

dr hab. inż. Dominik Belter, prof. PP
Politechnika Poznańska
Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki

Poznań, 27 czerwca 2024 r.

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej magistra inżyniera Jarosław Karwowskiego
pt.: „Trajectory planning for a social robot using a hybrid tra-
jectory candidates generation and spatiotemporal cost functions”**

1 Podstawa wykonania recenzji

Niniejsza recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jarosław Karwowskiego zaty-
tułowanej: „Trajectory planning for a social robot using a hybrid trajectory candidates
generation and spatiotemporal cost functions” w dyscyplinie naukowej automatyka, elek-
tronika i elektrotechnika i technologie kosmiczne. Promotorem opiniowanej rozprawy dok-
torskiej jest dr hab. inż. Wojciech Szyrkiewicz, prof. PW. Recenzja została przygotowana
na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotech-
nika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej nr 756/II/2024 z dnia 21.05.2024
r. Zgodnie z informacją dodatkową załączoną do powyższego pisma, postępowanie o nada-
nie stopnia naukowego doktora mgr. inż. Jarosław Karwowskiego procedowane jest według
wymagań określonych w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie
wyższym i nauce.

2 Rozprawa doktorska

2.1 Struktura rozprawy

Rozprawa doktorska zredagowana jest w formie 8 rozdziałów z dwoma dodatkami i obejmuje 290 stron. Zestawienie literatury zawiera 421 pozycji, w tym 145 prac z ostatnich pięciu lat. Pięć pozycji literaturowych stanowią współautorskie prace Doktoranta.

Rozdział pierwszy wprowadza do tematyki rozprawy i przedstawia motywację podjęcia tematu planowania trajektorii ruchu robotów społecznych. Następnie przedstawiony jest problem badawczy, dwie tezy główne rozprawy, znaczenie uzyskanych wyników zebrane w czterech głównych punktach oraz zawartość pracy.

W rozdziale drugim zdefiniowane zostały wymagania dotyczące systemów nawigacji robotów społecznych. Zostały one podzielone na cztery główne grupy: fizyczne bezpieczeństwo ludzi, odczuwalne bezpieczeństwo i komfort przechodniów, naturalność ruchu robota, zgodność z normami społecznymi.

Rozdział trzeci poświęcony został przeglądowi literatury. Wszystkie podrozdziały w przeglądzie literatury powiązane są jawnie z wymaganiami dotyczącymi systemów nawigacji robotów społecznych zdefiniowanych w rozdziale drugim. Trzy główne podrozdziały dotyczą zagadnień związanych z percepcją, planowaniem ruchu i ewaluacją uzyskanych trajektorii ruchu robota. W części dotyczącej percepcji skupiono się głównie na aspektach związanych z rozprawą czyli reprezentacją otoczenia, detekcją, śledzeniem i przewidywaniem trajektorii ruchu ludzi oraz zagadnieniami związanymi z kontekstem i działaniem robota w zależności od szerszej sytuacji. Kolejny rozdział wprowadza zagadnienia związane planowaniem ruchu robotów mobilnych. Został on podzielony na globalne planowanie ścieżki oraz lokalne planowanie trajektorii. Omówione metody zostały podsumowane i porównane. Ostatni podrozdział opisuje różne metody i narzędzia związane z ewaluacją metod planowania trajektorii robotów społecznych.

W rozdziale czwartym przedstawiona jest autorska metoda ilościowej oceny algorytmów planowania ruchu dla robotów społecznych. Dotyczy ona oceny wykonania przez robota zdefiniowanego zadania, oceny naturalności ruchu robota oraz odczuwanego bezpieczeństwa ludzi.

Rozdział piąty odnosi się do zaproponowanej metody planowania trajektorii ruchu robota nazwanej HUMAP (HUMAN-Aware Trajectory Planner MAPPING the Pedestrians Motion Pattern), która wykorzystuje model ruchu przechodniów oraz zaproponowaną metodę oceny generowanych trajektorii.

W rozdziale szóstym przedstawiono implementację metody HUMAP oraz proponowanego narzędzia do ewaluacji planerów ruchu robotów społecznych (SRPB).

Rozdział siódmy poświęcony został wynikom ewaluacji proponowanej metody oraz jej porównaniem do metod dostępnych w literaturze. Po przedstawieniu warunków symulacji i eksperymentów, pokazane są wyniki działania metod dostępnych w literaturze oraz proponowanej metody HUMAP wraz ze szczegółową analizą wyników.

Ostatni rozdział podsumowuje zawartość pracy, podkreśla znaczenie uzyskanych wyników, ograniczeń proponowanej metody oraz przedstawia wnioski końcowe i kierunki dal-

szych prac.

2.2 Ogólna charakterystyka podjętej tematyki

Przedmiotem rozprawy jest planowanie ruchu robotów społecznych w środowisku dynamicznym, w którym jednocześnie poruszają się ludzie. Podczas planowania ruchu robot powinien wziąć pod uwagę nie tylko wykonanie zadania ale również powinien uwzględniać aspekty społeczne związane z bezpieczeństwem i komfortem osób poruszających się w tym samym środowisku. Celem pracy jest opracowanie metody, która pozwoli na efektywne i bezpieczne poruszanie się robota społecznego oraz zapewni komfort osób mających styczność z robotem. Poza metodą planowania trajektorii ruchu spełniającej zdefiniowane kryteria, celem pracy jest również opracowanie metody ilościowej ewaluacji uzyskanych wyników, która została wykorzystana do porównania z innymi metodami dostępnymi w literaturze.

2.3 Problem naukowy i teza rozprawy

Problem naukowy i tezy pracy zostały jednoznacznie zdefiniowane. Pierwszym problemem naukowym rozpatrywanym w rozprawie jest planowanie trajektorii ruchu robotów z uwzględnieniem relacji społecznych w środowisku, w którym jednocześnie poruszają się ludzie. Drugim problemem analizowanym w pracy jest automatyczna ilościowa ocena algorytmów planowania trajektorii ruchu robotów, biorąca pod uwagę nie tylko szybkość wykonania zadania ale również bezpieczeństwo i komfort ludzi będących w tej samej przestrzeni roboczej.

W pracy zostały zdefiniowane dwie następujące tezy:

Najnowsze lokalne planery trajektorii dla robotów mobilnych uwzględniające pozycje ludzi w otoczeniu nie przewyższają tradycyjnych algorytmów pod względem skuteczności nawigacji i łagodzenia dyskomfortu ludzi współdzielących przestrzeń roboczą.

oraz:

Lokalna metoda planowania trajektorii może zostać opracowana w celu umożliwienia robotom skutecznego działania w środowiskach współdzielonych z ludźmi, przy czym skuteczność może zostać określona ilościowo. Uzyskane miary wykazują wyższą skuteczność proponowanej metody w porównaniu z istniejącymi tradycyjnymi lokalnymi algorytmami planowania trajektorii uwzględniającymi pozycje ludzi w otoczeniu w zakresie odporności, skuteczności zadań nawigacyjnych oraz łagodzenia dyskomfortu wśród ludzi w środowisku robota.

2.4 Rozwiązanie postawionego problemu

W celu udowodnienia pierwszej tezy przeprowadzony został bardzo szeroki przegląd literatury dotyczący planowania ruchu robotów z uwzględnieniem obecności ludzi w otoczeniu

robota. Następnie opracowany został zestaw metryk umożliwiający ilościową ocenę działania algorytmów planowania ruchu z uwzględnieniem aspektów dotyczących wykonywanego zadania, płynności ruchu, a także aspektów społecznych uzyskanego ruchu robota. Na końcu opracowany został zestaw narzędzi do testowania algorytmów planowania ruchu dla robotów społecznych nazwany SRPB (Social Robot Planner Benchmark).

Udowodnienie drugiej tezy możliwe było dzięki zaproponowaniu i implementacji lokalnego planera trajektorii robota społecznego (HUMAP) uwzględniającego hybrydowe generowanie trajektorii ruchu robota oraz funkcji oceniających ruch z uwzględnieniem poruszających się w pobliżu ludzi. Opracowane wcześniej narzędzie do testowania algorytmów planowania ruchu zostało później użyte do porównania proponowanej metody z metodami dostępnymi w literaturze. Przeprowadzone symulacje i eksperymenty na rzeczywistym robocie pokazują przewagę proponowanego algorytmu w zakresie skuteczności wykonywania zadań i bezpiecznego omijania ludzi poruszających się w otoczeniu robota.

2.5 Oryginalny dorobek autora i jego znaczenie poznawcze i aplikacyjne

Oryginalny dorobek Doktoranta związany jest z nowym planerem wykorzystującym hierarchiczne sieci zadań opartym na wyszukiwaniu progresywnym, wykorzystującym próbkowanie warunkowe i można go zdefiniować następująco:

- Przegląd najnowszej literatury w celu uzyskania zbioru wymagań stawianym systemom nawigacji robotów społecznych,
- Zdefiniowanie wymagań dotyczących systemów nawigacji robotów społecznych,
- Klasyfikacja istniejących podejść do nawigacji robotów społecznych i najnowocześniejszych testów porównawczych zgodnie z proponowaną taksonomią wymagań,
- Zaprojektowanie i implementacja wskaźników ilościowych do oceny nawigacji robotów społecznych,
- Projekt i implementacja lokalnego planera trajektorii uwzględniającego ruch ludzi w otoczeniu robota z wykorzystaniem hybrydowej metody generowania trajektorii i przestrzenno-czasowych funkcji kosztu,
- Rozszerzenie modelu ruchu pieszego o system wnioskowania rozmytego w celu poprawy skuteczności unikania kolizji robota z człowiekiem,
- Opracowanie sposobu generowania trajektorii ruchu robota z uwzględnieniem modelu społecznych zachowań ludzi poruszających się w otoczeniu robota,
- Projekt funkcji kosztu do oceny trajektorii z punktu widzenia norm społecznych,
- Implementacja funkcji kosztu do oceny trajektorii z uwzględnieniem norm społecznych w lokalnym planerze trajektorii ruchu robota,

- Eksperymenty porównawcze różnych lokalnych algorytmów planowania trajektorii w środowisku symulacyjnym i w warunkach rzeczywistych,
- Otwarto-źródłowe oprogramowanie dostępne do testowania i porównywania nowych algorytmów planowania ruchu.

