

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY**  
**INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**  
zaprasza na  
PUBLICZNĄ OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**mgr. inż. Marcina Kołakowskiego**

która odbędzie się w dniu **6 lipca 2023 roku**, o godzinie **13:00** w trybie hybrydowym

Temat rozprawy:

„Adaptive Method for Indoor Positioning of Moving Objects”

Promotor: prof. dr hab. inż. Józef Modelski – Politechnika Warszawska

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Kamil Staniec – Politechnika Wrocławska

prof. dr hab. inż. Jacek Stefański – Politechnika Gdańska

Obrona odbędzie się zdalnie na platformie MS Teams/ w Sali nr.427/428 WEiTI. Osoby zainteresowane uczestnictwem w obronie proszone są o zgłoszenie chęci uczestnictwa w formie elektronicznej na adres sekretarza komisji: dr hab. inż. Halina Tarasiuk, – email: halina.tarasiuk@pw.edu.pl, do dnia 03.07.2023. godz. 12:00.

Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelni Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1.

Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej: <https://bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/Wszczete-przed-30-kwietnia-2019-r/Dyscyplina-informatyka-techniczna-i-telekomunikacja-dziedzina-nauk-inzynieryjno-technicznych/mgr-inz.-Marcin-Kolakowski>

Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny  
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja  
Politechniki Warszawskiej  
**dr hab. inż. Jarosław Arabas, prof. uczelni**

Wrocław, 14.06.2023

Prof. dr hab. inż. Kamil Staniec  
Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki  
Wydział Informatyki i Telekomunikacji  
Politechnika Wrocławska  
ul. Janiszewskiego 9  
50-372 Wrocław  
e-mail: [kamil.staniec@pwr.edu.pl](mailto:kamil.staniec@pwr.edu.pl)

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**Tytuł rozprawy:** Adaptive method for indoor positioning of moving objects

**Autor rozprawy:** mgr inż. Marcin Kołakowski

Podstawą prawną do opracowania niniejszej recenzji jest Ustawa „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. 2018 poz. 1668), w szczególności zapisy zawarte w art. 187, określające niezbędne elementy rozprawy doktorskiej. Zgodnie z Poradnikiem „Recenzje w postępowaniu o awans naukowy”, wydanym przez Radę Doskonałości Naukowej w 2022 r., mimo że przepisy przytoczonej Ustawy nie wskazują wprost, na czym ma polegać recenzja rozprawy doktorskiej, mając na uwadze wytyczne określone w art. 187, opinia dotycząca danej rozprawy doktorskiej powinna zawierać następujące elementy: 1) ocenę wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w określonej dyscyplinie albo dyscyplinach; 2) ocenę wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej przez osobę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora oraz 3) ocenę wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne. Niniejsza recenzja stanowi analizę mającą odpowiedzieć na pytanie, czy i w jakim zakresie przedłożona do zaopiniowania praca doktorska jest realizacją tych trzech elementów.

### **1. Ocena wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w określonej dyscyplinie albo dyscyplinach**

Rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Kołakowskiego dostarcza wielu dowodów na dogłębną dziedzinową (i nie tylko) wiedzę Doktoranta z zakresu metod radiowego



str. 1

pozycjonowania w obszarach zamkniętych. Rozdział 2. jest tego emanacją, gdyż prezentuje przekrojowo i wyczerpująco stan badań w tym zakresie, z odwołaniem do 80 pozycji bibliograficznych, ze szczególnym uwzględnieniem metod adaptacyjnych. W tej grupie bowiem Autor odnalazł ulokował swój przedmiot badań, wykazując klarownie na łamach wspomnianego rozdziału systematykę formalną metod adaptacyjnych używanych w pozycjonowaniu, wśród których wyróżnił (wraz z pod-metodami): 1. wstępne przetwarzanie wyników pomiarowych; 2. dopasowywanie parametrów algorytmicznych i 3. przetwarzanie końcowe rezultatów pozycjonowania. Zestawienie to, nawet jeśli pozbawione samo w sobie waloru badawczego, stanowi ciekawy materiał przeglądowy o charakterze dydaktycznym. Dowodzi jednocześnie świadomości Doktoranta, iż prowadzone przez niego prace badawcze lokują się w dość dobrze rozpoznanym obszarze wiedzy, co w takich wypadkach stanowi niemałe wyzwanie i wymaga wyjątkowej kreatywności do odnalezienia wciąż niezagospodarowanych rejonów czy też sposobów na poprawę wyników, bądź wykazania istotności pewnych opisów parametrycznych na wynikową lokalizację.

