

Gliwice, 4.02.2024 r.

Dr hab. inż. Adam Gałuszka, prof. Uczelni  
Politechnika Śląska,  
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki  
Katedra Automatyki i Robotyki  
ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice  
[adam.galuszka@polsl.pl](mailto:adam.galuszka@polsl.pl)

SEKRETARIAT  
Rady Dyscypliny AEEITK

13. 02. 2024

Wpłynęło dnia .....

Zarejestrowano pod nr .....

Podpis .....

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: Prediction model of an autonomous vehicle's behavior, based on Artificial Intelligence methods

Autor rozprawy: mgr inż. Nikodem Pankiewicz

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Piotr Bania, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Dziedzina: nauki inżyniersko-techniczne

Dyscyplina: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne

Niniejsza recenzja została przygotowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, dr. hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH pismem z dnia 27.10.2023r.

### 1. Cel i zakres rozprawy

Rozprawa doktorska ma charakter wdrożeniowy i dotyczy rozwoju jednej z funkcji zautomatyzowanej jazdy, tj. trybu adaptacyjnego tempomatu (Adaptive Cruise Control). Podjętym problemem badawczym jest opracowanie i implementacja zbioru reguł decyzyjnych odpowiedzialnych za planowanie przyszłych zachowań pojazdu z wykorzystaniem wybranych metod sztucznej inteligencji, w szczególności uczenia ze wzmacnianiem i uczenia przez naśladowanie, w trybach wykorzystujących dane uczące symulowane (offline) oraz dane rzeczywiste zbierane podczas jazd testowych (online). W ramach badań Autor analizuje problem przenoszenia opracowanych zbiorów reguł ze środowiska symulowanego do rzeczywistego i opracowuje metody, które łagodzą lukę sim2real. Proponowane metody integrują dane symulowane z danymi rzeczywistymi z jazd testowych w procesie uczenia się.

Celem pracy jest wykazanie, że umiejętne wykorzystanie danych rzeczywistych podczas procesu uczenia prowadzi do zwiększenia efektywności opracowanego systemu

regulowego. Realizacja celu jest osiągnięta poprzez udowodnienie zaproponowanej tezy pracy: system uczący wykorzystujący zarówno rzeczywiste, jak i symulowane dane znacznie poprawia wydajność w środowisku naturalnym w porównaniu do systemu wykorzystującego tylko dane symulowane. Oczekuje się również, że zaproponowana w pracy kombinacja metod uczenia offline i online złagodzi ograniczenia obu metod uczenia.

## 2. Struktura i zawartość rozprawy

Recenzowana praca doktorska liczy 135 stron i obejmuje osiem rozdziałów, jeden dodatek oraz spis literatury. Praca napisana jest w języku angielskim i jej zaletą jest jasny i zrozumiały (choć miejscami nieprecyzyjny) przekaz dla czytelników prac z dziedziny nauk technicznych.

Zasadnicza część rozprawy liczy łącznie 113 stron, a spis bibliografii liczy 128 aktualnych pozycji ściśle związanych z tematem rozprawy. Praca rozpoczyna się wstępem, w którym przedstawiono motywację i tezę postawioną w rozprawie.

Rozdział 2 przedstawia założenia pracy, wybór zmiennych stanu, modele dynamiczne pojazdu, schemat układu planowania ruchu pojazdu. Założenia obejmują integrację modelu pojazdu z otoczeniem, wykorzystane czujniki pojazdu, narzędzia symulacyjne użyte do eksperymentów, oraz założenia dotyczące reguł bezpieczeństwa wraz z odniesieniem do kodeksu ruchu drogowego.

W rozdziale 3 Autor wyjaśnia metodologię oraz algorytmy uczenia ze wzmocnieniem, uczenia się przez naśladowanie oraz opisuje problem rozbieżności między symulacją a środowiskiem rzeczywistym.

Rozdział 4 zawiera opis konfiguracji eksperymentalnej opracowanej w celu osiągnięcia celu projektu zgodnie z założeniami. Kolejne części tego rozdziału opisują środowisko eksperymentalne symulowane, zebrany zestaw danych, architekturę sieci neuronowej i funkcję nagrody wykorzystywanej w procesie uczenia.

