. Kozłowski, W. Kowalczyk, B. Krysiak, M. Kielczewski, T. Jedwabny. Modular architecture of the multi-robot system for teleoperation and formation control purposes. 9th International Workshop on Robot Motion and Control RoMoCo 2013 : proceedings, Wąsowo, July 3-5, 2013, strony 19-24. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2013.
- [246] K. Kozłowski, D. Pazderski, B. Krysiak, T. Jedwabny, J. Piasek, S. Kozłowski, S. Brock, D. Janiszewski, K. Nowopolski. High Precision Automated Astronomical Mount, strony 299-315. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, AISC. Springer, 2020.
- [247] K. Kołowski. Zaatakowali Rosję. Nagranie prezentuje potencjał Ukrainy. WP Tech, 22 listopada 2024.
- [248] B. Krysiak, D. Pazderski, S.K. Kozłowski, K. Kozłowski. High Efficiency Direct-drive Mount for Space Surveillance and NEO Applications. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 132(1015):095002-1-095002-16, 2020.
- [249] M. Krzysztoń, E. Niewiadomska-Szynkiewicz. Intelligent mobile wireless network for toxic gas cloud monitoring and tracking. *Sensors*, 21(11), 2021.
- [250] R. Królikowski, M. Kopys, W. Jędruch. Self-organization in multi-agent systems based on examples of modeling economic relationships between agents. *Frontiers in Robotics and AI*, 3(41):1–16, 2016.
- [251] G. Kubera. Ich broń trafi w cele bez potrzeby korzystania z GPS. Niemieckie drony dla Ukrainy. *Business Insider Polska*, 8 grudnia 2024.
- [252] M. Kucharczyk. Bezzałogowe bitwy nad Ukrainą. Drony-myśliwce stają się powszechne. *Gazeta.pl*, 4 września 2024.
- [253] D. Kuchta, D. Gryglewski, W. Wojtasiak. A GaN HEMT Amplifier Design for Phased Array Radars and 5G New Radios. *Micromachines*, 11(4), 2020.
- [254] J.J. Kuffner, S.M. LaValle. RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning. *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, wolumen 2, strony 995-1001 vol.2, 2000.

- [255] R. Kummerle, G. Grisetti, H. Strasdat, K. Konolige, W. Burgard. G2o: A general framework for graph optimization. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), strony 3607-3613, 2011.
- [256] R. Kurzweil. The Age of Intelligent Machines. MIT Press, Cambridge, Mass., 1990.
- [257] R. Kurzweil. The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence. Penguin, New York, 1999.
- [258] R. Kurzweil. The Singularity is Near: When Humans Transcend Biology. Viking, New York, 2005.
- [259] J. Kędzierski, R. Muszynski, C. Zoll, A. Oleksy, M. Frontkiewicz. Emys—emotive head of a social robot. International Journal of Social Robotics, 5:237-249, 2013.
- [260] F. La Via, D. Alquier, F. Giannazzo, T. Kimoto, P. Neudeck, H. Ou, A. Roncaglia, S. Sadow, S. Tudisco. Emerging SiC Applications beyond Power Electronic Devices. Micromachines, 14(6), 2023.
- [261] J. Laird, C. Lebiere, P. Rosenbloom. A standard model of the mind: Toward a common computational framework across artificial intelligence, cognitive science, neuroscience, and robotics. AI Magazine, 38(4):13-26, 2017.
- [262] K. Łakomy, M.M. Michałek. Robust output-feedback VFO-ADR control of underactuated spatial vehicles in the task of following non-parametrized paths. European Journal of Control, 58:258-277, 2021.
- [263] S. LaValle. Rapidly-exploring random trees : a new tool for path planning. The annual research report, 1998.
- [264] S. Lavalley. Planning Algorithms. Cambridge University Press, 2006.
- [265] M. Ławryńczuk. Computationally Efficient Model Predictive Control Algorithms: A Neural Network Approach, wolumen 3 serii Studies in Systems, Decision and Control. Springer, Cham, 2014.
- [266] M. Ławryńczuk. Explicit nonlinear predictive control algorithms with neural approximation. Neurocomputing, 129:570-584, 2014.
- [267] M. Ławryńczuk. Nonlinear state-space predictive control with on-line linearisation and state estimation. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 25:833-847, 2015.
- [268] M. Ławryńczuk. Input convex neural networks in nonlinear predictive control: A multimodel approach. Neurocomputing, 513:273-293, 2022.
- [269] M. Ławryńczuk. Nonlinear Predictive Control Using Wiener Models: Computationally Efficient Approaches for Polynomial and Neural Structures, wolumen 389 serii Studies in Systems, Decision and Control. Springer, Cham, 2022.

- [270] M. Ławryńczuk. Fast training of neural affine models for model predictive control: An explicit solution. IFAC-PapersOnLine, 56:1578-1583, 2023. 22nd IFAC World Congress.
- [271] M. Ławryńczuk. Koopman operator-based multi-model for predictive control. Nonlinear Dynamics, 112:9955-9982, 2024.
- [272] M. Ławryńczuk, P. Marusak, P. Chaber, D. Seredyński. Initialisation of Optimisation Solvers for Nonlinear Model Predictive Control: Classical vs. Hybrid Methods. Energies, 15(7):2483, 2022.
- [273] M. Ławryńczuk, P. Tatjewski. Offset-free state-space nonlinear predictive control for wiener systems. Information Sciences, 511:127-151, 2020.
- [274] Y. LeCun, Y. Bengio, G. Hinton. Deep learning. Nature, 521(7553):436-444, 2015.
- [275] K-F. Lee. On large-vocabulary speaker-independent continuous speech recognition. Speech Communication, 7(4):375-379, 1988. Word Recognition in Large Vocabularies.
- [276] H. Lefevre. The Fiber-Optic Gyroscope. Artech House, 2022.
- [277] B. Li, Z. Shao. Simultaneous dynamic optimization: A trajectory planning method for nonholonomic car-like robots. Advances in Engineering Software, 87:30-42, 2015.
- [278] T. Li, L. Pei, Y. Xiang, iin. P3-loam: Ppp/lidar loosely coupled slam with accurate covariance estimation and robust raim in urban canyon environment. IEEE Sensors Journal, 21(5):6660-6671, March 2021.
- [279] X. Li, H. Wang, S. Li, iin. Gil: a tightly coupled gnss ppp/ins/lidar method for precise vehicle navigation. Satellite Navigation, 2:26, 2021.
- [280] Y. Li, L. Wu, Z. Zhang, J. Dang, B. Zhu, X. Zhang. Sensing Assisted Optical Wireless Communication for UAVs. IEEE Transactions on Vehicular Technology, strony 1-15, 2024.
- [281] R. Lienhart, J. Maydt. An extended set of haar-like features for rapid object detection. International Conference on Image Processing, wolumen 1 serii 2002 International Conference on Image Processing, strona 900, 2002.
- [282] P. Lima, G. Pereira, J. Martensson, B. Wahlberg. Experimental validation of model predictive control stability for autonomous driving. Control Engineering Practice, 81:244-255, 2018.
- [283] P. Lindsay, D. Norman. Human Information Processing: Introduction to Psychology. Academic Press Inc, 1977.
- [284] T. Litman. Autonomous vehicle implementation predictions implications for transport planning. Victoria Transport Policy Institute, November 2018.
- [285] J. Liu, W. Gao, Z. Hu. Optimization-based visual-inertial slam tightly coupled with raw GNSS measurements. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), strony 11612-11618, 2021.

- [286] S. Liu, Y. Sang, H. Jin. Robust model predictive control for stratospheric airships using LPV design. *Control Engineering Practice*, 81:231-243, 2018.
- [287] Y. Liu, B. Ge, H. Abu-Rub, H. Sun, F. Peng, Y. Xue. Model predictive direct power control for active power decoupled single-phase quasi-Z - source inverter. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 12:1550-1559, 2016.
- [288] I. Lopez-Sanchez, J. Moreno-Valenzuela. Pid control of quadrotor UAVs: A survey. *Annual Reviews in Control*, 56:100900, 2023.
- [289] B.P. Lowerre, R. Reddy. The harpy speech understanding system. *Readings in speech recognition*, strony 576-586. Elsevier, 1990.
- [290] T. Luong, R. Socher, C. Manning. Better word representations with recursive neural networks for morphology. J. Hockenmaier, S. Riedel, redaktorzy, *Proceedings of the Seventeenth Conference on Computational Natural Language Learning*, strony 104-113, Sofia, Bulgaria, Sierpień 2013. Association for Computational Linguistics.
- [291] K. Lynch, F. Park. *Modern Robotics Mechanics, Planning, and Control*. Cambridge University Press, 2017.
- [292] M. Łysoń. Myśliwce dostają potężnego sojusznika. Chiny prezentują broń nowej generacji. *Chip*, 18 grudnia 2024.
- [293] M. Łysoń. Topi metal, jak masło. Ukraina wyposażyla drony w broń z piekła rodem. *Chip*, 15 lipca 2024.
- [294] J. López-Higuer. *Handbook of Fibre Optic Sensing Technology*. John Wiley, 2000.
- [295] Jalali. M., A. Khajepour, S. Chen, B. Litkouhi. Integrated stability and traction control for electric vehicles using model predictive control. *Control Engineering Practice*, 54:256-266, 2016.
- [296] D. Maciejasz. Rynek dronów oszalał. *Gazeta Wyborcza*, 30-ty sierpnia 2024.
- [297] J. Maciejowski. *Predictive control with constraints*. Prentice Hall, Harlow, 2002.
- [298] J. Maestre, M. Fernandez, I. Jurado. An application of economic model predictive control to inventory management in hospitals. *Control Engineering Practice*, 71:120-128, 2018.
- [299] D. Maji, S. Nagori, M. Mathew, D. Poddar. Yolo-pose: Enhancing yolo for multi person pose estimation using object keypoint similarity loss, 2022.
- [300] A. Majumdar, R. Tedrake. Funnel libraries for real-time robust feedback motion planning. *The International Journal of Robotics Research*, 36(8):947-982, 2017.
- [301] D. Malyasov. Mysterious uncrewed aircraft spotted in China. *Defence Blog*, 3 września 2024.

- [302] Z. Manchester, S. Kuindersma. Robust direct trajectory optimization using approximate invariant funnels. *Autonomous Robots – Special Issue on Robotics: Science and Systems*, 43(2):375–387, February 2019.
- [303] J. Mandziuk, A. Zychowski. Duel-based Neuroevolutionary Method for Stackelberg Security Games with Boundedly Rational Attacker. *Applied Soft Computing*, 146:110673, 2023.
- [304] I. Mani, M. T. Maybury. *Advances in Automatic Text Summarization*. The MIT Press, 1999.
- [305] Ch.D. Manning, H. Schutze. *Foundations of statistical natural language processing*. MIT press, 1999.
- [306] M. Marcus, G. Kim, M. Marcinkiewicz, i in. The Penn Treebank: Annotating predicate argument structure. *Human Language Technology: Proceedings of a Workshop held at Plainsboro, New Jersey, March 8-11, 1994*, 1994.
- [307] M. Marks, E. Niewiadomska-Szynkiewicz, J. Kołodziej. High performance wireless sensor network localisation system. *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, 17(2):122-133, 2014.
- [308] M. Marks, E. Niewiadomska-Szynkiewicz, J. Kołodziej. An integrated software framework for localization in wireless sensor network. *COMPUTING AND INFORMATICS*, 33(2):369-386, 2014.
- [309] S. Marsella, J. Gratch, P. Petta. Computational models of emotion. *A Blueprint for Affective Computing – A Sourcebook and Manual*, 11(1):21–46, 2010.
- [310] A. Marucci, A. Colantoni, I. Zambon, G. Egidi. Precision farming in hilly areas: The use of network rtk in gnss technology. *Agriculture*, 7(60), 2017.
- [311] P. Marusak. Numerically efficient fuzzy MPC algorithm with advanced generation of prediction—application to a chemical reactor. *Algorithms*, 13:143, 2020.
- [312] P. Marusak. Advanced construction of the dynamic matrix in numerically efficient fuzzy MPC algorithms. *Algorithms*, 14:25, 2021.
- [313] P. Marusak. A numerically efficiency fuzzy MPC algorithm with fast generation of the control signal. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 31:59-71, 2021.
- [314] T. Maruszewski. *Psychology of Cognition*. Gdańskie Wydawnictwo Psychologiczne, Gdańsk, 2001.
- [315] A. Maslow. *Toward a Psychology of Being*. Start Publishing, USA, 2012.
- [316] K. Mathe, L. Busoniu. Vision and control for UAVs: A survey of general methods and of inexpensive platforms for infrastructure inspection. *Sensors*, 15:14887-14916, 2015.