W pozycjonowaniu radiowym stosuje się rozmaite techniki wymagające dogłębnej wiedzy z zakresu propagacji, technik korelacyjnych czy analiz różnicowych. Autor wykazał w tym zakresie niezbędną wiedzę, swobodnie przechodząc pomiędzy technikami bazującymi na mocy sygnału odebranego RSS (*received signal strength*) oraz różnicy czasu nadejścia TDoA (*time difference of arrival*). Na osobną uwagę zasługuje jednak także biegłość Autora w zakresie technik z zakresu sztucznej inteligencji, w szczególności uczenia głębokiego. Dowiódł tego, umiejętnie inkorporując w module korekty wyników model regresyjny oparty na splotowych sieciach neuronowych CNN oraz na sieciach długiej pamięci krótkotrwałej LSTM, z zastosowaniem bibliotek: Keras i TensorFlow. Podejście to gwarantuje, iż opracowany system posiada wbudowaną zdolność do samodzielnego uczenia się, adaptując się do zmian behawioralnych lokalizowanych użytkowników oraz samego środowiska propagacyjnego. Szczególnie w dobie trwającej tzw. trzeciej rewolucji w sieciach neuronowych, Pan Kołakowski dołożył tym samym swój wkład w przestrzeń zastosowań tych rozwiązań, czym zmanifestował znakomite rozeznanie w stanie badań przekraczającym zakres objęty tradycyjnie pojętą radiokomunikacją.

## **2. Ocena wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej przez osobę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora**

W odniesieniu do tego punktu oceny, uważam iż można się posłużyć dorobkiem publikacyjnym mgr. inż. Kołakowskiego wymienionym w rozdziale bibliograficznym rozprawy, i statystykami z niego wynikającymi. Dorobek ten obejmował głównie referaty (razem 12 prac, z czego w 11 jako jedyny bądź główny autor) wygłoszone na konferencjach międzynarodowych: *MIKON*, *TELFOR*, *RFID-TA*, *SPSympo*, *EuCAP*. Publikacje w czasopismach naukowych (razem 9 prac, z czego w 6 jako jedyny bądź główny autor) ukazywały się z kolei na łamach: *Sensors*, *Applied Sciences*, *Przegląd Telekomunikacyjny/Wiadomości Telekomunikacyjne*, *IET Microwaves*, *Antennas and Propagation*, *IEEE Sensors Journal* oraz *IJET*. Prosta analiza przytoczonych parametrów liczbowych wskazuje na to, iż w zaprezentowanym dorobku bibliograficznym, w którym Doktorant przyrostowo raportował o swoich pomysłach składających się ostatecznie na przedłożone do oceny dzieło, w 81% prac wystąpił jako wyłączny bądź pierwszy autor, natomiast w 67% jako jedyny autor (bądź współautor z promotorem). Taki wynik u kandydata do stopnia doktora, jest ewidentnie indykatywny dla wyróżniającej się samodzielności badawczej. Dodatkowo, fakt częstego występowania w charakterze autora głównego stanowi o jego potencjale w zakresie liderowania w badaniach oraz inicjatywnej i wiodącej roli w powstawaniu publikacji naukowych, wieńczących naukowe eksploracje.

Zasługującą na wzmiankę moim zdaniem jest także tendencja Pana Kołakowskiego do zestawiania parami najtrafniejszych – jego zdaniem – metod dochodzenia do wyników, dla ostatecznego wskazania tej dającej najlepsze rezultaty. Wykazał to m.in. w:

- fazie wyboru zestawów ‘kotwic’ (*anchor selection parameter estimation*), do której jako pierwszej użył metody bazującej na RSS, jako drugiej zaś – metody opartej na TDoA;
- fazie pracy algorytmu pozycjonowania użytkownika, proponując metodę estymatora najmniejszych kwadratów LS (co prawda szybko zarzuconej) oraz Rozszerzonego Filtru Kalmana EKF, dającego dokładniejsze wyniki niż LS, stąd zaproponowanego jako metoda docelowa;
- fazie końcowego pozycjonowania adaptacyjnego, zestawiając wyniki uzyskane za pomocą procedury uproszczonej, bazującej jedynie na selekcji wyników pomiarowych (ze stałym zestawem kotwic) oraz procedury pełnej (kompletnej), uwzględniającej korekcję wyników zmierzonych (ze zmiennym zestawem kotwic).

### 3. Ocena wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne

Osiągnięcie badawcze mgr. inż. Marcina Kołakowskiego należy do nurtu adaptacyjnych metod lokalizacyjnych ze wstępnym przetwarzaniem wyników pomiarowych. W szczególności, Autor zaproponował wzbogacenie etapów: 1. selekcji wyników oraz 2. korekcji wyników, w oparciu o dane historyczne oraz pewne charakterystyczne cechy środowiska propagacyjnego, w którym system lokalizacyjny jest wdrażany. Samo zastosowanie tych etapów jest praktyką dość powszechną (co opisał w rozdz. 2.2.1), jednak dla potrzeb własnej metody, zastosował w nich innowacyjne podejścia prowadzące do uelastycznienia ostatecznego wyniku lokalizacyjnego. Podejścia te, przedstawione w dalszej części recenzji, stanowią jednocześnie oryginalny wkład mgr. inż. Kołakowskiego w tematykę radiowej lokalizacji wewnątrzbudynkowej.

