

dr inż. Wojciech Kowalczyk
Politechnika Poznańska
Wydział Informatyki
Instytut Automatyki i Robotyki
ul. Piotrowo 3A
60-965 Poznań

Poznań, 26.04.2019

Załącznik nr 2A

do wniosku z dn. 26.04.2019

o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego
w dziedzinie Nauk Technicznych w dyscyplinie Automatyka i Robotyka

Autoreferat w języku polskim

AUTOREFERAT

1. Imię i Nazwisko

Wojciech Kowalczyk

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- *Stopień doktora nauk technicznych* w dyscyplinie Automatyka i Robotyka, Politechnika Poznańska, Wydział Informatyki i Zarządzania, Katedra Sterowania i Inżynierii Systemów, tytuł rozprawy: „Algorytmy sterowania formacją robotów mobilnych”, promotor prof. dr hab. inż. Krzysztof Kozłowski, Politechnika Poznańska, recenzenci: prof. dr hab. inż. Mirosław Galicki, Uniwersytet Zielonogórski, dr hab. inż. Przemysław Herman, Politechnika Poznańska, 23.09.2008 r.
- *Dyplom ukończenia studiów magisterskich*, Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny, kierunek Automatyka i Robotyka, tytuł pracy: „Sterowanie robotem o elastycznych ogniwach”, promotor: dr inż. Piotr Dutkiewicz, rok 1998.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

2008 – teraz – zatrudnienie na stanowisku adiunkta, Wydział Informatyki, Instytut Automatyki i Robotyki, (do 2010 r. na Wydziale Informatyki i Zarządzania; do 2017 r. w Katedrze Sterowania i Inżynierii Systemów) Politechnika Poznańska,

2006-2008 – asystent w Katedrze Sterowania i Inżynierii Systemów na Wydziale Informatyki i Zarządzania, Politechnika Poznańska,

2002-2005 – asystent w Instytucie Sterowania i Inżynierii Systemów na Wydziale Informatyki i Zarządzania, Politechnika Poznańska,

2000-2002 – asystent w Instytucie Automatyki i Inżynierii Informatycznej na Wydziale elektrycznym, Politechnika Poznańska.

1999-2000 – praca (14 miesięcy) na stanowisku programisty w firmie FORcom PHU, Poznań (nie jest to jednostka naukowa).

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789):

a) tytuł osiągnięcia naukowego

Podstawę wniosku habilitacyjnego stanowi osiągnięcie przedstawione w cyku publikacji powiązanych tematycznie, zatytułowanych:

**„Lokalne i globalne funkcje sztucznych potencjałów
w sterowaniu systemami robotów mobilnych”**

b) Wykaz publikacji zaliczonych do cyklu

- I. W. Kowalczyk (100%), „Formation Control and Distributed Goal Assignment for Multi-Agent Non-Holonomic Systems”, Applied Sciences, 9, 1311, 2019, doi:10.3390/app9071311, **IF 1,689** (z 2019), 25pkt.

Mój wkład polegał na opracowaniu algorytmu sterowania łączącego techniki śledzenia trajektorii referencyjnej z unikaniem kolizji i mechanizmem zamiany celów. W pracy zawarto analizę stabilności układu w zamkniętej pętli, weryfikację mechanizmu zamiany celów w oparciu o funkcję podobną do Lapunowa oraz rozbudowaną symulację dla formacji 48 robotów. Mój udział wynosi 100%.

- II. W. Kowalczyk (100%), „Rapid Navigation Function Control for Two-Wheeled Mobile Robots”, Journal of Intelligent & Robotic Systems, 93 (3-4), str. 687-697, 2019, doi: 10.1007/s10846-018-0879-4, **IF 1,583** (z 2017), 25pkt.

Mój wkład polegał na zaproponowaniu algorytmu sterowania umożliwiającego strojenie stanów przejściowych (poprzez lokowanie wartości własnych zlinearyzowanego układu zamkniętego), analizie zbieżności oraz eksperymentalnej weryfikacji z wykorzystaniem robota MTracker. Ponadto przeprowadzono testy algorytmu dla punktu siodłowego oraz dobrano parametry dla metody detekcji punktów siodłowych. Mój udział wynosi 100%.

- III. W. Kowalczyk (70%), K. Kozłowski (30%), „Trajectory Tracking and Collision Avoidance for the Formation of Two-Wheeled Mobile Robots”, Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 9 stron, 2019, praca przyjęta do publikacji (list potwierdzający w załączniku), **IF 1,361** (z 2017), 25pkt.

Mój wkład polegał na zaproponowaniu metody sterowania, udziale w przeprowadzeniu dowodu stabilności oraz wykonaniu symulacji numerycznych zamieszczonych w artykule. Mój udział procentowy szacuję na 70%.

- IV. W. Kowalczyk (55%), M. Przybyła (25%), K. Kozłowski (20%), „Set-point Control of Mobile Robot with Obstacle Detection and Avoidance Using Navigation Function - Experimental Verification”, *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 85 (3-4), str. 539-552, 2017, doi: 10.1007/s10846-016-0388-2, **IF 1,583** (z 2017), 25pkt.

Mój wkład polegał na implementacji algorytmu sterowania opartego na funkcji nawigacji oraz udziale w testach eksperymentalnych z wykorzystaniem robota MTracker. Mój udział procentowy szacuję na 55%.

- V. W. Kowalczyk (55%), M. Przybyła (25%), K. Kozłowski (20%), Rapid Navigation Function Control for Omnidirectional Mobile Platform, 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), str. 137-140, Międzyzdroje, 28-31 sierpień 2017, doi: 10.1109/MMAR.2017.8046812. Punktacja MNiSW: 15pkt. (Web of Science).

Mój wkład polegał na opracowaniu algorytmu sterowania do punktu, przeprowadzeniu analizy zbieżności, implementacji we frameworku ROS (Robot Operating System) oraz przeprowadzeniu eksperymentów z wykorzystaniem robota mobilnego Kuka youBot. Mój udział procentowy szacuję na 55%. Zagadnienia zaprezentowane w artykule przedstawiałem w trakcie wystąpienia na sesji konferencyjnej.

- VI. W. Kowalczyk (100%), „Rapidly Converging Navigation Function Control for Differentially Driven Mobile Robots”, *Robot Motion and Control (RoMoCo)*, 2017 11th International Workshop on, str. 244-250, 3-5 Lipiec 2017, Wąsowo, Polska, doi: 10.1109/RoMoCo.2017.8003920, Punktacja MNiSW: 15pkt. (Web of Science)

Mój wkład polegał na opracowaniu algorytmu sterowania dla nieholonomicznego robota mobilnego, przeprowadzeniu analizy stabilności oraz wykazaniu, że wprowadzone współczynniki umożliwiają strojenie zbieżności algorytmu. Ponadto przeprowadziłem symulacje numeryczne oraz eksperymenty z wykorzystaniem robota Kuka youBot, w którym na poziomie oprogramowania prowadzono ograniczenie możliwości ruchu poprzecznego (jest to robot typu omnidirectional) w celu uczynienia go platformą nieholonomiczną. Mój udział wynosi 100%. Zagadnienia zaprezentowane w artykule przedstawiałem w trakcie wystąpienia na sesji konferencyjnej.

- VII. W. Kowalczyk (55%), M. Przybyła (25%), K. Kozłowski (20%), „Saddle point detection of the navigation function in nonholonomic mobile robot control”, 2016

21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Miedzyzdroje, 2016, pp. 936-941, doi: 10.1109/MMAR.2016.7575263. Punktacja MNiSW: 15 (Web of Science).

Mój wkład polegał na zaprojektowaniu metodologii detekcji, że robot mobilny znalazł się w punkcie siodłowym oraz przeprowadzeniu testów numerycznych metody. Mój udział procentowy szacuję na 55%. Zagadnienia zaprezentowane w artykule przedstawiałem w trakcie wystąpienia na sesji konferencyjnej.

- VIII. W. Kowalczyk (70%), K. Kozłowski (30%), 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), str. 123-135, 2016, doi: 10.12700/APH.13.1.2016.1.9, **IF 0.745** (z 2016), 20pkt.

Mój wkład polegał na implementacji algorytmu dla przeszkód typu gwiazda, w tym przeszkód niewypukłych należących do tej klasy oraz na przeprowadzeniu symulacji numerycznych i eksperymentów z wykorzystaniem robota MTracker. Mój udział procentowy szacuję na 70%.

- IX. W. Kowalczyk (80%), M. Michałek (10%), K. Kozłowski (10%), „Trajectory tracking control with obstacle avoidance capability for unicycle-like mobile robot”, Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 60 (3), str. 537–546, 2012, doi: 10.2478/v10175-012-0066-x, **IF 0,98** (z 2012), 30pkt.

Mój wkład polegał na zaprojektowaniu rozszerzenia algorytmu orientowania pól wektorowych (VFO) o funkcję unikania kolizji z przeszkodami statycznymi, przeprowadzeniu analizy stabilności oraz udziale w serii eksperymentalnych testów algorytmu, w których wykorzystano robota mobilnego MiniTracker. Mój udział procentowy szacuję na 80%.

- X. W. Kowalczyk (65%), K. Kozłowski (25%), J. Tar (10%), „Trajectory Tracking for Formation of Mobile Robots”. In: Kozłowski K.R. (eds) Robot Motion and Control 2009, Lecture Notes in Control and Information Sciences, vol 396. Springer, London, doi: 10.1007/978-1-84882-985-5_6, 13pkt.

Mój wkład polegał na zaprojektowaniu algorytmu sterowania uwzględniającego unikanie kolizji między robotami i z przeszkodami statycznymi, przeprowadzeniu dowodu stabilności dla robota unikającego kolizji z pojedynczą przeszkodą (rozdział 6.3.1) oraz przeprowadzaniu symulacji numerycznych ilustrujących działanie metody. Mój udział procentowy szacuję na 65%.

Tab. 1. Analiza wskazanych pozycji jednolitego cyklu czasopism

Nr publikacji	Nazwa czasopisma/konferencji	Punktacja wg ministerialnego wykazu czasopism	Impact Factor	Wkład wnioskodawcy	Rok publikacji
I	Applied Sciences	25	1,689 (z 2019)	100%	2019
II	Journal of Intelligent & Robotic Systems	25	1,583 (z 2017)	100%	2019
III	Bulletin of the Polish Academy of Sciences	25	1,361 (z 2017)	70%	2019
IV	Journal of Intelligent & Robotic Systems	25	1,583 (z 2017)	55%	2017
V	MMAR - 22rd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics	15 (Web of Science)	Nie dotyczy	55%	2017
VI	RoMoCo - 11th International Workshop on Robot Motion and Control	15 (Web of Science)	Nie dotyczy	100%	2017
VII	MMAR - 21rd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics	15 (Web of Science)	Nie dotyczy	55%	2017
VIII	Acta Polytechnica Hungarica	20	0,745 (z 2016)	70%	2016
IX	Bulletin of the Polish Academy of Sciences	30	0,98 (z 2012)	80%	2012
X	Lecture Notes in Control and Information Sciences	13	nie wyzn.	65%	2009

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

**„Lokalne i globalne funkcje sztucznych potencjałów
w sterowaniu systemami robotów mobilnych”**

Cykl obejmuje dziesięć publikacji wybranych przez habilitanta spośród opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora. Należy zaznaczyć, że wszystkie jego 30 artykułów, które ukazały się w tym okresie dotyczy zagadnienia sterowania robotami mobilnymi. Habilitant zdecydował się wybrać 10 reprezentatywnych.

Cel naukowy

Szybki rozwój technologii, na których opiera się robotyka mobilna, w tym postęp w zakresie wydajnych architektur komputerowych o niskim zużyciu energii, rozwój technologii mikroelektronicznych (w tym związanych z komunikacją bezprzewodową) oraz dostępność nowych rozwiązań w zakresie napędu i mechaniki sprawiły, że w wielu zastosowaniach robotyki mobilnej zaczęto rozważać możliwość dekompozycji zadania w taki sposób by mogłoby ono być realizowane przez wiele robotów. Wiązano to z szeregiem korzyści, które można uzyskać stosując takie rozwiązanie zamiast pojedynczego robota:

- zrównoleglenie realizacji podzadań,
- większa odporność systemu na awarie (robot, który uległ awarii może być zastąpiony innym, sprawnym robotem),
- skalowalność (rozumiana jako możliwość równoległego działania na większą skalę przy wykorzystaniu większej liczby robotów),
- podział zadania między roboty przeznaczone do specjalnych podzadań, np. część robotów wyposażona jest w specjalistyczną aparaturę pomiarową, inne natomiast w efekторы umożliwiające operowanie w przestrzeni roboczej,
- obniżenie kosztów związane z tym, że zbudowanie wielu mniejszych, powtarzalnych konstrukcji robotów jest tańsze niż budowa pojedynczego robota lub krótkiej ich serii.

Z drugiej strony realizacja zadania w systemie wielorobotowym wiąże się z szeregiem wyzwań:

- podzadania są realizowane przez osobne systemy (często autonomiczne) a to oznacza, że może zaistnieć potrzeba bezprzewodowej komunikacji między nimi,
- w przestrzeni zadania pojawi się nie jeden a wiele robotów i muszą one być zdolne nie tylko do unikania kolizji z przeszkodami zastanymi ale również między sobą,
- realizacja zadania może wymagać współpracy, koordynacji lub synchronizacji robotów,
- zadanie dla grupy robotów jest zlecane lub dozorowane przez zdalny system, który komunikuje się z robotami bezprzewodowym kanałem komunikacyjnym,
- konieczne jest zaproponowanie nowych algorytmów planowania i sterowania umożliwiających realizację zadań zgodnie ze specyfikacją.

Większość z wymienionych wyzwań znalazła się w obszarze zainteresowań naukowych habilitanta i znajduje odzwierciedlenie w prezentowanym cyklu publikacji. W swoich badaniach uwzględnił on wykorzystanie komunikacji bezprzewodowej w celu szybszej realizacji zadania. We wszystkich proponowanych algorytmach uwzględniał problem unikania kolizji między robotami zaś propozycje nowych algorytmów są jednym z głównych tematów publikacji.

W wyniku analizy rozwiązań zadania bezkolizyjnego ruchu dla zespołu robotów mobilnych habilitant wyróżnił dwie grupy. W pierwszej problem unikania kolizji rozwiązywany jest na poziomie planowania. Planer (często zcentralizowany) poszukuje najlepszych trajektorii dla poszczególnych robotów [10], [11] a następnie realizowane jest śledzenie tych trajektorii przez układ sterowania działający w zamkniętej pętli. W drugim podejściu unikanie kolizji realizowane jest na poziomie sterowania w zamkniętej pętli [7], [8] natomiast trajektorie referencyjne robotów wynikają z zadania i nie muszą być modyfikowane w celu unikania kolizji. Według obserwacji habilitanta pierwsze z wymienionych podejść dominuje w literaturze. Jego zaletą jest dekompozycja problemu na dwie części, które dalej rozpatrywane są osobno co znacząco ułatwia syntezę rozwiązania. Istotną wadą jest natomiast znaczna złożoność obliczeniowa procesu planowania oraz mała odporność na zmianę sytuacji w przestrzeni roboczej, która może wynikać np. z niedokładności modelu, niedokładnego śledzenia trajektorii referencyjnych przez roboty (może to być spowodowane zjawiskiem poślizgu) lub też wpływu zmian w samej przestrzeni roboczej. Habilitant jest zwolennikiem podejścia, w którym moduł unikania kolizji jest integralną częścią sterownika, działającą w sposób reaktywny. To wydatnie zmniejsza ilość obliczeń potrzebnych do realizacji zadania, choć zazwyczaj

komplikuje syntezę sterownika działającego w zamkniętej pętli. Takie podejście jest w literaturze znacznie rzadziej rozważane.

