**Dr hab. inż. Paweł Skruch, prof. AGH**
Katedra Automatyki i Robotyki
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie
Al. Mickiewicza 30/B1, 30-059 Kraków
E-mail: pawel.skruch@agh.edu.pl

*Kraków, dn. 24. października 2022 r.*

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Hanzla pt. „Wykorzystanie filtracji adaptacyjnej i logiki rozmytej oraz technologii UWB do identyfikacji i lokalizacji obiektów na potrzeby walidacji algorytmów w podsystemach ADAS"**

## I. Podstawa opracowania recenzji

Niniejsza recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Hanzla zatytułowanej „Wykorzystanie filtracji adaptacyjnej i logiki rozmytej oraz technologii UWB do identyfikacji i lokalizacji obiektów na potrzeby walidacji algorytmów w podsystemach ADAS" w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie naukowej informatyka techniczna i telekomunikacja. Promotorem opiniowanej rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Damian Grzechca, prof. Pol. Śl., a promotorem pomocniczym dr inż. Krzysztof Tokarz. Recenzję opracowano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Śląskiej prof. dr. hab. inż. Andrzeja Polańskiego (pismo z dn. 26. sierpnia 2022 r., RDITT/137/2022).

## II. Ocena oryginalności problemu badawczego podjętego w rozprawie i jego znaczenia dla rozwoju dyscypliny

Rozprawa doktorska dotyczy zagadnienia lokalizacji i identyfikacji obiektów oraz elementów infrastruktury drogowej za pomocą technologii telekomunikacyjnej UWB (ang. Ultra WideBand). Jest to problem badawczy z obszaru lokalizacji, który polega na określeniu pozycji danego obiektu w ustalonym układzie odniesienia. Ten problem obok zadania percepcji, które polega na detekcji i klasyfikacji elementów będących w polu widzenia systemu sensorycznego, jest jednym z kluczowych zagadnień w motoryzacji przy opracowywaniu zaawansowanych systemów wspomagania kierowcy oraz systemów umożliwiających jazdę o wysokim stopniu automatyzacji. Lokalizacja w pojazdach w głównej mierze bazuje na systemie GPS, który jest uzupełniany o nawigację inercyjną oraz dodatkowe informacje pochodzące z czujników wizyjnych czy też radarowych. Algorytmy lokalizacji powinny charakteryzować się wysoką dokładnością, która w przypadku branży motoryzacyjnej nie powinna przekraczać kilkunastu centymetrów, gdyż w oparciu o uzyskaną dokładność lokalizacji podejmowane są decyzje krytyczne pod względem bezpieczeństwa. Technologia UWB nie jest powszechnie wykorzystywana w przemyśle samochodowym, zarówno jeśli chodzi o elementy systemu sensorycznego pojazdu będącego standardowym wyposażeniem samochodu, jak i również jeśli chodzi o sam proces projektowania i weryfikacji systemów wspomagania kierowcy i jazdy zautomatyzowanej.

W tym kontekście pomysł Autora pracy, aby zbadać technologię UWB pod kątem zastosowań w motoryzacji należy uznać za trafny i wartościowy poznawczo i aplikacyjnie. W szczególności, zagadnienie identyfikacji obiektów z wykorzystaniem transmisji UWB może zdecydować o wykorzystaniu tej technologii w szerszej skali. Dodatkowo, ze względu na specyfikę przemysłu motoryzacyjnego, algorytmy przetwarzania danych muszą być implementowane na platformach czasu rzeczywistego o ograniczonych zasobach sprzętowych. Te wymagania powodują, że czasami algorytmy charakteryzujące się dobrymi wskaźnikami jakościowymi nie mają zastosowania w branży motoryzacyjnej ze względu na duże wymagania pod względem mocy obliczeniowej i zasobów pamięciowych. W tym zakresie motywacja Autora pracy związana z osiągnięciem konsensusu pomiędzy dokładnością i funkcjonalnością ma swoje praktyczne uzasadnienie.

