

Prof. dr hab. inż. Damian Grzechca
Politechnika Śląska
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki
Katedra Elektroniki, Elektrotechniki i Mikroelektroniki

Gliwice, 8 sierpnia 2024 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: **Inteligentny system sterowania robotem mobilnym
(Intelligent Control System for Mobile Robot)**

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Autor rozprawy: Ravi Raj

Wpłynęło dnia 13.08.2024

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Andrzej Kos

Zarejestrowano pod nr 510-2-5/24

Podpis *Jm*

Niniejsza recenzja została przygotowana na zlecenie Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, na podstawie uchwały z dnia 6.06.2024 i pisma z dnia 6.06.2024r. Przewodniczącego rady dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne Pana prof. dr. hab. inż. Ryszarda Sroki.

1. Informacje wstępne

Rozprawa doktorska mgr inż. Ravi Raj dotyczy analizy oraz opracowania techniki niezależnego uczenia się robotów mobilnych opartej na naśladowaniu przy braku lub przy małej liczbie odpowiednich demonstracji, czyli wzorców zachowań wymaganych w autonomicznej nawigacji w środowisku zmieniającym się dynamicznie. Autor założył pozyskiwanie informacji przez robota mobilnego za pomocą wstępnych prezentacji eksperckich, czyli naturalnej skłonności ludzkiej związanej z naśladownictwem. Faza prezentacji eksperckich obejmuje zdefiniowany, skończony zbiór przykładowych działań, które w konsekwencji nieprzewidywalnych działań mogą się różnić od wymaganych działań w rzeczywistym środowisku. Doktorant postanowił połączyć fazę ekspercką z metodami sztucznej inteligencji, które pozwalające uogólnić pozyskaną wiedzę do innych możliwych scenariuszy nie uwzględnionych w prezentacjach eksperckich.

Praca została podzielona na 7 rozdziałów, listę skrótów, spisy tabel i rysunków, oraz spis literatury, które łącznie zajmują 142 strony. Spis literatury składa się ze 133 pozycji, które właściwie pokrywają obszar badań prezentowany w rozprawie. W rozdziale drugim opisano podstawowe techniki mogące znaleźć zastosowanie w sterowaniu robota mobilnego, tj. uczenie przez wzmacnianie (Reinforcement Learning, RL), ogólnie o metodach sztucznej inteligencji (Artificial Intelligence, AI), uczeniu maszynowym (Machine Learning), uczeniu głębokim (Deep Learning, DL) oraz sztucznych sieciach neuronowych (Artificial Neural Network, ANN). Rozdział 3 zawiera przegląd literatury związany z inteligentnym sterowaniem robotów mobilnych. W rozdziale 4 opisano częściowo obserwowalny proces decyzyjny Markowa wraz z potencjalnymi rozwiązaniami opartymi na programowaniu dynamicznym (Dynamic Programming, DP). Autonomiczna nawigacja pojazdów/robotów mobilnych w nieznanym środowisku z wykorzystaniem RL (uczenia poprzez wzmacnianie) opisano w rozdziale 5.

Rozdział ten jest w mojej ocenie najważniejszym rozdziałem recenzowanej rozprawy. Założeniem opracowanych metod jest brak informacji o mapie, wstępny proces wyznaczania wartości Q oparty na sieci neuronowej typu wielowarstwowy perceptron. Zaproponowane podejście zostało ocenione dla scenariusza statycznego i dynamicznego w środowisku symulacyjnym o różnym poziomie złożoności z losowo umieszczonymi przeszkodami. Otrzymane rezultaty pozwoliły ocenić zaproponowaną metodę dla środowiska nieznanego, tzn. bez wstępnie dostępnej mapy. W rozdziale 6 przeprowadzono dyskusję porównawczą różnych strategii nawigacji bazujących na uczeniu ze wzmocnieniem, optymalizacji rojowej (Particle Swarm Optimization, PSO) oraz nawigacji termicznej (Thermal navigation). Rozprawę kończy rozdział 7, gdzie przeprowadzono dyskusję, przedstawiono wnioski końcowe oraz perspektywy rozwoju inteligentnego sterowania dla robotów mobilnych.

