

dr hab. inż. Andrzej Rusiecki, prof. ucz.
Katedra Informatyki Technicznej
Wydział Informatyki i Telekomunikacji
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Rada Dyscypliny
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
wpłynęło dnia 03.10.2022
nr 29 zał.

Recenzja rozprawy doktorskiej pt. *Implementacja algorytmu autonomicznej jazdy w symulowanym ruchu ulicznym*

Autor rozprawy: mgr Tomasz Sułkowski

Promotor: prof. dr hab. inż. Jacek Izydorczyk

Promotor pomocniczy: dr inż. Marcin Szelest

Niniejsza recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej zatytułowanej „*Implementacja algorytmu autonomicznej jazdy w symulowanym ruchu ulicznym*” autorstwa Pana mgra Tomasza Sułkowskiego i została opracowana na wniosek **Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Śląskiej**.

Charakterystyka celu i zakresu rozprawy

Obszarem badawczym, na którym skupia się w swej rozprawie Pan mgr Tomasz Sułkowski jest problem autonomicznego poruszania się pojazdów w symulowanym ruchu ulicznym, czyli – inaczej rzecz ujmując – automatycznego „prowadzenia” samochodu w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Głównym zadaniem naukowym podjętym w pracy doktorskiej jest z kolei *opracowanie, implementacja i badanie własności algorytmu trasowania ścieżki ruchu pojazdu samochodowego*.

Problem sterowania pojazdem samochodowym w oparciu o dane pochodzące z wielu różnych źródeł (GPS, lidary, kamery, radary) jest niewątpliwie zagadnieniem bardzo istotnym i aktualnym z punktu widzenia technologii i rozwoju tzw. pojazdów autonomicznych. Jednym z zadań składowych szeroko pojętego problemu badawczego jest trasowanie ścieżki pojazdu, rozumiane jako wyznaczanie bezpiecznej i uwzględniającej dodatkowe ograniczenia trajektorii ruchu powiązanej z serią sterowań związanych z fizyką rozpatrywanego pojazdu, jak i warunkami drogowymi. Zadania takie realizowane są dziś najczęściej z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego, szczególnie rozwiązań korzystających z głębokich sieci neuronowych, mogą być jednak również formułowane bardziej tradycyjnie, jako problemy optymalizacyjne. Autor rozprawy postawił sobie za cel *opracowanie, implementację i eksperymentalną walidację algorytmu trasowania ścieżki ruchu pojazdu samochodowego*,

wykorzystującego symulację przepływu cieczy. Wybór podejścia uzasadniony został już na wstępie trudnością w określeniu celu i opisu warunków dla sformułowania zadania optymalizacyjnego i oczywistymi problemami związanymi z przygotowaniem danych dla rozwiązań opartych na uczeniu maszynowym. Główna teza pracy brzmi zatem, w wersji nieco skróconej, następująco: „Algorytm trasowania ścieżki ruchu pojazdu samochodowego oparty o symulację przepływu płynu oraz obrazu najbliższej okolicy (...) pozwala na bezkolizyjne kierowanie samochodem (...).”

Zawartość rozprawy

Rozprawa przedstawiona przez mgra Tomasza Sułkowskiego składa się z 6 rozdziałów, bibliografii i dodatku zawartych na 93 stronach, a poprzedzonych spisem treści, oraz spisami rysunków i tabel.

Rozdział 1 rozpoczyna krótki rys historyczny ukazujący początki prac związanych z tematyką pojazdów autonomicznych i prowadzący czytelnika do opisu przedmiotu badań. Na poziomie ogólnym sformułowany zostaje problem automatyzacji procesu prowadzenia samochodu i wspomniane zostają rozwiązania oparte na sieciach neuronowych i algorytmach optymalizacyjnych. Doktorant rozważa cechy tych podejść wskazując na mało eksplorowane pole metod przyczynowo-skutkowych trasowania ścieżki ruchu, jako warte wypróbowania. Dalsza część rozdziału przedstawia motywację podjęcia badań prezentując, opisane szerzej na kolejnych stronach pracy, rozwiązania generowania trajektorii ruchu bazujące na polu potencjałów, wyznaczaniu i wyborze najlepszej wielomianowej ścieżki, czy wreszcie symulacji przepływu cieczy. Rozdział kończy jasne i klarowne sformułowanie zarówno celu pracy wraz z cechami planowanego algorytmu, jak i głównej tezy przytoczonej już w poprzedniej sekcji niniejszej recenzji.

