

dr hab. inż. Rafał Stanisławski, prof. uczelni
Katedra Informatyki
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Politechnika Opolska
e-mail: r.stanislawski@po.edu.pl

Opole, 9.02.2024
S E K R E T A R I A T
Rady Dyscypliny AEEITK
Wpłynęło dnia 19. 02. 2024
Zarejestrowano pod nr
Podpis 

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy:

Prediction model of an autonomous vehicle's behavior, based on Artificial Intelligence methods
Model predykcji zachowania się pojazdu autonomicznego oparty na metodach Sztucznej Inteligencji

Autor rozprawy: mgr inż. Nikodem Pankiewicz
Promotor rozprawy: dr hab. inż. Piotr Bania

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica, dra hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH, z 27 października 2023 roku.

1. Zawartość pracy i ocena formalna

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska zawiera łącznie 157 stron podzielonych na osiem rozdziałów, literatury liczącej 128 pozycji, streszczeń przedstawionych w języku polskim i angielskim, spisu rysunków oraz wykazów ważniejszych skrótów i oznaczeń. Dysertacja została napisana w języku angielskim. Zawartość rozprawy zaprezentowano poniżej.

W rozdziale pierwszym przedstawiono krótkie wprowadzenie do zagadnień poruszanych w pracy. Na tej bazie przedstawiono motywację do podjęcia przeprowadzonych badań oraz zaprezentowano szczegółowo obszar, zakres i strukturę dysertacji, jak również przedstawiono jej tezy. W rozdziale pierwszym przeprowadzono również szczegółową analizę literaturową, na tle której omówiono kluczowe osiągnięcia dysertacji.

Rozdział drugi przedstawia wprowadzenie do adaptacyjnych tempomatów stosowanych we współczesnych pojazdach samochodowych. W rozdziale scharakteryzowano zarówno sam obiekt regulacji, jak również cele stawiane układom sterowania w adaptacyjnych tempomatach. Omówione zostały także wymagania projektowe dla tych układów, które obejmują zarówno integrację z układami ruchu pojazdu, jak również poszczególnymi sensorami samochodu. W rozdziale drugim opisano także środowisko symulacyjne wykorzystane w pracy i omówiono stosowaną metodologię związaną z zasadami bezpieczeństwa. Rozdział drugi jest (dokładnie przeprowadzonym) właściwym wprowadzeniem do przedmiotu dysertacji.

W rozdziale trzecim przedstawiono wprowadzenie teoretyczne do matematycznych/algoritmicznych narzędzi stosowanych w pracy. W pierwszej kolejności omówiono metodologię uczenia ze wzmocnieniem (ang. *Reinforcement Learning* – RL) oraz wybrane algorytmy należące do tej



grupy. W rozdziale zawarto również opis podejścia do uczenia przez naśladownictwo (ang. *Imitation Learning*) i wybranych algorytmów w tej grupie. Również podjęto problematykę rozbieżności między symulacją a rzeczywistością oraz opis standardowych technik stosowanych do eliminacji tego zjawiska. Rozdział ten ma charakter teoretyczny.

Rozdział czwarty opisuje proces przeprowadzania badań w dedykowanym symulacyjnym środowisku eksperymentalnym. W rozdziale opisano zarówno założenia i warunki przeprowadzania eksperymentów, zaprezentowano środowisko symulacyjne, jak również przedstawiono pakiet danych uczących. W rozdziale pokazano także architekturę sieci neuronowych, wraz z ich wejściami i wyjściami, opisano dodatkowe założenia i omówiono pewne ograniczenia rozważanych rozwiązań. Rozdział jest wprowadzeniem do części badawczej pracy i opisuje warunki przeprowadzenia badań eksperymentalnych.

