

prof. dr hab. inż. Ignacy Duleba
Katedra Cybernetyki i Robotyki
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska
ignacy.duleba@pwr.edu.pl

Wrocław 2024-07-01

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Jarosława Karwowskiego
"Trajectory planning for a social robot using a hybrid trajectory candidates
generation and spatiotemporal cost functions".**

Podstawa prawna.

recenzję wykonano na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej, prof. dra hab. inż. Tomasza Stareckiego, zgodnie z uchwałą Rady nr 756/II/2024 z dnia 21.05.2024, powołującej mnie na recenzenta w przewodzie doktorskim mgr inż. Jarosława Karwowskiego.

1. Charakterystyka ogólna.

Istotną, współczesną i burzliwie się rozwijającą częścią robotyki jest robotyka społeczna, a szczególnie jej mobilny sektor. Niewystarczające zdają się metody opracowane dotychczas, a zakładające, *explicite* czy *implicite*, brak wyróżnienia człowieka jako szczególnej przeszkody w otoczeniu robota. Wprowadzenie ludzi do otoczenia robota wprowadza szereg nowych aspektów z pogranicza różnych, dotychczas traktowanych jako odmienne, dziedzin nauk. Przykładowo: bezpieczeństwo człowieka – fizyczne (domena nauk technicznych), czy percepowane (psychologia, socjologia). Zagadnienia w tym obszarze są zwykle niestandardowe, bowiem często trudno mierzalne i obiektywizowalne, bowiem umocowane kulturowo (strefy komfortu zależne od narodowości), czy osobniczo (zachowania jednostkowe czy grupowe). Trudno więc o dowodliwe matematycznie twierdzenia, a jednak robotyka jako dziedzina przede wszystkim praktyczna, musi odpowiadać na realne potrzeby, a wyjście robotów z hal fabrycznych jest nieuchronne i coraz bardziej powszechne.

Obecnie w mobilnej robotyce społecznej z powodzeniem rozwiązywane są jednostkowe zadania, gdy dość dobrze jest określony kontekst sytuacyjny: szpital, restauracja, muzeum, opieka domowa. Materia dziedziny jest jednakże bardzo płynna (jak to zwykle w fazie intensywnej eksploracji wschodzącej dziedziny). Recenzowana praca wnosi pewien porządek i systematykę, starając się uogólnić i wydzielić prawidłowości wynikające z prac robotyków z tego obszaru. Dysertację sytuuję jako w całości należącą do dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

2. Forma i kompozycja rozprawy.

Rozprawa doktorska jest napisana po angielsku i obejmuje 290 stron tekstu podzielonego na osiem rozdziałów, uzupełnionych spisem tabel i rysunków oraz dodatkami, gdzie zdefiniowano funkcje pomocnicze. Całości dopełnia bardzo obszerna bibliografia licząca 421 pozycji z zakresu przedmiotu dysertacji, wśród których pięć pozycji jest współautorstwa mgr inż. J. Karwowskiego (trzy artykuły (z listy ministerialnej) i dwa referaty na konferencjach międzynarodowych).

Rozdział 1. zawiera opis motywacji pracy, przedstawia jej cel jako: *opracowanie algorytmu poprawiającego efektywność działania robota w środowiskach współdzielonych z ludźmi*. Cel ów Autor przekłada na dwie tezy szczegółowe, z których jedna konstatuje brak przewag literaturowych algorytmów planowania dedykowanych dokładnie temu zadaniu nad klasycznymi algorytmami działającymi w środowiskach z przeszkodami, druga natomiast jest konstruktywna i postuluje opracowanie algorytmu pozbawionego wad algorytmów istniejących. W dalszej części rozdziału sygnalizowany jest wkład własny Autora z referencją do współautorskich prac, na których dysertacja bazuje, istotnie poszerzając ich zawartość. Ze względu na obszerność zagadnień generowanych przez robotykę społeczną, Autor wskazał także jakimi problemami nie będzie się zajmował, będąc ich świadom (systemy wielorobotowe, współdziałanie z robotem wymagające fizycznego kontaktu, itp.). Podział materiału w rozdziały kończy tę część dysertacji.

Rozdział 2. zawiera studia literaturowe (głównie w zakresie percepcji robota przez ludzi), których celem jest nie tylko wydzielenie cech istotnych w interakcjach robota społecznego z ludźmi podczas ruchu robota, lecz także próba zobiekttywizowania i sformułowania ich w formie wymagań możliwych później do ewaluacji dla konkretnej aplikacji. Oprócz wymienienia łatwiejszych do ewaluacji i dość dobrze zbadanych w literaturze zagadnień bezpieczeństwa fizycznego czy odczuwalnego, Autor zauważa otwarte pole (być może nierozstrzygalne ogólnie) w sformułowaniu norm społecznych, które robot powinien przestrzegać. Normy owe muszą być traktowane raczej jako heurystyki niż ścisłe reguły, bowiem podlegają silnemu wpływowi wiedzy kontekstowej czy kulturowej.

Rozdział 3. przedstawia bardzo szeroki zestaw klasycznych i nowszych metod z literatury robotycznej dotyczących etapu percepcji otoczenia przez robota z traktowaniem ludzi jako wyróżnionych przeszkód; także z modelowaniem ich potencjalnych zachowań w warunkach indywidualnych i grupowych. Następnie omawiane są techniki planowania ruchu (globalnego i lokalnego), również pod kątem użyteczności w uwzględnieniu ludzi w otoczeniu robota. Metody tu występujące są adaptacją bądź metod klasycznych bądź kolażem kilku technik wprowadzając elementy (czaso-przestrzennej) ważności modelu. Ten podrozdział zamykają syntetyczne zestawienia tabelaryczne referencji do prac w celu klasyfikacji metod nawigacji robota pod kątem spełnienia wymogu bezpieczeństwa, norm społecznych, czy naturalności ruchu. Ostatni podrozdział traktuje o ocenie systemów nawigacji robota społecznego (oceny jakościowe/iłościowe; specyfikacja warunków przeprowadzania eksperymentów, narzędzia możliwe do wykorzystania podczas ewaluacji (bazy danych, symulatory, benchmarki)).

Rozdział 4. zawiera formalną definicję różnych wskaźników jakości działania robota (po wprowadzeniu niezbędnych oznaczeń), w tym bazujących głównie na: charakterystykach samego planowania ruchu robota (złożoność obliczeniowa, długość toru, odległość od przeszkód); określania nienaturalności ruchu robota (nieciągłości prędkości, obroty w miejscu); naruszenia stref komfortu człowieka czy grup ludzi (tu także przetwarzanie rozkładów gaussowskich modelujących niepewności).

Rozdział 5. jest poświęcony zagadnieniu lokalnego planowania trajektorii, gdzie Autor skomprimował pozytywne cechy rozwiązania tego problemu znane z kilku prac, argumentując, że można unikać ich wad. Autorskie rozszerzenia występują w zakresie szerokiego uwzględnienia minimalizacji dyskomfortu ludzi potencjalnie wywołanego ruchem robota. W początkowej części rozdziału przedstawiono zachowania robota generowane przez maszynę stanów i warunki wywołujące tranzycje. Węzły maszyny (zachowania) szczegółowo opisano w zakresie najciekawszym, czyli generowania ruchu, także w warunkach potencjalnego konfliktu (przy skrzyżowaniach ruchu robota z ruchem ludzi lub obiektów dynamicznych). Lokalne (w sensie

horyzontu czasowego) planowanie trajektorii robota bazuje istotnie na modelach ruchu ludzi (podrozdział 5.5) i polega na generowaniu potencjalnych scenariuszy ruchu, które są oceniane na bazie charakterystyk opisanych w rozdz. 4. Najlepszy z nich, w sensie Pareto właściwym dla optymalizacji wielokryterialnej, jest zadawany (w postaci prędkościowej) do realizacji dla układu wykonawczego robota.

W rozdziale 6. opisano implementacyjną stronę autorskich systemów SNPB (*Social Robot Planning Benchmark*) i HUAMP (*HUMAN-Aware Motion Planner*) niezbędnych do sprawdzenia poprawności ich działania oraz ewaluacji w warunkach symulacyjnych i rzeczywistych. Opisano komponenty i ich realizację z uwzględnieniem docelowego systemu ROS umożliwiającego robotykom łatwiejszą implementację algorytmów planowania ruchu robotów oraz istnienie wtyczek (*plugin*) z dostępnymi algorytmami klasycznymi.