3 Uwagi merytoryczne

3.1 Silne i słabe strony pracy, uwagi dyskusyjne

- Zaproponowane metody oraz inne metody wykorzystane w pracy mają bardzo dużo parametrów. Ich strojenie może być bardzo czasochłonne. Dużą zaletą zaproponowanej metody jest to, że zdefiniowane parametry mają znaczenie fizyczne i są intuicyjne. Mimo to strojenie może sprawiać problemy. Czy istnieją jakieś wskazówki ułatwiające proces uruchomienia proponowanego systemu na nowym robocie?
- Zaproponowane metryki służą do ewaluacji wygenerowanych trajektorii. Czy możliwe jest efektywne wykorzystanie tych metryk do optymalizacji trajektorii ruchu robota?
- Do znalezienia globalnej ścieżki ruchu robota użyty został algorytm Dijkstry. Dlaczego nie wykorzystano algorytmu A*, który przy poprawnie dobranej heurystyce, szybciej zwróci zaplanowaną ścieżkę?
- Na filmie dołączonym na stronie 177 robot znajduje się bardzo blisko człowieka (1:10). Ten film służy do pokazania scenariusza eksperymentu. Która wersja sterownika doprowadziła do takiej sytuacji i czy takie rozwiązanie jest akceptowalne?
- Dlaczego metoda HUMAP nie została przetestowana podczas eksperymentu pokazanego na rysunku 7.6? Eksperyment dotyczy metod *state of the art*, jednak to jest świetna okazja, żeby przetestować i pokazać właściwości proponowanej metody.
- Trajektorie uzyskane z metody DWA są bardziej płynne niż z proponowanej metody HUMAP. Czy użytkownicy również odbierają podobnie ruch robota podczas porównania obu planerów?
- Ponieważ praca zawiera aspekty społeczne związane z odczuciami ludzi warto porównać wyniki uzyskane z proponowanych miar z wynikami, które można uzyskać z metod służących do ilościowej oceny systemów angażujących użytkowników np. z ankiet. Dzięki temu można stwierdzić, że proponowane miary oceniające aspekt społeczny pracy robota są zbieżne z wrażeniami użytkowników.
- miara 4.4 zdefiniowana na stronie 88: Czy nie wystarczy, że robot nie koliduje z przeszkodą? W pewnej odległości nie ma to znaczenia, jak blisko robot znajduje się przeszkody.

- Eksperymenty podsumowane na rysunku 7.14b i 7.14c na stronie 205: Dlaczego DWA zawiódl podczas tych eksperymentów?
- Analiza “Computational complexity” przedstawiona na stronie 211 nie dotyczy złożoności obliczeniowej a czasu działania.
- Czy podjęto próby przeprowadzenia eksperymentów z większą liczbą ludzi w środowisku symulacyjnym? Ciekawe byłoby porównanie różnych metod w takich warunkach.
- Czy komponent społeczny zmienia zachowanie robota, jeśli nie wykryto ludzi? jeśli tak, czy możemy przełączać się między zestawem parametrów w zależności od tego czy system percepcji wykrył ludzi?

Praca jest praktycznie wolna od błędów językowych i pozbawiona usterek technicznych.

4 Wnioski końcowe

Powyższe uwagi nie umniejszają wartości merytorycznej pracy. Przyjęte w rozprawie założenia są prawidłowe, a Doktorant rozwiązał postawione problemy naukowe oraz użył właściwych metod. Rozprawa świadczy o wiedzy na zaawansowanym poziomie o charakterze podstawowym dla dziedziny nauk inżynierijno-technicznych oraz o charakterze szczegółowym, dotyczącym planowania ruchu dla robotów społecznych. Rozprawa obejmuje najnowsze osiągnięcia nauki i świadczy o znajomości współczesnej literatury z dyscypliny naukowej automatyki i robotyki. W rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej dotyczącej planowania zadań i ruchu. Mgr inż. Jarosław Karwowski wykazał się umiejętnością poprawnego i przekonującego przedstawiania uzyskanych przez siebie wyników. Wyniki przedstawione są w sposób zwięzły i przejrzysty. Na uwagę zasługuje formalne przedstawienie problemu oraz formalne opisanie działania proponowanych algorytmów.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie aktualnego i ważnego problemu naukowego w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz potwierdza wiedzę teoretyczną i umiejętność samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych przez Doktoranta. Rozprawa w pełni spełnia ustawowe wymagania dotyczące rozpraw doktorskich określone w artykuale 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Wnioskuje do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie rozprawy mgr. inż. Jarosława Karwowskiego do publicznej obrony.

Dominik Beltra