Rozdział piąty szczegółowo przeprowadza analizę wyników uzyskanych przez opracowane w dysertacji metody sterowania w adaptacyjnym tempomacie z zastosowaniem zarówno metod w wersji *off-line*, jak i *on-line*. Autor koncentruje się na opracowaniu polityki, która będzie w stanie adaptować się do różnych scenariuszy jazdy. Badania przeprowadzono w oparciu o wyniki otrzymane w środowisku symulacyjnym, jak również rzeczywiste dane eksperymentalne uzyskane przy użyciu pojazdu badawczego. W badaniach poruszono również problematykę suboptymalności wyników jak i przedstawiono rezultaty, które otrzymano poprzez łączenie uczenia modeli metodą *off-line* z mechanizmem adaptacyjnym pracującym w czasie rzeczywistym. Rozdział piąty ma charakter teoretyczno-praktyczny i stanowi istotny wkład Doktoranta w recenzowaną rozprawę doktorską.

Rozdział szósty dokonuje szczegółowej, krytycznej oceny porównawczej opracowanych układów regulacji przeprowadzonej dla różnych parametrów jazdy pojazdu. W rozdziale zawarto również szczegółowe podsumowanie przeprowadzonych eksperymentów, interpretację otrzymanych wyników i przedyskutowano ograniczenia proponowanych rozwiązań. Finalnie, wytypowano najbardziej efektywną metodę, tj. MARWIL (ang. *Monotonic Advantage Re-Weighted Imitation Learning*) bazującą na PPO (ang. *Proximal Policy Optimization*). Rozdział szósty ma charakter praktyczny i również stanowi istotny wkład Doktoranta w recenzowaną rozprawę doktorską.

Interesujące rozwinięcie rozwiązań rozważanych w pracy w zakresie narzędzi uczenia zostało przedstawione w rozdziale siódmym. Zaproponowana autorska metoda wykorzystuje próbki trajektorii zebrane w fazie pierwszej i określa, w jakim stopniu dana cecha wejściowa wpływa na działanie agenta. Dzięki temu możliwe jest oszacowanie wag opisujących wpływ poszczególnych cech wejściowych na działanie agenta. Metoda ta pozwala na zrozumienie zachowania agenta i sprawdzenie, czy proces podejmowania decyzji jest zgodny z ludzką intuicją. Podobnie jak Rozdziały piąty i szósty, rozdział siódmy zawiera duży wkład naukowy Doktoranta.

W rozdziale ósmym zostało zawarte podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań, wraz z odniesieniem do postawionych tez dysertacji. W rozdziale przedstawiono również kierunki potencjalnych przyszłych prac Doktoranta.

Układ pracy jest poprawny. Treści dysertacji zostały logicznie podzielone na poszczególne rozdziały pracy. Układ i zakres poszczególnych rozdziałów, podrozdziałów i sekcji nie budzi żadnych wątpliwości Recenzenta.

Warta podkreślenia jest dobra strona edycyjna pracy. Rozdziały, podrozdziały, sekcje, nagłówki, stopki itp. utrzymane są w tej samej konwencji, przez co praca bardzo dobrze wygląda. Rysunki są bardzo starannie przygotowane z dbałością o estetyczne i precyzyjne przedstawienie gra-

ficzne zastosowanych algorytmów i wyników badań. Język użyty w pracy jest czytelny i precyzyjny, przez co pracę czyta się dobrze. Warty podkreślenia jest również fakt, że praca została napisana w języku angielskim, co daje szansę na zwiększenie grona jej potencjalnych odbiorców. Rozprawa jest również dokładnie opracowana redakcyjnie. Nieliczne błędy typograficzne i stylistyczne zostały wypunktowane w dalszej części recenzji.