W rozdziale drugim, zatytułowanym *Przegląd literatury*, Doktorant przedstawił opis prac związanych z technikami automatycznego trasowania, które nie wykorzystują uczenia maszynowego. Znaleźć tu można wspomniane już podejścia oparte o sztuczne pole potencjałów, wielomianowe ścieżki ruchu i symulację przepływu. Należy zaznaczyć, że wszystkie wymienione techniki znalazły potem zastosowanie w opracowanym przez Autora algorytmie.

Rozdział 3 porusza tematykę symulatorów ruchu ulicznego. Biorąc pod uwagę cel pracy, konieczne okazało się wybranie odpowiedniego środowiska umożliwiającego przeprowadzenie testów opracowanego rozwiązania i pozwalającego na jego ocenę według ustalonych wcześniej kryteriów. Pierwsza część rozdziału zawiera zatem sformułowanie owych kryteriów i sposobu oceny dostępnych symulatorów. W drugiej części opisane zostały środowiska Microsoft AirSim, CARLA i symulator oparty na GTA V. Pod koniec rozdziału znaleźć można uzasadnienie wyboru symulatora CARLA, co – jak stwierdza Autor – okazało się z perspektywy czasu słuszną decyzją.

Rozdział 4 to opis możliwości trasowania z wykorzystaniem symulacji przepływu płynów. Autor krótko przedstawia metody takie jak Interfered Fluid Flow (IFDS) i Fuzzy Virtual Force (VF) wykorzystane do planowania trajektorii statków powietrznych i łodzi. Dalej pojawiają się

krótkie rozważania nad samym sposobem modelowania przepływu, kończące się konkluzją o wyborze metody kratowego równania Boltzmanna (*Lattice Boltzmann Method, LBM*). Następnie opisane zostały jej podstawy teoretyczne, a w szczególności dyskretyzacja równania transportu i implementacja kratowego równania Boltzmanna. Doktorant zaproponował prosty symulator dwukołowego pojazdu, dla którego generacja trajektorii związana jest z topologią przejezdnego terenu i umiejscowieniem źródła ciśnienia. Model ten posłużył do eksperymentalnego potwierdzenia możliwości prowadzenia pojazdu z wykorzystaniem przepływu płynów oraz wstępnego doboru parametrów symulacji.

W rozdziale piątym opisano najistotniejszą – z punktu widzenia wkładu Autora – część, którą niewątpliwie jest opracowany przez niego algorytm autonomicznego prowadzenia pojazdu oparty o ciągłą symulację płynów (*Continous Fluid Flow, CFF*). Na początku rozdziału wspomniana została równoległa implementacja metody LBM z wykorzystaniem technologii CUDA, która umożliwiła znaczący wzrost wydajności w porównaniu z początkową implementacją na CPU. Dalej następuje opis poszczególnych faz i elementów składowych algorytmu CFF, wraz z elementami związanymi z możliwością późniejszego testowania i uruchamiania go w środowisku CARLA. Pewnym uproszczeniem było tu np. posłużenie się segmentacją dostarczaną bezpośrednio przez symulator. Doktorant przedstawił sposób transformacji obrazu z początkowej segmentacji na opis otoczenia odpowiadający widokowi z góry, uzyskany z wykorzystaniem odwrócenia perspektywy (*Inverse Perspective Transformation, IPT*), oraz proste autorskie podejście umożliwiające aktualizowanie informacji o przejezdnych obszarach na podstawie aktualizacji siatki segmentacji i zajętości. Opisane zostały ponadto: sposób generowania na siatce wektorów odpychających i blokowania wąskich przesmyków, procedura symulacji płynów z odpowiednim umiejscowieniem źródła, metoda śledzenia siatki i wreszcie końcowe obliczanie trajektorii. Dodatkowo wprowadzono proste zasady prowadzenia pojazdu dotyczące skrętu przednich kół i kontroli prędkości.

