

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Szymona Szomińskiego pt. :
„*Behawioralny algorytm koordynacji ruchu robotów mobilnych
oparty na modelu postępowania przemieszczających się osób*”**

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Tematyka rozprawy to szeroko pojęta koordynacja ruchu autonomicznych robotów w środowiskach, w których mogą występować zakleszczenia najczęściej spowodowane wąskimi przejściami oraz przeciwnymi lub konfliktowymi kierunkami ruchu robotów.

Rozprawa dotyczy konstrukcji szczególnego rodzaju algorytmów do koordynacji robotów mobilnych i ich weryfikacji poprzez różnorodne eksperymenty zarówno w środowisku symulowanym jak i rzeczywistym środowisku, w którym poruszają się mobilne roboty. Algorytmy te opierają się na trzech zasadach, jakimi kierują się ludzie podczas przemieszczania się w zagęszczonych środowiskach miejskich. Pierwszą zasadę można krótko ująć poprzez następujące zdanie. *Ustąp miejsca ważniejszej osobie*. Druga zasada to uprzywilejowane kierunki ruchu nawiązujące do zwyczaju społecznego, że *pierwszeństwo mają osoby wychodzące*, np. z tramwaju czy z autobusu. Trzecia zasada również nawiązuje do uprzywilejowanych kierunków ruchu, tym razem w ruchu drogowym, ustalającym, że *ten po prawej ma pierwszeństwo*. Podobnych zasad może być wiele, co więcej, mogą być one wzajemnie sprzeczne. Autor rozprawy ograniczył się tylko do tych trzech zasad.

Doktorant podejmuje problem bardzo popularny w obecnych badaniach naukowych dotyczących de facto systemów wielo-agentowych (ang. *multi-agent systems*), a w szczególności do specjalnej klasy takich systemów odnoszących się do tzw. inteligencji rojów (ang. *swarm intelligence*), gdzie zachowanie agentów-robotów (w roju) sprowadza się zazwyczaj do prostych całkowicie zdecentralizowanych reguł (zasad), natomiast globalny efekt tych zachowań daje pożądane złożone zachowanie całego systemu.

Zagadnienie naukowe zostało przedstawione i sformułowane przez Autora w Rozdziale 3 rozprawy w postaci następującej tezy:

Behawioralny i zdecentralizowany algorytm sterowania ruchem robotów mobilnych, oparty o zachowania inspirowane postępowaniem przemieszczających się osób, może być wykorzystany do bezpiecznego i skutecznego koordynowania ruchu grup robotów działających w dynamicznie zmiennych środowiskach.



Dalej Doktorant pisze, że w rozprawie został taki algorytm zaproponowany. Nie korzysta on z jawnej komunikacji pomiędzy robotami i mimo to, jest w stanie rozwiązać trudne sytuacje (tj. zakleszczenia) wynikające z dynamicznie zmieniającego się środowiska. Razem z eksperymentalną weryfikacją i porównaniem do istniejących rozwiązań, algorytm ten ma uzasadniać w pełni tezę rozprawy.

Teza została jasno i precyzyjnie sformułowana. Sens pojęć „*bezpieczne i skuteczne koordynowanie ruchu grupami robotów*” oraz „*jest w stanie rozwiązać trudne sytuacje wynikające z dynamicznie zmieniającego się środowiska*” został dokładnie zdefiniowany w modelu systemu wielo-robotowego reprezentującego klasę systemów rozpatrywanych w rozprawie. W modelu zostały przedstawione specyfikacje samych robotów, oddziaływań pomiędzy nimi samymi, oraz specyfikacje oddziaływań typu robot-środowisko.

Rozprawa ma charakter bardziej praktyczny niż teoretyczny. Podstawą do weryfikacji postawionej tezy są eksperymenty bardziej niż analiza teoretyczna.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle / świadczący o dostatecznej wiedzy autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

W Rozdziale drugim, Autor przedstawia obszernie wprowadzenie do tematyki oraz przegląd prac dotyczących bezpośrednio tematyki samej rozprawy. Zakres literatury dotyczący przedmiotu rozprawy jest szeroki i liczy 112 pozycji.

Przedstawiona analiza jest wystarczająca, chociaż siłą rzeczy nie wyczerpująca, bo ta kwalifikuje się sama w sobie na obszerną monografię.