2. Ocena merytoryczna pracy

Zagadnienia związane z systemami automatyki i diagnostyki stosowanymi w pojazdach samochodowych są w ostatnich latach szeroko eksplorowane w obszarach łączących kilka dyscyplin nauk inżynieryjno-technicznych tj. *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, Informatyka Techniczna i Telekomunikacja* oraz w pewnych aspektach *Inżynieria Lądowa i Transport*. Szczególnie intensywny rozwój tego obszaru badawczego był (i jest) związany z rozwojem układów cyfrowych, które są szeroko wykorzystywane w wielu systemach pojazdów samochodowych. Świadczy o tym również stale zwiększający się udział kosztów układów elektronicznych w końcowej cenie samochodów. W ostatnich latach szczególnie intensywnie prowadzone są badania w kierunku automatyzacji ruchu pojazdu, począwszy od wsparcia kierowcy w ramach pierwszego poziomu autonomiczności, poprzez bardziej złożone systemy częściowej automatyzacji jazdy (poziom drugi), aż do zintegrowanych systemów autonomicznej jazdy w ramach poziomu trzeciego. Jest to obecnie jedno z kluczowych zagadnień związanych zachowaniem bezpieczeństwa pojazdu w ruchu drogowym. Zarówno w zakresie wsparcia kierowcy, ale w szczególności w zakresie wyeliminowania kierowcy w systemach autonomicznych, kluczowe są a) analiza otoczenia i rozpoznawanie przeszkód w okolicach pojazdu, b) sterowanie torem jazdy oraz c) sterowanie prędkością pojazdu. W zakresie sterowania prędkością pojazdu w ostatniej dekadzie klasyczne tempomaty, których celem była stabilizacja prędkości pojazdu na wartości zadanej, są zastępowane znacznie bardziej zaawansowanymi tempomatami adaptacyjnymi, które (w różnym stopniu) dostosowują prędkość pojazdu do jego otoczenia. Jednak, liczne ograniczenia zdecydowanej większości obecnych rozwiązań oraz dość niski poziom autonomiczności sprawia, że jest to obszar wymagający dalszego rozwoju. Autor porusza właśnie problematykę opracowania algorytmów pracy tempomatu adaptacyjnego w oparciu o narzędzia sztucznej inteligencji w postaci sieci neuronowych i specyficznych algorytmów uczenia. Zastosowanie narzędzi sztucznej inteligencji wydaje się trafne w odniesieniu do dużej rozpiętości zdarzeń, które muszą zostać przewidziane w tych narzędziach. Jednak nauczanie w tym przypadku wymaga dużej ilości danych, które mogą być trudne do zgromadzenia. Dlatego idea połączenia uczenia sieci z zastosowaniem danych symulacyjnych i rzeczywistych oraz połączenia technik uczenia *off-line* i *on-line* wydaje się być dobrym kierunkiem, który jednocześnie dobrze wpisuje się w obecne trendy w literaturze światowej.

W związku z powyższym Autor podejmuje pracę w ważnym i aktualnym obszarze badań, który ma swoje podstawy w światowej literaturze naukowej, jak również daje możliwości osiągnięcia nowych, istotnych wyników szczególnie w ujęciu praktycznym. Recenzent jednoznacznie umiejscawia przedmiotową dysertację w dyscyplinie *Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne* w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych.

Autor przedstawił sobie cel opracowania nowych rozwiązań w zakresie adaptacyjnej regulacji prędkości w ramach tempomatów pojazdów samochodowych z zastosowaniem sieci neuronowych

oraz przy wykorzystaniu wybranych narzędzi uczenia. Autor postawił następujące tezy pracy, które odnoszą się do procesów uczenia sieci neuronowych w tempomatach adaptacyjnych:

Polityka treningu, która wykorzystuje zarówno dane rzeczywiste, jak i symulowane, zgodnie z przedstawioną konwencją, istotnie poprawia wydajność w warunkach rzeczywistych w porównaniu z wykorzystaniem wyłącznie danych symulowanych.

Zaprezentowane połączenie metod uczenia się *off-line* i *on-line* zmniejsza ograniczenia każdej z tych metod szkoleniowych.

