

Częstochowa, dn. 29 września 2022 r.

prof. dr hab. inż. Rafał Scherer
Katedra Inteligentnych Systemów Informatycznych
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki
Politechnika Częstochowska
al. Armii Krajowej 36
42-200 Częstochowa

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Rada Dyscypliny
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
wpłynęło dnia 10.10.2022
nr 31 zał.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Sułkowskiego, pt.: Implementacja algorytmu autonomicznej jazdy w symulowanym ruchu ulicznym.

Niniejszą recenzję opracowano na wniosek Rada Dyscypliny Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki Politechniki Śląskiej, która w dniu 12 lipca 2022 r. roku powołała mnie na recenzenta. Promotorem jest prof. dr hab. inż. Jacek Izydorczyk.

1. Charakterystyka tematu, celu i tezy badawczej rozprawy

Jedną z największych zalet samochodów autonomicznych będzie bardzo zredukowana liczba wypadków spowodowanych ludzkim błędem. Będzie to możliwe dzięki komputerom i sztucznej inteligencji. Tworzenie autonomicznych pojazdów jest bardzo trudne, na przykład z powodu braku zdolności algorytmów do przewidywania i oceny ryzyka w przypadkach niespotykanych wcześniej okoliczności lub w przypadku granicznych. Niniejsza praca jest bardzo ciekawym przyczynkiem do rozwoju autonomicznych pojazdów przez zaproponowanie algorytmów opartych na innych zasadach, niż wszechobecne głębokie sieci neuronowe. Dzięki temu, rozważane algorytmy nie potrzebują tak dużej liczby danych jak algorytmy oparte o uczenie maszynowe.

2. Zawartość rozprawy

Recenzowana praca mgr inż. Tomasza Sułkowskiego składa się ze spisu rysunków i tabel, siedmiu rozdziałów, bibliografii oraz spisu skrótów. Dokument liczy 93 stron.

Rozdział pierwszy jest wprowadzeniem do tematyki i historią tworzenia autonomicznych pojazdów. Podano krótką historię autonomicznych pojazdów zapoczątkowaną w latach 50 ubiegłego wieku. Przełom nastąpił w roku 1977, kiedy podjęto próby użycia kamer i komputera do prowadzenia pojazdów; w latach 80' ten pomysł był udoskonalony przez firmę Mercedes-Benz. Dziedzina ta mocno rozwinęła się w XXI wieku kiedy agencja amerykańska agencja

DARPA organizowała zawody długodystansowe pojazdów autonomicznych. W XX wieku każda firma motoryzacyjna stara się stworzyć swój własny system autonomicznego prowadzącego pojazdu wykorzystując radary, LiDAR, GPS oraz kamery stereowizyjne. Dalej Doktorant omawia przedmiot prowadzonych badań w ramach pracy doktorskiej, czyli stworzenie algorytmów prowadzenia autonomicznego samochodu z wykorzystaniem zjawisk zachodzących w cieczy przepływającej przez dwuwymiarowy układ hydrauliczny. Jest to odmienne podejście do wszechobecnego uczenia maszynowego wykorzystującego głównie głębokie sieci neuronowe. Celem pracy jest stworzenie algorytmu ruchu pojazdu samochodowego, który nie wymaga podania celu podróży, unikającego kolizji, naśladującego intuicję kierowcy, z wykorzystaniem danych zbieranych na bieżąco z sensorów bez użycia mapy opartego na symulacji przepływu cieczy. W ten sposób można uniknąć bardzo kosztownej akwizycji danych niezbędnych do uczenia sztucznych sieci neuronowych. Cele te odzwierciedlone są w tezie pracy kończącej ten rozdział.

Rozdział drugi jest przeglądem literatury. Omówiono metody oparte o sztuczne pole potencjałów, gdzie sterowanie odbywa się w oparciu o obliczanie gradientu pola wypadkowego pochodzącego od obiektów znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie sterowanego pojazdu. W następną techniką są wielomianowe ścieżki ruchu. Dalej omówiono techniki oparte o przepływ płynu wykorzystujące samoorganizację cząstek płynu w ich podążaniu od źródła ciśnienia do ścieku w granicach określonych przez ukształtowanie terenu czy otoczenie. Idea sztucznego pola potencjałów pochodzi z roku 1985. Początkowo metody te operowały w środowisku statycznym, na przykład przy sterowaniu manipulatorem robota. Dynamiczne środowisko, w którym również przeszkody są ruchome, rozważano dopiero na początku XXI wieku. Pomysł na użycie symulacji przepływu płynu do wyznaczania ścieżki poruszania się robota po raz pierwszy pojawił się prawie 30 lat temu.

