

mpł. RDITT  
20.09.2022  
M. Skowron

dr hab. inż. Adam Idźkowski, prof. PB  
Politechnika Białostocka  
Wydział Elektryczny  
Katedra Elektrotechniki, Ergoelektroniki i Elektroenergetyki  
Ul. Wiejska 45D  
15-351 Białystok

Białystok, 12.09.2022 r.

### **Recenzja pracy doktorskiej**

Recenzję przygotowano na podstawie uchwały Senatu Politechniki Śląskiej nr 26/2022 z dnia 31 maja 2022 r. oraz pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja o numerze RDITT/136/2022 z dnia 3 sierpnia 2022 r.

**Tytuł rozprawy:** *Wykorzystanie sieci neuronowej oraz systemu rozmytego do predykcji pozycji i wyboru ścieżki poruszającego się obiektu w lokalnym systemie pozycjonowania opartym na technologii UWB*

**Autor rozprawy:** mgr Inż. Krzysztof Paszek

**Promotor rozprawy:** dr hab. inż. Damian Grzechca, prof. Pol. Śl.

**Dziedzina:** nauki inżynieryjno-techniczne

**Dyscyplina:** Informatyka Techniczna i Telekomunikacja

#### **1. Cel, zakres i charakter rozprawy**

Celem rozprawy było opracowanie systemu decyzyjnego pozycjonowania obiektów będących w ruchu, umieszczonego w newralgicznych miejscach infrastruktury, działającego w czasie rzeczywistym, na podstawie danych z systemów: Ultra-wideband (UWB) oraz nawigacji inercyjnej INS (AHRS). Zaproponowany kooperacyjny system pozycjonowania miał umożliwić pozyskanie pozycji obiektu w akceptowalnym czasie. Z powodu braku dostępności symulacyjnego narzędzia do przeprowadzania analiz komputerowych systemu UWB, postawiono także cel poboczny rozprawy, czyli opracowanie symulatora odzwierciedlającego pracę rzeczywistego dostępnego systemu na podstawie obserwacji jego zachowania. Symulator ten miał udostępniać dane referencyjne, które umożliwiłyby określenie dokładności wyznaczanych pozycji.

W rozprawie na 131 stronach przedstawiono problem naukowy, tj. poprawę dokładności wyznaczania pozycji poruszającego się obiektu w dopuszczalnym czasie. Wzrost prędkości poruszających się obiektów zwiększa różnicę pomiędzy pozycją aktualną obiektu, a wyznaczoną z wykorzystaniem systemów pozycjonowania. Rozwiązaniem problemu wydaje się być predykcja ścieżki poruszającego się obiektu, która nie tylko ma zniwelować przesunięcie, ale także zapewnić ciągłość wyznaczania pozycji przy krótkotrwałych zanikach danych z systemu pozycjonującego. Podczas analizy danych o ruchu obiektu dane referencyjne należy pozyskać z innego systemu, którego dokładność powinna być o co najmniej rząd wielkości wyższa niż dokładność systemu testowanego.

Uzyskane w rozprawie rezultaty mają charakter aplikacyjny.

## 2. Zawartość rozprawy, osiągnięcia Doktoranta

Praca doktorska liczy 131 stron i zawiera 5 rozdziałów. Oprócz właściwego tekstu zawiera rozbudowany spis treści, spis akronimów i skrótów, spis rysunków, spis tabel oraz wykaz źródeł bibliograficznych. Znajduje się w niej 56 rysunków i 36 tabel. Na zewnętrznym nośniku danych zamieszczono tekst pracy oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

Doktorant po przedstawieniu wprowadzenia, celu, tez i motywacji:

- a) W rozdziale 2 opisał terminy, metody i systemy związane z pozycjonowaniem pojazdów, m.in. oparte technologii szerokopasmowej (UWB) oraz nawigację inercyjną INS (AHRS);
- b) Opracował, opisany w rozdziale 3, symulator systemu UWB wraz z procedurą pozyskania danych umożliwiającą odwzorowanie rzeczywistego systemu opartego na modułach DWM1000 (Decawave) bez znajomości dokładnych parametrów transmisji. Wymagało to wykonania stanowiska pomiarowego oraz zarejestrowania danych pomiarowych o odległości pomiędzy węzłami sieci, które są w zasięgu znacznika. Wykonał doświadczenie dla dwóch warunków – w linii widoczności (LOS) i przy braku widoczności pomiędzy węzłami sieci (NLOS). Określił parametry modelu i opisał sposób wyznaczania odległości obiektu do czterech najbliższych kotwic. Omówił wprowadzenie przeszkód i detekcji, czy badana odległość została wyznaczona w warunkach LOS lub NLOS;
- c) Wykonał, opisane w rozdziale 4, przetwarzanie danych z systemu UWB obejmujące: filtrację, korektę odległości, predykcję pozycji oraz zaproponował ekspercki system decyzyjny oparty na logice rozmytej. Pozwala on podjąć decyzję, czy do wyznaczenia aktualnej pozycji obiektu należy wykorzystać pozycję znajdującą się na ścieżce zbudowanej z pozycji pozyskanych z danych aktualnych, czy wykorzystać dane pochodzące z predykcji, czy też posiadane dane nie są wystarczające do wyznaczenia pozycji obiektu;
- d) Zaproponował funkcję korekty odległości pozyskanych z systemu UWB z wykorzystaniem funkcji wielomianowej, która redukuje miary niedokładności systemu (błędy RMSE i MBE). Zaadoptował metodę sympleksową do wyznaczania pozycji obiektu w procesie trilateracji;
- e) Zaproponował predykcję pozycji obiektu będącego w ruchu z wykorzystaniem sieci neuronowej typu LSTM, która redukuje opóźnienie wprowadzane przez system pozycjonowania UWB i pozwala na nieprzerwane pozycjonowanie obiektu;
- f) Zaproponował obszary bezpieczeństwa wynikające z błędów oraz możliwych przesunięć wynikających z czasu akwizycji i przetwarzania danych z systemu UWB z podziałem na pojazd typu AGV i pojazd samochodowy. W rozdziale 4.6 przeanalizował czasy przetwarzania dla poszczególnych etapów w procesie wyznaczania pozycji obiektu - od akwizycji danych aż po wnioskowanie. Podał także czasy całościowe dla zastosowanych metod trilateracji (najmniejszych kwadratów i sympleksowej) oraz obu metod predykcji ścieżki (Filtr Kalmana i sieć neuronowa typu LSTM). Wyzначył i porównał przebyte dystanse dla warunków brzegowych, oddzielnie dla pojazdu AGV poruszającego się z prędkością 2 m/s oraz dla pojazdu samochodowego poruszającego się z prędkością 14 m/s.

## 3. Ocena merytoryczna pracy

### a) Poprawność i oryginalność postawionych tez, w jakim stopniu zostały one wykazane

Teza 1.

*„Wykorzystanie lokalnego podsystemu pozycjonowania UWB oraz zastosowanie filtracji komplementarnej zwiększa dokładność przy dopuszczalnym czasie wyznaczania pozycji poruszającego się obiektu.”*

Teza 2.

*„Fuzja danych pochodzących z podsystemów pozycjonowania wraz z wykorzystaniem systemu rozmytego i sieci neuronowej umożliwi wybór aktualnej i predykcję ścieżki poruszania się obiektu w akceptowalnym czasie.”*

Uważam, że sformułowana teza 1 (str. 14) jest nie do końca precyzyjna jeśli chodzi o występujący termin „filtracja komplementarna”, który wymagałaby wyjaśnienia w tej pracy. Należy zauważyć, że ogólna idea filtracji komplementarnej bazuje na integracji informacji z różnego typu sensorów dla uzyskania informacji o lepszych własnościach. Pierwotny filtr komplementarny (CF) wykorzystuje różne filtry (np. dolno- i górnoprzepustowe) w poszczególnych kanałach, które są podawane na węzeł sumacyjny, a na wyjściu są skorygowane wartości wielkości mierzonej. Innym rodzajem filtru jest filtr Kalmana (KF), który także stosowany jest w aplikacjach z fuzją sensoryczną i bazuje na sygnałach mierzonych oraz na modelu procesu. W aplikacjach opisywanych w literaturze występuje także komplementarny filtr Kalmana (CKF), gdzie Filtr Kalmana (KF) jest jednym z bloków, wykonującym estymację błędów systemu.

Moim zdaniem obie tezy zostały wykazane w stopniu zadowalającym. Doktorant przedstawił w sposób systematyczny zagadnienie oraz pełny cykl badawczy wraz ze stosownymi eksperymentami i wynikami.

**a) Analiza źródeł (w tym literatury światowej i/lub stanu techniki) świadczącej o dostatecznej wiedzy autora w danej dyscyplinie naukowej**

Praca odnosi się do 110 źródeł, w tym dziewięciu, których Doktorant jest współautorem. Są to pozycje zgodne z tematyką rozprawy doktorskiej. Świadczą one o dostatecznej wiedzy Doktoranta w dyscyplinie naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Literaturę uzupełniłbym o pozycje:

- 1) P. Narkhede, S. Poddar, R. Walambe, G. Ghinea, and K. Kotecha, „Cascaded Complementary Filter Architecture for Sensor Fusion in Attitude Estimation”, *Sensors*, 21(6), 1937, 2021, doi: 10.3390/s21061937;
- 2) Y. Zhong, T. Liu, B. Li, L. Yang, and L. Lou, "Integration of UWB and IMU for precise and continuous indoor positioning," 2018 Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location-Based Services (UPINLBS), 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/UPINLBS.2018.8559718;
- 3) B. Li, Z. Hao, and X. Dang, "An indoor location algorithm based on Kalman filter fusion of ultra-wide band and inertial measurement unit", *AIP Advances* 9, 085210, 2019, <https://doi.org/10.1063/1.5117341>.

