

Prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz
Instytut Napędów i Lotnictwa
Politechniki Poznańskiej

O C E N A
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Brzostowskiego
pt.: „Planowanie ruchu samochodu autonomicznego z zastosowaniem
modeli dynamiki”

podstawa opracowania: pismo Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego W-1//25/2025 z dnia 24.01.2025, do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej wraz z umową i rachunkiem

1. UZASADNIENIE PODJĘCIA TEMATU ROZPRAWY

W ostatnich latach wzrosło zainteresowanie autonomicznymi systemami transportu, które mają potencjał znacząco zwiększyć bezpieczeństwo na drogach, poprawić płynność ruchu oraz zmniejszyć emisję spalin. Pojazdy autonomiczne są obecnie wdrażane w różnych sektorach przemysłu, począwszy od transportu miejskiego, przez centra logistyczne, aż po zastosowania wojskowe.

Głównym problemem w implementacji systemów autonomicznych jest precyzyjne planowanie ruchu, które wymaga uwzględnienia zarówno dynamiki pojazdu, jak i zmieniających się warunków otoczenia. Ważną rolę w tym procesie odgrywa modelowanie dynamiki pojazdów, które umożliwia precyzyjne przewidywanie ich zachowania w różnych sytuacjach drogowych. Efektywne planowanie trajektorii wymaga zastosowania zaawansowanych algorytmów sterowania oraz analizy wpływu czynników zewnętrznych, takich jak warunki atmosferyczne czy obecność innych uczestników ruchu.

W literaturze naukowej istnieje wiele podejść do modelowania dynamiki pojazdów, począwszy od prostych modeli kinematycznych, aż po zaawansowane modele uwzględniające wielowymiarowe zjawiska dynamiczne. Pomimo dużej liczby badań w tym obszarze, nadal istnieje potrzeba opracowania modeli, które będą zarówno precyzyjne, jak i efektywne numerycznie, aby mogły być stosowane w rzeczywistych systemach autonomicznych.

Celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest opracowanie nowoczesnych modeli dynamiki pojazdu autonomicznego, które pozwolą na skuteczne planowanie ruchu w różnych warunkach drogowych. Praca skupia się na analizie wpływu warunków atmosferycznych na działanie systemów sensorycznych oraz ich wpływie na dokładność modelowania trajektorii pojazdu. Badania przeprowadzone w ramach tej rozprawy mają na celu stworzenie podstaw dla

przyszłych aplikacji w zakresie autonomicznej jazdy oraz poprawę niezawodności systemów nawigacji w zmiennym środowisku.

Zasadnicze wyzwania jakie są związane z wprowadzeniem pojazdów autonomicznych do eksploatacji to:

- Bezpieczeństwo i niezawodność,
- Etyczne dylematy,
- Cyberbezpieczeństwo,
- Problemy prawne i regulacyjne,
- Wysokie koszty i dostępność,
- Interakcja z człowiekiem.

Badania naukowe nad tego rodzaju procedurami i konstrukcjami są prowadzone przez szereg ośrodków naukowo-badawczych, które ze zrozumiałych względów, nie udostępniają tych informacji. Deficyt prac poświęconych tym badaniom, zwłaszcza empirycznym, potwierdza słuszność podjętej przez Autora problematyki badawczej oraz wskazuje, że tematyka, zakres oraz cele przedstawione w pracy zostały trafnie zdefiniowane.

Zwłaszcza, że znając współczesny stan wiedzy światowej na temat podjętego zagadnienia uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Brzostowskiego stanowi oryginalne osiągnięcie Autora i wnosi ważne aspekty do badań nad stworzeniem samochodu autonomicznego. Praca porusza aktualny i ważny temat z zakresu inżynierii mechanicznej i informatyki, zwłaszcza w kontekście poszukiwania bardziej efektywnych rozwiązań planowania ruchu w pojazdach autonomicznych z zastosowaniem modeli dynamiki. Postawione zadanie naukowe we właściwy sposób spełnia wymagania stawiane rozprawie doktorskiej.