Rozdział 7. zawiera przedstawienie i dyskusję wyników przeprowadzonych eksperymentów. Na wstępie jednak przedstawiono platformę programistyczną i sprzętową oraz poprawną metodologię testowania bazującą na izolacji czynnika badanego. Dla przeprowadzenia eksperymentów i ich oceny zaproponowanymi wskaźnikami jakości wybrano kilka scenariuszy, najczęściej skutkujących postawieniem robota w trudnej sytuacji decyzyjnej (wyprzedzanie, omijanie), dla łatwiejszego zróżnicowania działania systemów: czy to literaturowych czy proponowanego. Porównanie ilościowe względem przyjętych wskaźników z metodami klasycznymi skutkowało wnioskiem, o celowości planerów uwzględniających obecność ludzi oraz uzasadnieniem przewag planera zaproponowanego w dysertacji. Wyniki przedstawiono w formie zestawu tabel (wskazując – krojem pogrubionym – najlepsze wyniki) oraz wizualnej. Dla ograniczenia zależności wyników od niedoskonałości pojedynczego eksperymentu, przeprowadzono ich serie, a wyniki przedstawiono w formie rozkładu częstości wyników scentrowanych wokół ich median.

Ostatni, rozdział 8. zawiera podsumowanie głównych osiągnięć dysertacji. Uwypuklono w nim oryginalny wkład autorski i przedstawiono plany przyszłościowe.

W warstwie matematycznej praca jest dość elementarna, a zaproponowane i wykorzystywane miary jakości bazują głównie na charakterystykach prędkościowych (liniowych i kątowych), czy czasu zachodzenia pewnych zdarzeń, scałkowanych po horyzoncie obserwacji i niekiedy selekcionowanych warunkami dodatkowymi, których celem jest wykrywanie zjawisk atypowych (np. zanik prędkości). W modelowaniu niepewności wykorzystano przekształcone (rodziny) wielowymiarowych rozkładów normalnych.

3. Wyniki uzyskane w rozprawie.

Za oryginalne osiągnięcia Autora uważam:

- Bardzo szerokie studia literatury przedmiotu, których wynikiem jest wydzielenie cech atrybutywnych (tudzież wymagań) i klasyfikacji podejść oraz propozycja zobiektywizowanych miar ilościowych służących ocenie metod nawigacji robota społecznego.
- Holistyczne potraktowanie zagadnienia planowania ruchu robota społecznego, które generuje konieczność rozwiązania bardzo wielu podzadań (i narażenia się na potencjalne nieprecyzyjności w rozważaniach nad każdym z nich).
- Projekt i realizacja środowiska testowego dedykowanego planerom ruchu robota społecznego, SRPB; działającego zarówno na danych rzeczywistych jak i symulowanych. Jako komponenty środowiska: propozycja wskaźników jakości uwzględniających obecność w otoczeniu robota zarówno pojedynczych osób jak i ich grup, przestrzegania przez robota norm społecznych, oraz uwzględniających niepewność pozyskiwanych danych o otoczeniu.

Na podkreślenie zasługuje udostępnienie środowiska w formule oprogramowania otwartego, *open-source*, zatem poszerzająca spektrum potencjalnych badaczy-użytkowników i potencjalną porównywalność osiągnięć ich planerów.

- W autorskiej metodzie lokalnego planowania ruchu, określonej akronimem HUAMP, uwzględnienie czynnika ludzkiego, poprzez ocenę (między innymi) dyskomfortu wprowadzanego przez ruch robota, czy naturalność ruchu, a także aspektu czasowego i przestrzennego planowania.
- Praktyczna realizacja złożonego systemu robotycznego wymagająca znajomości i integracji różnych składowych (niektórych także (współ)-autorskich) – sprzętowych i programistycznych.
- Przeprowadzenie wszechstronnych badań testowych, głównie w środowisku symulacyjnym ale także w rzeczywistym, oraz potwierdzenie sformułowanych tez dysertacji na bazie wniosków z badań wynikających.

