



Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

**Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Inżynierii
Biomedycznej**

Katedra Automatyki i Inżynierii Biomedycznej

Autoreferat rozprawy doktorskiej

**Planowanie trajektorii dla wybranej klasy robotów mobilnych
z punktu widzenia ich sterowalności**

mgr inż. Maciej Garbacz

Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Oprzędkiewicz, prof. n. AGH

Kraków 2016

1. Wprowadzenie

Funkcjonalność ruchowa robota mobilnego, rozumiana jako zdolność do realizacji dowolnej trajektorii w różnorodnym otoczeniu, zależy od bardzo wielu czynników między innymi od konstrukcji robota jak i algorytmów jego sterowania. Funkcjonalność ruchowa robota jest ściśle powiązana z jego sterowalnością (jako systemu dynamicznego), gdyż własność sterowalności robota mobilnego jest równoważna stwierdzeniu, że przestrzeń stanów osiągalnych z dowolnego punktu początkowego jest równa całej przestrzeni roboczej robota. Robot sterowalny jest w stanie osiągnąć dowolny punkt w przestrzeni roboczej, a w szczególności jest w stanie ominąć przeszkodę (nieruchomą lub ruchomą) wykrytą podczas jazdy do zadanego punktu końcowego. Kolizja z przeszkodą może być interpretowana jako utrata sterowalności z dwóch powodów: po pierwsze, system sterowania robota nie jest w stanie wygenerować trajektorii pozwalającej na ominięcie przeszkody, po drugie – w razie kolizji robot nie jest w stanie osiągnąć punktu docelowego. Planowanie trajektorii robota oraz jej późniejsza realizacja wymaga przeanalizowania zarówno zagadnień związanych z rozpoznawaniem otoczenia robota jak właściwym doбором odpowiednich metod sterowania z uwzględnieniem istniejących ograniczeń, przy czym ograniczeniami są: jest ilość i rozmieszczenie czujników wykrywających przeszkody oraz same przeszkody znajdujące się w przestrzeni roboczej i ich cechy istotne z punktu widzenia ich rozpoznania (kształt, kolor). W przypadku robotów holonomicznych nie występują ograniczenia związane z niemożliwością realizacji pewnych określonych trajektorii wynikającą z ograniczeń konstrukcyjnych robota.

Jednakże z punktu widzenia konstrukcji robota pojawia się w takiej sytuacji problem ustalenia optymalnej liczby czujników wykrywających przeszkody oraz ich lokalizacji na obudowie urządzenia. Zbyt mała liczba czujników może uniemożliwić wykrycie wszystkich przeszkód, a z kolei zbyt duża ich liczba podnosi koszty urządzenia, zwiększa jego masę i zużycie energii oraz komplikuje algorytm sterowania.

2. Teza i cel pracy

Celem naukowym niniejszej pracy jest analiza konstrukcji holonomicznego robota mobilnego z punktu widzenia optymalizacji liczby i lokalizacji czujników zbliżeniowych przy wykorzystaniu istniejącej, optymalnej z punktu widzenia sterowalności konfiguracji układu napędowego.

Formalnie cel naukowy pracy może być sformułowany następująco:

Należy zaproponować i zweryfikować eksperymentalnie warunki stabilności i sterowalności dla autonomicznego, holonomicznego robota mobilnego klasy „pojazd Breitenberga” wiążące te własności z jego konstrukcją, a w szczególności z ilością i lokalizacją czujników wykrywających przeszkody przy założeniu, że trajektoria ruchu robota jest wyznaczana z użyciem algorytmu Breitenberga (podstawowego lub zmodyfikowanego), przestrzeń robocza jest ograniczona, a lokalizacja przeszkód w obrębie tej przestrzeni roboczej nie jest znana.

W szczególności realizacja powyższego celu naukowego pracy wymaga rozwiązania następujących problemów:

1. W oparciu o modele kinematyki i dynamiki rozważanego robota należy zbadać stabilność robota w funkcji wag sygnałów z czujników.
2. Należy zaproponować i zidentyfikować modele matematyczne opisujące zależność pomiędzy poziomem sygnału z czujnika zbliżeniowego a odległością od przeszkody.
3. Należy w oparciu o zlinearyzowany model kinematyki rozważanego robota zdefiniować pojęcie sterowalności dla rozważanej klasy robotów mobilnych oraz zaproponować warunki sterowalności wiążące tę własność z wagami sygnałów z czujników.
4. Zaproponować wskaźniki jakości będące miarą poprawności realizacji trajektorii podczas omijania przeszkody w celu oceny jakości realizacji zadań.
5. Otrzymane wyniki teoretyczne należy zweryfikować eksperymentalnie z użyciem zbudowanych w tym celu algorytmów sterowania zaimplementowanych na robocie eksperymentalnym.