Rozdział 3 prezentuje przegląd istniejących symulatorów ruchu ulicznego. Na początku Doktorant wymienia kryteria oceny symulatorów. Pierwszym jest fizyka jazdy związana z realizmem poruszania się pojazdu po drodze czyli wpływ kinematyki na dane sensorów (pochylanie samochodu, uślizg kół czy punkt obrotu samochodu). Następnym kryterium jest różnorodność symulowanego środowiska jazdy – algorytm prowadzenia powinien być testowany w jak najbardziej różnorodnym środowisku czyli przy różnych topologiach ulic, zabudowy, krajobrazu, roślinności oraz warunków pogodowych. Następnym kryterium jest liczba typów danych telemetrycznych takich jak prędkość kątowa kół czy kąt skrętu. Ponadto, ważne są aspekty niezwiązane z samym ruchem pojazdu, takie jak język programowania, system operacyjny czy zapisy licencyjne. Pierwszym ocenianym symulatorem był Microsoft AirSim. Jest on stworzony po części na bazie Unreal Engine 4. Wadą symulatora było twarde zawieszenie i statyczny sposób poruszania się elementów środowiska. Możliwe jest uzyskanie danych prawie ze wszystkich sensorów oprócz LiDARu. W następnym symulatore jest symulator CARLA, którego wielką zaletą jest otwartość kodu, możliwość symulacji różnorodnych warunków pogodowych, pojazdów i pieszych. Pozwala na uzyskiwanie danych z wielu sensorów w tym LiDARu, jest on również oparty na Unreal Engine 4. Nie ma on zaimplementowanej pełnej fizyki poruszania się pojazdu, przez co nie można testować jazdy w warunkach ekstremalnych. Sceneria może być dowolnie modelowana, a użytkownicy ruchu zachowują się w sposób inteligentny. Następnym systemem do symulacji jest połączenie gry

GTA 5 z rozszerzeniem Script Hook, przez co mamy dostępną bardzo realistyczną scenerię oraz detale. Ponadto, fizyka jazdy jest oparta na prawdziwym modelu prowadzenia samochodów. Sceneria to ponad 70 000 z unikalnych segmentów dróg na 250 km² wirtualnej mapy. Dostępne jest ponad 260 modeli pojazdów i ponad 1000 modeli pieszych oraz zwierząt. Rozszerzenie Script Hook daje dostęp do telemetrii jazdy, jednak niedostępne są dane sensorów. Po dokonaniu wnikliwej analizy, Doktorant wybrał symulator CARLA do dalszej pracy.

Rozdział 4 omawia zastosowanie algorytmów symulacji przepływu płynu w wyznaczaniu trasy pojazdu. Pierwsza idea wykorzystania mapy wektorów przepływu płynu ciśnienia do ujęcia została zaproponowana w 1994 roku i udoskonalona w 1998 roku. Pomysł ten był stosowany do sterowania ruchem statków na morzu oraz statków powietrznych. Symulacje przepływu płynu można dokonywać albo za pomocą symulacji ruchu cząsteczek albo w oparciu o kratownice przepływów. Autor wybrał tą drugą metodę jako nieporównywalnie szybszą i zastosował metodę kratowego równania Boltzmanna, pochodzącą od równania transportu Boltzmanna, które opisuje czasową ewolucję dystrybucji cząstek symulowanego płynu. Aby obliczyć kratowe równanie Boltzmanna, Autor dyskretyzuje równania transportu Boltzmanna w czasie i przestrzeni. Dalej w rozdziale, Doktorant przeprowadził eksperymenty z wykorzystaniem krat Boltzmanna do prostego sterowania samochodem. W drodze eksperymentów, dobrał optymalną wielkość krat.

