

PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne

prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

Profesor dr hab. inż. Zdzisław Kowalczyk
Katedra Systemów Decyzyjnych i Robotyki
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Politechniki Gdańskiej

Gdańsk, 18.02.2024

WYDZIAŁ AUTOMATYKI,
ROBOTYKI I I ELEKTROTECHNIKI
POLITECHNIKI POZNAŃSKA

05-03-2024

WPŁYNEŁO

O C E N A

**dorobku naukowego i działalności naukowej
dr inż. Michała Nowickiego**

**w postępowaniu dotyczącym przyznania stopnia
doktora habilitowanego nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne
prowadzonym przez
Radę Dyscypliny AEETK Politechniki Poznańskiej**

Podstawę do opracowania niniejszej opinii stanowi pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne (AEETK), prof. dr hab. inż. Wojciecha Szelaąga datowane na 14 grudnia 2023 r. skierowane do mnie w wyniku uchwały nr 18/2023-2024 z dnia 15.11.2023 Rady Dyscypliny AEETK Politechniki Poznańskiej, informujące o powołaniu mnie na recenzenta w postępowaniu habilitacyjnym dr inż. Michała Nowickiego, wszczętym w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne na podstawie wniosku habilitanta z dnia 29.05.2023.

Opinię przygotowałem na podstawie załączonej szczegółowej dokumentacji przewodu habilitacyjnego w języku polskim, zawierającej – oprócz danych wnioskodawcy, kopii dyplomu doktora oraz wykazu osiągnięć (załącznik nr 4) – autoreferat (załącznik nr 2 i 3) zawierający informację o karierze naukowej i dotychczasowym zatrudnieniu oraz osiągnięć naukowo-badawczych w formie jednotematycznego cyklu publikacji pod nazwą: „*Wielosensoryczna lokalizacja robotów mobilnych*”, który stanowi obszernie omówienie problematyki badawczej w języku polskim na tle ośmiu wskazanych publikacji naukowych (podanych w postaci PDF na załączonej pamięci USB) oraz związanych z nimi problemów badawczych, jednak nie zawiera monografii, która w mojej opinii stanowi zwykle najbardziej wartościowe, życiowe zwięźczenie wysiłku badawczego naukowca.

I. Ogólna sylwetka aplikanta

Dr Michał Nowicki uzyskał w roku 2014 dyplom magistra inżyniera na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej w specjalności Robotyka na podstawie pracy pt. „Development and implementation of a visual odometry algorithm for mobile devices”. Stopień doktora nauk technicznych został mu nadany w roku 2018 przez tenże Wydział na podstawie rozprawy doktorskiej pt. „Methods for the fusion of quantitative and qualitative information using factor graph optimization for the simultaneous localization and mapping problem” (promotor: Piotr Skrzypczyński/PP; recenzenci: Dariusz Uciński/UZ oraz Bogdan Kwolek/AGH). Jak widać, aplikant posiada stabilne zatrudnienie na Politechnice Poznańskiej, gdzie pracował najpierw jako asystent w Instytucie Automatyki, Robotyki i Inżynierii Informatycznej (2014-2018), a następnie jako adiunkt w Instytucie Robotyki i Inteligencji Maszynowej (2018-2023).

Habilitant posiada duży dorobek w zakresie współpracy z krajowymi i międzynarodowymi instytucjami naukowymi i przemysłowymi. Jego badania dotyczyły wielu aspektów naukowych i

technologicznych związanych głównie z tematyką jedno- i wielosensorycznej lokalizacji robotów mobilnych w środowisku pracy. Wyniki pięciu prac badawczych znalazły się w artykułach opublikowanych w prestiżowych czasopismach: *IEEE Robotics and Automation Letters* oraz *Measurement* (autorskie), jak również *IEEE Robotics and Automation Letters*, *Robotics and Autonomous Systems*, *Journal of Applied Mathematics and Computer Science* (współautorskie). Habilitant posiada duże doświadczenie przemysłowe oraz wykazuje bogaty zbiór różnych przejawów współpracy międzynarodowej, w tym udziału w projektach naukowych i badawczych.

Po doktoracie Michał Nowicki opublikował 23 artykuły w czasopismach (12 na liście JCR, w tym 4 w MDPI Sensors) oraz wygłosił 11 prac na konferencjach (takich jak ICRA, ICARCV, APCOM). Ponadto, szczydzi się on, według bazy WoS, imponującą liczbą 565 cytowań oraz indeksem Hirscha na poziomie 13 i sumarycznym wskaźnikiem wpływu (JCR) IF około 53 (w bazie Scopus oraz Google Scholar wskaźniki te są odpowiednio wyższe: 490/14 oraz 1000/17).

II. Ocena dorobku naukowego

Ocena dorobku naukowego obejmuje ogólną charakterystykę obszaru badawczego, dorobek naukowy i warsztatowy, charakterystykę dorobku i zawartość naukową ocenianej serii publikacji (w tym uwagi krytyczne) oraz konkluzję dotyczącą dorobku i wskazanie wkładu autora w rozwój dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

1. Ogólna charakterystyka obszaru badawczego

Doktor Michał Nowicki prezentuje dobry przypadek szybkiej kariery naukowej. W ramach swojej działalności akademickiej prowadzi badania naukowe i rozwojowe, w których podejmuje się – w celu powiększenia zasobów wiedzy i zakresu jej wykorzystania – rozwiązywania zauważonych istotnych problemów technicznych i tworzenia nowych zastosowań.

Zagadnienie autonomii robotów mobilnych jest problemem złożonym, związanym głównie ze zróżnicowaniem środowiska pracy, a także typem robotów i ich wyposażenia, rodzajem zadań oraz dostępną mocą obliczeniową. Zgodnie z ogólnym paradygmatem rozwoju systemów (automatyki), złożone projekty dzieli się na zadania składowe, związane z podległymi operacjami (np. percepcją, lokalizacją, planowaniem i kontrolą), które są rozwiązywane niezależnie, a następnie łączone w jeden kompletny system.

W swojej pracy badawczej habilitant skupił się na wybranych aspektach percepcji i lokalizacji w celu właściwego postrzegania otoczenia. Zebrane wyniki pozwalają na realizację różnych zadań składających się na autonomię systemu (jak diagnostyka i monitorowanie, planowanie i sterowanie).

W omawianym osiągnięciu naukowym dr Michał Nowicki skupia się na problemie lokalizacji z użyciem systemów wielosensorycznych, który obejmuje całe spektrum operacji, od kalibracji czujników po metody fuzji informacji w celu poprawy jakości i wydajności systemów zwłaszcza względem tych, które wykorzystują pojedyncze czujniki.

W perspektywie budowy robotów autonomicznych, przedmiotem studiów habilitanta jest zatem zagadnienie lokalizacji robota, które obejmuje kalibrację czasoprzestrzenną czujników (kamer RGB i obrotowych systemów LiDAR 3D), rozpoznawanie miejsc w oparciu o obrazy RGB i lidarowe chmury punktów, wykorzystanie sieci neuronowych w przetwarzaniu takiej chmury punktów, aplikację specjalnych architektur do wielosensorycznej klasyfikacji terenu, wykorzystanie transformerów do lokalizacji, stosowanie wyuczonej i nienadzorowanej reprezentacji danych dla lokalizacji haptycznej, systemy lokalizacji dla robota kroczącego przy użyciu rzadkich danych dotykowych, oraz praktyczną estymację pozy w zadaniu dokowania autobusu.

Rozważania te ściśle wiążą się z popularnym problemem SLAM (ang. *Simultaneous Localization and Mapping*), który zwykle znajduje swoją implementację w postaci złożonego systemu dynamicznego, który jest bardzo wrażliwy na błędy pomiarowe (warto tu przywołać zagadnienie różnic w traktowaniu takich błędów przez znane kryteria najmniejszych kwadratów i najmniejszych wartości bezwzględnych, LS i LA). Konsekwencją tej wrażliwości mogą być duże błędy w estymacji pozycji robota oraz narzędziowej mapy.

2. *Motywacja, warsztat naukowy i dorobek*

Oceniany dorobek naukowy doktora Michała Nowickiego jest wynikiem jego silnego skupienia na wybranych aspektach naukowych zagadnienia lokalizacji robota.