Główny cel jaki postawił sobie habilitant był następujący:

- Zaproponowanie nowych algorytmów sterowania grupą robotów mobilnych, uwzględniających reaktywne unikanie kolizji oraz przeprowadzenie teoretycznej weryfikacji stabilności układu w zamkniętej pętli.

W toku prowadzonych badań wyłonił się problem, którego rozwiązanie stało się kolejnym celem prac badawczych:

- Kształtowanie przebiegów przejściowych w systemach jedno- i wielorobotowych w celu polepszenia zbieżności. W ramach tej tematyki znalazł się również problem punktów siodłowych, które mogą wystąpić, i w których sterowanie się degeneruje.

Główny cel był motywowany faktem, że w większości znanych rozwiązań unikanie kolizji realizowane jest na poziomie planera trajektorii [10], [11], [17], [18]. Wadą takiego podejścia jest to, że robot(y) nie mogą reagować w czasie rzeczywistym na zmiany konfiguracji przeszkód, ponieważ działanie planera jest kosztowne obliczeniowo. Celem habilitanta była integracja mechanizmu unikania kolizji z algorytmem śledzenia. Wcześniej były znane publikacje proponujące tego typu rozwiązania jednak nie było ich wiele [7], [8]. Ponadto, zdaniem habilitanta, ważne było rozstrzygnięcie czy problem punktów siodłowych można w praktyce zignorować (punkty siodłowe, stanowią zbiór miary zero i w związku z tym część badaczy uważa, że w praktyce nie stanowią one problemu) czy też należy zaproponować procedurę umożliwiającą wyjście robota z takiej lokalizacji (niektórzy badacze proponowali takie rozwiązania wcześniej [2], natomiast nie przeprowadzili żadnej eksperymentalnej walidacji).

Zadanie sterowania nieholonomicznym robotem mobilnym w przestrzeni roboczej z przeszkodami wiąże się z jednoczesnym rozwiązaniem dwóch podzadań, które, przynajmniej przejściowo, mogą pozostawać w sprzeczności. Pierwsze z nich, będące głównym celem, to redukcja błędu, rozumianego jako różnica między wektorem zadany a wektorem współrzędnych konfiguracyjnych robota. Ten pierwszy może być stały (sterowanie do punktu) lub zmieniać się (śledzenie ścieżki bądź trajektorii referencyjnej). Drugie podzadanie to unikanie kolizji z przeszkodami znajdującymi się w przestrzeni zadaniowej.

Pierwsze z wymienionych podzadań, w przypadku robota nieholonomicznego (poruszającego się w otwartej przestrzeni), jest nietrywialne ze względu na fakt niedosterowania układu. W przypadku robota dwukołowego, obiekt posiada trzy zmienne konfiguracyjne, reprezentujące położenie w przestrzeni euklidesowej i orientację platformy mobilnej oraz dwa wejścia sterujące prędkościami linową i kątową. Z niedosterowaniem łączą się problemy konfiguracji osobiwych, w których sterowanie może się degenerować i w związku z tym, w celu zapewnienia zbieżności konieczne jest stosowanie specjalnych zabiegów, np. modyfikowanie algorytmu sterowania.

Zagadnienie unikania kolizji również jest nietrywialne. Może ono zostać rozwiązane na etapie planowania ruchu lub jako część sterowania działającego w pętli zamkniętej. Wnioskodawca zajmował się drugim podejściem, charakteryzującym się działaniem reaktywnym. Jego bezsprzeczną zaletą jest odporność na zmieniającą się sytuację, w szczególności, jeżeli przestrzeń robocza jest dynamiczna lub gdy obiektem sterowania jest grupa robotów stanowiących dla siebie wzajemnie przeszkody. Z unikaniem kolizji związany jest problem lokalnych minimów oraz punktów siodłowych. Szczególnie te pierwsze stanowią istotny problem. Mechanizm unikania kolizji powinien być projektowany w taki sposób by nie powstawały lokalne minima lub zadanie powinno być zdefiniowane w taki sposób by samoczynnie zanikały (jest to możliwe w przypadku systemów wielorobotowych).

Drugi cel habilitanta, czyli kształtowanie przebiegów przejściowych jest skutkiem próby zastosowania metody funkcji nawigacji do sterowania systemem wielu robotów. W literaturze były dostępne metody wykorzystujące to podejście dla grup robotów [12] – [14], w tym również latających [15], [16], jednak autorzy przeprowadzali tylko testy symulacyjne i zdaniem habilitanta nie poświęcili dość uwagi bardzo wolnej zbieżności. Problem ten jest spowodowany faktem, że w pewnych sytuacjach strojenie funkcji nawigacji, które ma zapewnić niewystępowanie minimów lokalnych prowadzi do pojawienia się obszarów, w których funkcja nawigacji ma małe nachylenie. W rezultacie, generowany gradient, choć kieruje robota do minimum globalnego, to ze względu na małą wartość modułu gradientu zbieżność jest bardzo wolna. Prace (II) i (IV) prezentują rozwiązanie tego problemu dla dwóch typów platform mobilnych: dwukołowego robota sterowanego różnicowo oraz dla robota typu omnidirectional.

Układ sterowania do punktu lub śledzenia trajektorii referencyjnej z jednoczesnym unikaniem kolizji posiada wszystkie wyżej wymienione cechy, co powoduje, że sterowanie

takimi układami jest trudne. Głównym założeniem jakie miały spełniać opracowywane algorytmy była możliwość ich praktycznej implementacji. Wszystkie badane i zaprojektowane algorytmy były testowane symulacyjnie a znaczna ich część również eksperymentalnie, z wykorzystaniem różnych robotów mobilnych dostępnych w laboratoriach Instytutu Automatyki i Robotyki na Politechnice Poznańskiej (MiniTracker, MTracker, Kuka youBot). Habilitant zdobył doświadczenie pozwalające uwzględnić w procesie projektowania ograniczenia praktyczne, niekoniecznie dostrzegane przez badaczy-teoretyków.

Niezależnie od takiego praktycznego, inżynierskiego podejścia habilitant stosował metody teorii sterowania. Wszystkie rozwiązania rozpatrywane w jego pracach mają charakter analityczny i są poparte dowodami stabilności (w niektórych przypadkach również zbieżności). Habilitant w postępowaniach dowodowych posługiwał się pierwszą oraz drugą metodą Lapunowa. Szczególną uwagę poświęcił stanom, w których sterowanie może się degenerować, co wynika z właściwości robotów nieholonomicznych lub specyficznego wariantu usytuowania celu oraz przeszkód (punkty siodłowe), w tym detekcji takich stanów oraz metodom ich opuszczenia.

Sterowanie oparte na lokalnych funkcjach sztucznych potencjałów

Istotną część cyklu publikacji stanowią te poświęcone zagadnieniu śledzenia trajektorii referencyjnej przez formację robotów. Zainteresowania habilitanta koncentrowały się na opracowaniu algorytmów, które można zaimplementować na prawdziwych robotach. Wiąże się z tym bezpośrednio zagadnienie unikania kolizji w czasie rzeczywistym. W literaturze można znaleźć szereg publikacji, które opisują metody oparte na silnych podstawach teoretycznych, jednak ich stosowalność w praktyce stoi pod znakiem zapytania. Niektóre z tych metod zapewniają realizację zadania śledzenia trajektorii referencyjnych jednak nie uwzględniają one problemu unikania kolizji między platformami mobilnymi [9]. Jeżeli roboty w stanie początkowym znajdują się na trajektoriach referencyjnych i można założyć, że ich ruch w czasie śledzenia nie będzie zakłócony metody te mogą być skuteczne, jednak zdaniem habilitanta takie założenia są zbyt optymistyczne. Najlepszym rozwiązaniem jest uczynienie unikania kolizji częścią zadania sterownika ruchu tak by zapewnić reaktywne unikanie kolizji oraz prawidłowe działanie w stanie przejściowym, jeżeli konfiguracje początkowe robotów nie leżą na trajektoriach referencyjnych. Takie podejście zaproponowano w pracy [8]. Stało się ono

inspiracją dla habilitanta do podjęcia badań, które zaowocowały pracami (IX) i (X). Zaprojektowano sterowniki o podobnej strukturze, jednak zmieniono rodzaj algorytmu śledzącego (użyto metody orientowania pól wektorowych VFO [19]) oraz zaproponowano nową funkcję potencjałową, która posiada ciągle pochodne dowolnego rzędu (ułatwia to projektowanie sterownika w przypadku gdy wymagane są wyższe pochodne funkcji potencjałowej, np. gdy uwzględniana jest dynamika robota). Metodę VFO wyróżnia jasna interpretacja poszczególnych składników sterowania, a przede wszystkim bardzo dobre właściwości w stanach przejściowych.

Inne podejście polega na powierzeniu zadania unikania kolizji planerowi trajektorii referencyjnych [10], [11], [17]. Takie rozwiązanie posiada dwie istotne wady: zwykle jest złożone obliczeniowo oraz nieodporne na zmiany, które mogą zajść w przestrzeni zadaniowej. Obie wymienione cechy skutkują tym, że system nie może reagować na zmiany w czasie rzeczywistym.

Znaczna część prac stanowiących cykl, przedstawia metody śledzenia trajektorii referencyjnych rozszerzone przez habilitanta o mechanizm unikania kolizji. Tak zmodyfikowane algorytmy stanowią podstawę sterowania formacjami robotów mobilnych.

W wielu z prezentowanych prac obiektem sterowania jest N nieholonomicznych robotów mobilnych sterowanych różnicowo, których model kinematyki jest dany równaniem różniczkowym:

$$\dot{q}_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & 0 \\ \sin(\theta_i) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} u_i ,$$

gdzie $i = 1, \dots, N$, i – indeks robota, $q_i = [x_i \ y_i \ \theta_i]^T$ jest wektorem zmiennych konfiguracyjnych i -tego robota reprezentujących położenie i orientację a $u_i = [v_i \ \omega_i]^T$ jego wektorem sterowań.

Unikanie kolizji opiera się na funkcji sztucznego potencjału:

$$B_{ij}(l_{ij}) = \begin{cases} 0 & \text{for } j_{ij} < r_j \\ e^{\frac{l_{ij}-r_j}{R_j}} & \text{for } r_j \leq l_{ij} < R_j \\ 0 & \text{for } l_{ij} \geq R_j \end{cases} ,$$

w której $l_{ij} = \|[x_j \ y_j]^T - [x_i \ y_i]^T\|$, r_i jest promieniem przeszkody a R_i jest odległością od środka przeszkody, w której funkcja sztucznego potencjału zanika do zera. Następnie uzyskana funkcja jest skalowania z użyciem wzoru:

$$V_{aij}(l_{ij}) = \frac{B_{aij}(l_{ij})}{1 - B_{aij}(l_{ij})} ,$$

przez co uzyskuje się wartości narastające do nieskończoności w miarę zbliżania do krawędzi przeszkody.

W pracach (IX) oraz (X) przedstawiono połączenie algorytmu orientowania pól wektorowych z unikaniem kolizji opartym na powyższych wzorach. W obu tych pracach sterowanie oparte było na zmiennych wyrażonych w globalnym układzie odniesienia.

Artykuł (X) prezentuje analizę stabilności układu w dwóch krokach: w pierwszej kolejności dowodzi się, że pojedynczy robot w trybie unikania kolizji z pojedynczą przeszkodą pozostaje stabilny, a następnie taka sama procedura jest przeprowadzona dla N robotów. Osobno przeprowadzono dowód zbieżności orientacji. Najpierw wykazano, że orientacja robota zbiega do tzw. pomocniczej zmiennej orientacji, a następnie, że pomocnicza zmienna orientacji zbiega do bliskiego otoczenia orientacji zadanej. Działanie algorytmu zilustrowano symulacjami numerycznymi, w których osiem robotów realizuje ruch w formacji. Dodatkowo unikają one kolizji ze statycznymi przeszkodami obecnymi w przestrzeni zadaniowej.

W pracy (IX) przedstawiono wyniki eksperymentalnej weryfikacji wyżej przedstawionej metody z użyciem robota MiniTracker. W pracy zawarto również szerszą analizę przypadków, w których sterowanie może się degenerować.

Część z zaprezentowanych prac (I), (III) opiera się na sygnałach uchybów wyrażonych w lokalnym układzie odniesienia umieszczonym na robocie:

$$\begin{bmatrix} e_{ix} \\ e_{iy} \\ e_{i\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & \sin(\theta_i) & 0 \\ -\sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{ix} \\ p_{iy} \\ p_{i\theta} \end{bmatrix} ,$$

gdzie $[p_{ix} \ p_{iy} \ p_{i\theta}]^T$ jest wektorem uchybów położenia i orientacji wyrażonych w układzie globalnym a $[e_{ix} \ e_{iy} \ e_{i\theta}]^T$ jest wektorem uchybów wyrażonych w układzie lokalnym.

Korzystając w powyższego równania oraz biorąc pod uwagę, że $\dot{y}_i \cos \theta_i - \dot{x}_i \sin \theta_i = 0$ dynamika błędu przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} \dot{e}_{ix} &= e_{iy} \omega_i - v_i + v_l \cos e_{i\theta} \\ \dot{e}_{iy} &= -e_{ix} \omega_i + v_l \sin e_{i\theta} \\ \dot{e}_{i\theta} &= \omega_l - \omega_i \end{aligned} ,$$

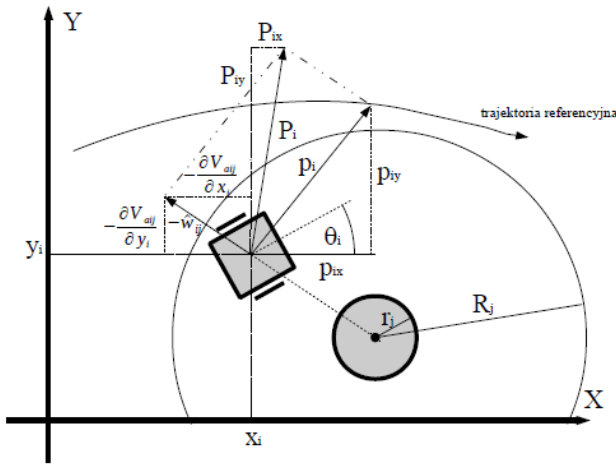
gdzie v_l oraz ω_l są prędkościami referencyjnego (wirtualnego) robota.

