


Wpłynęło dnia ..... 04. 01. 2024  
Zarejestrowano pod nr .....  
Podpis ..... 

## Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra inż. Wojciecha Turleja

*pt. Real-time generation of safe trajectories for autonomous vehicles in dynamic environments (Generacja bezpiecznych trajektorii w czasie rzeczywistym dla pojazdów poruszających się w dynamicznym środowisku)*

Recenzja została przygotowana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie z dnia 26 października 2023 roku.

### 1. Przedmiot i zakres rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy zagadnienia wyznaczania w czasie rzeczywistym trajektorii sterujących (tj. przebiegu pożądanych sygnałów sterujących) dla autonomicznego pojazdu samochodowego lub pojazdu inteligentnego wyposażonego w zaawansowany system wsparcia manewrów (ang. ADAS), gwarantujących bezkolizyjność manewrów takiego pojazdu w dynamicznie zmiennym i percepcyjnie niepewnym środowisku ruchu drogowego (głównie autostradowego). Doktorant wykorzystał tzw. jednośladowy model kinematyczny (częściowo rozszerzony o kinematykę przyspieszeń) pojazdu samochodowego przy (niejawnym) założeniu spełnienia więzów nieholonomicznych narzuconych na ruch pojazdu, gdzie jako wejścia sterujące przyjęto zadane przyspieszenie liniowe wybranego punktu prowadzenia pojazdu oraz zadany kąt skrętu zastępczego koła skrętnego. Na ruch pojazdu narzucono ograniczenia pozycyjne (ograniczona przestrzeń robocza wolna od przeszkód), ograniczenia dopuszczalnej prędkości postępowej, oraz ograniczenia sterujące wynikające z ograniczonej maksymalnej bezwzględnej krzywizny ruchu pojazdu oraz ograniczonego dopuszczalnego przyspieszenia liniowego punktu prowadzenia pojazdu.

Autor rozprawy zaproponował trzy koncepcje algorytmiczne służące rozwiązaniu postawionego problemu, będące jednocześnie próbą potwierdzenia trzech, dobrze zarysowanych, hipotez badawczych postawionych na samym początku dysertacji (str. 5). Pierwsza koncepcja polega na iteracyjnym numerycznym planowaniu przebiegu sygnałów sterujących pojazdu w wyniku numerycznego rozwiązania zagadnienia optymalizacji z ograniczeniami (dla wieloskładnikowej ważonej funkcji kosztu) w obecności ograniczeń stanu i sterowania pojazdu, z zastosowaniem procesu wielohipotezowego podejmowania decyzji wyboru jednego z wielu równolegle wyznaczanych bezkolizyjnych planów ruchu na podstawie aktualnego stanu i przewidywanych przyszłych możliwych stanów środowiska ruchu pojazdu (w tym najbardziej krytycznych ze względu na bezpieczeństwo).

W ramach drugiej koncepcji Autor proponuje zdefiniowanie stochastycznych modeli składników podsystemu percepcyjnego pojazdu (zarówno w zakresie percepcji obiektów statycznych jak i dynamicznych), a następnie ich wykorzystanie w procesie uczenia wielowarstwowej sztucznej sieci neuronowej służącej do generowania trajektorii sterowań, w celu zwiększenia poziomu odporności planera neuronowego na możliwe błędy percepcji maszynowej. W tym rozwiązaniu proces strojenia parametrów sieci neuronowej odbywa się na podstawie algorytmu nienadzorowanego uczenia ze wzmocnieniem z wykorzystaniem skumulowanej (wieloskładnikowej) funkcji nagrody uwzględniającej zarówno komfort podróży pasażerów jak i wskaźniki bezpieczeństwa ruchu pojazdu.

Trzecia autorska koncepcja zaproponowana w rozprawie dotyczy mechanizmu zautomatyzowanej symulacyjnej walidacji numerycznych algorytmów planowania ruchu w celu skutecznego wykrywania ich słabych punktów lub ukrytych wad. Mechanizm walidacji polega tu na zoptymalizowanym wyszukiwaniu i generowaniu wielu różnych, intencjonalnie *antagonistycznych* (tj. złożonych i niebezpiecznych), testowych scenariuszy ruchu, skutkujących pojawianiem się podczas testów takich warunków ruchu drogowego, które są krytyczne ze względu

na bezpieczeństwo sterowanego pojazdu (zwanego dalej 'ego-pojazdem').

Dwie zaproponowane w rozprawie metody planowania ruchu oraz metoda walidacji zostały numerycznie sprawdzone w środowisku symulacyjnym dla różnych wybranych scenariuszy i stanów środowiska ruchu pojazdu w warunkach drogowych (głównie autostradowych) obejmujących takie manewry jak: zmiana pasa ruchu, włączanie się do ruchu z pasa dojazdowego, unikanie kolizji poprzez hamowanie awaryjne lub omijanie / wymijanie innych pojazdów znajdujących się w obszarze ruchu drogowego. Metoda planowania wykorzystująca sztuczną sieć neuronową została statystycznie porównana z dwoma alternatywnymi podejściami znanymi z literatury przedmiotu, wykazując przewagę i zalety tej pierwszej. Ponadto Autor skomentował kwestie złożoności obliczeniowej opracowanych algorytmów, ich zalety i ograniczenia oraz możliwe przyszłe prace badawcze służące zwiększeniu skuteczności i praktycznej stosowalności zaproponowanych rozwiązań.

Tematyka rozprawy, plasująca się na styku takich obszarów badawczych jak automatyka (w tym robotyka) oraz informatyka techniczna, jest bardzo aktualna w świetle współczesnych badań prowadzonych w zakresie automatyzacji i robotyzacji transportu drogowego, a zwłaszcza w obszarze autonomizacji ruchu pojazdów samochodowych. Doktorant podjął się próby rozwiązania bardzo trudnego problemu badawczego związanego z uzyskaniem gwarancji bezpieczeństwa w układach nawigacji i sterowania pojazdami inteligentnymi w warunkach niepewności percepcyjnej i dynamicznej zmienności stanu otoczenia pojazdu. Jest to obecnie jedno z ważkich i pilnie domagających się rozwiązania zagadnień badawczych współczesnej inżynierii. Na uwagę zasługuje stosunkowo kompleksowe potraktowanie tematu przez Autora, w którym uwzględnił on zarówno kwestie modelowania (pojazdu i podsystemu percepcyjnego), jak i ściśle powiązanego ze sterowaniem planowania ruchu w obecności różnorodnych ograniczeń oraz zakłóceń natury stochastycznej. W konsekwencji takiego podejścia wyniki przedstawione w rozprawie cechują się relatywnie wysokim poziomem realizmu, a zaproponowane rozwiązania algorytmiczne relatywnie wysokim poziomem odporności na wpływ wybranych zaburzeń typowych dla rzeczywistych warunków ruchu pojazdów i tym samym nabierają istotnego znaczenia praktycznego. Do zapewnienia metodycznej kompletności rozprawy zabrakło co prawda przedstawienia przykładowych wyników eksperymentów uzyskanych z wykorzystaniem fizycznego pojazdu w warunkach rzeczywistych, ale wspomniane przez Autora i zrozumiałe kwestie bezpieczeństwa, a także kwestia wymaganych wysokich nakładów finansowych potrzebnych do realizacji takich eksperymentów, mogą usprawiedliwiać ten brak.