Tezy pracy zostały sformułowane nieco nieformalnie, choć jak najbardziej poprawnie. Ponadto Autor wyodrębnił podrozdział w ramach podsumowania (Podrozdział 8.2), który przeznaczony został wyłącznie na omówienie dowodów tez rozprawy.

Zawartość rozprawy, opisana w poprzednim punkcie recenzji, wynika bezpośrednio ze sformułowanych zadań i tez dysertacji. Do podstawowych osiągnięć dysertacji można zaliczyć:

- Wykorzystanie w procesie uczenia sieci neuronowych przez wzmocnianie (ang. *Reinforcement Learning*) połączenia danych symulacyjnych z danymi rzeczywistymi. Takie ulepszenie zapewnia lepsze pokrycie rozkładu stanów dzięki wykorzystaniu symulacji, a jednocześnie minimalizuje problematykę sztuczności danych dzięki wykorzystaniu rzeczywistych danych.
- Zastosowanie specyficznego mechanizmu randomizacji domeny w procesie uczenia przez wzmocnianie, który obsługuje szeroki zakres cech środowiskowych.
- Zaproponowanie autorskiego algorytmu uczenia się przez naśladowanie, które jest oparte na optymalizacji operacji na zbiorze danych. Optymalizacja prowadzi do poprawy jakości rezultatów.
- Zaproponowanie autorskiej hierarchicznej, modułowej architektury systemu ruchu, zapewniającej integrację narzędzi sztucznej inteligencji z klasycznymi narzędziami stosowanymi w tym zakresie w pojazdach samochodowych.
- Przeprowadzenie, krytycznej oceny porównawczej opracowanych układów regulacji dla różnych aspektów jazdy pojazdu samochodowego.

Finalnie w ramach pracy powstało nowe, oryginalne rozwiązanie systemów regulacji prędkości w tempomacie adaptacyjnym, które jest oparte na narzędziach sztucznej inteligencji. Osiągnięte rezultaty pokazują, że a) opracowane algorytmy regulacji cechują się wysoką efektywnością wg. szerokiego wachlarza wskaźników oceny oraz b) zapewniają modułową strukturę pozwalającą na integrację z wbudowanymi układami pojazdu. Opracowany system należy zaliczyć do głównego osiągnięcia recenzowanej pracy.

Podsumowując należy jednoznacznie stwierdzić, że wszystkie wyżej wymienione osiągnięcia są znaczące i stanowią istotny wkład Kandydata w rozwój dyscypliny *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne* oraz finalnie doprowadziły do osiągnięcia celów pracy. Ponadto otrzymane w dysertacji wyniki jednoznacznie udowadniają postawione tezy.

W kontekście opracowanego rozwiązania praca ma charakter praktyczny, aczkolwiek w celu jego zbudowania Autor osiągnął również pewne rezultaty teoretyczne. Nowe rozwiązania teoretyczne



Kandydata przedstawiono we fragmentach rozdziału trzeciego, jednak główny teoretyczny wkład Autora stanowią rozdziały piąty oraz siódmy. Główny wkład praktyczny Kandydata stanowią natomiast rozdziały piąty i szósty.

3. Analiza źródeł, pozycja rozprawy, znaczenie wyników Autora, umiejętność przedstawiania wyników

Motywacja dla podjęcia tematu rozprawy wyniknęła z dobrze przeprowadzonej przez Autora analizy literatury przedmiotu, liczącej 128 pozycji. Dzięki temu został poprawnie odzwierciedlony aktualny stan wiedzy na temat wszystkich zagadnień podejmowanych w pracy.

Pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy reprezentowanej w literaturze światowej jest bardzo dobra. Autor dysertacji jest współautorem artykułu w czasopiśmie indeksowanym na liście JCR tj. *Electronics* i oraz kilku referatów na konferencjach międzynarodowych tj. *International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing*, *International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics* oraz *Polish Control Conference*. Ponadto o dużej wartości praktycznej dysertacji świadczy złożony przez Doktoranta wniosek o ochronę patentową w amerykańskim urzędzie patentowym. Dorobek publikacyjny Doktoranta spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim, a jego aktywność publikacyjna jest ponadprzeciętna.