**Stwierdzam zatem, że tematyka badawcza poruszana w rozprawie doktorskiej wpisuje się dobrze w aktualne trendy rozwojowe obowiązujące w branży motoryzacyjnej i związane przede wszystkim z automatyzacją transportu. Ta tematyka jest również zgodna z wymaganiami stawianymi dla rozwiązań algorytmicznych, które są opracowywane dla przemysłu samochodowego. Należy zatem jednoznacznie stwierdzić, że problem badawczy podjęty w rozprawie wykazuje duże cechy oryginalności i innowacyjności w skali międzynarodowej oraz ma duży potencjał dla rozwoju dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja.**

## III. Ocena poprawności i kompletności celów oraz hipotez badawczych

Autor rozprawy doktorskiej stawia tezę naukową, że możliwe jest „wykorzystanie filtracji adaptacyjnej i logiki rozmytej oraz technologii UWB do identyfikacji i lokalizacji obiektów na potrzeby walidacji algorytmów w podsystemach ADAS" (przez systemy ADAS rozumie się tutaj zaawansowane systemy wspomagania kierowcy, z ang. Advanced Driver Assistance Systems). Postawiona hipoteza badawcza dotyczy nowego aspektu związanego z lokalizacją obiektów w automatyce pojazdowej w oparciu o technologię UWB. Hipoteza badawcza jest wyrażona w sposób jasny i nie zawiera wewnętrznych sprzeczności. Teza główna jest sformułowana dosyć ogólnie, dlatego też Autor ją uszczegóławia formułując trzy tezy cząstkowe. W celu weryfikacji oraz sprawdzenie poprawności postawionej tezy badawczej Autor stawia sobie za cel pracy opracowanie systemu lokalizacji i identyfikacji infrastruktury drogowej na potrzeby walidacji algorytmów będących częścią zaawansowanych systemów wspomagania kierowcy.

**Stwierdzam, że spełnione są warunki poprawności hipotezy badawczej. Hipoteza badawcza jak i główny cel rozprawy są sformułowane w sposób jednoznaczny oraz umożliwiający ich weryfikację za pomocą mierzalnych wskaźników. W kontekście aktualnych trendów rozwojowych obowiązujących w branży motoryzacyjnej, przedstawiona teza i cel są ważnym elementem rozwoju zaawansowanych systemów wspomagania kierowcy odpowiadającym na zapotrzebowania rynku.**

## IV. Ocena poprawności struktury rozprawy

Rozprawa doktorska składa się z siedmiu głównych rozdziałów, w tym wstępu oraz spisu literatury, zajmujących łącznie 122 strony. Na końcu pracy Autor umieścił wykaz skrótów oraz spis rysunków i tabel. Pierwszy rozdział zawiera zwięzłe wprowadzenie w zagadnienie badawcze będące przedmiotem dysertacji oraz formułuje tezy i cel pracy. Rozdział drugi stanowi przegląd aktualnego stanu wiedzy w zakresie pozycjonowania oraz charakteryzuje technologię UWB pod tym kątem. W rozdziale trzecim została opisana procedura przetwarzania danych pozyskanych z systemu UWB,

w szczególności zostały przedstawione sposoby filtracji wstępnej, filtracji adaptacyjnej, filtracji opartej na logice rozmytej oraz został opisany algorytm trilateracji umożliwiający wyznaczenie pozycji i orientacji pojazdu. W kolejnym rozdziale przedstawiono wyniki oraz analizę ilościową i jakościową mające na celu weryfikację eksperymentalną przedstawionych bloków funkcjonalnych w łańcuchu przetwarzania danych. Rozdział piąty opisuje sposoby wykorzystania transmisji UWB do identyfikacji obiektów i elementów infrastruktury drogowej. W rozdziale tym Autor zaproponował zarówno strukturę komunikatów jak również opisał wyniki eksperymentalne związane z analizą czasów transmisji. Rozdział szósty zawiera podsumowanie, a rozdział siódmy spis literaturowy.