Jak wspomniano, systemy SLAM są bardzo wrażliwe na błędy pomiarowe, czego konsekwencją mogą być duże błędy w estymacji pozycji oraz mapy. Dlatego w recenzowanym cyklu artykułów habilitant uprościł swój problem badawczy – zakładając dostępność mapy (zbędność SLAM) i skupił się na zagadnieniu lokalizacji w oparciu o zadanie percepcyjne z wykorzystaniem opcji multisensorycznej. W pracach habilitanta pojawiają się zatem praktyczne rozwiązania lokalizacyjne dla robotów, w przypadkach kiedy nie jest konieczne stosowanie kompletnych systemów pokładowych SLAM.

Systemy wielosensoryczne wymagają szczególnie dokładnego wzorcowania, w celu osiągnięcia zgodności wszystkich pomiarów potrzebnej do ich fuzji. W przypadku wysokich wymagań dokładnościowych, zadanie kalibracji przestrzennej i czasowej wymaga znacznego wysiłku projektanta. Nie sprawdzają się tu gotowe rozwiązania, a stan wiedzy w zakresie systemów kalibracyjnych odnosi się głównie do systemów LiDAR 2D (i relacji przestrzennych pomiędzy sensorami, bez uwzględniania relacji czasowych). Aby rozwiązać zachodzące tu problemy, kandydat opracował algorytm wyznaczania ścisłych relacji przestrzennych i czasowych pomiędzy sensorami.

Testy polowe przeprowadzone z autobusem wykazały skuteczność rozwiązania opartego na kamerach, które były w stanie wykryć małą ładowarkę elektryczną z dużej odległości (30m) z dokładnością lokalizacji umożliwiającą zaplanowanie i realizację trajektorii ruchu przegubowego autobusu. Zastosowano innowacyjną (względem podejść opartych na błędzie wzorcowania) metodę kalibracji zestawu sensorów na autobusie opartą na skuteczności.

Podczas eksperymentów z kalibracją wielosensoryczną autor (podobnie jak wielu inżynierów praktyków i robotyków) poznał trudy i żmudność kalibracji, w konsekwencji czego zwrócił się ku popularnej obecnie konstrukcji polegającej na łączeniu dwóch typów czujników: kamery i LiDARu 3D. W takim rozwiązaniu LiDAR 3D dostarczając dodatkową informację geometryczną skutecznie wspiera podstawowe rozwiązanie oparte na kamerze.

Ponieważ systemy oparte na kamerach charakteryzują się niższą wydajnością w trudnych warunkach pogodowych (deszcz, słońce, noc), zaś LiDAR 3D dostarcza danych uzupełniających, habilitant dostrzegł szansę na zwiększenie użyteczności systemu lokalizacji i sformułował problem badawczy: Jak należy przygotować chmury punktów 3D uzyskane z systemu LiDAR 3D do analizy przez głębokie sieci neuronowe?

Generalnie należy oczekiwać, że w przypadku autonomicznych robotów mobilnych (jak i przy podejmowaniu jakichkolwiek decyzji inżynierskich) wszelkie dodatkowe wskazówki mogą okazać się pomocne. Kolejny impuls dla działań dra Nowickiego związany był z problemami, których należy oczekiwać przy analizie danych nieobrazowych za pomocą sztucznych sieci neuronowych.

W oparciu o dostrzeżone wyzwania habilitant sformułował czterotorowy cel omawianego cyklu publikacji w postaci zaprojektowania i wdrożenia: (1) oprogramowania do kalibracji kamer RGB i obrotowych systemów LiDAR 3D, z zamiarem wyznaczenia przesunięcia znacznika czasu (przy braku wyzwalacza sprzętowego) oraz trójwymiarowych zależności geometrycznych pomiędzy czujnikami, kluczowych dla efektywności kalibracji; (2) metody kalibracji, która optymalizuje percepcję robota mobilnego, tj. poprawia skuteczność zestawu czujników w aplikacji (zamiast dążyć do optymalnej transformacji geometrycznej); (3) efektywnego systemu rozpoznawania miejsc dla danych w postaci obrazów RGB i chmur punktów z systemu LiDAR 3D, gdzie autor założył, że fuzja informacji z obu źródeł poprawi dokładność wyników i skupił się na znalezieniu odpowiedniej reprezentacji chmury punktów 3D (niezbędnej dla technologii głębokiego uczenia); (4) metody lokalizacji wykorzystującej specyficzne rzadkie dane sensoryczne, kiedy czujniki podstawowe (kamera i LiDAR 3D) nie są dostępne, przy czym autor rozważał roboty kroczące, odbierające otoczenie za pomocą sygnałów haptycznych – zakładając dodatkowo, że doświadczenie zdobyte podczas szkoleniowego przejścia przez dany obszar będzie można wykorzystać do późniejszej lokalizacji w podobnych warunkach.

Powyższe wyraźne cele habilitant osiągnął dzięki zastosowaniu wyrafinowanych narzędzi dostępnych publicznie (w sieci), takich jak:

- * optymalizator g2o, oparty na grafie ograniczeń,
- * pakiet rzadkiego splotu 3D, zaimplementowany na maszynie Minkowskiego,
- * funkcja strat/błędów trójkowych (z przykładami trudnymi do uczenia),
- * pakiety do wykrywania obiektów 2D (HRNet i inne z biblioteki MMPose),
- * architektura transformera (prosta architektura sieciowa oparta na mechanizmie uwagi),
- * metoda lokalizacji metodą cząsteczkową Monte Carlo.

Seria publikacji wchodzących w skład omawianego osiągnięcia naukowego stanowi solidnie udokumentowany krok w kierunku rozwiązania postawionych przez habilitanta zadań.

Wynikiem zaledwie 5-letniej aktywności i współpracy naukowej dr R. Nowickiego po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych w roku 2018 jest interesująca lista dorobku publikacyjnego. Osiągnięciem stanowiącym podstawę jego wniosku habilitacyjnego (określonym w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.) jest jednotematyczny cykl publikacji pt.: „*Wielosensoryczna lokalizacja robotów mobilnych*”, obejmujący:

- [A1] **M.R. Nowicki** (100%), Spatiotemporal Calibration of Camera and 3D Laser Scanner, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(4), s. 6451 – 6458, 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.3014639 (IF:3.741, 200 pkt)
- [A2] T. Nowak (60%), **M.R. Nowicki** (30%), P. Skrzypczyński (10%), Vision-based positioning of electric buses for assisted docking to charging stations, *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 32(4), s. 583 – 599, 2022, doi: 10.34768/amcs-2022-0041 (IF2.157, 100 pkt)
- [A3] **M.R. Nowicki** (100%), A data-driven and application-aware approach to sensory system calibration in an autonomous vehicle, *Measurement*, 194, 2022,doi:10.1016/j.measurement.2022.111002 (IF:5.131,200 pkt)
- [A5] K. Żywanowski (20%), A. Banaszczyk (20%), **M.R. Nowicki** (55%),J. Komorowski (5%),MinkLoc3D-SI: 3D LiDAR Place Recognition With Sparse Convolutions,Spherical Coordinates, and Intensity, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(2), s. 1079-1086, 2022,doi: 10.1109/LRA.2021.3136863. (IF:4.321, 200 pkt)
- [A6] M. Bednarek (34%), **M.R. Nowicki** (33%), K. Walas (33%), HAPTR2: Improved Haptic Transformer for legged robots' terrain classification, *Robotics and Autonomous Systems*, 158, 2022, ISSN 0921-8890, doi: 10.1016/j.robot.2022.104236 (IF:3.7, 140 pkt)
- [A4] K. Żywanowski (20%), A. Banaszczyk (20%), **M.R. Nowicki** (60%), Comparison of camera-based and 3D LiDAR-based place recognition across weather conditions, 2020 16th *International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, Shenzhen, China, 2020, s.886-891, doi: 10.1109/ICARCV 50220.2020.9305429 (140-20 pkt)
- [A7] M. Łysakowski (30%), **M.R. Nowicki** (35%), R. Buchanan (10%), M. Camurri (10%), M. Fallon (10%), K. Walas (5%), Unsupervised Learning of Terrain Representations for Haptic Monte Carlo Localization, 2022 *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Philadelphia, PA, USA, Maj 23-27, 2022, s. 4642-4648, 2022, doi: 10.1109/ICRA46639.2022.9812296 (70 pkt, CORE B)
- [A8] D. Sojka (30%), **M.R. Nowicki** (60%), P. Skrzypczyński (10%), Learning an Efficient Terrain Representation for Haptic Localization of a Legged Robot, 2023 *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, London, UK, 29 Maj-2 Czerwiec 2023 (70 pkt, CORE B)

Ogólnie kandydat opublikował 23 artykuły w czasopiśmie (w tym 12 na liście JCR): *IEEE Robotics and Automation Letters* (x2), *Measurement*, *Robotics and Autonomous Systems* (x2), *Autonomous Robots*, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, *IJ of Applied Mathematics and Computer Science* oraz *MDPI Sensors* (x4). Pozostałych 11 prac ogłoszono na międzynarodowych konferencjach, takich jak: *IC on Robotics and Automation (ICRA)* (x2), *IC on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)* (x2), *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, *Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industries (APCOM)*.

W ocenianym cyklu habilitant zawarł szczegółową prezentację swojego dorobku badawczego, na który składają się metody, algorytmy i narzędzia, a także ważne inżyniersko/systemiczne wnioski dotyczące możliwości praktycznego zastosowania opracowanych technik. Zaprezentowane wyniki badań pozwalają na osiągnięcie zamierzonego celu, jakim jest skuteczna lokalizacja robota mobilnego, a w dłuższej perspektywie jego autonomiczność.

Charakterystyczną cechą dorobku naukowego (wydawniczego i wdrożeniowego) habilitanta, powiązanego z udziałem w krajowych i międzynarodowych projektach badawczych, jest widoczna umiejętność odważnego i zwykle trafnego definiowania zadań, innowacyjność oraz dbałość o dobre podstawy matematyczne i technologiczne dla rozwiązywanych problemów, a także umiejętne stosowanie opracowanych algorytmów w praktyce. Już po kilku latach pracy naukowej od czasu doktoratu Michał Nowicki pokazał walory samodzielnego naukowca ze znaczącym dorobkiem naukowym, które pozwalają mu skutecznie rozwiązywać problemy techniczne, wykorzystując wiedzę teoretyczną, aparaturę matematyczną i osiągnięcia technologiczne.

W opinii recenzenta monografia stanowi najlepszą, jednolitą i uporządkowaną prezentację wyników badań osiągniętych przez habilitanta oraz wyczerpujące odwzorowanie jego szerszej wiedzy dziedzinowej. Tym nie mniej przedmiotowy cykl publikacji naukowych dra Michała Nowickiego jest w pewne części równoważny monografii. Jest też to bardzo cenna seria raportów naukowych (uznawana przez Ministerstwo w kontekście habilitacji), która została opracowana wystarczająco starannie, w poprawnym języku angielskim.

3. Charakterystyka dorobku i zawartość naukowa ocenianego cyklu publikacji

W skład nowoczesnych systemów sensorycznych robotów mobilnych wchodzi zestawy kamer, systemów LiDAR, radarów i innych elementów elektronicznych służących do pomiaru orientacji (Inertial Measurement Unit – IMU). Aby efektywnie je wykorzystać, należy ocenić poszczególne układy współrzędnych. W warunkach statycznych potrzebna jest jedynie transformacja przestrzenna (tzw. zmiana bazy). Ale w sytuacji dynamicznej, należy wziąć też pod uwagę atrybuty czasowe analizowanych pomiarów.

Kalibrację przestrzenną można przeprowadzić przy użyciu wielu dostępnych narzędzi wzorcujących. Kalibracja czasowa wymaga dodatkowego sprzętu wyzwalającego wykonanie zdjęcia i synchronizującego je ze znacznikami czasu pomiaru według chmury punktów uzyskanej z systemu LiDAR 3D. Kiedy taki sprzęt nie jest dostępny, problem kalibracji czasu jest często pomijany lub prymitywnie rozwiązywany.

Kalibracja czasoprzestrzenna staje się standardem w nowoczesnych systemach odometrii wizualnej oraz systemach lokalizacji i mapowania SLAM, które jednocześnie przetwarzają dane z kamer i lidarów.

Para kamera RGB i LiDAR 3D stała się tematem szeroko zakrojonych prac badawczych w zakresie kalibracji zewnętrznej (poza typowym problemem stereowizji). Mniej prac dotyczy kalibracji kamera–element-IMU. Niewiele jest udokumentowanych rozważań na temat mniej popularnych par czujników, jak kamera – RADAR lub LiDAR – RADAR (choć procedury kalibracji są podobne).

Kumulowanie się błędów wzorcowania wpływa na dokładność docelowego systemu wieloczujnikowego. Z tego powodu powstał pomysł prowadzenia wspólnej kalibracji w takich systemach jak LiDAR 3D + kamera + RADAR albo LiDAR 2D + kamera + IMU (jak Kalibr). Wymaga to wspólnego pola widzenia sensorów. Według autorów błędem metodologicznym jest skupianie się na dokładności parametrów, a nie na wydajności całego systemu wielosensorowego.

Nie wszystkie aplikacje lokalizacyjne wymagają dokładnego wzorcowania. Jednym z takich zadań, w którym łatwo jest ograniczyć nagromadzony dryf, są systemy z zamknięciem pętli (*Loop Closure*), w których robot powraca do znanej już lokalizacji (nieco podobne do koncepcji systemów *Iterative Learning & Repeative Control*). Skuteczność systemów detekcji zamknięcia pętli wykorzystujących kamery RGB zależy od jakości obrazu (która zwykle pogarsza się w niesprzyjających warunkach oświetleniowych czy pogodowych). Warto dodać, że obecnie większość samochodów autonomicznych wyposażona jest w sensory typu LiDAR 3D, które dostarczają chmur punktów uzupełniających obrazy RGB i pozwalają na budowanie pełnego widoku otoczenia.

Problem wyuczenia skutecznego rozpoznawania miejsc na podstawie chmur punktów nie został jeszcze rozwiązany. Dużym wyzwaniem jest opracowanie najlepszej reprezentacji danych 3D, którą można efektywnie przetworzyć za pomocą ANN w celu wyodrębnienia ważnych cech rozpoznawczych. Badacze nadal analizują reprezentacje zbiorowe i obrazowe w oparciu o woksele czy widoki z lotu ptaka ... etc. (np. rzadkie sploty 3D czy moduł uwagi).

Postęp w technologii robotów kroczących sprawia, że i one znajdują coraz więcej zastosowań. Ciągłe pojawiają się też nowe koncepcje, takie jak (niezawodna) praca pomimo awarii czujników (np. typu FTC: *Fault-Tolerant Control*). Habilitant podjął badania nad autonomicznym czworonożnym robotem realizującym zadania inspekcyjne, gdzie potrzebna jest niezawodna lokalizacja oparta wyłącznie na czujnikach proprioceptywnych (wewnętrznych stanów nóg, dotyku, IMU). W ten sposób możliwe jest wykonanie zadania i powrót w bezpieczne miejsce – nawet bez podstawowych czujników wizji komputerowej (kamer i lidarów).

W takich okolicznościach klasę terenu można określić za pomocą pomiarów haptycznych (taktylnych), co zwrótnie może posłużyć do zlokalizowania nóg robota na wcześniej przygotowanej gęstej mapie (z ustalonymi klasami terenu). Habilitant zaproponował metodę lokalizacji, która buduje mapę haptyczną w całości według wewnętrznych czujników robota (sygnałów siły/momentu obrotowego pochodzących z czujników jego stóp), tj. wygenerowaniu takiej mapy dla dostępnej lokalizacji w oparciu o wizję komputerową. Podczas kolejnej wizyty bez takiej wizji, sygnały dotykowe mogą być wykorzystane do skutecznej lokalizacji robota na mapie (*Teach & Repeat*).

Poszczególne prace opublikowane przez habilitanta (przeważnie indeksowane w JCR) zawarte w analizowanym cyklu koncentrują się na celach naukowych postawionych w punkcie 2.

W ramach kalibracji czasoprzestrzennej pary kamera – LiDAR-3D autor pracy [A1] zajął się zagadnieniem wspólnej kalibracji czasowej i przestrzennej komputerowego systemu wizyjnego składającego się z dwóch sztywno zamontowanych czujników: kamery z globalną migawką i systemu LiDAR 3D. W tym zakresie habilitant opracował innowacyjny program do kalibracji takiego systemu wizyjnego, który opiera się na znacznikach i zapewnia wzorcowanie czasoprzestrzenne - dzięki nowatorskiemu zastosowaniu interpolacji splajnowej (krzywych b-sklejanych) dla równań płaskich z wykorzystaniem minimalnej reprezentacji w algebrze Liego. Rozwiązanie to wymaga dostępnego znacznika wzorcowania i jednonumitowej sesji kalibracyjnej, aby zapewnić odpowiednią powtarzalność i dokładność.