Dla ułatwienia analizy stabilności układu, gradienty funkcji potencjałowych również przekształca się do układu lokalnego:

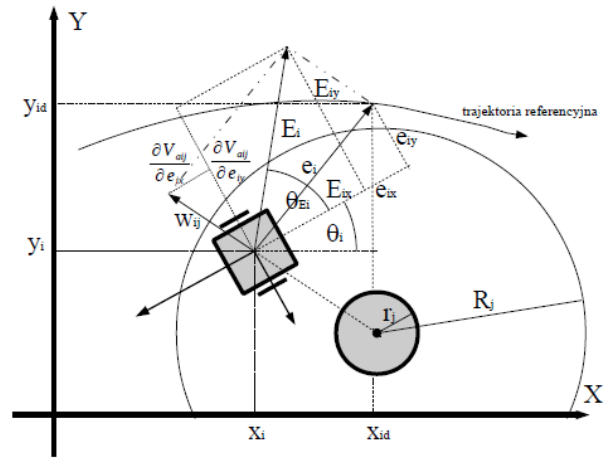
$$\begin{bmatrix} \frac{\partial V_{aij}}{\partial e_{ix}} \\ \frac{\partial V_{aij}}{\partial e_{iy}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & -\cos(\theta_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{aij}}{\partial x_i} \\ \frac{\partial V_{aij}}{\partial y_i} \end{bmatrix}.$$

Modyfikację algorytmu śledzenia [1] tak by uwzględniał również unikanie kolizji przeprowadza się zamieniając zmienne reprezentujące uchyb na tzw. zmienne korekcyjne. Łączą one uchyby położenia i składniki związane z unikaniem kolizji, będące sumami składowych gradientów funkcji potencjałowych:

$$\begin{aligned} E_{ix} &= e_{ix} + \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{\partial V_{aij}}{\partial e_{ix}} \\ E_{iy} &= e_{iy} + \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{\partial V_{aij}}{\partial e_{iy}} \end{aligned}.$$



Rys. 1. Robot i pojedyncza przeszkoda - zmienne wyrażone w układzie globalnym



Rys. 2. Robot i pojedyncza przeszkoda - zmienne wyrażone w układzie lokalnym

Na Rys. 1. przedstawiono robota w środowisku z pojedynczą przeszkodą. Składowe wektorów związanych ze śledzeniem i unikaniem kolizji wyrażono w układzie globalnym. Rys. 2. prezentuje ten sam przypadek ale ze składowymi wyrażonymi w układzie lokalnym związanym z robotem.

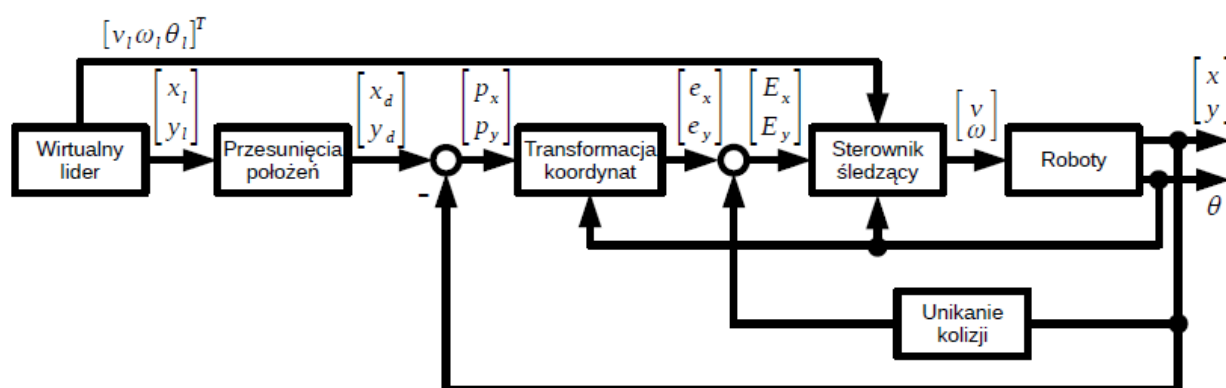
Sterowanie dla i -tego robota mobilnego jest dane równaniami (I):

$$\begin{aligned} v_i &= v_l \cos e_{i\theta} + k_1 E_{ix} \\ u_i &= \omega_l k_2 \operatorname{sgn}(v_l) E_{iy} + k_3 e_{i\theta} \end{aligned}.$$

Zostało ono oparte na algorytmie sterowania dla pojedynczego robota [1] poruszającego się w przestrzeni pozbawionej przeszkód, w którym składowe uchyby położenia zastąpiono odpowiadającymi im zmiennymi korekcyjnymi E_{ix} i E_{iy} .

Dynamika błędu po podstawieniu powyższych sterowań przyjmuje postać:

$$\begin{aligned}\dot{e}_{ix} &= e_{iy} \omega_i - k_1 e_{ix} \\ \dot{e}_{iy} &= -e_{ix} \omega_i + v_l \sin e_{i\theta} \\ \dot{e}_{i\theta} &= -k_2 \operatorname{sgn}(v_l) E_{iy} - k_3 e_{i\theta}\end{aligned}$$



Rys. 3. Schemat układu sterowania

Na Rys. 3. przedstawiono schemat układu sterowania.

Założenie 1

Jeżeli robot znajdzie się w obszarze oddziaływania pola potencjałowego związanego z przeszkodą jego sygnał referencyjny jest zamrażany.

Wprowadza się pomocniczą zmienną orientacji $\theta_{iE} = \operatorname{Atan} 2(-E_y, -E_x)$.

Założenie 2

W przypadku gdy θ_{iE} przyjmie wartość bliską $\pm \frac{\pi}{2}$ uruchamiana jest specjalna procedura wyprowadzająca robota z tego stanu (np. dobrym rozwiązaniem jest przeorientowanie robota).

W obszarze oddziaływania na robota sztucznych pól potencjałowych związanych z unikaniem kolizji, w związku z założeniem 1 dynamikę błędu można zapisać w następującej postaci:

$$\begin{aligned}\dot{e}_{ix} &= k_3 e_{iy} e_{i\theta} - k_1 E_{ix} \\ \dot{e}_{iy} &= k_3 e_{i\theta} e_{ix} \\ \dot{e}_{i\theta} &= -k_3 e_{i\theta}\end{aligned}.$$

Jeżeli robot jest poza obszarami oddziaływania funkcji sztucznych potencjałów analiza stabilności przedstawiona w pracy [1] pozostaje aktualna. Przeciwny przypadek zostanie przedstawiony dalej.

Stabilność układu złożonego z N robotów zbadano przyjmując następującą funkcję podobną do Lapunowa:

$$V = \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{2} (e_{ix}^2 + e_{iy}^2 + e_{i\theta}^2) + \sum_{j=1, j \neq i}^N V_{aij} \right].$$

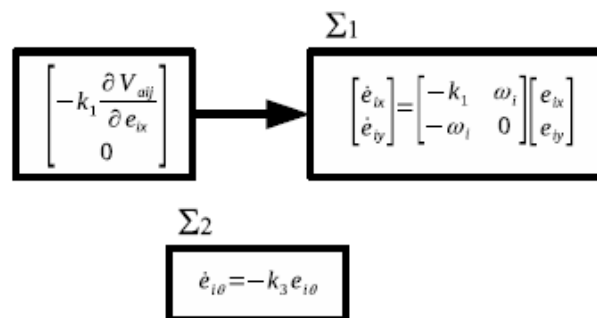
Pochodna funkcji Lapunowa względem czasu dana jest równaniem:

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^N \left[e_{ix} \dot{e}_{ix} + e_{iy} \dot{e}_{iy} + e_{i\theta} \dot{e}_{i\theta} + \sum_{j=1, j \neq i}^N \left(\frac{\partial V_{aij}}{\partial e_{ix}} \dot{e}_{ix} + \frac{\partial V_{aij}}{\partial e_{iy}} \dot{e}_{iy} \right) \right].$$

W toku postępowania dowodowego wykazano, że zamknięty układ sterowania jest stabilny jeżeli jest spełniony warunek:

$$\sum_{i=1}^N \left[k_1 \cos^2 \theta_{iE} - \frac{1}{2} (e_{ix}^2 + e_{iy}^2) \right] > 0.$$

Powyższą nierówność można spełnić zwiększając wartość k_1 . Dodatkowo założenie 2 zapewnia, że $\cos^2 \theta_{iE} \neq 0$.

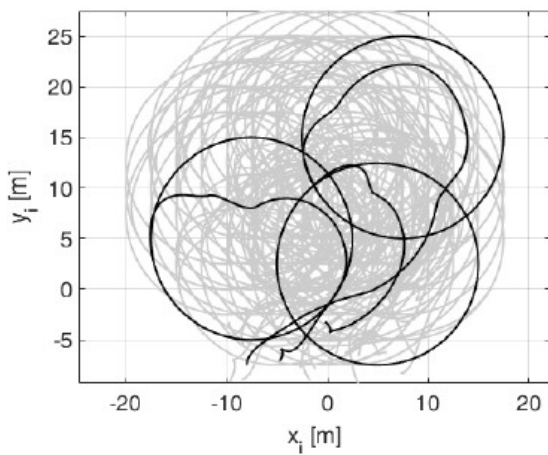


Rys. 4. Dekompozycja zamkniętego układu sterowania na dwa podsystemy

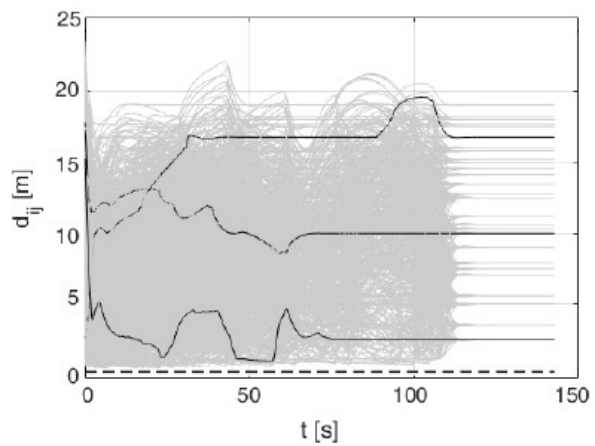
Ponadto, dekomponując zamknięty układ na dwa podsystemy Σ_1 i Σ_2 (Rys. 4.) można stwierdzić, że Σ_2 jest wykładniczo stabilny jeżeli $k_3 > 0$. Każdy z podsystemów jest stabilny wejście-stan (ang. input to state stable, ISS). Wykorzystując twierdzenie o małym wzmocnieniu można wykazać stabilność systemu (ISS). Korzystając z

aproksymacji $\dot{e}_{ix} \simeq k_1 \frac{\partial V_{aij}}{\partial e_{ix}}$, w pobliżu przeszkody można wykazać, że warunek

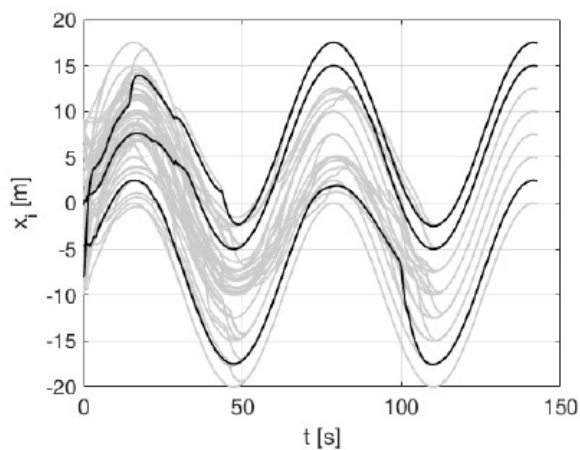
$\dot{V}_{aij} \leq 0$ można spełnić zmniejszając k_3 oraz zwiększając k_1 . Spełnienie $\dot{V}_{aij} \leq 0$ gwarantuje, że nie nastąpi kolizja.



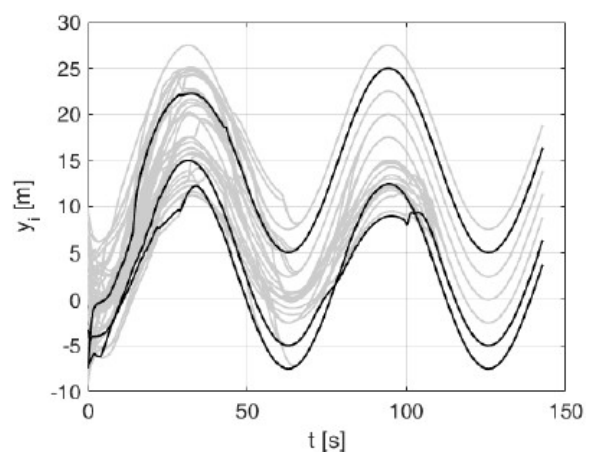
Rys. 5. Ścieżki robotów na płaszczyźnie (x,y)



Rys. 6. Odległości między robotami



Rys. 7. Współrzędna x w funkcji czasu



Rys. 8. Współrzędna y w funkcji czasu

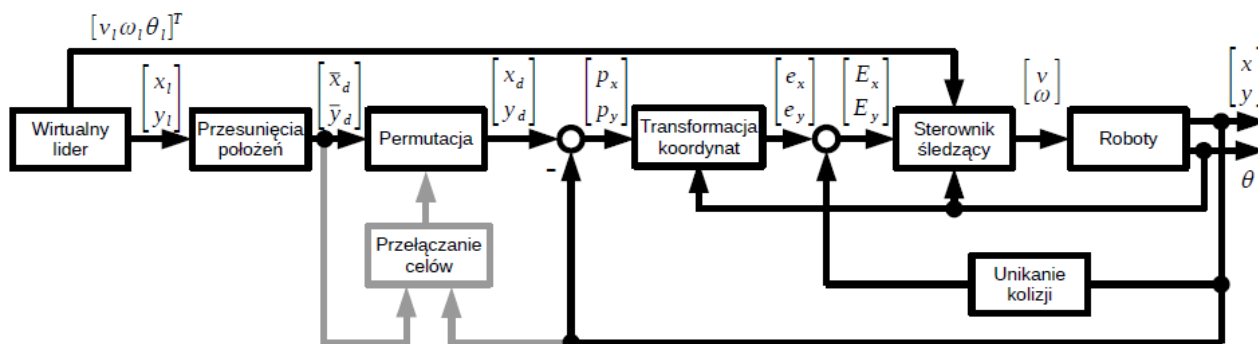
Wyniki symulacji dla 48 robotów przedstawiono na Rys. 5 – 8. W celu poprawienia czytelności sygnały dla trzech robotów zostały wyróżnione kolorem czarnym (pozostałe:

kolor szary). Rys. 5. prezentuje przebiegi ścieżek robotów na płaszczyźnie (x,y). Na Rys. 6. przedstawiono odległości między wszystkimi parami robotów; linia przerywana reprezentuje odległość, w której nastąpiłaby kolizja. Żaden z przebiegów nie osiąga tej wartości. Rys. 7. i Rys. 8. przedstawiają składowe położenia x i y w funkcji czasu. Osiągają one wartości referencyjne po 120s.

W pracy (III) przedstawiono podobną metodę sterowania, w której śledzenie trajektorii referencyjnej oparto na algorytmie z ustawicznym pobudzeniem. Dodatkowo algorytm rozszerzono o unikanie kolizji z przeszkodami statycznymi. Praca zawiera analizę stabilności układu w zamkniętej pętli sterowania oraz wnikliwą analizę przypadków, w których sterowanie może się degenerować wraz z propozycjami postępowania w takich przypadkach. Praca zawiera wyniki symulacyjne dla formacji 15 robotów realizujących złożoną trajektorię referencyjną w środowisku z 5 przeszkodami statycznymi.