**Kolejność rozdziałów rozprawy doktorskiej jest poprawna i odzwierciedla ona właściwą metodologię prowadzenia badań naukowych, w której po sformułowaniu hipotezy badawczej jest przedstawiony i dokładnie opisany schemat postępowania mający na celu sprawdzenie jej prawdziwości. Weryfikacja postawionej hipotezy badawczej jest przeprowadzana przez szereg eksperymentów, które służą do pozyskania odpowiednich danych. Dane te następnie są przedmiotem analizy jakościowej i ilościowej a jej wyniki są konfrontowane z postawionymi tezami i celem pracy. Proporcje pomiędzy poszczególnymi rozdziałami są właściwe. Praca zawiera również poprawnie sformułowane założenia metodologiczne, w tym właściwy opis metod, technik i wykorzystywanych narzędzi badawczych.**

## V. Ocena znajomości metodologii badań oraz przyjętych i zastosowanych metod badawczych

Metodologia badań opisanych w rozprawie doktorskiej opiera się w głównej mierze na eksperymentach, w których weryfikowany jest ilościowo i jakościowo algorytm lokalizacji i identyfikacji. W eksperymentach Autor wykorzystał moduły DecaWave DWM1000, DWM1001, DWM3000EVB oraz zestawy ewaluacyjne z procesorami STM32. Do referencyjnych pomiarów odległości wykorzystano dalmierz laserowy UNI-I LM80. Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone w różnych warunkach środowiskowych, tj. na zewnątrz i wewnątrz budynku, z przeszkodami i bez przeszkód, ze statycznymi i dynamicznymi obiektami, włączając w to rzeczywisty pojazd samochodowy. Analiza wyników eksperymentalnych została wykonana pod kątem wskaźników jakościowych uwzględniających przede wszystkim dokładność procesu lokalizacji, a w przypadku identyfikacji również czas transmisji danych. Niepewności związane z systemem pomiarowym zostały opisane za pomocą parametrów statystycznych. **Należy zatem stwierdzić, że Autor rozprawy właściwie dobrał metodologię badawczą do rozwiązania postawionego problemu badawczego oraz wykazał się dobrą znajomością metod badawczych zarówno pod względem teoretycznym jak i aplikacyjnym.**

## VI. Ocena stopnia zaawansowania zawartej w rozprawie wiedzy teoretycznej z informatyki i telekomunikacji

Rozprawa doktorska ma w przeważającym stopniu charakter koncepcyjno-aplikacyjny, gdzie nabyta przez Autora rozprawy wiedza teoretyczna z zakresu systemów pomiarowych oraz telekomunikacyjnych sieci komunikacyjnych została wykorzystana do opracowania systemu lokalizacji i identyfikacji w oparciu o technologię UWB. **W tym kontekście stopień zaawansowania zawartej w rozprawie wiedzy teoretycznej z dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja należy ocenić jako zadowalający i wystarczający z punktu widzenia rozwiązywanego problemu badawczego. Problem badawczy będący przedmiotem rozprawy doktorskiej jest poprawnie zdefiniowany przy wykorzystaniu właściwego formalizmu stosowanego w systemach pomiarowych i telekomunikacyjnych. Schematy komunikacyjne oraz przetwarzania danych wejściowych**

**uzyskanych z systemu UWB są poprawne i czytelne. Autor stosuje właściwą nomenklaturę, poprawnie definiuje wskaźniki jakościowe, przeprowadza eksperymenty w sposób umożliwiający uzyskanie miarodajnych wyników niezbędnych do weryfikacji postawionych hipotez badawczych.**

**VII. Ocena umiejętności poprawnego przedstawienia uzyskanych przez doktoranta wyników**

**Autor rozprawy przykłada wystarczająco dużo uwagi do poprawnej weryfikacji przyjętych hipotez i zakładanego celu badawczego. Wnioski wynikające z analizy uzyskanych wyników eksperymentalnych są przedstawione w sposób jasny i zrozumiały.** Zestawienie wyników w postaci tabel, schematów i rysunków jest dodatkowo opisywane i wyjaśniane w tekście rozprawy, co miejscami jest dobrą praktyką, ze względu na ich wielowymiarowy i wieloaspektowy charakter. Rozdział 4. kończy się zwięzłym podsumowaniem. Podobny schemat byłby korzystny dla pracy także dla rozdziałów 3 i 5. Notacja dotycząca formuł czy też wzorów matematycznych, aczkolwiek intuicyjnie zrozumiała, od strony formalnej wymaga jeszcze doprecyzowania, gdyż w wielu miejscach występują błędy i brak konsekwentności w nazewnictwie zmiennych i funkcji. Podsumowując **stwierdzam, że doktorant opanował w stopniu wystarczającym umiejętność poprawnego przedstawiania wyników badań i opracowywania tekstu technicznego.**

