

## Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra inż. Pawła Markiewicza

pt. **Research and development of occupancy grid fusion for automotive applications**

przygotowanej w dziedzinie nauk technicznych (dyscyplina: informatyka techniczna i telekomunikacja)

pod kierunkiem promotorów: dra hab. inż. Romana Starosolskiego (prof. PŚI) oraz dra hab. inż. Pawła Skrucha (prof. AGH)

Podstawa prawna: Recenzja została przygotowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Śląskiej, prof. dra hab. inż. Andrzeja Polańskiego, na podstawie Uchwały nr 55/2022 w/w Rady z dnia 13.09.2022 r.

### 1. Przedmiot, charakter i zakres rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy próby rozwiązania praktycznego problemu zautomatyzowanego tworzenia i fuzji tzw. siatek zajętości (ang. *occupancy grids*) oraz ich wirtualnej walidacji na podstawie syntetycznych lub zmierzonych danych wyjściowych zestawu sensorów pokładowych stosowanych w systemach bezpieczeństwa i percepcji maszynowej inteligentnych pojazdów samochodowych. Praca ma charakter badawczo-rozwojowy; została przygotowana w ramach doktoratu wdrożeniowego, z myślą o przyszłym wykorzystaniu wyników badań w ramach działalności firmy Aptiv zajmującej się automatyzacją i autonomizacją pojazdów samochodowych.

Rozprawa doktorska przedstawia oryginalną architekturę systemu tworzenia, fuzji i walidacji jakości siatek zajętości w dwóch trybach pracy: z danymi pochodzącymi ze scenariuszy symulowanych w środowisku wirtualnym oraz z danymi zarejestrowanymi przez rzeczywiste sensory pokładowe podczas ruchu fizycznego pojazdu. Zasadniczymi składowymi funkcjonalnymi zaproponowanego systemu są: podsystem generowania danych sensorycznych (syntetycznych lub poprzez emulację działania systemu sensorycznego pojazdu) oraz informacji odniesienia do celów walidacyjnych, podsystem przygotowania siatek składowych wykorzystujący nowo opracowany i opatentowany (w trakcie realizacji pracy) model odwrotny sensora typu lidar lub radar, podsystem łączenia (tj. fuzji) informacji zawartych w siatkach składowych z uwzględnieniem niepewności danych, a także podsystem oceny jakości siatek wynikowych (uzyskanych po procesie fuzji) w kontekście możliwości generowania na ich podstawie zautomatyzowanych decyzji o zajętości obszarów siatki i tym samym o obecności potencjalnych przeszkód w otoczeniu pojazdu.

Poza prezentacją proponowanej architektury systemu, rozprawa zawiera opis oryginalnej metody interpretacji danych sensorycznych stosując tzw. jednowymiarowy (1D) model odwrotny sensorów, opis zaproponowanych algorytmów fuzji informacji percepcyjnej, opis szeregu wskaźników jakości zastosowanych do ilościowej oceny skuteczności działania algorytmów fuzji, opis oprzyrządowania pojazdu testowego firmy Aptiv przygotowanego i wykorzystanego do realizacji prac badawczych omawianych w rozprawie, a także wyniki walidacyjne zaproponowanego systemu zautomatyzowanej percepcji dla dwóch scenariuszy drogowych i jednego scenariusza detekcji niezajętych miejsc parkingowych znajdujących się w ustrukturyzowanym obszarze izolowanym. W przypadku scenariuszy drogowych, syntetyczne dane percepcyjne były generowane w środowisku wirtualnym, natomiast w przypadku scenariusza parkingowego dane pochodziły z rzeczywistych sensorów pokładowych testowego pojazdu firmy Aptiv. Wyniki uzyskane w rozprawie poddano ocenie jakościowej oraz ilościowej. Wybrane metody przetwarzania danych, analizowane w rozprawie, poddano dodatkowej weryfikacji w kontekście wymagań czasowych obliczeń numerycznych realizowanych na komputerze klasy PC z wykorzystaniem systemu ROS (ang. *robot operating system*).

Tematyka rozprawy porusza aktualne i ważne zagadnienie projektowania i testowania - w warunkach powtarzalnych i kontrolowanych - systemów percepcji pojazdów inteligentnych i autonomicznych. Opracowanie skutecznej metody łączenia informacji pochodzących z różnych źródeł, a także wiarygodnej metodyki walidacji systemów wykorzystujących takie metody wydaje się nieodzowne do uzyskania powszechnie akceptowalnych

rozwiązań komercyjnych, spełniających wysokie wymagania niezawodnościowe nakładane na systemy krytyczne ze względów bezpieczeństwa (ang. *safety-critical systems*). Rozprawa dotyczy praktycznego zastosowania technik związanych zarówno z ekstrakcją, przetwarzaniem, jak i zautomatyzowaną interpretacją niepewnej informacji pochodzącej z różnych źródeł sensorycznych pracujących w sieciowym systemie pomiarowo-obliczeniowym. W tym kontekście tematyka rozprawy z pewnością wpisuje się w szeroki zakres dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja, choć warto również zauważyć istotną tematyczną zbieżność z obszarem automatyki i robotyki.

## 2. Kompozycja i zawartość rozprawy

Rozprawa została zredagowana w języku angielskim i liczy 133 strony numerowane. Tekst rozprawy rozpoczyna streszczenie w języku angielskim, powtórzone następnie w języku polskim. Spis treści wskazuje na pięć zasadniczych rozdziałów pracy, po których podano: bibliografię zawierającą 96 pozycji literatury, spis akronimów oraz spis symboli matematycznych zastosowanych w treści pracy, a także spis rysunków i tabel zawartych w rozprawie.

Rozdział 1 prezentuje organizację pracy, uzasadnia znaczenie podjętego tematu, wyjaśnia cel i podaje tezę rozprawy, a także wyszczególnia elementy składające się na oryginalny wkład Autora rozprawy.