## **2. Kompozycja i redakcja rozprawy**

Rozprawa została zredagowana w języku angielskim, liczy 172 strony numerowane i składa się z sześciu rozdziałów poprzedzonych streszczeniem (w języku polskim i w języku angielskim), podziękowaniami, spisem treści oraz listą wyjaśniającą zastosowane symbole matematyczne. Rozprawa kończy się bibliografią oraz spisami rysunków i tabel. Rozdział pierwszy wprowadza w tematykę rozprawy, podaje zakres rozważań i motywacje Autora, streszcza zawartość rozprawy, a także zawiera sformułowanie trzech głównych hipotez badawczych (strona 5), których potwierdzenie zawarte kolejno w rozdziałach trzecim, czwartym i piątym stanowi zasadniczy wkład merytoryczny dysertacji. Rozdział drugi przedstawia podstawowe wiadomości wprowadzające w tematykę autonomicznych pojazdów oraz zaawansowanych systemów wsparcia kierowców (ang. ADAS), a także przytacza podstawowe wiadomości na temat rodzajów sensorów i podsystemów percepcji maszynowej, metod uczenia maszynowego stosowanych w pojazdach inteligentnych, typowych źródeł błędów percepcyjnych pojawiających się w tego typu systemach, stosowanych reprezentacji środowiska ruchu pojazdów i stanu pojazdu autonomicznego, a także zagadnień oraz istniejących standardów technicznych w obszarze bezpieczeństwa ruchu pojazdów autonomicznych. W rozdziale szóstym Autor podsumowuje uzyskane wyniki (w kontekście postawionych wcześniej hipotez badawczych), podkreśla na czym polega nowatorstwo zaproponowanych rozwiązań, a także nakreśla możliwe kierunki dalszych prac badawczych pozwalających na poprawę jakości oraz dalsze rozszerzanie możliwości i zastosowań zaproponowanych rozwiązań. Kompozycja rozprawy jest w mojej ocenie właściwa i przejrzysta, a dobrze uporządkowany układ i logiczne powiązanie treści w poszczególnych rozdziałach i podpunktach sprawiają pozytywne wrażenie spójności i klarowności dysertacji jako dzieła naukowego.

Obszerna bibliografia cytowana w rozprawie (zawierająca 204 różne pozycje literatury), jest dobrze dobrana oraz właściwie wykorzystana w treści rozprawy. Poza odniesieniami do publikacji naukowych podano

również referencje do dokumentów normatywnych oraz do baz danych, co dobrze lokuje wyniki rozprawy także w kontekście praktycznym. Szkoda jednak, że Autor, poza cytowanymi pracami szkoły krakowskiej i śląskiej, nie przywołał w rozprawie wyników innych krajowych ośrodków zajmujących się w ostatnich latach zagadnieniami percepcji, planowania ruchu oraz modelowania i sterowania w obszarze pojazdów inteligentnych. W tym aspekcie można było spodziewać się u Autora szerszej znajomości aktualnego stanu polskich badań. Należy zauważyć też brak kompletności danych bibliograficznych przy opisie wielu cytowanych prac, co bardziej szczegółowo omawiam w punkcie 4 recenzji.

Warto podkreślić dużą staranność Autora w redakcji głównej części tekstu rozprawy, przejrzystą ilustrację wybranych zagadnień oraz wyników w postaci schematów, rysunków, wykresów, i tabel, dbałość o ścisłość, precyzję i logiczne uporządkowanie wywodów i komentarzy, dobry i zrozumiały styl językowy, a także zasadniczo udaną (choć nie w pełni czytelną i spójną) próbę matematycznego opisu zastosowanych koncepcji i rozwiązań, co nie zawsze jest spotykane w przypadku stosowania podejść o charakterze numerycznym, szczególnie w przypadku wykorzystywania metod uczenia maszynowego. Zauważone usterki i niejasności w tym zakresie (stosunkowo nieliczne wobec znacznej objętości tekstu i dużej liczby zastosowanych symboli matematycznych) omawiam bardziej szczegółowo w punkcie 4 niniejszej recenzji.

### 3. Ocena zastosowanej metodyki badawczej i uzyskanych wyników

Problem badawczy postawiony przez Doktoranta został dobrze i klarownie sformułowany w punkcie 1.4 za pomocą trzech hipotez badawczych, które można moim zdaniem zasadniczo uznać za potwierdzone uzyskanymi wynikami badań numerycznych (symulacyjnych), przynajmniej w zakresie testowanych warunków drogowych i w ramach przyjętych (jawnie bądź niejawnie) założeń upraszczających. Brak wyników testów eksperymentalnych uzyskanych z użyciem fizycznego pojazdu samochodowego w różnych rzeczywistych warunkach drogowych walidujących wyniki numeryczne jest niewątpliwie brakiem metodycznym tego typu dysertacji, bowiem tylko taka weryfikacja pozwoliłaby na formułowanie wiarygodnych wniosków w kontekście hipotez postawionych na str. 5. Jednak obiektywne ograniczenia wynikające z konieczności podjęcia bardzo dużych nakładów finansowych oraz z kwestii poważnego ryzyka kolizji związanego z realizacją takich testów usprawiedliwiają taki brak w tym przypadku. Pewnym kompromisowym rozwiązaniem walidacyjnym mogłoby jednak być wykorzystanie komercyjnie dostępnych środowisk symulacyjnych dużej wiarygodności (takich jak np. środowisko CarSim), które umożliwiłoby istotne zbliżenie poziomu realizmu warunków prowadzenia procesu walidacji do tych obserwowanych w rzeczywistości.

Zastosowanie optymalizacji numerycznej z ograniczeniami w rozdziałach 3 i 5 oraz uczenia maszynowego, a w szczególności metody nienadzorowanego uczenia ze wzmocnieniem (ang. Reinforcement Learning) w rozdziale 4, wydają się zasadne w perspektywie dzisiejszego poziomu rozwoju metodyki analizy i projektowania złożonych systemów dynamicznych pracujących w warunkach znacznych niepewności, do jakich bez wątpienia należą systemy algorytmizacji ruchu zautomatyzowanych pojazdów drogowych. Pomimo znanych wad i ograniczeń zastosowanych metod numerycznych oraz technik uczenia maszynowego, są to obecnie jedne z bardziej efektywnych narzędzi obliczeniowych umożliwiających jednocześnie uwzględnienie wielu, często powiązanych ze sobą i trudnych w matematycznym modelowaniu, efektów i cech świata fizycznego takich jak niepewność pomiarowa i decyzyjna, nieprzewidywalność zdarzeniowa, zmienność parametryczna i strukturalna, które dotyczą zarówno samego przedmiotu algorytmizacji jak i okoliczności środowiskowych, w których ten proces algorytmizacji musi zachodzić.

Autor zaproponował zdefiniowanie problemu planowania ruchu na poziomie zadanych kinematycznych sygnałów sterujących w postaci profilu zadanego kąta skrętu zastępczego koła skrętnego pojazdu oraz profilu przyspieszenia liniowego punktu prowadzenia pojazdu. Taki wybór ma swoje zalety, o których Autor wspomina w rozprawie, ale także wprowadza pewne ograniczenia, a mianowicie niejako *spłaszcza* kaskadową strukturę układu algorytmizacji ruchu (tj. planowania i sterowania) pomijając etap wyznaczania zadanej trajektorii stanu (por. schemat z rys. 2.10 na str. 26), co może prowadzić do trudności w interpretacji wyników algorytmizacji, a tym samym detekcji i eliminacji potencjalnych ukrytych wad takiego układu algorytmizacji ruchu. Poza tym wybór przyspieszenia jako sygnału sterującego zasadniczo wymaga zastosowania podrzędnej pętli regulacji przyspieszenia

na pokładzie pojazdu, co może być w praktyce niekorzystne ze względu na trudności z jakościowo zadowalającym pomiarem sygnału sprzężenia zwrotnego w tym przypadku. Punkt prowadzenia pojazdu w modelu ze strony 49 (dla którego zdefiniowano przyspieszeniowe wejście sterujące) został wybrany jako środek masy pojazdu (punkt 'COM' oznaczony na rys. 3.5 i 5.2), co nie jest konieczne i dodatkowo niepotrzebnie utrudnia problem sterowania ze względu na niepewność i możliwą dużą zmienność położenia środka masy podczas realizacji manewrów (tutaj zasadnym byłoby określenie punktu prowadzenia pojazdu jako ustalonego punktu związanego z geometrią platformy). Natomiast wprowadzenie ograniczeń na stan i sygnały sterujące pojazdów i uwzględnienie ich w zdefiniowanych problemach optymalizacji do celów planowania ruchu jest w pełni zasadne, a z praktycznego punktu widzenia wręcz konieczne w celu zapewnienia fizycznej realizowalności uzyskanych planów.