W rozdziale 5 Doktorant prezentuje właściwy algorytm sterowania pojazdem wykorzystujący kratowe równanie Boltzmanna, zoptymalizowany pod kątem prędkości obliczeń. Zrównoleglenie obliczeń odbyło się z wykorzystaniem pakietu Python Numba, przez co obliczenia mogły być wykonywane równolegle na karcie graficznej. Wykorzystując kartę graficzną o przeciętnej wydajności, udało się przyspieszyć obliczenia około 20 razy. Dalej prezentowany jest właściwy algorytm Continuous Fluid Flow (CFF), który był opublikowany w czasopiśmie IEEE Access. Danymi wejściowymi do algorytmu jest widok segmentacji czyli obraz pochodzący z (wirtualnej) kamery zamontowanej nad przednią szybą samochodu. Środowisko Carla udostępnia obraz segmentacji wchodzący automatycznie uzyskiwany z danych, natomiast Doktorant przeprowadził eksperymenty porównując segmentację dokonywaną przez sieć neuronową i wyniki były zbliżone. W rzeczywistym środowisku oczywiście trzeba by wykorzystać jakiś algorytm segmentacji obrazu wideo. Następnie, obraz przetwarzany jest przez algorytm odwracania perspektywy. Autor wykorzystał tu algorytm pochodzący z literatury o nazwie *Inverse Perspective Transformation* (IPT). Algorytm zamienia obraz segmentowany na widok z lotu ptaka. Następnie tworzona jest siatka segmentacji z kolejnych sekwencji ruchu pojazdu, aby uniknąć cieni. Na siatce nanoszona jest droga, uczestnicy ruchu oraz chodnik. Dalej tworzony jest obraz na siatce zajętości, który jest pobierany z symulatora Carla. W rzeczywistym środowisku dane byłyby pozyskiwane z urządzenia LiDAR albo z komunikacji pomiędzy pojazdami typu V2X. Pojazd jedzie pomiędzy przeszkodami dzięki siatce wektorów odpychających. Wyszukiwane są również i blokowane wąskie przesmyki, przez które przepłynąłby płyn, ale nie zmieściłby się pojazd. Dalej obliczana jest symulacja płynu algorytmem LBM, który wykonywany jest równolegle na dwóch urządzeniach CUDA – na jednym przepływ cząstek, na drugim kolizję cząstek. Ostatecznie, tworzona jest siatka wektorów ruchu przez połączenie siatki wektorów przepływu płynu oraz

siatki wektorów odpychających. Po śledzeniu wektorów ruchu następuje planowanie trajektorii, która jest wyznaczona w postaci łuku o stałej krzywiznie. Rozdział kończą wzory na sterowanie poprzeczne i wzdłużne samochodem, czyli na obliczanie skrętu kół i prędkości.

Rozdział 6 jest opisem testów zaproponowanego algorytmu CFF. Testy wykonano na dwóch komputerach. Na pierwszym uruchomiono symulator Carla. Na drugim był uruchomiony algorytm CFF. Oba komputery były połączone siecią 10 GB. Pierwszymi testami były testy ablacyjne wykorzystujące scenariusze i dane z publikacji ChauffeurNet. Wykonano testy omijania zaparkowanego samochodu, odzyskiwania po zaburzeniu trajektorii oraz zwalnianie do wolno jadącego samochodu. Następnie wykonano testy wyprzedzania z wykorzystaniem scenariusza z innej publikacji. Dalej opisany jest test odchylenia na skrzyżowaniu i tutaj również użyto danych z istniejącej publikacji. Ostatnią grupą były testy przejeżdżania przez skrzyżowanie sygnalizacją świetlną, gdzie droga jest przecinana przez samochód jadący nieprawidłowo na czerwonym świetle. We wszystkich testach, zaproponowany algorytm CFF działał tak samo albo lepiej niż algorytm z literatury.

Rozdział 7 jest podsumowaniem pracy oraz zaproponowaniem pomysłów na dalsze badania.

Pracę kończy bibliografia składająca się z 86 pozycji oraz krótki dodatek z definicją trzech skrótów.

