

Gdynia, 2024-08-07

prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki
Katedra Elektroniki Morskiej
Wydział Elektryczny
Uniwersytet Morski w Gdyni

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 13. 08. 2024
Zarejestrowano pod nr S10-2-6/24
Podpis *dm*

Recenzja rozprawy doktorskiej

**mgr inż. Ravi Raja nt. „Inteligentny system sterowania robotem mobilnym”
(„Intelligent Control System for Mobile Robot”)**

1. Uwagi ogólne

Niniejsza recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Ravi Raja została przygotowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Rozprawa ta dotyczy inteligentnych systemów sterowania i nawigowania w zastosowaniach dla robotów mobilnych, systemów wspierających kierowcę samochodu i wspomagających poruszanie się osób słabo widzących. Jej tematyka mieści się w dyscyplinie naukowej Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Doktorant przedstawił w swej rozprawie wyniki swoich badań stanowiących istotne przyczynki w zakresie sztucznych sieci neuronowych, rozpoznawania położenia w nieznanym otoczeniu i uczenia się wyznaczania trasy między zadanymi punktami w nieznanym otoczeniu. Praca nie ma struktury typowej dla rozpraw doktorskich, tzn. nie sformułowano w niej tezy rozprawy, która jest dowodzona w kolejnych rozdziałach. Oceniana praca ma strukturę bardziej typową dla monografii naukowych. Doktorant prezentuje w niej swoje osiągnięcia w zakresie tematu rozprawy na tle osiągnięć innych autorów.

Autor zaproponował zastosowanie systemów automatycznego uczenia się ze wzmocnieniem i sieci neuronowych w systemach samonawigujących z wykorzystaniem informacji sensorycznych. Przeanalizował właściwości trzech algorytmów uczenia się. Przedstawione zostały efekty zastosowania tych systemów dla samonawigujących robotów mobilnych, kontroli trasy dla samochodów oraz systemów ułatwiających poruszanie się osobom słabo widzącym w nieznanym otoczeniu.

Poruszane w pracy zagadnienia są ważne z punktu widzenia badania systemów sterowania robotów mobilnych w nieznanym środowisku oraz rozwoju techniki pojazdów

autonomicznych oraz wsparcia przez systemy samonawigujące dla osób niepełnosprawnych.

Tematyka podjęta w ocenianej pracy doktorskiej jest aktualna i ważna, a częściowe problemy rozważane przez Doktoranta są również poruszane w licznych pracach innych autorów, opublikowanych w kilkunastu ostatnich latach. Dowodzi to trafnego wyboru zagadnienia badawczego.

Doktorant wykazał, że zaproponowane przez Niego algorytmy są efektywne we wszystkich badanych przez niego aplikacjach. Przedstawione w rozprawie wyniki badań dowodzą wysokich kompetencji Doktoranta w zakresie techniki sensorowej, sztucznych sieci neuronowych, systemów samonawigujących, metod samouczenia oraz planowania i realizacji badań naukowych.

2. Ocena merytoryczna pracy

Praca liczy łącznie 142 strony i zawiera 7 rozdziałów, wykaz cytowanej literatury, a także spis treści, listę skrótów, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz podziękowania i wykazy rysunków, tabel, algorytmów, listę opublikowanych prac autora rozprawy.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawił podstawowe informacje na temat robotów mobilnych, historii ich rozwoju i typach takich robotów. Wskazane zostały problemy związane z autonomicznością robotów mobilnych i uczeniem takich robotów oraz oddziaływaniem między robotem a człowiekiem. W rozdziale tym uzasadniono podjęcie tematu, wskazano na najważniejsze osiągnięcia pracy oraz przedstawiono jej strukturę.