- [317] D. Mayne, J. Rawlings, C. Rao, P. Scokaert. Constrained model predictive control: Stability and optimality. *Automatica*, 36:789-814, 2000.
- [318] A. Mazur, F. Dyba. The non-orthogonal serret-frenet parametrization applied to the path following problem of a manipulator with partially known dynamics. *Archives of Control Sciences*, 33(2):339-370, 2023.
- [319] M. Mazur. *Cybernetics and Character*. PIW, Warszawa, 1976.
- [320] E. McGinnies. Emotionality and perceptual defense. *Psychological Review*, 56(5), sep 1949.
- [321] X. Meng, N. Hatch, A. Lambert, A. Li, N. Wagener, M. Schmittle, J. Lee, W. Yuan, Z. Qiuyu Chen, S. Deng, G. Okopal, D. Fox, B. Boots, A. Shaban. Terrainnet: Visual modeling of complex terrain for high-speed, off-road navigation. K.E. Bekris, K. Hauser, S. Herbert, J. Yu, redaktorzy, *Robotics: Science and Systems XIX*, Daegu, Republic of Korea, July 10-14, 2023, 2023.
- [322] M. Michalek, K. Kozłowski. Vector-field-orientation feedback control method for a differentially driven vehicle. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 18(1):45-65, 2010.
- [323] M.M. Michałek, T. Gawron. Vfo path following control with guarantees of positionally constrained transients for unicycle-like robots with constrained control input. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 89(1):191-210, Jan 2018.
- [324] M.M. Michalek, T. Gawron, M. Nowicki, P. Skrzypczynski. Precise docking at charging stations for large-capacity vehicles: An advanced driver-assistance system for drivers of electric urban buses. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 16(3):57-65, 2021.
- [325] M. Michałek, M. Kiełczewski. Cascaded VFO set-point control for n-trailers with on-axle hitching. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 22(4):1597-1606, 2014.
- [326] M. Michałek, M. Kiełczewski, T. Jedwabny. Kaskadowe sterowanie przegubowym robotem mobilnym w systemie RMP-SW. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Elektronika*, (182, 1):189-198, 2012.
- [327] M. Michałek, K. Kozłowski. Feedback control framework for car-like robots using the unicycle controllers. *Robotica*, 30(4):517-535, 2012.
- [328] M.M. Michałek. A highly scalable path-following controller for N-trailers with off-axle hitching. *Control Engineering Practice*, 29:61-73, 2014.
- [329] M.M. Michałek. Cascade-like modular tracking controller for non-standard n-trailers. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 25(2):619-627, 2017.
- [330] M.M. Michałek. Scalable parametric-identification procedure for kinematics of automated n-trailer vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 73(6):7758-7770, 2024.

- [331] M.M. Michałek, M. Kielczewski. The concept of passive control assistance for docking maneuvers with n-trailer vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(5):2075-2084, 2015.
- [332] M.M. Michałek, B. Patkowski, T. Gawron. Modular kinematic modelling of articulated buses. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(8):8381-8394, 2020.
- [333] M.M. Michałek, D. Pazderski. Forward tracking of complex trajectories with non-standard ntrailers of non-minimum-phase kinematics avoiding a jackknife effect. *International Journal of Control*, 92(11):2547-2560, 2019.
- [334] M.M. Michałek, D. Pazderski. Reconstruction of admissible joint-references from a prescribed output-reference for the non-standard and generalized N-trailers. *European Journal of Control*, 58:60-73, 2021.
- [335] T. Mikolov, K. Chen, G. Corrado, J. Dean. Efficient estimation of word representations in vector space, 2013.
- [336] T. Mikolov, K. Chen, G. Corrado, J. Dean. Efficient estimation of word representations in vector space, 2013.
- [337] T. Mikolov, M. Karafiat, L. Burget, J.H. Cernocky, S. Khudanpur. Recurrent neural network based language model. *Interspeech*, strony 1045-1048, 2010.
- [338] T. Mikolov, M. Karafiat, L. Burget, J. Cernocky, S. Khudanpur. Recurrent neural network based language model. *Interspeech 2010*, strony 1045-1048, 2010.
- [339] T. Mikolov, I. Sutskever, K. Chen, G. Corrado, J. Dean. Distributed representations of words and phrases and their compositionality. *Proceedings of the 26th International Conference on Neural Information Processing Systems – Volume 2, NIPS’13*, strony 3111–3119, Red Hook, NY, USA, 2013. Curran Associates Inc.
- [340] T. Mikolov, I. Sutskever, K. Chen, G. Corrado, J. Dean. Distributed representations of words and phrases and their compositionality, 2013.
- [341] B. Mildenhall, P. Srinivasan, M. Tancik, J. Barron, R. Ramamoorthi, R. Ng. NeRF: Representing scenes as neural radiance fields for view synthesis. A. Vedaldi, H. Bischof, T. Brox, J-M. Frahm, redaktorzy, *Computer Vision – ECCV 2020*, strony 405-421, Cham, 2020. Springer International Publishing.
- [342] T. Mileszko. Armia Rosji ma duży problem. Do Ukrainy dotarł niezwykle sprzęt. *Komputer Świat*, 3 listopada 2024.
- [343] T. Mileszko. Turcja przeszła do historii. Takiej maszyny nie ma nikt inny na świecie. *Komputer Świat*, 3 listopada 2024.
- [344] G. Miller. Wordnet: a lexical database for english. *Commun. ACM*, 38(11):39–41, Listopad 1995.

- [345] M. Milley, E. Schmidt. America Isn't Ready for the Wars of the Future. And They're Already Here. *Foreign Affairs*, 5 August 2024.
- [346] K. Modzelewska. PHANTOM pokona tysiące kilometrów. Ten dron powstaje w Europie. *WP Tech*, 30 października 2024.
- [347] M. Morari, J. Lee. Model predictive control: past, present and future. *Computers & Chemical Engineering*, 23:667-682, 1999.
- [348] J. Moreno-Valenzuela, R. Perez-Alcocer, M. Guerrero-Medina, A. Dzul. Nonlinear PID-type controller for quadrotor trajectory tracking. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 23:2436-2447, 2018.
- [349] P. Morin, C. Samson. Practical stabilization of driftless systems on lie groups: the transverse function approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 48(9):1496-1508, 2003.
- [350] M. Mulas, S. Tronci, F. Corona, H. Haimi, P. Lindell, M. Heinonen, R. Vahala, R. Baratti. Predictive control of an activated sludge process: An application to the viikinmaki wastewater treatment plant. *Journal of Process Control*, 35:89-100, 2015.
- [351] T. Muller, A. Evans, C. Schied, A. Keller. Instant neural graphics primitives with a multiresolution hash encoding. *ACM Transactions on Graphics*, 41(4), 2022.
- [352] M. Muraszewicz, R. Nowak. *Sztuczna inteligencja dla inżynierów. Metody ogólne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2022.
- [353] M. Muraszewicz, R. Nowak. *Sztuczna inteligencja dla inżynierów. Istotne obszary i zastosowania*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2023.
- [354] H. Murveit, M. Cohen, P. Price, G. Baldwin, M. Weintraub, J. Bernstein. SRI's DECIPHER system. *Speech and Natural Language: Proceedings of a Workshop Held at Philadelphia, Pennsylvania, February 21-23, 1989*, strony 238-242, 1989.
- [355] N. Naciri, S. Bisnath. Rtk-quality positioning with global precise point positioning corrections. *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, 70(3), 2023.
- [356] G. Nalepa. From Good Robots to Useful Intelligent Agents. K. Tchoń, W. Gasparski, redaktorzy, *A Treatise on Good Robots*, strony 159-170. Transaction Publishers, 2014.
- [357] R. Nebeluk, K. Zarzycki, D. Seredyński, P. Chaber, M. Figat, P. Domański, C. Zieliński. Predictive tracking of an object by a pan-tilt camera of a robot. *Nonlinear Dynamics*, 111:8383— 8395, 2023.
- [358] NGA. USA chwala się sukcesem. Futurystyczny dron ukończył test. *WP Tech*, 27 listopada 2024.

- [359] E. Niewiadomska-Szynkiewicz, M. Marks, P. Arabas, A. Sikora. Bezprzewodowe sieci czujników w Internecie Rzeczy. Modele, algorytmy, protokoły. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2022.
- [360] E. Niewiadomska-Szynkiewicz, A. Sikora, M. Marks. A movement-assisted deployment of collaboration autonomous sensors for indoor and outdoor environment monitoring. *Sensors*, 16(9), 2016.
- [361] M. Nijak, P. Skrzypczyński, K. Ćwian, M. Zawada, S. Szymczyk, J. Wojciechowski. On the importance of precise positioning in robotised agriculture. *Remote Sensing*, 16(6), 2024.
- [362] F. Niroui, K. Zhang, Z. Kashino, G. Nejat. Deep reinforcement learning robot for search and rescue applications: Exploration in unknown cluttered environments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2):610-617, 2019.
- [363] A. Nordmann. Singular Simplicity – The story of singularity is sweeping, dramatic, simple – and wrong. *IEEE Spectrum*, 45:52-55, June 2008.
- [364] A. Nowakowski, W. Kasprzak. Automatic speaker's age classification in the common voice database. *Annals-CSIS*, wolumen 35, strony 1087-1091. PTI, 2023.
- [365] H. S. Nwana, D. T. Ndumu. A Brief Introduction to Software Agent Technology, strony 29-47. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1998.
- [366] E. Nęcka, J. Orzechowski, B. Szymura. Cognitive Psychology. PWN, Warszawa, 2008.
- [367] Office of the Under Secretary of Defense for Policy. DOD Directive 3000.09: Autonomy in Weapon Systems, January 2023.
- [368] Office of the Under Secretary of Defense for Research, Engineering, Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition, Sustainment. Unmanned System Safety Engineering Precepts Guide for DoD Acquisition, 2021.
- [369] K. Ogata. Modern Control Engineering. Prentice Hall, Boston, MA, 2010.
- [370] S. Ogonowski, D. Bismor, Z. Ogonowski. Control of complex dynamic nonlinear loading process for electromagnetic mill. *Archives of Control Sciences*, 30:471-500, 2020.
- [371] O. Ogundile, A. Alfa. A survey on an energy-efficient and energy-balanced routing protocol for wireless sensor networks. *Sensors*, 17(5), 2017.
- [372] F. Okazaki, W. Kasprzak. A two-step approach to blind deconvolution of speech and sound sources in the time domain. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 53(1):49-55, 2005.
- [373] M. Okulski, M. Ławryńczuk. A novel neural network model applied to modeling of a tandem-wing quadplane drone. *IEEE Access*, 9:14159-14178, 2021.

- [374] M. Okulski, M. Ławryńczuk. How much energy do we need to fly with greater agility? energy consumption and performance of an attitude stabilization controller in a quadcopter drone: A modified MPC vs. PID. *Energies*, 15:1380, 2022.
- [375] M. Okulski, M. Ławryńczuk. A small UAV optimized for efficient long-range and VTOL missions: An experimental tandem-wing quadplane drone. *Applied Sciences*, 12(14):7059, 2022.
- [376] W. Oleszkiewicz, D. Basaj, I. Sieradzki, M. Górszczak, B. Rychalska, K. Lewandowska, T. Trzcinski, B. Zielinski. Visual probing: Cognitive framework for explaining selfsupervised image representations. *IEEE Access*, 11:13028-13043, 2023.
- [377] W. Oleszkiewicz, T. Makino, S. Jastrzebski, T. Trzcinski, L. Moy, K. Cho, L. Heacock, K. Geras. Understanding the robustness of deep neural network classifiers for breast cancer screening. *CoRR*, abs/2003.10041, 2020.
- [378] J. Oncea. How the defence industry is using GaN technology? *RF Globalnet*, July 17, 2024.
- [379] OpenAI. Gpt-4.
- [380] OpenAI. Hello gpt-4.
- [381] L. Padgham, M. Winikoff. *Developing Intelligent Agent Systems: A Practical Guide*. John Wiley & Sons, 2004.
- [382] S. Pan, Q. Yang. A Survey on Transfer Learning. *IEEE Transactions on Knowledge Data Engineering*, 22(10):1345-1359, 2010.
- [383] N. Pantazis, S. Nikolidakis, D. Vergados. Energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks: A survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 15(2):551-591, 2013.
- [384] J. Pascual, J. Romera, V. Puig, G. Cembrano, R. Creus, M. Minoves. Operational predictive optimal control of Barcelona water transport network. *Control Engineering Practice*, 21:1020-1034, 2013.
- [385] K. Patan, J. Korbicz. Nonlinear model predictive control of a boiler unit: A fault tolerant control study. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 22:225-237, 2012.
- [386] R. Patelski, D. Pazderski. Parameter identifying disturbance rejection control with asymptotic error convergence. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 9(2):1035-1042, 2024.
- [387] R. Paulus, C. Xiong, R. Socher. A deep reinforced model for abstractive summarization, 2017.
- [388] P. Pawłowski, A. Dąbrowski, J. Balcerek, A. Konieczka, K. Piniarski. Visualization techniques to support cctv operators of smart city services. *Multimed Tools and Applications*, 79:21095-21127, 2020.