4. Kwestie do dyskusji, komentarze, uwagi polemiczne.

Uwagi natury ogólnej:

1. W taksonomii dla metod klasycznych warto było wymienić także jako wymaganie lokalizację robota w oparciu o zróżnicowane dane sensoryczne.
2. Wydaje się, że praca zyskałaby, gdyby rysunkowo przedstawić nieruchomy układ globalny, układ związany z robotem oraz ilustrację graficzną definicji współrzędnych konfiguracji robota.
3. W wyliczeniach odległości robota od otoczenia, zakłada się, że operuje się na rzutach robota na płaszczyznę xy i odległościach do jego centralnego punktu. Pewnie implícite założono, że robot ma symetrię radialną (co jest praktycznie zawsze spełnione w aktualnych konstrukcjach robotów społecznych). W przypadku ogólnym, wyliczenie odległości może być znacznie bardziej skomplikowane.
4. W przedstawieniu metod globalnych czy lokalnych (probabilistyczne, mapy dróg) zaprezentowano klasyczne strategie czyste. W rzeczywistych aplikacjach często są one sprzęgane z metodami splajnowymi wygładzającymi otrzymaną ścieżkę (zwykle w formie sekwencji punktów pośrednich), a celem jest przygotowanie danych dla modułu sterowania wymagających krzywych odpowiedniej klasy ciągłości.
5. We wzorze (4.12) jakie jest uzasadnienie by wprowadzać, oprócz amplitudy prędkości także ograniczenia amplitud na składowe x, y ?
6. Jak w miarach jakości ruchu można byłoby uwzględnić następujące czynniki: co człowiek wie o robocie i vice versa, czy robot/człowiek wie, że człowiek/robot wie. A więc *common knowledge* człowieka/robota jako źródło oceny interakcji i społecznej akceptowalności. Np. od dzieci nie będziemy wymagali, ani zakładali pewnych zachowań i brali poprawkę (skorelowanie z wiekiem estymowanym np. wysokością, czy rysami twarzy itp.) Społeczne środowisko robota może być bardzo zróżnicowane względem wiedzy o działaniu i zachowaniach robota. Przykładowo: personel szpitalny dłużej współpracujący z robotem, czy osoby odwiedzające chorych w szpitalu.

Czy Autor ma przemyślenia na ten temat i mógłby się nimi podzielić?

7. W pracy *metrics* odnosi się bardziej do (*quality index*) niż metryki w sensie matematycznym, która dla niektórych robotyków jest pierwszym skojarzeniem. Proszę o komentarz.

8. Wskaźnik (4.8) opisujący złożoność obliczeniową ma pewne wady (można porównywać algorytmy, ale na identycznie skonfigurowanym systemie). Systemy rzeczywiste są zróżnicowane pod względem percepcji, (niekompatybilnego) oprogramowania (także wykorzystywanych bibliotek) mogą być więc trudno porównywalne. W systemach informatycznych dość często rozważa się też złożoność pamięciową.
9. Nie wydaje mi się, by nazwa *oscillations* (podrozdział 4.3.3) była trafna. Zwykle oscylacje zakładają pewną regularność (okresowość, powtarzalność) odchyłeń, a proponowana miara tego nie określa. Może *slow motion factor*?
10. Niebezpiecznie jest, z technicznego punktu widzenia, stawiać warunki kategoryczne jak w (4.14), prędkości równe zero (szum zawsze istnieje więc na sensorach pewnie nigdy nie będzie wartości 0).
11. Dlaczego wyróżniona jest składowa x w (4.13)? Chyba, że prędkość mierzona w innym niż globalny układzie (orientowanym względem pewnej osi robota).
12. Niektóre zaproponowane wskaźniki jakości zakładają (chyba) dokładną i nieustanną znajomość konfiguracji społecznego robota mobilnego. A to założenie niekoniecznie musi być spełnione. Proszę o komentarz.
13. Czy założenia do badań oraz ich wyniki były prezentowane czy konsultowane z przedstawicielami nauk społecznych?
14. Uważam, że nieco pominięty (ani wzmiankowany jako mniej czy bardziej istotny) jest czynnik ekonomiczny systemów, możliwości techniczne (zestaw oczujnikowania i efektywne jego wykorzystanie) badaczy (szczególnie do przeprowadzenia eksperymentów). W kontekście pracy jest to zrozumiałe, gdy chce się oceniać systemy ogólne, a nie dedykowane i skonfigurowane pod konkretną aplikację.
15. Tezy, na których bazują systemy robotyki społecznej z pewnością mogą być uwiarygadniane, a same systemy – optymalizowane. Interesuje mnie pogląd Autora, czy ogólnie tezy owe są falsyfikowalne?

Uwagi pomniejszej wagi: techniczne, językowe, redakcyjne.