Rozdział drugi opisuje informacje literaturowe na temat uczenia się ze wzmacnianiem. Autor wyjaśnia pojęcie sztucznej inteligencji, uczenia maszynowego, głębokiego uczenia, sztucznych sieci neuronowych i głębokich sieci neuronowych. W rozdziale tym przedstawiona jest także krótka historia uczenia się ze wzmacnianiem i główne aplikacje tej metody. Ostatnia część tego rozdziału opisuje rolę uczenia się ze wzmacnianiem w zastosowaniach nawigacyjnych. Autor wskazuje, że zastosowanie tej metody w robotyce pozwala na bezkolizyjne przemieszczanie się robota w skomplikowanym otoczeniu i osiągnięcie celów nawigacyjnych oraz udoskonalanie tras, którymi robot porusza się w takim środowisku.

Rozdział 3 zawiera przegląd literatury na temat nawigacji autonomicznej w zastosowaniach dla robotów mobilnych. Autor analizuje zawartość 28 prac związanych z tym tematem. Prace te dotyczą wykorzystania metod sztucznej inteligencji i sygnałów zbieranych z otoczenia robota do określania jego położenia lub wytyczania trasy, którą może się on bezpiecznie przemieszczać.

Rozdział 4 poświęcony jest procesom decyzyjnym Markowa w odniesieniu do robotyki. Autor wyjaśnia w tym rozdziale koncepcję uczenia się ze wzmacnianiem, w którym wykorzystuje się dane pochodzące z obserwacji otoczenia za pomocą odpowiednich sensorów. Autor opisuje probabilistyczną metodę podejmowania decyzji w oparciu o procesy decyzyjne Markowa. Podano niezbędne zależności matematyczne opisujące sposób podejmowania decyzji i opisano częściowo obserwowalne procesy decyzyjne Markowa, które znajdują zastosowanie, gdy dostępne dane o otoczeniu są niepełne. Opisano koncepcję programowania dynamicznego, która może być stosowana do znalezienia najlepszej polityki dla rozwiązania procesu decyzyjnego Markowa. Taka technika programowania wymaga zastosowania modelu. Opisano także uczenie się ze wzmacnianiem, które nie wymaga modelu. W tej grupie znajdują się m.in. metoda Monte Carlo i metoda różnic czasowych. Wskazano też aplikacje uczenia się ze wzmacnianiem w odniesieniu do robotów poruszających się po ziemi, robotów latających oraz pływających. Opisano krótko model robota mobilnego dedykowany dla programu MATLAB, w którym wykonywane są obliczenia prezentowane w rozprawie. Rozważano także zagadnienie nieprzewidywalności w robocie mobilnym.

Wyniki badań Doktoranta przedstawiono w rozdziale 5. Badania te dotyczą inteligentnej nawigacji robota mobilnego w nieznanym i złożonym środowisku z wykorzystaniem uczenia się ze wzmacnianiem. W podejściu tym nie jest wymagany model. Rozważane są dwa warianty algorytmu sterowania nazywane Q-learning oraz Sarsa. Doktorant przedstawił oba te algorytmy i opisał je. Przedstawił też sposób aproksymacji funkcji dla algorytmu Sarsa. Doktorant udoskonalił technikę uczenia się Q-learning opartą na sieci neuronowej. Doktorant podał równania opisujące zaprojektowaną sieć neuronową, scharakteryzował przestrzeń stanu i akcji oraz funkcje nagrody. Opisana została koncepcja kontroli stochastycznej oraz sposób iteracji wartości stanu działania. Opisano działanie opracowanego algorytmu oraz procedurę uczenia zastosowanej sieci neuronowej. Przedstawiono też sposób implementacji opracowanego algorytmu do sterowania robota mobilnego. Pokazano też wyniki symulacji i badań doświadczalnych dla robota poruszającego się w pomieszczeniu z różnym układem przeszkód. Wykazano, że w każdej z rozważanych sytuacji robot znalazł trasę umożliwiającą dotarcie z punktu startowego do punktu docelowego. Wykazano też, że w kolejnych przejściach robota jego trasa była bliższa optymalnej. Doktorant wykazał, że opracowany przez niego algorytm jest bardziej efektywny od algorytmów znanych z literatury.