Podaną w rozdziale 3 koncepcję wielohipotezowego planowania alternatywnych trajektorii sterujących uważam za interesującą. Próbuje ona naśladować i rozszerzyć podobną analizę wykonywaną często przez kierowcę, szczególnie w warunkach zagrożenia bezpieczeństwa ruchu. Zapewnienie zgodności ze sobą kilku zaplanowanych alternatywnych trajektorii sterowania przez pewien początkowy interwał czasu jest pożądaną cechą pozwalającą na odsunięcie w czasie i wypracowanie bardziej pewnych decyzji sterujących w miarę napływu nowych danych pomiarowych i wyników działania podsystemu percepcji maszynowej, a w konsekwencji umożliwiającą uniknięcie kolizji drogowej.

Wprowadzenie w rozdziale 4 stochastycznych modeli percepcyjnych oraz ich wykorzystanie w procesie uczenia maszynowego do celów zwiększenia odporności wypadkowej strategii planowania na błędy i niepewności percepcyjne okazało się bardzo korzystne w kontekście zauważalnej poprawy poziomu bezpieczeństwa ruchu ego-pojazdu. Podczas modelowania Autor uwzględnił zasadnicze i praktycznie istotne efekty percepcyjne, takie jak ograniczenie zakresu pomiarowego sensorów, przysłanianie oraz błędy estymacji 'stanu' obiektów statycznych i dynamicznych obecnych w środowisku ego-pojazdu, a także fałszywe (pozytywne i negatywne) detekcje obiektów w otoczeniu ego-pojazdu. Podanie statystycznych wyników walidacyjnych w rozdziale 4 w celu weryfikacji skuteczności opracowanego planera ruchu korzystającego z metod uczenia maszynowego jest właściwe, ponieważ metody takie poprzez swą konstrukcję nie gwarantują stuprocentowej skuteczności i do ich oceny wymaga się walidacji statystycznej. Porównanie zaproponowanej strategii planowania ruchu wykorzystującej stochastyczny model percepcyjny typu OU-SM z dwoma innymi strategiami wziętymi z literatury (oznaczonymi symbolami G-SM i GT) uważam za ciekawe i zasadne. Wykazane zalety opracowanej strategii planowania z modelem typu OU-SM są przekonujące zarówno w kontekście uzyskanej odporności na błędy percepcyjne, jak i osiągniętego poziomu bezpieczeństwa manewrów. Ponadto wyniki analizy czasu obliczeń uzyskane dla metody z modelem OU-SM (tablica 4.14 na str. 111) czynią ją obiecującą w perspektywie jej potencjalnych aplikacji czasu rzeczywistego na pokładzie zautomatyzowanego pojazdu wyposażonego w dostępne dziś na rynku jednostki obliczeniowe.

W rozdziale 5 Autor porusza bardzo ważny i aktualny problem wiarygodnej i miarodajnej walidacji metod algorytmizacji ruchu zautomatyzowanych/inteligentnych pojazdów wykorzystujących techniki uczenia maszynowego. Podjęcie próby opracowania narzędzia służącego temu celowi, a w szczególności wykrywaniu luk logicznych i potencjalnych wad ukrytych algorytmu, uważam za bardzo zasadne i praktycznie potrzebne. Doktorant zaproponował sposób rozwiązania tego zagadnienia poprzez iteracyjne generowanie wielu różnych intencjonalnie antagonistycznych (w tym szczególnie trudnych i krytycznych ze względu na bezpieczeństwo) scenariuszy zachowania pojazdów w środowisku ruchu ego-pojazdu prowadzonego za pomocą walidowanego algorytmu planowania ruchu i w obecności błędów percepcyjnych ego-pojazdu. Moduł generatora antagonistycznego został zrealizowany jako rozwiązanie stosownie zdefiniowanego zadania optymalizacji stochastycznej z ograniczeniami, gdzie minimalizowana ważona funkcja kosztu zawiera składowe promujące kolizje (frontalne i tylne) oraz składowe minimalizujące zarówno czas do kolizji jak i geometryczną odległość między ego-pojazdem a innym pojazdem poruszającym się w środowisku drogowym (podano także wersję funkcji kryterialnej uwzględniającą błędy percepcyjne estymacji stanu obiektów, jednak nie jest jasne czy była ona wykorzystana w podrozdziale 5.4). Skuteczność zaproponowanej metody walidacyjnej zilustrowano wynikami uzyskanymi dla sześciu przykładów manewrów w dwóch różnych scenariuszach drogowych, gdzie ego-pojazd był prowadzony przez algorytm planowania ruchu uzyskany w wykorzystaniu techniki maszynowego uczenia ze wzmocnieniem (ang. Reinforcement Learning). Mimo, iż przyjęte scenariusze drogowe są dość proste (3 aktywne + 2 pasywne pojazdy



na prostoliniowym odcinku trzypasmowej autostrady oraz 2 pojazdy w manewrze włączania się do ruchu autostradowego z pasa dojazdowego), to opracowany walidator umożliwił ujawnienie warunków, w których algorytm planowania popełnił błędy skutkujące kolizją drogową. Warto zaznaczyć jednak, że detekcja błędów w testowanym algorytmie nie oznacza jednocześnie zdolności do wyjaśnienia przyczyny tych błędów i tym samym do opracowania skutecznych działań naprawczych w konstrukcji samego algorytmu planowania ruchu. Wydaje się, że ten problem (szczególnie trudny w przypadku wykorzystania metod uczenia maszynowego) pozostaje nadal nierozwiązany.