Rozdział 6 zawiera opis rezultatów testów symulacyjnych opracowanego algorytmu trasowania. Przeprowadzono badania metody CFF na zaczerpniętych z literatury scenariuszach testów ablacyjnych sieci ChauffeurNet, testów wyprzedzania, przejazdu przez skrzyżowanie z dynamiczną przeszkodą i pojazdem przejeżdżającym na czerwonym świetle. Pierwsze z nich posłużyły również do wyboru optymalnej (zapewniającej odpowiednią szybkość działania i wystarczającą dokładność) liczby pętli symulacji płynu w pojedynczej iteracji głównego algorytmu. To, niestety, również jedyne scenariusze testowe, dla których wygenerowano kilkadziesiąt (a nie jedynie kilka) wariantów i w których oceniano 3 możliwe zachowania badanej metody. Pozostałe dotyczą wykonania pojedynczych (aczkolwiek złożonych) manewrów, a ocena, oprócz analizy opisowej zachowania algorytmu, sprowadza się do stwierdzenia o wyniku pozytywnym bądź negatywnym dla danego testu. Rozdział kończy krótkie podsumowanie wyników badań, wraz z tabelą porównawczą algorytmu CFF i „oryginalnych metod”, co zapewne należy rozumieć jako metody, które jako pierwsze były na danych scenariuszach testowane. Z treści nie wynika jasno, czy Autor spróbował odtworzyć oryginalne rozwiązania i porównać je ze swoim podejściem, czy też cytuje rezultaty znalezione w literaturze. Niewątpliwie pozytywnym elementem jest umieszczenie przez Doktoranta kodu wszystkich wykorzystanych scenariuszy testowych w ogólnodostępnym repozytorium.

Właściwą część rozprawy kończy rozdział siódmy, zawierający podsumowanie. Autor na poziomie ogólnym przypomina analogie symulacji zachowania płynu i ruchu ulicznego, zwięźle pokazując, że mogą być one również wykorzystane do prowadzenia pojazdu. Potem zebrane i przedstawione zostają wnioski z badań opisanych w rozdziale 6, wraz z odniesieniem rezultatów uzyskanych dla algorytmu CFF do zachowania oryginalnych metod znanych z literatury. Wydaje się, że ta część podsumowania powinna pojawić się raczej w rozdziale wcześniejszym zawierającym opis i wyniki testów. Autor wymienia tu też w skompresowanej formie najistotniejsze własne osiągnięcia i kończy pracę opisem możliwości dalszego rozwoju i ewentualnych ulepszeń, które można by wprowadzić do algorytmu CFF.

Rozprawę zamyka spis 86 pozycji bibliograficznych (w tym adresów URL) i dodatek zawierający spis 3 stosowanych w tekście skrótów.

Ocena rozprawy

Zgodnie z odnośną ustawą, rozprawa doktorska powinna charakteryzować się zaprezentowaniem ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata, jego samodzielności naukowej i przedstawiać oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, zatem te elementy zostaną poniżej ocenione.