Rozdział 5 wyjaśnia opracowane metody rozwoju agentów RL zdolnych do prowadzenia pojazdów w warunkach naturalnych.

W rozdziale 6 przedstawiono w pierwszej kolejności kryteria oceny i metodologię opracowaną do celów porównawczych reguł trenowanych przy użyciu różnych podejść. Następnie przedstawiono proces ewaluacji wyuczonych reguł zachowań według zaprezentowanej metody.

Rozdział 7 przedstawia nowatorski algorytm wyjaśnialności reguł pozwalający na weryfikację agentów pod kątem zgodności z ludzką intuicją. Metoda przedstawia podejście dla agentów działających w ciągłej lub dyskretnej przestrzeni działania.

Całość pracy zakończono wnioskami (rozdział 8).

### 3. Najważniejsze osiągnięcia rozprawy

Biorąc pod uwagę zawartość pracy, za główne osiągnięcia Autora należy uznać:

- 1) zaproponowanie kompleksowej metody opracowywania reguł zachowania kierowcy w warunkach rzeczywistych przy użyciu metod uczenia ze wzmacnianiem. Strategia zachowania jest odpowiedzialna za przewidywanie następnej wartości przyspieszenia, którą pojazd powinien wykonać w określonym horyzoncie czasowym;
- 2) zaproponowanie i symulacja szeregu scenariuszy testowych;
- 3) zaproponowanie metody redukcji problemu ograniczenia danych w algorytmach uczenia przez naśladowanie poprzez uwzględnienie danych rzeczywistych z jazd testowych, pozwalające na redukcję tzw. luki sim2rea;
- 4) uwzględnianie w procesach uczenia zjawiska katastrofalnej interferencji poprzez odpowiednie włączenie rzeczywistych danych podczas procesu uczenia. Dodatkowo, trening RL jest wspierany przez metodę uczenia programowego;
- 5) zaproponowanie metod oceny wyuczonych reguł zachowania;
- 6) porównanie efektywności wyuczonego systemu z wydajnością testowego kierowcy oraz bazową strategią pozyskaną standardowymi metodami uczenia ze wzmacnianiem;
- 7) opracowanie metodologii pozwalające na ocenę wiarygodności modelu zachowania przy pomocy statystycznej analizy badającej wpływ elementów wejściowych do systemu na wybrane przez sieć neuronową zachowanie. Metodologia wykorzystuje próbki trajektorii zebrane podczas pierwszej fazy oceny i określa zakres, w jakim dana cecha wejściowa wpływa na działanie agenta oraz wskazuje związek między decyzjami, znaczeniem cech wejściowych i ich wartościami. Zaproponowana metoda tym samym pozwala na zrozumienie zachowania agenta oraz określa, czy proces podejmowania decyzji jest spójny z ludzką intuicją, czy też jest z nią sprzeczny.

Powyższe, najważniejsze elementy rozprawy decydująca o jej wartości naukowej i badawczej. Należy zauważyć, że Autor podjął się realizacji bardzo ciekawego oraz istotnego z punktu widzenia praktycznych zastosowań tematu badawczego. Poszczególne wyniki badań

zostały opublikowane w kilku współautorskich pracach w języku angielskim, co świadczy pozytywnie o dużej wiedzy Autora rozprawy w zakresie poruszanej tematyki badawczej.

Uważam, że opiniowana rozprawa podejmuje ważny i aktualny problem naukowy. Elementy nowości przejawiają się w autorskim modelu hybrydowym sieci neuronowej, wykorzystującej dane rzeczywiste i symulowane oraz algorytmach i metodologiach uczenia oraz ocen uzyskanych wyników. Podjęcie przedstawionej problematyki jest uzasadnione zarówno ze względów poznawczych, jak i możliwości wielu praktycznych zastosowań związanych z rzeczywistymi systemami aktywnych tempomatów.