Praktyczna skuteczność wykorzystania metod numerycznych zaproponowanych w rozprawie zależy od wielu czynników, w tym od siły przyjętych założeń upraszczających, konstrukcji funkcji kosztu i postaci ograniczeń, reprezentacji niepewności oraz od wyborów przez projektanta konkretnych wartości (hiper-)parametrów projektowych zawartych w wymienionych elementach. W tym kontekście, niektóre założenia i wybory projektowe przedstawione w rozprawie wymagają dodatkowego komentarza, wyjaśnienia lub uzasadnienia. Mianowicie, założenie pierwsze z punktu 3.2.1 na str. 44 nie jest precyzyjne, bo nie wskazuje jakie konkretnie zmienne stanu pojazdu mają być znane (czyli, jak zakładam, dostępne pomiarowo). Opis scenariuszy na str. 123 zakłada brak reakcji pojazdów obecnych w środowisku ruchu na bieżące zachowanie ego-pojazdu, co wydaje się mało realistyczne. Nie jest do końca jasne dlaczego Autor zdecydował się na taki pasywny scenariusz testów i dlaczego nie można było w tym miejscu rozważyć wykorzystania np. metody wielohipotezowej zaproponowanej w rozdziale 3. Nie jest też do końca jasne dlaczego jednym z sygnałów sterujących zaproponowanego modelu matematycznego pojazdu jest przyspieszenie a nie prędkość postępową, którą znaczenie łatwiej jest stabilizować w kaskadowym układzie sterowania zautomatyzowanego pojazdu. W tym kontekście (ale i generalnie, bo dotyczy to każdego praktycznego układu regulacji) czwarte założenie ze str. 44 (czwarta kropka w punkcie 3.2.1) wydaje się dość silne. Poza tym Autor nie podał w sposób jawny czy zakłada spełnienie przez ego-pojazd oraz przez inne pojazdy znajdujące się w środowisku ruchu więzów nieholonomicznych związanych z brakiem składowych poślizgu poprzecznego zastępczych kół modelu jednośladowego i co się z tym wiąże w świetle rozważanych scenariuszy ruchu (jest to bardzo istotne z punktu widzenia interpretacji i zakresu wiarygodności wyników uzyskanych w rozprawie). Ponadto przyjmowanie jako punktu prowadzenia pojazdu środka jego masy jest w mojej ocenie niezręczne i niepotrzebnie utrudnia problem, ponieważ środek masy może być zmienny podczas ruchu pojazdu a jego położenie jest w praktyce niepewne, czego Autor nie wziął pod uwagę.

Wyniki walidacyjnych symulacji numerycznych podane w rozdziałach 3, 4 i 5 są zasadniczo obiecujące, choć wykorzystanie praktyczne zaproponowanych algorytmów planowania musi być poprzedzone odpowiedzią na pytanie o stopień konserwatywności planów oraz czasy obliczeń planera w przypadku bardziej złożonych scenariuszy ruchu od tych testowanych w rozprawie, w szczególności przy większej liczbie pojazdów znajdujących się w środowisku drogowym i gdzie ruch (zarówno ego-pojazdu jak i pojazdów w jego otoczeniu) odbywa się w warunkach ograniczonej przyczepności kół do podłoża (tj. gdzie możliwe są umiarkowane poślizgi kół naruszające więzy nieholonomiczne przyjęte w modelu kinematyki pojazdu), a także przy uwzględnieniu niedokładnej realizacji zaplanowanych profili sygnałów sterujących przez układy wykonawcze. Rozważania zawarte w punktach 3.6, 4.8 i 5.5 oraz w rozdziale 6 wskazują, że Autor dysertacji jest świadomy większości ograniczeń i słabych punktów rozwiązań zaproponowanych w rozprawie. Ponadto w pracach badawczych, których tematyka dotyczy zagadnień krytycznych ze względu na bezpieczeństwo, ważnym (lecz nieobecnym w rozprawie) elementem jest eksperymentalna walidacja opracowanych algorytmów lub przynajmniej ich walidacja w środowisku *wysokiej wiarygodności*, która umożliwi sprawdzenie wrażliwości/odporności opracowanych rozwiązań na naruszenie (w różnym stopniu) założeń upraszczających poczynionych na etapie projektowania.

Szczegółowe uwagi krytyczne i pytania dotyczące analizy i oceny rozwiązań zaproponowanych w rozprawie zostały sformułowane w punkcie 4 niniejszej recenzji.

#### 4. Szczegółowe uwagi krytyczne i pytania

[U1] Przyjęcie do celów planowania ruchu jako punktu prowadzenia pojazdu w modelu na rys. 3.5 i 5.2 środka masy pojazdu (punkt 'COM') jest kontrowersyjne. Po pierwsze środek masy pojazdu rzadko jest ułożony na osi symetrii wzdłużnej pojazdu i zależy od rozmieszczenia ładunku i pasażerów, co może ulegać zmianom

podczas ruchu, a tym samym może wprowadzać dodatkową niepewność w modelu pojazdu. Punkt prowadzenia powinien być raczej związany z geometrią platformy pojazdu, która jest stała i dobrze znana (w podejściu kinematycznym często wybiera się punkt środka zastępczego koła ustalonego). Po drugie nie wyjaśniono precyzyjnie o jaką prędkość 'v' użytą w modelu (3.2.6) chodzi, a wektor prędkości punktu COM został dość tendencyjnie oznaczony na rys. 3.5, co może być mylące. Po trzecie Autor nie pokazał, która oś pojazdu jest napędowa i jak prędkości pochodzące z układu wykonawczego przenoszą się na prędkość punktu prowadzenia, ani jak układy wykonawcze generują przyspieszenie punktu prowadzenia, które potraktowano jako jeden z sygnałów sterujących pojazdu. Odtwarzanie przyspieszenia zadanego przez algorytm planowania ruchu nie jest prostym zadaniem w praktyce, bowiem wymaga albo pomiaru albo estymacji bieżącej wartości przyspieszenia punktu prowadzenia. Znacznie łatwiejszym zadaniem byłoby potraktowanie prędkości punktu prowadzenia jako sygnału sterującego, którego pomiar/estymacja są znacznie łatwiejsze w praktyce. Dlaczego Doktorant zdecydował się na wybór przyspieszenia do celów sterowania (inaczej: dlaczego stan pojazdu ma postać jak we wzorze (3.2.5)?) i jak Autor wyobraża sobie techniczną realizację zadanego profilu przyspieszenia (obliczanego przez planer ruchu) punktu 'COM' w rzeczywistym zautomatyzowanym pojeździe? W końcu po czwarte: czy Doktorant założył, że ruch ego-pojazdu odbywa się bez poślizgu poprzecznego i wzdłużnego kół we wszystkich analizowanych scenariuszach ruchu? Jeżeli tak, to założenie o wystarczająco dużej przyczepności kół do podłoża powinno znaleźć się wprost w spisie założeń poszczególnych algorytmów planowania (to nie jest jawnie stwierdzone w rozprawie).

- [U2] Przyjmując upraszczające założenie o ruchu bez poślizgu kół dla ego-pojazdu (tj. przyjęcie nieholonomicznego modelu kinematyki pojazdu) do celów planowania ruchu może być zasadne w pewnych warunkach ruchu, jednak nie oznacza to jednocześnie przyjęcia takiego samego założenia dla etapu walidacji działania planera, zarówno w przypadku ego-pojazdu jak i w przypadku pozostałych pojazdów znajdujących się w środowisku ruchu. Czy Autor przyjął założenie o braku poślizgów na etapie walidacji algorytmów (nie jest jasne czy ruch pojazdów podczas procesu walidacji był symulowany jako całkowanie równań (3.2.6) ze str. 49 czy w inny sposób)? Jeżeli tak, to stopień realizmu scenariuszy walidacyjnych jest ograniczony, a wnioski dotyczące bezpieczeństwa sformułowane na podstawie uzyskanych wyników powinny zawierać takie zastrzeżenie ograniczające. Poza tym generalnie warto byłoby sprawdzić wrażliwość zaproponowanych rozwiązań w warunkach umiarkowanych poślizgów kół wszystkich pojazdów, aby przybliżyć warunki walidacyjne do rzeczywistych warunków drogowych typowych dla względnie dużych prędkości ruchu lub np. dla przypadku mokrej nawierzchni drogi. Takie symulacyjne środowiska walidacyjne o dużej wiarygodności modelu są komercyjnie dostępne, jak np. w oprogramowaniu 'CarSim', których wykorzystanie pozwoliłoby częściowo zrekomensować brak wyników eksperymentalnych w rozprawie.
- [U3] W punkcie 3.2.4 na stronie 48 Autor zakłada idealne odtwarzanie przez pokładowy układ sterowania niskiego poziomu zadanych przebiegów (trajektorii) sterowań  $T_i(\mathbf{q}_i, t)$ . To jest dość silne założenie, zwłaszcza w krótkich skalach czasowych, które wydają się być typowe dla dynamicznych sytuacji krytycznych ze względu na bezpieczeństwo. Czy nie lepiej byłoby wprowadzić jakiś dopuszczalny błąd realizacji tych trajektorii sterujących, aby uwzględnić dynamikę stanów przejściowych obwodów regulacyjnych i ich wpływ na bezpieczeństwo wyznaczanych planów? Poza tym postać trajektorii  $T_i(\mathbf{q}_i, t)$  nie została wyjaśniona w pracy; nie podano też interpretacji pierwszego argumentu tej trajektorii.
- [U4] Przy okazji wprowadzenia relacji (3.2.2) nie podano definicji symbolu 'Box( $\mathbf{q}_i, t$ )' ani interpretacji jego pierwszego argumentu. Czy relacja (3.2.2) zakłada powiększanie obszaru 'Box( $\mathbf{q}_i, t$ )' o jakąś nadmiarową strefę bezpieczeństwa uwzględniającą np. wpływ niezerowych błędów (uchybów) fizycznej realizacji wyznaczonej trajektorii sterowania  $T_i(\mathbf{q}_i, t)$ ? Takie podejście służyłoby zwiększeniu odporności zaproponowanego systemu algorytmizacji w warunkach nienominalnych.
- [U5] Postulowane zalety definicji (3.3.3) nad (3.3.2) nie są do końca jasne – ta kwestia wymaga komentarza ze stosownym uzasadnieniem.
- [U6] Funkcje kosztu zaproponowane we wzorach (3.4.1), (5.3.1) i funkcja nagrody (4.5.5) składają się z wielu ważnych składowych, które same także często zawierają parametry projektowe; podobnie wiele

