

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

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.

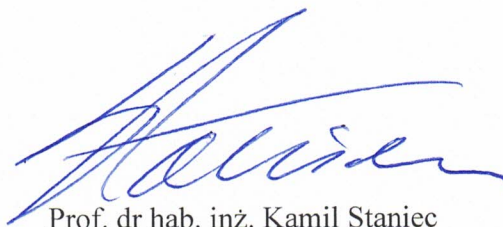
Niedosyt pozostawia jedynie fakt, że zarówno w symulacjach jak i eksperymentach pomiarowych, Autor oparł się na tylko jednym środowisku, typu mieszkaniowego. Praca nabrałaby ogólniejszego charakteru, gdyby badania weryfikacyjne wykonał także dla innego typu środowisk, jak np. galeria handlowa, pomieszczenia 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