W części dot. selekcji wyników, zaproponował podział środowiska na strefy (najczęściej będące osobnymi pomieszczeniami), zauważając że przy braku danych o absolutnie wiarygodnych (*ground truth*) lokalizacjach, ich rolę mogą pełnić wąskie przejścia pomiędzy strefami, o szerokości nie przekraczającej zazwyczaj 1 m. Ich znane lokalizacje pozwalają na zawężenie możliwych pozycji użytkownika do obszaru o rozmiarze 0,3-0,5 metra, spełniając tym samym funkcję analogiczną do pozycji absolutnych w metodach, które na to pozwalają (np. stosujących bramki RFID czy czujniki iBeacon). Dodatkowo, biorąc pod uwagę ograniczoną swobodę ruchu po przekroczeniu przejścia, Autor postuluje wyodrębnienie możliwych dalszych trajektorii ruchu, dopasowując do nich (poprzez obliczenie odległości Fréchet'a) dane pomiarowe, a następnie dokonując skojarzenia z najlepszym zestawem kotwic radiowych. Oznacza to, że po wykryciu (bądź jego wykluczeniu) przekroczenia przejścia, określany jest kolejno wektor ruchu, m.in. w oparciu o historyczne dane zebrane o zachowaniu danego użytkownika, które biorą udział w procedurze ponownego wyboru zestawów 'kotwic' (czy – zgodnie z nomenklaturą użytą w pracy – *estymację parametru wyboru kotwicy*). Tym samym, rutynowa praca systemu polega na iteracyjnym określaniu tego zestawu (z poniżej sekundowym cyklem), w oparciu o:

- określenie bieżącej strefy, w której znajduje się użytkownik, na podstawie ostatniej znanej lokalizacji;
- ustalenie bieżącego kierunku i zwrotu wektora ruchu użytkownika;
- dostępne kotwice.

Głównym celem fazy korekcji wyników jest kompensacja znaczących błędów wyników pomiarowych wynikających z warunków NLOS, typowych dla wnętrz budynków. Powstają one wskutek zarówno dużej zmienności w funkcji czasu (czyli w trakcie ruchu) rozłożenia przeszkód pomiędzy modulem użytkownika a nadajnikami kotwic, ale też wskutek stosunkowo częstej i zazwyczaj gwałtownej reorientacji ciała użytkownika, powodującej efekt zacieniania (*body shadowing*). Oba te zjawiska odpowiedzialne są za powstawanie niereprezentatywnych (bo nie należy ich nazywać błędnymi, jak określa je Autor, gdyż przecież poprawnie odzwierciedlają chwilowe wahania sygnału radiowego) odczytów pomiarowych, prowadzących często do skrajnych odchyłeń lokalizacyjnych z nich wynikających. Po ich wykryciu, z użyciem prostego kwantyfikatora statystycznego w postaci dwukrotności odchylenia standardowego, są ‘podciągane’ do wartości estymowanych. Ostateczna lokalizacja użytkownika odbywa się już z zastosowaniem zmodyfikowanych wartości tych odczytów. Użycie tej metodyki wymaga jednak pracy dodatkowych modułów działających równoległe do podstawowego algorytmu pozycjonującego, czyli:

- modułu predykcji lokalizacji użytkownika, implementującego dwuetapowy model, którego celem jest wyodrębnienie (na podstawie określonej liczby historycznych lokalizacji) cech opisujących trajektorię ruchu użytkownika, poprzez użycie ekstraktora cech opartego na sieci neuronowej;
- modułu korekty wyników, służącego do określenia tymczasowych zależności pomiędzy wyodrębnionymi cechami ruchu i dokonania prognozy kolejnej lokalizacji użytkownika.

Działanie systemu opiera się na wstępnym wytrenowaniu modelu z użyciem symulowanych możliwych ścieżek (trajektorii) ruchu użytkownika, odpowiadających jego kilkunastogodzinnemu poruszaniu się w analizowanym środowisku. W fazie regularnej pracy systemu, w dalszym ciągu może on podlegać trenowaniu, stosując koncepcję transferu wiedzy (*transfer-learning method*) do ‘douczenia’ wstępnie wytrenowanej sieci za pomocą analogicznego zbioru nowych danych. Bieżącemu uczeniu jednak podlega już tylko praca modułu korekty wyników, przy zachowaniu niezmiennych wag ekstraktora cech.

Wyniki symulacji wskazują na stałą przewagę lokalizacji opartej o pomiary TDoA, w stosunku do RSS, wykazując 2,5- oraz 3,5-krotnie mniejszą wartość medianowego błędu bezwzględnego MAE (*median absolute error*) dla scenariuszy wykorzystujących, odpowiednio, pozycjonowanie w oparciu jedynie o selekcję wyników (metodę uproszczoną)

oraz pozycjonowanie z użyciem korekty wyników (metodę kompletną). Ponadto, dla odpowiadających sobie scenariuszy (TDoA, RSS), stosunek uzyskiwanych MAE pomiędzy metodami: uproszczoną oraz kompletną, wynosi od ok. 2,5 do blisko 4 razy.