Zauważyć również należy, że Autor rozprawy jest współautorem 16 publikacji, z czego aż 7 pozycji to artykuły posiadające współczynnik wpływu (Impact Factor), a dodatkowo dwie pozycje literaturowe są aktualnie w recenzji. Doktorant jest pierwszym Autorem we wszystkich publikacjach z listy JCR, a 3 publikacje (oraz potencjalnie dwie kolejne) są w pierwszym kwartylu wg bazy Scopus. Sumarycznie liczba punktów MNiSzW wynosi 1140pt., co jak na Doktoranta jest wartością imponującą.

2. Zagadnienia naukowe rozpatrywane w rozprawie

(Jakie zagadnienia naukowe/badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?)

Doktorant podkreśla, że inspiracją prac badawczych zaprezentowanych w rozprawie jest konkurs „DARPA challenge”, którego celem jest zaprojektowanie algorytmu nawigacji dla pojazdów autonomicznych umożliwiający przejechanie zdefiniowanego odcinka docierając do celu najszybciej bez zbędnych strat. Innymi słowy, algorytm lub algorytmy powinny brać pod uwagę aktualny stan robota mobilnego, a kolejne czynności powinny być logiczne i umożliwić prawidłową percepcję otoczenia wykorzystując do tego dostępne sensory umieszczone na pojeździe mobilnym. W tym celu konieczne staje się nabycie takich umiejętności sterowania, które poradzą sobie w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu, dlatego możliwość uczenia się i samodoskonalenia istniejących umiejętności jest zasadna. W mojej ocenie praca pośrednio dotyczy sterowania, a jej głównym wątkiem jest zdefiniowanie aktualnego stanu robota i podjęcia odpowiedniej akcji w kontekście wyznaczenia lub korekty trajektorii poruszania się robota w przypadku zaistnienia sytuacji krytycznej, co ma miejsce przy niekorzystnych warunkach dynamicznych zmian występujących w najbliższym otoczeniu pojazdu (robota), co w zasadzie sprowadza się do omijania przeszkód, w tym też przeszkód ruchomych, np. ludzi.

Praca nie ma wprost sformułowanej tezy, a cel pracy jest zawarty w formie opisu w rozdziale 1.2, który brzmi następująco: “Robots must possess the ability to acquire information either on their own or with assistance. The role of intelligent control in self-navigating systems through robot learning using sensory information is examined in this doctoral thesis. It is intended that people lacking programming skills would be able to more readily expand and customize robotic skills for new scenarios.”, co rozumieć można

następująco: cel dotyczy planowania doraźnej ścieżki poruszania się robota mobilnego z wykorzystaniem techniki „uczenie się z demonstracji (LFD)”, co skutkuje możliwością budowy odpowiednich przejść pomiędzy stanami i wykonania właściwych akcji, wykorzystując eksperckie prezentacje jako dane wejściowe. Działania Doktoranta są więc skierowane na opracowanie techniki umożliwiającej nawigowanie w nieznanym środowisku na podstawie danych z dostępnych sensorów zainstalowanych na pojeździe, czyli tzw. percepcji otoczenia z wykorzystaniem uczenia ze wzmacnianiem (Reinforcement Learning). Doktorant postanowił wykorzystać te dane w celu samodzielnego, niezależnego uczenia się robota mobilnego i w konsekwencji odpowiedniego sterowania tak, aby ominąć wszelkie przeszkody na drodze do określonego punktu docelowego. Niemniej istotnym celem pracy jest opracowanie procedury umożliwiającej opracowanie dedykowanego systemu nawigacji dla osób nieposiadających zdolności programistycznych. Należy zaznaczyć, że nawigacja pojazdem mobilnym nie jest zagadnieniem nowym, jednak aspekt samouczenia się z wykorzystania metod inteligencji obliczeniowej uznać można za element nowy, biorąc pod uwagę założenia, tj. brak dostępności do rzeczywistej mapy w środowisku z dynamicznie zmieniającymi się przeszkodami. W mojej ocenie problem rozważany przez Doktoranta jest aktualny, jednak opisowość celu i brak wprost sformułowanej tezy powodują pewne trudności w interpretacji uzyskanych wyników pojawiających się w dalszej części czytania rozprawy.

