

12 lipca 2024 r.

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej
mgra inż. **Zbigniewa Żelaznego**

pt.

„Reaction time estimation in automated braking system for land vehicles controlled by algorithmic artificial intelligence module”

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej z dnia 26.04.2024 roku (nr W10/D/32/2024).

1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do zaopiniowania rozprawa doktorska, nie należy do typowych prac doktorskich, a o jej specyfice decyduje kilka aspektów. Przede wszystkim ma ona charakter eksperymentalny i nowatorski w zakresie poszukiwania innowacyjnego rozwiązania estymowania czasu reakcji w autonomicznych układach hamulcowych pojazdów lądowych kontrolowanych przez sztuczną inteligencję. Praca ta jest napisana w języku angielskim, a ponadto jest ona podsumowaniem kilkuletnich prac doktoranta nad pojazdem autonomicznym. Kolejną specyficzną cechą rozprawy jest innowacyjny charakter w zakresie wykorzystania sztucznej inteligencji w kilku obszarach inżynierii pojazdowej włącznie z wykorzystaniem powietrznych statków latających do jego sterowania.

Opiniowana praca doktorska opisuje wybrany aspekt związany z budową Pierwszego Polskiego Pojazdu Autonomicznego w ramach projektu „Jurek” w Katedrze Pojazdów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Piotr Wrzecionarz, a promotorem pomocniczym jest dr hab. inż. Radosław Wróbel, prof. PWr. Na uwagę zasługuje trafnie sformułowany tytuł pracy określający estymację czasu reakcji, ponieważ w użyciu algorytmów sztucznej inteligencji nie powinniśmy używać słów związanych z obliczeniem czasu reakcji. Estymacja jako słowo, według słownika języka polskiego, dotyczy szacowania nieznanych parametrów w tym przypadku czasu reakcji autonomicznego układu hamulcowego EMB (Electromechanical Braking System) w pojeździe lądowym, przy czym użycie słowa „szacowanie” nie jest poprawne w moim odczuciu, ponieważ czas ten jest wyliczany na podstawie obliczeń numerycznych użytych algorytmów sztucznej inteligencji zamodelowanych w programie Matlab. Algorytmy sztucznej inteligencji mogą być zamodelowane w strukturach, co

skutkuje tym że wynik nie jest powtarzalny w 100%. Ponadto system ten zamontowany w pojeździe autonomicznym jest wspierany przez szereg czujników (systemów), w tym monitorowanie toru jazdy z użyciem bezzałogowego statku powierzanego. Takie rozwiązania jak opisane w pracy w postaci pojazdów autonomicznych stanowić będą w przyszłości, niewątpliwie kolejny element rozwoju cywilizacji, w tym będą następnym krokiem rozwoju motoryzacji po jej elektryfikacji.

Pojazd autonomiczny, ang. Autonomous Vehicle (AV), nie jest zdefiniowany precyzyjnie w literaturze technicznej języka polskiego, jednak jego definicję odnaleźć można w publikacjach unijnych, zgodnie z którymi pojazd autonomiczny to „w pełni zautomatyzowany pojazd wyposażony w technologie zdolne do wykonywania wszystkich funkcji jazdy bez interwencji człowieka”. Słowa „bez interwencji człowieka”, są niespójne z klasyfikacją pojazdów autonomicznych wykonaną przez Międzynarodowe Stowarzyszenie Inżynierów Motoryzacyjnych (ang. International Society of Automotive Engineers (SAE)), gdzie według standardu SAE J3016 wskazano na sześć poziomów autonomiczności pojazdów. Pierwszy poziom oznaczony „level 0” to pojazdy, które informują o zagrożeniu na drodze, ale nie reagują na nie – to zadanie nadal należy do kierowcy. To kierowca je kontroluje, a na podstawie komunikatów podejmuje decyzje o tym, jak zachować się na drodze. Natomiast ostatni poziom „level 5” to pojazdy, przyszłości, które będą w pełni odpowiedzialne za jazdę. Kierowca będzie miał wtedy tylko jedno zadanie – wprowadzić dane do komputera na temat docelowego adresu. Resztę zrobią za niego systemy automatyczne zabudowane w pojeździe. Według europejskiej rady doradczej ds. badań transport drogowego „European Road Transport Research Advisory Council (ERTRAC)” wprowadzenie takich pojazdów na drogi europejskie jest szacowane na lata 2026-2030. Zatem odnosząc to do tego okresu czasu, przedstawiona praca do recenzji jest osadzona w aktualnej tematyce i dotyczy swym obszarem bardzo aktualnych zagadnień związanych z bezpieczeństwem poruszania się pojazdów autonomicznych na drogach. Jest to ważne z uwagi na potrzebną w tych pojazdach wiedzę co do czasu reakcji poszczególnych systemów, w tym przypadku czasu reakcji układu hamulcowego. W pojazdach autonomicznych jest też ważna kwestia trwałości i niezawodności działania poszczególnych układów zabudowanych w pojeździe, dlatego w pracy, w celu estymacji czasu reakcji wykorzystano systemy redundantne, gdzie informacje dotyczące działania systemu są wnioskowane z trzech niezależnych systemów tj. z radaru, kamery i czujników.