Autor posiadał umiejętność poprawnego, przekonującego i precyzyjnego przedstawiania uzyskanych przez siebie wyników. Zarówno rozprawę, jak również artykuły Doktoranta cechuje zwięzłość, jasność języka oraz precyzja.

4. Wady rozprawy, słabe strony, uwagi i pytania

Należy podkreślić, że poziom merytoryczny ocenianej dysertacji jest bardzo wysoki i Recenzent nie dostrzegł w niej istotnych wad i niedostatków. Jednak warto wskazać na pewne, w większości drobne uchybienia oraz niejasności. Uwagi zostały wypunktowane i podzielone na dwie grupy, a) uwagi dyskusyjne i pytania oraz b) drobne uchybienia typograficzne i stylistyczne.

Uwagi dyskusyjne i pytania:

- 1) W rozdziale piątym na niektórych przebiegach czasowych zaobserwować można liczne nieciągłości (np. Rys. 5.9–5.11, 5.16, 6.2–6.3). Czy Doktorant mógłby objaśnić dokładniej przyczynę ich występowania?
- 2) Pomimo wielu wskaźników użytych do oceny jakości regulacji prędkości pojazdu, Recenzent nie zauważył oceny efektywności energetycznej zaproponowanego rozwiązania. Wydaje się, że w przypadku praktycznej implementacji tempomatu adaptacyjnego uwzględnienie zużycia paliwa istotnie podniosłoby jego walory praktyczne. A wydaje się, że w przypadku wielu scenariuszy jazdy, oszczędności mogłyby być znaczące.
- 3) Czy Doktorant ma możliwość porównania zaproponowanego rozwiązania z innymi tempomatami adaptacyjnymi stosowanymi fabrycznie w samochodach dla wybranych scenariuszy jazdy?



Drobne uchybienia, w tym typograficzne i stylistyczne:

- Strona 24 równanie (3.1). Błąd typograficzny w równaniu.
- Strona 24, równanie (3.2). Błędy interpunkcyjne w opisie oznaczeń.
- Strona 25, równanie (3.4). Błędy interpunkcyjne w opisie oznaczeń.
- Strona 27, po równaniu (3.6). Odnośniki do równań powinny być podane w nawiasach. Ponadto odnośniki do równań powinny występować po równaniu.
- Strna 27, równanie (3.8). Błąd typograficzny w równaniu.
- Strna 28, równanie (3.12). Błąd typograficzny w równaniu.
- Strna 28, równanie (3.13). Wątpliwości budzą oznaczenia w równaniu.
- Strna 33, równanie (3.26). Błąd typograficzny w równaniu.
- Strona 35, linie 9-10. Uchybienie stylistyczne,
- Cała praca. Brak konsekwencji w pisaniu *hyperparameter/hyper parameter*.

Należy podkreślić, że przedstawione powyżej uwagi i pytania nie obniżają bardzo pozytywnej oceny pracy.

5. Podsumowanie recenzji i wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi, zdaniem Recenzenta, oryginalne rozwiązanie ważnego problemu naukowego oraz wykazuje dużą ogólną wiedzę teoretyczną i aplikacyjną Kandydata w dyscyplinie naukowej *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne*, a także Jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Zatem stwierdzam, że **rozprawa mgr inż. Nikodema Pankiewicza spełnia z nadmiarem** kryteria stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora w Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późn. zm.).

W związku z powyższym, uwzględniając oryginalność rozwiązania problemu naukowego przedstawionego w rozprawie, specjalistyczną wiedzę Kandydata oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej **wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Nikodema Pankiewicza do dalszych etapów przewodu doktorskiego** w dyscyplinie *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne*.

Rafal Stanislawski