Zagadnienia prezentowane w pracy (realizowalność trajektorii robota przy różnej liczbie aktywnych czujników) mogą mieć duże znaczenie praktyczne przykładowo w przypadku robotów pracujących w warunkach bojowych w sytuacji, gdy część czujników zostanie uszkodzona lub zniszczona. W takich warunkach robot powinien mieć możliwość dalszego ograniczonego funkcjonowania w otoczeniu.

3. Struktura rozprawy

Rozdział 1. ma charakter wprowadzający i podzielony został na krótkie podrozdziały. Podrozdział 1.2. przedstawia tło historyczne dotyczące omawianego zagadnienia. Podrozdział

1.3 poświęcony jest krótkiej charakterystyce i klasyfikacji robotów mobilnych różnego rodzaju. W podrozdziale 1.4. podano cel naukowy pracy.

Rozdział 2. dotyczy zagadnienia planowania trajektorii dla robotów mobilnych. W podrozdziale 2.1 omówiono znane w literaturze algorytmy planowania trajektorii, podano ich klasyfikację i krótko omówiono najważniejsze z nich. Szczególną uwagę zwrócono na algorytm Braitenberga bazujący na zachowaniu się żywych organizmów. Wynika to z faktu, że do realizacji części eksperymentalnej pracy został wykorzystany robot Khepera III, będący dobrym rzeczywistym przykładem tzw. pojazdu Braitenberga. Podrozdział 2.2. zawiera uwagi o konstrukcji robotów mobilnych z punktu widzenia planowania trajektorii. Podrozdział 2.3 krótko porusza tematykę problemów, jakie mogą wystąpić podczas planowania trajektorii robota.

Rozdział 3. poświęcony został robotowi Khepera III użytemu w części praktycznej pracy oraz systemowi sterowania tym robotem. Rozdział ten zawiera opis budowy robota a także przedstawia zbudowany przez autora system sterowania robota oparty o środowisko MATLAB/SIMULINK umożliwiający implementację algorytmów planowania trajektorii wykorzystanych w części eksperymentalnej pracy.

Rozdział 4. zawiera szczegółową charakterystykę czujników zbliżeniowych pracujących w paśmie podczerwieni znajdujących się na wyposażeniu robota i wykorzystywanych podczas prowadzenia doświadczeń. W rozdziale tym zostaje również zasygnalizowany 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.

Rozdział 5. opisuje 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 Lapunova) i sterowalności przedstawionych modeli, z uwzględnieniem konieczności omijania przeszkód.

W rozdziale 5 zaproponowano definicję sterowalności dla rozważanego robota, wykazano, 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.

W rozdziale 5 omówiono także zaproponowane przez autora 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 modelu dynamiki robota. 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.

Rozdział 7. zawiera opis części eksperymentalnej pracy. W rozdziale przedstawiono wyniki testów polegających na realizacji przez robota różnych typowych zadań: 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 wykorzystano algorytm Braitenberga w wersjach: podstawowej i zmodyfikowanej. Dla każdego przejazdu robota rejestrowana była w formie graficznej jego trajektoria oraz wyliczane były wskaźniki jakości. W rozdziale 7. pracy zamieszczono wybrane, charakterystyczne przypadki wraz z ilustracją graficzną oraz podsumowaniem tabelarycznym odpowiednich wskaźników jakości z. Zbadano również omijanie przez robota przeszkód o różnych współczynnikach pochłaniania promieniowania podczerwonego.

Rozdział 8. stanowi podsumowanie przeprowadzonych eksperymentów oraz jest próbą odpowiedzi na pytanie o optymalną liczbę aktywnych czujników rozważanego robota podczas jego ruchu w nieznanym otoczeniu.

Rozdział 9. stanowi wykaz literatury, natomiast rozdział 10. to streszczenie pracy w języku polskim, a rozdział 11.- w języku angielskim.

Na końcu pracy umieszczono dodatki. 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.

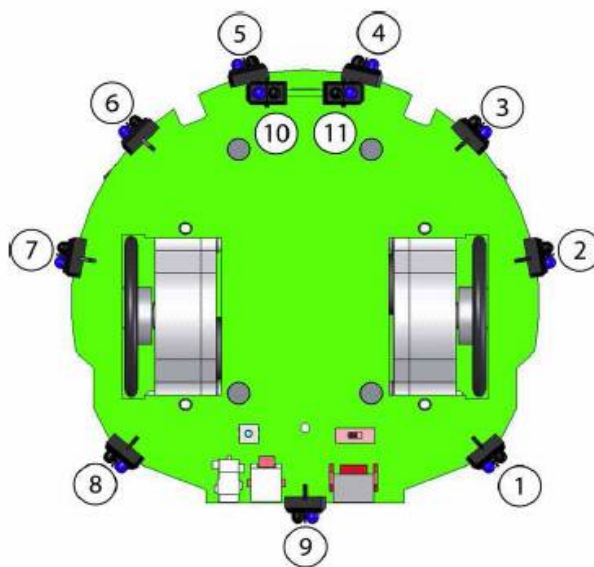
4. Treść rozprawy

4.1. Robot Khepera II, jego konstrukcja i system sterowania

Do badań eksperymentalnych został wykorzystany robot mobilny Khepera III znajdujący się na wyposażeniu Laboratorium Automatyki, Robotyki i Systemów Fotowoltaicznych. Zdjęcie robota przestawiono na rysunku 4.1, a rozmieszczenie czujników zbliżeniowych na rysunku 4.2



Rys. 4.1. Robot Khepera III wykorzystywany do testów



Rys. 4.2. Rozmieszczenie czujników zbliżeniowych (widok od spodu)

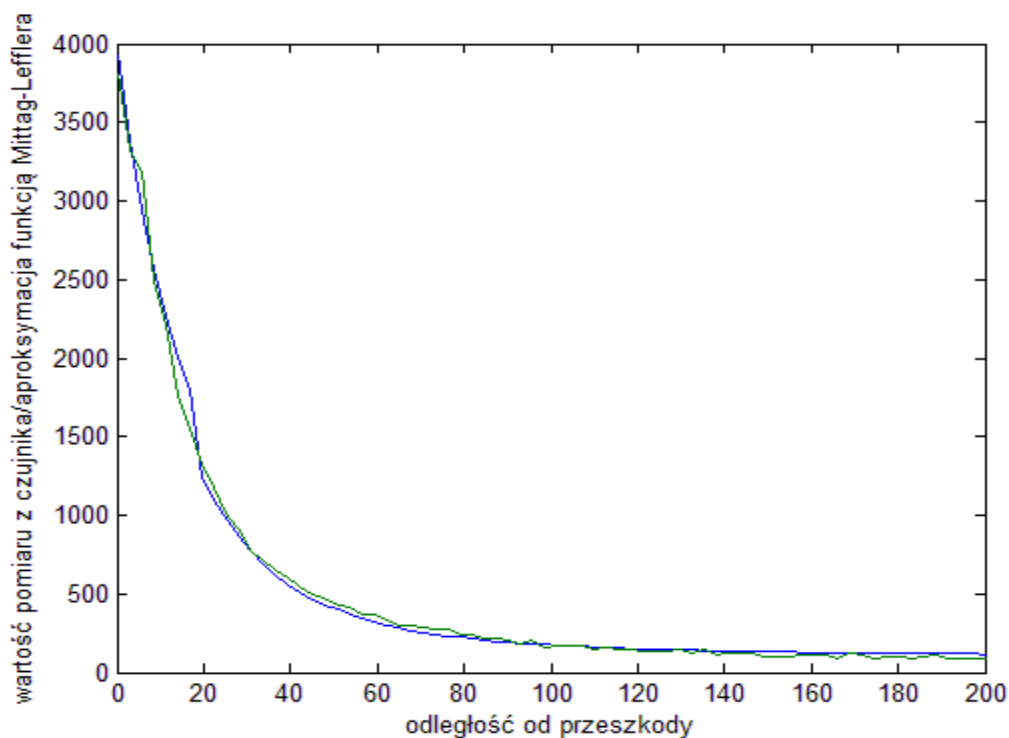
Robot porusza się na dwóch kółkach, umieszczonych w jednej osi. Dodatkowo Khepera III podparty jest w jednym punkcie co zapewnia stabilne poruszanie się w przestrzeni roboczej. Dookoła obudowy robota umieszczonych jest 9 czujników podczerwieni oraz dodatkowo 2 pod spodem (czujniki zbliżeniowe), umożliwiających wykrywanie na niedaleką

odległość przeszkód bądź krawędzi stołu po którym robot się porusza. Robot ma również możliwość zmierzenia odległości od przeszkody, za sprawą pięciu wbudowanych sensorów ultradźwiękowych (sonary). Do napędu wykorzystano dwa wysokiej klasy silniki DC (jeden dla każdego koła) zapewniające sprawne i dokładne sterowanie ruchem robota.

Układ sterowania robotem został zrealizowany na platformie MATLAB/SIMULINK. Zbudowanie układu sterowania poprzedziło zbudowanie specjalnej biblioteki rozkazów pod środowisko MATLAB służących do komunikacji i sterowania robotem Khepera III, ponieważ robot Khepera III został dostarczony przez producenta bez specjalistycznego oprogramowania.

4.2. Czujniki zbliżeniowe i ich modele matematyczne

W przypadku poruszania się robota w bliskich odległościach od przeszkód podstawowym źródłem informacji o tych przeszkodach są czujniki zbliżeniowe pracujące w paśmie podczerwieni. Charakterystyki czujników aproksymowano funkcją progową, wykładniczą oraz funkcjami Mittag-Lefflera. Najlepsza (pod względem wartości wskaźnika kwadratowego) okazała się aproksymacja funkcją Mittag-Lefflera, przykładową charakterystykę pokazano na rysunku 4.3.



Rys. 4.3. Charakterystyka czujnika odległościowego wraz z aproksymacją funkcją Mittag-Lefflera.

4.3. Model kinematyki robota oraz analiza jego stabilności i sterowalności

Model kinematyki robota Khepera III stworzony w oparciu o wielkości fizyczne związane z konstrukcją i wymiarami robota jest modelem nieliniowym. Tak stworzony model analizuje się pod kątem stabilności. W celu analizy sterowalności dokonuje się linearyzacji modelu w wyznaczonych punktach równowagi dla przypadku algorytmu Braintemberga bez podania punktu docelowego oraz z podaniem punktu docelowego (tzw. „zmodyfikowany” algorytm Braintemberga). Warunek konieczny sterowalności względem stanu systemu liniowego stacjonarnego okazuje się niewystarczający dla zadania poruszania się w przestrzeni roboczej z przeszkodami. Z tego względu zaproponowano w pracy dodatkowy warunek wiążący wagi i pomiary z poszczególnych czujników zbliżeniowych, którego spełnienie jest warunkiem dostatecznym sterowalności gwarantującej ominięcie przeszkody.

4.4. Proponowane przez autora wskaźniki jakości do oceny jakości ruchu robota

Do oceny jakości ruchu robota po trajektorii podczas przejazdu od punktu początkowego do końcowego z omijaniem przeszkód oprócz typowych wskaźników jak długość przebytej drogi, czas przejazdu czy wskaźnik minimalnokwadratowy oceniający odchyłkę od trajektorii referencyjnej zaproponowano własny wskaźnik uwzględniający „płynność” ruchu, wyrażony wzorem:

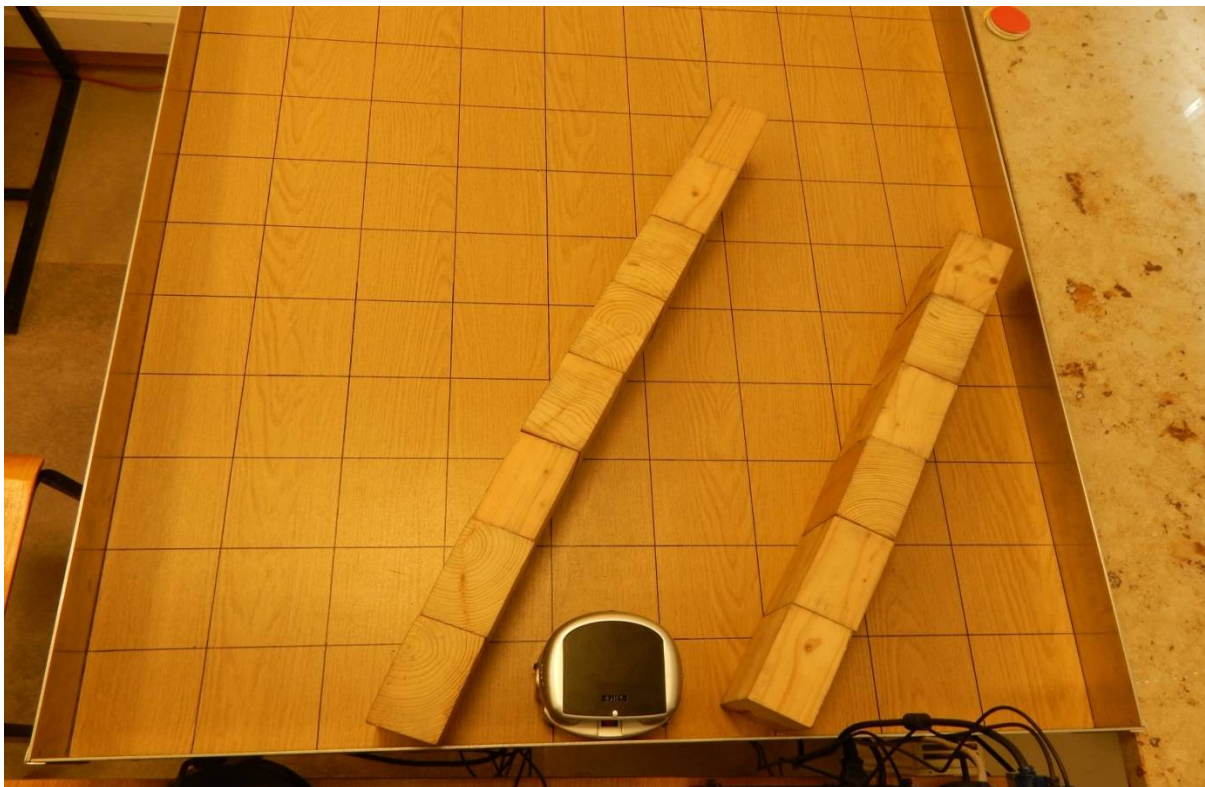
$$I_1(w) = \max_t \left| \frac{dv(t)}{dt} \right| \quad (4.1)$$

gdzie: $w=[w_1, \dots, w_8]$ oznacza wektor wag poszczególnych czujników, a $v(t)$ oznacza prędkość obrotu kół robota, pochodna po prędkości opisuje przyspieszenie ruchu (bez znaczenia, czy dodatnie, czy ujemne).

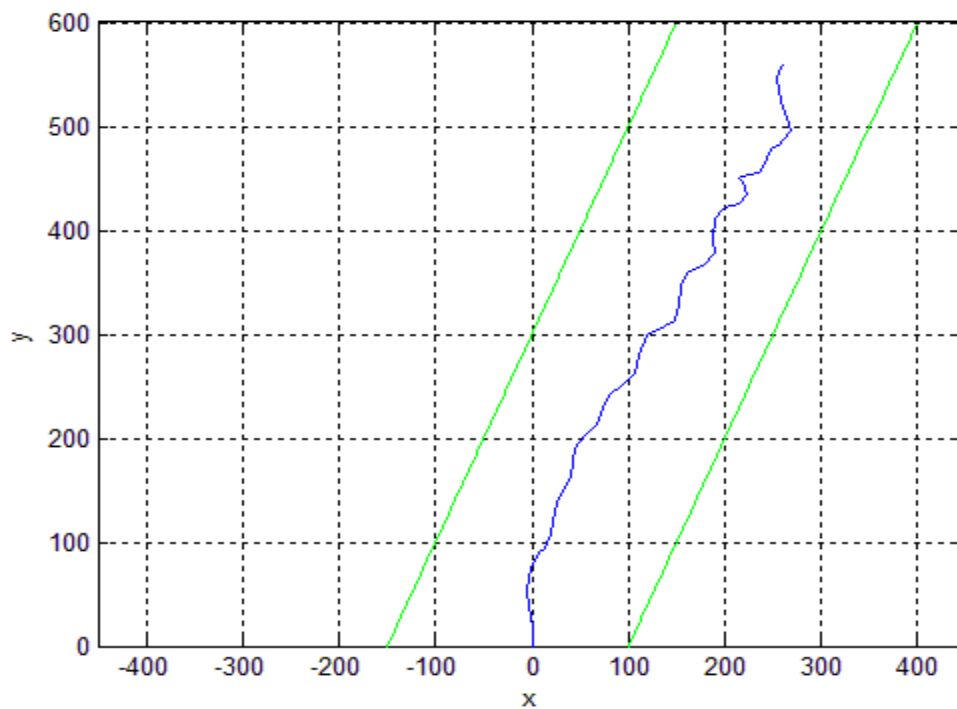
4.5. Badania eksperymentalne dla różnych konfiguracji czujników

W części eksperymentalnej prowadzono doświadczenia polegające na poruszaniu się robota Khepera III zgodnie z zaimplementowanym algorytmem Braintemberga zarówno bez podania jak i z podaniem punktu docelowego. Eksperymenty prowadzono dla różnej liczby aktywnych czujników oraz różnych wag poszczególnych czujników. Przeprowadzone eksperymenty miały potwierdzić poprawność przeprowadzonych rozważań teoretycznych na temat stabilności i sterowalności robota Khepera III jak również dać odpowiedź na pytanie, czy możliwe jest zmniejszenie liczby aktywnych czujników przy zachowaniu poprawnej realizacji postawionego zadania przez robot. Na rysunku 4.4. przedstawiono zdjęcie przykładowej

przestrzeni roboczej, natomiast na rysunku 4.5. zarejestrowaną trajektorię robota. Dla każdego eksperymentu zebrano w postaci tabelarycznej wyliczone wskaźniki jakości.



Rys. 4.4. Widok przestrzeni roboczej z prostym korytarzem ustawionym pod kątem



Rys. 4.5. Widok obszaru roboczego oraz trajektorii dla eksperymentu II.2.

5. Podsumowanie

W celu realizacji pracy przy współudziale autora została w pierwszej kolejności zbudowana biblioteka rozkazów w środowisku MATLAB umożliwiająca komunikację i sterowanie robotem mobilnym Khepera III. Biblioteka ta umożliwiła autorowi realizację dalszych części pracy. Należy tu zaznaczyć, że robot został zakupiony bez oprogramowania sterującego i musiało ono zostać zbudowane.