Reasumując, tematyka pracy jest bardzo aktualna i odnosi się do nowoczesnych trendów w konstrukcji pojazdów samochodowych, a w szczególności do dynamicznie rozwijających się technologii koncepcji ich autonomiczności. Zastosowanie planowania ruchu z wykorzystaniem modeli dynamiki, staje się coraz bardziej popularne, co czyni wybór tematu wyjątkowo istotnym dla współczesnej nauki i przemysłu samochodowego.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska liczy 176 stron. Praca została podzielona na wstęp i 9 zasadniczych rozdziałów. Treść obejmuje również streszczenie w języku polskim i angielskim, oraz wykaz literatury. Bibliografię stanowi 121 pozycji o charakterze naukowym oraz poznawczym, obejmujące tematykę badawczą rozprawy. Uwzględniono w nich artykuły naukowe w języku polskim i angielskim. Na uwagę zasługuje cytowanie przez Autora wielu nowych publikacji anglojęzycznych. Potwierdza to aktualność podjętej problematyki oraz świadczy o rzetelnym przeglądzie literatury dokonany przez Doktoranta. Cała dysertacja została napisana poprawnym i precyzyjnym językiem technicznym.

Celem rozprawy jest próba odpowiedzi na wybrane kwestie związane z planowaniem ruchu pojazdu autonomicznego i wskazanie możliwości planowania ruchu samochodu autonomicznego z zastosowaniem modeli dynamiki o różnym stopniu złożoności. Natomiast celem użytkowym jest opracowanie modeli dynamiki pojazdu uwzględniających wpływ różnych warunków atmosferycznych, a następnie zastosowanie ich w planowaniu ruchu samochodu autonomicznego.

Ponadto Autor postawił tezę pracy, że możliwa jest realizacja trasy przejazdu samochodu autonomicznego z zastosowaniem uproszczonych modeli dynamiki o 3 lub 5 stopniach swobody.

Dla realizacji postawionego celu naukowego Autor zrealizował następujące zadania

szczegółowe:

1. Przedstawienie zagadnień związanych ze sterowaniem samochodem autonomicznym i używanych w nich czujników i określenie wpływu niesprzyjających warunków atmosferycznych na ich działanie.
2. Przegląd i ocena modeli dynamiki stosowanych w planowaniu ruchu pojazdów autonomicznych i określenie wymagań stawianych tym modelom.
3. Sformułowanie modeli dynamiki ruchu pojazdu (wprowadzający różne podejścia do modelowania dynamiki).
4. Przeprowadzenie badań stanowiskowych dotyczących wpływu warunków atmosferycznych na działanie lidar.
5. Walidację i weryfikację sformułowanych modeli dynamiki pojazdu.
6. Ocenę efektywności obliczeniowej i dokładności odwzorowania rzeczywistych właściwości kinematycznych i dynamicznych pojazdu przeprowadzoną dla modeli dynamiki o różnych stopniach złożoności.
7. Badania symulacyjne ruchu pojazdu w różnych warunkach atmosferycznych i z różnym rozłożeniem masy.
8. Wybór modeli możliwych do zastosowania w planowaniu ruchu samochodu autonomicznego.
9. Sformułowanie i rozwiązanie zadania doboru bezpiecznej prędkości ruchu zależnie od warunków atmosferycznych.
10. Przedstawienie i sformułowanie zadania realizacji trasy przejazdu.
11. Zastosowanie funkcji sklepanych do aproksymacji trasy przejazdu.
12. Przedstawienie i porównanie algorytmów sterowania.
13. Sformułowanie i weryfikacja własnego algorytmu wyznaczania kąta skrętu kół B3M.
14. Rozwiązanie zadania śledzenia ścieżki.
15. Podsumowanie przeprowadzanych badań oraz sformułowanie wniosków i rekomendacji na przyszłość.

Reasumując, struktura rozprawy jest spójna i logiczna, co ułatwia czytelnikowi przyswojenie treści. Każdy rozdział pełni określoną funkcję, stopniowo wprowadzając czytelnika w coraz bardziej zaawansowane zagadnienia badawcze.

3. OCENA ROZPRAWY

Uwagi ogólne

Recenzowaną rozprawę oceniam bardzo wysoko pod względem merytorycznym oraz metodycznym. Praca zawiera pojedyncze błędy i niedociągnięcia, które nie rzutują na jej ogólną wysoką ocenę. Problem badawczy został jasno i celnie postawiony i prawidłowo rozwiązany.

Praca nie zawiera powtórzeń i błędów logicznych. Rozprawa została napisana wyjątkowo starannie z wykorzystaniem poprawnego języka technicznego. Wykorzystane pojęcia i terminologia są właściwie używane.

O wysokiej wartości merytorycznej pracy świadczą również:

- właściwe uzasadnienie podjętej tematyki poprzedzone szeroką analizą stanu wiedzy,
- wyjątkowo trafne zdefiniowanie celu i zakresu pracy,
- oryginalność uzyskanych wyników badań,
- logiczna i przejrzysta struktura pracy,
- a także:
 - kompleksowe podejście do problemu,
 - praktyczną wartość badań,
 - poprawność metodologiczną.