#### 4. Poprawność pracy i uwagi krytyczne

Poprawność treści rozprawy nie wzbudza zastrzeżeń, a stwierdzenia w niej zawarte stanowią podstawę do kontynuowania badań, co wynika w szczególności z przedstawionych podstaw teoretycznych popartych wynikami przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Praca jest bardzo dobrze przygotowana pod względem edytorskim

Brak znaczących uwag krytycznych. Poniżej wymieniono uwagi o charakterze dyskusyjnym:

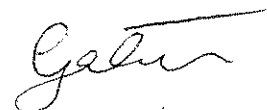
- 1) W pracy widoczny jest brak porównania budowanego systemu z innymi systemami aktywnych tempomatów. Czy wynika to z braku porównywalnych systemów? Proszę o krótkie uzasadnienie.
- 2) Formuła 2.1, wybór zmiennych stanu. Dlaczego w wektorze stanu nie uwzględniono przyspieszenia? W jaki sposób zapewniano dokładność danych dotyczących położenia pojazdu?
- 3) Formuła 2.15, funkcja nagrody. Wszystkie komponenty są ujemne, a w innych miejscach pracy funkcje nagrody są inaczej definiowane, np. formuła 4.6. Dlaczego? Dodatkowo, wartości funkcji nagrody są na wszystkich wykresach dodatnie (np. rys.4.9), czy przewidziano scenariusze testowe, dla których funkcja nagrody jest ujemna?
- 4) Rysunek 2.4: czujniki. W jaki sposób dokonano fuzji sensorycznej dla estymacji położenia, prędkości i przyspieszenia? Czy system wymaga kalibracji np. po przejechaniu jakiegoś dystansu?
- 5) Punkt 2.4: system RSS. Czy zbiór przyjętych pięciu reguł jest zamknięty? Jeśli tak, to dlaczego?

- 6) Formuła Str. 54, dane: Autor wspomina o zbieraniu danych na autostradach. Czy dane były zbierane przez Autora i czy zespół?
- 7) Rysunki 5.3 do 5.6: Przebiegi czasowe trwają 35 sekund. Skąd taki okres?
- 8) Rysunki 5.9 do 5.1: Przebiegi czasowe trwają nieco ponad 50 sekund. Skąd taki okres?
- 9) Sekcja 6.2: KPI. W tabelach 6.1, 6.2 oraz 6.3 wspomiano o 3 wskaźnikach: Collisions, CauseCollisions oraz NotCauseCollisions, nie zdefiniowano ich w sekcji 6.2. Jak są wyliczane i jaka jest ich interpretacja?
- 10) Tabele 7.2 (brak jednego wyniku) i 7.3: Dane korelacyjne. W tekście nie przeanalizowano uzyskanych danych korelacyjnych. Podpisy pod tabelami sugerują tylko korelacje dla jednego atrybutu (vs\_limit\_exec). Proszę o wyjaśnienie i interpretację;
- 11) We wstępie Autor sugeruje, że wyniki badań będą wdrażane przez firmę dla użytkownika końcowego. Czy część wyników prac jest przedmiotem postępowania patentowego?
- 12) Jak zmieniają się parametry planowanej trajektorii w przypadku zmiany warunków pogodowych? Które z parametrów systemu miałyby wpływ na takie zmiany?
- 13) Drobne uwagi szczegółowe, np:
  - Rys.2.1 – brak  $F_x, r$ ;

## 5. Podsumowanie

Przytoczone wyżej uwagi dyskusyjne nie umniejszają zasług Autora ani nie kwestionują przedstawionych osiągnięć, a opisywana w pracy problematyka dotyczy aktualnych i interesujących zagadnień naukowych. Recenzowana praca ma charakter wdrożeniowy, zasługuje na wysoką ocenę merytoryczną i wnosi istotny oraz oryginalny wkład w dyscyplinę automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Postawione cele i zadania pracy zostały zrealizowane, a jej tematyka wpisuje się we współczesny nurt badań w tym zakresie. Warto zauważyć, że Autor jest również współautorem sześciu publikacji notowanych w bazie SCOPUS, w tym, jako pierwszy autor, zasługującej na szczególną uwagę: Attribution Analysis of Reinforcement Learning-Based Highway Driver w Electronics (Switzerland), 2022, 70(4), posiadającą impact factor.

Stwierdzam zatem, że opiniowana rozprawa mgr inż. Nikodema Pankiewicza pt. „Prediction model of an autonomous vehicle’s behavior, based on Artificial Intelligence methods” zawiera samodzielne rozwiązanie ważnego i istotnego problemu



naukowego. Recenzowana praca doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574 z późn zm.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, tak więc wnoszę o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Adam Gałuska