

**Opinia o rozprawie doktorskiej mgr inż. Pawła Ośmiałowskiego
p.t. „Spatial Reasoning in Problems of Planning and Navigation of Autonomous mobile
Robots and their Formations”**

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Ośmiałowskiego nosi w tłumaczeniu na język polski tytuł "Wnioskowanie przestrzenne w problemach planowania i nawigacji automatycznymi robotami mobilnymi i ich formacjami". Rozprawa zawiera 207 stron i składa się z 11 podstawowych rozdziałów oraz bibliografii. Do każdego z 11 rozdziałów jest dodatkowo dołączona bibliografia jemu poświęcona.

We Wstępie (Rozdział 1) przedstawiono wprowadzenie do tematyki rozprawy, określono jej cel oraz scharakteryzowano zawarte w rozprawie podejście do rozwiązanego problemu. Omówiono krótko zawartość rozprawy w tym wykonane prace oraz uzyskane wyniki. Tematem rozprawy jest planowanie i nawigacja robotami mobilnymi i ich formacjami, wykorzystujące metodologię opartą na podejściu mereologii przybliżonej. Celem rozprawy jest stworzenie jednolitego środowiska dla planowania i nawigacji autonomicznymi robotami mobilnymi w oparciu o wnioskowanie przestrzenne oraz środowiska dla symulacji implementowanych procedur i prowadzenia rzeczywistych eksperymentów.

Doktorant zrealizował ten cel w następujących etapach:

1. Opracowanie metodologii planowania i nawigacji przy użyciu wnioskowania przestrzennego w ramach mereologii przybliżonej.
2. Opracowanie nowej metodologii planowania związanej z modelem pola potencjału budowanego przy wykorzystaniu mereologii przybliżonej.
3. Zaproponowanie definicji formacji robotów w oparciu o predykat "bycia pomiędzy" jako modyfikację predykatu pochodzącego od A. Tarskiego.
4. Zaimplementowanie opracowanych predykatów i definicji w robotycznym systemie Player/Stage z pomocą wyrażeń SQL i dedykowanych sterowników.
5. Przeprowadzenie eksperymentów z rzeczywistymi robotami Roomba w Laboratorium Robotyki PJWSTK, przystosowanym przez zainstalowanie systemu globalnej lokalizacji robotów.

W rozdziale 2 Doktorant przedstawia opis problemów planowania trajektorii dla robotów mobilnych i przegląd metod znajdowania optymalnych rozwiązań tych problemów. Planowanie trajektorii dla robota to zapewnienie mu możliwości automatycznego wyboru trajektorii bezpiecznej tj. omijającej przeszkody. Ponieważ planowanie jest obliczeniowo NP-trudne stosowane są metody heurystyczne. W podrozdziale 2.2 Doktorant omawia planery wykorzystujące przeszukiwanie heurystyczne, których istota polega na śledzeniu przez robota brzegu przeszkody i podążaniu wzdłuż niego aż do uzyskania możliwości dotarcia do celu w linii prostej. Podrozdział 2.3 jest poświęcony metodzie pola potencjału. W tej metodzie wprowadza się potencjał przyciągający generowany przez cele i potencjał odpychający wprowadzany przez przeszkody. Robot porusza się w sumarycznym polu potencjału i jest kierowany w stronę celu przez gradient tego pola. Doktorant dostrzega niebezpieczeństwo wpadania rozwiązań w minima lokalne i podaje metodę losowych zaburzeń dla pokonywania tej trudności.

W podrozdziale 2.4 Doktorant omawia metodę planowania trajektorii stosowaną w przypadku konieczności wielokrotnych wędrówek robota - opłacalne jest wtedy budowanie mapy topologicznej środowiska. Opisana jest tutaj metoda grafów widoczności, metoda grafów (diagramów) Voronoia oraz metody sylwetkowe Canny'ego. W kolejnych podrozdziałach omawiane są metody rozkładu obszaru działania robotów na komórki: rozkłady trapezoidalne, rozkłady Morse'a oraz planery probabilistyczne. W podrozdziale 2.7 Doktorant omawia znane metody lokalizacji położeń robotów: filtrację Kalmana i filtrację bayesowską.

Rozdział 3 zawiera wprowadzenie do problematyki mereologicznego opisu pojęć i zarys metod wnioskowania przestrzennego korzystających z pojęć mereologii. Mereologia, której podstawy teoretyczne zostały stworzone przez Stanisława Leśniewskiego w 1916 roku, wykorzystuje jako podstawę pojęcie części i dostarcza własności opartych na pojęciu bycia częścią innego obiektu. W podrozdziale 3.2 Doktorant wprowadza relację bycia składnikiem, zachodzenia na siebie i rozdzielności. W podrozdziale 3.3 Doktorant omawia rozszerzenia mereologii Leśniewskiego przez dalszych autorów (Whitehead, Clark) na pojęcia rozciągłości oraz bycia połączonym, które dają lepszy opis zależności topologicznych między obiektami. Konsekwencją jest rachunek regionów połączonych omówiony w podrozdziale 3.4.

W rozdziale 4 Doktorant omawia podstawowe pojęcia mereologii przybliżonej (ang. rough mereology) zaproponowanej przez L. Polkowskiego a także rozszerzenie mereologii przybliżonej, którego podstawowym pojęciem jest inkluzja przybliżona, jako relacji: "x jest częścią y w stopniu co najmniej r". Wprowadzona jest definicja mereogeometrii jako

geometrii środowiska robota. Podstawowym problemem jest tu opis predykatów geometrii wprowadzonych przez Tarskiego: "bycie pomiędzy", "równoodległość", z modyfikacjami vanBenthema.

W podrozdziałach 4.1, 4.2 Doktorant przedstawia wprowadzoną przez siebie formę tej relacji przystosowaną do wykorzystania w robotyce, gdzie rozważane obiekty są robotami lub przeszkodami modelowanymi jako figury geometryczne. Podrozdział 4.3 jest poświęcony wprowadzeniu odpowiednich relacji geometrycznych, pozwalających na wyrażenie, w kontekście mereologii przybliżonej, relacji elementarnej geometrii wprowadzonych w aksjomatyzacji Tarskiego i vanBenthema. Istotne są tu relacje „bycia bliżej” oraz „bycia pomiędzy”. Doktorant przenosi te abstrakcyjne definicje na przypadek walcowatych robotów Roomba, w sposób naturalny modelowanych jako koła otoczone kwadratami reprezentującymi strefy bezpieczeństwa wokół robotów. Doktorant wykorzystuje pojęcie ekstentu (ang. extent), rozumianego jako najmniejszy prostokąt zawierający roboty reprezentowane przez ich kwadraty bezpieczeństwa a następnie definiuje pojęcie "bycia pomiędzy" dla robotów.

Rozdział 5 jest poświęcony literaturowej analizie metod planowania i nawigacji dla zespołów robotów mobilnych zwanych w rozprawie formacjami oraz metodom określania, utrzymywania i odzyskiwania formacji robotów.

W podrozdziale 5.1 jest przedstawiona dyskusja podstawowych kontekstów, w których formacje robotów są wykorzystywane wraz z identyfikacją podstawowych problemów istotnych dla Doktoranta w rozprawie, takich jak: architektura formacji, rozwiązywanie konfliktów, kooperacji, uczenia, oraz problemy geometryczne: planowania ścieżek dla robotów w formacji, przejazdu w formacji, odzyskania formacji.

W podrozdziale 5.2 omawiane są wybrane metody planowania trajektorii dla wielu robotów, uwzględniające unikanie kolizji, dostosowanie prędkości, orientację na sąsiada, orientację na lidera. Wynikają z tego podstawowe zasady planowania: odnoszenie się do lidera, odnoszenie się do sąsiada, odnoszenie się do środka grupy. Następnie Doktorant omawia metodę potencjału oraz tzw. metody metryczne.

Podrozdział 5.3 jest poświęcony metodom literaturowym dla sterowania formacjami. W podrozdziale 5.4 Doktorant cytuje pewne wyniki na temat planowania dla grup robotów.