W trakcie realizacji rozprawy Doktorant wykazał się dobrym przygotowaniem do pracy naukowej, w szczególności znajomością zagadnień teoretycznych poświęconych modelowaniu, a także znajomością procedur matematycznych i informatycznych.

Zalety pracy, to:

- Połączenie elementów teoretycznych: modele dynamiki pojazdów, generowanie funkcji definiujących przebieg kąta skrętu kół w oparciu o proste (geometryczne) algorytmy sterowania i praktyczne (własne badania stanowiskowe).
- Opracowanie czterech autorskich modeli dynamiki pojazdu o różnym stopniu złożoności i efektywności obliczeniowej. Sposób sformułowania modeli ma pozytywny wpływ na czasy obliczeń.
- Stwierdzenie, że modele o 3 i 5 stopniach swobody najlepiej spełniają wymagania stawiane modelowi dynamiki samochodu autonomicznego. Istotne jest zastrzeżenie, że modele te można stosować tylko w konkretnych warunkach (przy odpowiednich prędkościach i przyspieszeniach bocznych).
- Opracowanie aplikacji komputerowej Vehicle Dynamics, która umożliwiła przeprowadzenie badań symulacyjnych, rozumianych jako obliczenia przy zastosowaniu własnych modeli. Ta aplikacja może mieć dodatkowe zastosowanie niż te przedstawione w rozprawie (np. samochody ciężarowe, maszyny rolnicze i systemy obronne).
- Przeprowadzenie walidacji modeli, które bazują na eksperymencie przeprowadzonym przez innych badaczy na torze Mortefontaine we Francji, a ich weryfikację przez porównanie wyników obliczeń własnych z wynikami otrzymanymi przy użyciu pakietu CarSim (zwłaszcza przebiegu podwójnej zmiany pasa ruchu i ruchu harmonicznego o malejącej amplitudzie). Wyniki walidacji weryfikacji potwierdziły poprawność sformułowanych modeli i ich implementacji komputerowej.
- Przedstawienie wyników symulacji różnych manewrów (w tym zgodnych z obowiązującymi normami), oraz w symulowanym ruchu pojazdów w różnych warunkach atmosferycznych (np. przez zmianę współczynnika przyczepności) i z różnym rozłożeniem masy. Wyniki tych symulacji dotyczą też bezpieczeństwa ruchu pojazdów (określenie bezpiecznej prędkości ruchu do zatrzymania pojazdu przed przeszkodą).
- Pokazanie możliwości kompleksowej realizacji trasy przejazdu przez samochód autonomiczny, w tym: wybór punktów trasy, aproksymację trasy do ścieżki, wyznaczenie kątów skrętu kół, obliczenie spodziewanej trajektorii ruchu pojazdu. Do realizacji tego zadania opracowano algorytm aproksymacji ścieżki wykorzystujący funkcje sklepane oraz własny algorytm wyznaczania kąta skrętu kół.
- Opracowanie własnego algorytmu wyznaczania kąta skrętu kół przednich nazwany B3M, o podobnej skuteczności jak algorytmy geometryczne przedstawiane w literaturze (Pure Pursuit i Stanley'a).
- Pokazanie możliwości rozszerzenia analiz teoretycznych i prowadzenia dalszych badań, np. sformułowanie dodatkowych modeli dynamiki, wprowadzenie innych algorytmów aproksymujących itp.

Uwagi krytyczne

Biorąc pod uwagę moją wysoką ocenę merytoryczną rozprawy, pragnę przedstawić pewne spostrzeżenia, drobne uwagi i wątpliwości, niektóre o charakterze dyskusyjnym i perspektywicznym dla dalszego rozwoju w przedmiotowej tematyce (np. dla realizacji postępowania habilitacyjnego):