**VIII. Ocena formalnej strony rozprawy**

**Rozprawa doktorska jest w przeważającej mierze napisana staranie, poprawnie pod względem językowym i stylistycznym.** Błędy i uchybienia zauważone podczas czytania pracy zostały opisane w uwagach szczegółowych. Uchybienia te są związane m.in. z formatowaniem tekstu, interpunkcją, stylistyką zdań i redakcją tekstu. **Przedstawiony przez Autora układ pracy jest jednak logiczny i przejrzysty. Recenzent nie zauważył podczas czytania pracy większych i systematycznych błędów. Przypisy, tabele, wykresy oraz bibliografia są sporządzone prawidłowo**.

**IX. Ocena znajomości, doboru, analizy i interpretacji wykorzystywanych w rozprawie źródeł literaturowych**

Spis literaturowy obejmuje w sumie 109 pozycji, gdzie 48 stanowią artykuły opublikowane w czasopismach, 30 to materiały konferencyjne, 19 to materiały elektroniczne w tym odwołania do stron internetowych, 4 to pozycje książkowe, 7 to rozdziały w pozycjach książkowych. Przegląd literatury w kontekście postawionych hipotez i celu badawczego jest zawarty w rozdziale drugim. Autor rozprawy poprawnie też odwołuje się do źródeł literaturowych w kolejnych rozdziałach pracy. W spisie literatury w kilku miejscach brakuje danych bibliograficznych (np. wydawnictwa, nazwy czasopisma, informacji o autorach), dla niektórych pozycji są odwołania do platformy ResearchGate zamiast to oryginalnego źródła, z którego te pozycje pochodzą. Należy nadmienić, że **spis literatury zawiera pozycje stosunkowo nowe, przeważająca ich ilość obejmuje okres ostatnich 12 lat** (84 pozycji zostało opublikowanych po roku 2009). **Przedstawiony przez Autora spis literatury należy uznać za obszerny i reprezentujący obecny stan wiedzy.**

W spisie literatury znajdują się 8 pozycji, w których jednym z wyszczególnionych autorów jest Autor recenzowanej pracy doktorskiej. Publikacje Autora rozprawy przedstawione w spisie pochodzą z okresu od 2018 do 2022 roku. Pięć z nich to publikacje w recenzowanych międzynarodowych czasopismach (*International Journal of Electronics and Telecommunications, Journal of Control Engineering and Applied Informatics, Journal of Physics: Conference Series, Bulletin of the Polish*

*Academy of Sciences: Technical Sciences, Journal of Communications*), dwie pozycje to rozdziały w książkach i jedna praca została opublikowana w materiałach konferencyjnych (*14th International Conference on Advanced Trends in Radioelecrtronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*). Te pozycje pokrywają się z tematyką pracy.

## X. Wskazanie oryginalnych osiągnięć

Autor rozprawy w ramach realizacji postawionego celu badawczego uzyskał nowe, oryginalne i wyróżniające rezultaty, do których zaliczam:

**(1) Opracowanie mechanizmu przetwarzania danych pozyskanych z systemu UWB m.in. w oparciu o filtrację adaptacyjną oraz metody logiki rozmytej w celu uzyskania dokładnej informacji na temat pozycji oraz orientacji pojazdu;**

**(2) Eksperymentalną weryfikację wraz z analizą ilościową i jakościową wykorzystania technologii UWB do zadania lokalizacji i identyfikacji obiektów oraz elementów infrastruktury drogowej w procesie projektowania i walidacji zaawansowanych systemów wspomagania kierowcy w branży motoryzacyjnej;**