Kolejne dwa rozdziały: 6 i 7 opisują narzędzia używane w rozprawie: system Player/Stage oraz Geographic Information System - GIS. System Player/Stage stanowi otwarty projekt rozwijany i stosowany w laboratoriach robotycznych do symulacji i wizualizacji procedur

robotycznych. System ten został zastosowany przez Doktoranta dla realizacji eksperymentów związanych z rozprawą.

W paragrafach 6.2, 6.3 Doktorant przedstawia ogólny opis systemu Player. Omówiono architekturę client-server stosowanej w systemie Player. Komunikacja między węzłami systemu odbywa się z wykorzystaniem protokołu TCP. System pośredniczący w komunikacji (middleware) jest omówiony w podrozdziale 6.4.

Podrozdział 6.5 omawia interfejsy Playera a podrozdział 6.6 zawiera opis dostępnych kontrolerów. Na uwagę zasługuje dyskusja techniki pisania nowych rozszerzeń (ang. plugins). Podrozdział 6.7 jest poświęcony obsłudze serwera systemu Player. Aplikacje klienckie (stosowanej w Playerze architektury klient-serwer) oraz interfejs programistyczny strony klienckiej zostały omówione w podrozdziale 6.8.

Końcowy podrozdział 6.9 omawia wkład Doktoranta w rozwój i adaptacje systemu Player do zadań robotyki wielu robotów. Przedstawiona została lista ulepszeń i nowych sterowników oraz programów klienckich. Trzeba tu podkreślić, że Doktorant wniósł do rozwoju tego systemu bardzo duży wkład, opracowując niemal 50 ulepszeń, poprawek i własnych sterowników.

Rozdział 7 omawia narzędzia Systemu Informacji Geograficznej (GIS), zaimplementowane w Playerze w celu ułatwienia implementacji algorytmów wnioskowania przestrzennego.

Omawiane są podsystemy PostGIS i PostgreSQL oraz sterownik, którego zadaniem jest przechowywanie i analizowanie danych geometrycznych. Podrozdział 7.3 demonstruje sposób modyfikacji mapy przechowywanej w bazie danych PostgreSQL z pomocą poleceń SQL. W podrozdziale 7.4 opisany jest graficzny system uDig obsługujący bardziej złożone mapy.

Rozdziały od 8 do 11 zawierają przedstawienie i omówienie zasadniczych oryginalnych wyników uzyskanych przez Doktoranta. Dotyczy to przede wszystkim koncepcji mereologicznego pola potencjału i planowania ścieżki robota z wykorzystaniem tego pola oraz implementacji relacji geometrii mereologicznej z Rozdziału 4 w postaci predykatów języka SQL.

Na podkreślenie zasługują podstawowe wyniki uzyskane w tym zakresie, opisane w Rozdziale 8, takie jak:

1. Metoda konstrukcji pola potencjału zbudowanego z pomocą inkluzji przybliżonej i jego implementacja w systemie Player/Stage. Idea tej konstrukcji (podrozdział 8.2). polega na rekurencyjnym wypełnianiu wolnej przestrzeni środowiska robota kwadratami, tak, by

gęstość wypełnienia wzrastała w miarę zbliżania się do celu. Odległość między kwadratami jest określana na podstawie relacji funkcji indukowanej przez inkluzję przybliżoną.

2. Metoda realizacji planera mereologicznego, zbudowanego z wykorzystaniem skonstruowanego pola potencjału (podrozdział 8.4). Planer ten przyjmuje współrzędne celu i buduje sekwencje punktów pośrednich od robota do celu. Punkty te są wyznaczane iteracyjnie jako środki ciężkości obszarów określanych jako sumy kwadratów pola, najbliższe w sensie mereologicznym obszarowi określonemu w ostatnim poprzedzającym kroku. W ten sposób robot jest prowadzony do celu wskutek rosnącej gęstości pola, zależącej od odległości euklidesowej r od celu jak $r^{1/2}$.

3. Implementacja w SQL relacji mereogeometrii z rozdziału 4 opisana w podrozdziale 8.7. W podrozdziale 8.8 przedstawiono eksperymenty porównujące zaproponowaną "mereologiczną" metodę planowania z komercyjną metodą wbudowaną w system Player.