Przełączanie celów

Kolejnym zaproponowanym rozwiązaniem jest algorytm przełączania celów, który prowadzi do znaczącej poprawy zbieżności położenia robotów poruszających się w formacji. Szczegóły rozwiązania zostały zaprezentowane w pracy (I).



Rys. 9. Schemat układu sterowania

Algorytm powstał przez modyfikację metody przedstawionej wcześniej. Dodano dwa bloki: permutacji oraz przełączania celów. Nowe bloki tworzą dodatkową pętlę regulacji, która działa asynchronicznie do głównej pętli, odpowiedzialnej za śledzenie trajektorii referencyjnej (Rys. 9.). W pracy [5] zaproponowano podobne rozwiązanie, jednak zakładające, że roboty nie posiadają ograniczeń nieholonomicznych (są

modelowane jako integratory). Zmniejsza to możliwość wykorzystania tej metody w praktyce.

Współrzędne celów dla robotów (aktualne punkty na trajektoriach zadanych) można zapisać w zagregowanych wektorach: $\bar{x}_d = [\bar{x}_{1d} \dots \bar{x}_{Nd}]^T$ oraz $\bar{y}_d = [\bar{y}_{1d} \dots \bar{y}_{Nd}]^T$. Wówczas przypisanie celów do robotów można przedstawić jako:

$$\begin{aligned} x_d &= P(t) \bar{x}_d \\ y_d &= P(t) \bar{y}_d \end{aligned},$$

gdzie $P(t)$ jest macierzą permutacji o wymiarze $N \times N$.

Jeżeli w pewnej chwili t_1 cel m jest przypisany do robota k oraz cel n jest przypisany do robota l , to można zapisać:

$$\begin{aligned} [x_{kd} \ y_{kd}]^T &= [\bar{x}_{md} \ \bar{y}_{md}]^T \\ [x_{ld} \ y_{ld}]^T &= [\bar{x}_{nd} \ \bar{y}_{nd}]^T \end{aligned}.$$

W macierzy $P(t_1)$ jedynki występują w elementach (m, k) oraz (n, l) natomiast pozostałe elementy w wierszach m, n i kolumnach k, l są zerowe.

W pewnej dyskretniej chwili $t_s > t_1$ dla pary robotów k oraz l i ich celów m oraz n obliczana jest następująca funkcja przełączająca:

$$\sigma = \begin{cases} 1 & \text{jeżeli } \|p_{mk}\|^2 + \|p_{nl}\|^2 > \|p_{nk}\|^2 + \|p_{ml}\|^2 \\ 0 & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases},$$

gdzie

Jeżeli σ przyjmuje wartość 1 macierz P zostanie zmieniona w następujący sposób:

$$P(t) = S_{mn} P(t_{-s}),$$

gdzie $P(t_{-s})$ jest macierzą permutacji w chwili poprzedzającej przełączenie.

Macierz elementarna S_{mn} reprezentuje transformację zamieniającą wiersze ma postać:

$$S_{mn} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Po operacji zamiany celów cel m jest przypisany do robota l oraz cel n jest przypisany do robota k , to można zapisać:

$$\begin{bmatrix} x_{kd} & y_{kd} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \bar{x}_{nd} & \bar{y}_{nd} \end{bmatrix}^T \\ \begin{bmatrix} x_{ld} & y_{ld} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \bar{x}_{md} & \bar{y}_{md} \end{bmatrix}^T \quad .$$

Analiza stabilności układu, w którym zastosowano algorytm zamiany celów została oparta na funkcji Lapunowa.

Korzystając z faktu, że hipotetyczny błąd położenia p_{ij} można przekształcić do układu lokalnego stosując wzór:

$$e_{ij} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_j) & \sin(\theta_j) \\ -\sin(\theta_j) & \cos(\theta_j) \end{bmatrix} p_{ij} \quad ,$$

który nie zmienia długości wektora, więc można zapisać:

$$\|e_{ij}\| = \|p_{ij}\| \quad .$$

Używając powyższej zależności funkcję przełączającą można przekształcić do postaci:

$$\sigma = \begin{cases} 1 & \text{jeżeli } \|e_{mk}\|^2 + \|e_{nl}\|^2 > \|e_{nk}\|^2 + \|e_{ml}\|^2 \\ 0 & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases} \quad .$$

Przedstawiając funkcję Lapunowa w postaci:

$$\begin{aligned} V = & \underbrace{\sum_{i=1}^N \frac{1}{2} e_{i\theta}^2}_{V_\theta} + \underbrace{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N V_{aij}}_{V_a} + \frac{1}{2} (e_{1x}^2 + e_{1y}^2) + \dots \\ & + \underbrace{\frac{1}{2} (e_{kx}^2 + e_{ky}^2)}_{V_{pk}} + \dots + \underbrace{\frac{1}{2} (e_{lx}^2 + e_{ly}^2)}_{V_{pl}} + \dots + \frac{1}{2} (e_{Nx}^2 + e_{Ny}^2) \end{aligned}$$

można stwierdzić, że składniki V_{pk} i V_{pl} są związane z błędami położenia robotów k i l . Pozostałe składniki funkcji Lapunowa V nie zmieniają się w przypadku przełączenia celów.

Dowodzi się, że suma V_{pk} i V_{pl} przed przełączeniem:

$$V_{p1} = V_{pk} + V_{pl} = \|p_{mk}\|^2 + \|p_{nl}\|^2 \quad ,$$

oraz po przełączeniu

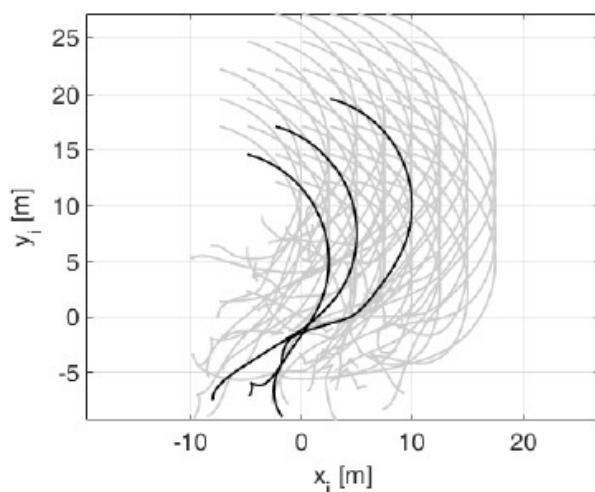
$$V_{p2} = V_{pk} + V_{pl} = \|p_{nk}\|^2 + \|p_{ml}\|^2$$

są odpowiednio lewą i prawą stroną warunku funkcji przełączającej (pomijając współczynnik $\frac{1}{2}$). Spełnienie nierówności $V_{p1} > V_{p2}$ prowadzi do konkluzji, że przełączenie celów powoduje skokowe zmniejszenie funkcji Lapunowa.

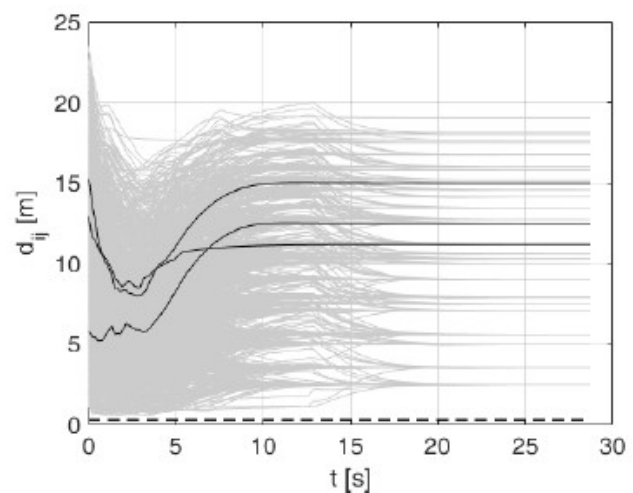
W pracy (I) przedstawiono więcej szczegółów powyższego wywodu oraz zaprezentowano dyskusję na temat protokołów, które należały zastosować by zapewnić integralność danych w procesie zamiany celów. Zdaniem habilitanta jest to krytyczny element zastosowanej metody, ze względu na konieczność synchronizacji zmiennych w zdalnych systemach, między którymi może nastąpić błąd komunikacji.

Ponadto w artykule (I) zaprezentowano dyskusję na temat innych możliwości skonstruowania funkcji przełączającej σ . Zaprezentowane szczególne przypadki potwierdzają tezę, że dla wielu robotów, które muszą unikać kolizji uzasadnione jest stosowanie funkcji kwadratowej, zaproponowanej przez habilitanta. Stosowane przez innych autorów podejście najkrótszej ścieżki [5] często prowadzi do kolizyjnych trajektorii ruchu robotów co nie sprzyja uzyskiwaniu szybkiej zbieżności. Porównując zaprezentowaną metodę z podejściem przedstawionym w [5] należy zauważyć, że w tej drugiej, w celu przeprowadzenia analizy stabilności, stosuje się wiele specjalnych funkcji Lapunowa. W rezultacie analiza staje się dużo bardziej złożona. Rozwiązanie zaproponowane przez habilitanta nie posiada tej wady.

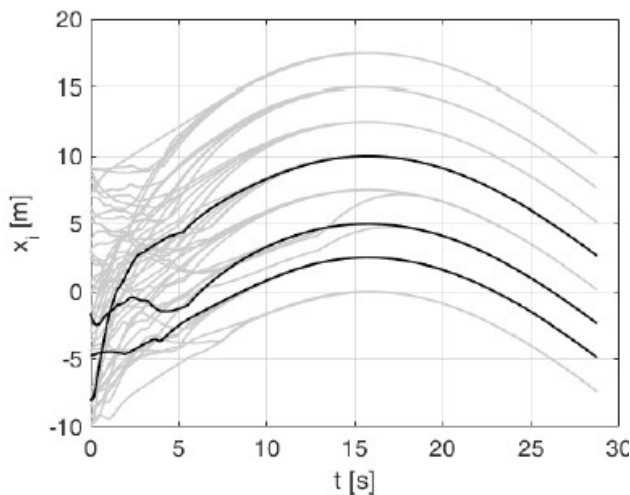
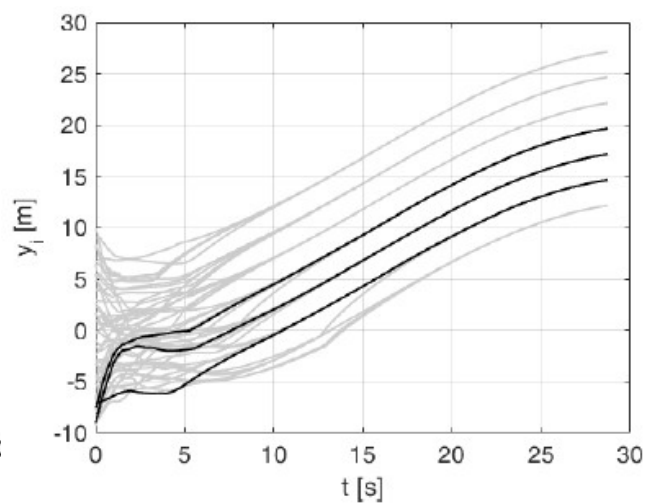
W pracy [6] zaproponowano rozwiązanie przedstawionego wyżej problemu na poziomie planera. Zdaniem habilitanta takie podejście ma w praktyce ograniczoną stosowalność. Nieprzewidziane zmiany zachodzące w przestrzeni zadaniowej, wynikające np. z niedokładności modelu systemu, mogą prowadzić do kolizji. Z powodu złożoności obliczeniowej nie jest możliwe uzyskanie rozwiązania tego problemu w czasie rzeczywistym przez ponowne uruchomienie planera.



Rys. 10. Ścieżki robotów na płaszczyźnie (x, y)



Rys. 11. Odległości między robotami

Rys. 12. Współrzędna x w funkcji czasuRys. 13. Współrzędna y w funkcji czasu

Rys. 10. prezentuje przebiegi ścieżek robotów na płaszczyźnie (x, y) . Na Rys. 11. przedstawiono odległości między wszystkimi parami robotów; linia przerywana reprezentuje odległość, w której nastąpiłaby kolizja. Rys. 12. i 13. przedstawiają składowe położenia x i y w funkcji czasu. Osiągają one wartości referencyjne po 20s. Porównując je z przebiegami na Rys. 7. i 8. można zaobserwować około sześciokrotną poprawę czasu zbieżności.

Funkcja nawigacji

Funkcja nawigacji jest odpowiedzią na problem lokalnych minimów, które mogą wystąpić w przypadku nakładających się lokalnych funkcji potencjałowych. Źródłem problemu jest fakt, że w klasycznym podejściu wykorzystuje się sumę wektorów oddziaływań odpychających od przeszkód i wektora przyciągającego do celu. Wektor wynikowy może zerować się z dala od celu jeżeli w przestrzeni roboczej wystąpi niekorzystny układ przeszkód oraz punktu referencyjnego. W takim przypadku nastąpi utknięcie robota w lokalnym minimum. W przypadku systemów wielorobotowych może nastąpić samoczynny zanik tego minimum spowodowany ruchem robotów w ramach realizacji zadania, jednak jeżeli jest ono wynikiem złożenia oddziaływań odpychających przeszkód statycznych robot może utknać w takim punkcie i uniemożliwi to realizację zadania.

Funkcja nawigacji rozwiązuje przedstawiony problem przez zastąpienie sumy oddziaływań funkcją opartą na ilorazie składników odpowiedzialnych odpowiednio za przyciąganie do celu oraz związanego z unikaniem przeszkód. Funkcja nawigacji w

postaci stosowanej w układach sterowania została zaproponowana w pracy [4]. Jest ona dana równaniem:

$$V = \frac{C}{(C^\kappa + \beta)^{\frac{1}{\kappa}}} ,$$

gdzie κ jest dodatnim, stałym współczynnikiem projektowym, składowa przyciągająca do punktu zadanego [3] ma postać:

$$C = \|r\|^2 + \theta^2 \frac{k_w}{k_w + \|r\|^2} .$$

Współczynnik k_w w powyższym równaniu jest dodatnią stałą. Zagregowana funkcja przeszkód β dana jest równaniem

$$\beta = \prod_{i=0}^M \beta_i ,$$

gdzie M to liczba przeszkód. Indeks zero oznaczono przeszkodę reprezentującą zewnętrzne ograniczenie przestrzeni roboczej. Funkcje przeszkód przyjmują wartość zero na krawędziach przeszkód oraz dodatnią wartość na zewnątrz.