**(3) Koncepcję jednoczesnej lokalizacji i identyfikacji obiektów z wykorzystaniem transmisji bezprzewodowej UWB.**

## XI. Uwagi i komentarze

Po przeczytaniu rozprawy doktorskiej nasuwają się następujące uwagi ogólne:

(1) Elementem podsumowującym i wieńczącym prace badawczo-rozwojowe przeprowadzone przez Autora byłoby określenie poziomu dokładności (w postaci jednej wartości) systemu pozycjonowania pojazdu w oparciu o technologię UWB. Po przeczytaniu pracy trudno jest obecnie wywnioskować o jakiej klasie pomiarowej można tutaj mówić.

(2) W pracy brakuje szczegółów implementacyjnych związanych z uruchomieniem algorytmów przetwarzaniach danych na platformach sprzętowych, w szczególności informacji o złożoności obliczeniowej, wymaganych zasobach sprzętowych i programowych.

(3) Istotną informacją z punktu widzenia jakości systemu lokalizacji jest określenie sposobów rozmieszczenia kotwic i znaczników na pojeździe. Jest oczywiste, że można to zrobić na wiele różnych sposobów. Stąd powstaje pytanie o wytyczne związane z umieszczaniem poszczególnych nadajników i odbiorników na obiektach i elementach infrastruktury drogowej.

Podczas czytania pracy nasunęły się następujące uwagi szczegółowe:

(1) Strona 1: zamiast anglojęzycznego określenia 'processing' lepiej użyć polskiego odpowiednia 'przetwarzanie';

(2) Strona 5: jest '... w oparciu na poniższych tezach...', powinno być '... w oparciu o poniższe tezy ...';

(3) Strona 5: nie jest jasne zdanie dotyczące zastosowania technologii UWB w postaci lokalnego układu odniesienia (raczej trudno odnieść technologię do układu odniesienia);

(4) Strona 13: tabela 1 rozciąga się na trzy strony co sprawia, że jest ona mało czytelna - dodanie nagłówków na każdej stronie i skondensowanie treści poprawiłoby jej odbiór;

(5) Strona 19: jest ' ... m.in. W Stanach Zjednoczonych', powinno być '... m.in. w Stanach Zjednoczonych';

(6) Strona 21: zdanie 'Niektóre systemy natomiast ...' jest stylistycznie niepoprawne;

(7) Strona 23: w zdaniu 'Proces wymiarowania ...' brakuje orzeczenia;

(8) Strona25: zamiast 'branży automotive' lepiej napisać 'branży motoryzacyjnej';

(9) Strona 27: nie jest jasne co oznaczają 'systemy napojazdowe';

(10) Strona 28: zamiast przecinka w sformułowaniu '... potencjał implementacyjny, Jednak jego ...' powinna być kropka;

(11) Strona 29: dobrze by było wyjaśnić znaczenie poszczególnych symboli we wzorach (3), (4), (5), (6) i (7);

(12) Strona 29: 'max' powinno się pisać czcionką prostą;

(13) Strona 30: jest '... dokonana w sposób statyczny', powinno być '... dokonana w sposób statystyczny';

(14) Strona 32: na rys. 8 określenie 'Ultrasound' powinno się zamienić na 'Ultradźwięki' lub 'Czujniki ultradźwiękowe';

(15) Strona 33: jest '... miejskiej przedstawiony został', powinno być '... miejskiej przedstawiona została';

(16) Strona 34: na schemacie blokowym na rys. 9 nie ma zaznaczonego bloku A;

(17) Strona 36: dobrze by było sprecyzować co na rys. 10 jest kotwicą, a co znacznikiem;

(18) Strona 37: na początku rozdziału jest informacja, że filtr z kroczącym oknem jest konieczny w filtracji wstępnej, tymczasem z rys. 9 wynika, że jest on opcjonalny;

(19) Strona 37: '+1' powinno stanowić indeks dolny w oznaczeniu $x_i \leq x_i + 1$;

(20) Strona 38: nie jest jasne jak wygląda macierz sąsiedztwa 'MN';