Rozdział 9 jest poświęcony metodom planowania trajektorii i nawigacji formacji robotów, wykorzystujących podejście mereologii rozproszonej. W podrozdziale 9.1 Doktorant podaje własną mereologiczną definicję formacji robotów, wykorzystującą pojęcie "bycia robota B pomiędzy robotem A i robotem C" i "bycia robota B pomiędzy robotem A i robotem C w stopniu r ". Formacje są opisywane jako listy wyrażeń, których składnia została zapożyczona z języka LISP (tzw. S-wyrażenia), co umożliwia łatwe tworzenie opisów składających się z zagnieżdżonych wyrażeń. Doktorant dowodzi, że problem znalezienia opisu formacji o minimalnej długości listy wyrażeń jest NP—trudny.

W podrozdziale 9.2 Doktorant przechodzi do opisu sterowników systemu Player służących do tworzenia i kontrolowania zadanych formacji. Doktorant podaje i analizuje 3 metody naprawiania formacji np. po niepożądanym modyfikacji po przejściu przez przeszkodę:

metoda behawioralna, w której każdy robot oprócz lidera dąży do swej pozycji a lider pozostaje w miejscu; metoda "jeden robot kolejno" oraz metoda "wszystkie roboty jednocześnie", w której roboty jednocześnie podążają do swoich pozycji. Przedstawiono opisy symulacji tych metod.

Rozdział 10 przedstawia wprowadzenie do eksperymentów z rzeczywistymi robotami i jest poświęcony robotom Roomba. Podany jest techniczny opis robota Roomba wraz z opisem modyfikacji i ulepszeń dokonanych przez Doktoranta w tym robocie. Doktorant opisuje sterownik robota dla systemu Player oraz zaimplementowane w nim interfejsy.

Rozdział 11 krótko opisuje zaadaptowane przez Doktoranta Wirtualne Laboratorium Robotyki (Virtual Robotic Laboratory) - funkcjonujące w Katedrze Inteligentnych Systemów

Robotyki PJWSTK - oraz przedstawia wykonane w tym laboratorium eksperymenty. Sfilmowane przebiegi eksperymentów z formacjami rzeczywistych robotów Roomba są zarejestrowane na załączonym dysku CDROM.

Ocena merytorycznej zawartości rozprawy

Przechodząc do ogólnej oceny opiniowanej rozprawy stwierdzam, że dotyczy ona bardzo aktualnego i ciekawego problemu badawczego, gdyż z jednej strony efektywne metody rozwiązywania problemów planowania trajektorii należą do bardzo ważnych problemów robotyki a z drugiej strony użyteczność teorii zbiorów przybliżonych a w tym mereologii przybliżonej zyskała nowe udokumentowane naukowo potwierdzenie. O znaczeniu przeprowadzonych badań świadczy dodatkowo fakt, że wielopłaszczyznowe wyniki rozprawy zostały opublikowane w dziewięciu publikacjach o zasięgu światowym.

Problem postawiony w rozprawie został poprawnie sformułowany. Celem pracy było przeprowadzenie badań i zaproponowanie nowych rozwiązań algorytmicznych i implementacyjnych (weryfikacja wykorzystanie podejścia mereologii przybliżonej). Cel pracy został sformułowany w sposób jasny. Został też w rozprawie zrealizowany.

Wyniki uzyskane w ramach rozprawy mają charakter teoretyczny oraz praktyczny i są oryginalne. Doktorant rozwiązał postawiony problem używając poprawnych metod. Doktorant wykorzystał istniejącą wiedzę na temat planowania i nawigacji oraz wnioskowania przestrzennego dla stworzenia oryginalnego nowego systemu robotycznego. W ten sposób twórczo rozszerzył stan wiedzy w dziedzinie robotyki wprowadzając do niego stworzony przez siebie system wnioskowania przestrzennego.