parametrów zawierają modele stochastyczne sensorów podane na stronach 86-94. Z jednej strony wielość parametrów i wag zapewnia dużą elastyczność projektowania, z drugiej jednak strony wymaga od projektanta doboru (strojenia?) tych komponentów w celu uzyskania zadowalających efektów. Można spodziewać się, że wybór wartości dla poszczególnych wag i parametrów nie jest łatwy i wymaga sporo wysiłku na etapie uczenia lub optymalizacji. Jak Autor dobierał wartości wag i parametrów podanych w tab. 3.2 na str. 65, tab. 3.3 na str. 68, tab. 3.4 na str. 71, tab. 4.1 na str. 90, tab. 4.2 na str. 95 i tab. 5.1 na str. 134? Czy był to proces trudny, uciążliwy i czasochłonny? Jak ten aspekt należałoby skomentować w kontekście potencjalnego praktycznego wykorzystania zaproponowanych rozwiązań w warunkach praktycznych i przy zmiennych scenariuszach i środowiskach ruchu zautomatyzowanego pojazdu? Czy można podać jakieś ogólne zasady doboru tych parametrów upraszczające problem w praktyce i jednocześnie minimalizujące potencjalną tendencyjność ich doboru, który mógłby wpływać na jakość wyników (np. w przypadku szczególnie krytycznego kosztu (5.3.9))?

- [U7] Zaproponowana *arbitralność* wyboru długości czasu trwania  $t_h$  nakładania się alternatywnych trajektorii sterujących zaplanowanych w ramach metody z rozdziału 3 jest mało precyzyjna. Intuicyjnie wydaje się, że wybór tego czasu powinien (dla zapewnienia bezpieczeństwa ruchu pojazdu) zależeć od takich czynników, jak: prędkość ruchu ego-pojazdu, szacowany czas do kolizji, ograniczenia nałożone na zmienne stanu pojazdu, a także bieżący stan otoczenia pojazdu. Jak zatem Autor proponuje dokonywać wyboru czasu  $t_h$  w praktyce i na jakiej podstawie czas ten był wybierany w rozprawie? (Nie znalazłem w treści dysertacji uzasadnienia wyboru wartości  $t_h=1$  s podanego w tab. 3.2 na str. 65 ani  $t_h=0.8$  s podanego w tab. 3.3 na str. 68.)
- [U8] Proces wielohipotezowego planowania zaproponowany w rozdziale 3 jest przeznaczony, jak zakładam, do iteracyjnego (i wykonywanego w czasie rzeczywistym) re-planowania trajektorii sterujących co pewien interwał czasu w odpowiedzi na zmianę stanu ego-pojazdu oraz na zmieniającą się dynamicznie sytuację w środowisku pojazdu. Jak często należy/można dokonywać re-planowania i jak to zostało zrealizowane w dysertacji w punkcie 3.5.2? Czy re-planowanie powinno zachodzić zawsze przed upływem czasu nakładania  $t_h$ ? Jak należy powiązać okres próbkowania sygnałów potrzebnych do re-planowania z interwałem re-planowania? Czy należy tutaj (i jeżeli tak, to w jaki sposób) uwzględnić czas opóźnienia wynikający z konieczności realizacji obliczeń optymalizacyjnych?
- [U9] Ograniczenia równościowe wprowadzone w (3.4.1) na str. 59 trudno jest spełnić przy obliczeniach numerycznych. Jak Autor sobie z tym poradził? Czy nierówność zapisana dla  $d_i^{\min}$  w (3.4.1) nie powinna być ostra (tj.  $>0$ )?
- [U10] Opisane warunki drogowe w podpunkcie 3.5.2 zakładają prędkości postępowe pojazdów nie przekraczające 55 km/h (tj. około 15 m/s). Jest to stosunkowo mała prędkość ruchu w warunkach drogowych, dająca relatywnie dużo czasu na obliczenia planera i podjęcie decyzji wyboru trajektorii sterującej. Dlaczego wybrano taki zakres prędkości i czy jakość działania metody zmienia się wraz ze wzrostem prędkości postępowej pojazdów? Czy takie ewentualne zmiany jakości działania planera mają tylko charakter ilościowy czy też jakościowy? Czy złożoność obliczeniowa algorytmu w rozdziale 3, a także algorytmów z rozdziałów 4 i 5, istotnie wzrasta przy zwiększeniu liczby pojazdów znajdujących się w pobliżu ego-pojazdu (tj. przy liczbie pojazdów większej od 3, która była analizowana w rozdziale 3)?
- [U11] Analizując wyniki z rys. 3.10 można zauważyć, że dla hipotezy 1 (predykowany ruch nominalny) ego-pojazd nieco oscyluje na pasie ruchu (widoczne są, wcale nie tak małe, zmiany kąta skrętu koła przedniego w tym etapie ruchu). Nie jest to zbyt naturalne zachowanie pojazdu w warunkach nominalnych. Czy Autor wie z czego ten efekt wynika i co należałoby zmodyfikować w algorytmie, aby ten efekt usunąć lub osłabić?
- [U12] Niektóre z wartości wariancji w tabeli 4.1 na str. 90 wybrano jako zerowe. Jaka była motywacja do takiego szczególnego wyboru i czy taki wybór można uznać za realistyczny z praktycznego punktu widzenia?
- [U13] Heurystyczne sposoby określania prawdopodobieństw podane we wzorach (4.4.7) i (4.4.8) na str. 94 są niejasne i powinny być (choćby krótko) skomentowane i uzasadnione.
- [U14] Czy Autor jest świadomy wad/ograniczeń (w kontekście bezpieczeństwa) wynikających z zastosowania metody uczenia maszynowego typu RL i sztucznych sieci neuronowych (rozdział 4) do generowania

niskopoziomowych sygnałów sterujących dla zautomatyzowanego pojazdu?