- [389] P. Pawłowski, K. Piniarski. Efficient lossy compression of video sequences of automotive high-dynamic range image sensors for advanced driver-assistance systems and autonomous vehicles. *Electronics*, 13(18), 2024.
- [390] P. Pawłowski, K. Piniarski, A. Dąbrowski. Highly efficient lossless coding for high dynamic range red, clear, clear, clear image sensors. *Sensors*, 21(2), 2021.
- [391] T. Pawłuszko. Odporność państwa i problemy obrony cywilnej. Jak uzbroić Polskę? Odstraszanie, Armia, Przemysł, Odporność Państwa, strony 50-67. Instytut Sobieskiego, 2024.
- [392] D. Pazderski. Application of transverse functions to control differentially driven wheeled robots using velocity fields. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 64(4):831-851, 2016.
- [393] D. Pazderski. Waypoint following for differentially driven wheeled robots with limited velocity perturbations. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 85(3):553-575, Mar 2017.
- [394] D. Pazderski. A robust smooth controller for a unicycle-like robot. *Archives of Control Sciences*, 28(1), 2018.
- [395] D. Pazderski, K. Kozłowski. Control of a differentially driven nonholonomic robot subject to a restricted wheels rotation. 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), strony 8827-8832, 2020.
- [396] D. Pazderski, D.K. Waśkowicz, K. Kozłowski. Motion control of vehicles with trailers using transverse function approach. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 77(3-4):457-479, 2015.
- [397] P. Pałka, C. Zieliński, W. Dudek, D. Seredyński, W. Szyrkiewicz. Communication-focused top-down design of robotic systems based on binary decomposition. *MDPI Energies*, 15(21, article no 7983):1187—1205, 2022.
- [398] F. Pelzl, K. Diepold, J. Auernhammer. Designing a multimodal emotional interface in the context of negotiation. *International Conference on Human-Computer Interaction*, strony 501—520. Springer, 2020.
- [399] G. Pennycook, J. Fugelsang, D. Koehler. What makes us think? A three-stage dual-process model of analytic engagement. *Cognitive Psychology*, 80:34—72, aug 2015.
- [400] F. Perez-Grau, R. Ragel, F. Caballero, A. Viguria, A. Ollero. Semi-autonomous teleoperation of UAVs in search and rescue scenarios. 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Miami, FL, USA, strony 1066-1074, 2017.
- [401] J. Peterson. *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*. Prentice Hall, 1981.
- [402] N-C. Pham, T-S. Nguyen, J. Niehues, M. Muller, S. Stuker, A. Waibel. Very deep selfattention networks for end-to-end speech recognition, 2019.

- [403] Photonics21. Photonics — an essential technology for defence. Photonics21 — European Technology Platform, 2024.
- [404] K. Piniarski, P. Pawłowski, A. Dąbrowski. Efficient hdr tone-mapping for adas applications. 2019 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA), strony 325-330, 2019.
- [405] K. Piniarski, P. Pawłowski, A. Dąbrowski. Improved pedestrian detection by adjustment of segmented roi in thermal night vision. 2020 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA), strony 92-97, 2020.
- [406] K. Piniarski, P. Pawłowski, A. Dąbrowski. Tuning of classifiers to speed-up detection of pedestrians in infrared images. Sensors, 20(16), 2020.
- [407] S. Plamowski, R. Nebeluk, A. Wojtulewicz, K. Cabaj, P. Chaber, M. Ławryńczuk, P. Marusak, K. Zarzycki. Methodology for conducting a study of the vulnerability of PLC control algorithms to cyber attacks. IEEE Access, 12:135551-135563, 2024.
- [408] R. Plutchik. A general psychoevolutionary theory of emotion. R. Plutchik, H. Kellerman, redaktorzy, Emotion: Theory, Research, and Experience, wolumen 1, strony 3—33. Academic, New York, 1980.
- [409] K. Podbucki, J. Suder, T. Marciniak, A. Dabrowski. Evaluation of embedded devices for realtime video lane detection. 2022 29th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and System (MIXDES), strony 187-191, 2022.
- [410] M. Powęska. Czy to najbardziej zaawansowany pojazd bojowy? Poznajcie Diamondback. Focus.pl, 21 października 2024.
- [411] A. Prado, Torres-Torriti. M., J. Yuz, F. Auat Cheein. Tube-based nonlinear model predictive control for autonomous skid-steer mobile robots with tire-terrain interactions. Control Engineering Practice, 101:104451, 2020.
- [412] P. Przybysz, Kasprzak W. The generation of letter-to-sound rules for grapheme-to-phoneme conversion. The 6th International Conference on Human System Interaction (HSI), strony 292-297. IEEE Xplore, 2013.
- [413] S. Puchala, W. Kasprzak, P. Piwowarski. Feature engineering techniques for skeleton-based two-person interaction classification in video. 2022 17th ICARCV, strony 66-71. IEEE Xplore, 2023.
- [414] S. Puchała, W. Kasprzak, P. Piwowarski. Human interaction classification in sliding video windows using skeleton data tracking and feature extraction. Sensors, MDPI, 23(6279):1-20, 2023.
- [415] D. Qin, A. Liu, D. Zhang, H. Ni. Formation control of mobile robot systems incorporating primal-dual neural network and distributed predictive approach. Journal of the Franklin Institute, 357:12454-12472, 2020.
- [416] S. Qin, T. Badgwell. A survey of industrial model predictive control technology. Control Engineering Practice, 11:733-764, 2003.

- [417] R. Quillian. A notation for representing conceptual information: an application to semantics and mechanical english paraphrasing, 1963.
- [418] A. Qureshi, Y. Miao, A. Simeonov, M. Yip. Motion planning networks: Bridging the gap between learning-based and classical motion planners. *IEEE Transactions on Robotics*, 37(1):48-66, 2021.
- [419] K. Racka-Szmidt, B. Stonio, J. Żelazko, M. Filipiak, M. Sochacki. A review: Inductively coupled plasma reactive ion etching of silicon carbide. *Materials*, 15(1):1-23, 2022.
- [420] A. Radford, K. Narasimhan. Improving language understanding by generative pre-training, 2018.
- [421] M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, R. Playter. Bigdog, the rough-terrain quadruped robot. *IFAC Proceedings Volumes*, 41:10822-10825, 2008.
- [422] B. Randall. PowerLight Technologies Launches Optical Power Beaming Over Fiber. *Broadband Communities News*, December, 11, 2017.
- [423] A. Raut, B. Irdmoussa, M. Shahbakhti. Dynamic modeling and model predictive control of an RCCI engine. *Control Engineering Practice*, 81:129-144, 2018.
- [424] J. Rawlings, D. Mayne, M. Diehl. *Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design*. Nob Hill Publishing, Madison, Wisconsin, 2022.
- [425] P. Razi, J. Sumantyo, D. Perissin, H. Kuze, M. Chua, G. Panggabean. 3D land mapping and land deformation monitoring using persistent scatterer interferometry (PSI) ALOS PALSAR: Validated by geodetic GPS and UAV. *IEEE Access*, 6:12395-12404, 2018.
- [426] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, Farhadi A. You only look once: Unified, real-time object detection, 2015.
- [427] J. Richalet, A. Rault, J. Testud, J. Papon. Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes. *Automatica*, 14:413-428, 1978.
- [428] R. Robertson. Ukraine leverages robotic dogs for reconnaissance, combat. *Straight Arrow News*, September 27, 2024.
- [429] A. Rogers, O. Kovaleva, A. Rumshisky. A primer in BERTology: What we know about how BERT works. *Transactions of the Association for Computational Linguistics*, 8:842-866, 2020.
- [430] H. Roncancio, M. Becker, A. Broggi, S. Cattani. Traversability analysis using terrain mapping and online-trained terrain type classifier. *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, strony 1239-1244, 2014.
- [431] J. Rossiter. *Model-Based predictive Control: A Practical Approach*. CRC Press, Boca Raton, 2004.
- [432] E. Roszkowska, P. Dulewicz, L. Janiec. Hierarchical hybrid control for multiple mobile robot systems. *IFAC-PapersOnLine*, strony 452-457, 2019.

- [433] E. Roszkowska, P. Makowski-Czerski, L. Janiec. Multi-level control for multiple mobile robot systems. *Discrete Event Dynamic Systems*, 33(4):1-29, 12 2023.
- [434] R. Roy. *Handbook of Mobile Ad Hoc Networks for Mobility Models*. Springer, USA, 2010.
- [435] A. Ruegamer, D. Kowalewski. Jamming and spoofing of gnss signals — an underestimated risk?! FIG Working Week 2015, 2015. Paper 7486.
- [436] S. Russell, P. Norvig. *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (4th Edition). Pearson, 2020.
- [437] N. Saeed, H. Nam, T. Al-Naffouri, M. Alouini. A state-of-the-art survey on multidimensional scaling-based localization techniques. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 21(4):3565-3583, 2019.
- [438] M. Safdar, R. Nowak, P. Pałka. A Denoising and Fourier Transformation-Based Spectrograms in ECG Classification Using Convolutional Neural Network. *Sensors*, 22(24):9576, 2022.
- [439] A. Saltini. Navigating cyber vulnerabilities in ai-enabled military systems. *European Leadership Network*, 2024.
- [440] D. Sarabia, F. Capraro, L. Larsen, C. de Prada. Hybrid NMPC of supermarket display cases. *Control Engineering Practice*, 17:428-441, 2009.
- [441] P. Satam. China Develops 'UAV-Compatible' High-Energy Laser Beams Not To Shoot Drones But To Power Them To Fly 'Forever' — Reports. *The EurAsian Times*, January, 21, 2023.
- [442] A. Saulski. Polski terminator. Będzie likwidował wrogie drony. *wGospodarce.pl*, 5 września 2024.
- [443] R.C. Schank, L. Tesler. A conceptual dependency parser for natural language. *Proceedings of the 1969 Conference on Computational Linguistics. COLING '69*, strony 1-3. Association for Computational Linguistics, 1969.
- [444] M. Schwenzer, M. Ay, T. Bergs, D. Abel. Review on model predictive control: an engineering perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117:1327-1349, 2021.
- [445] D. Seborg, T. Edgar, D. Mellichamp, F. Doyle III. *Process Dynamics and Control*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2016.
- [446] F. Serebinski. Przebudowa polskiego przemysłu obronnego w obliczu zagrożenia wojną. Jak uzbroić Polskę? *Odstraszanie, Armia, Przemysł, Odporność Państwa*, strony 41-49. Instytut Sobieskiego, 2024.
- [447] W. Shafik, S. Matinkhah, F. Shokoor. Cybersecurity in unmanned aerial vehicles: a review. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 16(1), 2023.
- [448] A. Shahin, S. Mohammad, Y. Hengshuai, G. Randy. Explainable artificial intelligence for autonomous driving: A comprehensive overview and field guide for future research directions, 2024.

- [449] T. Shan, B. Englot. Lego-loam: Lightweight and ground-optimized lidar odometry and mapping on variable terrain. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, strony 4758-4765, Madrid, 2018.
- [450] T. Shan, B. Englot, D. Meyers, i in. Lio-sam: Tightly-coupled lidar inertial odometry via smoothing and mapping. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), strony 5135-5142, 2020.
- [451] B. Sieja. 30 psów robotów już służy w Ukrainie. Nie boją się niczego. Komputer Świat, 14 sierpnia 2024.
- [452] B. Sieja. To czarny dzień dla rosyjskiego wywiadu. Stracili zwiadowców i miliony dolarów. Komputer Świat, 14 stycznia 2025.
- [453] S. Singh, B. Landry, A. Majumdar, J-J. Slotine, M. Pavone. Robust feedback motion planning via contraction theory. The International Journal of Robotics Research, 42(9):655-688, 2023.
- [454] P. Skrzypczyński. Mobile robot localization: where we are and what are the challenges? R. Szewczyk, i in., redaktorzy, Automation 2017. Innovations in Automation, Robotics and Measurement Techniques, wolumen 550 serii AISC, strony 249-267. Springer, 2017.
- [455] M. Sochacki. Nowe materiały półprzewodnikowe na rzecz poszanowania energii. XIV Konferencja Naukowa Technologia Elektronowa ELTE, strony 22-23, 2023.
- [456] K. Sohraby, D. Minoli, T. Znati. Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols and Applications. John Wiley & Sons, Ltd, Hoboken, New Jersey, 2007.
- [457] J. Somers. A Revolution in How Robots Learn. A future generation of robots will not be programmed to complete specific tasks. Instead, they will use A.I. to teach themselves. The New Yorker, November 25, 2024.
- [458] M. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar. Robot Modeling and Control. Wiley, 2020.
- [459] M. Stachowski. Analiza stanów osobowych sił zbrojnych Rzeczypospolitej polskiej – wnioski, rekomendacje. Jak uzbroić Polskę? Odstraszanie, Armia, Przemysł, Odporność Państwa, strony 23-40. Instytut Sobieskiego, 2024.
- [460] A. Stachurski. Wprowadzenie do optymalizacji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2009.
- [461] K. Stadler, J. Poland, E. Galleste. Model predictive control of a rotary cement kiln. Control Engineering Practice, 19:1-9, 2011.
- [462] D. Stampfer, A. Lotz, M. Lutz, C. Schlegel. The SmartMDSD Toolchain: An Integrated MDSD Workflow and Integrated Development Environment (IDE) for Robotics Software. Journal of Software Engineering for Robotics (JOSER), 7(1):3-19, July 2016.