W zakresie wzorcowania systemu sensorycznego opartego na danych z docelowej aplikacji w zadaniu wizyjnego pozycjonowania autobusów elektrycznych opracowano system [A2], który służy do wspomagania kierowcy w dokowaniu dachowym pantografem w ładowarce elektrycznej. Przy czym wykorzystuje się system kamer monokularowych do pozycjonowania na starannie wybranych punktach wykrytych na stacji ładującej. Położenie jest oceniane metodą geometryczną, przy znanej strukturze punktów, zaś samo wykrywanie punktów kluczowych i rozpoznawanie stacji ładującej odbywa się przy użyciu sieci neuronowych. Autorzy pracy badali dwa podejścia do neuronowego wykrywania punktów kluczowych: rozwiązanie o nazwie *Regression Keypoint Network* RKN (oparte na sieci Faster R-CNN) oraz rozwiązanie nazwane *Max Resolution Heatmap Keypoint Network* MRHKN (wykorzystujące mapy ciepłe do wykrywania punktów kluczowych). Natomiast aplikant, dr Nowicki, skupił się tu na rozwiązaniu lokalizacyjnym. Kompletny system wspomagania kierowcy ADAS (*Advanced Driver Assistance System*) składa się z modułu lokalizacji, modułu planowania i odpowiedniego interfejsu człowiek-maszyna.

W autorskiej pracy [A3] habilitant proponuje zwiększenie dokładności tego systemu za pomocą odpowiedniej procedury kalibracyjnej, w której wykorzystuje się potok przetwarzania (do)celowej aplikacji do oceny jakości wzorcowania. Podejście to zostało przetestowane przy kalibracji pokładowego systemu wizyjnego wykorzystywanego do ulokowania autobusu w stacji ładowania. Opracowane podejście zmniejszyło błąd lokalizacji w docelowej aplikacji o prawie 50%.

Rozpoznawanie miejsc na podstawie wyglądu z użyciem kamery i systemu LiDAR 3D, zaprezentowano w referacie [A4], gdzie habilitant dokonał porównania systemów rozpoznawania miejsc opartych na kamerach, lidarach oraz parze kamera – LiDAR 3D w warunkach rzeczywistych. Celem tych działań było określenie położenia na podstawie pojedynczego zdjęcia lub jednej chmury punktów 3D na określonym i znanym obszarze, ale bez wykorzystywania informacji o wcześniejszej lokalizacji. Analizując wpływ warunków pogodowych na działanie systemu rozpoznawania miejsc przeprowadzono eksperymenty na zbiorze danych USyD, uwzględniając różne warunki pogodowe w różnych dniach tygodnia w 6 kategoriach: słonecznie (S), pochmurno (C), słonecznie/pochmurno (S/C), po deszczu (AR), o zachodzie słońca (SS) i bardzo pochmurno (VC). Przy ocenie jakości systemu, deskryptor uzyskany dla aktualnie analizowanej lokalizacji porównywany był ze wszystkimi deskryptorami dostępnymi w bazie lokalizacji, gdzie najbliższą lokalizację uważa się za poprawną,

jeśli znajduje się w odległości +/- 10 metrów od lokalizacji referencyjnej GPS (typowa dokładność w ICP [62]). W przeciwnym razie wynik lokalizacji oznaczony był jako nieprawidłowy.

Rozpoznawanie miejsca wg LiDAR 3D ma na celu oszacowanie przybliżonej lokalizacji na podstawie pojedynczego skanu z obrotowego czujnika LiDAR 3D. Istniejące rozwiązania tego problemu obejmują ręcznie tworzone deskryptory chmur punktów (np. ScanContext, M2DP, LiDAR IRIS) oraz rozwiązania oparte na głębokim uczeniu (np. PointNetVLAD, PCAN, LPDNet, DAGC, MinkLoc3D). Często są one oceniane wyłącznie na podstawie zgromadzonych skanów 2D ze zbioru danych Oxford RobotCat. Dostosowując przetwarzanie do poszczególnych modalności, w [A5] autor skupił się na określeniu reprezentacji chmury punktów z LiDARu 3D, która byłaby najbardziej odpowiednia dla systemu rozpoznawania miejsc. Zaproponowana metoda MinkLoc3D-SI integruje ulepszenia typowe dla ręcznie wykonanych deskryptorów (takich jak ScanContext) z wydajną ekstrakcją cech na architekturze MinkLoc3D (z rzadkimi splotami 3D i warstwą GeM).

Roboty kroczące to szczególny rodzaj robotów mobilnych, które podczas poruszania się po terenie mają dostęp do dodatkowego źródła informacji – pomiarów dotykowych ze stóp. W ramach analizy takiej haptycznej metody lokalizacji dla robota kroczącego, praktyczne wyniki prac [A6, A7, A8] uzyskano dla robota ANYMAL, gdzie mapę charakteryzowało osiem różnych typów terenu. Robot ANYMAL wyposażony był w sensoryczne stopy, które składają się z płaskich powierzchni kontaktowych z ograniczonym ułożeniem w zakresie pochylenia (*pitch*) oraz przechylenia (*roll*). Robot chodził po płaskiej powierzchni i rampie wymagającej dostosowania się stop do rodzaju i kształtu terenu. W eksperymentach wykorzystano osiem różnych terenów: dywan, sztuczną trawę, gumę, piasek, piankę, skały, płytki ceramiczne i PCV, gdzie stopa adaptacyjnie nachylała się w specyficzny sposób w zależności od rodzaju terenu, jego właściwości i kształtu.

Jednym ze sposobów wydobycia informacji z sygnałów haptycznych jest dokonanie klasyfikacji terenu na potrzeby przyszłej jego identyfikacji. W takiej klasyfikacji projektanci zwykle skupiają się na sygnałach siły i momentu obrotowego z czujników w stopach robota oraz na dokładności lokalizacji. W zamierzeniu autorów rozwiązanie powinno umożliwić zadowalającą klasyfikację terenu i szybkie wnioskowanie, przy ograniczonych zasobach przetwarzania RT. W pracy [A6] rozważano zastosowanie wydajnych metod *transformerowych* HAPTR i HAPTR2 w warunkach czasu rzeczywistego (RT). Nowością proponowanego rozwiązania jest warstwa MAL (*Modality Attention Layer*) oparta na mechanizmie *Multi-Head Attention*. Wejściowe dane z różnych modalności (sygnały siły i momentu obrotowego na stopach robota) przekazywane są do odpowiednich warstw konwolucyjnych, które przekształcają wielowymiarowe sygnały w reprezentacje spłaszczone.

Przy lokalizacji dotykowej informacja o klasyfikacji terenu może okazać się jednak mało przydatna. Ponieważ klasy terenu dobierane na podstawie ludzkiej percepcji terenu mogą dobrze nie odzwierciedlać różnic haptycznych, a w ramach danego terenu reakcja haptyczna może nie być jednorodna, autorzy [A7] skupili się na wykorzystaniu informacji dotykowej bez zawężania się do listy predefiniowanych klas. W projekcie tym habilitant zaproponował system SMC (*Sequential Monte Carlo*) z nienadzorowaną reprezentacją dotykową. Najpierw koder określa reprezentację terenu dla każdego kroku, po czym ustalony kod kroku łączony jest z precyzyjnym wzorcem pozycji robota (z systemu SLAM), aby zbudować rzadką mapę dotykową. Lokalizację osiąga się wówczas w oparciu o pewną liczbę cząstek w ruchu (w stałych odstępach czasu), przy czym na każdym etapie estymator SMC aktualizuje stan swoich cząstek, wykorzystując odometrię robota, aktualne sygnały dotykowe i opcjonalnie geometrię terenu.

Ponieważ taka rozproszona mapa reprezentacji terenu zawiera kroki z poprzednich przejść po tej samej trasie, rozmiar mapy powiększa się liniowo wraz z długością trajektorii, zatem w celu zmniejszenia tej złożoności przy zachowaniu właściwości oryginalnych sygnałów (poprawiając jednocześnie możliwości uogólniania dla podobnych obszarów), habilitant poszukiwał kodowania, które wygeneruje zredukowany obraz odpowiedzi haptycznej w postaci odpowiedniego wektora reprezentacji (*latent vector*). Zgodnie z oczekiwaniami, zastosowanie nienadzorowanych sygnałów dotykowych w połączeniu z informacją geometryczną (HL-GU) pozwoliło uzyskać wyższą dokładność w porównaniu z metodami wykorzystującymi wyłącznie geometrię (HL-G). Analiza wyników nadzorowanej metody klasyfikacji terenu za pomocą geometrii (HL-GC) pokazuje, że uwzględnienie sygnałów pomiarowych F/T też prowadzi do poprawy dokładności (przy ogólnie porównywalnych wynikach). W ten sposób potwierdzono, że sygnały dotykowe (F/T) dobrze wychwytyją różnice pomiędzy różnymi klasami terenu.

Główną wadą podejścia zaproponowanego w [A7] był brak kontroli nad nauką nienadzorowanej reprezentacji informacji haptycznej. Dlatego w [A8] autor zaproponował sieć do określenia reprezentacji, która koduje istotne cechy lokalizacji w oparciu o surowe dane dotykowe. Różnica pomiędzy [A8] i [A7] polega głównie na treningu z błędem trójkowym (*triplet loss*). Wtedy proces uczenia minimalizuje różnicę pomiędzy reprezentacjami kroków bliskich siebie oraz maksymalizuje różnicę pomiędzy reprezentacjami kroków zarejestrowanych daleko od siebie. Do wyuczenia reprezentacji lokalnych zastosowano tutaj metodę uczenia z potrójną stratą, która była wcześniej stosowana do lokalizacji globalnych [A4, A5].

Wprowadzając metodę lokalizacji haptycznej HL-ST ze wszystkimi informacjami odczytywanymi z mapy rzadkiej oraz m.in. system HL-T bez uwzględnienia wysokości, wykazano znaczącą przewagę (w sensie APE, *Absolute Pose Error*) nowej metody HL-T z nienadzorowaną informacją haptyczną [A8] w porównaniu z poprzednimi wynikami [A7]. Zgodnie z oczekiwaniami najmniej efektywnym środkiem jest estymator odometrii nóg TSIF (który jest jednakowoż przydatnym elementem systemów wieloskładnikowych).

Ponadto, habilitant odrębnie przedstawił swoje publikacje ściśle związane z problematyką doktorskiego dorobku naukowego, które nie wchodzą w skład recenzowanego cyklu, ale prezentują szersze i bardzo spektakularne spojrzenie na poruszany problem lokalizacji robotycznej.

(&1) W odniesieniu do problemu lokalizacji dla systemu dokowania autobusów, który przejawiał się w kilku pracach aplikanta, w publikacji [48] opisano, w jaki sposób sieć neuronowa wyznacza lokalizację ładowarki elektrycznej poprzez „zwrócenie uwagi” na punkty cieplne pokazane na wygenerowanej mapie ciepła (z analizą fałszywych alarmów oraz kwestią powiększania zbioru danych uczących).

(&2) Praktyczną realizację systemu dokującego (również z DGPS) przedstawiono w [46] jako kompletne rozwiązanie polegające na integracji modułów percepcji, planowania i sterowania w celu zapewnienia rozwiązania typu ADAS, którego skuteczność została wykazana przy użyciu 24 najazdów dokowania w warunkach rzeczywistych.

(&3) Wstępne prace nad rozwiązaniem lokalizacyjnym dla robotów kroczących przedstawiono w [12], gdzie klasyfikacja terenu pomaga w określeniu pozycji dotykowej robota przy użyciu podejścia Monte Carlo. Autorzy zaobserwowali tu kilka mankamentów związanych z percepcją modelowaną na wzór człowieka oraz sztywną granicą pomiędzy różnymi obszarami.

(&4) Architektura oparta na transformerach wprowadzona przez autorów [7] do klasyfikacji terenu pokazała, że szybkie przetwarzanie w predefiniowanym oknie może być efektywne bez stosowania sieci rekursywnych RNN, co stało się podstawą ulepszeń omawianych w [A6].

(&5) Pomysł łączenia danych z kamer RGB i kamer termowizyjnych do wykrywania pieszych został wstępnie przebadany w [59]. Celem tego projektu było opracowanie sposobu połączenia obrazów z obu czujników (fuzji danych wieloczujnikowych) w celu budowy rozwiązania opartego na Y.O.L.O. (*real-time object detection system*), które zapewniłoby skuteczniejszą detekcję w porównaniu z pojedynczym czujnikiem. Jak wiadomo, najlepsze rezultaty osiąga się przy fuzji informacji na poziomie cech (wewnątrz sieci, przed wygenerowaniem końcowych decyzji). Skuteczność zaproponowanego systemu detekcji dla jazdy autonomicznej została przeanalizowana zarówno w dzień, jak i w nocy.

Ogólnie można zatem stwierdzić, że habilitant udokumentował fakt, że opracowane metody stanowią twórcze rozwinięcie rozwiązań istniejących w *state-of-the-art* dyscypliny AEEiTK w obszarze lokalizacji wielosensorycznej. Najważniejsze szczegółowe osiągnięcia tej dyscypliny (w szczególności w dziedzinie automatyki i robotyki) podaje w konkluzjach (p. 4).

Drobne uwagi krytyczne i dyskusyjne

Aby oddać pełny obraz analizowanego raportu, konieczne jest przedstawienie przynajmniej kilku uwag krytycznych lub dyskusyjnych dotyczących niektórych aspektów i wybranych szczegółów, które nasuwają się na myśl przy dokładniejszej lekturze dorobku habilitacyjnego:

Ogólnie Autoreferat sporządzony w języku polskim jest na niskim poziomie formalnym i po części merytorycznym. Ma czytelną, choć niedoskonale wyważoną strukturę. Niestety zawiera też sporą liczbę błędów redakcyjnych i gramatycznych.

(*1) Opis w języku ojczystym jest bardzo ubogi. Zawiera mnóstwo niezgrabności i nielogiczności oraz nieprzejrzystych (długich) zdań podpartych wyrażeniami slangowymi lub nadmiernymi skrótami:

Przykłady:

„Ta specyfika wynika ze względu na wykorzystanie historii pomiarów...”

„Dzięki testom na autobusie zaobserwowaliśmy, że tylko rozwiązanie oparte na kamerze było w stanie wykryć ładówkę elektryczną, ponieważ był to mały obiekt. Problemem było zapewnienie pożądanej dokładności lokalizacji, aby umożliwić planowanie i sterowanie długim, przegubowym autobusem, ponieważ małe niedokładności ustawień sensorów prowadziły do błędów, który był nie do przyjęcia dla algorytmów planowania ruchu.”

„Rozwiązaniem okazała się kalibracja kompletnego zestawu sensorów w docelowej aplikacji na autobusie, prezentując nowe podejście do kalibracji oparte na wydajności w aplikacji końcowej względem typowych podejść opartych na błędzie kalibracji.”

„Znaczenie tych podejść wzrasta, gdy założymy, że nawet algorytmy oparte na kamerach i LiDAR-ach 3D mogą zawieść w przypadku trudnych warunków środowiskowych, gdzie od autonomicznego robota mobilnego wymagamy nadal skutecznej lokalizacji, aby zapewnić bezpieczne działanie.”

„W swojej pracy naukowej spotkałem się z tym problemem w przypadku robota kroczącego wyposażonego w czujniki siły i momentu oferujące dane komplementarne, ale dające relatywnie mało informacji do lokalizacji na znanej mapie terenu.”

„...praca poprawia kalibrację kamera-IMU przedstawioną w kalibr, gdy IMU nie znajduje się blisko kamery poprzez wykorzystanie dodatkowych ograniczeń.”

„Podczas oceny działania metody porównujemy deskryptor lokalizacji uzyskany dla aktualnie analizowanego miejsca względem wszystkich deskryptorów lokalizacji dostępnych w referencyjnej bazie miejsc.”

„bezpośrednio skupiłem się”

„Wyniki prac [A6,A7,A8] zostały uzyskane na robocie ANYMAL chodzącym nieprzerwanie” f „Praktyczne wyniki prac [A6,A7,A8] uzyskano dla robota kroczącego ANYMAL”

„wykonanie klasyfikacji terenu, aby móc wykonać działanie lub wykorzystać identyfikację terenu do lokalizacji” f

„wykonanie klasyfikacji terenu na potrzeby przyszłej jego identyfikacji”

„Metody te skupiają się na uzyskaniu jak najlepszych wyników mierzonych jako dokładność na zarejestrowanym zbiorze danych”

„osiągając największą dokładność” f „osiągając najwyższą dokładność”

„nasza metoda nie jest zawężona do ograniczonej liczby klas”

„dokowanie za pomocą kamery” ...