- [U15] Wyniki porównawcze z tab. 4.13 na str. 108 (oraz na rys. 4.4 i 4.5) pokazują zalety podejścia zaproponowanego przez Autora dysertacji (ich wiarygodność jest stosunkowo dużo biorąc pod uwagę liczbę wykonanych symulacji numerycznych). Jednak żadna z porównywanych metod nie osiągnęła 99% skuteczności (wg ostatniej linii z tablicy 4.13). Zatem czy można powiedzieć, że analizowane metody są bezpieczne i jeżeli tak, to w jakim sensie? Kiedy wg Autora dane rozwiązanie (a w szczególności takie, które wykorzystuje metody uczenia maszynowego) można nazwać bezpiecznym w kontekście technologii AD? Czy stwierdzenie '[...] to ensure a safe motion' zawarte w sekcji 'Abstract' nie powinno być raczej osłabione np. do formy '[...] to increase a motion safety'? Podobnie, Autor pisze w streszczeniu: '[...] dla zagwarantowania istnienia bezkolizyjnego manewru bezpieczeństwa', co jest dyskusyjne, bo w pewnych skrajnych warunkach taki manewr nie istnieje.
- [U16] Dlaczego w punkcie 5.4 nie walidowano strategii sterowania wykorzystującej model OU-SM zaproponowanej wcześniej przez Autora w rozdziale 4 (pomimo jej zalet wykazanych tamże)?
- [U17] Czy wersja funkcji kosztu ze wzoru (5.3.9) była testowana w rozprawie? Jeżeli tak, to ile wynosiła wartość wagi  $w_{se}$  i które z wyników podanych w rozprawie ilustrują wykorzystanie tej funkcji kosztu?
- [U18] Uwagi dotyczące układu treści i strony redakcyjnej tekstu dysertacji:
1. Opis w punkcie 2.4.1 dotyczący optymalizacji PPO nie jest wystarczająco szczegółowy i tym samym może być niezrozumiały dla czytelnika. Znaczenie symbolu  $\hat{E}$  użytego w równaniu (2.4.1) nie jest wyjaśnione. Interpretacja wzoru (2.4.2) nie została podana. Za wzorem (2.4.3) brakuje słowa 'where', a w tej samej linii symbol  $\phi$  powinien być indeksem dolnym funkcji 'V'. Ten sam symbol  $\epsilon$  został użyty na stronach 28 i 29 w dwóch różnych kontekstach.
  2. Byłoby korzystniej dla czytelnika, aby opis modelu pojazdu zawarty po raz pierwszy w rozdziale 3 był podany znacznie wcześniej, np. już w rozdziale 2, jako opis wprowadzający i ułatwiający wczesne zrozumienie przyjętej przez Autora struktury układu sterowania i planowania ruchu pojazdu.
  3. Zastosowana wielorzędowa numeracja podrozdziałów aż do poziomu czwartego (np. w rozdziale 5 na str. 136) wydaje się zdecydowanie za głęboka. Zazwyczaj nie stosuje się numerowania podrozdziałów głębszych niż stopnia drugiego (tj. głębszych niż X.X.X).
  4. Interpretacja składników we wzorze (3.3.6) nie jest do końca czytelna. Czy przyspieszenia tam występujące są z założenia zawsze dodatnie czy nie? Jaki jest zakres dopuszczalnych wartości 'maksymalnych' przyspieszeń występujących w mianownikach i jaka jest fizyczna interpretacja poszczególnych składników we wzorze (3.3.6)?
  5. Opis na stronie 61 jest nieściśły i nierygorystyczny. Mianowicie: nie wiadomo czym są 'G-forces'; jak należy rozumieć 'fuel efficiency' oraz 'desired velocity  $v_d$ '; element ' $p_{ex}$ ' (druga linia od dołu strony) nigdzie nie występuje; w ostatniej linii na tej stronie (we wzorze przybliżonym) brakuje wagi ' $w_{ex}$ ', nie wiadomo czym jest ' $t_i$ ' oraz ' $\Delta t$ ', a ostatnia suma na końcu strony 61 nie ma matematycznego sensu.
  6. Czytając definicję modelu błędu estymacji (4.3.8) na str. 88 nie jest jasne, jak to wyrażenie interpretować. Dopiero jego połączenie z równaniem (4.3.10) na str.89 ujawnia dynamiczny charakter modelu. Prezentacja tego modelu w tekście powinna podawać (4.3.10) i (4.3.8) równocześnie (lub w bezpośredniej bliskości), aby nie konfundować czytelnika. Poza tym przy pierwszym wprowadzeniu procesu Ornsteina-Uhlenbecka na str. 88 powinno być podane stosowne cytowanie do bibliograficznego źródła tego modelu. Podobnie niejasna jest interpretacja wzoru (4.4.4) - brak tutaj odpowiednika (4.3.10).
  7. Jaka jest poprawna kolejność składania odwzorowań podanych we wzorze (4.3.11) na str. 89? Wydawałoby się, że pierwotne odwzorowanie (dotyczące bezpośrednio pomiarów sensorycznych) powinno dotyczyć błędów estymacji stanu (czyli  $M^{state,est}$ ), a dopiero jego skutkiem są pozostałe błędy. Wówczas kolejność złożenia odwzorowań powinna być raczej odwrotna niż to zapisano w (4.3.11). Jak zatem rozumieć kolejność złożenia podanego w (4.3.11)?
  8. Opis sieci neuronowych na str. 97 ma charakter funkcjonalny, brakuje natomiast szczegółów



matematycznych. Jaką postać matematyczną mają poszczególne bloki oznaczone na schemacie z rys. 4.1? Czy można się tutaj odwołać do konkretnej literatury wyjaśniającej szczegóły matematyczne? Na rys. 4.1 brakuje też symboli stosownych sygnałów podanych w tekście pracy. Jak rozumieć konkatenację zaznaczoną na schemacie z lewej strony rys. 4.1?