- [463] M. Staniak, T. Winiarski, C. Zieliński. Parallel visual-force control. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'08, 2008.
- [464] M. Staniak, C. Zieliński. Structures of visual servos. Robotics and Autonomous Systems, 58(8):940-954, 2010.
- [465] A. Stentz. Optimal and efficient path planning for partially-known environments. Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, strony 3310-3317, 1994.
- [466] J. Stenum, K. Cherry-Allen, C. Pyles, R. Reetzke, M. Vignos, R. Roemich. Applications of pose estimation in human health and performance across the lifespan. Sensors, 21(21), 2021.
- [467] S. Strumph Wojtkiewicz. Sekrety Enigmy. Iskry, Warszawa, 1978.
- [468] D. Sturzenegger, D. Gyalistras, M. Morari, R. Smith. Model predictive climate control of a Swiss office building: Implementation, results, and cost-benefit analysis. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 24:1-12, 2016.
- [469] T. Stubler, A. Amodei, D. Capriglione, G. Tomasso, N. Bonnotte, S. Mohammed. An investigation of denial of service attacks on autonomous driving software and hardware in operation, 2024.
- [470] J. Suder, T. Marciniak. Foreign object debris detection at aerodromes using yolov5. Proceedings of the IEEE Conference on Signal Processing Algorithms, Architectures, Arrangements and Applications, wolumen 144, strony 66-71, 2024.
- [471] J. Suder, T. Marciniak, K. Podbucki, A. Dąbrowski. Real-time density maps generation of moving objects using embedded systems. 2022 International Symposium ELMAR, strony 179-184, 2022.
- [472] J. Suder, K. Podbucki, T. Marciniak. Chromaticity measurement of airport navigation lighting using integrated colour sensor. Opto-electronics Review, 31(4), 2023.
- [473] S. Sukhbaatar, A. Szlam, J. Weston, R. Fergus. End-to-end memory networks. Proceedings of the 28th International Conference on Neural Information Processing Systems – Volume 2, NIPS'15, strony 2440-2448, Cambridge, MA, USA, 2015. MIT Press.
- [474] K. Sun, B. Xiao, D. Liu, J. Wang. Deep high-resolution representation learning for human pose estimation, 2019.
- [475] I. Sutskever. Training recurrent neural networks. University of Toronto, Toronto, Ont., Canada, 2013. Ph.D. Thesis.
- [476] I. Sutskever, O. Vinyals, Q. Le. Sequence to sequence learning with neural networks. Z. Ghahramani, M. Welling, C. Cortes, N. Lawrence, K. Weinberger, redaktorzy, Advances in Neural Information Processing Systems, wolumen 27, strony 3104-3112. Curran Associates, Inc., 2014.

- [477] T. Szatkowski. Nie powinniśmy być patentami w nato (wywiad). Jak uzbroić Polskę? Odstraszanie, Armia, Przemysł, Odporność Państwa, strony 14-22. Instytut Sobieskiego, 2024.
- [478] M. Szopa. Produkcja s-70 ochotnik „od połowy 2024 roku”. Defence24, 26 stycznia 2024.
- [479] P. Szyrkarczyk. Neutralising and assisting robot SMR-100 Expert – design problematics. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 53(1):52-55, 2005.
- [480] P. Szyrkarczyk, R. Czapryniak, M. Trojnecki, A. Andrzejuk. Current state and development tendency in mobile robots for special applications. Proceedings International Conference 6th Workshop on European Scientific and Industrial Collaboration on promoting Advanced Technologies in Manufacturing WESIC’08, September 25-26 2008.
- [481] W. Szyrkiewicz, W. Kasprzak, C. Zieliński, W. Dudek, M. Stefańczyk, A. Wilkowski, M. Figat. Utilisation of embodied agents in the design of smart human-computer interfaces —a case study in cyberspace event visualisation control. Electronics, 9(6), 2020.
- [482] F. Tahir, E. Mercer, I. Lowdon, D. Lovett. Advanced process control and monitoring of a continuous flow micro-reactor. Control Engineering Practice, 77:225-234, 2018.
- [483] G. Takacs, G. Batista, M. Gulan, B. Rohal’-Ilkiv. Embedded explicit model predictive vibration control. Mechatronics, 36:54-62, 2016.
- [484] T. Takasu. Rtklib: Open source program package for rtk-gps. FOSS4G, 2009.
- [485] P. Tatjewski. Advanced control of industrial processes, structures and algorithms. Springer, London, 2007.
- [486] P. Tatjewski. Supervisory predictive control and on-line set-point optimization. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 20:483-495, 2010.
- [487] P. Tatjewski. Disturbance modeling and state estimation for offset-free predictive control with state-space process models. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 24:313-323, 2014.
- [488] P. Tatjewski. Offset-free nonlinear model predictive control with state-space process models. Archives of Control Sciences, 27:595-615, 2017.
- [489] P. Tatjewski, M. Ławryńczuk. Algorithms with state estimation in linear and nonlinear model predictive control. Computers & Chemical Engineering, 143:107065, 2020.
- [490] A. Taube, M. Sochacki. Edge Termination Design for 1.7 kV Silicon Carbide p-i-n Diodes. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, 68(2):367-375, 2020.
- [491] K. Tchoń. Introduction. K. Tchoń, W. Gasparski, redaktorzy, A Treatise on Good Robots, strony xvii-xxviii. Transaction Publishers, 2014.

- [492] M. Tomczak. Drony Bayraktar nieskuteczne w Ukrainie? Turcy są innego zdania. WP Tech, 18 września 2024.
- [493] J. Tordesillas, J. How. MADER: Trajectory Planner in Multi-Agent and Dynamic Environments. *IEEE Transactions on Robotics*, 38:463-476, 2022.
- [494] A. Townsend, I. Jiya, C. Martinson, D. Bessarabov, R. Gouws. A comprehensive review of energy sources for unmanned aerial vehicles, their shortfalls and opportunities for improvements. *Heliyon*, 6(11), November 2020.
- [495] NATO Headquarters Supreme Allied Commander Transformation. Policy Guidance: Autonomy in Defence Systems. Focus Area "Role of Autonomous Systems in Gaining Operational Access", October 29 2014.
- [496] R. Triebel, P. Pfaff, W. Burgard. Multi-level surface maps for outdoor terrain mapping and loop closing. 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, strony 2276-2282, 2006.
- [497] P. Tucker. US-made jam-resistant drones helped Ukrainians cut through Russia EW. Shield AI's V-BATs are giving Kyiv new range capabilities. *Defense One*, 31 października 2024.
- [498] UGS-LIS Project Team (GMV, PIAP, MUT). Unmanned Ground Systems Landscaping and Integration Study (UGS-LIS). Final Report. EDA Project 13.CAP.OP.592, 2015.
- [499] R. van de Pol. Weapons security: Comply or explain. Praca magisterska, Leiden University, 2021.
- [500] A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A. Gomez, L. Kaiser, I. Polosukhin. Attention is all you need, 2017.
- [501] M. Vecchio, R. Lopez-Valcarce, F. Marcelloni. A two-objective evolutionary approach based on topological constraints for node localization in wireless sensor networks. *Applied Soft Computing*, 12:1891–1901, 2012.
- [502] V. Vinge. Signs of the Singularity. *IEEE Spectrum*, 45:69-74, June 2008.
- [503] A. Waibel, T. Hanazawa, G. Hinton, K. Shikano, K.J. Lang. Phoneme recognition using time-delay neural networks. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 37(3):328-339, 1989.
- [504] G. Wan, X. Yang, R. Cai, i in. Robust and precise vehicle localization based on multi-sensor fusion in diverse city scenes. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, strony 4670-4677, 2018.
- [505] D. Wang, Y. Gao, W. Wei, Q. Yu, Y. Wei, W. Li, Z. Fan. Sliding mode observer-based model predictive tracking control for mecanum-wheeled mobile robot. *ISA Transactions*, 151:51-61, 2024.
- [506] J. Wang, W. Chi, C. Li, C. Wang, M. Meng. Neural rrt*: Learning-based optimal path planning. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 17(4):1748-1758, 2020.
- [507] L. Wang. Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB. Springer, London, 2009.

- [508] P. Wang, L. Liu, Y. Liu, C. Theobalt, T. Komura, W. Wang. Neus: Learning neural implicit surfaces by volume rendering for multi-view reconstruction. M. Ranzato, A. Beygelzimer, Y. Dauphin, P. Liang, J. Vaughan, redaktorzy, *Advances in Neural Information Processing Systems*, wolumen 34, strony 27171-27183. Curran Associates, Inc., 2021.
- [509] X. Wang, W. Chen, Y-F. Wang, W. Wang. No metrics are perfect: Adversarial reward learning for visual storytelling. Iryna Gurevych, Yusuke Miyao, redaktorzy, *Proceedings of the 56th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, wolumen 1, strony 899909, Melbourne, Australia, 2018. Association for Computational Linguistics.
- [510] K. Warwick, H. Shah, A. Velder, E. Stradella. How Good Robots Will Enhance Human Life. K. Tchoń, W. Gasparski, redaktorzy, *A Treatise on Good Robots*, strony 3-18. Transaction Publishers, 2014.
- [511] P. Waurzyniak. The Silicon Carbide Race Begins. *Semiconductor Engineering*, September, 20, 2023.
- [512] W. Wen, X. Bai, L. Hsu, T. Pfeifer. Gnss/lidar integration aided by self-adaptive gaussian mixture models in urban scenarios: An approach robust to non-gaussian noise. *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, strony 647-654, 2020.
- [513] W. Wen, L.-T. Hsu. Towards robust gnss positioning and real-time kinematic using factor graph optimization. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, strony 5884-5890, 2021.
- [514] W. Wen, T. Pfeifer, X. Bai, L.-T. Hsu. It is time for factor graph optimization for gnss/ins integration: Comparison between fgo and ekf. *arXiv*, 2004.10572v2, 2020.
- [515] J. Weston, S. Chopra, A. Bordes. *Memory networks*, 2015.
- [516] K. Wilewski. Gladius rośnie w siłę. *Polska Zbrojna*, 21 grudnia 2023.
- [517] A. Wilkowski, T. Kornuta, W. Kasprzak. Point-based object recognition in rgb-d images. *Intelligent Systems'2014 (IEEE Int. Conference on Intelligent Systems)*. Series: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, wolumen 323, strony 593-604. Springer International Publishing Switzerland, 2015.
- [518] A. Wilkowski, T. Kornuta, M. Stefańczyk, W. Kasprzak. Efficient generation of 3d surfel maps using rgb-d sensors. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science (AMCS)*, 26(1):99-122, 2016.
- [519] A. Wilkowski, M. Stefańczyk, Kasprzak W. Training data extraction and object detection in surveillance scenario. *Sensors*, 20(9-2689), 2020.
- [520] G.N. Wilson, A. Ramirez-Serrano, Q. Sun. Vehicle state prediction for outdoor autonomous high-speed off-road ugvs. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, strony 467-472, 2015.

- [521] T. Winiarski, M. Węgierek, D. Seredyński, W. Dudek, K. Banachowicz, C. Zieliński. EARL – Embodied Agent based Robot control systems modelling Language. *Electronics – an Open Access Journal by MDPI*, 9(article 379):1-27, 2020.
- [522] J. Winter, R. Nowak. Point cloud densification algorithm for multiple cameras and lidars data fusion. *Sensors*, 24(17):5786, 2024.
- [523] W. A. Woods. Progress in natural language understanding: an application to lunar geology. *Proceedings of the June 4-8, 1973, National Computer Conference and Exposition, AFIPS '73*, strony 441–450, New York, NY, USA, 1973. Association for Computing Machinery.
- [524] M. Wooldridge. Agent-based software engineering. *Software Engineering. IEE Proceedings*, wolumen 144, strony 26-37. IET, 1997.
- [525] H. Wu, S. Yunas, S. Rowlands, W. Ruan, J. Wahlstrom. Adversarial driving: Attacking end-to-end autonomous driving. *2023 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, strony 1–7. IEEE, Czerwiec 2023.
- [526] Y. Wu, M. Schuster, Z. Chen, i in. *Google’s neural machine translation system: Bridging the gap between human and machine translation*, 2016.
- [527] A. Wyatt, J. Nicholson, M. Black, A. Dowse. Understanding How to Scale and Accelerate the Adoption of Robotic and Autonomous Systems into Deployable Capability. Phase 1 —Identifying Barriers. *Rand Australia, Australian Army Occasional Paper No. 20*, 2024.
- [528] C. Xia, T. Liu, T. Shi, Z. Song. A simplified finite-control-set model-predictive control for power converters. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10:991-1002, 2014.
- [529] W. Xiao, T. Wang, R. Hasani, M. Chahine, A. Amini, X. Li, D. Rus. Barrier-net: Differentiable control barrier functions for learning of safe robot control. *IEEE Transactions on Robotics*, 39(3):2289-2307, 2023.
- [530] Y. Xu, X. Han, G. Deng, J. Li, Y. Liu, T. Zhang. Sok: Rethinking sensor spoofing attacks against robotic vehicles from a systematic view. *2023 IEEE 8th European Symposium on Security and Privacy (EuroS&P)*, strony 1082-1100, 2023.
- [531] J-P. Yaacoub, H. Noura, O. Salman, A. Chehab. Robotics cyber security: vulnerabilities, attacks, countermeasures, and recommendations. *International Journal of Information Security*, 21(1):115-158, Feb 2022.
- [532] S. Yan, Y. Xiong, D. Lin. Spatial temporal graph convolutional networks for skeleton-based action recognition, 2018.
- [533] Y. You, Z. Yang, H. Zhuo, Y. Sui. Research on ground mobile robot trajectory tracking control based on MPC and ANFIS. *Control Engineering Practice*, 152:106040, 2024.
- [534] E. Zanjaj, I. Enesi, B. Zanjaj. Energy aware algorithms for wireless sensor networks. *Procedia Computer Science*, 105:105-110, 2017.

- [535] K. Zarzycki, P. Chaber, K. Cabaj, M. Ławryńczuk, P. Marusak, R. Nebeluk, S. Plamowski, A. Wojtulewicz. Forgery cyber-attack supported by LSTM neural network: An experimental case study. *Sensors*, 23(15):6778, 2023.
- [536] K. Zarzycki, M. Ławryńczuk. Advanced predictive control for GRU and LSTM networks. *Information Sciences*, 616:229-254, 2022.
- [537] K. Zarzycki, M. Ławryńczuk. Long short-term memory neural networks for modeling dynamical processes and predictive control: A hybrid physics-informed approach. *Sensors*, 23:8898, 2023.
- [538] H. Zhang, L. Niu, A. Clark, R. Poovendran. Fault tolerant neural control barrier functions for robotic systems under sensor faults and attacks. 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), strony 9901-9907, 2024.
- [539] J. Zhang, S. Singh. LOAM: lidar odometry and mapping in real-time. *Robotics: Science and Systems X*, University of California, Berkeley, USA, 2014.
- [540] J. Zhao, W. Zhao, B. Deng, Z. Wang, F. Zhang, W. Zheng, W. Cao, J. Nan, Y. Lian, A. Burke. Autonomous driving system: A comprehensive survey. *Expert Systems with Applications*, 242:122836, 2024.
- [541] P. Zhao, A. Lakshmanan, K. Ackerman, A. Gahlawat, M. Pavone, N. Hovakimyan. Tubecertified trajectory tracking for nonlinear systems with robust control contraction metrics. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(2):5528-5535, 2022.
- [542] R. Zheng, Y. Lyu. Nonlinear tight formation control of multiple uavs based on model predictive control. *Defence Technology*, 25:69-75, 2023.
- [543] J. Zhu, L. Liu, Y. Liu, W. Li, F. Wen, H. Zhang. Fg-depth: Flow-guided unsupervised monocular depth estimation. 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), strony 4924-4930, 2023.
- [544] L. Zhu, B. Wan, C. Li, G. Tian, Y. Hou, K. Yuan. Dyadic relational graph convolutional networks for skeleton-based human interaction recognition. *Pattern Recognition*, 115:107920, 2021.
- [545] Z. Zhu, N. Li, R. Sun, D. Xu, H. Zhao. Off-road autonomous vehicles traversability analysis and trajectory planning based on deep inverse reinforcement learning. *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, strony 971-977, 2020.
- [546] T. Zielinska. *Maszyny kroczące. Podstawy, projektowanie, sterowanie i wzorce biologiczne*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2014.
- [547] T. Zielinska, J. Heng. Mechanical design of multifunctional quadruped. *Mechanism and Machine Theory*, 38(5):463-478, 2003.
- [548] C. Zieliński. Zastosowanie agentów upostaciowionych do projektowania systemów robotycznych, strony 469-499. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2020.

- [549] T. Zielińska, J. Heng. Real-time-based control system for a group of autonomous walking robots. *Advanced Robotics*, 20(5):543-561, 2006.
- [550] T. Zielińska, W. Kasprzak, W. Szyrkiewicz, C. Zieliński. Path planning for robotized mobile supports. *Journal of Mechanism and Machine Theory*, 78:51-64, 2014.
- [551] C. Zieliński. *Robot Programming Methods*. Publishing House of Warsaw University of Technology, Warsaw, 1995.
- [552] C. Zieliński. Object-Oriented Robot Programming. *Robotica*, 15:41-48, 1997.
- [553] C. Zieliński. The MRROC++ system. *Proceedings of the First Workshop on Robot Motion and Control, RoMoCo'99*, strony 147-152, June 1999.
- [554] C. Zieliński. A unified formal description of behavioural and deliberative robotic multi-agent systems. *7th International IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO)*, wolumen 7, strony 479-486, 2003.
- [555] C. Zieliński. Formal approach to the design of robot programming frameworks: the behavioural control case. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences*, 53(1):57-67, March 2005.
- [556] C. Zieliński. Formalne podejście do programowania robotów — struktura układu sterującego, wolumen 15, strony 267-300. *Monografie Komitetu Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk, EXIT*, 2010. Zieliński.
- [557] C. Zieliński. Specification of agent based robotic systems using hierarchical finite state automata. Andrzej Bartoszewicz, Jacek Kabziński, Janusz Kacprzyk, redaktorzy, *Advanced, Contemporary Control*, strony 465-476, Cham, 2020. Springer International Publishing.
- [558] C. Zieliński. wolumen 296 serii *Advances in Intelligent Systems and Computing*, rozdział/ Robot System Design Methodology Utilising Embodied Agents, strony 523-561. Springer, 2021.
- [559] C. Zieliński. Robotyka: techniki, funkcje, rola społeczna, cz. 1 – techniczne podstawy inteligencji i bezpieczeństwa robotów. *Pomiary, Automatyka, Robotyka – PAR*, (4):5-26, 2022.
- [560] C. Zieliński, M. Figat, R. Hexel. Communication Within Multi-FSM Based Robotic Systems. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 93(3):787-805, Mar 2019.
- [561] C. Zieliński, W. Kasprzak, T. Kornuta, W. Szyrkiewicz, P. Trojanek, M. Walęcki, T. Winiarski, T. Zielińska. Control and programming of a multi-robot-based reconfigurable fixture. *Industrial Robot: An International Journal*, 40(4):329-336, 2013.
- [562] C. Zieliński, K. Mianowski, K. Nazarczuk, W. Szyrkiewicz. A Prototype Robot for Polishing and Milling Large Objects. *Industrial Robot*, 30(1):67-76, January 2003.
- [563] C. Zieliński, M. Stefańczyk, T. Kornuta, M. Figat, W. Dudek, W. Szyrkiewicz, W. Kasprzak, J. Figat, M. Szlenk, T. Winiarski, K. Banachowicz,

- T. Zielińska, E. Tsardoulis, A. Symeonidis, F. Psomopoulos, A. Kintsakis, P. Mitkas, A. Thallas, S. Reppou, G. Karagiannis, K. Panayiotou, V. Prunet, M. Serrano, J-P. Merlet, S. Arampatzis, A. Giokas, L. Penteridis, I. Trochidis, D. Daney, M. Iturburu. Variable structure robot control systems: The RAPP approach. *Robotics and Autonomous Systems*, 94:226-244, 2017.
- [564] C. Zieliński, W. Szyrkiewicz. Systemy MRROC i MRROC++; Część I: Struktura. C. Zieliński, T. Zielińska, redaktorzy, Konstrukcja, sterowanie i programowanie złożonych systemów robotycznych, strony 25-40. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1997.
- [565] C. Zieliński, W. Szyrkiewicz, K. Mianowski, K. Nazarczuk. Mechatronic design of openstructure multi-robot controllers. *Mechatronics*, 11(8):987-1000, November 2001.
- [566] C. Zieliński, W. Szyrkiewicz, T. Winiarski, M. Staniak, W. Czajewski, T. Kornuta. Rubik's cube as a benchmark validating MRROC++ as an implementation tool for service robot control systems. *Industrial Robot: An International Journal*, 34(5):368-375, 2007.
- [567] C. Zieliński, P. Trojanek. Stigmergic cooperation of autonomous robots. *Journal of Mechanism and Machine Theory*, 44:656-670, April 2009.
- [568] C. Zieliński, T. Winiarski. Motion generation in the MRROC++ robot programming framework. *International Journal of Robotics Research*, 29(4):386-413, 2010.
- [569] C. Zieliński, T. Winiarski, W. Szyrkiewicz, T. Kornuta, P. Trojanek. MRROC++ – programowa struktura ramowa do tworzenia sterowników systemów wielorobotowych. S. Ambroszkiewicz, A. Borkowski, K. Cetnarowicz, C. Zieliński, redaktorzy, *Inteligencja wokół nas. Współdziałanie agentów softwareowych, robotów, inteligentnych urządzeń*, wolumen 15, strony 317-384. Seria Monografie Komitetu Automatyki i Robotyki PAN, EXIT, 2010.
- [570] K. Zywanowski, A. Banaszczyk, M. Nowicki, J. Komorowski. MinkLoc3D-SI: 3D LiDAR Place Recognition With Sparse Convolutions, Spherical Coordinates, and Intensity. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(2):1079-1086, 2022.

SKOROWIDZ

- ADA2, 23
- Alpagut, 48
- MHT, 54
- ACF, 117
- ACS, 52
- ADRC, 118
- AESA, 46
- agent, 57–59, 75, 127, 128, 130, 145–151
- agent programowy, 58
- agent upostaciowiony, 58, 127, 128–130
- air-gapping, 91
- algorytm regulacji, 65
- AllenNLP, 86
- Alpagu, 47
- Alvey NLP, 77
- amerykańskie drony, 51, 157
- amerykańskie drony morskie, 42
- amerykańskie potrzeby, 12
- analiza akcji, 76
- analiza interakcji osób, 76
- analiza obrazu, 79, 134, 141, 151
- analiza sekwencji obrazów, 74
- ANKA-3, 48
- antydrony, 53, 54
- any-jamming, 89
- APAS, 25
- architektura ISD, 146, 148, 150, 151
- aspekty prawne, 5, 13, 33, 158
- ASPIC, 141, 142
- ASR, 83, 84, 86
- asymetryczna reakcja, 30
- atak antagonistyczny, 90
- atak DoS, 90, 91
- atak na system komunikacji, 89
- atak odmowy usługi, 90
- atencja, 78, 84
- ATN, 77
- automat skończony, 127, 129, 130
- autonomia, 5, 11, 12, 18, 22, 26, 27, 57, 58, 119, 156
- autonomia pojazdów, 19
- autonomia robotów pola walki, 5, 13, 19, 21, 157
- AV, 136, 137
- awionika, 95, 143
- Baba Jaga, 46, 50, 53, 536
- BAD, 46
- bariery we wdrażaniu robotów, 36, 37
- Bayraktar TB2, 46
- BERT, 81, 82
- BEV, 58, 68
- bezpieczeństwo, 3, 19, 22, 23, 36, 38, 41, 45, 57, 72–75, 89, 91, 92, 95, 111, 117, 134, 140, 141, 144, 150, 151, 157, 158
- bezpieczeństwo AI, 90
- bezpieczeństwo systemów autonomicznych, 72
- beprzewodowa łączność laserowa, 94
- beprzewodowe sieci czujników, 86, 138
- beprzewodowe ładowanie baterii, 96
- Bielik, 82
- BigDog, 45
- BLEEX, 103
- Blue Bottle, 42
- Boyga, 47, 48
- BPL, 28, 29, 164, 165
- brachiacja, 14
- BRAVE¹, 54
- BROACH, 55
- brytyjskie drony morskie, 43
- BSP-U, 49
- Bumin, 48
- c-UAS, 24
- Caffe, 85
- CapTech, 28
- CASEVAC, 27
- Cassie, 15
- CBOW, 78, 82
- CBRN, 29, 122
- CCA, 52
- CCTV, 117
- CDAO, 163
- cecha emergentna, 15
- CH-6, 50
- Chainer, 85, 86
- ChALW, 37
- ChatGPT, 38
- chińskie drony, 50
- chińskie drony morskie, 43
- chmura punktów, 66, 67, 106, 109, 110, 134
- Chomsky N., 76
- Cloud Shadow CS-5000T, 50
- CNN, 67
- CNTK, 85
- CommonVoice, 137
- CONOPs, 163
- CoreNLP, 85
- COTS, 98
- CS-5000T, 50
- CSAR, 27
- CTC, 84, 137
- CUAV, 5
- cyberbezpieczeństwo, 89, 91
- cykliczna linearyzacja, 62, 131
- czujniki światłowodowe, 96, 141
- DAIC, 164
- dane szkieletowe, 74, 76, 134, 135

dane testowe, 136
 DARPA, 42, 45, 102
 DBN, 84
 DDoS, 90
 DECIPHER, 84
 detekcja obiektów, 58, 117, 137, 151, 164
 DGPS, 68
 Diamondback, 44
 DMC, 62
 DNN, 84
 DOA, 138
 dobry robot, 154
 DoD, 36, 163,
 DoS, 90, 91
 dostarczanie energii elektrycznej, 97
 Dragon, 84
 dron, 14, *passim*
 dron FPV, 4, 50, 54, 56, 95
 drony, 50
 drony morskie, 14, 43
 Drozd, 44
 DTW, 70
 duże modele językowe, 79
 duży model zachowań, 69
 dyrektywa bezpieczeństwa DoD, 23