Ocena wiedzy teoretycznej

Próba opracowania algorytmu trasowania ścieżki ruchu pojazdu opartego o symulację przepływu płynu, będąca głównym zadaniem naukowym realizowanym przez Autora rozprawy, wymagała niewątpliwie posiadania odpowiednio szerokiej wiedzy teoretycznej związanej z różnymi aspektami rozpatrywanego zagadnienia jazdy autonomicznej. Wystarczy więc wspomnieć, że Doktorant wykazał się ogólną wiedzą dotyczącą algorytmów trasowania opartych o sztuczne pole potencjałów, ścieżki wielomianowe i symulację przepływu, co zaprezentował w rozdziale 1. Bardziej szczegółowa wiedza związana z symulacją płynów opartą na LBM pojawia się w rozdziale 4 i stanowi ona podstawę autorskiego rozwiązania opisanego w rozdziale 5. Ponadto Autor zaprezentował wiedzę związaną z generowaniem trajektorii (opis geometryczny i fizyka prostego modelu), transformatą odwrócenia perspektywy, czy wreszcie prostym sterowaniem (kontrola prowadzenia). Przedstawiona w rozprawie wiedza teoretyczna była niezbędnym elementem opracowanego przez Doktoranta podejścia, przy czym zaznaczyć należy, że ma ona charakter interdyscyplinarny, co ilustruje choćby, będący wątkiem pobocznym badań, sposób optymalizacji metody LBM polegający na zrównolegleniu obliczeń z wykorzystaniem procesora graficznego. Można zatem uznać, że w rozprawie zaprezentował on, w sposób co najmniej wystarczający, swoją ogólną wiedzę teoretyczną związaną z odnośną dyscypliną.

Ocena samodzielności naukowej

Jako swoje autorskie osiągnięcia opisane w pracy Pan mgr Tomasz Sułkowski wymienia siedem punktów, które można streścić następująco:

- Opracowanie metodologii oceny przydatności symulatorów ruchu drogowego i wybór środowiska do testowania algorytmów.

- Opracowanie algorytmu rekonstrukcji widoku z góry na podstawie danych z kamery przedniej oraz kinematyki prowadzonego pojazdu.
- Opracowanie szybkiej implementacji algorytmu LBM na procesorach karty graficznej.
- Opracowanie algorytmu CFF.
- Eksperymentalne dostrojenie parametrów algorytmu CFF w środowisku CARLA.
- Zebranie i implementacja wybranych testów jakości prowadzenia pojazdu w środowisku CARLA.
- Przeprowadzenie testów prowadzenia pojazdu przez algorytm CFF i porównanie ich z danymi dotyczącymi innych, znanych z literatury algorytmów.

Cel pracy i sformułowana teza badawcza wymagały zatem odpowiedniego zaplanowania przeprowadzonych prac, zarówno koncepcyjnych jak i implementacyjnych, właściwego doboru narzędzi naukowych i technologicznych, czy wreszcie samodzielnego rozwiązania głównego problemu badawczego, oraz pojawiających się w trakcie realizacji badań problemów technicznych. Konieczne było zapoznanie się z literaturą przedmiotu, właściwe wykorzystanie dostępnej wiedzy, oraz zaproponowanie własnych rozwiązań. Biorąc pod uwagę powyższe osiągnięcia, można jednoznacznie stwierdzić, że Doktorant wykazał się samodzielnością naukową na odpowiednim poziomie.

Ocena oryginalności rozwiązania

Jak już wspomniano, zagadnienie opracowania algorytmu autonomicznej jazdy wykorzystującego deterministyczne lub choćby częściowo wyjaśnialne metody, jest bardzo istotne z punktu widzenia potencjalnych zastosowań, w szczególności w kontekście autonomicznego prowadzenia pojazdów samochodowych. Wynika to oczywiście z konieczności zapewnienia przewidywalnych i bezpiecznych rozwiązań, czego w większości przypadków nie gwarantują popularne algorytmy wykorzystujące głębokie uczenie (*deep learning*), czyli modele oparte na – mających nierzadko dziesiątki milionów automatycznie dobranych parametrów – głębokich sieciach neuronowych. Docenić należy więc fakt, że Doktorant postanowił wykorzystać właśnie metody deterministyczne.