Funkcja nawigacji gwarantuje zbieżność z prawie wszystkich konfiguracji początkowych do punktu zadanego (wyjątek stanowią punkty siodłowe, omówione dalej) z jednoczesnym unikaniem kolizji. Jest to jednoznaczne z faktem, że w przypadku wykorzystania funkcji nawigacji nie występują lokalne minima. Funkcja nawigacji rozwiązuje więc istotny problem, który występuje w układach sterowania wykorzystujących lokalne funkcje potencjałowe, posiada ona jednak istotną wadę: w zależności od układu przeszkód musi ona zostać odpowiednio „dostrojona” za pomocą współczynnika κ (co nie jest trudne) jednak często prowadzi do powstawania obszarów o bardzo małym nachyleniu (niemal płaskich). W związku z tym, że w sterowaniu wykorzystuje się gradient funkcji nawigacji, niewielkie nachylenie prowadzi do bardzo wolnej zbieżności układu, bardzo często nieakceptowalnej w praktycznych zastosowaniach.

W dalszych rozważaniach zakłada się, że obiektem sterowania jest dwukołowy robot mobilny, dla którego $q = [x \ y \ \theta]^T$ jest wektorem zmiennych konfiguracyjnych reprezentujących położenie i orientację a $u = [v \ \omega]^T$ jest wektorem sterowań.

Propozycja nowego sterownika dla robota nieholonomicznego ma postać:

$$u = - \left\{ a \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \right\} y ,$$

gdzie a jest dodatnią stałą; $b = \bar{b} \frac{L^T \nabla V}{h(g)}$ oraz $\gamma = \frac{B^T \nabla V (\|q^T\| + \epsilon_e)}{g^2 + \epsilon_f}$. Postać składowej

γ została zaproponowana w pracy (II). Przedstawiony sterownik jest rozwinięciem metody z pracy [3], w którym składnik γ miał postać $\bar{\gamma} = B^T \nabla V$.

Parametry projektowe $\bar{b}$, ϵ_e oraz ϵ_f są dodatnimi stałymi,

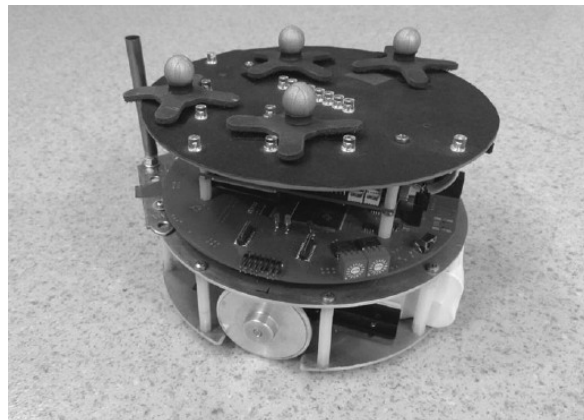
$L^T = [\sin(\theta) \quad -\cos(\theta) \quad 0]$, $g = \|B^T \nabla V\|$. Funkcja $h(g)$ ma postać:

$$h(g) = g^2 + \epsilon_g \sqrt{g},$$

zaś ϵ_g jest dodatnią stałą.

W artykule (V) przedstawiono analizę opartą o linearyzację, w której wykazano, że wprowadzone do algorytmu nowe współczynniki ϵ_e oraz ϵ_f pozwalają wpływać bezpośrednio na położenie wartości własnych układu zamkniętego, zlinearyzowanego w punkcie równowagi. W ten sposób można wpływać na szybkość zbiegania układu do wartości referencyjnej. Zamknięty układ sterowania jest asymptotycznie stabilny. Symulacyjna oraz eksperymentalna weryfikacja pokazała, że nawet jeżeli robot znajdował się w punkcie odległym od equilibrium (w otoczeniu którego przeprowadzono linearyzację) wymienione współczynniki projektowe pozwalają wpływać na zbieżność położenia.

Do weryfikacji skuteczności zaproponowanego algorytmu użyto robota MTracker (Fot. 1.), który został opracowany w Instytucie Automatyki i Robotyki na Politechnice Poznańskiej.

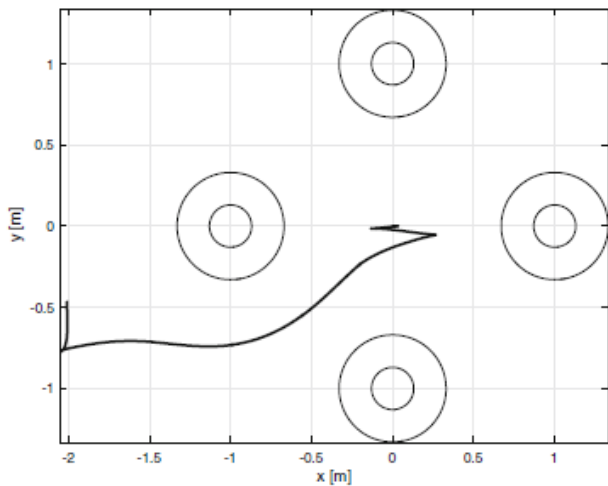


Fot. 1. Robot MTracker

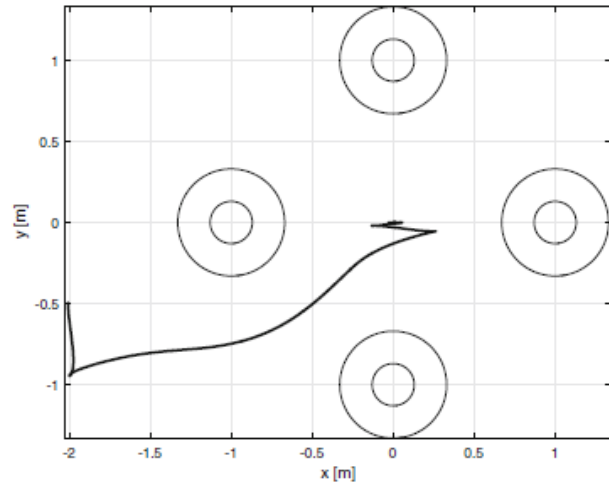
Do lokalizacji wykorzystano system śledzenia ruchu OptiTrack.

Na Rys. 14. i 15. przedstawiono ścieżkę robota na płaszczyźnie (x, y) odpowiednio: dla algorytmu zmodyfikowanego i oryginalnego. Różnica między przebiegami jest niewielka. Rys. 16. i 17. prezentują przebiegi zmiennych

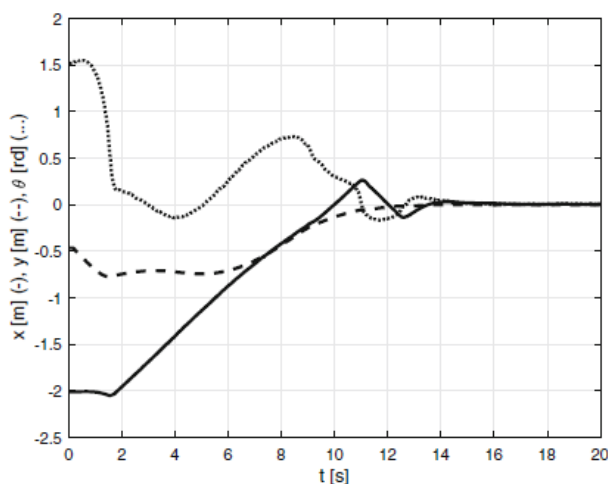
konfiguracyjnych w funkcji czasu. Rys. 16 – dla algorytmu zmodyfikowanego zbieżność następuje w 16s. Rys. 17. przedstawia przebiegi dla metody oryginalnej. Przebiegi osiągają wartości zadane w 35s. W przypadku wartości początkowych robota dalszych niż w prezentowanym przykładzie poprawa wyników jest jeszcze bardziej wyraźna.



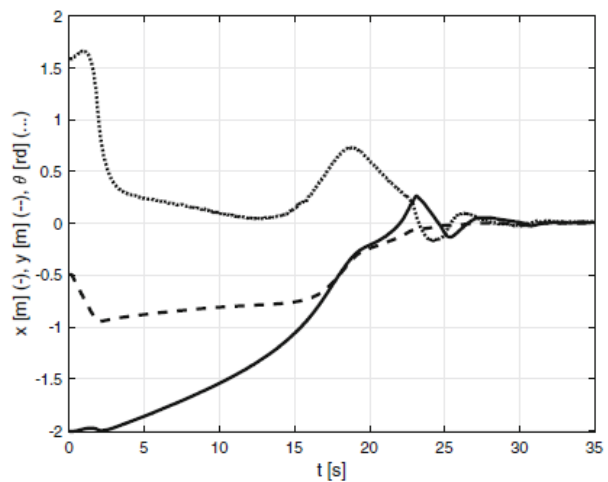
Rys. 14. Ścieżka robota na płaszczyźnie (x, y) – algorytm z (II)



Rys. 15. Ścieżka robota na płaszczyźnie (x, y) algorytm z [3]



Rys. 16. Współrzędne konfiguracyjne w funkcji czasu – algorytm z (II)



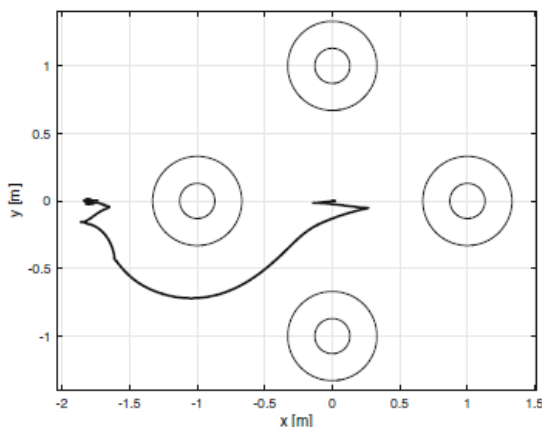
Rys. 17. Współrzędne konfiguracyjne w funkcji czasu – algorytm z [3]

W artykule (VI) zaprezentowano eksperymentalną weryfikację przedstawionego powyżej algorytmu z wykorzystaniem robota Kuka youBot, w którym możliwość ruchu poprzecznego została zablokowana programowo. Testy prowadzono dla ograniczonych prędkości linowej i kątowej platformy mobilnej.

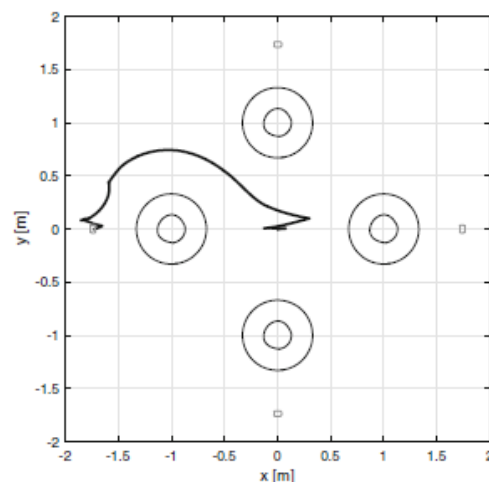
Punkty siodłowe

Prawidłowe nastrojenie funkcji nawigacji za pomocą współczynnika κ gwarantuje, że w przestrzeni roboczej nie pojawią się lokalne minima. Jeżeli występują przeszkody wewnętrzne (przestrzeń nie jest jednospójna) to istnieją w niej punkty siodłowe w liczbie zgodnej z liczbą przeszkód wewnętrznych (wyłączona z tego zbioru jest przeszkoda zewnętrzna, ograniczająca przestrzeń roboczą). W takich punktach pochodna funkcji Lapunowa się zeruje.

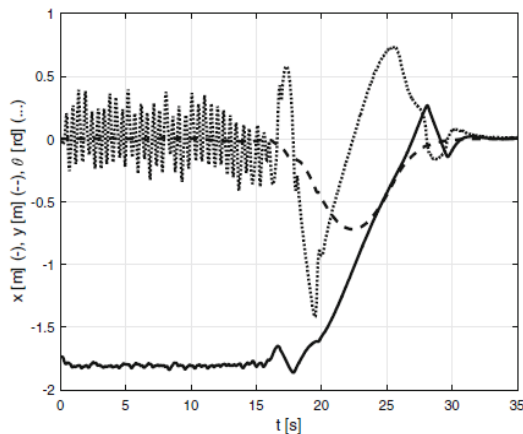
Spotykane w literaturze teoretyczne rozważania dotyczące punktów siodłowych nie rozstrzygały czy stanowią one istotny problem w praktyce. Zdaniem niektórych autorów w związku z tym, że punkty siodłowe stanowią zbiór miary zero, nie stanowią problemu i można je zignorować. Inni badacze uważają, że problem punktów siodłowych istnieje, jednak może zostać rozwiązany przez proste zaburzenie sterowania lub punktu zadanego. Trzecią grupę stanowią autorzy proponujący modyfikację sterowania w punkcie siodłowym, w której wykorzystuje się funkcję zależną od czasu do wypchnięcia robota z punktu siodłowego. Habilitant przeprowadził szereg testów, które wykazały, że choć faktycznie stosowanie specjalnych procedur w przypadku wykrycia punktu siodłowego nie jest konieczne (robot opuszczał punkt siodłowy nawet jeżeli takich nie zastosowano) to ich użycie znacznie poprawiało przebiegi przejściowe: przyspieszało zbieżność do celu oraz zapobiegało zjawisku chatteringu w sygnałach sterowania prędkością kół, które w prezentowanym przykładzie trwało kilkanaście sekund (Rys. 20).



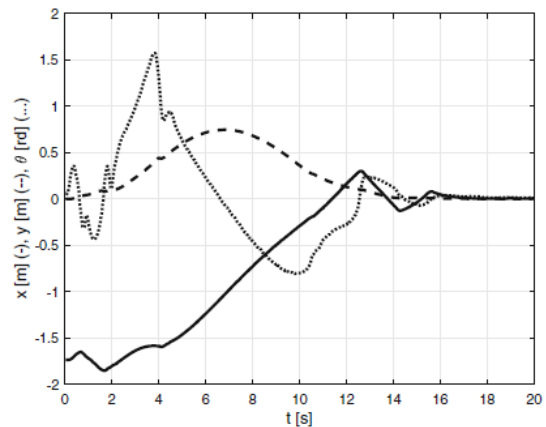
Rys. 18. Ścieżka robota na płaszczyźnie (x,y) bez procedury wyjścia z punktu siodłowego



Rys. 19. Ścieżka robota na płaszczyźnie (x,y) z procedurą wyjścia z punktu siodłowego

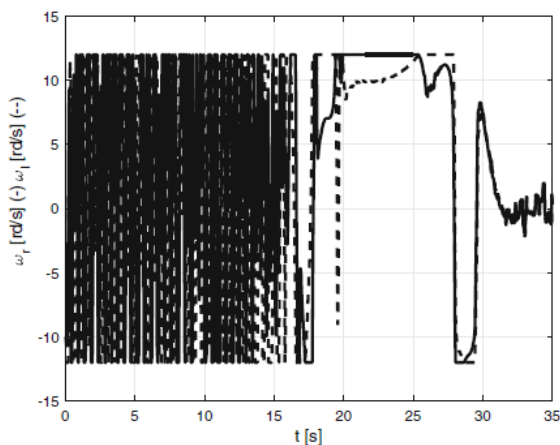


Rys. 20. Współrzędne konfiguracyjne w funkcji czasu - bez procedury wyjścia z punktu siodłowego

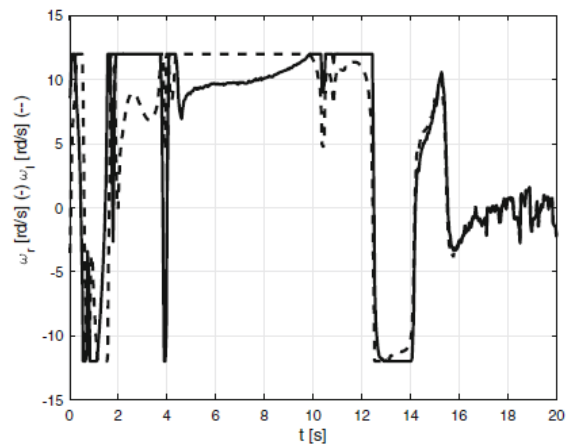


Rys. 21. Współrzędne konfiguracyjne w funkcji czasu - z procedurą wyjścia z punktu siodłowego

Poniżej przedstawiono porównanie wyników eksperymentów, w których położenie początkowe robota pokrywa się z punktem siodłowym. Rys. 18., 20. i 22. pokazują sytuację gdy detekcja i unikanie kolizji jest wyłączona; Rys. 19., 21. i 23. ilustrują działanie mechanizmu wykrywania i wychodzenia z punktów siodłowych. Choć ścieżki robota w obu przypadkach są podobne to wykresy czasowe zarówno zmiennych konfiguracyjnych, jak i sterowań jasno pokazują, że w pierwszym przypadku występuje zjawisko chatteringu, a położenie zadane zostało osiągnięte dwukrotnie później.