9. W kilku miejscach (np. na str. 64, 94-95, 106, 134, 138) Autor pisze o stanowisku eksperymentalnym, eksperymentach lub wynikach eksperymentalnych, co jest mylące, bo żadnych wyników eksperymentów w dysertacji nie przedstawiono (podano tylko wyniki symulacji numerycznych). Jest to nadużycie terminologiczne.
10. Opis problemu modelowania sensorów podany w punkcie 4.2 mógłby być bardziej czytelny, gdyby podano jakiś prosty przykład ilustracyjny. Poza tym nie wiadomo z opisu czy symbole  $n_{s_c}$  i  $n_{\hat{s}_c}$  oznaczają to samo, w czwartej linii od dołu brakuje argumentu 't' w definicji zbioru, w równaniu (4.2.1) brakuje indeksu 'i' przy  $s_c$ , nie jest znane znaczenie symbolu 'n' w (4.2.3) i brakuje tego symbolu po prawej stronie wzoru (4.2.3).
11. Nazywanie wektora (4.3.1) 'stanem' jest mylące (w kontekście teorii systemów dynamicznych), ponieważ wymiary geometryczne nie są elementami stanu; poza tym przyspieszenie także nie powinno tu należeć do wektora stanu, bo wcześniej zostało potraktowane jako sterowanie w modelu pojazdu. Symbol  $\psi_i$  powinien oznaczać kąt orientacji platformy pojazdu a nie 'rotację'. Symbol  $p_d$  użyty w równaniu (4.3.2) nie został wyjaśniony.
12. Oznaczanie operacji mnożenia symbolem '\*' np. w równaniu (4.3.8) czy w (4.4.7) jest mało eleganckie, a oznaczanie np. w (4.3.8) oraz na str. 64 okresu próbkowania symbolem 'dt' (lub jako  $\Delta t$  na str. 133) jest mylące i nieściśle ('dt' zwykle oznacza różniczkę). Ponadto w pierwszym warunku we wzorze (4.3.8) chyba powinno być  $i \geq 1$  (zamiast  $i > 1$ ).
13. Zastosowana konwencja notacji matematycznej nie jest do końca spójna w rozprawie. Mianowicie dużymi wytłuszczonymi literami zwykle oznacza się macierze (w (4.3.8) symbol  $W$  oznacza jednak wektor), natomiast małymi literami wytłuszczonymi oznacza się zwykle wektory (jednak pod równaniem (4.3.10) symbolem 'p' oznaczono też macierze).
14. Autor w wielu miejscach (np. na str. 92-93) przy wyliczeniach matematycznych zamiast wielokropka '...' stosuje niepoprawny symbol '..' (tylko dwie kropki).
15. Interpretacja fizyczna elementów takich wektorów jak (4.5.2) byłaby łatwiejsza poprzez prezentację stosownego rysunku.
16. Argumenty odwzorowania (4.6.4) nie zostały zinterpretowane w tekście. Powyżej na tej stronie nie podano interpretacji dla  $g_{lon}$  i  $g_{lat}$ .
17. Wartości błędu estymacji prędkości (=20 m/s) i wariancji (=100) podane w tablicach 4.8 i 4.9 na str. 105 są bardzo duże. Jak jest uzasadnienie dokonania takiego wyboru?
18. Wydaje się, że parametr  $p_{rc,2}$  w definicji (5.3.4) powinien być dodatni (w przeciwieństwie do komentarza zawartego pod tym wzorem na stronie 129).
19. Wydaje się, że wykresy X-Y w rozdziale 5 prezentują zachowanie pojazdów jako widzianych w lokalnym układzie współrzędnych ego-pojazdu, co nie zostało wyjaśnione. Czy to jest właściwa interpretacja?
20. Autor w wielu miejscach pracy posługuje się wyrażeniem 'efficient trajectories' (np. na str. 43, 47, 60, 146), jednak znaczenie tego wyrażenia nie zostało wyjaśnione ani jakościowo ani ilościowo. Jak zatem należy to nieściśle wyrażenie rozumieć?
21. Nie znalazłem żadnego odwołania w tekście do następujących rysunków: 2.1, 2.4, 2.6, 2.7, 3.2, 3.3, 3.6, 4.2. Opis tablicy 2.1 na str. 12 powinien znajdować się nad tablicą. Brakuje odwołania bibliograficznego do następujących wzorów: (2.2.1), (2.2.2).
22. Symbol 'f' po prawej stronie (3.2.4) powinien być zapisany czcionką wytłuszczoną (funkcja wektorowa).
23. Niejasna jest interpretacja wzoru (4.3.4).
24. Podwektory w wektorze transponowanym należy także transponować, aby zachować właściwy wymiar wektora wypadkowego – por.: druga linia od dołu na str. 58, (4.5.2), (4.5.3), (5.2.3), (5.2.4).
25. Sformułowania językowe w pierwszej osobie liczby pojedynczej (np. 'based on my previous work' na

- str. 83, 'I will focus' na str. 91, 'I described' na str. 112 i inne podobne) raczej powinny być zastąpione wersjami bezosobowymi.
26. Sformułowanie postaci 'All policies were successfully trained [...]' ze str. 106 nie jest do końca ściśle – jak rozumieć znaczenie przysłówka 'successfully' w tym przypadku? Niezrozumiałe jest także stwierdzenie '[...] allowing for faster than real-time training of a policy [...]' ze strony 111. Jak można wykonać jakiegokolwiek obliczenia szybciej niż w czasie rzeczywistym? Takie stwierdzenie brzmi tutaj jak żargon lub skrót myślowy.
27. Dostrzeżone usterki/niezręczności językowe i błędy typograficzne: 'uwzględnianych robotyce' (brakuje 'w', Streszczenie); 'kontrolowanego pojazdu' ('sterowanego pojazdu', Streszczenie); 'opartych o' ('opartych na', Streszczenie); 'daptation' ('adaptation', str. 3), 'figure 2.2' ('Figure 2.2, str. 13); 'figure 2.3' ('Figure 2.3, str. 14); 'Simplest' ('The simplest' str. 24); 'ADAD' (ADAS, str. 36); '... the authors proposed providing...' (? ,str. 38); 'GAN' ('CAN', str 38); 'as input' ('as an input' str. 38); 'in 3.1.4' ('in Section 3.1.4', str. 42); 'for and represents' (? , str. 44); 'HD' (nieznany skrót, str. 44); 'the ego' ('the ego vehicle', str. 47 i w innych miejscach, np. na str. 59, 123); 'methods 3.2.1' ('methods from Section 3.2.1', str. 52); 't=1..' ('i=...', str. 52); 'an arbitray initial speed value' ('some finite positive initial speed value', str. 54); 'in 3.3.1' ('in Section 3.3.1', str. 56); 'rear vehicle applying' ('rear vehicle is applying', str. 57); brakuje indeksu 'min' przy 'd;' w opisie na str 59; na początkach sekcji 3.4.1.1, 3.4.1.2 i 3.4.2 brakuje odniesienia do wzoru (3.4.1); 'initial state is  $c_0$ ' (' $s_0$ ', str. 61); 'Cost term' ('A cost term', str. 61); 'section 3.3' ('Section 3.3', str. 62); opis nad tablicą 3.2 (str. 65) nie jest chyba do końca poprawny znaczeniowo; 'Road A' i 'Road B' zamiast Road 1' i 'Road 2' (por. rys. 3.12 i opis na str. 67); brak kwadratu w jednostce przyspieszenia na str. 68; 'table 3.3' ('Table 3.3', str. 68); nie jest jasne dlaczego liczba parametrów w tablicy 3.4 jest mniejsza niż w tablicy 3.3; 'section 4.5' ('Section 4.5', str. 82); 'the the' (str. 84); 'their stat is' ('state is', str. 88); 'in presence of' ('in the presence of', str. 93); 'broken line' ('dashed line', str. 96); brakuje wyjaśnienia symboli ' $\alpha$ ' użytych w podpisie Fig. 4.1 i w (4.5.4); nie jest jasne czy w tablicy 4.4 na str. 99 powinny być symbole wag 'w' czy symbole 'r' składowych funkcji nagrody (4.5.5); 'is the 'use of' (? , str. 112); 'and real-world' ('and a real world', str. 112); 'of complex simulation' ('of a complex simulation', str. 117); skróty RSS i SOTIF na str. 119 nie są wyjaśnione; 'is number' ('is a number', str. 124); opis postaci i znaczenia symbolu ' $x_i$ ' pod (5.2.2) na str. 124 nie jest jasny; brakuje definicji dla symboli ' $c_a(t)$ ' i ' $c_{ego}(t)$ ' na str. 125; symbol z lewej strony (5.2.5) jest niezdefiniowany; w modelu kinematyki pojazdu na rysunku 5.2 na str. 127 użyto niepoprawnie wektorów pozycji o symbolach innych niż wprowadzonych w modelu (3.2.6); nie jest jasne jak rozumieć nierówność dla wielkości wektorowych z 8 linii od góry na str. 128; symbol ' $c_{ed}$ ' użyty nad (5.3.6) nie jest zdefiniowany; nie wiadomo czym są wielkości wektorowe w (5.3.6); symbol ' $S_{scen}$ ' nie jest użyty we wzorze (5.3.8) – por. str. 131; postać wektora ' $O_{env}$ ' ze str. 132 nie została zdefiniowana.
28. W spisie literatury (str. 151-169) można zauważyć liczne braki w danych bibliograficznych takie, jak: numery stron i/lub numer wolumenu, i/lub numer wydania, i/lub miejsca konferencji/wydania, i/lub nazwy wydawcy, i/lub daty wydania (por. np. pozycje [6,13-18,21,22,24,27-30,32,34,37,40, 43,48,49,52,55-57,60-61,64,67,71,75-79,85-90,93,96-99,101,103,104,107,108,110,112-116,120,122, 125,126,128,130,132-135,139-142,144,146,148-151,162,164,165-167,169,171,174-175,178,181-184, 187,188,192-196,201-203,205]), a także brak dużych liter w nazwach własnych (por. np. pozycje [16,17,21,23,32,47,53,59,75,80,98,100,103,107,127,142,146,150,174,200]) oraz obecność dziwnych wielokropków (por. np. pozycje [123,149]). Poza tym pozycje [181] i [182] odnoszą się do tej samej publikacji.