W rozdziale 6 przedyskutowano właściwości uczenia się ze wzmacnianiem, optymalizację roju cząstek oraz nawigacji termicznej. Doktorant przedstawił cechy charakterystyczne

wymienionych metod nawigacji, a szczególnie dużo miejsca poświęcił nawigacji termicznej. Nawigacja termiczna została przedstawiona w aplikacjach dotyczących samochodów autonomicznych oraz wspieraniu orientacji przestrzennej osób słabo widzących. Zwrócono uwagę na umieszczenie czujnika pozwalającego określić odległość od przeszkody. W odpowiednio przygotowanych tabelach Doktorant porównał cechy wszystkich rozważanych algorytmów. Wskazał zarówno zalety, jak i ograniczenia każdego z nich.

Rozdział 7 zawiera wnioski z pracy oraz kierunki przyszłych badań. Doktorant wymienił swoje najważniejsze osiągnięcia naukowe opisane w rozprawie. Wskazane zostały też dalsze perspektywy rozwoju tematyki badawczej będącej przedmiotem rozprawy doktorskiej.

Wykaz literatury zawiera łącznie 133 pozycje, w tym 9 prac, których współautorem jest Doktorant. Cytowane prace są w większości wydane w ostatnich 10 latach, a zatem są one aktualne. Dobór cytowanych prac świadczy o dobrej orientacji Doktoranta we współczesnej wiedzy z zakresu teorii sterowania, robotyki, systemów nawigacji, sieci neuronowych i metod uczenia się.

3. Uwagi ogólne

Praca jest napisana w języku angielskim, w sposób na ogół zrozumiały. Jest ona zredagowana bardzo starannie i zawiera tylko drobne błędy redakcyjne. Autor zadbał o wyjaśnienie używanych skrótów i prawidłowo dobrał kolejność prezentowanych zagadnień.

Zamieszczone w pracy rysunki i zdjęcia są dobrze dobrane i ułatwiają zrozumienie zagadnień poruszanych przez Autora. Brakuje mi wykresów ilustrujących porównanie efektywności prezentowanych algorytmów sterowania.

W pracy przedstawiono wyniki badań Autora dotyczące techniki uczenia robotów mobilnych oraz inteligentnego sterowania takimi robotami przy autonomicznej nawigacji. Doktorant zaproponował zastosowanie sztucznej sieci neuronowej i uczenia ze wzmacnianiem i wykorzystania danych z czujników w celu znalezienia trasy zapewniającej bezkolizyjne dotarcie z punktu startowego do punktu docelowego w nieznanym wcześniej środowisku.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktoranta, przedstawionych w recenzowanej rozprawie, można zaliczyć:

- Przeanalizowanie roli uczenia się ze wzmacnianiem w nawigowaniu robota w złożonych środowiskach przy wykorzystaniu symulacji,
- Przeanalizowanie możliwości zastosowania nawigacji termicznej przy użyciu czujników podczerwieni do kontroli drogi w samochodach oraz do wspierania

poruszania się osób słabo widzących w nieznanym środowisku,

- Wykazanie skuteczności proponowanego sposobu nawigowania robotów mobilnych dla pomieszczeń z różną konfiguracją przeszkód,
- Poprawienie jakości metody Q-learning z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych.
- Opublikowanie wyników prac badawczych w 16 artykułach, w tym 9 prac zamieszczono w czasopismach indeksowanych w JCR.

Osiągnięcia te dowodzą, że Doktorant opanował umiejętność formułowania problemów badawczych i ich rozwiązywania przy zastosowaniu nowoczesnych metod naukowych. Oceniana rozprawa dowodzi, że Doktorant opanował zaawansowaną wiedzę z zakresu metod sterowania robotami mobilnymi, sztucznych sieci neuronowych, metod uczenia się, systemów nawigacyjnych i techniki sensorowej oraz potrafi twórczo ją wzbogacać.