Po przygotowaniu oprogramowania sterującego dokonano szeregu badań testowych robota, umożliwiających m.in. sprawdzenie działania zainstalowanych czujników ultradźwiękowych i zbliżeniowych i interpretację ich sygnałów istotną dla realizacji algorytmów sterowania. Dla wykorzystywanych podczas poruszania się robota w przestrzeni roboczej czujników zbliżeniowych zaproponowano modele przedziałowe charakterystyk tych czujników biorąc pod uwagę różne zachowanie się tych czujników w zależności od rodzaju, koloru przeszkody a także oświetlenie panującego w pomieszczeniu. Do opisu charakterystyk czujników zaproponowano funkcje: progową, wykładniczą oraz Mittag-Lefflera. Po dokonaniu identyfikacji okazało się, że ta ostatnia funkcja najlepiej opisuje zachowanie się rozważanych czujników zbliżeniowych.

W następnej kolejności dokonano opisanie modelu kinematyki robota i na jego podstawie dokonano analizy fundamentalnych cech rozważanej klasy robotów: stabilności oraz sterowalności oraz ich zależności od wag czujników. Do analizy stabilności wykorzystano pierwszą i drugą metodę Lapunova.

Analizę sterowalności przeprowadzono w oparciu o znane wyniki dla układów liniowych. Sformułowano definicję sterowalności dla robota rozważanej klasy, wykazano że znany z teorii systemów liniowych warunek konieczny i dostateczny jest łatwy do spełnienia, natomiast w przypadku robota rozważanej klasy jest on tylko warunkiem koniecznym sterowalności. W związku z tym zaproponowano dodatkowy warunek dostateczny sterowalności dla robotów rozważanej klasy. W obu rozważanych przypadkach powiązано własność sterowalności z wagami sygnałów z czujników wykrywających przeszkody. Wnioski z analizy teoretycznej pokryły się z wynikami doświadczalnymi (przykładowo wyłączenie zbyt dużej liczby czujników prowadzi do utraty sterowalności przez robota).

Należy tu podkreślić, że autorowi pracy nie są znane wcześniejsze opracowania analizujące powiązanie sterowalności z pracą czujników robota.

Analiza zachowania robota wyłącznie w oparciu o model kinematyki okazała się dość znacznym uproszczeniem rzeczywistości. Podczas eksperymentów dostrzeżono zjawiska, których nie dało się wytłumaczyć wyłącznie z wykorzystaniem tego modelu kinematyki- jak np. „wężykowanie” przy niektórych próbach. Stąd też do rozważań dołączono model dynamiki. Na podstawie modelu dynamiki dokonano analizy stabilności rozważanego robota, której wyniki pokryły się z wynikami otrzymanymi na podstawie analizy modelu kinematyki.

Do oceny jakości realizacji zadań przez robota zaproponowano własne wskaźniki jakości, pozwalające 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 z punktu widzenia zużycia energii.

Z wykorzystaniem zbudowanego oprogramowania sterującego została utworzona w środowisku MATLAB/SIMULINK aplikacja umożliwiająca implementację algorytmu Braitenberga z możliwością ustawiania wag poszczególnych czujników, w tym w szczególności przez ustawienie wagi 0- dezaktywację poszczególnych czujników. Jako algorytmy sterowania w ramach wcześniejszych prac prowadzonych przez autora zaimplementowano między innymi algorytmy oparte o logikę rozmytą. Jako, że nie były one bezpośrednio powiązane z częścią eksperymentalną pracy, to ich krótki opis zamieszczono w Dodatku B. Zasadniczą częścią pracy była implementacja algorytmów bazujących w swoim ogólnym zarysie na idei pojazdu Braitenberga- pozwalających na stosunkowo prostą formalizację wiedzy i doświadczeń zdobytych przez autora pracy podczas badań rozważanego robota. Dzięki wykorzystaniu narzędzia MATLAB/SIMULINK możliwa była łatwa prezentacja i interpretacja otrzymanych podczas eksperymentów wyników.

Następnie wykonano szereg badań doświadczalnych dla różnych konfiguracji czujników zbliżeniowych mających potwierdzić wyniki teoretyczne. Na podstawie przeprowadzonych rozważań teoretycznych oraz licznych eksperymentów z wykorzystaniem robota mobilnego Khepera III można wyciągnąć wnioski, że do prawidłowego funkcjonowania holonomicznego robota mobilnego w większości typowych przestrzeni roboczych wystarcza liczba