Samo planowanie lub generowanie trajektorii ruchu z wykorzystaniem metod symulacji przepływu płynu nie jest podejściem nowym, natomiast opracowany i zaprezentowany w ocenianej rozprawie algorytm CFF można uznać za oryginalny. Jeśli chodzi o inspirację, to opiera się on na połączeniu pomysłów z istniejących metod, czyli używa symulacji płynów do skonstruowania siatki wektorów ruchu, wykorzystuje pole potencjałów modyfikujące odpowiednio siatkę w pobliżu obszarów nieprzejezdnych oraz wielomianowo wyznacza bieżącą trajektorię w postaci łuku o stałej krzywiznie. Odpowiednio skonstruowana fuzja modyfikacji znanych technik, wzbogacona o autorskie elementy takie jak algorytm rekonstrukcji widoku, czy zrównoleglony algorytm LBM, jak również odpowiedni do realizowanego zadania dobór parametrów na podstawie wykonanych testów symulacyjnych, stanowią zatem w całości oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Uwagi krytyczne i wątpliwości

Część wątpliwości recenzenta odnośnie treści rozprawy została już zasygnalizowana w poprzednich sekcjach, natomiast teraz zostaną one uszczegółowione i usystematyzowane.

O ile sam opis opracowanego algorytmu CFF nie budzi większych zastrzeżeń, o tyle już sposób jego eksperymentalnej oceny wykazuje pewne braki, wynikające być może, z przyczyn technicznych. Po pierwsze, samo zaplanowanie i metodyka symulacji sprawdzających działanie algorytmów mogłaby zostać poprawiona poprzez sparametryzowanie konkretnych scenariuszy. Wg Tablicy 6.1 było ich łącznie 55, z czego 47 przypada na testy ablacyjne ChauffeurNet. Również w przypadku pozostałych scenariuszy dodanie dodatkowych wariantów (np. różna prędkość, wielkość pojazdu, topologia skrzyżowania) umożliwiłyby bardziej miarodajne porównanie (zwłaszcza z użyciem testów statystycznych).

Kolejna wątpliwość dotyczy samego sposobu wykonania analizy porównawczej: Doktorant za każdym razem odnosi rezultaty działania własnego podejścia jedynie do algorytmu dedykowanego, związanego z konkretnym scenariuszem testowym. Rodzi to pytanie, czy algorytmy te zostały rzeczywiście zaimplementowane i przetestowane w ramach realizacji badań eksperymentalnych, czy też przedstawione w rozprawie wyniki odnoszą się do danych zawartych w cytowanych źródłach? Niewątpliwie do sformułowania wniosków odnośnie działania badanych algorytmów wskazane byłoby przeprowadzenie badań w ujednoliconym środowisku symulacyjnym. Jeśli tak właśnie było, należało to jasno w rozprawie zaznaczyć, aby uniknąć nieporozumień.

Dodatkowe uwagi i pytania merytoryczne:

- Co Autor ma na myśli pisząc w pierwszym akapicie rozdziału 2 (str. 11), że „*trasowanie ścieżki pojazdu za pomocą technik nie korzystających z uczenia maszynowego, (...) ciągle jest najbardziej solidnym rozwiązaniem w tym zakresie [29, 30]*”? Domyślam się, że chodzi o bezpieczeństwo rozwiązania, które rzeczywiście wzmiankowane jest w cytowanej pozycji [29]?
- Strona 39: nie jest dla mnie jasne zdanie wprowadzające równanie (4.9a) – czy sformułowanie „*najczęściej prowadzi*” oznacza tu, że przy różnych zestawach założeń otrzymujemy to samo oszacowanie?
- Skąd wziął się wzór (4.17)? Czy jest to jakaś interpolacja uzyskanych wyników?
- Strona 58: Autor stwierdza, że proces wyszukiwania wąskich przesmyków w wersji równoległej jest „*szybszy niż można się spodziewać*”? Jak rozumieć to sformułowanie i czego powinniśmy się spodziewać odnośnie szybkości działania?
- W Tablicy 6.1 dla testów ablacyjnych ChauffeurNet znajdujemy różne liczby testów dla metody oryginalnej i CFF (60 i 47). Z czego wynika ta różnica i czy wobec tego uprawnione jest porównanie względnej skuteczności tych metod?
- W bibliografii brakuje najnowszych pozycji – oprócz artykułu Doktoranta nie ma tu żadnego źródła z roku 2022, co zapewne wynika z ukończenia pracy w roku minionym.