EDA, 12, 18
 EDF, 26, 33
 EDIDP, 26
 EDTIB, 26
 efektor, 127, 165
 efektor rzeczywisty, 127
 efektor wirtualny, 127
 EFO, 33
 egzoszkielety, 102
 EIC, 92, 103
 EKF, 70, 71
 EM, 77
 embedding, 81
 emergencja, 15
 emocje, 16, 145–147
 emocje mówcy, 137
 Enigma, 40
 EOD, 122
 ESPnet, 85
 etyka robotów, 153
 EUPAS, 26
 ExoAtlet, 103
 Expert, 120, 121

faza gazowa, 141
 Feihong, 50
 FGO, 111, 113, 114
 FH-97, 50
 FIPA, 130
 FOG, 90
 formalna specyfikacja, 127
 fotodetekcja, 141
 fotogrametria, 64

fotoniczne technologie sensoryczne, 93
 fotonika, 92
 fotonika zintegrowana, 92, 96
 fotonika światłowodowa, 142
 fotowoltaika, 96, 97, 142
 FPV, 46, 50, 54, 56, 95
 FrameNet, 77
 framework, 128
 FT-5, 49
 funkcja przejścia, 127, 129
 funkcje certyfikacji, 73
 funkcje Lapunowa, 73
 funkcje transwersalne, 115

GaN, 98–100, 141, 143, 144
 Gaussian Splatting, 66
 Gemini, 81
 Gensim, 86
 geolokalizacja, 87
 geolokalizacja wizualna, 134
 geolokalizacja węzłów sieci, 139
 gesty dynamiczne, 75
 gesty statyczne, 75
 GhostRobotics Vision 60 Q-UGV, 55
 GJ-11, 50
 Gladius, 32
 GNSS, 27, 47, 54, 68, 69, 70, 71, 104, 111–114
 GNSS-INS, 69, 70
 GOCO, 33
 GPC, 62
 GPS, 12, 15, 42, 43, 48, 49, 52, 53, 56, 68,
 69, 88–90, 93, 94, 96, 111, 114, 127,
 132, 137, 138
 GPT, 79, 80, 81
 GPU, 55, 85
 graf czynnikowy, 71
 gramatyka przypadków, 76
 grupa heterogeniczna, 15, 16
 grupa homogeniczna, 15
 grupa jednorodna, 15
 grupa niejednorodna, 15, 16
 grupa robotów, 15, 56
 Grupa WB, 49
 GRYF, 121, 122, 123
 GTZ, 28
 Guardian XO, 102
 GuidedRRT, 105, 106
 GuidedRRT*-Connect, 105
 Głuptak, 44

hamulce etyczne, 155
 HARDIMAN, 102
 Hawk, 49
 HDR, 117
 Herne XLAUV, 43
 heterogeniczna grupa robotów, 15, 16
 heterostruktury, 141
 HEV, 98
 hierarchiczna sieć Petriego, 128, 129, 130

historia sterowania predykcyjnego, 62
 HMM, 84
 homeostaza, 146
 horyzont predykcji, 61
 horyzont sterowania, 61
 HRNet, 74
 HTK, 84
 Hunter, 42, 125, 126
 HVAC, 64
 HX-2, 53

 IBIS, 121, 124, 125,
 IBIS TRANSPORT, 125, 126
 IBM Georgetown, 76
 ICA, 138
 IED, 26
 IDS, 91
 IGBT, 99
 IIR, 48
 IMU, 55, 113, 137
 INS, 69, 113
 Inspector, 120
 InstantNGP, 66
 Inteligentny System podejmowania Decyzji,
 144, 145
 interakcja osób, 74, 76, 134, 135
 interoperacyjność, 15, 22, 26, 57, 78
 interrogatory, 141
 irańskie drony, 53
 ISD, 144, 145
 ISR, 27, 28
 ISTAR, 27, 28, 48
 izraelskie drony, 48
 izraelskie drony morskie, 41

 JAIC, 36, 163
 jamming, 89
 JARI-USV-A, 43
 jednoetapowe rozmieszczanie czujników, 88

 Kaldi, 86
 kamera ToF, 93, 164
 Kargu, 47
 Kazhan, 50
 KenLM, 86
 Keras, 85
 Kerkes, 48
 Killer Whale, 43
 klasyfikacja robotów, 14, 19, 20,
 klasyfikacja SAE, 18, 136, 160
 koder sekwencji, 78
 komunikacja człowiek-maszyna, 76, 165
 komunikacja optyczna, 92, 94, 142
 koncentracja uwagi, 79
 kryteria klasyfikacji robotów, 14
 krytyka Praw Robotyki, 159
 krzywoliniowa parametryzacja nieortogonalna, 151
 Kurzweil R., 36

 LabSat3, 90,
 LARS, 27,
 laserowe zasilanie dronów, 97, 142
 LAWS, 38, 163,
 LBM, 69
 LeGO-LOAM, 106, 107, 108, 109
 LibROSA, 86
 LiDAR, 93, 106–108, 110, 111, 113, 114, 118,
 133, 137
 LLM, 79, 81, 83
 LOAM, 71, 106, 107, 108
 logika rozmyta, 146
 lokalizacja czujników sieci, 86
 lokalizacja robotów, 68
 lokalizacja wizualna, 134
 lokalizacja za pomocą LiDARa, 106
 lokalizacja źródeł dźwięku, 137
 LQR, 60
 LS3, 45
 LSP/MPII-MPHB, 74, 75
 LSTM, 78, 131, 135
 LUNAR, 77
 LWIR, 93

 ładunek, 29
 łączność laserowa, 94

 MADER, 94,
 magazynowanie energii, 96, 97, 98
 Magura V5, 42, 56
 MALE, 46
 MALE RPAS, 28
 manipulacja danymi sensorycznymi, 89
 manipulatory mobilne, 151
 mapa cieplna, 117
 mapa ciepła, 110
 mapa rastrowa, 67, 71,
 mapa terenu, 65
 mapa wysokości terenu, 108
 mapa wysokościowa, 65, 66
 mapa zajętości, 65, 66
 Mariner, 42
 maszyny kroczące, 44–46, 55, 102, 127, 132, 133
 Mavica, 53
 MCDC, 160
 mechanizm uwagi, 78, 79, 84
 mechanizm uwagi, 78, 79, 84
 MEMS IMUs, 96
 metamateriały hiperboliczne, 142
 metamodel, 127, 128, 130
 METEO, 77
 metody bariery, 73
 metody Lapunowa, 73
 metody metryki kontrakcji, 73
 metody sterowania ruchem robotów, 114
 metryka kontrakcji sterowania, 73
 MHPC, 62
 MILSPEC, 46
 MIMO, 60,

miękka kwantyzacja, 68
 MLP, 66, 135
 MMCM, 27
 monitorowanie wizyjne, 141
 monocykl, 115
 Moral Machine, 155,
 moralne preferencje ludzi, 155
 moralność robotów, 153, 154
 MOSA, 44
 motywatory, 146
 MPC, 60–65, 130–132
 MPNet, 72
 MROC++, 128
 MRROC, 128
 MUM-T, 27, 28
 MWIR, 93
 MXNet, 85

napęd bezpośredni, 118
 napęd strugowodny, 41
 NAUT, 55
 nawigacja wizyjna, 104
 nawodne drony morskie, 14
 nawodne roboty autonomiczne, 41
 NDT-OM, 66
 Nemesis, 50
 NEO, 118
 NeRF, 66
 NeuS, 66
 niechęć do robotów w wojsku, 34, 35, 37
 niemieckie drony, 53
 NLOS, 71
 NLP, 76, 77, 78, 79, 81, 85, 86
 NLTK, 85

obrona cywilna, 31, 33, 34
 OceanAero Triton, 42
 ocena prakseologiczna, 154
 Ocius Blue Bottle, 42
 odporność państwa, 31
 ograniczenia, 60–62, 66, 69, 71, 72, 79, 96–101,
 104, 108, 110–114, 116, 130, 144, 159
 Okhotnik, 50
 oktomapa, 66
 ONYX, 55, 103
 OpenNLP, 86
 OpenPose, 74
 optymalizacja kwadratowa, 131
 optymalne rozlokowanie, 87
 Orbiter Mini UAV, 48
 orientowanie pól wektorowych, 114
 osobiwość technologiczna, 36
 OWC, 95, 96

PADR, 26
 partnerstwo państwowo-prywatne, 33
 partnerstwo prywatno-państwowe, 33
 PATROL, 122, 124,
 pedipulacja, 14

percepcja, 15, 25, 29, 116, 134, 136, 137,
 145, 148–150, 164
 percepcja otoczenia, 116
 perowskit, 97
 PESCO, 26
 PHANTOM, 51
 Phantom 4, 89, 90
 PIAP Expert, 120
 PIAP GRYF, 121, 122, 123,
 PIAP Hunter, 125, 126
 PIAP IBIS, 121, 124, 126
 PIAP IBIS TRANSPORT, 125, 126
 PIAP Inspector, 120
 PIAP PATROL, 122, 124
 PIAP TRM, 120, 121
 PIC, 92, 95
 PID, 60, 61, 63, 64, 65, 131
 planowanie ruchu, 63, 66, 67, 71–73, 105,
 109, 115, 139
 platforma, 29
 platforma oświetleniowo-sensoryczna,
 PLC, 60, 61, 63, 64, 65, 131
 pociski manewrujące, 32, 54, 55
 podsystem wirtualny, 127, 128
 podwodne drony morskie, 14, 43
 podwodne roboty autonomiczne, 41
 pojazdy autonomiczne, 18
 pojazdy z przyczepami, 115
 polskie drony, 48
 polskie drony morskie, 43
 polskie potrzeby, 31
 PoseConv3D, 76,
 postury człowieka, 45, 133
 potrzeby EDA, 18, 25
 poza dynamiczna, 75
 poza statyczna, 75
 poziom gotowości technologicznej, 34, 165
 poziomy autonomii, 17, 18, 19
 pozy sylwetki człowieka, 76
 PPP, 68, 69, 70, 71,
 Prawa Asimova, 159
 Prawa Robotyki, 159
 Prawo Konfliktów Zbrojnych, 160
 Predator MQ-1, 51
 Predator MQ-9, 51
 predykcja, 58, 59, 61, 62, 65, 74, 131, 165
 PRM, 72
 proces jednowymiarowy, 61
 procesy poznawcze, 147, 148
 programowa struktura ramowa, 85, 128
 programowanie kwadratowe, 62, 73
 przetwarzanie języka naturalnego, 76, 81, 85, 86
 przetwarzanie sygnału mowy, 137
 przetworniki optyczne, 141
 przyrządy mocy, 98
 psychologia poznawcza, 145, 147
 PyTorch, 85, 86
 półprzewodniki, 92, 95, 98–101, 142, 143, 144
 pędnik strumieniowy, 41, 42