Rozdział 2 jest poświęcony przeglądowi wybranych systemów wparcia kierowców stosowanych w samochodach osobowych (tzw. *advanced driver assistance systems*), głównie związanych z komfortem i bezpieczeństwem podróży, takich jak np. *autonomous emergency braking* (AEB), *automatic emergency steering* (AES), *lane keeping aid* (LKA), *active cruise control* (ACC), *forward collision warning* (FCW) i innych. Ponadto, w rozdziale 2 podano przegląd rozwiązań z obszaru zaawansowanej technologii sensorycznej (radarowej, wizyjnej i laserowej) stosowanej obecnie w pojazdach do celów inteligentnej percepcji. Dokonano jakościowego porównania różnych technologii sensorycznych w tablicy na stronie 34. Następnie opisano metodykę tworzenia siatek zajętości (z uwzględnieniem stochastycznej niepewności danych pomiarowych) oraz dokonano przeglądu architektur i algorytmów fuzji informacji zawartej na siatkach składowych. W drugiej części rozdziału 2 (tj. począwszy od punktu 2.4) Autor wyjaśnia oraz uzasadnia główne techniki weryfikacyjne i założenia metodyczne zastosowane w dalszej części pracy, w szczególności: koncepcję wirtualnej walidacji systemów percepcji z wykorzystaniem danych syntetycznych, architekturę systemu informatycznego, komunikacyjnego i strukturę oprogramowania zastosowane w testowym pojeździe firmy Aptive, a także strukturę systemu HIL (ang. *hardware in the loop*) zastosowaną do celów emulacji w trybie off-line procesu pozyskiwania danych pomiarowych z rzeczywistego pojazdu do celów powtarzalnego testowania metod fuzji siatek zajętości. Powołano się tutaj na znany z literatury schemat systemowego podejścia do procesu weryfikacji i walidacji złożonych systemów inżynierskich (tzw. *V-model*), powszechnie stosowany m.in. w przemyśle samochodowym. Poza tym podano definicje wskaźników jakości służących do ilościowej oceny jakości działania proponowanego systemu percepcji, omówiono zaplanowane scenariusze pomiarowe oraz założenia związane z liczbą, rodzajem i sposobem umieszczenia sensorów na pokładzie pojazdu.

Zasadnicze wyniki badań zawarto w rozdziałach 3 i 4. W rozdziale trzecim na stronie 73 podano architekturę systemu wirtualnej walidacji, wyjaśniono oryginalną metodę odwrotnego modelowania sensora typu radar lub lidar uwzględniającą probabilistyczny charakter danych pomiarowych, zaprezentowano ogólną architekturę fuzji informacyjnej stosowaną do danych pochodzących z grupy sensorów pokładowych, zdefiniowano zestaw 13 (w tym kilku autorskich) alternatywnych metod i odpowiadających im architektur fuzji podlegających ocenie porównawczej, a także wyjaśniono metodykę oceny porównywanych fuzji z wykorzystaniem wprowadzonych wcześniej wskaźników jakości. Wyniki obliczeń i przeprowadzonych testów porównawczych zawarto w rozdziale 4, gdzie zaprezentowano wynikowe obrazy ilustrujące zdetektowane obiekty w wirtualnej przestrzeni roboczej pojazdu oraz wartości wskaźników jakości uzyskane dla 13 analizowanych metod i architektur fuzji. W przypadku scenariusza detekcji miejsc parkingowych na podstawie danych pochodzących z rzeczywistych sensorów zaprezentowano zasadniczo wyniki jakościowe w postaci graficznej, uzupełnione o ilościowe wyniki czasów obliczeń podane dla trzech wybranych (wg Autora najskuteczniejszych) metod fuzji.

Główną treść rozprawy zamyka rozdział 5 zawierający podsumowanie, wnioski końcowe oraz komentarze na temat potencjalnych praktycznych zastosowań uzyskanych wyników.

Bibliografia podana na stronach 109-120 jest dość obszerna i nawiązuje do prac tematyczne związanych (lub ściśle związanych) z przedmiotem rozprawy, w tym do prac zawierających wyniki będące fundamentem metod i technik zastosowanych w pracy, co może świadczyć o dobrych podstawach merytorycznej wiedzy Doktoranta.

### 3. Ocena zawartości rozprawy, zastosowanej metodyki badawczej i uzyskanych wyników

W rozprawie Doktorant przedstawił autorską propozycję mechanizmu tworzenia i fuzji siatek zajętości dla podsystemu percepcji oraz architekturę układu wirtualnej walidacji takiego podsystemu wykorzystującego mechanizm fuzji dla danych syntetycznych (pochodzących ze środowiska wirtualnego) lub danych pomiarowych pochodzących z zestawu sensorów pokładowych pojazdu samochodowego (schemat funkcjonalny układu walidacji podano na stronie 73, rys. 3.1, uzupełniony układem typu HIL (ang. *hardware-in-the-loop*) podanym na stronie 61, rys. 2.36). Do celów badawczych Doktorant wykorzystał dedykowane stanowisko eksperymentalne z pojazdem testowym firmy Aptiv, wyposażonym w zestaw czujników radarowych oraz zestaw maszyn obliczeniowych pracujących pod systemem Linux z nakładką ROS (ang. *robot operating system*) i połączonych z podsystemem sensorycznym siecią komunikacyjną. Ponadto Autor zaproponował uproszczoną metodę odwrotnego modelowania sensora typu radar/lidar do celów tworzenia siatek zajętości. Metoda ta zyskała akceptację urzędu patentowego we Francji (numer patentu: FR3097972B1). Wspomniane wyżej elementy uważam za składowe zasadniczego oryginalnego wkładu Doktoranta w rozwiązanie problemu badawczego, który został sformułowany w postaci tezy rozprawy na stronie 9 (linie 3-6 od góry).