**b) Pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy lub/i stanu techniki reprezentowanych przez literaturę światową**

Tematyka rozprawy jest aktualna ze względu na rozwój systemów UWB. W ostatnich 5-ciu latach pojawiło się wiele prac z tej tematyki w literaturze światowej. Osiągnięcia Doktoranta w rozprawie uważam za aktualne i oryginalne. Doktorant opublikował część opisanych w rozprawie wyników badań w renomowanym czasopiśmie naukowym (pozycja [98] w spisie literatury). Występuje tam jako autor korespondencyjny.

### **c) Znaczenie uzyskanych wyników dla danej dyscypliny naukowej**

Dokonania w rozprawie uważam za oryginalne i stanowiące zauważalny wkład w rozwój dyscypliny naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Oryginalnym elementem pracy jest zaproponowany proces korekty odległości, pozyskanej z systemu UWB, która redukuje niedokładność wyznaczanej pozycji w procesie trilateracji, oraz opracowanie procedury predykcji pozycji obiektu będącego w ruchu z wykorzystaniem sieci neuronowej LSTM, która redukuje opóźnienie wprowadzone przez system pozycjonowania UWB.

### **d) Umiejętności autora do poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników ( zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)**

Przygotowanie rozprawy nie budzi dużych wątpliwości natury merytorycznej (za wyjątkiem pewnych braków objaśnień, do których odniosę się poniżej w części „uwagi o charakterze dyskusyjnym”). Jeśli chodzi o stronę formalną to rozprawa została przygotowana ze średnią dbałością o szczegóły opisu badań i elementów stanowisk badawczych (będzie o nich mowa w części „główne wady rozprawy, jej słabe strony”). Nie udało się także uniknąć uchybień o charakterze głównie edycyjnym (wymienionych w części „uwagi szczegółowe”).

#### **Główne wady rozprawy, jej słabe strony:**

- a) Brak w rozprawie odniesienia się do uzyskanych wyników (wartości błędów) przez innych autorów z podobnego obszaru badawczego (fuzja danych z UWB i IMU, metody predykcji w określaniu współrzędnych położenia);
- b) Brak informacji na temat użytego sprzętu (poza komputerem PC i jego parametrami), środowiska programistycznego, języka programowania, używanych bibliotek i nazw funkcji; w pracy nie ma opisu (lub kodu) jak wyznaczono czasy przetwarzania poszczególnych procesów analizy danych i czas całościowy;
- c) Brakuje kodów źródłowych lub pseudokodów oprogramowania;
- d) Brakuje zdjęć stanowisk pomiarowych dokumentujących wykonanie badań;
- e) W rozprawie istnieje pewna niekonsekwencja w prezentacji opisu matematycznego ruchu obiektu: w rozdziale drugim prezentowane są równania dla przestrzeni trójwymiarowej, w rozdziale trzecim dla płaszczyzny dwuwymiarowej, natomiast w rozdziale czwartym wektor parametrów zawiera komponenty z trzema lub z dwoma składowymi kierunkowymi (patrz strony 75, 88 i 101). Autor w poszczególnych sekcjach rozprawy powinien wyraźnie zaznaczyć dla jakiego wymiaru układu współrzędnych prezentuje dane, czy pomija składową kierunkową „z”, czy też nie;
- f) Zawartość tego rozdziału 3 (poświęconego symulatorowi systemu UWB) jest mało czytelna. O ile rozdział 3.1 jest jeszcze dosyć dobrze napisany, to na początku rozdziału 3.2 (pt. Wyznaczenie parametrów modelu) brakuje jasno i wyraźnie zdefiniowanego modelu oraz wymienienia z nazwy jego parametrów. Na stronie 44 zamiast wstępu teoretycznego od razu prezentowana jest szczegółowa analiza danych pomiarowych. Liczba przedstawionych statystyk testowych dezorientuje czytelnika. Wypadałoby tu zacząć najpierw od informacji ogólnych, teorii (jest na str. 50-52), a następnie przejść do szczegółów. Z kolei pełny diagram procesów w symulatorze (rys. 37) przedstawiono dopiero na końcu rozdziału trzeciego, a należałoby go wstawić do rozdziału 3.1 jako rozwinięcie rys. 15;
- g) W systemie opisanym w rozdziale 4, gdzie mowa jest o fuzji danych z UWB i IMU, brakuje informacji sprzętowych jak i danych liczbowych - wartości wariancji (lub odchyłeń standardowych) mierzonego przyspieszenia i współrzędnych położenia przez użyte elementy

sensoryczne, tj. akcelerometr, żyroskop, system UWB. Parametry te występują we wzorach (59) i (60).