Wyniki symulacji znajdują swoje potwierdzenie także w pomiarach, w których Autor przytoczył rezultaty uzyskane za pomocą lokalizacji dokonanej dla różnych kombinacji statycznie ustawionych zestawów kotwic, następnie z zastosowaniem metody uproszczonej, a kolejno – metody kompletnej. Zarówno stosując pomiary wąskopasmowe (z użyciem systemu BLE, *Bluetooth low radio*) jak i szerokopasmowych (z użyciem systemu UWB, *ultra-wideband*), metoda kompletna dała najlepsze rezultaty, w sensie błędu określania trajektorii, przy czym pomiary wąskopasmowe ujawniły jednocześnie większą reprezentatywność (albo innymi słowy: przydatności odczytów) dla procenta lokalizacji niż szerokopasmowe. Dla pomiarów BLE bowiem 84% lokalizacji mogłoby być dokonanych z użyciem połowy par, podczas gdy ta sama liczba par w technice UWB pozwalała na dokonanie jedynie 67% lokalizacji. To wynik ciekawy, choć niejako poboczny względem głównego ciągu badań.

Niedosyt pozostawia jedynie fakt, że zarówno w symulacjach jak i eksperymentach pomiarowych, Autor oparł się na tylko jednym środowisku, typu mieszkaniowego. Praca nabrałaby ogólniejszego charakteru, gdyby badania weryfikacyjne wykonał także dla innego typu środowisk, jak np. galeria handlowa, pomieszczenia biurowe, sala sportowa czy otwarta hala produkcyjna. Znacząco inna charakterystyka geometryczna takich środowisk, a więc także wynikająca z nich specyficzna odpowiedź kanału radiowego, mogłaby zaowocować wnioskami i rekomendacjami o wyższej wiarygodności i szerszej uniwersalności. Za mało przekonujący uważam także sposób porównania przedmiotowego modelu do konkurencyjnych rozwiązań, i choć tab. 5.3 stanowi nader ciekawą kompilację wyników, właściwie nie wiadomo, jaka miałyby być ich użyteczność w kontekście porównawczym, z uwagi na istotne różnice między nimi w kluczowych kwestiach (a także w przyjętych metrykach), o których Pan Kołakowski wspomina w rozdz. 5.3. Ponadto, w ponad połowie przypadków dla pomiarów BLE oraz we wszystkich przypadkach pomiarów UWB, średni błąd lokalizacji zacytowanych systemów okazał się niższy niż w metodzie Doktoranta. Tym samym obstaruję raczej przy wniosku, iż z braku dostępu do narzędzi symulacyjnych wykorzystanych w konkurencyjnym oprogramowaniu, analiza komparatywna nie dostarczyła miarodajnych informacji.

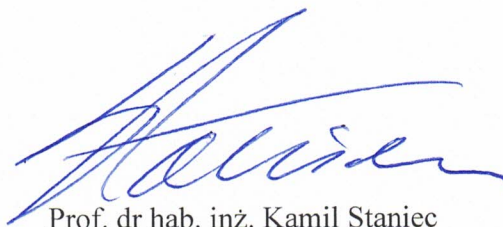
Pomimo zgłoszonych uwag, pod względem oryginalności rozwiązania naukowego i przydatności, pracę oceniam bardzo wysoko. Uważam także iż teza postawiona przez

Doktoranta, o brzmieniu (tłumaczenie własne na j. polski): „*możliwe jest zmniejszenie błędów lokalizacji poruszających się obiektów bez modyfikowania algorytmu pozycjonowania, biorąc pod uwagę układ przestrzeni wewnętrznej i dane historyczne opisujące ruch lokalizowanego obiektu*” została w pełni udowodniona. Jej treść bowiem wskazuje na to, iż zamiarem Autora było wykazanie istotności geometrii środowiska propagacyjnego oraz zdolności prognozowania lokalizacji na bazie wcześniejszych danych, w redukcji błędów lokalizacji, nie zaś opracowanie narzędzia o wyróżniającej się dokładności na tle dotychczasowych opracowań w tym zakresie. Deklarowany zamiar został osiągnięty na drodze klarownie opisanych metod i podejść, wyniki zostały poprawnie zaprezentowane i odpowiednio skonkludowane.



---

**KONKLUZJA:** w mojej ocenie, wzięwszy pod uwagę spełnienie wszystkich trzech zasadniczych elementów pracy doktorskiej, osiągnięcie mgr. inż. Marcina Kołakowskiego pt. „*Adaptive method for indoor positioning of moving objects*” należy uznać za **spełniające wymagania z wyraźnym nadmiarem**. Uważam tym samym, że przedłożona rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy i dlatego wnioskuję o dopuszczenie jej do obrony



Prof. dr hab. inż. Kamil Staniec



Prof. dr hab. inż. Jacek Stefański  
Politechnika Gdańska  
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki  
Katedra Systemów i Sieci Radiokomunikacyjnych  
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Gdańsk, dnia 01.06.2023 r.