O ile w stanie techniki są opisane rozwiązania dla pojazdów autonomicznych, to szczegóły ich sterowania zachowywane są w tajemnicy, a zintegrowanie ich w jedną całość w celu estymacji czasu reakcji autonomicznego układu hamulcowego w pojeździe z wykorzystaniem powietrznych statków latających jest rozwiązaniem innowacyjnym, na które to rozwiązanie Doktorant pracy pracował wiele lat. Na tej podstawie można stwierdzić, że Doktorant dobrze dobrał temat rozprawy doktorskiej, a przede wszystkim jej praktyczna realizacja w realnym pojeździe wymagała rozwiązania wielu problemów technologicznych z użyciem do ich kontroli sztucznej inteligencji. Sprawia to, że oceniana rozprawa doktorska ma niewątpliwie aspekt naukowy i jest dobrze osadzona w aktualnych badaniach naukowych i może przyczynić się do zmniejszenia liczby wypadków na drodze.

2. Zawartość pracy i układ rozprawy

2.1. Ogólna charakterystyka rozprawy i oryginalność tematu

Oceniana praca zawiera opis prac wykonanych na Politechnice Wrocławskiej w Katedrze Inżynierii Pojazdów dotyczących budowy pojazdu autonomicznego w projekcie „Jurek”, w którym Doktorant był liderem zespołu. Podjęty temat w pracy nad autonomicznym układem hamulcowym jest na czasie, ale i innowacyjny w swej treści. Wykorzystanie sztucznej inteligencji połączonej z szeregiem czujników, a do tego zbudowanie stanowiska do testów metodą HIL wymagało od Doktoranta wiedzy z wielu obszarów techniki, ale też jest zagadnieniem wielowątkowym. Obecnie wiele koncernów motoryzacyjnych pracuje nad pojazdami autonomicznymi, czy też jest w fazie testów, w tym czołowi producenci jak Tesla, Toyota, Volkswagen, Mercedes czy Audi. Systemy te wymagają ciągłego rozwoju i każdy pomysł w tym zakresie jest wartym analizy, z uwagi na bezpieczeństwo człowieka. Jak podaje światowa organizacja zdrowia rocznie w wypadkach drogowych ginie ponad 12 mln osób a blisko 90% tych wypadków powstaje z winy kierowcy. Zastosowanie układów autonomicznych przynajmniej na drugim poziomie „level 2” znacząco poprawia bezpieczeństwo kierujących pojazdami drogowymi. Z tego też powodu zastosowana metodyka badawcza metodą HIL i zbudowanie stanowiska umożliwiającego weryfikację koncepcji sterowania jeszcze na wczesnej fazie jej rozwoju, jest rozwiązaniem bardzo dobrym ale i pożądanym. Jest to efektywne narzędzie badawcze, co jest niewątpliwie wartością dodaną do pracy.

Meritum pracy było opracowanie modelu matematycznego, przeprowadzenie badań symulacyjnych oraz eksperymentalna weryfikacja wybranych parametrów prototypu pojazdu autonomicznego, w celu estymacji czasu reakcji autonomicznego układu hamulcowego pojazdu drogowego. Ponadto, w pracy opisano oryginalny system wizyjny dla pojazdu autonomicznego, który wykorzystuje dane z kamer umieszczonych na bezzałogowym statku powietrznym (UAV) do skanowania otoczenia z wysokości, uwzględniając inne obiekty i przeszkody oraz ich unikanie w celu zapewnienia bezpiecznego ruchu do pożądanego miejsca, co mogło by stanowić tematykę osobnej rozprawy.