## 5. Ocena spełnienia warunków wymaganych zapisami Ustawy (zgodnie z zaleceniami sformułowanymi w [RDN:22])

Algorytmy planowania oraz metoda zautomatyzowanej walidacji numerycznych planerów ruchu zaproponowane w rozprawie są w mojej ocenie interesującymi i oryginalnymi propozycjami rozwiązania trudnego, ważnego i bardzo aktualnego problemu badawczego jakim jest algorytmizacja bezkolizyjnego ruchu pojazdów inteligentnych i autonomicznych w warunkach dynamicznie zmiennych warunków i ograniczeń ruchu drogowego

oraz w obecności niepewności percepcyjnej. Za oryginalny wkład naukowy zawarty w rozprawie w szczególności uważam trzy osiągnięcia:

- opracowanie i numeryczną weryfikację koncepcji wielohipotezowej numerycznej algorytmizacji bezkolizyjnego ruchu (w postaci iteracyjnego planowania zbiorów bezpiecznych trajektorii sterowań kinematycznych) zautomatyzowanego pojazdu samochodowego poruszającego się w obecności ograniczeń stanu i sterowania w dynamicznie zmiennym środowisku drogowym, z wykorzystaniem predykcji możliwych przyszłych zmian stanu otoczenia pojazdu i innych użytkowników ruchu w celu znalezienia i późniejszej zautomatyzowanej realizacji bezkolizyjnych manewrów drogowych (także w przypadkach szczególnie krytycznych ze względów na bezpieczeństwo),
- opracowanie stochastycznych modeli podsystemów percepcji maszynowej (zarówno dla statycznych jak i dynamicznych elementów zmiennej sceny drogowej) dla zautomatyzowanego pojazdu samochodowego i ich wykorzystanie w procesie uczenia maszynowego do celów opracowania systemu algorytmizacji ruchu pojazdu o zwiększonej odporności na błędy percepcyjne, wraz z wykazaniem zalet tak opracowanego systemu algorytmizacji w zaprezentowanych statystycznych badaniach symulacyjnych,
- opracowanie i symulacyjna weryfikacja koncepcji zautomatyzowanego systemu generacji intencjonalnie antagonistycznych scenariuszy walidacyjnych do testowania słabych stron i wad ukrytych systemów planowania ruchu zautomatyzowanych pojazdów drogowych (w szczególności systemów stosujących techniki uczenia maszynowego).

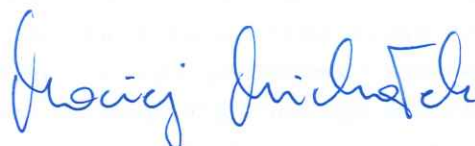
Kompleksowe podejście zaproponowane w rozprawie czyni zaprezentowane rozwiązania obiecującymi w kontekście spodziewanych wyników ich przyszłej walidacji eksperymentalnej oraz ich potencjalnego wykorzystania w prototypowych systemach zautomatyzowanej nawigacji i sterowania na pokładzie rzeczywistych pojazdów samochodowych. Część wyników jest rozszerzeniem treści dwóch artykułów opublikowanych przez Doktoranta - jednej w czasopiśmie *Electronics* (praca samodzielna) oraz drugiej (współautorskiej) zaprezentowanej w ramach międzynarodowej konferencji *Methods and Models in Automation and Robotics* (MMAR). Ponadto Doktorant jest współautorem jednego patentu przyznanego w USA o treści ściśle związanej z tematyką rozprawy. Obszerne i dobrze skonstruowane opisy merytoryczne dotyczące aktualnego stanu wiedzy i techniki w zakresie systemów algorytmizacji ruchu oraz systemów sensorycznych inteligentnych pojazdów zawarte w rozdziale drugim rozprawy, liczna i właściwie dobrana bibliografia, a także naukowo dojrzałe wnioski i rozważania Autora, komentujące zarówno dobrze zilustrowane zalety jak i ograniczenia zaproponowanych rozwiązań na tle aktualnego stanu wiedzy, pozwalają stwierdzić, że Doktorant prezentuje solidną wiedzę i umiejętności stosowania modeli i nowoczesnych metod obliczeniowych (w szczególności w obszarze uczenia maszynowego) do celów numerycznej algorytmizacji ruchu pojazdów inteligentnych (w tym autonomicznych), a Jego podejście do rozwiązywania postawionych problemów badawczych jest wyważone, odpowiedzialne i świadome większości ograniczeń charakterystycznych dla zastosowanych narzędzi algorytmicznych i metodyki badawczej. Poza tym Autor zna aktualnie obowiązujące przemysłowe akty normatywne ISO/IEEE związane z bezpieczeństwem systemów algorytmizacji ruchu zautomatyzowanych pojazdów. Wspomniane wyżej argumenty świadczą w mojej opinii o dojrzałości naukowej Doktoranta i o spełnieniu przez Niego wszystkich trzech warunków stawianych rozprawom doktorskim w zapisach Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*.

[RDN:22] Recenzje w postępowaniach o awans naukowy. Poradnik, Rada Doskonałości Naukowej, 2022.

## 6. Podsumowanie i konkluzja końcowa

Recenzowana rozprawa doktorska przedstawia oryginalne oraz interesujące propozycje rozwiązania trudnego i bardzo aktualnego zagadnienia badawczego, jakim jest algorytmizacja bezpiecznego ruchu pojazdu autonomicznego/inteligentnego w dynamicznym środowisku drogowym, w obecności ograniczeń konfiguracyjnych i sterujących pojazdu oraz w warunkach niepewności percepcyjnej stanu pojazdu i stanu środowiska ruchu. Rozprawa zawiera ciekawe i obiecujące wyniki numeryczne oraz wyważone i dojrzałe wnioski Autora, komentujące zarówno zalety jak i słabości opracowanych metod. Uwagi krytyczne sformułowane w recenzji mają częściowo charakter polemiczny, częściowo domagają się dodatkowych wyjaśnień i uzasadnień, a także mogą w pewnym

stopniu sugerować dalsze rozwinięcia/modyfikacje zaproponowanych algorytmów. Jednak uwagi te ani nie podważają zasadności głównej koncepcji rozwiązania problemu postawionego w rozprawie, ani istotności wyników w niej zawartych i tym samym nie zmieniają mojej pozytywnej oceny dysertacji wraz z jej zauważalnym oryginalnym wkładem w rozwój wiodącej dyscypliny naukowej jaką jest automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne (w zakresie dotyczącym tematyki recenzowanej pracy). Wobec argumentów przedstawionych w punkcie 5 recenzji **stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Wojciecha Turleja spełnia wszystkie wymagania ustawowe** formułowane w odniesieniu do rozpraw doktorskich i **wniosuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony** w ramach wyżej wymienionej dyscypliny wiodącej.



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