- Istnieje wiele możliwych modeli dynamiki pojazdów, a. przedstawione w pracy modele stanowią tylko wycinek tego obszaru wiedzy i należą do grupy modeli uproszczonych.
- Autor mógł dokładniej uzasadnić ograniczenie się do 10 stopni swobody w najbardziej rozbudowanym modelu. Potrzeba opracowania modeli bardziej rozbudowanych, może być istotna, np. w zadaniach realizacji ścieżki przez pojazdy ciężarowe.
- Walidacja modeli została przeprowadzona na podstawie wyników eksperymentu wykonanego przez innych badaczy. Wskazane byłoby, aby w przyszłych pracach przedstawić wyniki weryfikacji na podstawie własnego eksperymentu umożliwiającego bezpośrednią walidację modeli.
- Autor zastosował do aproksymacji trasy funkcje sklejane B3. Nie podał dlaczego wybrał takie podejście. Może mogłaby być zastosowana inna (dokładniejsza?, prostsza?) metoda.
- Należałoby dokładniej rozważyć problem poruszania się pojazdu również w trudnych warunkach atmosferycznych takich jak:
 - wpływu wiatru na ruch pojazdu, co może mieć istotne znaczenie w przypadku pojazdów specjalnych, autobusów, pojazdów wielocłonowych.
 - głębsza analiza wpływu warunków atmosferycznych na widoczność.
 - ocena skuteczności porównywanych algorytmów doboru kąta skrętu kół przy zmniejszonym współczynniku przyczepności.

Pozostałe uwagi:

1. Uważam, że „Wstęp” powinien mieć punkt 1.
2. Brakuje mi bardzo przydatnego podsumowanie każdego rozdziału merytorycznego.
3. Mimo bardzo starannego zredagowania rozdziału „9. Podsumowanie i wnioski” sugerowałbym bardziej przejrzyste zakończenie tej pracy, a więc ostatni rozdział: powinien mieć postać:
 - „10. Zakończenie
 - 10.1. Podsumowanie (bez szczegółowej zawartości poszczególnych rozdziałów)
 - 10.2. Wnioski (przez dodanie wniosków w następującej konfiguracji):
 - wnioski ogólne (czy zrealizowano cele pracy i czy udowodniono tezy),
 - wnioski szczegółowe,
 - wnioski metodyczne,
 - wnioski utylitarne,
 - wnioski perspektywiczne (kierunki dalszych badań)”.
4. Brak tytułu rozprawy w języku angielskim.
5. W pracy występuje tzw. „tekst wiszący”, poniżej wyjaśnienie problemu:
 - Przy numeracji cyfrowej wielorzędowej po tytule rozdziału 1 powinien od razu następować tytuł podrozdziału 1.1. a tuż po tytule podrozdziału 1.1. powinien być tytuł podrozdziału 1.1.1. itd. Między nimi nie powinno być żadnych tekstów (zwanymi wiszącymi).
 - Teksty te to z reguły ogólne wprowadzenia do rozdziałów, omówienia czy streszczenia.
 - Jeżeli tekst wiszący jest cennym i niezbędnym wprowadzeniem do tematu – powinien mieć numer i tytuł.
 - Jeśli tekst ten zawiera same ogólniki lub omówienie dalszej części rozdziału – powinien zostać usunięty przez autora.
 - W pracy takie teksty są w: 2 → 2.1; 4 → 4.1 (aż 6 stron! – ewidentnie powinien być podtytuł); 6 → 6.1; 6.1 → 6.1.1; 7 → 7.1; 8 → 8.1.
6. W podpisach pod własnymi rysunkami i tabelami niepotrzebne są dopiski (opracowanie własne), bo gdy nie ma cytowania w [xx] to jednoznacznie rozumie się, że to praca Autora.
7. Nie zawsze stosowane wcięcia przy akapitach.

8. Nietypowe dla publikacji technicznych cytowanie literatury, np. (Zang i Ding, 2019) zamiast powszechnie stosowanego [117].
9. Załączniki Z1 i Z2 należało umieścić bezpośrednio w treści rozprawy.

Podsumowanie oceny merytorycznej

Pomimo wymienionych powyżej drobnych uwag krytycznych i sugestii bardzo wysoko oceniam poziom merytoryczny rozprawy doktorskiej. Na szczególną uwagę zasługuje szeroki zakres wykonanej pracy, trafność podjętej tematyki badawczej oraz duży wkład intelektualny Autora. Wymienione krytyczne uwagi, niektóre o charakterze dyskusyjnym, nie umniejszają mojej wysokiej oceny recenzowanej pracy.

Należy również podkreślić, że tekst pracy został napisany w sposób jasny, spójny i przejrzysty, co ułatwia zrozumienie skomplikowanych zagadnień technicznych nawet osobom mniej zaznajomionym z tematyką. Styl pracy cechuje się wysokim poziomem merytorycznym, a jakość graficznych ilustracji – w tym rysunków i wykresów – jest na bardzo wysokim poziomie, co dodatkowo podnosi wartość pracy. Rysunki są nie tylko estetyczne, ale również wnoszą istotny wkład do zrozumienia przedstawianych zagadnień.