#### **Uwagi o charakterze dyskusyjnym:**

- 1) Wyjaśnić ideę filtracji komplementarnej zastosowanej w rozprawie.
- 2) Wyjaśnić czy równanie stanu reprezentujące dynamikę systemu jest liniowe dla przedstawionych scenariuszy przejazdu. Dlaczego wybrano filtr Kalmana, a nie np. rozszerzony filtr Kalmana (EKF)?
- 3) W jaki sposób wyznaczono przedstawione w rozdziale 4 czasy przetwarzania poszczególnych etapów przetwarzania danych?

#### **Uwagi szczegółowe:**

#1

Str. 1: Wykaz akronimów i skrótów jest zamieszczony, natomiast brakuje wykazu symboli i ich wyjaśnień;

#2

Str. 7: Tabela 2 – brak/niepełna definicja poziomu 5 automatyzacji SAE;

#3

Str. 10: Wzór (10), czyli lewa strona układu równań (13), jest niepoprawnie podany;

#4

Str. 44: Rysunek 16 - brakuje kompletnego wymiarowania. Czy grubość metalowej przeszkody, rodzaj stopu metalu, i jej kształt ma wpływ na wyniki badań?

#5

Str. 45: Występuje pojęcie przeszacowania wartości odległości, którego definicja jest dwie strony dalej;

#6

Str. 47: Wzór (18) i tabela (5) - symbole wielkości nie są spójne. Brak opisu indeksu *i*. Jaką różnicę wartości pomiaru i wartości referencyjnej Autor ma na myśli?

#7

Str. 47: Pojawia się akronim MBE (ang. mean bias error), a jego definicja jest dopiero na stronie 50;

#8

Str. 53-55: Sigma, SD, i STD – występują trzy różne oznaczenia odchylenia standardowego;

#9

Str. 61-62: Autor nie komentuje wystąpienia prędkości kątowej na odcinku łuku (w kierunku pionowym - oś OZ);

#10

Str. 65: Czy do opisu matematycznego przeszkody potrzebny jest ostatni wiersz układu nierówności?

#11

Str. 68: „(...) odwzorowanie systemu ze średnim błędem na poziomie 21% zarówno dla MBE jak i odchylenia standardowego” – jak wyznaczono tę wartość?

#12

Str. 71: Występuje sformułowanie „stałego przesunięcia pomiarów (ang. bias)”, czy chodzi o błąd systematyczny?

#13

Str. 73-75: W rozdziale 4.1.3 cytowane są dwie dawne publikacje na temat filtru Kalmana (KF). Czy nie lepiej było zastosować np. rozszerzonego filtru Kalmana (EKF) zamiast jego klasycznej postaci (KF) dla prezentowanego systemu dynamicznego?

#14

Str. 75: Niespójność zaprezentowanego modelu przemieszczenia (54) w rozdziale poświęconym filtrowi Kalmana z modelem przemieszczenia przedstawionym wcześniej na str. 59-60. To równanie opisuje tylko dwa odcinki ścieżki z rys. 41, a co z pozostałymi?

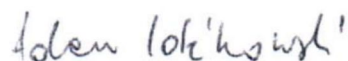
#15

Str. 110: Czy podane w tabeli 34 czasy przetwarzania są średnie, czy maksymalne?

#### **Podsumowanie:**

Osiągnięcia Doktoranta przedstawione w rozprawie uważam za oryginalne i stanowiące zauważalny wkład w rozwój prac na temat systemów decyzyjnego pozycjonowania obiektów (pojazdów) przy pomocy technologii UWB. Autor rozprawy wykazał, że posiada niezbędną wiedzę teoretyczną w zakresie reprezentowanej dyscypliny i ma umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Brał udział w czterech projektach. Elementy jego rozprawy są wynikiem współpracy z firmami z branży motoryzacyjnej. Jest współautorem dziewięciu publikacji, w tym siedmiu indeksowanych w bazie Web of Science Core Collection.

Stwierdzam, że praca doktorska mgr. inż. Krzysztofa Paszka **spełnia** warunki określone w art. 13 ust. 1 i 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, z późn. zm.), w związku z art. 179 ust. 1 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. - Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669, z późn. zm.). Wniosuję do Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Śląskiej o **dopuszczeniu** mgr. inż. Krzysztofa Paszka do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.



dr hab. inż. Adam Idźkowski, prof. PB