Podsumowując, stwierdzić można, że Autor podjął się trudnego zadania związanego z autonomiczną nawigacją robotów mobilnych na podstawie informacji uzyskanych z dostępnych sensorów w dynamicznie zmieniającym się środowisku, a następnie, analizowania tych danych i podejmowania odpowiednich działań (akcji) w celu skutecznego manewrowania w środowisku, zgodnie z wcześniej ustalonym kursem.

3. Analiza źródeł, stan wiedzy i zastosowań w przemyśle

(Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?)

Bibliografia zawiera 133 pozycje naukowe, które dobrze komponują się z zakresem prac realizowanym przez Doktoranta. Zaznaczyć należy, że Doktorant jest autorem lub współautorem aż 17 publikacji, co jest osiągnięciem imponującym tym bardziej, że większość tych prac jest dwuautorska. Dorobek naukowy Doktoranta z nawiązką spełnia wymagania stawiane przez Radę Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Rozprawa napisana jest w języku angielskim, w sposób zrozumiały, a uwagi zawarte w dalszej części recenzji mają głównie charakter dyskusyjny. Wnioski z przeglądu źródeł sformułowane są w sposób prawidłowy i przekonujący. Wyniki wprowadzonych metod mogą stanowić podstawę do praktycznej implementacji przemysłowej i mogą być inspiracją do dalszych badań wdrożeniowych.

Pewne zastrzeżenia budzi struktura pracy, np. zagnieżdżenie podrozdziałów w rozdziale pierwszym jest niepotrzebne. Podział rozdziału drugiego, czy przegląd literatury w rozdziale trzecim powodują, że właściwa część pracy rozpoczyna się od rozdziału czwartego na stronie 55, a w zasadzie rozdział piąty to najważniejszy rozdział rozprawy.

Podsumowując, przedstawiona analiza aktualnego stanu wiedzy jest przeprowadzona właściwie i dobrze odzwierciedla aktualne trendy w obszarze zastosowań metod sztucznej inteligencji do nawigacji, w tym sterowania pojazdem mobilnym, choć struktura podziału wydaje się być zbyt rozbudowana.

4. Metody i założenia użytych metod

(Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?)

Proces autonomicznej nawigacji robota mobilnego można podzielić na kilka części, tj. percepcja otoczenia, odwzorowanie otoczenia do lokalnej mapy kosztów (occupancy grid map), lokalizacja robota mobilnego (w wypadku, kiedy mapa środowiska jest dostępna), planowanie ścieżki poruszania oraz określenie kolejnej akcji, tj. predykcja lub ogólniej odpowiednia reakcja na zdarzenia pojawiające się na torze ruchu pojazdu mobilnego. Jedną z eksplorowanych technik związanych z autonomią robotów jest wykorzystanie doświadczenia (zdarzeń przeszłych) oraz metod sztucznej inteligencji w celu m.in. obniżenia kosztów implementacyjnych, czyli czasu wymaganego na zakodowanie problemu, czy mnogość sytuacji możliwych do zaistnienia w danym środowisku. Doktorant zauważa również, że problemem może być również zakłócony odczyt z poszczególnych wykorzystanych czujników, dlatego przetwarzanie informacji sensorycznych z zakłóceniami ma niewątpliwie duże znaczenie podczas prawidłowej nawigacji pojazdu mobilnego. Niestety tym problemem Doktorant się nie zajmuje, domyślnie zakładając, że metody sztucznej inteligencji poradzą sobie z takimi zakłóceniami. Podstawowym założeniem pracy jest wykorzystanie decyzyjnego procesu Markowa, który rozważano w kilku wariantach z różnymi funkcjami przekształcającymi aktualny stan w odpowiednią akcję. Przyjęte założenie dotyczące nieznaności modelu (model-free) w uczeniu ze wzmocnieniem przy nieznanym otoczeniu jest prawidłowe. Jedną z możliwości podejmowania decyzji (decision making) jest sieć neuronowa znana ze swych własności uogólniających. Pan Ravi Raj wskazuje tutaj niedogodność związaną z dużą liczbą węzłów obliczeniowych, co z jednej strony jest prawdą, ale z drugiej strony sieć taka najczęściej jest uczona w procesie przygotowawczym i posiada pewne zdefiniowane (lub predefiniowane) wartości wag.