pływające roboty, 41, 42
 Q-UGV, 45, 55, 56, 66, 111, 118, 119
 R18, 50
 radar AESA, 46
 Rainbow, 50
 Ranger, 42
 RAVDESS, 137
 RAVEN, 56
 receptor, 127, 148
 receptor rzeczywisty, 127
 receptor wirtualny, 127
 regulator, 60, 63–65, 73, 151
 reprezentacja plecakowa, 77
 RNN, 78, 84,
 roboty hybrydowe, 14, 55, 72
 roboty kosmiczne, 14
 roboty kroczące, 65, 105
 roboty latające, 14, 16, 24, 31, 32, 43, 46, 118, 151
 roboty lądowe, 14, 16, 24, 26, 30, 39, 44, 46, 56, 66, 68, 70, 108, 110, 118, 120, 122
 roboty na gąsienicach, 44
 roboty na kołach, 44, 56
 roboty nawodne, 14, 16, 26, 41–43, 56
 roboty podwodne, 26, 31, 43, 44
 roboty pola walki, 6, 11–13, 15–17, 19, 32, 34, 35, 41, 57, 89, 91, 97, 101, 104, 144, 151, 153, 163, 166, 167
 roboty pływające, 14, 41, 42
 roboty specjalnego przeznaczenia, 5, 12, 145, 167
 roboty torbacze, 56
 robotyka społeczna, 152
 ROE, 159
 RORC, 128
 ROS, 108
 rosyjska strategia, 30
 Rotunbot RT-G, 56
 rozkładanie czujników, 87
 rozpoznanie sylwetki osoby, 74
 rozpoznawanie mowy, 78, 79, 83, 84, 86, 137
 rozpoznawanie mówcy, 78, 137
 rozpoznawanie obiektów, 58, 59, 117, 148, 150
 rozszerzona rzeczywistość, 41, 103
 rozszerzone sieci przejścia, 77
 rosyjskie drony, 50, 53, 95
 RPM, 67
 RRT, 72, 105, 106
 RSHPN, 129, 130
 RSSL, 128
 RT-G, 56
 RTK, 68, 69, 71, 114
 RTKLIB, 113
 rój, 15
 specyfikacja formalna, 127
 Sphinx, 84, 86
 spoofing, 89
 Spot, 133
 SR-10 Inspector, 120
 ST-GCN, 76
 stabilizacja temperatury, 64
 stabilizatory optyczne, 92, 94, 142
 stan emocjonalny mówcy, 135, 137, 145
 statystyczne przetwarzanie języka, 77, 85
 stealth, 48, 50, 52
 steganografia, 136, 140
 sterowanie, 60
 sterowanie automatyczne, 19, 60
 SAE, 18, 136, 160
 SAF, 39,
 Saildrone Voyager, 42
 SAR, 93
 scenariusz testowy, 136
 Sea Baby, 41
 Sea Hawk, 42
 Sea Hunter, 42
 Seagull, 41,
 segmentacja semantyczna, 67
 separacja źródeł dźwięku, 137
 serwomechanizmy wizyjne, 129, 131
 SfM, 134
 Shahed 136, 53
 Shahed 238, 53
 SHARC, 42
 Sharp Sword, 50
 SHRDLU, 77
 SiC, 98–100, 141, 143, 144
 sieci czujników, 86, 138
 sieci grafowo-splotowe, 76, 77
 sieci semantyczne, 77
 sieci sensoryczne, 86, 87, 138, 139
 sieć dekodera, 78, 84
 sieć multi-hop, 88,
 sieć typu Transformer, 79, 81
 SISO, 60
 SJ, 99
 skip-gram, 78, 82,
 SLAM, 66, 67, 69–71, 108, 110–112, 114
 SMR-100 Expert, 120, 121
 solwer, 62
 SoX, 86
 spaCy, 86
 specjalizowane układy fotoniczne, 96
 sterowanie haptyczne, 165
 sterowanie predykcyjne, 60, 62–64, 130
 sterowanie ruchem robota, 114
 sterowaniem siłą, 129
 stopień autonomii, 11, 17, 18, 37, 53, 54, 167
 Storm Shadow, 54
 stygmergia, 15, 129
 Suchoj S-70, 50
 Supercam S350, 51
 SVM, 117
 SWaP, 95
 SWIR, 93
 sylwetka człowieka, 10, 74, 110, 136

system koordynowany, 15,
 system mapowania terenu, 108
 system motywacyjny, 146, 150
 systemy fotowoltaiczne, 142
 systemy o zmiennej strukturze, 129
 systemy zasilania, 97, 98, 101, 144
 SYSTRAN, 77
 sztuczna inteligencja, 5, 22, 23, 27, 30, 35–39,
 42, 49, 52, 54–58, 60, 75, 83, 90, 103, 117,
 133, 137, 145, 151, 158, 162–164, 166
 sztuczny ptak, 56

 światłowody, 95

 Taktyczny Robot Miotany, 120
 TALOS, 103
 TDNN, 84
 techniki światłowodowe, 95,
 technologie fotoniczne,
 technologie światłowodowe, 92, 142
 TensorFlow, 85
 teoria Plutchika, 147
 Teoria Sprawiedliwej Wojny, 155
 TERPROM, 55
 TerrainNet, 68
 Thanatos, 52
 Thermonator, 46
 TIMIT, 137
 ToF, 67, 93, 164
 Togan, 47
 token, 79
 Tomahawk, 55
 transfer uczenia, 58, 59, 78
 Transformer, 79, 80, 81
 TRANSPORT, 125, 126
 trałowiec, 27
 Triton, 42
 TRL, 25, 34, 162, 165
 TRM, 120, 121
 TRURL.AI, 82
 truteń, 14
 tuba, 73, 74
 tureckie drony, 24, 46

 UAS, 24
 uczenie przeciwstawne, 79
 uczenie przez wzmacnianie, 79
 uczenie transferowe, 58, 59, 78
 UFOmap, 66
 UGS, 26
 UGV, 66, 111, 118, 119, 56
 UKF, 54, 70
 ukraińskie drony, 46, 50, 53
 ukraińskie drony morskie, 24, 41, 42
 układ nieholonomiczny, 115
 układy przekształtnikowe, 99–101
 USV, 24, 41

 UUV, 27
 UxS, 22, 23, 158
 V-2, 40
 V-BAT, 51, 52
 Valkyrie, 49
 Vampire, 50
 VAS, 103
 VFO, 114
 VIS-IR-THz, 141
 Vision 60 Q-UGV, 55
 voxel, 66
 Voyager, 42
 VTOL, 51, 64

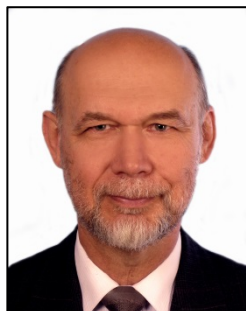
 WARMATE, 32, 49
 wartość zadana, 59, 60
 warunek końcowy, 127
 WDO, 138
 wentylator kanałowy, 51,
 wieloetapowe rozmieszczanie czujników, 88
 wielokamerowy system wizyjny, 134
 Wing Loong, 50
 word2vec, 78, 81
 współpraca z NATO, 31, 32
 wykorzystanie podatności, 90
 wyznaczanie pozycji czujników, 138
 węgierskie drony, 51
 węzły mobilne sieci, 29, 138
 węzły referencyjne, 138

 XAI, 42, 58, 90
 xAI, 91
 XLAUV, 43
 XOS, 102
 XQ-58A Valkyrie, 52

 YOLO, 74, 189
 YOLO-Pose, 74
 YOLOv8, 74

 zachowanie podsystemu, 127
 zadanie nadążania, 60
 zakłócenia, 29, 53, 60, 61, 64, 69, 71–73, 91,
 95, 96, 104, 113, 130, 165
 zalety regulacji predykcyjnej, 61
 zależność pojęciowa, 77
 zaplecze przemysłowe, 31, 162
 zasilanie bezprzewodowe, 96, 142
 zasilanie elektryczne, 142, 144
 zasilanie laserowe, 96, 142
 zdalne zasilanie dronów, 142
 ZMA-X, 44
 zmienne manipulowane, 60
 zmienne regulowane, 60
 złośliwe oprogramowanie, 91, 140, 141
 żyroskopy optyczne, 92, 93, 94, 95, 142

Biogramy autorów



Cezary Zielinski (mgr inż. 1982, dr 1988, dr hab. 1996, prof. 2012), dyrektor Instytutu Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej (PW), przewodniczący Sekcji Robotyki i członek Komitetu Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk, przewodniczący Rady Naukowej Centrum Badawczego Priorytetowego Obszaru Badawczego „Sztuczna inteligencja i robotyka” PW, pracownik na części etatu w Sieci Badawczej Łukasiewicz w Instytucie Automatyki i Pomiarów Przemysłowych. Pracował w Loughborough University of Technology w Wielkiej Brytanii i Nanyang Technological University w Singapurze. Jest redaktorem naczelnym czasopisma naukowego: „PAR – Pomiary, Automatyka, Robotyka”. Kierował ponad dwudziestoma projektami krajowymi i europejskimi. Zajmuje się robotyką, a w szczególności metodami programowania robotów oraz architekturami systemów sterowania robotów. Jest autorem i współautorem ponad 240 prac z tego zakresu.



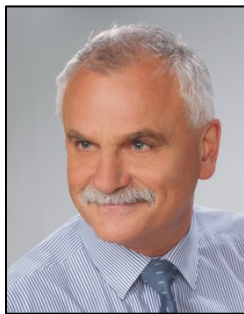
Jarosław Arabas (prof. dr hab. inż.) zajmuje się rozwojem metod optymalizacji inspirowanych ewolucją oraz wdrożeniami systemów sztucznej inteligencji, ze szczególnym uwzględnieniem energetyki. Ma w dorobku ponad 140 publikacji, w tym książkę, kilka podręczników oraz ponad 40 artykułów w czasopismach o zasięgu międzynarodowym. Kierownik Zakładu Sztucznej Inteligencji w Instytucie Informatyki Politechniki Warszawskiej (PW), przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja PW, członek Rady Naukowej Centrum Badawczego Priorytetowego Obszaru Badawczego „Sztuczna inteligencja i robotyka” PW, członek Rady Programowej Festiwalu Nauki w Warszawie, opiekun Koła Naukowego Sztucznej Inteligencji „Golem”.



Dominik Belter (mgr inż. 2007, dr 2012, dr hab. 2020), dyrektor Instytutu Robotyki i Inteligencji Maszynowej (IRIM) Politechniki Poznańskiej (PP), członek Komisji Informatyki i Automatyki Oddziału Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu. Od 2024 roku jest zastępcą przewodniczącego Polskiej Sekcji IEEE Robotics and Automation Society. W latach 2013-2016 spędził rok pracując jako postdoc w Intelligent Robotics Laboratory na Uniwersytecie w Birmingham. Pełni funkcję członka rady naukowej konferencji CLAWAR i EMCR oraz redaktora pomocniczego konferencji IEEE ICRA. Jest redaktorem pomocniczym w czasopiśmie IEEE Robotics and Automation Letters. Kierował pięcioma projektami krajowymi finansowanymi z NCN i NCBR. Zajmuje się robotyką mobilną i manipulacyjną, a w szczególności systemami percepcji i planowania ruchu. Autor ponad 110 prac z tego zakresu.



Włodzimierz Kasprzak (mgr inż. 1981, dr 1987, dr hab. 2002, prof. 2014), kierownik Zespołu Percepcji Maszyn w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej, członek IEEE (w tym IEEE Computational Intelligence Society, IEEE Signal Processing Society, IEEE SMC Society), w przeszłości Sekretarz i Przewodniczący Rady Rewizyjnej Towarzystwa Przetwarzania Obrazów. Pracował w IPI PAN, Instytutach IMM i PIAP oraz za granicą w Uniwersytecie Erlangen-Norymberga (RFN) i RIKEN (Japonia). Odbił dłuższe staże naukowe w Technische Hochschule Darmstadt, FORWISS Erlangen (RFN) i Uniwersytecie Keio (Japonia). Kierował projektami krajowymi i projektem europejskim. Zajmuje się rozpoznawaniem obrazów i sygnałów mowy oraz metodami sztucznej inteligencji. Jest autorem ponad 170 prac z tego zakresu.



Zdzisław Kowalczyk, prof. drhab. inż. (1978-2003), pracuje od 1978 r. na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej. Wizyty na University of Oulu/1985, Australian National University/1987, Technische Hochschule Darmstadt/ 1989 oraz na George Mason University/ 1990-1991. Założył Katedrę Systemów Decyzyjnych i Robotyki (2006-2024). Od 2003 roku jest redaktorem Pomorskiego Wydawnictwa Naukowo-Technicznego, od 2016 roku jest prezesem Towarzystwa Konsultantów Polskich (NOT), od 2011 roku Polskiego Towarzystwa Pomiarów, Automatyki i Robotyki (POL-SPAR) oraz MNO of IFAC, a ponadto prowadzi IFAC TC Intelligent Autonomous Vehicles (2020-2026). Jest członkiem Komitetu Automatyki i Robotyki PAN od 1999 r., a także redaktorem Int. J. of Applied Mathematics and Computer Science od 1999 r. i IEEE Tr. on Cognitive and Developmental Systems od 2019 r. Zainteresowania: automatyka, robotyka, sztuczna inteligencja i diagnostyka. Publikacje: ok. 30 książek, ok. 130 artykułów (52/JCR) oraz ponad 320 referatów i rozdziałów. Jest laureatem nagród Ministra Edukacji Narodowej (1990 i 2003), nagrody NFP (1999) oraz Medalu SEP im. prof. Nowackiego (2014).