Rada Naukowa Dyscypliny  
INFORMATYKA TECHNICZNA  
I TELEKOMUNIKACJA  
Sekretariat  
Data wpływu.....16.06.2023r.  
Numer.....

### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**pt. *Adaptive Method for Indoor Positioning of Moving Objects***

**autorstwa mgr inż. Marcina Kołakowskiego, opracowana na podstawie pisma  
przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna  
i Telekomunikacja z Politechniki Warszawskiej z dnia 17 kwietnia 2023 r.**

#### **1. Tematyka rozprawy**

Tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej koncentruje się na problemie poprawy dokładności estymacji położenia obiektów ruchomych w środowisku wewnątrzbudynkowym z zastosowaniem ultraszerokopasmowego UWB (*Ultra-WideBand*) oraz wąskopasmowego BLE (*Bluetooth Low Energy*) interfejsu radiowego. Nowością w zaproponowanej metodzie jest adaptacyjny dobór jej parametrów na podstawie znanego rozkładu pomieszczeń oraz zarejestrowanych danych historycznych o położeniu obiektów. Metoda ta jest niezależna od stosowanych algorytmów wyznaczania położenia obiektów i może stanowić cenne uzupełnienie istniejących rozwiązań, gdyż umożliwia właściwą selekcję i korekcję wyników pomiarowych przed procesem estymacji położenia. Testy funkcjonalne poprawności działania zaproponowanej metody zostały przeprowadzone w sieciach radiowych bazujących na pomiarach różnicy czasów nadejścia sygnałów radiowych TDoA (*Time Difference of Arrival*) – w interfejsie UWB oraz mocy sygnałów odbieranych RSS (*Received Signal Strength*) – w interfejsie BLE.

Zatem tematyka poruszana w rozprawie jest ważna i aktualna, ukierunkowana na praktyczne rozwiązania w obszarze nowych technik oraz wpisuje się w tzw. wszechobecne przetwarzanie danych o położeniu obiektów (*ubiquitous positioning*), ze szczególnym uwzględnieniem środowisk wewnątrzbudynkowych.

W rozprawie Doktorant podjął się udowodnienia naukowymi metodami następującej tezy (tłumaczenie z języka angielskiego): *możliwe jest zmniejszenie błędów estymacji położenia*

*poruszających się obiektów bez modyfikowania zastosowanego algorytmu pozycjonowania, poprzez uwzględnienie rozkładu pomieszczeń w środowisku wewnątrzbudynkowym i danych historycznych opisujących ruch lokalizowanego obiektu.*

Do udowodnienia przyjętej tezy, która brzmi jednoznacznie, Autor zastosował metodę eksperymentalną, polegającą na przeprowadzeniu:

- badań symulacyjnych z uwzględnieniem właściwości ultraszerokopasmowego oraz wąskopasmowego interfejsu radiowego,
- badań pomiarowych w warunkach rzeczywistych.

Opracowana metoda ma duży potencjał aplikacyjny. Została z powodzeniem zastosowana do poprawy dokładności estymacji położenia obiektów w sieci pilotowej UWB/BLE zbudowanej w ramach projektu IONIS (*NITICSplus – Indoor and Outdoor Solution for Dementia Challenges*), który był realizowany w Instytucie Radioelektroniki i Technik Multimedialnych Politechniki Warszawskiej.

Na zakończenie tego punktu należy stwierdzić jednoznacznie, że tytuł, cel i teza rozprawy zostały przez Doktoranta sformułowane poprawnie i wystarczająco jasno.

## **2. Charakterystyka rozprawy**

Rozprawa doktorska mgra inż. Marcina Kołakowskiego została zredagowana na 129 stronach, w postaci sześciu rozdziałów, w tym wstępu i podsumowania, oraz spisu literatury zawierającego 110 pozycji, a także pięciu dodatków. W rozprawie znajduje się również wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń oraz spis rysunków i tabel. W spisie literatury znajduje się aż 12 pozycji autorstwa i 10 współautorstwa Doktoranta oraz aktualne pozycje innych autorów z uznanych czasopism zagranicznych i konferencji o zasięgu międzynarodowym, jak również 7 odnośników do stron www. Wszystkie pozycje literaturowe są przynajmniej raz zacytowane w tekście głównym rozprawy.

We wstępie Autor przedstawił motywacje zajęcia się tematyką radiolokalizowania obiektów wewnątrz budynków, jednocześnie wskazując na trzy istotne uwarunkowania, które wpływają na dokładność estymacji położenia w tym środowisku: brak bezpośredniej widoczności anten urządzeń w sieci radiolokalizacyjnej – częste występowanie warunków NLoS (*Non-Line of Sight*), niekorzystny wpływ ciała użytkownika na opóźnienie i tłumienie sygnałów radiowych oraz nieoptymalne rozmieszczenie elementów sieci związane m.in. z ograniczonym dostępem do zasilania, bezpieczeństwem użytkownika, a także względami estetycznymi. W celu minimalizacji błędów określania położenia obiektów, Doktorant

zapropował podejście adaptacyjne, które zostało rozwinięte w dalszej części niniejszej rozprawy.