1. 86₁₂: $n = \longrightarrow n \in$
2. Oznaczenie rys. 1.1 zniknęło (także ze spisu rysunków), choć fotografie i nazwy robotów z rysunku są czytelne.
3. 7² umiejętność $\longrightarrow$ własność,
4. 37₃ a study $\longrightarrow$ the study
5. 45⁷ In addition $\longrightarrow$ In addition,
6. 45⁷ to identifying $\longrightarrow$ to identify or in identifying
7. 45₄ The Sec. 3.1 $\longrightarrow$ Sec. 3.1
8. 46² surrounding humans $\longrightarrow$ humans
9. 46⁹ expands the intelligence $\longrightarrow$ expands capabilities
10. 49⁶ intelligently $\longrightarrow$ purposefully
11. 62⁵ of concerns $\longrightarrow$ of concern
12. 62¹⁹ of contract $\longrightarrow$ of construct?
13. 88¹ a border point $\longrightarrow$ the nearest border point

14. 93₁₇ some human $\rightarrow$ a human?
15. $Rot(z, \theta)$ jako macierz (2×2) , a nie jak klasycznie w robotyce w $SO(3)$, jako macierze (3×3) .
16. Za niezręczne uważam zdanie 171⁸⁻⁹ "... experiments aimed to determine, whether motion planning for human-aware navigation is still an open problem." Za otwarty problem naukowy uważam taki, który nie ma jeszcze rozwiązania. Natomiast w dziedzinie dysertacji istnieją rozwiązania (częstkowe czy klasyczne), które z pewnością (jak pokazał Autor) są możliwe do poprawy. Inną wątpliwością jest sugerowana możliwość eksperymentalnego wskazania problemów otwartych.
17. 171₉ "... independent comparison" (od czego niezależne?)
18. W bibliografii niektóre pozycje mają pewne usterki (najczęściej brak podania stron), przykładowo: [10],[18],[27],[30],[35],[42],[46], [82],...

Przedstawione uwagi, pytania czy komentarze mają charakter głównie polemiczny lub poznawczy i nie wpływają ani na prawdziwość tez dysertacji (czy elementów składowych jej uzasadnienia) ani jej rangę naukową.

5. Podsumowanie.

Przydatność dysertacji dla nauk inżynierskich (a dokładniej dla robotyki społecznej) nie budzi żadnych wątpliwości. Dla środowiska robotycznego praca może stanowić cenne źródło systematycznej informacji o "mobilnych" aspektach robotyki społecznej. Poza wartością porządkującą (taksonomia) i próbą obiektywizacji oceny algorytmów planowania ruchu robota w środowiskach współdzielonych z ludźmi oferuje badaczom z zakresu robotyki społecznej także gotowe środowisko do oceny własnych algorytmów. Zaproponowane podejście do lokalnego planowania ruchu może stanowić wskazówkę dla badaczy do dalszych dociekań z uwzględnieniem aktywnej interakcji między robotem a ludźmi (głos, gesty, efekty wizualne) czy propozycji własnych wskaźników oceny zachowania i efektywności ruchu robota.

6. Konkluzja.

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgr inż. Jarosława Karwowskiego wyrażam opinię, że jej Autor wniósł oryginalny wkład do dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

Problemy naukowe sformułowano w sposób klarowny, a są one aktualne i ważne praktycznie. Autor opanował odpowiednio warsztat naukowy, zna obszerną literaturę przedmiotu i krytycznie potrafi ją analizować. Zna odpowiednie narzędzia i systemy ułatwiające przeprowadzenie metodologicznie poprawnych badań i potrafi je efektywnie wykorzystać. Udokumentowany w rozprawie doktorskiej wkład w rozwój wiedzy (aspekt poznawczy) i możliwości jej potencjalnego zastosowania (aspekt praktyczny) należy uznać za istotny.

Stwierdzam zatem, że **przedłożona do recenzji rozprawa spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim zawarte w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce oraz wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

Zważywszy że dorobek Autora spełnia wymagania wyróżnienia rozpraw doktorskich, oraz doceniając imponujący zakres i wielowątkowość dysertacji, a także odwagę Autora do całościowego ujęcia zagadnienia (miast bezpiecznego polerowania wybranego aspektu), **stawiam również wniosek o wyróżnienie rozprawy.**