Do najważniejszych wyników rozprawy zaliczam:

1. Opracowanie metod wnioskowanie przestrzennego w oparciu o teorię mereologii przybliżonej, określenie relacji mereogeometrii i ich implementacja w systemie Player jako predykatów języka SQL. Metody wnioskowania zostały przez Doktoranta przyswojone i zaadaptowane do celów symulacji i eksperymentów z robotami .
2. Opracowanie metod planowania i nawigacji robotami mobilnymi. Tutaj Doktorant zaproponował i zaimplementował nowy typ planera oparty na idei mereologicznego pola potencjału, rosnącego z odległością jak $r^{1/2}$ a więc wolniej od tradycyjnego pola typu Coulomba, w którym potencjał rośnie jak r^2 .
3. Określenie formacji robotów z pomocą relacji "between" a więc w sposób niezależniący od metryki i geometrycznych relacji między robotami typu odległość i kąt. Daje to formacji elastyczność i umożliwia pokonywanie przeszkód z zachowaniem spójności formacji.

4. Implementacja metod planowania i nawigacji formacji robotów oraz metod odzyskiwania formacji.
5. Adaptacja systemu Player/Stage do zadań symulacji i wizualizacji formacji robotów przez wbudowanie modułów pozwalających na tworzenie i przechowywanie map środowiska i wizualizację pola potencjału oraz ścieżek robotów.
6. Rozbudowa laboratorium robotycznego dla prowadzenia rzeczywistych eksperymentów, w tym istotne dostosowanie robotów Roomba oraz instalacja systemu GIS.

Działanie opracowanych algorytmów i rozwiązań implementacyjnych zostało zweryfikowane poprzez eksperymenty wykonane w rzeczywistych systemach. Uzyskane wyniki eksperymentów są pozytywne i potwierdzają spełnienie tezy rozprawy. Na podstawie wykonanych eksperymentów można sądzić, że zaproponowane w rozprawie rozwiązania znajdują zastosowanie w praktyce.

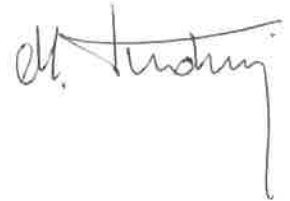
Niniejsza rozprawa doktorska świadczy o bardzo dobrej wiedzy Doktoranta w zakresie zagadnień mereologii przybliżonej oraz robotyki. Cytowana i wykorzystana literatura uwzględnia moim zdaniem wszystkie podstawowe problemy cząstkowe dziedziny pracy.

Uwagi szczegółowe

Nie zauważyłem w pracy istotnych błędów merytorycznych w zakresie proponowanych metod realizacji operacji sterujących robotami. Praca jest napisana w olbrzymiej większości poprawnym i zrozumiałym językiem, jednakże pozostawiono w niej dość liczne błędy pisarskie i stylistyczne jak np. str. 110 "some of them has already", str. 112 "we have developed number", str. 114 "instead making", str. 163 "one or more instance", "written italics", on figure". Tekst rozprawy jest bardzo rozległy i dobrze byłoby część materiału, takich jak opisy istniejących systemów przenieść do dodatków. Brak w rozprawie podsumowania i wniosków końcowych. Jednakże wnioski były formułowane w trakcie przekazu cząstkowych wyników pracy. Wydaje się, że wystarczającym kryterium akceptacji wyników pracy jest już samo poprawne działanie robotów. Brak w rozprawie szerszych eksperymentalnych wyników porównawczych proponowanych metod. Dołączenie takich wyników znacznie podniosłoby wartość naukową pracy. W sumie jednak rozprawa stanowi bardzo obszerne i cenne opracowanie z dziedziny robotyki oraz metodologii pochodnej od teorii zbiorów przybliżonych.

Podsumowując niniejszą recenzję stwierdzam, że Doktorant uzyskał w swojej rozprawie bardzo interesujące oryginalne wyniki merytoryczne spełniające w pełni wymagania dla rozpraw doktorskich określone w obowiązującej ustawie o stopniach i tytule naukowym.

Jednocześnie Doktorant wykazał się znajomością dziedziny naukowej, której dotyczy rozprawa i umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie niniejszej rozprawy doktorskiej i Doktoranta do dalszych faz przewodu doktorskiego.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. Kuchta'.