Rozdział drugi zawiera opis typowej architektury wewnątrzbudynkowego systemu radiolokalizacyjnego wraz z najczęściej stosowanymi algorytmami estymacji położenia obiektów oraz przegląd, na podstawie światowej literatury, aktualnego stanu wiedzy w obszarze adaptacyjnych metod lokalizacyjnych. W rozdziale tym Autor skupił się przede wszystkim na klasyfikacji adaptacyjnych metod lokalizacyjnych, wskazując trzy główne etapy procesu estymacji położenia obiektów, w których stosowana jest adaptacja. Pierwsza grupa (*measurement results pre-processing*) obejmuje metody wstępnego przetwarzania wyników pomiarów wykonywanych przez infrastrukturę sieci radiolokalizacyjnej. Metody wykorzystują informacje o sieci i jej otoczeniu do selekcji, modyfikacji i ważenia wyników pomiarów. Druga grupa (*algorithm parameters fitting*) jest najliczniejsza i obejmuje metody modyfikacji parametrów algorytmów lokalizacyjnych w celu zwiększania efektywności ich pracy w zależności od typu środowiska i zachowania użytkowników. Zakres modyfikowanych parametrów obejmuje tzw. mapy radiowe, modele propagacyjne oraz cechy charakterystyczne ruchu użytkownika. Do ostatniej grupy (*positioning results post-processing*) należą metody, które wykorzystują informacje o środowisku w celu modyfikacji końcowych wyników estymacji położenia obiektów. Stosowane są również, chociaż nadal jeszcze rzadko, metody hybrydowe, które wykorzystują adaptację na kilku ww. etapach procesu radiolokalizowania. Autor zwrócił również uwagę na szybki rozwój algorytmów sztucznej inteligencji (*artificial intelligence*) w zastosowaniach adaptacyjnych, czego efektem są coraz liczniejsze rozwiązania opisywane w literaturze.

Materiał przedstawiony w części teoretycznej, świadczy o dobrym rozeznaniu Autora w przedmiocie rozważanego problemu, zaś wnioski wynikające z przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu są jasne i merytorycznie poprawne.

W rozdziale trzecim Autor sformułował tezę rozprawy oraz opisał szczegółowo zaproponowaną adaptacyjną metodę lokalizacyjną, która składa się z trzech głównych etapów. W pierwszym, następuje selekcja wyników, które posłużą do estymacji położenia użytkownika. Wyniki te są wybierane na podstawie aktualnego położenia użytkownika i najkorzystniejszych dla niego węzłów referencyjnych. W kolejnym etapie, wyniki pomiarów są korygowane pod kątem eliminacji negatywnego wpływu wysoce niepewnych wyników na podstawie prognozowanego położenia użytkownika. Położenie użytkownika w tym etapie jest przewidywane przy użyciu dedykowanego modelu uczenia maszynowego, który początkowo był trenowany na symulowanych danych, a następnie dostrajany na podstawie

zarejestrowanych trajektorii ruchu użytkownika. W ostatnim, trzecim etapie zaktualizowane wyniki pomiarów przekazywane są do algorytmu estymacji położenia obiektu. W przeprowadzonych eksperymentach Doktorant zastosował estymator najmniejszych kwadratów LS (*Least Squares estimator*) oraz rozszerzony filtr Kalmana EKF (*Extended Kalman Filter*).

W rozdziale czwartym Doktorant opisał rezultaty badań symulacyjnych zaproponowanej metody adaptacyjnej. Symulator został opracowany w języku programowania Python i uwzględnia istotne zjawiska występujące w kanale radiowym, takie jak opóźnienie i tłumienie propagacyjne oraz warunki NLoS pomiędzy węzłami referencyjnymi i lokalizowanym użytkownikiem. Obszar środowiska wewnątrzbudynkowego został ograniczony do mieszkania o powierzchni użytkowej 50 m<sup>2</sup>, które podzielono na sześć stref oddzielonych ścianami. Na całej powierzchni tego środowiska rozlokowano również typowe wyposażenie mieszkalne oraz zaproponowano rozmieszczenie sześciu stacji referencyjnych. Ponadto, podczas testowania efektywności pracy adaptacyjnej metody lokalizacyjnej przyjęto, że poszczególne stacje referencyjne realizują pomiary z częstotliwością kilku herców. Głównym wynikiem przeprowadzonych badań symulacyjnych były rodziny krzywych estymat dystrybuanty błędu bezwzględnego położenia użytkownika dla różnych parametrów systemowych. Z otrzymanych rezultatów jednoznacznie wynika poprawa dokładności lokalizowania użytkowników w środowisku wewnątrzbudynkowym stosując metodę adaptacyjną, zaproponowaną przez Doktoranta, w porównaniu z rozwiązaniami klasycznymi.