4 czujników. Dotyczy to zwłaszcza przypadków, kiedy przeszkody znajdujące się w przestrzeni roboczej cechują się dobrą refleksyjnością dla promieniowania IR (są w kolorze drewna bądź białym). Przeprowadzone doświadczenia pokazały praktycznie zbędny charakter czujników znajdujących się z tyłu robota- nr 1 i 8. Robot Khepera III- z racji swojego holonomicznego charakteru- porusza się głównie do przodu, a w razie potrzeby może łatwo zmienić swoją orientację- stąd czujniki nr 1 i 8 praktycznie nie były wykorzystywane. W większości przeprowadzonych eksperymentów udawało się pomyślnie zrealizować postawione zadania testowe z wykorzystaniem 4 czujników- zwłaszcza dla przeszkód w kolorze białym i drewnianym. Konieczność ominięcia przeszkody w kolorze czarnym lub innej przeszkody silnie pochłaniającej promieniowanie podczerwone wymuszała włączenie dodatkowych czujników. W większości przykładów konieczne okazało się korzystanie z czujników najbardziej „czołowych”- tj. nr 4 i 5. Wspomagane były one przez parę symetrycznie rozmieszczonych czujników bocznych. W przypadku przeszkody prostokątnej lepsze efekty przynosiło uaktywnienie czujników znajdujących się bardziej z boku- tj. nr 2 i 7. Z kolei w przypadku przeszkód o okrągłych kształtach nieco lepsze efekty przynosiło skorzystanie z pary czujników znajdujących się bliżej czoła robot- tj. nr 3 i 6. W gotowym urządzeniu, jakim jest robot Khepera III (produkt szwajcarskiej firmy kTeam) niemożliwy okazał się do zmierzenia efektywny pobór energii przez poszczególne czujniki. Dostarczone oprogramowanie zawiera jedynie instrukcję zwracającą informację o stanie rozładowania akumulatora. Jednak informacja ma ta charakter zgrubny i służy głównie do informacji o konieczności wymiany akumulatora w przypadku spadku napięcia poniżej pewnego poziomu. Niemożliwe okazało się przy użyciu tej instrukcji określenie, na ile dezaktywacja poszczególnych czujników wpłynie na oszczędność energii. Natomiast bardzo pomocna okazała się zaproponowana przez autora funkcja kosztu wykorzystująca informację o przyspieszeniach poszczególnych kół. Przyspieszenia kół mają bezpośredni wpływ na energię spożytkowaną na napędy. Przy pomocy tej funkcji kosztu możliwe było wskazanie potencjalnie korzystniejszej konfiguracji czujników. Do rozważenia pozostaje kwestia wyboru czwórki czujników do aktywacji. Można by ewentualnie rozważyć rozwiązanie kombinowane. Np. w oparciu o kamerę umieszczoną ponad obszarem roboczym zanalizować przestrzeń, rozpoznać znajdujące się tam kształty i w zależności od tego uaktywnić odpowiedni zestaw czujników.

Na podstawie wyników badań należy stwierdzić, że konfiguracja sprzętowa robota mobilnego klasy „pojazd Braitenberga” umożliwiającą poprawną realizację trajektorii w nieznanym

otoczeniu z przeszkodami powinna zawierać: 4 czujniki umożliwiające wykrycie przeszkód, przy czym 2 winny być zlokalizowane z przodu robota oraz po jednym po bokach. Dotyczy to środowiska z przeszkodami w kolorach jasnych. Znajdujące się bowiem na wyposażeniu robota czujniki zbliżeniowe wykrywają przeszkody czarne stosunkowo późno. Większa ilość czujników w niektórych sytuacjach może nawet pogorszyć jakość ruchu w sensie założonych wskaźników jakości. Z tego względu zestaw 8 czujników, jakim dysponuje stosowany do testów robot Khepera III należy uznać za „nadmiarowy” w sensie realizowalności typowych zadań stawianych przed tym robotem i innymi urządzeniami podobnej klasy. Większa liczba czujników może natomiast okazać się niezbędna podczas innych zadań typu praca robota w zespole lub możliwość występowania ruchomych przeszkód w przestrzeni roboczej, czy też w przypadku występowania przeszkód w kolorze czarnym. W przypadku współpracy robota w grupie robotów może się okazać konieczne uwzględnienie pomiarów z czujników znajdujących się z tyłu robota- tj. nr 1 i 8- z uwagi na możliwość najechania „od tyłu” przez inny robot.

Drugim podstawowym czynnikiem decydującym o poprawności ruchu rozważanego robota w nieznanym otoczeniu jest poprawny dobór wag poszczególnych czujników. Wyniki eksperymentów pokazują, że ten sam zestaw 4 czujników, który zapewnia poprawną realizację zadania przy jednym zestawie wag, nie zapewnia poprawności realizacji zadania przy innych wagach. Skrajnym przykładem jest tutaj odpowiednio V i VI seria eksperymentów, które to różniły się między sobą tylko kolorem przeszkody. Zestaw wag czujników gwarantujący pomyślne wykonanie zadania dla przeszkody białej okazywał się bezużyteczny dla przeszkody czarnej. Podczas eksperymentów wagi te były dobierane „intuicyjnie”, natomiast dalsza analiza rozważanej tematyki musi objąć poszukiwanie metod analitycznych mogących wskazać rozwiązania optymalne z punktu widzenia przyjętego kryterium. Pomocna będzie tu na pewno zależność sterowalności od wag czujników, poruszona w podrozdziale 5.3.