Rys. 22. Sterowania kół robota w funkcji czasu - bez procedury wyjścia z punktu siodłowego

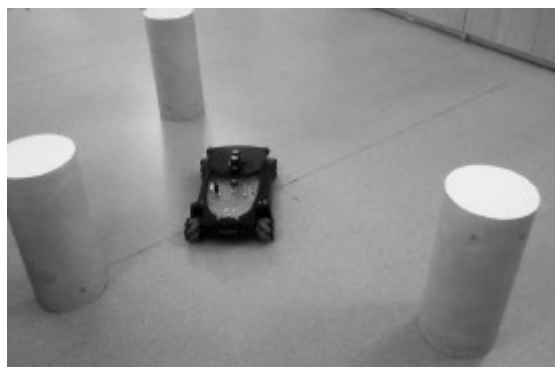


Rys. 23. Sterowania kół robota w funkcji czasu - z procedurą wyjścia z punktu siodłowego

Zaprezentowane wyniki uzyskano stosując metodę wychodzenia z punktów siodłowych z pracy [2]. Nigdy wcześniej nie była ona badana eksperymentalnie. Wkładem habilitanta jest natomiast wnikliwa analiza warunków pozwalających wykrycie sytuacji, w której robot znajduje się w punkcie siodłowym. Stosując czysto teoretyczne podejście wiadomo, że warunkiem wystąpienia punktu siodłowego jest zerowanie się gradientu funkcji potencjałowej przy jednoczesnym pojawieniu się ujemnej wartości własnej macierzy Hessego tej funkcji. W praktyce pojawienie się numerycznego zera w funkcji gradientu jest bardzo mało prawdopodobne, więc przyjęcie zera jako wartości progowej, która aktywuje procedurę wypychania z punktu siodłowego spowodowałoby, że niemal nigdy nie następowałaby aktywacja. Przyjmuje się pewien niezerowy próg aktywacji ϵ_s . Wyznaczenie najlepszej wartości tego progu było obiektem badań habilitanta. Wyniki wskazują, że system nie jest wrażliwy na wartość tego współczynnika i może on być przyjmowany w szerokim zakresie. Warto zauważyć, że opublikowane rozważania dotyczyły konkretnego wariantu usytuowania przeszkód, celu oraz konkretnych parametrów funkcji potencjałowej a ich uogólnienie wymagać będzie dalszych badań. Nie zmienia to faktu, że przed habilitantem i jego współautorami nikt nie podjął badań eksperymentalnych w tym zakresie.

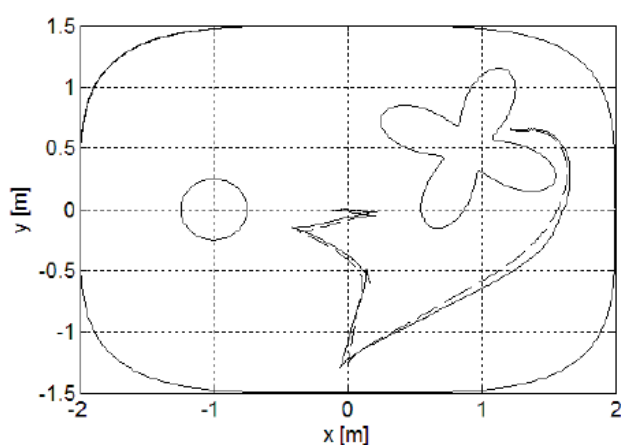
Badania przedstawione wyżej były poprzedzone wnikliwymi testami numerycznymi przedstawionymi w artykule (VII). Rozważano w nim również przypadek, gdy rozmieszczenie przeszkód powoduje, że punkty siodłowe nie znajdują się dokładnie po przeciwnej stronie niż cel. W przypadku wykrycia punktu siodłowego stosowano modyfikację algorytmu zaproponowaną w [3], w której sterowanie zależy od czasu. To pozwala wyprowadzić robota z niestabilnego punktu równowagi. Zarówno wyniki przedstawione w pracy (II) jak i (VII) wykorzystywały gradient funkcji nawigacji oraz macierz Hessego wyprowadzone w postaci analitycznej, by uniknąć ewentualnych problemów numerycznych.

Praca (V) prezentuje algorytm oparty na funkcji nawigacji w wersji dla robota typu omnidirectional. Opisana wcześniej cecha małej stromości funkcji nawigacji nie ogranicza się tylko do przypadku sterowania robotami nieholonomicznymi. W pracy przedstawiono metodę, która zapewnia szybką zbieżność położenia również dla dużych wartości współczynnika κ . Orientacja robota była regulowana osobnym sterownikiem proporcjonalnym.

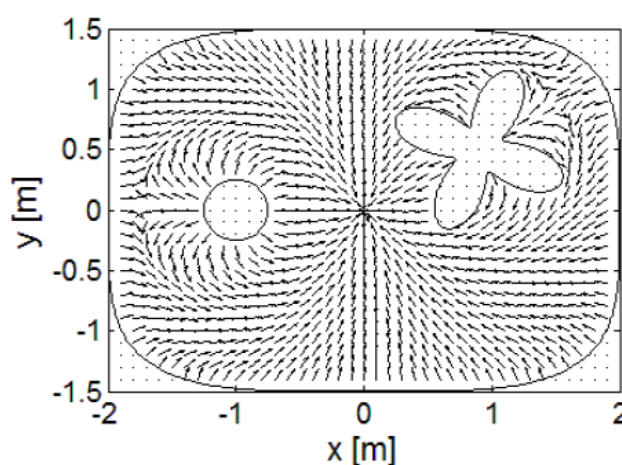


Fot. 2. Robot Kuka youBot

Działanie metody zostało zweryfikowane eksperymentalnie dla różnych scenariuszy z użyciem robota Kuka youBot (Fot. 2.). Praca zawiera analizę prezentującą możliwość wpływania na położenie wartości własnych układu zlinearyzowanego za pomocą współczynników algorytmu.

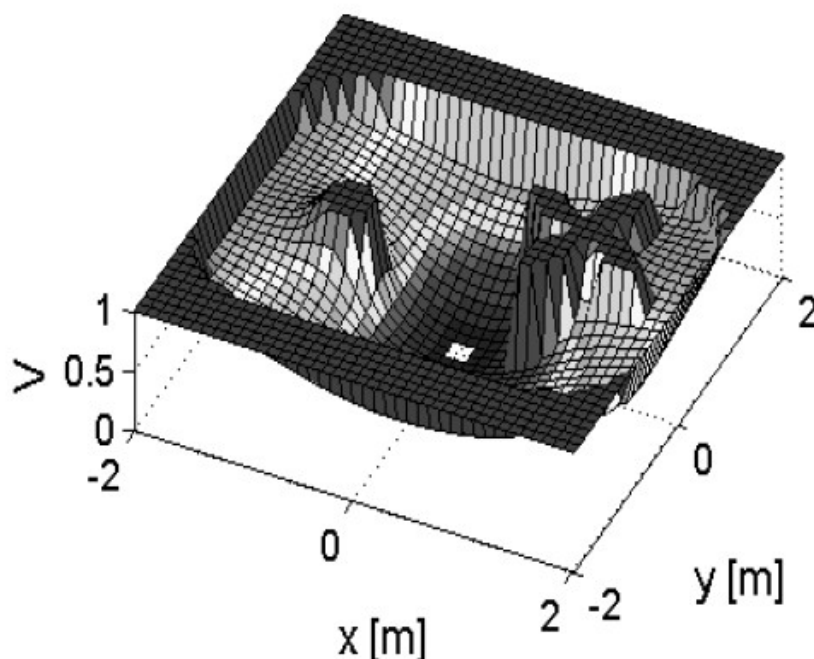


Rys. 24. Ścieżka robota na płaszczyźnie (x, y)



Rys. 25. Pole wektorowe dla ustalonego kąta $\theta=0$, znormalizowana długość strzałek

Artykuł (VIII) prezentuje działanie algorytmu opartego na funkcji nawigacji w wersji zawierającej transformację z przestrzeni gwiazd do pomocniczej przestrzeni sfer (okręgów). Umożliwia to sterowanie robotem mobilnym do punktu w przypadku gdy w jego przestrzeni roboczej znajdują się przeszkody niewypukłe pewnej podklasy (typu gwiazda). W pracy przedstawiono wyniki eksperymentalnej weryfikacji działania algorytmu z wykorzystaniem robota MTracker. Wg wiedzy habilitanta były to pierwsze opublikowane wyniki eksperymentów przeprowadzonych z użyciem tej metody.



Rys. 26. Funkcja nawigacji dla ustalonego kąta $\theta=0$

Na Rys. 24. przedstawiono ścieżkę robota na płaszczyźnie (x, y) . Linia przerywaną zaznaczono wynik symulacji numerycznej. Linia ciągła reprezentuje ścieżkę robota w czasie eksperymentu. Rys. 25. przedstawia wykres gradientu (dla czytelności długość strzałek została znormalizowana), zaś na Rys. 26. przedstawiono trójwymiarowy wykres funkcji nawigacji. W przypadku obydwu powyższych wykresów założono stałą orientację robota $\theta=0$, ponieważ pole potencjałowe jest trójwymiarowe i nie można go przedstawić na płaskim rysunku. W artykule (VIII) zaprezentowano wykresy gradientu i funkcji nawigacji dla innych wartości orientacji robota.

Podsumowanie dotychczasowych badań

- Prace (I), (III) oraz (X) dotyczą sterowania grupą robotów mobilnych z wykorzystaniem lokalnych funkcji sztucznych potencjałów. Zaproponowano w nich trzy różne algorytmy sterowania wraz z dowodami stabilności.
- Praca (IX) prezentuje podobne rozwiązanie w zastosowaniu do pojedynczego robota, który unika kolizji z dwoma statycznymi przeszkodami. W artykule tym zaprezentowano wyniki eksperymentalne z wykorzystaniem robota MiniTracker.

- Metoda zamiany celów zaproponowana w pracy (I) jest unikatowym rozwiązaniem. Wg habilitanta w literaturze nie ma podobnego algorytmu, działającego na poziomie sterowania w zamkniętej pętli regulacji dla grupy robotów nieholonomicznych. Ponadto możliwość implementacji w sposób rozproszony czyni to podejście wyjątkowo praktycznym, i stosunkowo łatwym w użyciu w rzeczywistych aplikacjach.
 - Prace (II), (IV) - (VIII) dotyczą metod sterowania opartych na funkcji nawigacji.
 - W artykułach (II) i (V) przedstawiono propozycje algorytmów, które umożliwiają strojenie zbieżności systemu. Pierwszy dotyczy robota dwukołowego, natomiast drugi rozważa platformę typu omnidirectional. W obu pracach zaprezentowano analizę zbieżności układu w zamkniętej pętli przy pomocy pierwszej metody Lapunowa. Zdaniem habilitanta metody zaproponowane w tych artykułach otwierają możliwości praktycznego stosowania algorytmów sterowania opartych na funkcji nawigacji. Wcześniej znane rozwiązania, choć z teoretycznego punktu widzenia poprawne, w pewnych przypadkach nie spełniały warunków wymaganych w praktycznych aplikacjach (szybka zbieżność).
 - Prace (II), (IV), (V), (VIII) prezentują eksperymenty z wykorzystaniem rzeczywistych robotów (MTracker oraz Kuka youBot).
 - Praca (VIII) prezentuje użycie funkcji nawigacji w przestrzeni roboczej z przeszkodami niewypukłymi wraz z weryfikacją symulacyjną i eksperymentalną. Wg wiedzy habilitanta metody oparte na funkcji nawigacji nie były wcześniej poddawane praktycznej walidacji przez innych badaczy. W szczególności nie znalazł on w literaturze eksperymentów, w których robot nieholonomiczny porusza się w przestrzeni zadaniowej, w której występują przeszkody niewypukłe typu gwiazda.
 - W pracach (II), (VII) rozważano problem punktów siodłowych. Przedstawiono metody ich detekcji oraz wyniki weryfikacji czy w praktyce istnieje potrzeba ich wykrywania. Wg wiedzy habilitanta tematyka detekcji punktów siodłowych funkcji nawigacji w praktyce nie była wcześniej badana. Nie znalazł on w dostępnej literaturze żadnych eksperymentalnych testów podejmujących to zagadnienie.
 - W badaniach przedstawionych w artykule (IV) detekcja przeszkód odbywała się z użyciem pokładowych dalmierzy laserowych.
-

Planowane badania

Habilitant planuje prowadzić dalsze badania w zakresie robotyki mobilnej a przede wszystkim systemów wielorobotowych. Poniżej zarysowane są dalsze jego plany badawcze:

- W najbliższym czasie zamierza zaimplementować na systemie wielorobotowym algorytm przedstawiony w pracy (I) oraz zbadać wpływ opóźnień komunikacyjnych na jakość uzyskanych przebiegów przejściowych. Habilitant ma duże doświadczenie w zakresie implementacji komunikacji z wykorzystaniem protokołów TCP/IP oraz projektowania dedykowanych protokołów dla specjalizowanych modułów radiowych.
- Habilitant planuje zmierzyć się z wykorzystaniem algorytmu zaproponowanego w pracy (II) w systemie złożonym z wielu robotów. Choć metody sterowania dla wielu robotów oparte na funkcji nawigacji były tematem badań innych autorów [12] - [14], to problem bardzo wolnej zbieżności tych algorytmów, pojawiający się w specyficznych wariantach usytuowania przeszkód nie był badany. Ponadto, wg wiedzy habilitanta, metody te nie doczekały się do tej pory weryfikacji eksperymentalnej. Habilitant planuje takie eksperymenty przeprowadzić.
- Habilitant zamierza zaproponować sterowanie robotami mobilnymi w środowisku ze złożonymi, niewypukłymi przeszkodami. Większość istniejących rozwiązań tego problemu realizowana jest w warstwie planowania. Zdaniem habilitanta funkcja nawigacji może pozwolić przesunąć rozwiązanie tego problemu do warstwy sterowania. Jeżeli synteza takiego sterownika okaże się możliwa a symulacje numeryczne dadzą obiecujące wyniki, habilitant planuje zaimplementować go i przetestować z użyciem sprzętu.

Literatura

- [1] C. De Wit, H. Khenouf, C. Samson, O. Sordalen, „Nonlinear Control Design for Mobile Robots”, Recent Trends Mob. Rob., str. 121–156, 1994.
 - [2] T. Urakubo, K. Okuma, Y. Tada, Feedback control of a two wheeled mobile robot with obstacle avoidance using potential functions. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. (IROS) 3, str. 2428–2433, 2004.
-

- [3] T. Urakubo, Feedback stabilization of a nonholonomic system with potential fields: application to a two-wheeled mobile robot among obstacles. *Nonlinear Dyn.* 81(3), str. 1475–1487, 2015.
 - [4] E. Rimon, D. Koditschek, Exact robot navigation using artificial potential functions. *IEEE Trans. Robot. Autom.* 8(5), str. 501–518, 1992.
 - [5] D. Panagou, M. Turpin, V. Kumar, Decentralized goal assignment and trajectory generation in multi-robot networks: A multiple Lyapunov functions approach. In *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Hong Kong, China, 31 May–5 June 2014; str. 6757–6762.
 - [6] M. Turpin, N. Michael, V. Kumar, Capt: Concurrent Assignment and Planning of Trajectories for Multiple Robots. *Int. J. Robot. Res.* 2014, 33, 98–112.
 - [7] K. D. Do, Formation Tracking Control of Unicycle-Type Mobile Robots With Limited Sensing Ranges. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2008, 16, 527–538.
 - [8] Mastellone, S.; Stipanovic, D.; Spong, M. Formation control and collision avoidance for multi-agent non-holonomic systems: Theory and experiments. *Int. J. Robot. Res.* 2008, 107–126.
 - [9] A. Loria, J. Dasdemir, N. Alvarez Jarquin, Leader—Follower Formation and Tracking Control of Mobile Robots Along Straight Paths. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2016, 24, 727–732.
 - [10] M. Bennewitz, W. Burgard, A Probabilistic Method for Planning Collision-free Trajectories of Multiple Mobile Robots, *Robots*,” 14th European Conference on Artificial Intelligence, 2000.
 - [11] F. Augugliaro, A. Schoellig, R. D’Andrea, Generation of collision-free trajectories for a quadrocopter fleet: A sequential convex programming approach, 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 7-12, 2012. Vilamoura, Algarve, Portugal.
 - [12] D. Dimarogonasa, G. Loizoua, K. Kyriakopoulos, M. Zavlanosb A feedback stabilization and collision avoidance scheme for multiple independent non-point agents. *Automatica* 42(2), 229–243 (2005).
 - [13] G. Roussos, K. Kyriakopoulos, Completely decentralised navigation of multiple unicycle agents with prioritisation and fault tolerance. In: *IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, str. 1372–1377 (2010).
-

- [14] G. Roussos, K. Kyriakopoulos, Decentralized and prioritized navigation and collision avoidance for multiple mobile robots. *Distrib. Autonom. Robot. Sys. - Springer Tracts Adv. Robot.* 83, 189–202 (2013).
- [15] G. Roussos, K. Kyriakopoulos, Decentralized navigation and conflict avoidance for aircraft in 3-D space. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 20(6), 1622–1629 (2012). <https://doi.org/10.1109/TCST.2011.2167974>.
- [16] G. Roussos, D. Dimarogonas, K. Kyriakopoulos, 3D navigation and collision avoidance for nonholonomic aircraft-like vehicles. *Int. J. Adapt. Control Signal Process. Special Issue: Air Traffic Manag.: Challenges Opport.* Adv. Control 24(10), 900–920 (2010).
- [17] A. Desai, E. Cappelletti, N. Michael, Dynamically feasible and safe shape transitions for teams of aerial robots. In *Proceedings of the 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon Convention Center, Daejeon, Korea, 9–14 October 2016; str. 5489–5494.
- [18] Alonso-Mora, J.; Baker, S.; Rus, D. Multi-robot formation control and object transport in dynamic environments via constrained optimization. *Int. J. Robot. Res.* 2017, 36, 1000–10217.
- [19] M. Michałek, K. Kozłowski, Vector-field-orientation feedback control method for a differentially driven vehicle, *IEEE Trans. on Control Systems Technology* 18 (1), 45–65 (2010).

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

(W rozdziale zastosowano osobną numerację odnośników do literatury; dla odróżnienia zastosowano numery arabskie w nawiasach okrągłych).

Do wniosku dołączono trzy wybrane prace, będące rozdziałami w monografiach, opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora, a które nie stanowią części cyklu stanowiącego podstawę ubiegania się o habilitację. W (18) przedstawiono wyniki badań możliwości praktycznego wykorzystania linearyzacji typu wejście-wyjście w przypadku robota mobilnego sterowanego różnicowo. Celem przeprowadzonych badań była weryfikacja w jaki sposób wielkość odsunięcia punktu sterowanego z osi kół robota wpływa w praktyce na właściwości układu zamkniętego.

W pracy (17) zaproponowano rozszerzenie algorytmu orientowania pól wektorowych na sterowanie formacją robotów, których modele uwzględniają dynamikę platform mobilnych. Zastosowano technikę backsteppingu.

Rozdział w monografii PWN (16) przedstawia obszerny przegląd metod sterowania formacją robotów opracowanych przez habilitanta wraz z współautorami w ostatnich latach. Praca ta zawiera dowody stabilności dla przedstawionych metod oraz wyniki symulacji numerycznych.

Spis prac, które nie są częścią cyklu stanowiącego podstawę ubiegania się o habilitację:

- (1) K. Kozłowski (55%), W. Kowalczyk (45%), „Local and global artificial potential functions in the control of mobile robots”. *Memorias De Congresos UTP*, 1(1), str. 5-20, 2018.

Mój wkład polegał na przygotowaniu rozdziału 4, dotyczącego funkcji nawigacji oraz przeprowadzeniu symulacji numerycznych przedstawionych w artykule. Mój udział procentowy szacuję na 45%.

- (2) W. Kowalczyk (70%), K. Kozłowski (30%), „Leader-Follower Control and Collision Avoidance for the Formation of Differentially-Driven Mobile Robots,” 2018 23rd International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics (MMAR), Międzyzdroje, 2018, str. 132-137, doi: 10.1109/MMAR.2018.8485851.

Mój wkład polegał na zaproponowaniu algorytmu sterowania uwzględniającego unikanie kolizji oraz przeprowadzeniu symulacji numerycznych zaprezentowanych w artykule. Mój udział procentowy szacuję na 70%. Zagadnienia zaprezentowane w artykule przedstawiałem w trakcie wystąpienia na sesji konferencyjnej.

- (3) K. Kozłowski (55%), W. Kowalczyk (45%), „Collision Avoidance with Artificial Potential Function for Two-Wheeled Mobile Robot Tracking Desired Trajectory,” 2018 IEEE 8th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), Tianjin, China, 2018, str. 1519-1526, doi: 10.1109/CYBER.2018.8688039.

Mój wkład polegał na zaproponowaniu metodologii unikania kolizji w algorytmie śledzenia trajektorii referencyjnej oraz wykonaniu testów numerycznych przedstawionych w artykule. Mój udział procentowy szacuję na 45%.

- (4) M. Przybyła (50%), M. Drażkowska (40%), W. Kowalczyk (10%), „Reactive obstacle avoidance in crowded environments for 2D omni-directional robot”, 2017 11th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo), Wasowo, 2017, str. 238 – 243,
doi: 10.1109/RoMoCo.2017.8003919. Punktacja MNiSW: 15 (Web of Science).
Mój wkład polegał na udziale w interpretacji wyników eksperymentów. Mój udział procentowy szacuję na 10%.
- (5) M. Przybyła (50%), W. Kowalczyk (30%), K. Kozłowski (20%), Navigation Function Used for Parallel Parking in Restricted Area by a Differentially-Driven Mobile Robot, IFAC-PapersOnLine, Volume 50, Issue 1, July 2017, str. 4312-4317, Part of special issue: 20th IFAC World Congress, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.852. Punktacja MNiSW: 15 (Web of Science).
Mój wkład polegał na implementacji algorytmu sterowania zaproponowanego w artykule oraz interpretacji wyników eksperymentalnych. Mój udział procentowy szacuję na 30%.
- (6) P. Herman (70%), W. Kowalczyk (30%), „Velocity tracking control of AUVs in horizontal motion”, 2016 3rd Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol), Barcelona, 2016, str. 105-110, doi: 10.1109/SYSTOL.2016.7739736. Punktacja MNiSW: 15 (Web of Science).
Mój wkład polegał na przeprowadzeniu symulacji numerycznych zaprezentowanych w artykule. Mój udział procentowy szacuję na 30%.
- (7) P. Herman (65%), W. Kowalczyk (35%), "Velocity tracking controller for planar motion of underwater vehicles," 2016 3rd Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol), Barcelona, 2016, str. 139-144, doi: 10.1109/SYSTOL.2016.7739741. Punktacja MNiSW: 15 (Web of Science).
Mój wkład polegał na przeprowadzeniu symulacji numerycznych zaprezentowanych w artykule. Mój udział procentowy szacuję na 35%.
- (8) W. Kowalczyk (50%), M. Przybyła (25%), K. Kozłowski (25%), „Control of a mobile robot and collision avoidance using navigation function - experimental verification”, 2015 10th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo), Poznań, 2015, str. 148-152, doi: 10.1109/RoMoCo.2015.7219727. Punktacja MNiSW: 15 (Web of Science).
-

Mój wkład polegał na implementacji algorytmu w systemie pokładowym robota, przeprowadzeniu eksperymentów oraz przygotowaniu interpretacji uzyskanych wyników. Mój udział procentowy szacuję na 50%. Zagadnienia zaprezentowane w artykule przedstawiałem w trakcie wystąpienia na sesji konferencyjnej.

- (9) P. Herman (65%), W. Kowalczyk (35%), „Position tracking controller based on transformed equations of horizontal motion for a class of vehicles”, 2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Torremolinos, 2015, str. 1148-1153, doi: 10.1109/MED.2015.7158910. Punktacja MNiSW: 15 (Web of Science).

Mój wkład polegał na przeprowadzeniu symulacji numerycznych zaprezentowanych w artykule. Mój udział procentowy szacuję na 35%.

- (10) P. Herman (65%), W. Kowalczyk (35%), „A nonlinear controller for trajectory tracking of hovercraft robot”, 22nd Mediterranean Conference on Control and Automation, Palermo, 2014, str. 1311-1315, doi: 10.1109/MED.2014.6961557. Punktacja MNiSW: 15 (Web of Science).

Mój wkład polegał na przeprowadzeniu symulacji numerycznych zaprezentowanych w artykule. Mój udział procentowy szacuję na 35%.

- (11) K. Kozłowski (20%), W. Kowalczyk (20%), B. Krysiak (20%), M. Kielczewski (20%), T. Jedwabny (20%), „Modular architecture of the multi-robot system for teleoperation and formation control purposes”, 9th International Workshop on Robot Motion and Control, Kuslin, 2013, str. 19-24, doi: 10.1109/RoMoCo.2013.6614578. Punktacja MNiSW: 15 (Web of Science).

Mój wkład polegał na opracowaniu architektury sterownika wysokiego poziomu dla robota MTracker. Mój udział procentowy szacuję na 20%. Zagadnienia zaprezentowane w artykule przedstawiałem w trakcie wystąpienia na sesji konferencyjnej.

- (12) W. Kowalczyk (65%), K. Kozłowski (35%), Teleoperation of the group of mobile robots, The Israeli Conference on Robotics, Tel Aviv, Israel, 2013.

Mój wkład polegał na zaprojektowaniu metody teleoperowania grupą robotów oraz przeprowadzeniu eksperymentów. Mój udział procentowy szacuję na 65%.

- (13) W. Kowalczyk (80%), M. Michałek (10%), K. Kozłowski (10%), Trajectory Tracking Control and Obstacle Avoidance for a Differentially Driven Mobile Robot, IFAC Proceedings Volumes, Part of special issue: 18th IFAC World Congress,

Volume 44, Issue 1, January 2011, str. 1058-1063, doi: 10.3182/20110828-6-IT-1002.03567. Punktacja MNiSW: 10 (Web of Science).

Mój wkład polegał na zaproponowaniu rozszerzenia algorytmu orientowania pól wektorowych o funkcję unikania kolizji z przeszkodami statycznymi, przeprowadzeniu analizy stabilności oraz symulacji zamieszczonych w artykule. Mój udział procentowy szacuję na 80%.

- (14) W. Kowalczyk (60%), K. Kozłowski (30%) and J. K. Tar (10%), „Trajectory tracking for multiple unicycles in the environment with obstacles”, 19th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD 2010), Budapest, 2010, str. 451-456, doi: 10.1109/RAAD.2010.5524544.

Mój wkład polegał na zaprojektowaniu algorytmu sterowania oraz przeprowadzeniu eksperymentów. Mój udział procentowy szacuję na 60%.

- (15) W. Kowalczyk (65%), K. Kozłowski (35%), Multiple nonholonomic mobile robots in the environment with obstacles, IFAC Proceedings Volumes, Part of special issue: 4th IFAC Symposium on System Structure and Control, Volume 43, Issue 21, 2010, str. 84-89, doi: 10.3182/20100915-3-IT-2017.00070.

Mój wkład polegał na zaproponowaniu algorytmu sterowania grupą robotów oraz przeprowadzeniu testów symulacyjnych przedstawionych w artykule. Mój udział procentowy szacuję na 65%.

- (16) K. Kozłowski (55%), W. Kowalczyk (45%), „Sterowanie formacją robotów mobilnych z wykorzystaniem funkcji sztucznych potencjałów”, rozdział w monografii PWN pt. „Automatyka, robotyka i przetwarzanie informacji”, 40 stron, 2019, praca przyjęta do publikacji (list potwierdzający w załączniku). Punktacja MNiSW: 15 (rozdział w monografii).

Mój wkład polegał na zaproponowaniu metod przedstawionych w rozdziałach 8, 9 i 11 przeprowadzeniu symulacji oraz opracowaniu ich wyników. Mój udział procentowy szacuję na 45%.

- (17) K. Kozłowski (55%), W. Kowalczyk (45%), „Formation Control and Vision Based Localization of a System of Mobile Robots” (2016) In: Filipe J., Madani K., Gusikhin O., Sasiadek J. (eds) Informatics in Control, Automation and Robotics 12th International Conference, ICINCO 2015 Colmar, France, July 21-23, 2015 Revised Selected Papers. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 383, str. 3-
-

27, Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-319-31898-1_1. Punktacja MNiSW: 15 (Web of Science).

Mój wkład polegał na przeprowadzeniu symulacji numerycznych, opracowaniu ich wyników oraz przygotowaniu opisu elementów stanowiska eksperymentalnego. Mój udział procentowy szacuję na 45%.

- (18) W. Kowalczyk (60%), K. Kozłowski (40%), „Feedback Linearization of the Differentially Driven Mobile Robot: An Experimental Verification”, Advances in Soft Computing, Intelligent Robotics and Control, part of the Topics in Intelligent Engineering and Informatics book series (TIEI, volume 8), str. 41-54, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-05945-7_2. Punktacja MNiSW: 5 (rozdział w monografii).

Mój wkład polegał na opracowaniu metodologii testów metody linearyzacji wejście-wyjście dla dwukołowego robota mobilnego oraz przeprowadzeniu badań eksperymentalnych. Mój udział procentowy szacuję na 60%.

- (19) 4. M. Michałek (75%), W. Kowalczyk (15%), K. Kozłowski (10%), „Strategia śledzenia trajektorii z unikaniem kolizji dla robota mobilnego klasy (2, 0)”, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Elektronika, wydanie 175, str. 381-390, 2010. Punktacja MNiSW: 2 (lista B).

Mój wkład polegał na wykonaniu eksperymentów i opracowaniu ich wyników, które zostały przedstawione w rozdziale 3 artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 15%.

- (20) K. Kozłowski (55%), W. Kowalczyk (45%), „Motion control for formation of mobile robots in environment with obstacles”, Towards Intelligent Engineering and Information Technology, part of the Studies in Computational Intelligence book series (SCI, volume 243), str. 203-219, 2009, doi: 10.1007/978-3-642-03737-5_15ID. Punktacja MNiSW: 7 (rozdział w monografii).

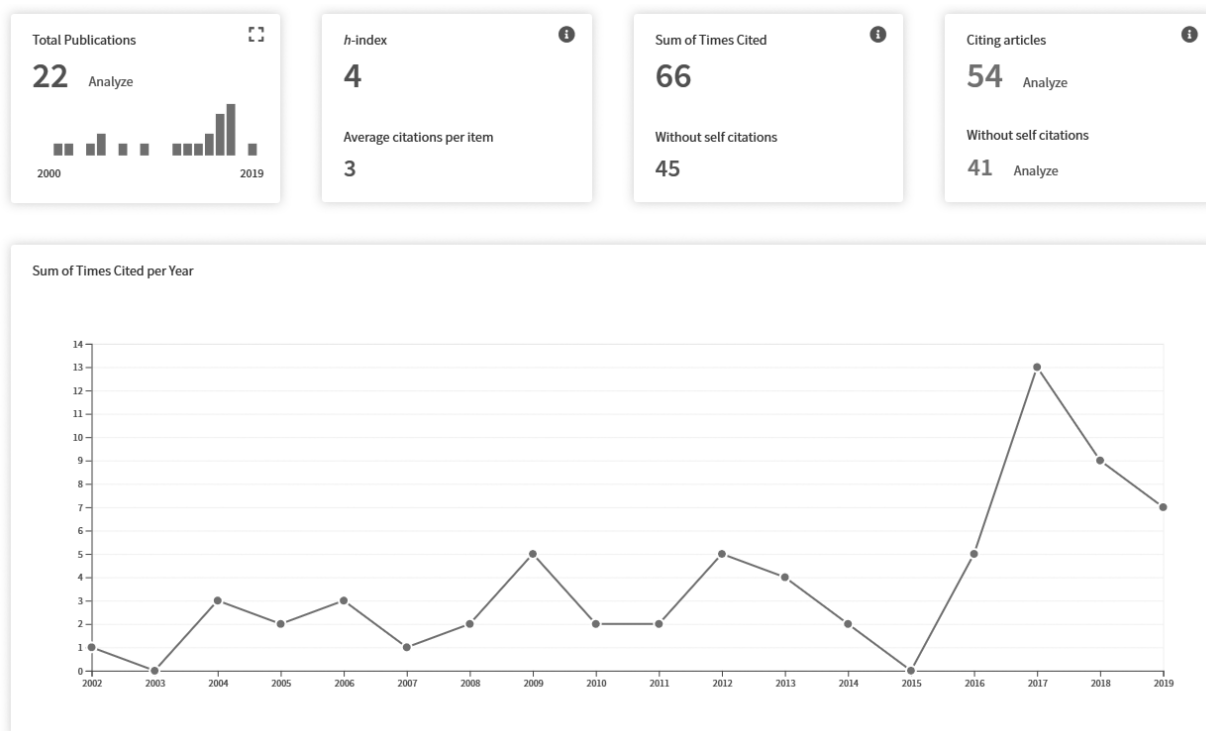
Mój wkład polegał na zaproponowaniu metody unikania kolizji, przeprowadzeniu badań symulacyjnych i eksperymentalnych oraz opracowaniu ich wyników.

Mój udział procentowy szacuję na 45%.

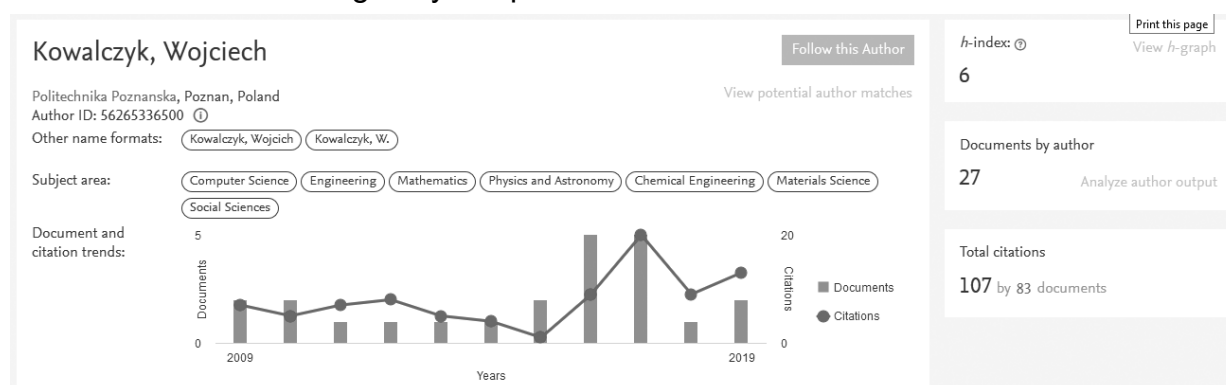
Podsumowanie działalności naukowej:

- Artykuły opublikowane w czasopiśmie JCR: **7**
- Pozostałe artykuły: **23**

- Sumaryczny Impact Factor publikacji naukowych wg listy JCR po uzyskaniu tytułu doktora nauk technicznych: **7,941**
- Sumaryczna liczba punktów MNiSW: **377**
- Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Scince (z uwzględnieniem autocytowań/z wyłączeniem autocytowań): **66/45**
- Liczba cytowań publikacji według bazy Scopus: (z uwzględnieniem autocytowań/z wyłączeniem autocytowań) **83/64**
- Liczba cytowań publikacji według bazy Google Scholar (z uwzględnieniem autocytowań/z wyłączeniem autocytowań): **167/120**
- Indeks Hirscha według bazy Web of Science: **4**



- Indeks Hirscha według bazy Scopus: **6**



- Indeks Hirscha według bazy Google Scholar: **7**
- Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach: **3**
- Liczba referatów opublikowanych w materiałach konferencyjnych: **18**
- Staże w zagranicznych ośrodkach naukowych: **1**

Seria wykładów zatytułowanych „Artificial Potential Functions in the Control of Mobile Robots” - Polytech Clermont-Ferrand, Francja - dla studentów stopnia magisterskiego i doktorantów (8h), 2019; wyjazd w ramach programu ERASMUS+ do Institut Pascal.

W czasie stażu nawiązana została współpraca naukowa, która zdaniem habilitanta w najbliższym czasie zaowocuje wspólnymi badaniami oraz publikacjami. Institut Pascal jest wiodącym ośrodkiem badawczym w zakresie robotów autonomicznych, w szczególności autonomicznych pojazdów drogowych.

- Recenzowanie artykułów

Czasopisma:

1. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science: **4**
2. Journal of Behavioral Robotics: **2**
3. Journal of Intelligent & Robotic Systems: **2**

Konferencje:

4. American Control Conference (ACC): **16**
5. IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO): **7**
6. Conference on Decision and Control (CDC): **8**
7. International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo): **4**
8. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA): **2**
9. International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics: **2**

Aktywność habilitanta obejmuje, oprócz badań naukowych, działania popularyzujące naukę oraz dotyczące dydaktyki. Poniżej przedstawiono podsumowanie prowadzonych przez niego działań:

- Promotor **5 prac inżynierskich**,
- Promotor **14 prac magisterskich**,

Prace inżynierskie i magisterskie

W ramach realizowanych pod opieką habilitanta prac inżynierskich [D6], [D7] i magisterskich [D1] – [D5] powstają projekty, które przyczyniają do lepszego poznania zagadnień związanych ze sterowaniem robotami mobilnymi. Studenci mają styczność z najnowszymi rozwiązaniami w dziedzinie robotyki mobilnej, i to zarówno od strony teoretycznej jak i praktycznej (różnorakie platformy mobilne, system śledzenia ruchu OptiTrack, czujniki pokładowe takie jak dalmierze laserowe). Tematyka prac dyplomowych nawiązuje do badań habilitanta. Te prowadzone w ostatnich latach dotyczyły zarówno lokalnych funkcji sztucznych potencjałów w zastosowaniu do systemów wielorobotowych [D3], [D4], [D6], [D7], jak i funkcji nawigacji [D1], [D2], [D5]. Wszystkie przytoczone prace dyplomowe obejmowały zadanie implementacji algorytmów sterowania z użyciem sprzętu.

[D1] R. Kamiński, „Wykorzystanie analitycznych funkcji kształtów do sterowania platformą mobilną w złożonym środowisku”, praca magisterska, Wydział Informatyki, Politechnika Poznańska, 2018.

[D2] M. Szura, „Nawigacja i sterowanie robotem dwukołowym klasy (2,0) w wąskim korytarzu z przeszkodami z wykorzystaniem sztucznych pól potencjałowych”, praca magisterska, Wydział Informatyki, Politechnika Poznańska, 2018.

[D3] P. Siwka, „Budowanie uporządkowanej formacji robotów z wykorzystaniem komunikacji między agentami”, praca magisterska, Wydział Informatyki, Politechnika Poznańska, 2017.

[D4] M. Pilch, „Śledzenie trajektorii dla grupy nieholonomicznych robotów mobilnych z unikaniem kolizji”, praca magisterska, Wydział Informatyki, Politechnika Poznańska, 2016.

[D5] M. Mikołajczyk, „Sterowanie wieloma robotami w środowisku ze statycznymi niewypukłymi przeszkodami”, praca magisterska, Wydział Informatyki, Politechnika Poznańska, 2016.

[D6] R. Patelski, Ł. Raburski, „Wykorzystanie funkcji sztucznych potencjałów w sterowaniu formacją robotów mobilnych”, praca inżynierska, Wydział Informatyki, Politechnika Poznańska, 2016.

[D7] Ł. Adamski, M. Ciszewski, P. Kanarek, „Wykorzystanie metody wirtualnej struktury do transportu ładunku przez grupę robotów”, praca inżynierska, Wydział Informatyki, Politechnika Poznańska, 2015.

- Organizacja pokazów na Politechnice Poznańskiej w ramach wydarzenia „**Noc naukowców**” w latach 2011-2014 – czterokrotnie,
 - Organizacja pokazów na Politechnice Poznańskiej w ramach wydarzenia „**Robotics Week**”, 2011,
 - Reprezentacja Wydziału Informatyki Politechniki Poznańskiej przez organizację pokazów w ramach wydarzenia „**Interaktywny Festiwal Robotów: Cyberiada**” w Muzeum Techniki i Przemysłu NOT w Warszawie, 2013,
 - **Recenzent w XXXII Konkursie Polskiego Towarzystwa Informatycznego** w roku 2015 na zlecenie Politechniki Wrocławskiej, recenzowana praca magisterska: Michał Konarski, „Behawioralny algorytm koordynacji ruchu robotów mobilnych”, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji, Katedra Informatyki, Kraków 2014,
 - Przygotowanie i prowadzenie zajęć dydaktycznych z następujących przedmiotów w j. polskim:
 - ◆ Systemy wieloagentowe - wykład
 - ◆ Systemy teleoperacyjne – wykład
 - ◆ Systemy wieloagentowe - projekt
 - ◆ Systemy teleoperacyjne – projekt
 - ◆ Teoria sterowania - projekt
 - ◆ Elektrotechnika i elektronika - wykład
 - ◆ Wprowadzenie do robotyki – ćwiczenia
 - ◆ Sterowanie neuro-rozmyte – laboratorium
 - Przygotowanie i prowadzenie zajęć dydaktycznych z następujących przedmiotów w j. angielskim:
 - ◆ Multiagent systems – wykład (SAAS)
 - ◆ Electrical engineering and electronics – wykład
-

◆ Basics of smart systems – laboratorium (SAAS)

SAAS - Smart Aerospace and Autonomous Systems jest specjalnością na stopniu magisterskim prowadzonym we współpracy z University of Evry. Studenci realizują zajęcia na dwóch uczelniach (w różnych semestrach) i uzyskują dwa dyplomy ukończenia studiów: Politechniki Poznańskiej oraz University of Evry, Francja.

Część prowadzonych zajęć dydaktycznych jest bezpośrednio związana z zakresem badań habilitanta. Dzięki temu studenci przedmiotów 'Systemy wieloagentowe', 'Systemy teleoperacyjne' i 'Multiagent systems' uzyskują wiedzę o najnowszych osiągnięciach w tych obszarach.

Tematy poruszane w ramach zajęć (szczególnie projektowych) wpływają na rozwój zainteresowań studentów dotyczących robotyki mobilnej i często skutkuje to podejmowaniem przez nich realizacji prac dyplomowych pod opieką habilitanta.

- Indywidualne zajęcia dydaktyczne dla studentów zagranicznych uczestniczących w programie Erasmus, liczba studentów: **8**:

Introduction to Robotics - 7 studentów w latach 2014-2019;

Electronics and Electrical Engineering - 1 student w roku akademickim 2017/18,

- Praca na stanowisku programisty w firmie FORcom PHU, 1999-2000, 14 miesięcy (przed uzyskaniem tytułu doktora).

Porównanie dorobku naukowego przed i po uzyskaniu stopnia doktora

	Przed uzyskaniem stopnia doktora	Po uzyskaniu stopnia doktora
Liczba publikacji (ogółem)	9	30
Rozdziały w monografiach	2	5
Liczba publikacji z listy JCR	0	7
Punkty za publikacje z listy JCR	0	163
Punkty MNiSW	85	377

Prace poprzedzające uzyskanie stopnia doktora poruszały następujące zagadnienia:

- sterowanie i planowanie ruchu dla grupy robotów mobilnych - 7 artykułów,
- wykorzystanie robota przemysłowego w aplikacji chirurgicznej - 1 artykuł,
- sterowaniem manipulatorem o elastycznych ogniwach - 1 artykuł.

Przed uzyskaniem stopnia doktora habilitant brał udział w następujących sieciach badawczych:

- Wspinające się oraz kroczące roboty, eksperymentalne, mobilne platformy robotyczne oraz ich zastosowanie (Climbing and Walking robots: Mobile robotic demonstrators and applications), 2003-2005,
- Sieć tematyczna European Robotics Network, 2005-2007.

Wojciech Kowalewski
.....
(podpis wnioskodawcy)