Podsumowując, w mojej ocenie Autor przyjął właściwe założenia dla procesu decyzyjnego Markowa, a swoją uwagę skierował na odpowiednie przejście pomiędzy wektorem stanów, a wektorem akcji na podstawie odpowiednio skonstruowanej funkcji nagrody.

5. Oryginalność rozprawy, samodzielny i oryginalny dorobek Autora

(Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?)

Uczenie się robotów odpowiedniej akcji na podstawie aktualnego stanu i analizy najbliższego otoczenia powoduje możliwość zastosowania wielu technik uczenia maszynowego (Machine Learning) lub ogólniej metod sztucznej inteligencji. Doktorant

wykorzystuje proces decyzyjny Markowa w różnych wariantach, który następnie wzbogaca o metody inteligentnego uczenia poprzez wzmacnianie. Analiza otoczenia oraz aktualnego stanu robota mobilnego oparta jest na sensorach zewnętrznych i wewnętrznych umożliwiających ocenę zarówno aktualnego stanu robota, jak i percepcję najbliższego otoczenia. Na podstawie recenzowanej rozprawy do najważniejszych osiągnięć Autora zaliczyć można:

- Zdefiniowanie algorytmu uczenia oraz nawigacji NNQL, tj. połączenie zdolności adaptacyjnych oraz generalizujących sieci neuronowych w algorytm uczenia ze wzmacnianiem, poprzez zastąpienie wartości funkcji Q za pomocą trójwarstwowej sieci neuronowej typu wielowarstwowy perceptron, na której wejście podawane są informacje z sensorów, a która na wyjściu wyznacza wartość funkcji Q.
- wprowadzenie dedykowanej funkcji nagrody w celu adaptacyjnego uczenia na podstawie naśladowania zachowań przeszłych, co umożliwia wygenerowanie odpowiedniego zachowania robota mobilnego w środowisku rzeczywistym z przemieszczającymi się obiektami.
- Zdefiniowanie dedykowanych kryteriów przejść (transitions) pomiędzy rozważanymi stanami, w których dobierane są wartości odległości pomiędzy kolejnymi krokami w czasie dyskretnym.

Podsumowując, wprowadzony algorytm uczenia polega na zebraniu eksperckich par stan-akcja, co wykonywane jest offline, a w trakcie regularnych czynności poruszający się pojazd (robot) doucza sieć neuronową bez dodatkowego etykietowania informacji wyjściowej. Polityka przejść pomiędzy stanem i akcją jest oparta na sieci neuronowej, która na wyjściu określa wartość funkcji Q dla poszczególnych przejść. Wybór odpowiedniej pojedynczej akcji odbywa się na podstawie polityki zachłannej (greedy policy), co dla sieci neuronowej posiadającej 5 neuronów w warstwie wyjściowej oznacza, że wygrywa neuron o największej wartości (WTA - Winner Takes All).

Podsumowując, uważam, że recenzowana rozprawa posiada elementy oryginalne i zawiera koncepcję inteligentnego dedykowanego podejścia do sterowania robota mobilnego.

6. Przydatność rozprawy w naukach inżynieryjno-technicznych

Rozprawa doktorska opiera się na zdefiniowanym środowisku symulacyjnym, która wymaga znajomości np. kinematyki robota tak, aby można było bezpośrednio zaimplementować algorytm wprowadzony przez Doktoranta. Niemniej jednak, przedstawiona koncepcja łączenia metod sztucznej inteligencji z procesem decyzyjnym Markowa może być wykorzystana przez naukowców, inżynierów projektantów, a także powinna być inspiracją do tworzenia hybrydowych metod podejmowania właściwej akcji, w których wiodącą rolę będą odgrywać algorytmy sztucznej inteligencji. W związku z tym, uważam, że rozprawa wnosi wkład w nauki inżynieryjno-techniczne i zaliczyć ją należy do dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

7. Uwagi dyskusyjne

Podczas czytania rozprawy nasuwają się pewne elementy dyskusyjne, które przedstawiam poniżej.