W pracy zawarto tezę pracy, która w skrócie brzmi: ***„istnieje możliwość skrócenia czasu reakcji układu hamulcowego i w konsekwencji dystansu hamowania pojazdu lądowego dzięki wdrożeniu autonomicznego układu hamulcowego opartego na algorytmach sztucznej inteligencji.”***

Elementy tezy:

1. **Skrócenie czasu reakcji układu hamulcowego:** Praca zakłada, że zautomatyzowany system hamowania może działać szybciej niż ludzki kierowca;
2. **Wpływ na dystans hamowania:** Krótszy czas reakcji powinien prowadzić do zmniejszenia dystansu hamowania, co zwiększa bezpieczeństwo na drogach;
3. **Wdrożenie sztucznej inteligencji:** Kluczowym elementem jest zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji, które mogą analizować dane z czujników i podejmować decyzje szybciej i bardziej precyzyjnie niż człowiek.

Rozdział siódmy pracy doktorskiej mgr inż. Zbigniewa Żelaznego stanowią wnioski i podsumowanie analizy wyników badań własnych nad autonomicznym układem hamulcowym typu EMB (Electromechanical Braking System) wspomaganym przez system wizyjny i UAV. Przedstawiono zalety fuzji danych z różnych sensorów, takich jak LIDAR, radar, kamery oraz IMU, które znacząco poprawiają dokładność percepcji otoczenia przez pojazd autonomiczny. Fuzja sensorów zapewnia komplementarne

informacje, zwiększa redundancję i niezawodność systemu, a także umożliwia precyzyjne śledzenie obiektów i lokalizację, co jest kluczowe dla nawigacji i unikania kolizji. Badania wykazały, że zastosowanie systemu wizyjnego wspomaganego przez UAV znacząco skraca czas reakcji układu hamulcowego, co przekłada się na krótszy dystans hamowania pojazdu. Algorytm oparty na Linear Support Vector Machines (SVM) okazał się najskuteczniejszy w większości testów, osiągając najkrótsze czasy reakcji w porównaniu z innymi algorytmami. Zatem Doktorant wykazał, iż istnieje możliwość skrócenia czasu reakcji układu hamulcowego w wyniku zastosowania niezależnych systemów sterowania opartych na sztucznej inteligencji, czym potwierdził słuszność postawionej tezy pracy.

Analizując wszystkie elementy ujęte w rozprawie, tj.: opracowanie w ramach projektu pojazdu autonomicznego „Jurek”, zbudowanie stanowiska, opracowanie algorytmów sterowania układem hamulcowym z użyciem sztucznej inteligencji, a także postawiony cel, tezę i wnioski końcowe rozprawy uważam, że jej realizacja pozwoliła na zdobycie nowej wiedzy oraz umiejętności, mieści się w dziedzinie nauk inżynierjno-technicznych i obejmuje zagadnienia z dyscypliny inżynieria mechaniczna. Taki stan uzasadnia podjęcie przez Doktoranta mgra inż. Zbigniewa Żelaznego tematu pracy i przedstawienie rozprawy pt. ***„Reaction time estimation in automated braking system for land vehicles controlled by algorithmic artificial intelligence module”***.

2.2. Uwagi merytoryczne i szczegółowe

Pod względem merytorycznym i metodycznym, pracę oceniam pozytywnie, choć Doktorant nie określił w jasny sposób jak zrealizował pracę ale przedstawił gotowe wyniki. Uważam, iż Doktorant z uwagi na wielowątkowość tematu, skrótowo potraktował opisy poszczególnych wątków, jak choćby „wprowadzenie”. W pracy brakuje osobnego punktu dotyczącego przyjętych założeń, co jest podstawą w przypadku realizacji projektów, ale to jest typowe podejście wśród praktyków. W rozdziale szóstym również są przedstawione obszernie wyniki, które skomentowano tylko na jednej stronie. Z punktu widzenia praktyka to są sprawy nieistotne, ale ważne z punktu oceniającego pracę. Jednak w odniesieniu do całości pracy - jej układ jest logiczny, a dobrana literatura jest dobrze osadzona w tematyce rozprawy. W odniesieniu do literatury w pracy brakuje osobnego rozdziału, który w sposób syntetyczny przedstawiłby osiągnięcia literatury światowej w temacie rozprawy.