Maciej Ławryńczuk (mgr inż. 1998, dr 2003, dr hab. 2013, prof. 2022), zastępca Dyrektora ds. Nauki Instytutu Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej (PW). Jest kierownikiem specjalności automatyka i robotyka na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych PW. Jest autorem lub współautorem ponad 200 publikacji, w tym 7 książek oraz 90 artykułów opublikowanych w czasopismach. Jego zainteresowania badawcze obejmują zaawansowane algorytmy sterowania, w szczególności algorytmy regulacji predykcyjnej (ang. Model Predictive Control, MPC), techniki sztucznej inteligencji, w szczególności sieci neuronowe oraz zagadnienia modelowania i symulacji. Jest redaktorem naukowym czasopism ISA Transactions (Elsevier) oraz Electronics (MDPI). Brał udział w ponad 30 projektach badawczych oraz badawczo-rozwojowych.



Michał Malinowski (mgr inż. 1978, dr 1985, dr hab. 2000, prof. 2004). Zajmuje się optoelektroniką, a w szczególności modelowaniem i badaniami spektroskopowymi aktywnych ośrodków i struktur fotonicznych. Autor ponad 180 artykułów i 250 prac konferencyjnych z tego zakresu. Zagraniczne staże naukowe odbywał m.in. na francuskich uniwersytetach w Grenoble, Lyonie i Clermont-Ferrand. Kierował ponad dwudziestoma projektami badawczymi krajowymi i międzynarodowymi. Kierownik Zakładu Optoelektroniki, dyrektor Instytutu Mikroelektroniki i Optoelektroniki, dziekan Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych PW w latach 2020-2024. Członek Rady Narodowego Centrum Nauki (2012-2016), członek korespondent Polskiej Akademii Nauk od 2022 r., członek Senatu Politechniki Warszawskiej od 2020 r.



Alicja Mazur (mgr inż. 1990, dr 1997, dr hab. 2011), w latach 2016-2021 kierownik Katedry Cybernetyki i Robotyki Politechniki Wrocławskiej (PWr), członek Komitetu Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk, przewodnicząca Komitetu Naukowego Krajowej Konferencji Robotyki. Zajmuje się robotyką, a w szczególności projektowaniem nieliniowych układów sterowania dla robotów, zwłaszcza z ograniczeniami nieholonomicznymi. Autorka ponad 110 prac z tego zakresu.



Wojciech Mazurczyk (mgr inż. 2004, dr 2009, dr hab. 2014, prof. 2024) jest profesorem w Instytucie Informatyki na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej. Równolegle pracuje także na FernUniversitaet in Hagen w Niemczech w zespole Parallelism and VLSI Group na Wydziale Matematyki i Informatyki. Autor lub współautor 2 książek, ponad 200 artykułów naukowych, 2 zgłoszeń patentowych oraz ponad 40 wykładów zaproszonych w tematyce cyberbezpieczeństwa. Brał udział w wielu krajowych i międzynarodowych projektach badawczych jako kierownik lub główny wykonawca. Od 2016 roku jest redaktorem naczelnym otwartego czasopisma Journal of Cyber Security and Mobility. Pięciokrotnie (tj. w latach 2019-2023) wskazany jako jeden z 2% najczęściej cytowanych naukowców w swojej dziedzinie według Stanford List of Top Scientists.



Ewa Niewiadomska-Szynkiewicz (dr 1995, dr hab. 2005, prof. 2017), prodziekan ds. nauki Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych (PW), kierownik Zespołu Złożonych Systemów w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej (PW), członek Komitetu Automatyki i Robotyki PAN, wiceprzewodnicząca Rady Naukowej Instytutu Badań Systemowych PAN, członek Rady Fundacji Krzewienia Nauk Systemowych. W latach 2009-2022 dyrektor ds. naukowych NASK-PIB i kierownik Centrum Badań i Transferu Technologii, w latach 2022-2024 ekspert i doradca dyrektora Głównego Instytutu Górnictwa. W latach 1999-2001 pracownik Knowledge Support Systems Group plc., UK. Kierownik i wykonawca ponad 50 krajowych i międzynarodowych projektów naukowo-badawczych. Autorka i współautorka ponad 200 publikacji naukowych. Specjalizuje się w modelowaniu, optymalizacji, symulacji i sterowaniu złożonymi systemami.



Dariusz Pazderski (mgr inż. 2002, dr 2007, dr hab. 2017), dyrektor Instytutu Automatyki i Robotyki Politechniki Poznańskiej, członek Komitetu Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk (PAN) oraz Komisji Informatyki i Automatyki przy poznańskim oddziale PAN. Zajmuje się nieliniowymi metodami sterowania w robotyce, sterowaniem odpornym i adaptacyjnym, planowaniem ruchu, estymacją stanu i zastosowaniami robotyki mobilnej. Jego zainteresowania naukowe obejmują również technologie dla zautomatyzowanych obserwatoriów optycznych. Jest autorem lub współautorem ponad 100 prac w czasopiśmie i materiałach konferencyjnych. Brał udział w licznych projektach badawczych finansowanych ze środków krajowych oraz Unii Europejskiej. Kierował dwoma projektami inwestycyjnymi, dotyczącymi opracowania nowej aparatury badawczej dla zautomatyzowanych obserwatoriów naziemnych.



Piotr Skrzypczyński (mgr inż. 1993, dr 1997, dr hab. 2007, prof. 2020), kierownik Zakładu Robotyki w Instytucie Robotyki i Inteligencji Maszynowej Politechniki Poznańskiej. Członek Komitetu Automatyki i Robotyki PAN. Członek komitetów redakcyjnych czasopism (AMCS, JAMRIS, Industrial Robot). Kierownik lub główny wykonawca projektów badawczych i rozwojowych finansowanych przez NCN, NCBiR oraz Komisję Europejską, w tym w programach Horizon 2020, Horizon Europe i CHIST-ERA. Autor ponad 180 publikacji z zakresu robotyki i informatyki. Jego zainteresowania naukowe obejmują roboty autonomiczne, jednoczesną lokalizację i budowę mapy (SLAM), percepcję maszynową i uczenie maszynowe.



Jan Szmidi (prof. dr hab. inż.), Rektor Politechniki Warszawskiej (2012-2020), Przewodniczący Konferencji Rektorów Akademickich Szkół Polskich KRASP (2016-2020), Honorowy Przewodniczący KRASP (2020-2024), członek Prezydium Rady Głównej Nauki i Szkolnictwa Wyższego, członek Komisji do spraw Etyki w Nauce PAN, członek Konwentu Honorowego Ekspertów KRASP. Zajmuje się technologiami elektronowymi, cienkimi warstwami materiałów oraz wytwarzaniem metodami plazmowymi. Przez ostatnie 20 lat koncentrował się głównie na technologiach materiałów na potrzeby energoelektroniki, w szczególności na bazie SiC i GaN oraz cienkich warstwach materiałów funkcjonalnych. Inicjator, wykonawca lub kierownik ponad 70-ciu projektów badawczych i badawczo-rozwojowych, również z zakresu obronności i bezpieczeństwa państwa. Współautor lub autor ponad 400 publikacji naukowych, współautor 15 patentów i zgłoszeń patentowych.



Mariusz Sochacki (mgr inż. 2002, dr 2007, dr hab. 2017), kierownik Zakładu Technologii Mikrosystemów i Materiałów Elektronicznych w Instytucie Mikroelektroniki i Optoelektroniki Politechniki Warszawskiej, członek Rady Naukowej Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny. Główny wykonawca ponad dwudziestu projektów krajowych i europejskich. Kierownik projektu Power electronics for green energy efficiency realizowanego w ramach europejskiego programu Interreg Baltic Sea Region. Zajmuje się zastosowaniami nowoczesnych przyrządów półprzewodnikowych mocy w zaawansowanych układach energo-elektronicznych, a w szczególności opracowaniem konstrukcji i wytwarzaniem tego typu przyrządów w technologii węgla krzemu, azotku galu oraz innych półprzewodników z szeroką przerwą energetyczną. Autor ponad 80 prac z tego zakresu.



Piotr Szykarczyk (dr hab. inż.), dyrektor Sieć Badawcza Łukasiewicz – Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów PIAP. Kieruje blisko 300-osobowym zespołem odnoszącym sukcesy w działalności badawczo-rozwojowej w obszarze szeroko pojętej automatyki i robotyki oraz prowadzi działalność analityczną i ekspercką w zakresie bezzałogowych pojazdów lądowych w zastosowaniach wojskowych oraz w zakresie robotów mobilnych do zastosowań cywilnych. Współtwórca pierwszych polskich robotów pirotechnicznych Inspector i Expert stosowanych w kraju i za granicą. Autor i współautor 12 zgłoszeń patentowych i ponad 70 publikacji naukowo-technicznych w wydawnictwach polskich i zagranicznych. Członek m.in.: Komitetu Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk, Rady Głównej Instytutów Badawczych oraz International Association for Automation and Robotics in Construction. Wiceprezes Izby Zaawansowanych Technologii IZTECH. Jego zainteresowania zawodowe związane są z robotyką mobilną, zastosowaniem sztucznej inteligencji w robotyce, sterowaniem systemami autonomicznymi z wykorzystaniem sterowników rozproszonych o budowie inspirowanej wzorcami biologicznymi, teleoperacją na duże odległości oraz zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych.



Wojciech Szykiewicz (mgr inż. 1985, dr 1996, dr hab. 2016) prof. uczelni, zatrudniony w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej. Zastępca dyrektora i członek Rady Naukowej Centrum Naukowego Automatyki i Technik Informacyjno-Decyzyjnych (1999-2005) Politechniki Warszawskiej. Jego zainteresowania naukowe w obszarze robotyki koncentrują się wokół zagadnień planowania zadań i ruchu robotów, cyberbezpieczeństwa oraz zastosowań sztucznej inteligencji. Autor ponad 130 publikacji naukowych z tego obszaru. Brał udział w ponad 30 projektach krajowych i międzynarodowych.



Józef Wrona (mgr inż. 1985, dr inż. 1998, dr hab. inż. 2019). Był Dyrektorem Instytutu Budowy Maszyn w Wojskowej Akademii Technicznej (WAT). W ramach NATO Advanced Fellowships Programme odbył staż naukowy w Purdue University, w USA. W Ministerstwie Obrony Narodowej był Krajowym Dyrektorem ds. Badań i Technologii Obronnych, w tym w Organizacji NATO ds. Badań/Nauki i Technologii (NATO RTO/STO) i Europejskiej Agencji Obrony (EDA). Był Przewodniczącym Komitetu Sterującego w Narodowym Centrum Badań i Rozwoju. Uczestniczył w zarządzaniu (po stronie rządowej) 57 programami i projektami krajowymi i międzynarodowymi, oraz kilkunastoma projektami po stronie wykonawcy. Zajmuje się inżynierią mechaniczną, a szczególnie załogowymi i bezzałogowymi platformami lądowymi. Autor ponad 50 prac z tego zakresu. Dyrektor Programu Współpracy Międzynarodowej w Obszarze Technologii Obronnych w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP. Członek Rady Dyrektorów I.A.A.R.C. (International Association for Automation and Robotics in Construction).



Teresa Zielińska (mgr inż. 1979, dr 1987, dr hab. 1995, prof. 2005), wicedyrektor Instytutu Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej (PW), vice przewodnicząca Komitetu Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk, prezydent sieci akademickiej HERITAGE Indie-Europa, członek Scientific Advisory Board CHIST ERA (europejska instytucja finansująca badania w zakresie technologii informacyjno-komunikacyjnych). Lokalna koordynatorka międzynarodowego programu Japan – Europe Master on Advanced Robotics oraz projektu europejskiego Capacity Building in Robotics and Autonomous Systems in India. Pracowała w Loughborough University of Technology w Wielkiej Brytanii i Nanyang Technological University w Singapurze. Profesor wizytujący w szeregu uczelni Europy, Azji i Australii – m.in. Griffith University (Australia), Waseda University (Japonia). Współredaktorka czasopisma naukowego Robotica (Cambridge). Zajmuje się robotyką, a w szczególności syntezą ruchu maszyn koczających i robotów humanoidalnych oraz zastosowaniami metod sztucznej inteligencji do rozpoznawania działań człowieka. Autorka ponad 300 prac z tego zakresu.