Rozdział piąty dotyczy badań pomiarowych, mających na celu praktyczną weryfikację opracowanej metody adaptacyjnej. Środowisko pomiarowe było identyczne z przyjętym modelem do badań symulacyjnych. Badania pomiarowe zostały zrealizowane w ramach projektu IONIS, w którym testom poddawano dwa rozwiązania systemu radiolokalizacyjnego, bazującego na pomiarach TDoA i mocy sygnałów odbieranych RSS. W każdym z tych przypadków dokładność estymacji położenia użytkowników była większa dla metody adaptacyjnej w porównaniu z rozwiązaniami klasycznymi, co ostatecznie potwierdziło wyniki badań symulacyjnych. Na zakończenie tego rozdziału Doktorant na podstawie wybranych pozycji literaturowych przeprowadził analizę porównawczą dokładności estymacji położenia użytkowników w różnych wewnątrzbudynkowych systemach radiolokalizacyjnych na tle opracowanej metody adaptacyjnej. Z punktu widzenia recenzenta, z uwagi na brak możliwości odniesienia się do jednoznacznie przyjętych założeń systemowych we wszystkich analizowanych rozwiązaniach, porównanie to ma jedynie wartość poglądową.

W dodatkach do rozprawy, Autor zdefiniował m.in. parametry jakościowe przy ocenie efektywności pracy metod lokalizacyjnych, w tym błąd bezwzględny położenia użytkownika oraz tzw. błąd trajektorii ruchu użytkownika, a także szczegóły implementacyjne środowiska do badań symulacyjnych, skróconą analizę wpływu środowiska i ciała użytkownika na wyniki pomiarów oraz podstawowe informacje o systemie radiolokalizacyjnym, opracowanym w ramach projektu IONIS.

### 3. Uwagi ogólne i szczegółowe

Rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Kołakowskiego jest napisana w języku angielskim w dobrym stylu. Całość stanowi interesującą, zwięzłą lekturę naukową, przystępną dla czytelnika. Wyciągane przez Doktoranta wnioski na podstawie zgromadzonego materiału badawczego (symulacyjnego i pomiarowego) są prawidłowe i jednoznaczne.

Do realizacji predykcji położenia użytkownika, Autor zaproponował architekturę sieci głębokiego uczenia składającą się z trzech sekcji: sieci spłotowej 1D, sieci rekurencyjnej z komórkami pamięci oraz warstwy w pełni połączonej. Warto zauważyć, iż zgodnie z opisem, poprawnie dobrano poszczególne sekcje architektury, które mają na celu kolejno wyekstrahować cechy charakterystyczne zmian położenia użytkownika, a następnie na podstawie tychże cech dokonać predykcji estymaty położenia użytkownika, wykorzystując zarówno informacje o zmianach krótkookresowych jak i długookresowych – co umożliwiają sieci LSTM (*Long-Short Term Memory networks*). W tym miejscu warto podkreślić, że zaproponowana kaskadowa architektura sieci spłotowej oraz sieci rekurencyjnej jest znana w literaturze, jednak sposób jej zastosowania w niniejszej dysertacji należy uznać za wartość dodaną w kontekście rozważań radiolokalizacyjnych. Po lekturze tej części rozprawy doktorskiej odczuwa się pewien niedosyt związany przede wszystkim z:

- brakiem informacji dotyczących metodyki wyboru architektury sieci oraz wyników procesu uczenia sieci, na podstawie których dana architektura została wybrana, a co za tym idzie jaka jest zależność wielkości poszczególnych elementów architektury względem rozmiaru analizowanych danych historycznych;
- brakiem wyjaśnienia parametru *None* w strukturze sieci, który odnosi się prawdopodobnie do wielkości zbiorów danych wejściowych (*batch*);
- brakiem wyjaśnienia jak warstwa normalizująca (*Flatten*) wpływa na sposób przetwarzania danych w pierwszej warstwie LSTM, ponieważ rozmiary danych wyjściowych nadal stanowią tablicę dwuwymiarową, a nie wektor i są takie same jak rozmiar macierzy wejściowej;

- brakiem określenia wrażliwości modelu na lukę w danych o położeniu użytkownika (z uwagi na możliwość wystąpienia nieciągłości danych lokalizacyjnych, Autor rozwiązał problem poprzez uzupełnianie macierzy wejściowej danymi z ostatniego poprawnego pomiaru), czyli zależności efektywności opracowanego modelu jako funkcji liczby kolejno brakujących estymat.

Forma redakcyjna rozprawy jest na wysokim poziomie, nie znaleziono również istotnych niedociągnięć natury językowej i pojęciowych.