Doktorant wnioskuje, na podstawie przedstawionej analizy, że problem zdecentralizowanej koordynacji mobilnych robotów nie został rozwiązany zwłaszcza dla skomplikowanych środowisk gdzie występują długie wąskie przejścia oraz wąskie skrzyżowania. Tak faktycznie jest, a tym samym, problem postawiony w rozprawie jest naukowo ważny i nadaje się przeprowadzenia nowatorskich badań nad konstrukcją zdecentralizowanych algorytmów do koordynacji ruchu mobilnych autonomicznych robotów.

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

Doktorant przedstawia (w rozdziale czwartym) swoje autorskie algorytmy do koordynacji ruchu grup autonomicznych mobilnych robotów.

Są to trzy rodzaje algorytmów bazujące na następujących prostych i intuicyjnych zjawiskach społecznych: (1) respekt (osoby ważniejsze mają pierwszeństwo), (2) wychodzący ma pierwszeństwo, oraz (3) zasada prawej dłoni (pierwszeństwo ma ten z prawej strony).

Na podstawie formalnego modelu systemu wielo-robotowego (opisanego w Rozdziale 3) Autor dokładnie specyfikuje ograniczenia jakimi są obarczone te algorytmy. Model ten umożliwia również przeprowadzenie teoretycznej analizy możliwości tych algorytmów, a

zwłaszcza do zdefiniowania rodzajów sytuacji, dla których te algorytmy zawodzą, tj. nie pozwalają na wyjście z zakleszczeń.

Pomimo, że zaproponowane algorytmy wydają się być intuicyjnie proste, ich specyfikacja oraz analiza (może oprócz algorytmu opartego na zasadzie prawej dłoni) nie jest prosta.

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

Oryginalny wkład Aurora to same algorytmy oparte na trzech prostych zasadach oraz ich eksperymentalna weryfikacja (jako wartość dodana) w postaci przeprowadzonych wszechstronnych eksperymentów zarówno w środowiskach symulowanych jak i rzeczywistych z użyciem fizycznych robotów mobilnych. Nie mniej ważny jest również model formalny opracowany przez Autora, który umożliwił precyzyjne sformułowanie algorytmów oraz określił strukturę i zachowanie całego systemu wielo-robotowego.

Okazuje się, że wydawałoby się proste i intuicyjne zasady wzięte z zachowań w społeczeństwach ludzkich można z powodzeniem stosować do zarządzania ruchem mobilnych robotów. Nie eliminują one całkowicie zakleszczeń, ale w zdecydowanej większości możliwych sytuacji dopuszczalnych i opisanych w modelu, są one wystarczające żeby rozwiązywać konflikty i umożliwić sprawne, i efektywne przemieszczanie się robotów mobilnych.

Zaproponowane przez Autora algorytmy zostały porównane do znanej i uznanej metody do zdecentralizowanej koordynacji ruchu robotów Reciprocal Velocity Obstacles (RVO).

Wyniki przeprowadzonych eksperymentów zostały zestawione i porównane z Reciprocal Velocity Obstacles (RVO). Środowiska testowe zostały w dużej mierze opracowane na podstawie artykułów opisujących metodę RVO.

Metodę RVO, podobnie jak stworzone algorytmy, można zaklasyfikować do grupy rozwiązań całkowicie zdecentralizowanych oraz *nie wykorzystujących jawnej komunikacji podczas koordynacji ruchu*.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/ ?

Tematyka, problem (teza rozprawy) i koncepcja rozwiązania, formalny model, algorytmy, analiza teoretyczna, wymagania funkcjonalne i niefunkcjonalne systemu do przeprowadzenia eksperymentów na podstawie formalnego modelu, implementacja, testowanie i ewaluacja, oraz porównanie do istniejących rozwiązań. -- Wszystko to zostało bardzo dobrze zrealizowane przez Autora i zostało przedstawione w rozprawie zwięźle, jasno i poprawnie pod względem redakcyjnym.



Teza rozprawy została uzasadniona poprzez zaproponowane algorytmy oraz ich eksperymentalną weryfikację, i porównanie do metody Reciprocal Velocity Obstacles (RVO) uznawanej za benchmark w tej tematyce badawczej.