Podczas lektury tej interesującej pracy nasunęło mi się kilka uwag:

- a) Czy Doktorant podjął próbę implementacji opracowanej metody sterowania w rzeczywistym robocie mobilnym? Czy implementacja taka jest ewentualnie przewidywana w dalszych badaniach Doktoranta?
- b) Jaki jest niezbędny czas uczenia się robota umiejętności poruszania się w nowym pomieszczeniu?
- c) Jakie są wymagania odnośnie rozdzielczości kamery termograficznej przy nawigacji termicznej?
- d) Jaka jest minimalna liczba cykli uczenia się do zapewnienia pewnej nawigacji w nieznanym pomieszczeniu? Jak ta liczba zależy od rozmiarów tego pomieszczenia i od liczby przeszkód?
- e) Czy zaproponowana metoda sterowania może być zastosowana w samochodach autonomicznych lub na statkach morskich? Na ile jest ona niezawodna?

Uwagi powyższe mają charakter dyskusyjny i w żadnym stopniu nie obniżają wysokiej oceny pracy.

4. Uwagi szczegółowe

Oceniana praca jest zredagowana bardzo starannie, ale Autor nie ustrzegł się drobnych uchybień, które jednak nie wpływają w istotny sposób na jednoznacznie pozytywną ocenę pracy. Wybrane z tych uchybień zebrano poniżej.

- a) Nie znajduję uzasadnienia dla stosowania numeracji podrozdziałów aż do szóstego rzędu włącznie, np. rozdział nr 1.1.1.2.2.2.

- b) Brakuje jasnego sformułowania celu pracy oraz jej zakresu.
- c) W streszczeniu pracy na stronie 10 występuje niezręczne sformułowanie „W oparciu o proponowaną technikę wyniki eksperymentów wykazały niezawodną i dokładną skuteczność w zadaniach autonomicznej nawigacji dla robotów mobilnych”.
- d) Autor często stosuje w teście pracy zwroty w pierwszej osobie liczby mnogiej zamiast w pierwszej osobie liczby pojedynczej.
- e) Na stronie 89 występuje odwołanie do nieistniejącego równania (6.10).
- f) Na stronie 97 występuje odwołanie do nieistniejącego równania (6.18).
- g) Na stronie 102 występuje niefortunne sformułowanie „Less than 50 of the robots in the initial 100 episodes achieved their goals, but more than 70 of the final 50 episodes showed the robot reaching its destination”.
- h) Fig. 5.4 wymaga skomentowania.
- i) Prace w wykazie literatury powinny być uszeregowane alfabetycznie.

5. Wniosek końcowy

Oceniana praca zawiera oryginalne i wartościowe wyniki stanowiące istotny wkład Doktoranta w badania właściwości systemów sterowania robotami mobilnymi, w tym algorytmów adaptacyjnych wykorzystujących sieci neuronowe i systemy sztucznej inteligencji. Doktorant samodzielnie rozwiązał ważne zagadnienie badawcze z zakresu dyscypliny naukowej Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz wykazał się znajomością aktualnej literatury naukowej w zakresie tematyki pracy. Przedstawione wyniki badań dowodzą wysokich kompetencji merytorycznych Doktoranta oraz Jego przygotowania do prowadzenia badań naukowych.

Uwagi sformułowane w punkcie 3 mają charakter dyskusyjny i wymagają ustosunkowania się do nich Doktoranta w czasie obrony.

W mojej opinii praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy prawa. W związku z tym zgłaszam wniosek do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie o dopuszczenie mgr inż Ravi Raja do publicznej obrony.

Ze względu na wysoki poziom przeprowadzonych badań, ich potencjał aplikacyjny oraz fakt opublikowania znaczącej części wyników tych badań w czasopismach znajdujących się na liście ministerialnej oraz ujętych w JCR wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Ravi Raja.

Górska