#### **4. Osiągnięcia zawarte w rozprawie**

Oryginalny wkład Autora rozprawy w rozwój systemów radiolokalizacyjnych został opisany w rozdziałach od trzeciego do piątego. W rozdziale trzecim Doktorant szczegółowo opisał adaptacyjną metodę lokalizacyjną, która bazuje na oryginalnej strukturze sieci głębokiego uczenia do prognozowania położenia użytkownika. W kolejnych dwóch rozdziałach opracowana metoda została poddana wnikliwym badaniom symulacyjnym i pomiarowym. W każdym z tych badań jednoznacznie wynika, że stosowanie metody adaptacyjnej zwiększa efektywność estymacji położenia użytkowników w środowisku wewnątrzbudynkowym w porównaniu z rozwiązaniami, które przyjęto nazywać klasycznymi. Przykładowo, z przeprowadzonych pomiarów wynika, że dla dwóch testowanych interfejsów radiowych UWB i BLE poprawa ta sięga nawet 20 %.

Podsumowując, Autor rozwiązał postawione zadanie przy użyciu właściwych metod (symulacyjnej i pomiarowej), stosując przy tym uzasadnione założenia.

#### **5. Wniosek końcowy**

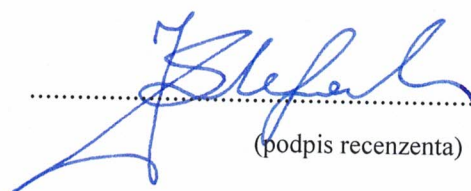
Na podstawie niniejszej recenzji można stwierdzić, że mgr inż. Marcin Kołakowski:

- przedłożył do oceny rozprawę doktorską pt. *Adaptive Method for Indoor Positioning of Moving Objects*, spełniającą wymagania stawiane tego typu pracom;
- podjął ważną, ciekawą i aktualną tematykę badawczą o dużym znaczeniu użytkowym, związaną z zagadnieniami lokalizowania obiektów w środowisku wewnątrzbudynkowym;
- opracował, zaimplementował oraz przetestował w warunkach rzeczywistych adaptacyjną metodę estymacji położenia obiektów ruchomych, przeznaczoną do stosowania w ultraszerokopasmowym oraz wąskopasmowym interfejsie radiowym.

Biorąc powyższe pod uwagę można stwierdzić jednoznacznie, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wskazuje na

wysoki poziom wiedzy teoretycznej z dyscypliny *informatyka techniczna i telekomunikacja*, a także na umiejętność prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta. Zatem **opiniowana praca mgr inż. Marcina Kołakowskiego spełnia wymagania ustawowe i może być dopuszczona do publicznej obrony.**

Ponadto, mając na uwadze wysoki poziom merytoryczny rozprawy, a także aktywność naukową Doktoranta, wyrażającą się m.in. licznymi i samodzielnymi publikacjami w prestiżowych czasopismach i prezentacjami referatów na renomowanych konferencjach międzynarodowych w tematyce ściśle powiązanej z rozprawą, **wnoszę o jej wyróżnienie.**

  
.....  
(podpis recenzenta)

## Adaptive Method for Indoor Positioning of Moving Objects

Marcin Kołakowski

W pracy przedstawiono adaptacyjną metodę przeznaczoną do określania położenia obiektów ruchomych wewnątrz pomieszczeń, w szczególności do lokalizacji przemieszczających się osób. Adaptacyjność zaproponowanej metody polega na zautomatyzowanym doborze jej parametrów na podstawie rozkładu pomieszczenia, w którym zainstalowano system oraz danych historycznych: wyników pomiarów i zarejestrowanych lokalizacji.

Istotą zaproponowanej metody jest przetworzenie bieżących wyników pomiarów polegające na:

- selekcji wyników na podstawie bieżącej lokalizacji osoby (wybór węzłów, z których wyniki są uwzględniane jest dokonywany w wyniku analizy danych pomiarowych w wąskich przejściach pomiędzy pomieszczeniami),
- korekcji wyników pomiarów znacznie odbiegających od wyników prognozowanych na podstawie historii ruchu osoby.

Metoda jest niezależna od algorytmu lokalizacyjnego, co pozwala na jej łatwe zaimplementowanie w istniejących systemach.

W pracy zamieszczono przegląd metod adaptacyjnych stosowanych w systemach lokalizacyjnych oraz opisano zaproponowaną metodę. Metoda została zweryfikowana w opracowanym środowisku do badań symulacyjnych. Symulacje obejmowały systemy oparte na pomiarach czasu (UWB) i mocy sygnałów (BLE). W pracy zamieszczono również wyniki badań eksperymentalnych wykonanych z wykorzystaniem hybrydowego systemu UWB/BLE opracowanego w ramach projektu IONIS.

Wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych i eksperymentalnych pokazały, że metoda pozwala na zwiększenie dokładności i dostępności wyników lokalizacji zarówno w systemie opartym na wykorzystaniu techniki ultraszerokopasmowej jak i wąskopasmowej.

Marcin Kołakowski