Autor podjął się trudnej problematyki naukowej oraz wykorzystał złożoną metodologię badawczą. Przedstawione w pracy zagadnienia nie wyczerpują wszystkich zagadnień związanych z rozwiązaniami planowania ruchu w pojazdach autonomicznych z zastosowaniem modeli dynamiki. Obecny stan wiedzy nie pozwala na pełną ocenę wpływu tych czynników i parametrów na procesy jazdy autonomicznej. Wskazuje to na konieczność prowadzenia dalszych badań w tym zakresie.

Ciekawym i ważnym uzupełnieniem osiągnięć Autora w przedmiotowej tematyce jest publikacja książkowa: Brzozowski M.: Samochody autonomiczne, sensory otoczenia i problemy percepcji. Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, 2023, ISBN: 978-83-66249-94-3.

Podsumowując, praca mgr. inż. Michała Brzozowskiego to świetny przykład rzetelnie przeprowadzonego badania naukowego, które wnosi wartościowe wnioski do rozwoju technologii pojazdów autonomicznych.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że:

- Autor dokonał wyjątkowo trafnego i aktualnego wyboru tematyki swojej pracy, a jej zakres spełnia stawiane wymagania,
- zasadnicze cele pracy zostały w pełni osiągnięte w zakresie przyjętym przez Doktoranta, bowiem uzasadnione zostały twierdzenia Autora ujęte w tezach pracy, a prezentowane wyniki są uzyskane w poprawnie przeprowadzonych studiach i eksperymentach własnych i mogą służyć do dalszych prac,
- opracowane w niej modele dynamiki pojazdu autonomicznego, metody planowania ruchu oraz analizy wpływu warunków atmosferycznych na skuteczność systemów sensorycznych stanowią istotny wkład w rozwój tej interdyscyplinarnej dziedziny nauki,
- formalny układ pracy jest prawidłowy, a forma edytorska bardzo staranna,
- dysertacja bardzo dobrze nawiązuje do aktualnej wiedzy i praktyki, a w wielu elementach wnosi do nich nowe treści,
- zostało spełnione kryterium logicznej poprawności pracy dzięki znacznej akumulacji należyście ustalonych faktów.

Powyższe fakty świadczą o kompetencjach Doktoranta w zakresie samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria Mechaniczna”, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą.

Stwierdzam zatem, że praca mgr inż. Michała Brzozowskiego pt.: „Planowanie ruchu samochodu autonomicznego z zastosowaniem modeli dynamiki” (promotor: dr hab. inż. Krzysztof Parczewski, prof. UBB; promotor pomocniczy: dr hab. inż. Łukasz Drąg, prof. UBB;) spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w myśl Ustawy z dnia 20 lipca 2018 – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2020 r., poz. 85 z późn. zm.) i stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej o przyjęcie rozprawy i o dopuszczenie Autora do publicznej obrony.

Ponieważ usterki pracy są nieliczne, drugorzędne i nie wpływają na moją bardzo pozytywną ocenę pod względem postawienia problemu badawczego, zrealizowania programu *badan doświadczalnych*, analizy wyników oraz napisania przejrzystej rozprawy naukowej.

Dlatego stawiam wniosek o wyróżnienie tej pracy, ze względu na:

1. Ważny, aktualny i oryginalny w skali światowej problem badawczy, zwłaszcza dla branży samochodowej, zarówno ze względów naukowych, jak i praktycznych.
2. Wnikliwe przeanalizowanie bardzo złożonego problemu naukowego, związanego z planowaniem ruchu samochodu autonomicznego z zastosowaniem modeli dynamiki. Na szczególną uwagę zasługuje bardzo wysoki poziom metodyczny i merytoryczny rozprawy oraz niezwykła dbałość Doktoranta o formalizm matematyczny, a także o ścisłość wyrażania myśli i wysoki poziom języka polskiego ogólnego, w tym również technicznego. Zakres pracy i poziom warsztatu naukowego przewyższa wartości uznawane powszechnie za standardowe.
3. Uzyskanie oryginalnych wyników naukowych o dużych wartościach poznawczych, z perspektywą ich wykorzystania w praktyce w działaniach, dla opracowania nowej koncepcji i konstrukcji pojazdów autonomicznych, a także pozwala zwiększyć bezpieczeństwo ruchu drogowego.