Treści rozprawy odpowiadają tokowi opracowanego tematu, jednak jej lektura skłania do kilku pytań czy uwag, tak ogólniejszych wynikających ze skromnego opisu niektórych elementów pracy, jak i bardziej szczegółowej natury.

W odniesieniu do pojazdów autonomicznych i ich zdefiniowania według standardu SAE J3016: to na którym poziomie można sklasyfikować opisany w pracy pełnoskalowy pojazd autonomiczny powstały w projekcie „Jurek”, poruszający się z wykorzystaniem powietrznych statków latających, co jest mało spotykane w zastosowaniach cywilnych.

W rozdziale drugim na stronie 28 Doktorant przedstawił schemat systemu konfiguracji pojazdu autonomicznego, nie przedstawiając założeń projektowych systemu. Nasuwa się zatem pytanie: jakie były kryteria wyboru platformy sprzętowej, czy wyboru konkretnych sensorów? Czy sensory są oznaczone na powyższym schemacie i jaką cechowały się dokładnością? Część odpowiedzi można znaleźć na rysunkach 22, 23 i 26, ale bardziej czytelne byłoby przedstawienie takiego zintegrowanego schematu systemu sterowania.

Na stronie 29 Doktorant pisze o różnych fazach procesu zwalniania samochodu, które później rozwija na stronie 30 i 31 – czy opisy tych faz są tożsame i czy można je odnieść do rysunku 14?

Na stronie 37 po wzorze (17) jest napisane, że zostanie podjęta decyzja. Zatem proszę Doktoranta o doprecyzowanie jaka decyzja zostanie podjęta.

Doktorant w rozdziale trzecim pisze o rozwoju systemu sterowania układem hamulcowym EMB i tu nasuwa się pytanie jakie korzyści przyniosło wykorzystanie systemu wizyjnego wspomaganego przez UAV w kontekście skrócenia czasu reakcji układu hamulcowego.

Ciekawym autorskim rozwiązaniem zastosowanym w pracy jest układ do testowania koncepcji sterowania metodą HIL z wykorzystaniem środowiska symulacyjnego Unreal Engine 4.0 i MATLAB/Simulink. Pomimo zastosowanego opisu systemu w rozdziale czwartym, nie znalazłem informacji na temat konwertera czasu rzeczywistego i zastosowanej platformy sprzętowej do komunikacji. Zastosowany silnik Unreal Engine 4.0 jest oprogramowaniem do analizy grafiki i obrazu, używanych w grach – zatem pytanie jakie tu ma zastosowanie i jakie były opóźnienia na torach pomiarowych dla kamery, sensorów i aktuatorów. Czy występujące opóźnienie miały wpływ na estymowany czas reakcji układu? Opis ten częściowo możemy znaleźć w rozdziale piątym, jednak tu głównie opisano metody redukcji szumów na połączeniach. Czy doktorant w pracy analizował wskaźnik SNR?

W rozdziale szóstym są opisywane badane algorytmy sterowania do estymowania czasu reakcji z kombinacji różnych sensorów. W wynikach są podane estymowane czasy, jednak jakie były opóźnienia sprzętowe wynikające z zastosowanej platformy, czy fuzji sensorów, czy analizy chmury danych z systemu wizyjnego?

Na rysunkach od numeru 71 do 88 przedstawiono histogramy w 10 klasach: co było podstawą przyjęcia 10 klas reakcji systemu HIL?

W pracy przedstawiono 24 wzory ze sporadyczną legendą bez podawania miana jednostek. Uważam, że w pracy powinien być wyodrębniony osobny rozdział dotyczący użytych skrótów, oznaczeń i jednostek.