Osobną kwestią jest też precyzyjna ocena uzyskiwanych w trakcie eksperymentów trajektorii. Przyjęto również ocenę za zasadzie „intuicyjnej”, przy czym jako warunek konieczny narzucono konieczność bezkolizyjnego dotarcia do wskazanego punktu docelowego bądź ominięcie przeszkody. Otwartą kwestią pozostaje stworzenie nowego, uniwersalnego wskaźnika jakości bazującego na zaproponowanych wskaźnikach, branych łącznie pod uwagę z odpowiednio dobranymi wagami.

Wyniki eksperymentów pokazują także, że jest także możliwa konfiguracja algorytmu sterowania umożliwiającego poprawną realizację zadania tylko przy dwóch aktywnych czujnikach, przy czym ten algorytm należy traktować jako „awaryjny” ze względu na jego nieefektywność w sensie przyjętych wskaźników jakości.

Podsumowując powyższe rozważania należy stwierdzić, że cel naukowy pracy został osiągnięty i odpowiedzi na pytania postawione w tezie pracy są następujące:

1. W przypadku rozważanego robota mobilnego klasy „pojazd Braitenberga” nie jest celowe zwiększanie liczby czujników umożliwiających obserwację otoczenia, gdyż większa ilość czujników nie zawsze ma dodatni wpływ na jakość realizacji postawionych zadań w sensie zadanych wskaźników jakości. Decydujące znaczenie dla poprawności ruchu robota w nieznanym otoczeniu z przeszkodami ma rozmieszczenie czujników i poprawny dobór wag sygnałów z tych czujników przy stałej liczbie czujników wynoszącej 4 dla większości typowych przeszkód w kolorach jasnych.

2. W przypadku przeszkód w kolorze czarnym konieczna okazuje się liczba 6 czujników, ponieważ znajdujące się na wyposażeniu robota Khepera III czujniki nie są w stanie dostatecznie wcześnie wykryć czarnej przeszkody.

3. Liczba czujników mniejsza od czterech także pozwala na „awaryjną” realizację założonej trajektorii ruchu, ale zadanie to wymaga innego algorytmu, niż przy użyciu 4 czujników. Niestety algorytm ten jest nieefektywny w sensie zużycia energii i czasu realizacji zadania.

4. Konstrukcja układu napędowego rozważanego robota mobilnego jest optymalna z punktu widzenia jego sterowalności. Zatem nie jest celowa jego rozbudowa o dodatkowe napędy, gdyż nie zwiększyłyby to jego możliwości ruchowych, a skomplikowałyby konstrukcję i sterowanie oraz zwiększyłyby masę i zużycie energii.

Wyniki badań zrealizowanych podczas przygotowania niniejszej rozprawy i przedstawione powyżej w żadnym wypadku nie wyczerpują rozważanej w pracy tematyki i można wskazać jeszcze wiele kierunków dalszych badań. Jako przykłady można tu podać:

Opracowanie formalnych metod dostrajania algorytmów sterowania rozważanym robotem, przy czym należałoby rozważyć w takiej sytuacji różne typy przeszkód omijanych przez robota. Dodatkowo w takim wypadku można próbować rozpoznać kształt przeszkody na podstawie sygnałów z czujników.

Należałoby też poświęcić więcej uwagi algorytmom „awaryjnym” realizowanym przy zmniejszonej liczbie aktywnych czujników z położeniem nacisku na ich realizację czasooptymalną, gdyż w szczególnych sytuacjach praktycznych (warunki bojowe) może to decydować o tym, czy urządzenie nie zostanie np. utracone.

Kolejnym interesującym tematem, który nie został w pracy poruszony, a jest wart rozważenia jest realizacja przez robota zadanej trajektorii w obecności aktywnych zakłóceń mających wpływ na działanie czujników. Takie zakłócenia mogą pochodzić np. od innego podobnego robota poruszającego się w tej samej przestrzeni roboczej i używającego czujników pracujących na tych samych częstotliwościach sygnałów.

Innym tematem nie rozważanym w pracy jest działanie robotów w zespole, gdyż wtedy istotne jest także wzajemne unikanie kolizji. W takiej sytuacji liczba czujników optymalna z punktu widzenia działania pojedynczego robota może się okazać niewystarczająca i tylne czujniki, określone podczas badań jako zbędne mogłyby okazać się konieczne np. do wykonania „uniku” przed innym pojazdem zbliżającym się z tyłu.