Pomimo starannej redakcji, rozprawa zawiera nieliczne błędy literowe i językowe, które jednak nie pogarszają pozytywnego odbioru całości:

- Na stronach 7 i 8 Doktorant omawiając systemy prowadzenia pojazdów wskazuje na instytucje, w których miały powstać, pisząc np. „hybrydę (...) testował *Institute of Control Theory*”, czy „algorytmu opracowanego przez *Wuhan University*”. Po pierwsze brzmi to niezręcznie, po drugie spojrzenie na listy autorów 3 z 4 publikacji ujawnia, że mieli oni różne afiliacje.
- Strona 15, przedostatni akapit: jest „Nnastępnie”, powinno być „Następnie”.
- Strona 15, przedostatni akapit: Doktorant używa sformułowania „*Najbardziej optymalna ścieżka*” – optymalności się nie stopniuje.
- Strona 16: po raz pierwszy pojawia się nazwa *Lattice Boltzmann Method* w wersji angielskiej, a jej polski odpowiednik znajdujemy dopiero na stronie 35, przy czym nazwy połączono na stronie 36.
- Strona 19, drugie zdanie ostatniego akapitu podrozdziału 3.1 kończy się bez powodu znakiem „?”.
- Strona 37: na górze strony zastosowano skrót D2Q4, podczas gdy jego wyjaśnienie znajdziemy dopiero na kolejnej stronie – dobrze byłoby umieścić wcześniej rysunek 4.2 i już w tym miejscu się do niego odwołać.
- Rysunek 4.7 nie posiada legendy, nie wiadomo więc, co oznaczają poszczególne kolory.
- Strona 51, drugi akapit: jest „Confitional”, powinno być „Conditional”
- Strona 52: zamiast „macierz rejestracji”, poprawnym określeniem byłaby „macierz obserwacji”
- Reklama samochodu przyszłości (Rys. 1.1) jest niewątpliwie interesującym elementem wprowadzenia, natomiast nie wymagała, moim zdaniem, wykorzystania całej strony (uwaga czysto subiektywna).
- Dodatek A zawiera wyjaśnienie zaledwie 3 skrótów (a nie symboli), ale nie spełnia do końca swego zadania: w rozprawie znajdziemy wiele innych skrótów występujących co najmniej dwukrotnie i opisanych jedynie w tekście.

Informacje dodatkowe

Choć nie zostało to wspomniane w treści rozprawy, z informacji recenzenta wynika, że doktorat realizowany był w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy. Oznacza to dodatkowo, że rozwiązywane zagadnienie badawcze ma także istotne znaczenie praktyczne i zostało w pewnej mierze wdrożone u pracodawcy Autora. Według zawartego w rozprawie spisu bibliografii, oraz danych w ogólnodostępnych bazach bibliograficznych, Doktorant jest

współautorem dwóch publikacji konferencyjnych (2018 International Conference on Signals and Electronic Systems ICSES i 2019 24th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR) oraz publikacji w czasopiśmie IEEE Access (Vol. 10, 2022) mającym IF = 3.476, co z kolei świadczy o rosnącej umiejętności popularyzowania uzyskanych rezultatów badawczych.

Wnioski końcowe

Podsumowując stwierdzam, że Pan mgr Tomasz Sułkowski w rozprawie doktorskiej zatytułowanej „*Implementacja algorytmu autonomicznej jazdy w symulowanym ruchu ulicznym*”:

- zaprezentował oryginalne rozwiązanie problemu naukowego,
- wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika,
- potwierdził umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Zatem recenzowana praca doktorska **spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim**, zgodnie z Ustawą o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789), oraz zgodnie z Ustawą z 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1669 z póź. zm.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika. Biorąc to pod uwagę **wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.**