

Prof. dr hab. inż. Wojciech MITKOWSKI
Katedra Automatyki i Inżynierii Biomedycznej
WEAI i IB-AGH al. Mickiewicza 30/B-1
30-059 KRAKÓW
wojciech.mitkowski@agh.edu.pl

Kraków, sobota, 3 czerwca 2016



RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

(na zlecenie WEAIiIB-b/510-1.-1/10 z dnia 1.04.2016 Dziekana Wydziału EAIiIB-AGH-Kraków)

TYTUŁ ROZPRAWY: *Planowanie trajektorii dla wybranej klasy robotów mobilnych z punktu widzenia ich sterowalności.* AGH-Kraków 2016, s. 1-149.

AUTOR ROZPRAWY: mgr inż. Maciej Garbacz

PROMOTOR ROZPRAWY: dr hab. inż. Krzysztof Oprzędkiewicz, prof. n. AGH.

Praca zawiera 149 str. maszynopisu (skład komputerowy), w tym wstęp, 7 rozdziałów zasadniczych, uwagi końcowe, wykaz literatury zawierający 162 pozycje, 3 dodatki (A,B,C, s. 136-149) oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

Praca dotyczy ważnego problemu z punktu widzenia nauk technicznych i zastosowań, a mianowicie sterowania robotem mobilnym wyposażonym w odpowiednią liczbę odpowiednio ułożonych czujników, pozwalających na wykrywanie przeszkód w obrębie obszaru roboczego robota. Zagadnienia prezentowane w pracy (realizowalność trajektorii robota przy różnej liczbie aktywnych czujników) mogą mieć duże znaczenie praktyczne przykładowo w przypadku robotów pracujących w trudnych warunkach i w sytuacji, gdy część czujników zostanie uszkodzona lub zniszczona. W takich warunkach robot powinien mieć możliwość dalszego ograniczonego funkcjonowania w otoczeniu. W literaturze można znaleźć rozwinięcie tematyki funkcjonowania robota mobilnego z uszkodzonymi częściowo czujnikami, głównie w odniesieniu do robotów pirotechnicznych będących przedmiotem produkcji i badań zespołu działającego w ramach Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów w Warszawie. Autor w swojej pracy rozwinął znacząco te problemy sterownia wybraną klasą robotów mobilnych.

Układ pracy jest następujący. **We wstępie** Autor przedstawił strukturę pracy, tło historyczne pracy, zwięźle i ładnie opisane, klasyfikację robotów mobilnych i w zakończeniu wstępu sformułował cel (s. 15), tezę i przedstawił krótko problemy naukowe (w postaci pytań) do rozwiązania w pracy (s. 15 i 16). Na wszystkie postawione pytania Autor sformułował odpowiedzi na s. 120.

W rozdziale 2, który dotyczy zagadnienia planowania trajektorii dla robotów mobilnych omówiono znane w literaturze algorytmy planowania trajektorii, podano ich klasyfikację i krótko omówiono najważniejsze i najpopularniejsze algorytmy lokalne, rozważane dalej pracy. Szczególną uwagę zwrócono na algorytm Braitenberga bazujący na zachowaniu się żywych organizmów (tu Autor nawiązuje do obszaru badawczego Wydziału, jakim jest inżynieria biomedyczna). Wynika to z faktu, że do realizacji części eksperymentalnej pracy został wykorzystany robot Khepera III, będący dobrym rzeczywistym przykładem tzw. pojazdu Braitenberga. Dalej Autor podał uwagi o konstrukcji robotów mobilnych z punktu widzenia planowania trajektorii i krótko omówił zagadnienia, jakie mogą wystąpić podczas planowania trajektorii robota.

Rozdział 3 dotyczy konstrukcji i sterowania robotem typu Kheper III, który został wykorzystany w części praktycznej pracy. Rozdział ten zawiera opis szczegółowej budowy robota a także przedstawia zbudowany przez Autora (własne oryginalne osiągnięcie Autora) system sterowania robotem wykorzystujący środowisko programowe MATLAB/SIMULINK, co umożliwiło implementację algorytmów planowania trajektorii wykorzystanych w części eksperymentalnej pracy.