3. Ocena rozprawy

W ramach rozprawy doktorskiej Doktorant zaproponował zestaw rozwiązań oparty o zachowanie się cieczy w dwuwymiarowym układzie hydraulicznym do sterowania pojazdem. Stworzył algorytm autonomicznego prowadzenia pojazdu jako fuzję trzech technik deterministycznych. Przeanalizował istniejące symulatory ruchu drogowego. Stworzył algorytm rekonstrukcji widoku z lotu ptaka wokół prowadzonego pojazdu na podstawie widoku z kamery przedniej oraz kinematyki prowadzonego pojazdu. Opracował równoległą implementację algorytmu LBM na procesorach graficznych. Stworzył algorytm Continuous Fluid Flow. Przeprowadził różnorodne testy jakości prowadzenia pojazdu przez algorytm CFF i porównał je z danymi dotyczącymi innych metod istniejących w literaturze.

Rozprawa doktorska uwidacznia wysoką ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną mgr inż. Tomasza Sułkowskiego. Doktorant przeanalizował dorobek światowy w dziedzinie dotyczącej sztucznego pola potencjałów, wielomianowego wyznaczania ścieżki oraz symulacji przepływu płynu w wyznaczaniu ruchu. Zauważył istniejące problemy z nimi związane i zaproponował własne rozwiązania, które osadził w otwartym symulatorze ruchu CARLA i opublikował. Mgr Sułkowski opublikował pracę naukową w czasopiśmie IEEE Access za 100 punktów oraz pracę w materiałach konferencji. Zaprezentowany materiał pokazuje, że Doktorant zrealizował cel pracy.

Rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej mgr inż. Tomasza Sułkowskiego. Opracował wprowadzenie do tematyki i dokonał przeglądu literatury dotyczącej sztucznego pola potencjałów, wielomianowego wyznaczania ścieżki oraz symulacji przepływu płynu w wyznaczaniu ruchu. Wykonał eksperymenty egzystujące w

otoczeniu istniejącego ekosystemu symulacji ruchu pojazdów. Zadbaj o popularyzację wyników swoich badań w renomowanych wydawnictwach.

Rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Zaproponowane metody mają duże znaczenie dla nauk technicznych, zarówno teoretyczne, jak i aplikacyjne. Podjęta tematyka może mieć wiele zastosowań w systemach autonomicznych.

Możliwym zarzutem do pracy są dość szczątkowe eksperymenty. Wyniki są okrojone i nie towarzyszy im jakaś forma analizy statystycznej. Oczywiście, ocena ruchu jest częściowo subiektywna, stąd może być to trudne.

Brakuje czasami dokładnych opisów prezentowanych metod oraz udostępnienia kodów pracy oraz przykładowych filmów z działania systemu. Np. równoleglenie algorytmu LBM mogło być może opisane nieco dokładniej, a nie w taki lakoniczny sposób: „Implementacja równoległa algorytmu LBM z wykorzystaniem procesorów CUDA za pomocą pakietu Python Numba okazała się bardzo efektywna. Dzięki rozdzieleniu etapów LBM: przepływu oraz kolizji (równanie (4.8)), obliczenia dla każdej z klat mogą być wykonywane równolegle.”

Tytuł pracy nie oddaje w pełni tematyki pracy nie wspominając o oparciu algorytmów na symulacji przepływu cieczy. Uminiejsza też wkład doktoranta mówiąc jedynie o implementacji.

Dodatek A zawiera definicję jedynie trzech skrótów, brakuje np. IPT, V2X, LiDAR, VaMoRs. Natomiast inne skróty zdefiniowane są w tekście, DARPA czy RCA.

Ponadto w pracy znajduje się kilka drobnych błędów literowych i interpunkcyjnych, których przykłady wymienione są poniżej:

Conditional Random Field Framework.

brak przecinków przed „aby”.

4. Wnioski końcowe recenzji

Podsumowując recenzję stwierdzam, że Pan mgr inż. Tomasz Sułkowski, w rozprawie doktorskiej „Implementacja algorytmu autonomicznej jazdy w symulowanym ruchu ulicznym” zrealizował cel rozprawy. Zaprezentowane rezultaty stanowią oryginalny wkład Autora w rozwój dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika. Pan Tomasz Sułkowski wykazał się umiętnością samodzielnej pracy badawczej, znajomością literatury światowej i wiedzą w zakresie sterowania pojazdami autonomicznymi, programowania oraz programowania równoległego. 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 późn. zm.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika, wnioskuję o przyjęcie rozprawy i jej doproszczenie do publicznej obroty