(*2) Słaba umiejętność przejrzystego prowadzenia wykładu. Brak spójności autoreferatu z omawianymi publikacjami oraz nadmierne skróty myślowe lub braki definicyjne ("reprezentacja bez nadzoru", ..., "HL-T", "APE", ...). Niejasne i rozwlekłe opisy/zdania, które w wielu miejscach są po prostu źle sporządzone lub źle ustrukturyzowane:

Przykłady:

Podpis pod rysunkiem 2 odnosi się do 3 wariantów (nie oznaczonych odrębnymi symbolami, a na rysunku widnieją dwa warianty camera-based i LiDAR-based (a wynik fuzji?).

„Artykuły prezentują zastosowanie w praktycznych scenariuszach, ale te metody mogą zostać zaadaptowane w podobnych aplikacjach, torując drogę do stworzenia rozwiązań lokalizacyjnych dla robotów bez wyraźnej potrzeby stosowania pokładowych systemów SLAM.

„Problemem z każdą kalibracją systemu sensorycznego realizowanego pomiędzy dwoma sensorami jest brak gwarancji dokładności kalibracji kompletnego systemu wielosensorycznego składającego się z większej liczby sensorów, ponieważ błędy kalibracji mogą się kumulować, gdy poszczególne wyniki kalibracji są łączone.”

→ „Kumulowanie się błędów kalibracji wpływa na dokładność docelowego systemu wielosensorycznego...”

„Głównym ograniczeniem jest jednak fakt, że istniejące metody kalibracji skupiają się na znalezieniu najdokładniejszych parametrów, zanedbując jednocześnie fakt, że ostatecznym celem kalibracji jest poprawa wydajności używanego systemu wielosensorycznego.”

→ „Jednakże głównym błędem metodologicznym jest skupianie się na dokładności parametrów, a nie na wydajności całego systemu wielosensorycznego.”

„Algorytmy do zastosowań w robotyce mobilnej są zwykle projektowane z myślą o aplikacji, ponieważ scenariusze świata rzeczywistego nakładają dodatkowe ograniczenia na proponowane rozwiązania.”

→ „Podobnie jak inne, algorytmy dla robotyki mobilnej powinny być ściśle dopasowywane do danej aplikacji, która stawia określone wymagania.”

„porównanie systemów rozpoznawania miejsc opartych na kamerach”

→ „porównanie systemów rozpoznawania miejsc za pomocą kamer”

„Przedstawiona ocena eksperymentu dowodzi, że wielosensoryczne rozpoznawanie miejsc powinno być rozważane w scenariuszach rzeczywistych, ponieważ zapewnia bardziej skuteczne rozwiązanie niż wykorzystanie tylko jednego sensora.”

„pojedynczego rzadkiego tensora skwantowanych punktów i związanego z nim cechy”

„informacja o klasyfikacji terenu może nie być najlepszym sposobem wykorzystania informacji haptycznej w systemie lokalizacji.” ...

(*3) Ze względu na nieprecyzyjność wielu opisów pojawiają się także nieporadności językowe, tautologie, zazwyczaj różnego rodzaju oczywistości:

Przykłady:

„Rozwiązanie to (lokalizacji jako fragmentu SLAM) może być wykorzystane w klasycznych, geometrycznych, wielosensorycznych systemach SLAM.”

„Wymóg dokładnej kalibracji geometrycznej okazał się krytyczny w problemie lokalizacji w odniesieniu do małego obiektu z dużej odległości.”

„Taki wymóg ogranicza uniwersalny aspekt proponowanych rozwiązań, ponieważ niektóre konfiguracje sensorów nie mogą być skalibrowane przy użyciu tych podejść.”

„Zauważyłem, że każda modalność powinna mieć inny potok przetwarzania bardziej dostosowany do danych wejściowych z każdego czujnika.”

„W [A6] uważamy, że dokładność jest tylko częścią całego obrazu.”

„Najgorsze wyniki uzyskuje TSIF, estymator odometrii nogi,” ...

(*4) Niestosowne, nieprawdziwe lub słabo udokumentowane tezy:

Przykłady:

„zapropnowałem nowe metody oceny ukierunkowane na wcześniej pomijane aspekty, takie jak czas wnioskowania i odporność.”

→ od dziesiątków lat inżynierowie poza skutecznością algorytmów, dbają o cechy odpornościowe i RT!

„Najpierw, wejściowe szeregi czasowe są dzielone według modalności”

→ chyba od momentu powstania dane te są przypisane do różnych „modalności”?

„Ponieważ rozproszona mapa reprezentacji terenu zawiera kroki z poprzednich przejść po tej samej trasie” etc.

(*5) Podsumowując, wniosek w raportowanej części naukowej jest w dużej mierze rozwlekły, zawiera powtórzenia oraz fragmenty "przegadane", zbyt szczegółowe, a nie zawsze niekompletne. To jedyne i zazwyczaj najważniejsze w życiu naukowca opracowanie (zwłaszcza jeśli nie stanowi obszernej monografii) powinno być zdecydowanie lepiej przygotowane. Habilitant powinien przede wszystkim wyrażać się w sposób zwięzły i przejrzysty. Raport ten powinien być skrócony, po przemyśleniu, które treści powinny się w nim znaleźć. Ponadto, biorąc pod uwagę fatalny poziom języka autoreferatu (z licznymi przykładami okaleczania języka polskiego), być może lepszym rozwiązaniem byłoby posłużenie się językiem angielskim, w którym prezentowane są oryginalne doniesienia naukowe z analizowanego cyklu publikacji.

4. Konkluzja dotycząca dorobku i określenie wkładu autora w rozwój dyscypliny

W swojej pracy badawczej habilitant skupił się na wybranych aspektach percepcji i lokalizacji robotycznych systemów mobilnych w procesie postrzegania otoczenia. Tematyka rozprawy jest ważna i aktualna, opracowanie jest wielotorowe i wieloaspektowe, ale też i kompleksowe – udokumentowane praktycznymi przykładami systemów lokalizacji robotycznej, zaś wyniki badawcze zawarte w analizowanym dorobku bardzo dobrze świadczą o wiedzy oraz umiejętnościach inżynierskich i systemicznych osiągniętych przez habilitanta. W zwięzłym ujęciu wielowątkowy i szczegółowy wkład habilitanta w rozwój dyscypliny jest następujący:

- zaprojektowanie i wdrożenie oprogramowania do precyzyjnej kalibracji czasoprzestrzennej kamer RGB i obrotowych LiDAR-ów 3D [A1],
- projekt i implementacja metody kalibracji poprawiającej działanie zestawu czujnikowego w docelowej aplikacji – wykraczającej poza dokładne przekształcenia geometryczne [A3], co umożliwiło budowę systemu estymacji pozy w zadaniu dokowania autobusu [A2],
- zaprojektowanie i wdrożenie systemu rozpoznawania miejsc w oparciu o obrazy RGB i chmury punktów LiDARu 3D [A4] oraz jego rozbudowa o nową reprezentację chmury punktów z LiDARów 3D do przetwarzania w sieci neuronowej [A5],
- opracowanie efektywnej architektury dla wielosensoryjnej klasyfikacji terenu z użyciem transformerów do zastosowań lokalizacyjnych [A6],
- zaprojektowanie i wdrożenie praktycznego systemu do haptycznej lokalizacji robota kroczącego przy użyciu rzadkich danych dotykowych (bez jawnej listy klas terenu) [A7] z późniejszymi modyfikacjami związanymi z wyuczoną albo nienadzorowaną reprezentacją, która koduje istotne cechy lokalizacji w oparciu o surowe dane dotykowe [A8].

W podsumowaniu, warto podkreślić jednorodność omawianego cyklu publikacji i ciągłość rozwoju habilitanta, która pozwala mu podejmować coraz to bardziej złożone wyzwania. Metoda kalibracji czasoprzestrzennej [A1] była kluczowym elementem przy wdrażaniu konkretnych aplikacji [A3, A2]. Kolejne prace w zakresie inicjalizacją systemów kamera-LiDAR zaowocowały bezkalibracyjnymi metodami rozpoznawania miejsc w [A4, A5]. Ponieważ oryginalna klasyfikacja terenu w [A6] okazała się nieskuteczna w przypadku lokalizacji dotykowej, aplikant zmodyfikował metodę lokalizacji, aby wykorzystać sygnały „nienadzorowane” [A7]. To z kolei przyczyniło się do zmian w odniesieniu do systemu przetwarzania sygnałów haptycznych, które polegały na zastosowaniu błędu tripletowego [A8] wykorzystanego głównie do lokalizacji globalnej [A4, A5].