W odniesieniu do przedstawionych uwag merytorycznych, to wynikają one z ciekawości Recenzenta, a uzupełnienie pracy o szczegółowe informacje podniosłoby atrakcyjność opiniowanej rozprawy doktorskiej. Praca doktorska jest napisana przez praktyka, a większość z nich nie dba o takie szczegóły. O ile nie można mieć zastrzeżeń do przekazu merytorycznego, o tyle od strony edytorskiej i zastosowanego słownictwa można znaleźć dość częste wpadki językowe, które oznaczono precyzyjnie w pracy i przekazano Doktorantowi. Dla przykładu w streszczeniu polskim można znaleźć błędy językowe (np. *Electromechanical* – bez „a”, *fromie* – zmiana kolejności liter „r” i „o”, *jest tory* – powinno być *toru*, *jest statu* – powinno być *statku*, *jest autonimizcznym a* powinno być – *autonomicznym*, *jest badwczym* – bez „a”). Błędy można również znaleźć w części angielskojęzycznej: *jest tor* – powinno być *for*, *jest sanded* – powinno być *sent* (strona 10), *jest wary* – powinno być *vary*, *jest mud* – powinno być *mood* (strona 14), czy inne błędy związane z odmianą, liczbą mnogą, czy użyciem spójników.

Błędy tego typu rzutują na ogólny odbiór pracy i przy dbałości o redakcję pracy powinny być usunięte, ale jednak się zdarzają. W szczególności u praktyków, którzy nie mają dostatecznie dobrze opanowanego warsztatu pisarskiego. Poprawie powinny podlegać również niektóre rysunki zamieszczone w pracy, jak np.: rozległe schematy przedstawione na rysunku 37, 41 czy 65, które są mało czytelne.

Powyższe uwagi szczegółowe mają charakter wyłącznie porządkowy, estetyczny, czyniący pracę klarowniejszą i nie umniejszają wartości merytorycznej rozprawy, którą uważam za ciekawą, wartościową i innowacyjną.

3. Podsumowanie oceny

Praca ma unikalny charakter eksperymentalny, a całość badań zrealizowano na specjalnie do tego celu przygotowanym stanowisku nowoczesną metodą HIL. Do tego Doktorant zastosował fuzję czujników na jednej platformie a do analizy efektów ich działania wykorzystał algorytmy sztucznej inteligencji. Przedstawione wyniki w pracy należy uznać za cenne, gdyż dotyczą one sfery wciąż rozwijanej w motoryzacji. Dodatkową zaletą pracy, w aspekcie innowacyjności, jest wykorzystanie powietrznych statków UAV do optymalizacji trasy i estymacji czasu reakcji. Rozbudowa pracy o ten wątek jest nowym podejściem i pozwoli Doktorantowi na dalszą kontynuację badań i rozwoju systemu.

Pracę uważam za ciekawą z punktu widzenia naukowego i poznawczego, zaś sama problematyka w niej poruszona została osadzona w realnym trendzie rozwoju motoryzacji. Zrealizowany w dysertacji problem badawczy i jego zakres merytoryczny jest szeroki, od aspektów teoretycznych, po analizę i ocenę, jak również weryfikację wyników badań z modelem HIL symulowanym za pomocą algorytmów sztucznej inteligencji. Przeprowadzona w pracy analiza estymacji czasu reakcji autonomicznego układu hamulcowego pojazdu drogowego jest podstawą podjęcia racjonalnych decyzji w zakresie bezpieczeństwa ich użytkowania przez osoby podróżujące tego typu pojazdami.

Podsumowując, Doktorant udowodnił, że posiada:

- umiejętność analizy tematu i doboru odpowiedniej literatury technicznej,
- dużą wiedzę z zakresu identyfikacji obiektu i prowadzenia pracochłonnych badań drogowych i symulacyjnych,
- umiejętność wyciągania syntetycznych wniosków z badań własnych i ich rekomendacje na przyszłość.

Umiejętności te doprowadziły do osiągnięcia założonego głównego celu badawczego rozprawy, a Doktorant mgr inż. Zbigniew Żelazny udowodnił, że potrafi samodzielnie formułować i rozwiązywać zadania naukowe na poziomie prac doktorskich i reprezentuje wystarczający poziom wiedzy związanej z tematyką rozprawy.

4. Wniosek końcowy

Wobec powyższego stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. **Zbigniewa Żelaznego pt. „Reaction time estimation in automated braking system for land vehicles controlled by algorithmic artificial intelligence module”** spełnia wymagania stawiane pracom na stopień doktora nauk inżynieryjno-technicznych, w rozumieniu art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, Dz.U. nr 65, poz. 595 (z późniejszymi zmianami) oraz Ustawy o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z 2018 r. stawiam zatem wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Wrocławskiej w dyscyplinie: *budowa i eksploatacja maszyn*, obecnie w nowej klasyfikacji dyscypliny - *inżynieria mechaniczna*.