- Łączenie danych z poszczególnych sensorów jest typowo rozwiązywane poprzez wprowadzenie tzw. mapy zajętości (occupancy map), która scala informacje pochodzącą z różnych sensorów. Najczęściej upraszcza to problem i umożliwia szybsze przejście pomiędzy kolejnymi stanami. Jaki wpływ na czas reakcji ma liczba zainstalowanych sensorów? Czy i jak powiązać czas wygenerowania akcji robota na zaistniałą sytuację krytyczną? Czy można oszacować i/lub powiązać czas reakcji z prędkością i odległością od napotkanej przeszkody?
- Stan „safe” jest najczęściej zarezerwowany dla sytuacji, w której nastąpił jakiś krytyczny wyjątek i należy zatrzymać pojazd/robot mobilny, aby nie wyrządził żadnych dodatkowych szkód. Dlaczego taki stan w procesie osiągnięcia WS (Winning State) nie jest rozważany?
- Zastanawiające jest, dlaczego przejście (transitions) do stanu „Failure State” możliwe jest tylko ze stanu „Dangerous State” i o ile można wyjść ze stanu „Dangerous” do dowolnego innego, (tab. 5.1) to jednak nie widać możliwości wyjścia ze stanu „Unsafe state”, które nie jest zdefiniowane we wzorze (5.14).
- Kryteria przejścia (tab. 5.1) oraz wartość „r” są zapewne dobrane pod odpowiedni obszar i prędkość z jaką może poruszać się robot oraz czas przetwarzania danych z sensorów. W jaki sposób należy uzależnić przejścia (wartości z tabeli 5.1) od prędkości lub liczby dostępnych sensorów?
- Eksperyment symulacyjny został zaprojektowany dla powierzchni 250m x 250m. Co Autor ma na myśli pisząc o optymalnej ścieżce (optimal path)? Czy jest to po prostu prosta po której ma się poruszać robot, kiedy nie napotka żadnych przeszkód? Czy jest to ścieżka uwzględniająca losowo rozmieszczone przeszkody? W jaki sposób jest wyznaczana optymalna ścieżka? W opisie występuje również „reaching its target destination as rapidly and efficiently as possible”? W jaki sposób ocenić efektywność lub prędkość? Czy są tutaj jednoznaczne kryteria oceny?
- Odnośnie wyniku eksperymentu (opis na stronie 102) wynika, że algorytm jest zbieżny, jednak dopiero po odpowiednio dużej liczbie prezentacji. Dla pierwszych 50 prezentacji zaledwie kilkanaście przejazdów (ze 100) dotarło do celu. Znaczną poprawę zauważono dopiero dla dużej liczby prezentacji. Ze względu na zastosowanie sieci neuronowej, czy wg Autor może wystąpić tutaj problem przeuczenia sieci pod określone środowisko?

Wybrane uwagi szczegółowe zauważone podczas czytania rozprawy:

- LfD na stronie 29 (powinno być LFD),
- niezręcznością językową jest wprowadzenie słowa „suggested”, które powinno być w wielu miejscach zastąpione słowem „proposed”,
- w tab. 5.1 brak jednostek, oraz w tekście niezdefiniowane parametry stałe d_{min} , d_{warn} , d_{win} ,

- w pracy jest sporo zdań opisowych bez liczbowej informacji uzasadniającej, np.: „The blue-colored paths are considered as less optimal paths w. r. t. green-colored path because the green-colored path is the shortest and consumes less energy thus it is the optimal path when compared with blue colored paths.”,

- skrót w.r.t. = “with respect to” jest w pracy zbędny.

Doktorant nadużywa również słów "we", "our" zapominając, że rozprawa powinna być pisana w stronie biernej, a w sytuacji podkreślenia autorskich elementów w pierwszej osobie liczby pojedynczej. W pracy pojawia się sporo błędów natury stylistycznej, brakuje rodzajników i pojawiają się niespójności słowne, tzw. literówki.

9. Wniosek końcowy

W świetle powyższych uwag stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska, pomimo uwag o charakterze dyskusyjnym i polemicznym, spełnia warunki określone w art. 13 *Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym* z dnia 14 marca 2003 r. z późn. zm. (Dz.U. 2017, poz. 1789) oraz ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018r. i wnioskuje o dopuszczenie mgr. inż. Ravi Raj do dalszych etapów przewodu doktorskiego.


.....

 **PODPIS ZAUFANY**
DAMIAN ERNEST
GRZECHCA
08-08-2024 16:59:18 (GMT+2)
Dokument podpisany elektronicznie
podpisem zaufanym