Koncepcję architektury systemu walidacji algorytmów percepcji dla danych syntetycznych i danych pomiarowych, uważam za zasadną z praktycznego punktu widzenia. Umożliwia ona zapewnienie powtarzalności eksperymentów w kontrolowanych scenariuszach drogowych, daje możliwość walidacji systemu percepcji w trybie off-line, z wykorzystaniem większej mocy obliczeniowej komputera (w stosunku do możliwości pokładowych komputerów umieszczonych na pojeździe), a także umożliwia łatwą i szybką modyfikację elementów systemu percepcji i ich walidację dla tych samych danych weryfikacyjnych. Modelowanie działania sensorów pokładowych (punkt 3.1.2), uwzględniające niepewność pomiarową poprzez wstępne przetworzenie syntetycznych danych generowanych w środowisku wirtualnym, uważam za kluczowy element zaproponowanej architektury zapewniający wymagany poziom realizmu warunków pomiarowych, który przybliży walidację wirtualną do walidacji wykonywanej dla danych rzeczywistych. Znaczenie wykorzystania takiego systemu w praktyce wydaje się istotne. Z jednej strony możliwość wykorzystania danych syntetycznych generowanych przez środowisko wirtualne umożliwia realizację złożonych scenariuszy drogowych, których fizyczna realizacja jest albo niemożliwa, albo jest zbyt kosztowna w warunkach praktycznych. Z drugiej strony wykorzystanie architektury, w której komputer PC emuluje zachowanie rzeczywistego systemu sensorycznego pojazdu (schemat HIL ze strony 61) umożliwia bezpieczną walidację podsystemu percepcji bez konieczności długotrwałej eksploatacji rzeczywistego pojazdu, co ma znaczenie zarówno ze względów bezpieczeństwa, jak i ze względów ekonomicznych i ekologicznych. Ponadto walidacja systemów krytycznych ze względu na bezpieczeństwo, a takimi są podsystemy percepcyjno-decyzyjne w pojazdach autonomicznych, wymaga długotrwałych kampanii testowych wykonywanych dla bardzo dużej liczby serii danych w różnych scenariuszach drogowych; zaproponowana architektura umożliwia realizację takich kampanii w kontrolowanych warunkach i stosunkowo niewielkim kosztem. Opatentowana przez Doktoranta metoda uproszczonego odwrotnego modelowania sensora typu radar/lidar (opisana w punkcie 3.2) może prowadzić do zwiększenia szybkości przetwarzania i interpretacji danych niepewnych pochodzących z sensorów pokładowych, i tym samym umożliwić zwiększenie częstotliwości aktualizacji informacji oraz wyznaczania decyzji sterujących w czasie rzeczywistym na pokładzie inteligentnego pojazdu. Takie zwiększenie częstotliwości wypracowywania decyzji sterujących może mieć kluczowe znaczenie dla poziomu bezpieczeństwa w szybkozmiennym środowisku ruchu.

Wybór testowanych architektur i metod fuzji, w tym zaproponowanych wersji autorskich, zebranych w tabeli 3.1 na stronie 89 wynika w mojej opinii z przesłanek użytkowych, jako próba znalezienia *najkorzystniejszego* narzędzia praktycznego, co jest akceptowalnym podejściem praktycznym. Jednak brak przekonującego uzasadnienia merytorycznego takiego a nie innego wyboru architektur i metod (na zasadzie studium przypadku) czyni ten wybór z założenia heurystycznym. Miarodajne porównanie heurystycznie wybranych metod wymaga

wiarygodnej weryfikacji statystycznej w realistycznych scenariuszach ruchu pojazdu. Niestety w recenzowanej rozprawie brakuje prezentacji wyników statystycznych wiarygodnie ilustrujących poziom niezawodności rozważanych metod tworzenia i fuzji siatek zajętości dla przypadku różnych scenariuszy drogowych/parkingowych, z wykorzystaniem danych zbieranych w różnych warunkach pomiarowych (tj. przy różnym poziomie niepewności danych). Wspomniany brak należy do słabych stron rozprawy. Przykładowe wyniki przedstawione w rozdziale 4 dotyczą zaledwie dwóch scenariuszy drogowych i jednego scenariusza parkingowego. Nie jest w pełni jasne, dlaczego ograniczono się tylko do tych trzech scenariuszy i dlaczego scenariusze drogowe zostały wybrane tak, a nie inaczej. Zaprezentowane wyniki potwierdzają, co prawda, tezę rozprawy, jednak nie pozwalają jednoznacznie stwierdzić jakiego poziomu skuteczności i niezawodności walidowanych metod można się spodziewać w różnych warunkach pomiarowych. Praktyczne wykorzystanie jakichkolwiek metod czy technik operujących na danych niepewnych w systemach krytycznych ze względu na bezpieczeństwo wymaga wykonania tego typu badań statystycznych. W konsekwencji zaproponowane rozwiązanie można na obecnym etapie traktować tylko jako demonstrator technologii potwierdzający jedynie potencjalną użyteczność (i tym samym zasadność przyjęcia) zaproponowanej architektury systemu (ang. *proof-of-concept*).

Podsumowując uwagi dotyczące znaczenia tematyki i zawartości rozprawy należy stwierdzić, że rozwiązanie zaproponowane przez Doktoranta dobrze wpisuje się w aktualne trendy rozwojowe w zakresie automatyzacji lub autonomizacji pojazdów samochodowych oraz w potrzeby narzędziowe firm technologicznych, takich jak firma Aptiv, działających w tym obszarze. Wybrane wyniki zawarte w rozprawie zostały opublikowane w dwóch anglojęzycznych artykułach o zasięgu międzynarodowym, których pierwszym autorem jest osoba Doktoranta (prace cytowane w rozprawie jako [50] i [51]). Fakt ten wypełnia wymagania ustawowe stawiane osobom ubiegającym się o pierwszy stopień naukowy.