Przedstawione osiągnięcia mają duże znaczenie praktyczne w zakresie lokalizacji robotycznej. Kalibracja jest niezbędnym krokiem przed jakimkolwiek wdrożeniem, a dokowanie przy użyciu kamery znalazło już swoje zastosowanie. Pozostałe rozwiązania – rozpoznawanie miejsca i lokalizacja dotykowa – budują poligon badawczy, którego wyniki mogą być wykorzystane w postaci użytecznych (awaryjnych) mechanizmów wspierających systemy techniczne RT. Niezależnie od pokazanych zastosowań, proponowane metody mają też w pewnej mierze charakter uniwersalny, np. w zakresie efektywnej fuzji danych w systemach wielosensorycznych.

Nie ulega zatem wątpliwości, że dorobek naukowy dra Michała Nowickiego od czasu uzyskania stopnia doktora nauk technicznych znacząco wzrósł i zasługuje na bardzo wysoką ocenę pod względem wymagań formalnych stawianych kandydatom do stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie Automatyki, Elektroniki, Elektrotechniki i Technologii Kosmicznych. Osiągnięcie to spełnia także zwyczajowe wymogi stawiane większości polskich uczelni w zakresie *osiągnięcia na światowym poziomie* i udokumentowanego udziału w rozwoju dziedziny. Analizując dorobek habilitanta łatwo dostrzec jego umiejętności głębokiego i szczegółowego zaangażowania w badania naukowe, jak również pracowitość, wytrwałość i konsekwencję oraz możliwości współpracy. Potrafi też wykorzystywać tak metody teoretyczne, jak i nowoczesne narzędzia technologiczne do rozwiązywania praktycznych problemów przemysłowych związanych z autonomicznymi robotami mobilnymi (jeżdżącymi i kroczącymi).

W rozwoju habilitanta, pomimo rozległego spektrum zadań i aplikacji, wyraźnie widać autorską myśl projektową i systematyczne powiększanie się jego doświadczenia, co pozwala mu na skuteczne podejmowanie się rozwiązywania coraz bardziej złożonych problemów związanych z lokalizacją robota w przestrzeni z użyciem kamer, haptiki i odpowiednich map.

Problematyka nie jest łatwa, dlatego nie dziwi fakt, że większość prac jest zespołowa. Niemniej jednak w zaprezentowanym cyklu publikacji oraz pozostałym dorobku widać wyraźny wkład autorski habilitanta. Mocną stroną takiej ścieżki naukowej jest intensywny przepływ wiedzy i doświadczenia, słabością natomiast możliwość przecoczenia pewnych merytorycznych powiązań rozpatrywanych zagadnień ze skądinąd znanymi problemami nauki i ich rozwiązaniami, a także niedociągnięcia w samodzielnie opracowywanych raportach (oryginalne prace w języku angielskim są nieco lub dużo lepsze).

III. Ocena działalności dydaktyczno-organizacyjnej i popularyzatorskiej, współpracy z otoczeniem gospodarczym oraz współpracy międzynarodowej

Dr Michał Nowicki rozpoczął pracę naukową już na studiach inżynierskich. Odbił swój pierwszy 3-miesięczny staż naukowy w Forschungszentrum Informatik (FZI) w Karlsruhe w Niemczech w ramach programu ERASMUS. Jego celem było opracowanie nowego systemu reakcyjnego dla robota kroczącego LAURON V, umożliwiającego mu pokonywanie stromych wzniesień [57, 58]. W 2014 roku odwiedził Uniwersytet w Birmingham w Wielkiej Brytanii, aby zaprezentować prace badawcze w ramach doktoratu. W lipcu 2015 roku uczestniczył w szkole letniej „Summer School: Aerospace Information Technology” na Uniwersytecie w Wurzburgu w Niemczech, gdzie poruszana była tematyka tworzenia rozwiązań dla zastosowań kosmicznych. Podczas pracy nad rozprawą doktorską w 2017 roku w ramach programu ETIUDA odbył 3-miesięczny staż naukowy na Uniwersytecie w

Saragossie w Hiszpanii w grupie prof. Juan Tardos (SLAM). W ramach swoich badań podjął temat wykorzystania błędu fotometrycznego w systemie cechowym (ORB-SLAM2).

W latach 2020–2021 kandydat realizował projekt “THING subTerranean Haptic INvestiGator” w ramach Horyzontu 2020 Research and Innovation (nr 780883), we współpracy z Uniwersytetem w Oxfordzie, Eidgenossische Technische Hochschule (ETH) w Zurychu, Uniwersytetem w Edynburgu, Uniwersytetem w Pizie i KGHM CUPRUM. Nawiązanie kontaktów międzynarodowych zaowocowało dwoma wspólnymi pracami z Uniwersytetem w Oxford w czasopiśmie *Autonomous Robots* [12] i na konferencji ICRA [A7] oraz referatem podsumowującym te działania [63] i obejmującym wyniki testów w KGHM CUPRUM.

W maju 2022 r. habilitant odbył staż naukowy (dotyczący opracowania systemu percepcji do budowy mapy wysokości) w Swiss Federal Institute of Technology at Lausanne (EPFL) w Szwajcarii w grupie prof. Auke Ijspeerta zajmującego się robotami inspirowanymi biologią. Staż odbył się w ramach konkursów Research and Innovation Action. Kolejny projekt pt. “Amphibious Locomotion with Learned Control and Biologically Inspired Underwater Sensing” jest na liście rezerwowej, z Politechniką Poznańską jako liderem międzynarodowego konsorcjum (Czech Technical University, CTU – Czechy, Technische Universität Darmstadt, TUDA – Niemcy, Scuola Superiore Sant’Anna, SSSA – Włochy, EPFL – Szwajcaria, ARTES4.0 – Włochy, Parco Regionale Migliarino, San Rossore, Massaciuccol, PRMSNM – Włochy, Openbaar Lichaam Gezamenlijke Brandweer, GBRAND – Holandia, Veolia Energia Poznań S.A. oraz MAB Robotics Sp. z o.o. – Polska).

Ostatnio, w kwietniu 2023 r. habilitant przedstawił swoje badania na Uniwersytecie w Cambridge w Wielkiej Brytanii dot. technologii AR/VR, będące przedmiotem projektu badawczego finansowanego przez firmę Meta Platforms Inc.

W powiązaniu ze współpracą krajową i międzynarodową powstały publikacje naukowe:

- [12, A7] – Uniwersytet w Oxfordzie, Wielka Brytania,
- [A5] – Politechnika Warszawska, Polska,
- [63] – KGHM CUPRUM, Polska,
- [71] – Politechnika w Graz, Austria,
- [57, 58] – Forschungszentrum Informatik w Karlsruhe, Niemcy,
- [49] – Czech Technical University w Pradze, Czechy.

Kandydat prowadzi również działalność popularyzatorską i dydaktyczną. Wymienić tu można: (*) projekt dla uczniów szkół średnich “Robotycy – współcześni czarodzieje” finansowany przez Fundację na Rzecz Nauki Polskiej w ramach programu “eNgage” (2015); (*) akcja dotycząca wykorzystania sensorów urządzeń mobilnych “Ujarmij magię swojego smartfona” finansowana przez FNP w ramach programu eNgage” (2016); oraz (*) projekt AI-Tech, którego celem było przygotowanie materiałów dydaktycznych do zajęć z metod sztucznej inteligencji w robotyce (2022).

Habilitant działał także jako popularyzator różnych aspektów nauki w środowisku poznańskim, był promotorem pomocniczym w 3 otwartych przewodach oraz promował pewną liczbę prac dyplomowych (7 prac. inż. i 8 prac mgr z nagrodami PIAP i SEP Poznań oraz publikacjami naukowymi). Prowadzone przez niego zajęcia dydaktyczne obejmują robotykę, sensory robotyczne i sztuczną inteligencję w robotyce oraz przedmioty podstawowe dla kierunków Automatyka i Robotyka oraz Informatyka i Sztuczna Inteligencja na Politechnice Poznańskiej.

Kandydat aktywnie uczestniczy w międzynarodowych konferencjach naukowych, m.in.: IEEE IC on *Robotics and Automation* (ICRA) oraz EC on *Mobile Robot* (ECMR). W 2023 r. pełnił nawet rolę redaktora (Associate Editor) IEEE/RSJ IC on *Intelligent Robots and Systems* (IROS 2023).

Recenzował 13 prac zgłoszonych na takie konferencje jak:

1. IEEE/RSJ IC on Intelligent Robots and Systems (IROS, CORE A),
2. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA, CORE B),
3. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV, CORE B),
4. IW on Robot Motion and Control (ROMOCO),
5. Krajowa Konferencja Robotyki (KKR),
6. IEEE IC on Multisensor Fusion and Integration (MFI),
7. EC on Mobile Robots (ECMR),
8. IC on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV),
9. Polskie Porozumienie na Rzecz Rozwoju Sztucznej Inteligencji (PP-RAI).

Recenzował 49 publikacji w czasopismach (według punktacji MEiN i wskaźnika IF):

1. ACM Computing Surveys (IF: 14.324, 200 pkt MEiN),
2. IEEE Internet of Things Journal (IF: 9.936, 200 pkt MEiN),
3. Measurement (IF: 5.131, 200 pkt MEiN),
4. Automation in Construction (IF: 11.45, 140 pkt MEiN),
5. Journal of Cleaner Production (IF: 9.297, 140 pkt MEiN),
6. Neurocomputing (IF: 5.719, 140 pkt MEiN),
7. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics (IF: 5.303, 140 pkt MEiN),
8. Robotics and Autonomous Systems (IF: 4.67, 140 pkt MEiN),
9. IEEE Sensors (IF: 4.325, 100 pkt MEiN),
10. MDPI Sensors (IF: 3.847, 100 pkt MEiN),
11. IEEE Signal Processing Letters (IF: 3.67, 100 pkt MEiN),
12. IEEE Access (IF: 3.367, 100 pkt MEiN),
13. Digital Singal Processing (IF: 3.15, 100 pkt MEiN),
14. MDPI Applied Sciences (IF: 2.838, 100 pkt MEiN),
15. Bulletin of the Polish Academy of Sciences (IF: 1.515, 100 pkt MEiN),
16. IET Image Processing (IF: 2.20, 70 pkt MEiN),
17. Industrial Robot (IF: 1.95, 70 pkt MEiN),
18. MDPI Robotics (20 pkt MEiN).

Oprócz udziału w kilku projektach krajowych habilitant brał udział jako wykonawca w trzech projektach europejskich, a mianowicie:

- (1) „THING subTereanean Haptic INvestiGator” w ramach Horyzontu 2020 Research and Innovation, numer projektu 780883, we współpracy z Uniwersytetem w Oxfordzie, ETH Zurich, Uniwersytetem w Edynburgu, Uniwersytetem w Pizie i KGHM CUPRUM (01.2020–08.2021, Politechnika Poznańska).
- (2) "Opracowanie systemu wizyjnej percepcji dla głowicy sensorycznej" w ramach programu European SMEs Robotics Applications, numer projektu 780265, MANDEYE wspierany w ramach programu ESMERA FOCE (05.2019 – 12.2019, Mandala Robotics, Skierniewice).
- (3) "Opracowanie systemu percepcji do budowy mapy wysokości dla robotów inspirowanych biologią" (staż) w grupie prof. Auke Ijspeerta w ramach programu TERRINET (09–13.05.2022, Swiss Federal Institute of Technology at Lausanne /EPFL, Biorobotics Laboratory /BioRob, Lozanna, Szwajcaria).

Habilitant był kierownikiem czterech projektów na Politechnice Poznańskiej, a mianowicie:

- (1) „Nowatorski system lokalizacji wózków samojezdnych AGV z wykorzystaniem skanerów laserowych 3D” w programie NCBR TANGO, TANGO-V-A/0036/2021-00 (02.2022 – 01.2023).
- (2.) „Nowa metoda fuzji danych ilościowych i jakościowych wykorzystująca optymalizację grafu ograniczeń w problemie jednoczesnej lokalizacji i budowy mapy” Narodowe Centrum Nauki (NCN) w ramach programu PRELUDIUM, 2015/17/N/ST6/01228 (02.2016 – 09.2019).
- (3) „Nowe metody wspomaganie nawigacji osób wykorzystujące zasoby urządzeń mobilnych typu tablet lub smartfon” MNiSzW w ramach programu Diamentowy Grant, DI2012 004142 (07.2013 – 03.2016).
- (4) „Projekt autonomicznego robota mobilnego do zadań poszukiwania i przynoszenia przedmiotów na potrzeby międzynarodowego konkursu Robots Intellect” MNiSzW w ramach programu Generacja Przyszłości, WS-1282/HF/2013 (09.2013 – 11.2014).

Formalnie należy też tu (zgodnie z powyższym) odnotować odbycie przez habilitanta trzech naukowych staży zagranicznych w:

- (1) Swiss Federal Institute of Technology at Lausanne (EPFL), Lozanna, Szwajcaria: „System percepcji do budowy mapy wysokości dla robotów inspirowanych biologią” w grupie prof. Auke Ijspeerta (05.2022).

(2) University of Zaragoza, Saragossa, Hiszpania: „System SLAM oparty na cechach (ORB-SLAM2) z wykorzystaniem błędu fotometrycznego” pod kierunkiem prof. Juana D. Tardosa (06.2017–10.2017).

(3) Forschungszentrum Informatik (FZI), Karlsruhe, Germany: „Projekt i implementacja nowego reakcyjnego systemu zachowań dla robota kroczącego LAURON V umożliwiającego pokonywanie stromych pochyłości” (07.2013–09.2013).

Ponadto wykazać warto ważniejsze dotychczasowe stypendia i nagrody kandydata do stopnia dr habilitowanego:

- (1) Stypendium MNiSzW dla wybitnych młodych naukowców (2022–2026),
- (2) Stypendium FNP START dla 100 wybitnych młodych naukowców (2021–2022),
- (3) Stypendium dla młodych badaczy poznańskiego środowiska naukowego (2019),
- (4) Nagroda Miasta Poznania za wyróżniającą się pracę doktorską (2019),
- (5) Nagroda PIAP II miejsca za rozprawę doktorską w konkursie Młodzi Innowacyjni (2019),
- (6) Stypendium NCN programu ETIUDA na dokończenie rozprawy doktorskiej oraz staż u prof. Juana D. Tardosa (2016–2018),
- (7) Stypendium MNiSzW dla doktorantów (2017–2018),
- (8) Nagrody lokalne PP, MNiSzW, Marszałka Województwa, PSSI, PTI oraz SEP (2012–2019).

IV. Wniosek końcowy

Na podstawie powyższej szczegółowej oceny autorskiego osiągnięcia naukowo-badawczego w postaci monotematycznego cyklu 8 publikacji pt. „*Wielosensoryczna lokalizacja robotów mobilnych*”, obejmującego 5 artykułów JCR i 3 referaty konferencyjne, a także całej dokumentacji przewodu habilitacyjnego w postaci autoreferatu habilitanta opisującego osiągnięcia naukowo-badawcze i dydaktyczno-organizacyjne, stwierdzam, że dorobek naukowy doktora Michała Nowickiego osiągnięty po uzyskaniu stopnia doktora N.T. jednoznacznie świadczy o wzroście naukowym kandydata oraz znaczącym i udokumentowanym jego wkładzie w dziedzinę nauk technicznych i może stanowić podstawę do rozpatrzenia wniosku o nadanie mu stopnia doktora habilitowanego.

Jednocześnie stwierdzam, że cykl obejmuje powiązane tematycznie artykuły naukowe opublikowane w czasopismach naukowych i w recenzowanych materiałach międzynarodowych konferencji, które w roku opublikowania w ostatecznej formie były ujęte w wykazie ministerialnym sporządzonym zgodnie obowiązującymi przepisami. Kandydat wykazuje się też istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej instytucji naukowej, w tym zagranicznej.

W ten sposób konkluduję, iż dorobek Pana Michała Nowickiego spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia doktora habilitowanego nauk technicznych, określone ustawą o tytule naukowym i stopniach naukowych z dnia 10 lipca 2018 (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce w postępowaniach habilitacyjnych; Dz.U.2023.742, w tym art. 219). W związku z tym wnoszę o dopuszczenie do dalszego postępowania habilitacyjnego nad wnioskiem doktora Michała Nowickiego z dnia 29 maja 2023 roku. Jestem również za nadaniem mu stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie *Nauk Inżynieryjno-Technicznych*, w dyscyplinie *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne*.


Zdzisław Kowalczyk