(21) Strona 43: opis tabeli 4 sugeruje, że można w niej znaleźć wartości błędu, tymczasem znajdują się tam procenty odległości referencyjnej;

(22) Strona 44: nie jest jasne w jaki sposób powstał wykres przedstawiony na rys. 13 na podstawie danych zawartych w tabeli 4;

(23) Strona 46: nie jest opisana oś pionowa na rys. 15;

(24) Strona 51: jeżeli $R_k$ jest zbiorem, to równanie (29) jest niepoprawne;

(25) Strona 55: znak transpozycji powinno się pisać czcionką prostą;

(26) Strona 59: jest błąd w drugim równaniu we wzorze (5), zamiast drugiej potęgi jest symbol 's';

(27) Strona 62: nie jest wyjaśnione skąd wziął się wzór (53);

(28) Strona 72: jest '... korekty została zastosowana', powinno być '... korekty został zastosowany';

(29) Strona 76: nie jest jasne zdanie 'W pierwszej kolejności funkcje generowane były automatycznie w sposób liniowy' (co to znaczy w przypadku funkcji?);

(30) Strona 79: w tabeli 26 błąd powinien być chyba wyrażony w cm a nie w mm;

(31) Strona 84: dobrze by było wyjaśnić skąd na rys. 35 tak dużo wartości odstających;

(32) Strona 85: błąd stylistyczny w zdaniu '... zastosowanie filtracji pozwoliło na wygładzenie otrzyma.';

(33) Strona 87: jest 'Wyznaczenie tego wypływu', powinno być 'Wyznaczenie tego wpływu';

(34) Strona 89: rys. 39 powinien być tabelą; podobnie rys. 40;

(35) Strona 91: 'Porównanie czasowe transmitowanych danych zostanie przedstawione w rozdziale 0' – gdzie można znaleźć ten rozdział?

(36) Strona 96: jest 'Zakład się, ...', powinno być 'Zakłada się, ...';

(37) Strona 98: jest 'Trzecia ramka danych ...', powinno być 'Druga ramka danych ...';

(38) Strona 99: nie jest jasne dlaczego oznaczenia czasów w tabeli 32 są czcionką pogrubioną;

(39) W wielu miejscach występująca błędy interpunkcyjne, np. brakuje często przecinka przed słowem 'który';

(40) Wzory matematyczne powinny stanowić logiczną część zdania, co oznacza, że poprzedzające zdanie nie powinno się kończyć kropką. Jeżeli po wzorze są wyjaśniane używane w nim symbole, to wzór powinien kończyć się przecinkiem i słowo 'gdzie' pisane z małej litery powinno rozpoczynać kolejną linię tekstu.

(41) We wzorach matematycznych operacja mnożenia jest oznaczana jako '$*$', czasami jako '$\cdot$', a czasami symbol operacji jest pomijany. Tutaj dobrze by było zachować konsekwentność w notacji.

## XII. Ocena ogólna i wnioski końcowe

**Stwierdzam, że sformułowany przez Autora cel pracy został osiągnięty, a postawiona teza rozprawy udowodniona. Rozprawa doktorska stanowi zwartą i przemyślaną całość. Autor w sposób zrozumiały przedstawia zasadnicze rezultaty rozprawy, które poparte są dobrze udokumentowanymi wynikami eksperymentalnymi. Struktura wewnętrzna pracy, logiczna kolejność poszczególnych rozdziałów i podrozdziałów oraz powołania literaturowe są poprawne. Stosowane w pracy nazewnictwo i oznaczenia są generalnie poprawne, zgodne z ogólnie przyjętymi**

**zasadami w specjalistycznej literaturze z obszaru informatyki technicznej i telekomunikacji. Praca jest napisana poprawnie redakcyjnie. Podkreślam charakter praktyczny pracy oraz potencjał aplikacyjny uzyskanych wyników.**

**Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Krzysztofa Hanzla spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w obowiązujących przepisach.**

**Wnoszę o przyjęcie rozprawy oraz jej dopuszczenie do publicznej obrony.**