Ważny poznawczo i praktycznie **rozdział 4** zawiera szczegółową charakterystykę czujników zbliżeniowych pracujących w paśmie podczerwieni znajdujących się na wyposażeniu robota i wykorzystywanych podczas prowadzenia eksperymentów praktycznych. W rozdziale tym Autor zasygnalizował fakt wyposażenia robota w czujniki ultradźwiękowe, których bliższa charakterystyka znajduje się w Dodatku C. Rozdział 4 zawiera także modele przedziałowe charakterystyk czujników zbliżeniowych wykorzystywanych podczas poruszania się robota w przestrzeni roboczej, bazujące na funkcji wykładniczej oraz na funkcjach Mittag-Lefflera. Ten fragment pracy nawiązuje do ostatnio rozwijającej się teorii układów niecałkowitego rzędu (funkcja Mittag-Lefflera o ciekawych własnościach dynamicznych) z niepewnymi parametrami, rozwijanej skutecznie w naszej Katedrze.

W rozdziale 5 i 6 wykorzystano klasyczny aparat matematyczny teorii sterowania. Przedstawiono i opisano model kinematyki robota realizującego algorytm Braitenberga- zarówno w wersji standardowej jak i zmodyfikowanej. Kolejne podrozdziały w obrębie rozdziału 5 przedstawiają proces linearyzacji nieliniowego modelu kinematyki oraz analizę stabilności z użyciem 1 i 2 metody Lapunowa. Dalej omówiono problem sterowalności przedstawionych modeli, z uwzględnieniem ograniczeń na trajektorie, wynikające z konieczności omijania przeszkód. Autor zaproponował definicję sterowalności dla rozważanego robota, wykazując, że znany z teorii systemów liniowych warunek konieczny i dostateczny sterowalności jest w rozważanym wypadku jedynie warunkiem koniecznym oraz zaproponowano warunek dostateczny sterowalności wiążący tę własność z wagami czujników zbliżeniowych robota. Autor zaproponował również wskaźniki jakości do oceny ruchu robota, służące do oceny jakości realizacji trajektorii rozważanego w pracy pojazdu Braitenberga i wykorzystywane w eksperymentalnej części pracy. Rozdział 6 dotyczy dynamiki robota analizowanej w oparciu o model matematyczny. W rozdziale tym podano zasadność rozważania modelu dynamiki oraz przedstawiono model dynamiki odpowiadający rozważanej w pracy klasie robotów mobilnych i dokonano analizy stabilności modelu dynamiki rozważanego robota.

Ważny kolejny **rozdział 7** zawiera opis części eksperymentalnej pracy. Autor w tym rozdziale, istotnym dla całej pracy, przedstawił wyniki własnych testów polegających na realizacji przez robota różnych typowych zadań takich, jak: omijania przeszkód o różnych kształtach i różnych kolorach, jazdy do punktu o zadanych współrzędnych w przestrzeni z przeszkodami przy różnych konfiguracjach czujników zbliżeniowych i różnych parametrach algorytmu. Jako algorytm sterowania Autor pracy wykorzystał algorytm Braitenberga w wersjach: podstawowej i zmodyfikowanej. Dla każdego przejazdu robota rejestrowana była w formie graficznej jego trajektoria oraz wyliczane były wskaźniki jakości, określone w poprzednich rozdziałach. Zamieszczono wybrane, charakterystyczne przypadki wraz z ilustracją graficzną oraz zestawieniem

tabelarycznym odpowiednich wskaźników jakości z jednoczesnym podsumowaniem zbliżonych do siebie eksperymentów (analiza porównawcza). Zbadano również omijanie przez robota przeszkód o różnych współczynnikach pochłaniania promieniowania podczerwonego.

Rozdział 8 to ważne i dobrze opisane uwagi końcowe, w których podsumowano wyniki przeprowadzonych eksperymentów. W uwagach końcowych Autor próbuje odpowiedzieć na pytanie o właściwą liczbę aktywnych czujników rozważanego robota podczas jego ruchu w nieznanym otoczeniu.

W zakończeniu pracy Autor przedstawił **wykaz literatury** (162 pozycje, s. 122-133, w tym 7 prac współautorskich (w tym 3 samodzielne prace Autora), dwa streszczenia w języku polskim i angielskim. Praca kończy się trzema dodatkami. Dodatek A zawiera kody źródłowe oprogramowania sterującego, Dodatek B opisuje możliwość sterowania robotem Khepera III z wykorzystaniem logiki rozmytej, natomiast Dodatek C przedstawia krótką charakterystykę czujników ultradźwiękowych. Czujniki te stanowią fabryczne wyposażenia robota, jednak z uwagi na właściwości pomiarowe nie były bezpośrednio wykorzystywane podczas realizacji niniejszej pracy, ale mogą ewentualnie wskazywać kierunki dalszych badań eksperymentalnych.

Za oryginalny dorobek Autora można uznać:

1. Zaproponowanie przez Autora wskaźników jakości (s. 66 i dalej) do oceny jakości realizacji zadań robota pozwalających na ocenę jakości przejazdu robota z ominięciem przeszkody i bez konieczności definiowania punktu końcowego. Część z tych wskaźników nie wymaga definiowania trajektorii referencyjnej i pozwala w prosty sposób wykryć zderzenie z przeszkodą lub jazdę nieoptymalną wykorzystując pomiar zużycia energii.
2. Przeprowadzenie analizy zachowania robota z wykorzystaniem technik stosowanych w teorii sterowania, w szczególności analiza stabilności i sterowalności rozważanych układów sterowania (s. 51, 54 i dalej). Interesując jest wynik dotyczący warunków sterowalności w zależności od wag przypisanych sygnałom z czujników zbliżeniowych (s. 56 i 65). Te myśli warto rozwinąć w dalszych pracach.
3. Modelowanie czujników zbliżeniowych w postaci zależności wiążącej poziom sygnału z czujnika od odległości od przeszkody (s. 36 i dalej). W celu uniezależnienia pracy robota od czynników zewnętrznych, takich jak natężenie oświetlenia, czy też od fizycznych cech materiałów napotykanym przeszkód na drodze robota, Autor zaproponował kilka funkcji poziomu sygnału z czujnika od wybranych cech przeszkody (s. 37 i dalej).
4. Dużą liczbę eksperymentów, dotyczących poruszania się robota pomiędzy różnymi przeszkodami i przy różnej liczbie czujników i różnych położeniach czujników pomiarowych, w skali laboratoryjnej oraz badań symulacyjnych, dobrze opisanych i z dobrą analizą porównawczą. Każda seria eksperymentów jest odpowiednio podsumowywana i zawiera wnioski dla potencjalnych użytkowników (s. 73 i wnioski s. 116).
5. W szczególności, interesujące i ważne są wyniki eksperymentów awaryjnej pracy robota. Autor zauważył, że jest możliwa konfiguracja algorytmu sterowania umożliwiającego poprawną realizację odpowiedniego zadania tylko przy dwóch aktywnych czujnikach. Algorytm należy traktować jako „awaryjny” ze względu na jego nieefektywność w sensie przyjętych wskaźników jakości.

6. Do oryginalnego dorobku Autora należy również zaliczyć Jego współudział w zbudowaniu biblioteki rozkazów w środowisku MATLAB, co umożliwiło komunikację i sterowanie robotem mobilnym Khepera III (Dodatek A). Biblioteka ta umożliwiła Autorowi realizację dalszych części pracy. Należy tu zaznaczyć, że robot został zakupiony bez oprogramowania sterującego i musiało ono zostać zbudowane przez Autora pracy.

W czasie czytania pracy nasunęły mi się następujące uwagi:

1. Autor w swojej pracy wykorzystuje klasyczne metody teorii sterowania. Odczuwalny jest brak odniesienia (odpowiedniego komentarza) do algorytmów sterowania optymalnego w klasycznym problemie nadążania.
2. Podobnie należy skomentować fakt, że sterowalność jest powiązana z takimi zagadnieniami jak: sterowanie docelowe minimalno-energetyczne oraz przeprowadzenie układu z jednego punktu (stanu) w inny zadany, ale np. w minimalnym czasie.
3. Uwagi redakcyjne. W wektorach między elementami nie stawia się przecinków. W całej pracy należy, w przyszłości w dalszych opracowaniach, dążyć do zwiększenia stopnia uporządkowania i ujednoczenia sposobu oznaczeń. Wykaz literatury sporządzony w sposób odbiegający od przyjętych zwyczajów redakcyjnych. W zakończeniu brakuje zwięzłego przedstawiania, co zdaniem Autora jest Jego oryginalnym osiągnięciem.
4. Uwagi szczegółowe:
 - 1) s. 29; w tym miejscu można dodać komentarz o problemie nadążania i to przy różnych ograniczeniach.
 - 2) s.35; tu można rozwinąć myśli o sterowaniu docelowym.
 - 3) s. 42; do aproksymacji wykorzystywać również inne funkcje, a nie tylko funkcję Mittag-Lefflera. Czy Autor dostrzega związku z modelowaniem układów ułamkowych?
 - 4) s. 43; te ograniczenia mają swoje przełożenie na modele układów dynamicznych robota (5.3). Brak precyzji.
 - 5) s. 47; cytując pozycję książkową należy podać stronę.
 - 6) s. 52; tu należy wyraźnie podać, do którego układu (odesłać do wzoru) będzie wykorzystywany funkcjonał (5.28).
 - 7) s. 54; może należało podać obszar parametrów, dla których $(5.37) < 0$. Nie należy mylić stabilności i asymptotycznej stabilności.
 - 8) s. 55; nad (5.39)-poprawić oznaczenie, wskaźnik przy U.
 - 9) s. 56; w (5.42) należy usunąć przecinki. Podobnie w innych miejscach pracy.
 - 10) s. 57; poprawić wzór (5.43).
 - 11) s.59; tu widać, że zadanie sterowanie przy omijaniu przeszkód trzeba inaczej formułować. Nie jako problem „klasycznej” sterowalności (bez odpowiednich ograniczeń).
 - 12) s. 66; czyli wskaźniki stosowane w zadaniach minimalno-energetycznych i minimalno-czasowych lub ich kombinacja z odpowiednimi wagami.
 - 13) s. 72; z (6.13) bez liczenia widać, jakie są wartości własne (macierz trójkątna). Zatem rachunki (6.14) i (6.15) są praktycznie zbędne. Warto zauważyć, że model typu (6.13) pojawia się również przy modelowaniu silnika prądu stałego (z tarciami wału).
 - 14) s. 85: czy „wężykowanie” jest zauważalne przy analizie teoretycznej modelu robota? Podobnie s. 109.

Powyższe uwagi mają w większości charakter redakcyjny oraz dyskusyjny i nie podważają istoty pracy, którą oceniam pozytywnie, głównie ze względu na mocne powiązanie badań teoretycznych z zastosowaniami praktycznymi zweryfikowanymi przez Autora w skali laboratoryjnej.

Jednak **powyższe uwagi powinny być skomentowane** przez Doktoranta na obronie rozprawy. Z uwag szczegółowych interesujące poznawczo jest, czy „wężykowanie” (zob. uwaga szczegółowa 14)) jest „zauważalne” przy analizie dynamiki poruszającego się robota.

Rozprawa dotyczy sterowania wybranym robotem mobilnym przy odpowiednio rozmieszczonym zestawie czujników pomiarowych. Jest to obecnie jeden z ważniejszych problemów nauk technicznych. Praca jest napisana starannie, jasno, wystarczająco precyzyjnie i zawiera oryginalne wyniki Autora w stosunku do rezultatów uzyskanych w dotychczasowej literaturze przez innych autorów. Wyniki Autora były częściowo publikowane (zob. odpowiednie pozycje wykazu literatury – 7 prac). Cenne są wnioski Autora z przeprowadzonych eksperymentów ze sterowanym robotem mobilnym. Autor do sterowania i komunikacji z robotem wykorzystał własne oprogramowanie. Przeprowadził analizę stabilności i sterowalności w zależności od położenia czujników pomiarowych. W szczególności, interesujące i ważne są wyniki eksperymentów awaryjnej pracy robota. Autor zna literaturę przedmiotu -wykaz literatury zawiera 162 pozycje -oraz wykazał się dobrą znajomością teorii sterowania oraz dostępnych narzędzi informatycznych i umiejętnościami prowadzenia badań naukowych.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że przedstawiona przez Pana Magistra inż. Macieja GARBACZA praca spełnia odpowiednie warunki stawiane rozprawom doktorskim i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Wojciech Mitkowski