Analiza metodyki badawczej zastosowanej w rozprawie i wyników przedstawionych w rozdziale 4 skłania do sformułowania następujących komentarzy i pytań wyjaśniających:

- (a) Ilościowe wyniki porównawcze zawarte na rys. 4.3 (strona 98) nie wskazują jednoznacznie, który z algorytmów przetwarzania byłby preferowany spośród walidowanego zbioru metod. Jakże zatem zasadnicze wnioski można wyciągnąć z zestawienia wyników walidacji podanych na rysunku 4.3? Czy zastosowane miary jakości pozwalają na jednoznaczną ocenę porównawczą i wyciągnięcie użytecznych wniosków o skuteczności analizowanych algorytmów w zastosowaniach zautomatyzowanej percepcji samochodowej? Dlaczego nie wykonano testów statystycznych porównywanych (pomimo dostępności wirtualnego środowiska do generacji danych)? W jakim sensie podane przykładowe wyniki na stronie 98 (ang. *case study*) i wnioski wyprowadzone na ich podstawie można traktować jako miarodajne?
- (b) Jak rozdzielczość siatki zajętości (tj. rozmiar komórki siatki np. z rys. 3.8) wpływa na jakość wynikowej siatki zajętości. Jaki jest sposób wyboru rozmiaru komórki siatki i czy jest to parametr projektowy, który mógłby być dodatkowym elementem brany pod uwagę w procesie walidacji metod tworzenia i fuzji siatek? Jak aproksymacja poczyniona we wzorze (3.15) na stronie 80 (dotyczy opatentowanej metody odwrotnego modelowania sensora) wpływa na jakość wynikowej siatki zajętości w kontekście skuteczności wykrywania przeszkód w otoczeniu pojazdu?
- (c) Ocena wyników podanych graficznie na rys. 4.5 (strona 103) ma charakter subiektywny (ocenia ekspert, w tym przypadku Autor rozprawy). Dlaczego nie podano tutaj wyników zautomatyzowanej oceny ilościowej? Czy powodem był brak dokładnych danych odniesienia (ang. *ground truth*)?
- (d) Pojazd użyty do akwizycji pomiarów był wyposażony w komputery pokładowe klasy PC pracujące pod systemem operacyjnym Linux, z oprogramowaniem ROS, które nie są systemami czasu rzeczywistego. Taka konfiguracja oprogramowania nie gwarantuje zatem dokładnej synchronizacji czasowej pomiarów sensorycznych i może wpływać na wynik interpretacji danych, a co za tym idzie na jakość wynikowych siatek zajętości. Czy brak systemu twardego czasu rzeczywistego (RTOS) miał istotny wpływ na jakość tworzenia i fuzji siatek zajętości i czy wymuszenie stosunkowo niewielkiej prędkości ruchu pojazdu testowego (10 km/h, strona 101) podczas akwizycji danych w scenariuszu parkingowym było podyktowane właśnie brakiem pełnej synchronizacji, czy przyczyna była inna? Czy czasy odczytane w systemie operacyjnym nie będącym RTOS i zaprezentowane w nieopisanej tabelicy na stronie 104 są wiarygodne w

kontekście podanej bardzo dużej rozdzielczości odczytu (nanosekundy)?

- (e) Na stronie 76 Doktorant wspomina, że zastosowanie autorskiego modelu odwrotnego sensora może prowadzić do zwiększenia wyników typu FN (ang. *false negative*), co wydaje się istotną wadą w systemach krytycznych ze względu na bezpieczeństwo. Zatem czy pomimo powyższego ograniczenia praktyczne wykorzystanie opatentowanego sposobu modelowania sensora w systemach percepcji pojazdów jest uzasadnione? Jeżeli tak, to jakie warunki muszą być spełnione, aby wykorzystanie tej metody modelowania zapewniało wymagany stopień bezpieczeństwa pojazdu i jego otoczenia?
- (f) Złożoność przyjętych dwóch testowych scenariuszy drogowych (rys. 2.40 i 2.41 na stronach 67-68) wydaje się stosunkowo niska (scenariusz 1: prosta i szeroka droga szybkiego ruchu z dwoma pojazdami w otoczeniu, scenariusz 2: prosta i szeroka droga szybkiego ruchu z pojedynczym rozgałęzieniem prawoskrętnym i dwoma pojazdami w otoczeniu). Czy zaproponowane i analizowane metody tworzenia i fuzji siatek zajętości mogą być skutecznie stosowane także w bardziej złożonych scenariuszach drogowych, gdzie występuje większe zatłoczenie środowiska ruchu, gdzie prędkość pojazdu (tzw. *ego-vehicle*) jest zmienna, a profil drogi nie jest prostoliniowy?
- (g) W rozdziale 5 Autor krótko nadmienia o *ograniczeniach* zaproponowanej architektury (strona 107), bez rozwijania tego ważnego zagadnienia. Proszę bardziej szczegółowo wyjaśnić te ograniczenia, szczególnie w kontekście praktycznej użyteczności zaproponowanego rozwiązania w pojazdach inteligentnych.

Pomimo stosunkowo licznie cytowanej bibliografii, tematycznie zgodnej z treścią rozprawy, jej analiza wymaga kilku komentarzy. Badawczo-rozwojowy charakter recenzowanej rozprawy może uzasadniać fakt, że większość odniesień literaturowych dotyczy artykułów konferencyjnych, dokumentacji technicznej, raportów technicznych oraz norm w porównaniu z liczbą cytowanych artykułów naukowych. Nieco dziwi jednak nadmierne (w opinii recenzenta) powoływanie się na pracę cytowaną jako [69], która pomimo jej rzetelnego charakteru jest jedynie pracą magisterską; w tym kontekście zasadne byłoby częstsze powoływanie się na bardziej wiarygodne źródła wiedzy (choćby te cytowane w pracy [69]). Pomimo licznych prac naukowych i przeglądowych ukazujących się ostatnio na temat systemów zautomatyzowanej percepcji i systemów wspomaganie kierowców w pojazdach samochodowych, tylko 11 pozycji bibliografii cytowanej przez Doktoranta jest datowane na lata 2020-2022. Duża liczba prac publikowanych obecnie każdego miesiąca nie pozwala na wyczerpujący przegląd literatury w żadnym opracowaniu o rozsądnej objętości. Jednak proste zapytanie wprowadzone przykładowo w renomowanej bazie publikacji IEEE Xplore pozwala na znalezienie ciekawych przykładowych artykułów naukowych ściśle związanych z tematem rozprawy, takich jak np.:

- [A] J.K. Suhr, H.G. Jung: **Sensor Fusion-Based Vacant Parking Slot Detection and Tracking**, IEEE TITS, 2014,
- [B] S.-I. Oh, H.-B. Kang: **Fast Occupancy Grid Filtering Using Grid Cell Clusters From LIDAR and Stereo Vision Sensor Data**, IEEE Sensors J., 2016,
- [C] D. Asljung, J. Nilsson, J. Fredriksson: **Using Extreme Value Theory for Vehicle Level Safety Validation and Implications for Autonomous Vehicles**, IEEE TIV, 2017,
- [D] Y. Yue, P.G.C. Namal Senarathne, C. Yang, J. Zhang, M. Wen, D. Wang: **Hierarchical Probabilistic Fusion Framework for Matching and Merging of 3-D Occupancy Maps**, IEEE Sensors J., 2018,
- [E] X. Zheng, Y. Li, D. Duan, L. Yang, C. Chen, X. Cheng: **Multivehicle Multisensor Occupancy Grid Maps (MVMS-OGM) for Autonomous Driving**, IEEE IoT J., 2022.

Nie jest jasne dlaczego Doktorant, pomimo tak dynamicznego rozwoju tematyki poruszanej w rozprawie, nie zdecydował się na zwiększenie aktualności zbioru cytowanej literatury poprzez odniesienie się choćby do kilku powyższych prac i/lub współczesnej literatury tam przywoływanej. Wartościowym odniesieniem źródłowym w kontekście tematyki recenzowanej rozprawy (niecytowanym przez Doktoranta) może być z pewnością praca pt. **Handbook of Intelligent Vehicles** pod redakcją A. Eskandariana (Springer, London, 2012). Poza tym na stronie 23 nawiązano do kwestii systemów sensorycznych i systemów percepcji stosowanych w pojazdach przegubowych; szkoda, że Doktorant nie odniósł się w tym miejscu do żadnych publikacji na ten temat polskiego środowiska naukowo-inżynierskiego (przykładowo ośrodek poznański opublikował ostatnio takie wyniki). Podobnie na stronie 29 nie ma żadnych cytowań polskich badaczy w zakresie zastosowania sensorów podczerwieni do percepcji

środowiska pojazdów inteligentnych, mimo że w ostatnim czasie opublikowano prace na ten temat autorstwa polskich badaczy. Ignorowanie lub brak świadomości istnienia wyników krajowych w obszarze tematyki rozprawy musi być potraktowane jako zaniedbanie ze strony Autora.

Najsłabszą stroną przedłożonej rozprawy, zdecydowanie obniżającą jej wypadkową ocenę, jest zastosowany układ logiczny i podział treści oraz strona redakcyjna tekstu. W wielu miejscach użycie języka angielskiego (tj. zastosowana terminologia, składnia oraz interpunkcja) budzi konfuzję, co przekłada się na niejasność znaczenia wyrażań, zdań czy wręcz całych akapitów tekstu. Tłumaczenie polskojęzyczne oryginalnego tytułu rozprawy jest mało precyzyjne. W wersji anglojęzycznej tematem pracy są badania i rozwój **operacji fuzji** siatek zajętości, natomiast tytuł w języku polskim wskazuje na badanie i rozwój **metod oceny** siatek zajętości. Znaczenie obu wersji tematu jest zatem nieco inne, co może być mylące dla czytelnika. Recenzent przyjął za obowiązującą wersję anglojęzyczną. Można odnieść wrażenie, że treść rozprawy była pisana bez należytej dbałości o szczegóły, z wprowadzonymi (być może na ostatnią chwilę) nieuporządkowanymi zmianami podziału treści, bez dbałości o poprawne odniesienia do rysunków i wzorów matematycznych, ze skrótami myślowymi naruszającymi w wielu miejscach oczekiwaną logikę wywodu. W rozdziale 2 częściowo spleciono ze sobą treści przywołane z literatury przedmiotu z przyjętymi przez Doktoranta założeniami i oryginalnymi wynikami rozprawy. Tytuł rozdziału 2 (tj. *Background and Methods*) sugeruje, że zawartość tego fragmentu tekstu dotyczy opisu podstaw teoretycznych i aktualnego stanu wiedzy. Jest tak do punktu 2.4 włącznie. Jednak od punktu 2.5 rozpoczyna się opis budowy i architektury stanowiska testowego oraz wybranych założeń i definicji wskaźników jakości związanych z metodyką walidacji, która będzie wykorzystana w dalszej części pracy. Brak spójności przekazu wynikający z takiego pomieszania treści bardzo utrudnia percepcję pracy przez czytelnika i w wielu miejscach wprowadza w konfuzję. Treści zawarte w punktach 2.5 do 2.8 powinny znaleźć się w oddzielnym rozdziale, gdzie w jednym miejscu zebrano by w postaci listy enumeracyjnej wszystkie istotne założenia poczynione przez Autora (kilka takich założeń można znaleźć luźno zamieszczonych w tekście na stronach: 75, 76, 92, 101). Poza tym, Doktorant nie stosuje w rozprawie należytego rygoru matematycznego przy wprowadzaniu i opisie wskaźników jakości, algorytmów modelowania odwrotnego sensorów oraz przy opisie wybranych metod tworzenia i fuzji siatek zajętości. W wielu miejscach Autor stosuje niedopowiedzenia, w wyniku czego czytelnik często musi domyślać się ważnych aspektów merytorycznych. W szczególności należy wspomnieć tutaj brak wyjaśnienia wielu symboli zastosowanych we wzorach lub stosowanie tych samych symboli do opisu różnych wielkości, brak wyprowadzenia wzorów lub choćby stosownego cytowania pracy, w której takie wyprowadzenia można znaleźć. W efekcie moja całościowa ocena rozprawy (pomimo ciekawych rozwiązań zaproponowanych w treści pracy) jest istotnie obniżona. Szczegółowe uwagi na ten temat oraz odniesienia do konkretnych miejsc w rozprawie zawarto w punkcie 4 niniejszej recenzji.

#### 4. Szczegółowe pytania i uwagi krytyczne

- [U1] Proszę odnieść się do pytań i komentarzy polemicznych podkreślonych w treści podpunktów od (a) do (g) z punktu 3 recenzji.
- [U2] Nie jest do końca jasne czy Doktorant brał udział (a jeżeli tak, to w jakim zakresie) w przygotowaniu stanowiska doświadczalnego składającego się z pojazdu testowego wraz z siecią infrastruktury pomiarowo-obliczeniową umieszczoną na pokładzie pojazdu. Proszę o precyzyjne wyjaśnienie jaki był oryginalny wkład Autora w ten aspekt badań.
- [U3] Krytyczne z punktu widzenia jakości merytorycznej rozprawy są fragmenty dotyczące zastosowanych algorytmów i metod obliczeniowych. Poniżej sformułowano najważniejsze uwagi w tym aspekcie.
  - U3.1. Znaczenie indeksów we wzorze (2.1) nie zostało wyjaśnione; nie wiadomo jak interpretować wartość '0' a jak wartość '1' w kontekście zajętości komórki. Poza tym znak ' $\leq$ ' (użyty w (2.1)) nie jest powszechnie stosowany w zapisie nierówności nieostrej (podobna uwaga dotyczy wzoru (3.17)). Czy użyty symbol ' $<$ ' oznacza przedział obustronnie domknięty?
  - U3.2. Na rysunku 2.17 (str. 38) na osi rzędnych powinny być opisane wartości funkcji gęstości prawdopodobieństwa, a nie wartości prawdopodobieństwa. Co oznacza symbol ' $e_p$ ' na rys. 2.17? Co oznacza symbol ' $pdf(x, \mu, \sigma)$ ' i jaką interpretację mają argumenty zapisane w nawiasach?

- U3.3. Operator transpozycji został błędnie zastosowany w równaniu (2.2). Nie wyjaśniono znaczenia symbolu '|.|' zastosowanego w mianowniku formuły (2.2). Czy to jest wyznacznik macierzy?
- U3.4. Brakuje transpozycji wektora w równaniach (2.3) i (2.4). Nie wyjaśniono znaczenia niektórych elementów wektora w równaniu (2.4).
- U3.5. Formuła (2.7) powinna zostać albo wyprowadzona, albo powinno być podane cytowanie stosownej literatury będącej źródłem tego wzoru. Czym jest macierz 'R'?
- U3.6. Równanie (2.8) nie reprezentuje elipsy.
- U3.7. Brak wyjaśnienia argumentów funkcji 'atan()' we wzorze (2.9).
- U3.8. W kontekście równania (2.10): jakie będzie postępowanie, jeżeli na daną komórkę siatki nakłada się kilka elips z różnych punktów detekcji? Brak wyjaśnienia symbolu '□r' na rys. 2.18.
- U3.9. Jeżeli wzór (2.11) został zapożyczony z pracy [69], to takie odniesienie literaturowe powinno być tu podane. Ponadto drugi argument prawdopodobieństwa w mianowniku chyba powinien mieć postać ' $x_{1,t}$ '.
- U3.10. Wyrażenie ' $l(m)l(m)$ ' w tekście nad wzorem (2.12) nie jest wyjaśnione. Co oznaczają symbole  $m_1$  i  $m_2$  we wzorze (2.13)? Czy ich znaczenie we wzorach (2.14)-(2.18) jest takie samo?
- U3.11. Uzasadnienie zastosowania heurystyki opisanej na stronie 45 (linie 5-8 od dołu) nie jest do końca jasne. Proszę skomentować tę kwestię oraz jaki jest wpływ użycia tej heurystyki na jakość siatki zajętości.
- U3.12. Jakie jest pochodzenie wzorów ze strony 47? Czym są symbole  $w_1$  i  $w_2$  we wzorze (2.15) oraz jak rozumieć sumę w (2.16)?
- U3.13. Jakie jest pochodzenie wzorów na stronach 48-51 i jaka jest interpretacja symboli w nich użytych?
- U3.14. Znaczenie elementów P i N we wzorach (2.28) i (2.30) nie zostało wyjaśnione. Sugerowałbym użycie operatora 'równe z definicji' do wzorów (2.28)-(2.32). Jakie jest pochodzenie tych definicji? Jeżeli są to wzory zaczerpnięte z literatury, to powinno być podane stosowne cytowanie. Proszę także wyjaśnić różnicę w interpretacji wskaźników ze wzorów (2.28) i (2.29).
- U3.15. Jak zmienia się indeks 'i' we wzorze (2.33)?
- U3.16. Jak należy dokładnie rozumieć cechy oznaczone terminami *Accumulated* oraz *Instantaneous* w tabeli 3.1 na stronie 89? Czy można podać matematyczną definicję tych cech?
- U3.17. Opis strony matematycznej opatentowanej metody odwrotnego modelowania w punkcie 3.2 jest nierzetelny i wymaga gruntownych wyjaśnień. W szczególności: wszystkie formuły z punktu 3.2 powinny zostać albo wyprowadzone, albo odniesione do stosownej literatury; wszystkie symbole użyte w równaniach powinny być wyjaśnione; indeks 'j' we wzorze (3.1) należy poprawić, a elementy zbioru należy wziąć w nawiasy klamrowe w tym wzorze; zapis ' $\mu_x \mu_y$ ' jest mylący (czy to jest para koordynat czy iloczyn?); opis symbolu ' $\sigma_{\alpha}$ ' na str. 77 jest błędny; interpretację 'r' i 'alpha' należy podać graficznie na rys. 3.3; na rysunkach od 3.3 do 3.5 brakuje układu współrzędnych sensora (SCS); czym jest 'res' na str. 78 i jak się ten parametr dobiera? Interpretację wzorów (3.2)-(3.6) należy zilustrować graficznie i wyjaśnić wszystkie symbole; podobnie należy uczynić w stosunku do wzorów (3.7)-(3.14). Co reprezentują nawiasy '['] użyte we wzorach (3.11) i (3.12)? Granice sumy we wzorze (3.16) należy podać. Brakuje indeksu 'i' w argumencie funkcji 'varphi' na rys. 3.6. Poza tym nie jest jasne czy we wszystkich testach z punktu 4.1 i 4.2 wykorzystano do obliczeń opatentowaną metodę odwrotnego modelowania sensora (to należy wyjaśnić). **Z tego względu, że punkt 3.2 jest jednym z kluczowych fragmentów rozprawy, bo dotyczy oryginalnego opatentowanego wyniku Autora, oczekuje się od Doktoranta rzetelnego uzupełnienia i wyjaśnienia treści punktu 3.2 (najlepiej w formie pisemnej), aby rozwiać wszelkie wątpliwości co do znaczenia poszczególnych składowych zaproponowanego rozwiązania.**

- [U4] Na stronie 108 Doktorant pisze o tym, że większa wrażliwość metody (w domyśle: metody fuzji siatek zajętości) skutkuje większą podatnością danej metody na zakłócenia i zatłoczenie środowiska. Taki wniosek wydaje się raczej oczywisty. Co zatem Autor chciał ważnego stwierdzić w tym zdaniu? Istotniejsze wydaje się zagadnienie, jaki jest powód większej wrażliwości jednej metody fuzji od innej i czy (lub jak) można taką

wrażliwość zmniejszyć.

- [U5] W tytule punktu 3.2 jest słowo 'Optimization', podczas gdy w treści tego punktu żadnej optymalizacji nie można się doszukać. Proszę wyjaśnić intencję użycia słowa 'Optimization' w tym przypadku.
- [U6] Długi (tzw. *wiszący*) tekst na stronach 8-9 powinien być opatrzony numerem 1.1 z tytułem podpunktu (zakres i organizacja rozprawy); wtedy na stronie 10 powinien znaleźć się podpunkt 1.2.
- [U7] Na wykresie 'NOMS' na rys. 4.3 (strona 98) skala osi rzędnych jest chyba niepoprawna (na rysunku zaznaczono dwa poziomy zerowe; wartości dodatnie umieszczono POD górnym poziomem zerowym).
- [U8] Zauważone błędne lub brakujące odniesienia: rys. 2.17 jest umieszczony na str. 38, a pierwsze odwołanie do niego znajduje się dopiero na str. 39; w tekście są częste odwołania 'w przód' do wzorów, które jeszcze nie zostały wprowadzone (str. 39, 40, 44, 46, 76, 90); nie można znaleźć odniesienia w tekście do rysunków: 2.19 ze str. 42, 2.20 ze str. 43 oraz 2.29-2.30 ze stron 55 i 56; liczne odniesienia do symboli takich, jak D2, D3.1, D3.2 i podobnych na stronach 42 i 43, które nie są wyjaśnione a pojawiają się dopiero na schemacie z rys. 3.1 na stronie 73 (podobne odniesienia są stosowane dalej bez referencji do schematu z rys. 3.1 na str. 73); na stronach 48-51, 62-63 oraz 80 znajdują się tzw. *wiszące* wzory, pozostawione bez wyjaśnienia i bez ujęcia w kontekście otaczającego je tekstu; brak opisu znaczenia poszczególnych widoków na rys. 2.33; prawdopodobnie błędne odniesienie do rys. 4.4 na stronie 69 (czy powinno być 2.43?); brak wyjaśnienia znaczenia skali z prawej strony wykresu na rys. 3.8; wydaje się, że pierwszy element legendy na rys. 3.11 jest błędny (powinny być kreski pionowe?); brakujący numer odwołania do rysunku na str. 80 (linia nad wzorem (3.15)); niepoprawne odniesienie do Fig. 5 na stronie 87 (nie ma takiego rysunku w rozprawie); brak numerów dla podrozdziałów na stronach 85, 88, 89, 92.
- [U9] W treści rozprawy można znaleźć wiele usterek, niezręczności lub niespójności językowych (jest ich zbyt wiele, by je wszystkie wymieniać w tym miejscu), głównie natury składniowej, gramatycznej, typograficznej oraz interpunkcyjnej (np. 'according to include', 'development vehicle', 'that base on', 'And the covariance matrix', brak początku zdania pod wzorem (2.2), brak końcówki zdania na str. 56 w linii 8 od dołu, sformułowania typu 'my articles' jak na str. 71 powinny być zastąpione wyrażeniami bezosobowymi, 'qualitative analysis' na str. 88 zamiast 'quantitative'). Nie jest jasne jak należy rozumieć wyrażenia: 'engineering tooling' (str. 10), 'angled parking' (str. 18), 'the host inside' (str. 25), 'extraction of the abstract definition of objects' (str. 31), 'drivability' i 'move-ability' (str. 35), 'detection surroundings' (str. 37), 'mapping occupancy probability' (str. 44), 'probability input' (str. 48), 'the primary driver' (str. 66), 'performance of features' (str. 72), 'outputs of sensor domains' (str. 74), 'distribution of ISM' (str. 78), 'resultant algorithm data' (str. 94), 'domain occupancy grids' (na rys. 3.1), 'to populate windowed-out areas' (str. 86), 'prior art of Galvez' (str. 88), 'takeaways' (str. 107).
- [U10] Opis tabeli powinien znajdować się NAD tabelą (por. str. 89, 99, 100). Brak opisu tabeli na str. 104.
- [U11] Nie zaznaczono jakie są wymiary stożków widzialności dla sensorów pokazanych na rysunkach 2.39 i 2.44 i tym samym, jak duży jest obszar nakładania się tych stożków brany pod uwagę podczas fuzji siatek zajętości. Czy można zaprezentować te stożki? Jak wielkość obszarów (pól powierzchni) nakładania wpływa na jakość procesu fuzji siatek zajętości?
- [U12] Komentarz w tekście do schematu z rys. 3.1 (str. 73) jest dość skąpy. Czytelnik spodziewa się szerszego wyjaśnienia i omówienia tego schematu, ponieważ stanowi on jeden z głównych oryginalnych wyników Autora rozprawy.
- [U13] Element opisany w podpisie rys. 2.42 jako 'Bounding box' jest bardzo słabo widzialny na czarnym tle.
- [U14] Tabela na stronie 34 nie została ani podpisana ani odpowiednio skomentowana w tekście rozprawy (nie ma jej także w spisie tabel na stronie 131). Czy zatem jest w ogóle potrzebna?
- [U15] Pewne skróty stosowane w treści pracy nie zostały wyjaśnione przy pierwszym ich użyciu, np. NCAP na str. 11, STATS na str. 14, UNECE na str. 14, IPG na str. 54, AS na str. 55, OS i QNX na str. 60, ECUs na str. 62, TP/TN/FP/FN na str. 63 (spis skrótów na stronach 121-124 jest pomocny, ale oprócz tego każdy skrót należy dodatkowo wyjaśnić w tekście).
- [U16] Opis wielu pozycji w spisie bibliografii jest niepełny: brakuje numerów stron (np. [2,4,12,22,41,42,47,57,62,...]), brakuje miejsca konferencji (np. [1,2,8,9,10,16,18,22,23,25,27,31,33,...]),



stosowane są różne style opisu (por. [22] z [25]), brakuje części autorów (stosowany jest skrót "et al.", np. [18,27,31,...]), początek opisu pozycji [24] jest wybrakowany, pochodzenie pozycji [40] nie jest podane, opis patentu [52] jest niepełny (nie wiadomo, że to jest opis patentu).

[U17] Redakcja spisu treści nie jest zgodna z powszechnie przyjętą konwencją (brak wcięć przy podpunktach).

## 5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska prezentuje wyniki badań przemysłowych i prac rozwojowych wykonanych w ramach realizacji tzw. doktoratu wdrożeniowego. Od tego typu prac doktorskich wymaga się oryginalnego rozwiązania konkretnego zagadnienia badawczego o charakterze praktycznym, wynikającego z określonych potrzeb rozwojowych gospodarki. Rezultaty prac Doktoranta spełniają wspomniane wyżej oczekiwania, wnosząc oryginalny wkład w rozwój narzędzi służących projektowaniu i walidacji poziomu niezawodności systemów krytycznych ze względu na bezpieczeństwo (w tym przypadku - systemów percepcji pojazdów inteligentnych).

W kontekście uwag przedstawionych w recenzji zasadniczy wynik przedłożonej rozprawy należy w mojej opinii traktować jako opracowanie demonstratora technologii, potwierdzającego zaproponowaną koncepcję (ang. *proof-of-concept*) rozwiązania problemu projektowania i praktycznej walidacji systemów percepcji inteligentnych pojazdów samochodowych korzystających z mechanizmu fuzji siatek zajętości. Potencjalną użyteczność zaproponowanej koncepcji zademonstrowano i porównano dla heurystycznie wybranych architektur i metod fuzji, walidowanych w ramach trzech wybranych scenariuszy ruchu, korzystając z danych syntetycznych oraz z rzeczywistych danych pomiarowych pochodzących z wielosensorycznego systemu pokładowego umieszczonego na pojeździe testowym. Koncepcja została zaaprobowana przez stronę przemysłową reprezentowaną w tym przypadku przez firmę Aptiv. Można zatem stwierdzić, że tezę rozprawy podaną na stronie 9 potwierdzono w zadowalającym stopniu.

Zaproponowana przez Doktoranta architektura systemu wirtualnej walidacji algorytmów percepcji opartych o fuzję siatek zajętości ma moim zdaniem oryginalny charakter. Zastosowana metodyka badawcza oraz zakres wyników przedstawionych w rozprawie świadczą o wymaganych umiejętnościach Doktoranta potrzebnych do prowadzenia badań przemysłowych i prac rozwojowych zgodnie ze współcześnie przyjętą metodyką. Autor rozprawy wykazał się wystarczającą wiedzą na temat aktualnie stosowanych i rozwijanych, m.in. w pojazdach inteligentnych, systemów automatyki pojazdowej oraz metod przetwarzania i interpretacji informacji zawartej w danych sensorycznych.

Niska jakość strony redakcyjnej tekstu rozprawy, a szczególnie brak wymaganego rygoru przy prowadzeniu wywodów matematycznych, istotnie obniżają moją ocenę jakości rozprawy jako dzieła o charakterze naukowym. Zwyczajowo wysokie oczekiwania co do jakości strony matematycznej i redakcyjnej pracy doktorskiej nie zostały w tym przypadku spełnione.

Pomimo powyższych krytycznych uwag, **wszystkie trzy wymogi ustawowe stawiane rozprawom doktorskim, stanowiące decydujące kryterium oceny [1], zostały w mojej opinii spełnione w stopniu zadowalającym przez przedłożoną do recenzji rozprawę mgra inż. Pawła Markiewicza. Wnioskuje zatem o dopuszczenie przedmiotowej rozprawy do publicznej obrony.**



dr hab. inż. Maciej Marcin Michałek, prof. PP

[1] Recenzje w postępowaniach o awans naukowy. Poradnik, Rada Doskonałości Naukowej, 2022 (dokument elektroniczny dostępny na stronie internetowej RDN).