Istotną część rozprawy liczy 125 stron w sześciu rozdziałach z bibliografią liczącą 112 pozycji. Dodatkowo na końcu rozprawy zostały dołączone: CV Doktoranta, Spis rysunków, Spis tablic, Wykaz skrótów, Materiały video (odnośniki), oraz Specyfikacja sprzętowo-programowa.

Kluczowe rozdziały to Rozdział 4 opisujący algorytmy koordynacji zaproponowane przez Autora, oraz Rozdział 5 opisujący eksperymenty w środowisku symulowanym jak i rzeczywistym mającym na celu weryfikację tych algorytmów koordynacji. Rozdział 6 opisuje przeprowadzone badania (głównie eksperymenty), które mają uzasadniać tezę rozprawy.

Połowa rozprawy to Rozdział 5 (ok. 50 stron) poświęcony opisowi eksperymentów poprzedzonych analizą teoretyczną, zwłaszcza przypadków zakleszczeń i niepowodzeń. Podsumowanie (Rozdział 6) jest jednocześnie uzasadnieniem tezy postawionej w rozprawie. Również w Rozdziale 6 (podrozdział 6.2) jest wspomniana, na jednej stronie i pół, metoda hybrydowa do konstrukcji algorytmów koordynacji, które mogłyby być konstruowane na podstawie algorytmów zaproponowanych w rozprawie.

Tej metodzie powinien być poświęcony osobny rozdział zarówno dotyczący analizy teoretycznej jak i eksperymentalnej, opisujący, dla jakich sytuacji (z którymi nie potrafią dać sobie rady przedstawione algorytmy) algorytmy hybrydowe byłyby lepsze. Jest to, według Autora, temat przyszłych owocnych badań.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

W zasadzie rozprawa nie ma słabych stron i wad. Pewien niedosyt może budzić brak szerszej dyskusji na następujące pytanie:

Czy przedstawiony system wielo-robotowy jest rzeczywiście systemem rozproszonym?

Z implementacji na potrzeby eksperymentów wynika, że nie jest. Czy jest on otwarty, tj. czy nowe roboty i nowe powierzchnie do poruszania się dla tych robotów mogą być dodawane lub usuwane dynamicznie, a algorytmy nadal działają poprawnie? Jak jest faktyczna autonomia i niezależność robotów?

Według Autora, rozpatrywane w rozprawie systemy są zdecentralizowane, ponieważ przeprowadzane obliczenia nie wymagają centralnego sterownika koordynującego działaniem poszczególnych jednostek.

W eksperymentach roboty komunikują się z centralnym serwerem. A więc nie są one autonomiczne. Czy nie prościej byłoby dodać prosty protokół komunikacyjny pomiędzy robotami, które siebie widzą, zachowując w ten sposób autonomiczność robotów?

Natomiast według Autora : „System jest zdecydowanie otwarty, ponieważ umożliwia dynamiczne dodanie nowych urządzeń (robotów), jak i nowych labiryntów bez konieczności

ich dodatkowego konfigurowania. Roboty, jak i nowe powierzchnie, mogą być dodawane w sposób całkowicie dynamiczny, zaś sam algorytm będzie funkcjonował poprawnie. Autonomia robotów (rozważana w kontekście sterownia i zarządzania grupą robotów mobilnych) umożliwi robotom niezależne wyznaczanie bezkolizyjnej trajektorii ruchu bez konieczności uzgadniania działań z innymi uczestnikami ruchu. Proces ten jest realizowany w sposób całkowicie autonomiczny przez samego robota."

Powyższe uwagi nie umniejszają wartości rozprawy a mogą jedynie służyć, jako podstawa do szerszej dyskusji na publicznej obronie.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Główne osiągnięcie Autora to formalny model pewnej ważnej (również dla zastosowań) klasy systemów wielo-robotowych oraz ciekawe i ważne algorytmy sterowania ruchem robotów mobilnych w takich systemach. Eksperymentalna weryfikacja tych algorytmów zarówno w środowisku symulowanym oraz z użyciem rzeczywistych robotów mobilnych jest istotna i potwierdza ich użyteczność.

Wyniki uzyskanych w rozprawie są ważne dla nauk technicznych.

W konkluzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Szymona Szomińskiego spełnia w pełni wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz.U. Nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami).

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a) nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
- b) wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
- c) spełniająca wymagania
- d) spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem
- e) wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie



