

Jacek Nowakowski*

Algorytmy sterowania robotem mobilnym w otoczeniu ruchomych przeszkód

1. Wprowadzenie

Zagadnienia sterowania robotami mobilnymi są od wielu lat przedmiotem badań prowadzonych w wielu ośrodkach. Praktyczne zastosowania robotów mobilnych w wielu dziedzinach wymagają ciągłego doskonalenia metod ich nawigacji. Podstawowymi zagadnieniami związanymi ze sterowaniem ruchem takich robotów jest wyznaczanie trajektorii w znanym otoczeniu. Przykładem robotów pracujących w znanym środowisku mogą być tzw. roboty samojezdne (SGV – *self guided vehicle*), które coraz częściej znajdują zastosowanie w praktyce przemysłowej do obsługi transportu wewnątrzzakładowego oraz systemów magazynowych. Ich działanie i sterowanie często jest włączone w skomputeryzowany system zarządzania produkcją. Roboty te poruszają się po zaprogramowanych trajektoriach i są wyposażone w układy czujnikowe zapewniające bezpieczne reagowanie na napotkane przeszkody, polegające najczęściej na zatrzymaniu robota i przekazaniu odpowiedniego sygnału do nadrzędnego systemu sterowania. Roboty mobilne muszą być wyposażone w systemy sensorów pozwalających na współdziałające z otoczeniem robota. Podstawowe układy sensoryczne robotów obejmują czujniki laserowe, ultradźwiękowe oraz systemy wizyjne. Różne konstrukcje robotów mobilnych są zaprezentowane między innymi w [21, 22, 36, 38, 40].

Sterowanie robotem jest możliwe wtedy, gdy robot jest zorientowany w swoim otoczeniu, czyli gdy system sterowania robota posiada informacje o położeniu przeszkód wokół niego oraz bieżącym położeniu i orientacji robota. Zasadniczym zadaniem wykonywanym przez moduł nawigacyjny układu sterowania robotem mobilnym jest generowanie mapy przestrzeni roboczej. Sytuacja taka ma miejsce nawet wtedy, gdy system sterujący dysponuje mapą otoczenia robota przygotowaną wcześniej. Zaletą takich systemów jest możliwość adaptowania strategii sterowania do warunków rzeczywistych, które mogą znacząco się różnić od wcześniej wczytanych danych. Lokalizacja robota może być określana w układzie bezwzględnym (B), np. pomieszczenia, ograniczonego obszaru lub dużego regionu, lub w układzie względnym (W), gdzie aktualne położenie robota jest określane względem

* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka, Wyższa Szkoła Humanistyczno-Ekonomiczna w Łodzi

ostatniej znanej lokalizacji, np. wyznaczonej w przebiegu poprzedniej iteracji układu sterującego robotem.

Lokalizacja robota może być dokonywana za pomocą:

- metody pomiarów odometrycznych (W),
- metod wykorzystujących GPS (*Global Positioning System*) (B),
- metod wizyjnych (B, W),
- metod probabilistycznych (B, W),
- metod bazujących na danych z sonarów (W),
- metod wykorzystujących dalmierze laserowe (W).

Na podstawie sygnałów z czujników umieszczonych na robocie jest generowana lub aktualizowana mapa przestrzeni roboczej. Wiele systemów dokonuje jednocześnie lokalizacji robota oraz tworzy mapę. Są one określane mianem SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) [24].

Znajomość pozycji robota i wzajemnego położenia przeszkód pozwala na sterowanie robotem wzdłuż określonej trajektorii ruchu robota zaplanowanej do dotarcia do założonego celu. Wiele algorytmów sterowania robotami opiera się na mapie otoczenia aktualizowanej na bieżąco [12, 27, 34, 36]. Pozwala to na realizację w sposób ciągły algorytmów sterowania robotem. W takiej sytuacji pojawienie się przeszkody na zaplanowanej trajektorii powoduje konieczność generowania nowej trajektorii do celu – jeśli jest to możliwe – w zmienionej konfiguracji przeszkód. Obecnie stosowane algorytmy sterowania robotem mobilnym uwzględniają zmienność środowiska robota, ale traktują przeszkody, które pojawiają się na trajektorii robota lub zostają z niej usunięte tak samo jak wszystkie pozostałe [14, 28, 29].

W niniejszym artykule zostanie przedstawiony sposób sterowania robotem mobilnym taki, by było możliwe manewrowanie robotem w otoczeniu ruchomych przeszkód.

W sytuacji pojawienia się na zaplanowanej ścieżce robota nowego, ruchomego obiektu, dotychczas stosowana strategia sterowania robotem mobilnym wymuszała poszukiwanie nowej trajektorii omijającej nową przeszkodę. W zależności od stopnia skomplikowania trasy i czasu generowania nowej trajektorii mogła zaistnieć potrzeba zatrzymania robota. W sytuacji ruchu przeszkody może się okazać, że odległość od robota do przeszkody jest na tyle duża, że robot poruszając się z określoną szybkością nie trafi na przeszkodę, która zostanie usunięta (odjedzie – jeśli to będzie pojazd lub inny robot). W takiej sytuacji nie ma potrzeby wyznaczania nowej trajektorii robota. Pojawienie się jednak ruchomej przeszkody musi zostać uwzględnione w zmodyfikowanym algorytmie sterowania robotem. Opracowanie nowego algorytmu sterowania robotem wiąże się z detekcją ruchu przeszkód w otoczeniu robota. Podstawowym zagadnieniem jest kwestia wykrywania ruchu przeszkód. Demonceaux i Kachi [18] przedstawili zagadnienie detekcji ruchu obiektów przy korzystaniu z obrazu pozyskanego tylko z jednej kamery. Autorzy analizowali sytuacje występujące w ruchu drogowym i przedstawili sposób detekcji ruchu przeszkód, praktycznie samochodów poruszających się przed kierowanym pojazdem. Wiele publikacji poświęconych procesowi identyfikacji ruchomych przeszkód dotyczy sytuacji spotykanych w ruchu drogowym. [9, 14, 19, 41]. Foggia [13] zaprezentował wstępne wyniki symulacji dotyczących

opracowania działającego w czasie rzeczywistym systemu rozpoznawania przeszkód i ruchomych obiektów (MOOD – *Moving Object and Obstacle Detection*). Podobne zagadnienie przedstawili Overett i Austin [17]. Sterowanie robotów mobilnych uwzględniające sygnały o otaczających robota przeszkodach pozyskane z różnych źródeł, takich jak skaner laserowy, system kamer, czujniki ultradźwiękowe były tematem wielu publikacji [4, 6, 11, 26, 30, 32, 33].

2. Systemy czujników w robotach

Popularne w konstrukcjach robotów mobilnych są czujniki ultradźwiękowe (sonary). Najczęściej robot mobilny jest wyposażony w zespół wielu – kilkunastu – czujników rozmieszczonych wokół robota. Wadą czujników ultradźwiękowych jest szeroki kąt działania oraz podatność na zakłócenia i interferencje odbitych sygnałów [4, 8, 16]. Popularnym obszarem zastosowania czujników ultradźwiękowych jest motoryzacja, gdzie coraz częściej są wykorzystywane jako czujniki ułatwiające parkowanie.

Niewątpliwie najpopularniejszymi systemami czujnikowymi w zastosowaniu do robotów mobilnych są dalmierze laserowe. Rozróżnia się trzy podstawowe typy dalmierzy laserowych [9, 14]. W pierwszym z nich odległość do przeszkody oblicza się na podstawie pomiaru czasu pomiędzy wysłaniem impulsu a chwilą powrotu wiązki odbitej. Zasada działania drugiego z typów dalmierzy polega na obliczeniu odległości do przeszkody na podstawie pomiaru różnicy fazy pomiędzy wiązką wysyłaną a powracającą. W trzecim typie dalmierzy laserowych, pomiar odległości polega na modulacji emitowanej wiązki sygnałem okresowym. Mierzona odległość jest proporcjonalna do różnicy częstotliwości sygnału nadawanego i odbieranego.

Dalmierze laserowe stanowią bazę do różnych konstrukcji skanerów laserowych, zarówno działających w płaszczyźnie, jak i skanerów 3D [3, 25, 33, 39]. Zbudowany w Instytucie Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn Politechniki Łódzkiej robot jest wyposażony w skaner płaski SICK LS200 oraz w opatentowaną oryginalną konstrukcję skanera przestrzennego zbudowanego w oparciu o dalmierz AccuRange 4000 [1]. Więcej szczegółów dotyczących zastosowanych w robocie systemów detekcji przeszkód (otoczenia) jest przedstawionych w [15, 28].

3. Metody nawigacji robotów mobilnych

Sterowanie robotów mobilnych w zasadniczym stopniu zależy od ich możliwości manewrowych. Z tego punktu widzenia różne konstrukcje robotów mobilnych można podzielić na roboty z więzami nieholonomicznymi i holonomicznymi. Możliwości manewrowe pierwszych z nich można porównać do konstrukcji samochodu, którego minimalny promień skrętu ma skończoną wartość. Roboty z drugiej grupy mają znacznie większe możliwości manewrowania, często mają niezależnie napędzane koła, co umożliwia im na przykład obracanie się w miejscu lub jazdę bokiem i inne skomplikowane manewry. Innym zagadnieniem związanym z konstrukcją robota mobilnego jest możliwość pokonywania przeszkód, na przykład poruszanie się po schodach lub przejeżdżanie przez leżące prze-

szkody. Podstawy teoretyczne zagadnienia planowania trajektorii robotów mobilnych zostały opisane w monografii [17] oraz w wielu publikacjach, m.in. w [2, 31, 37, 41].

W pracach [5, 6, 7, 31] i innych zaproponowano między innymi podział procedur planowania trajektorii na trzy poziomy. Jest to związane z szybkością przeprowadzanych obliczeń przez poszczególne moduły. Czas jednego cyklu obliczeń wynosi kilka do kilkadziesiąt sekund, a w przypadku robotów z więzami nieholonomicznymi nawet wielokrotnie dłużej. W pracy [31] w celu skrócenia czasu obliczeń więzy nieholonomiczne robota są pomijane w procesie planowania ścieżki. Dopiero drugi poziom – nawigator uwzględnia możliwości manewrowe robota. Wykorzystuje on metody lokalnego planowania trasy, dzięki czemu jego czas pracy jest krótki.

Znane i dotychczas stosowane metody planujące trajektorię ruchu, wykorzystywane przez generator ścieżki można zasadniczo podzielić na dwie kategorie [17]:

- 1) metody przeszukiwania grafu,
- 2) metody potencjalne.

Metody przeszukiwania grafu i niektóre z metod potencjalnych są metodami globalnymi, czyli biorą pod uwagę całą przestrzeń roboczą, natomiast podstawowe wersje metod potencjalnych są metodami lokalnymi, tzn. uwzględniają tylko przeszkody w bezpośrednim otoczeniu robota. Podstawową cechą rozróżniającą metody przeszukiwania grafu jest sposób tworzenia grafu. Wyróżniamy tu metody z grupy mapy dróg, podziału przestrzeni konfiguracyjnej oraz metody probabilistyczne.

Najczęściej spotykane metody przybliżonego podziału przestrzeni konfiguracyjnej to metody podziału równomiernego i podziału na poczwórne drzewo (*quadtree*). Przy metodzie podziału na poczwórne drzewo całą przestrzeń roboczą (zwykle kwadratową) dzieli się na cztery kwadratowe komórki. Sprawdza się następnie każdą z nich, czy jest pusta, cała zajęta przez przeszkody czy też mieszana (zawiera przeszkody i miejsca wolne). W przypadku komórek mieszanych ponawia się podział, w pozostałych przypadkach zaprzestaje się go. Podziały te dokonuje się zwykle do 6 lub 8 poziomu, tworząc drzewo, którego każdy wierzchołek jest wierzchołkiem przeszukiwanego grafu. Dzięki szybkim procedurom określania czy dwie komórki sąsiadują ze sobą można przyspieszyć proces planowania ścieżki [28].

Graf utworzony jedną z powyżej opisanych metod jest następnie przeszukiwany w celu znalezienia połączenia (najczęściej najkrótszego) pomiędzy wierzchołkami startu i celu. Podstawową jest tu metoda A^* , lecz stosowana jest jeszcze metoda *best first* oraz algorytm Dijkstry.

Inny sposób planowania ścieżki dla robota nie posiadającego więzów nieholonomicznych został przedstawiony w [39]. Określone zostały tam dwa punkty w obrysie robota i zostały utworzone metodą propagacji ośmiokierunkowej dwa pola potencjalne osobno dla każdego punktu. Utworzono graf, w którym krawędziami były jednostkowe przemieszczenia tych punktów, takie, że ich odległość była stała. Graf przeszukiwano metodą A^* z kosztem heurystycznym będącym kombinacją wartości pola potencjalnego dla obydwu punktów.

Bardzo obszerna analiza i porównanie metod planowania trajektorii robotów mobilnych zostały przedstawione w [28], gdzie również zaproponowano klasyfikację opisywanych metod.

W artykule zostały omówione wyniki badań nad sterowaniem robotem mobilnym przy wykorzystaniu metody planowania trajektorii polegającej na przeszukiwaniu grafu metodą A* z modyfikowaniem kosztu uwzględniającym położenie przeszkód i nadrzędne strategie sterowania robotem.

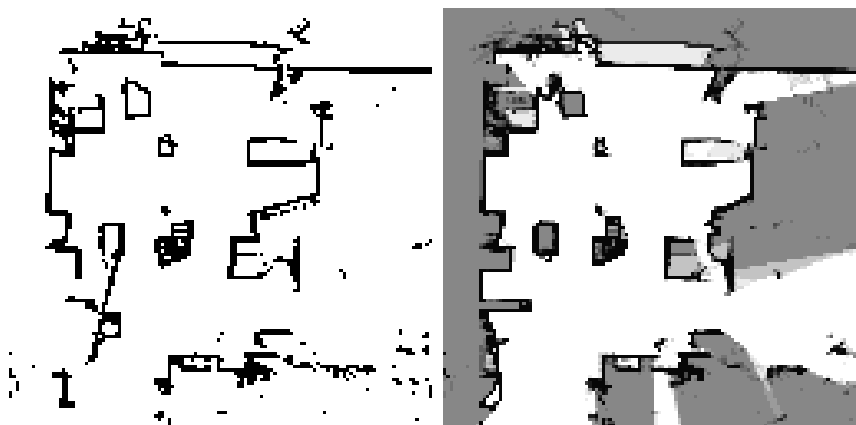
4. Konstrukcja robota wykorzystanego do badań

Opracowane teoretycznie i sprawdzone podczas symulacji komputerowych algorytmy sterowania robotem były weryfikowane doświadczalnie na trójkołowym robocie mobilnym. Robot ten został zbudowany w Instytucie Obrabiarek i TBM Politechniki Łódzkiej. Zasadniczym elementem konstrukcyjnym robota jest rama o wymiarach 1,3×0,8 m wykonana z lekkich profili aluminiowych. Tylne dwa koła robota nie są napędzane i obracają się swobodnie wokół osi prostopadłej do osi robota. Jedno koło przednie służy zarówno do napędu robota jak i zapewnia jego sterowanie. Mechanizm napędu robota jest oparty o silnik komutatorowy prądu stałego PZTK 10-08 z przekładnią ślimakową o przełożeniu 1:20, a obrót koła napędowego wokół osi pionowej jest napędzany również silnikiem prądu stałego PZTK 88-35 poprzez przekładnię ślimakową o przełożeniu 1:51. Konstrukcja robota i zastosowanego komputerowego układu sterowania zostały szerzej przedstawione między innymi w publikacjach [15, 28].

5. System sterowania robotem mobilnym

Dotychczas prowadzone badania w zakresie nawigacji robotów mobilnych pozwoliły na opracowanie i zweryfikowanie doświadczalnie systemu nawigacji robota mobilnego z więzami nieholonomicznymi (*car-like*) w dowolnie skomplikowanym środowisku. Robot porusza się autonomicznie znajdując drogę w otoczeniu przeszkód na podstawie mapy zapisanej w pamięci komputera sterującego robotem. Mapa ta jest zapisywana w systemie w postaci rastra o rozmiarze 128×128 punktów. Ze względu na rozmiary robota założono, że jeden punkt rastra mapy odpowiada kwadratowi obszaru roboczego o wymiarach 10×10 cm, przez co standardowa mapa pozwala na zapisanie otoczenia robota o powierzchni ponad 150 m². Mapa otoczenia robota może być wygenerowana w systemie komputerowym, lub być utworzona w wyniku „objechania” przez robota określonego pomieszczenia i odtworzenia mapy otoczenia na podstawie pomiarów rzeczywistych przeprowadzonych przez robota. Ze względu na system pomiaru odległości do przeszkód – skaner laserowy, możliwe jest tylko wyznaczenie położenia przedniej ściany przeszkody. Oczywiście jest, że w takiej sytuacji mapa przeszkód wykonana na podstawie pomiarów przeprowadzonych podczas jazdy uczącej robota może w pewnych fragmentach różnić się od mapy wygenerowanej komputerowo i od rzeczywistego otoczenia robota (nie będą oznaczone przeszkody w obszarach niedostępnych dla robota. Przykład mapy wygenerowanej podczas jazdy uczącej robota – z zaznaczeniem obszarów niedostępnych (ciemnych) przedstawia rysunek 1. Dotychczas opracowane algorytmy sterowania robotem w ograniczonym stopniu mogły uwzględnić zmienność środowiska robota. W sytuacji pojawienia się na wyznaczonej trajektorii robota nowej przeszkody następowało zatrzymanie robota, system poszuki-

wał nowej ścieżki do celu omijającej napotkaną przeszkodę. Jeśli istniała inna droga do celu omijająca przeszkodę robot poruszał się tą ścieżką. W przeciwnym wypadku robot pozostawał w miejscu. W praktyce przestój robota trwał nie dłużej niż 3,5 sekundy. W sytuacji pojawienia się na zaplanowanej ścieżce ruchomej przeszkody, np. innego robota, pojazdu, przechodzącej osoby może się zdarzyć, że w chwili, gdy robot dojedzie do miejsca, gdzie wykryto nową przeszkodę już jej tam nie będzie i nie będzie ona miała wpływu na sterowanie robotem. W sytuacji pojawienia się przeszkody w bezpośrednim sąsiedztwie robota powinien on być tak sterowany, by uniknąć kolizji, uwzględniając jednocześnie ruch przeszkody i możliwość jej usunięcia się z zaplanowanej trajektorii robota. Dotychczasowe doświadczenia w pracach nad sterowaniem robotami mobilnymi oraz analiza dostępnej literatury dotyczącej tego zagadnienia pozwoliły na opracowanie systemu sterowania robotem mobilnym w zmieniającym się otoczeniu z uwzględnieniem ruchu przeszkód, mającym wpływ na strategię sterowania robotem. Opracowany algorytm, będący zmodyfikowaną wersją algorytmu A* pozwala na uwzględnienie następujących parametrów, które mają zarówno wpływ na szybkość działania algorytmu, jak i w pewnym zakresie na wybór trajektorii.



Rys. 1. Przykładowe mapy pomieszczeń, wygenerowane przez skaner robota

Parametry te dotyczą:

- liczby rozróżnialnych położenia kątowych robota,
- unikania lub zalecania wykonywania drobnych skrętów przez robota,
- unikania lub zalecania wykonywania nawrotów przez robota,
- unikania lub zalecania jazdy tyłem przez robota,
- unikania lub zalecania przejazdów przez wąskie przejścia blisko przeszkód (margines bezpieczeństwa).

Odpowiedni dobór parametrów algorytmu może np. praktycznie całkowicie wyeliminować poruszanie się robota do tyłu.

Sterowanie robotem mobilnym jest realizowane dwuetapowo. Robot w celu orientacji w swoim położeniu korzysta z mapy otoczenia. Mapa jest przedstawiana w postaci graficz-

nej i przedstawia przeszkody znajdujące się w pomieszczeniu, po którym porusza się robot, np. hala technologiczna. Przykładowe mapy pomieszczeń są pokazane na rysunku 1. Przyjęto, że jeden piksel na rysunku odpowiada rzeczywistej odległości 10 cm. Dla robota o wymiarach 1,3×0,8 m taka rozdzielczość jest wystarczająca.

Zanim robot będzie mógł się samodzielnie poruszać w laboratorium musi mieć wczytaną do systemu mapę pomieszczenia. Zazwyczaj uproszczona wersja mapy otoczenia jest przygotowywana na podstawie wyników rzeczywistych pomiarów pomieszczenia przy pomocy edytora graficznego. Stanowi to podstawę do wykonania rzeczywistej mapy otoczenia robota. W tym celu robot musi „objechać” pomieszczenie i wygenerować mapę – skorygować mapę przygotowaną w pliku graficznym. Aby to osiągnąć robot może być sterowany ręcznie z klawiatury komputera, lub można wprowadzić takie położenie celu, o którym wiadomo, że robot może do niego dojechać.

System sterowania robotem mobilnym wykorzystujący skaner laserowy został opracowany we współpracy z Instytutem Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn.

System ten został sprawdzony i zweryfikowany doświadczalnie. Składa się z kilku modułów, ściśle ze sobą współpracujących. System nawigacji robota mobilnego realizuje następujące założenia:

- trajektoria ruchu robota uwzględnia więzy nieholonomiczne robota,
- wyznaczona trajektoria spełnia założone kryteria optymalności,
- system nawigacji działa w dowolnie skomplikowanej przestrzeni roboczej,
- czas planowania ścieżki jest stosunkowo niski.



Rys. 2. Przykładowe efekty działania systemu nawigacji robota w środowisku z przeszkodami statycznymi
Objaśnienia w tekście

Na rysunku 2 zostały przedstawione przykładowe przypadki wyznaczania trajektorii ruchu robota. Na lewej części rysunku jest pokazane położenie celu (symbol robota w prawej części rysunku), którego robot nie może osiągnąć. Wyznaczenie trajektorii do celu pokazanego na prawym rysunku, obejmującego 70 konfiguracji pośrednich, zajęło 4 sekundy.

Zgodnie z założeniami system sterowania robotem mobilnym ma uwzględniać ruch przeszkód. W związku z tym został opracowany nowy algorytm sterowania robotem uwzględniający aktualne położenie przeszkód i ich zmiany w czasie. Ruch przeszkód został zasymulowany przez uzupełnienie informacji o przeszkodzie przez parametr określający czas zajmowania określonego piksela w mapie otoczenia robota przez przeszkodę. Mapa otoczenia jest przedstawiana w postaci rastrowej, ruch przeszkód jest symulowany przez zmianę stanu zajętości poszczególnych pikseli mapy. Rysunek 3 przedstawia przykład wyznaczania trajektorii dla robota w przykładowym otoczeniu, w którym zasymulowano dwie ruchome przeszkody wyróżnione kółkiem i oznaczone na rysunku 4 kolorem szarym. Przeszkody te poruszają się w kierunku wyznaczonej trajektorii robota tak, że obie przeszkody przetną wyznaczoną trasę przejazdu robota.



Rys. 3. Przykład nawigacji robota w środowisku z ruchomymi przeszkodami
Objaśnienia w tekście



Rys. 4. Przykład nawigacji robota w środowisku z ruchomymi przeszkodami
Objaśnienia w tekście

Fazy zbliżania się przeszkód do trasy przedstawia rysunek 4. Zbliżająca się górna przeszkoda poruszająca się pionowo w dół powoduje zmianę trajektorii robota, gdyż przy założonej szybkości poruszania się robota i przeszkody w określonym kierunku dojdzie do kolizji. Wynik poszukiwania trajektorii pozwalającej na uniknięcie kolizji przedstawia rysunek 5. Jak widać na rysunku, przeszkoda znajdująca się w dolnej części mapy nie powoduje kolizji, gdyż jej parametry ruchu pozwolą na uniknięcie kolizji z robotem, przez co trajektoria robota nie zostaje zmieniona. Trajektoria bezkolizyjna składa się z 87 kroków. Czas wyznaczenia tej trajektorii pozwalającej na uniknięcie kolizji z dwiema ruchomymi przeszkodami nie przekroczył 4 sekund.



Rys. 5. Przykład nawigacji robota w środowisku z ruchomymi przeszkodami i ze zmianą trasy wynikającą z omijania ruchomej przeszkody

6. Podsumowanie i wnioski końcowe

Przedstawione w niniejszym artykule wyniki działania systemu nawigacji robota w zmieniającym się środowisku, w którym występują ruchome przeszkody pokazują, że algorytm działa prawidłowo w sytuacji symulowanego poruszania się przeszkód w otoczeniu robota. Dalszym zagadnieniem do rozwiązania jest kwestia sterowania robotem w sytuacji wykrycia przez układ sensorów robota ruchomej przeszkody w jego pobliżu. Przeprowadzone na symulatorze komputerowym testy pokazały, że wydłużenie czasu poszukiwania trajektorii może nie mieć praktycznego znaczenia i nie stanowi groźby dla systemu nawigacji robota. Zasygnalizowany powyżej problem detekcji ruchu przeszkód w bliskim sąsiedztwie robota stanowi ciekawy przyczynek do dalszych badań nad tym zagadnieniem. Prowadzone są również badania nad wykorzystaniem systemu stereowizyjnego służącego do rozpoznawania i wyznaczania parametrów ruchu przeszkód w otoczeniu robota.

Badania stanowiące podstawę niniejszej publikacji były realizowane w ramach grantu MNiI w latach 2004–2006.

Literatura

- [1] *AR4000 Manual*; Acuity Research Inc.; r. 1999
- [2] Angelloni A., Leo T., Longhi S., Zulli R.: *Real time collision avoidance for mobile robots*. 6th Symposium on Measurement and Control in Robotics, Brussels 1996
- [3] Bergh C.F., Kennedy B.A., Matthies L.H., Johnson A.E.: *A compact, low power two-axis scanning laser rangefinder for mobile robots*. Seventh Mechatronics Forum International Conference, Atlanta 2000
- [4] Block D., Brennan S., Bullo F., Cortes J., Robinson C.: *Nonsmooth analysis and sonar-based implementation of distributed coordination algorithms*. Proceedings of the 2004 IEEE Conf. Robotics and Automation, New Orleans 2004, 3000–3005
- [5] Bogaert M., Do S. And Al.: *Local navigation for a class of outdoor robots*. Proceedings of the ESPRIT Conference Week, Brussels, Belgium, 1990
- [6] Bonci A., Leo T., Longhi S.: *Ultrasonic and Video Data Fusion for Mobile Robot Navigation*. Proceedings of the 10th Mediterranean Conference on Control and Automation – MED2002, Lisbon, Portugal
- [7] Bouffouix S., Bogaert M., Do S.: *A real-time obstacle avoidance algorithm for teleoperated vehicles*. 1st IFAC International Workshop on Intelligent Autonomous Vehicles, Southampton, 1993, 264–275
- [8] Bozma O., Kuc R.: *Building a Sonar Map in a Specular Environment Using a Single Mobile Sensor*. Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 1260–1269
- [9] Broggi A., Caraffi C., Porta P., Zani P.: *The Single Frame Stereo Vision System for Reliable Obstacle Detection used during the 2005 DARPA Grand Challenge on TerraMax™*. Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Toronto, 2006, 745–752
- [10] Cyganek B.: *Komputerowe Przetwarzanie obrazów trójwymiarowych*. Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT 2002
- [11] Demonceaux C., Kachi-Akkouche D.: *Robust Obstacle Detection with Monocular Vision Based on Motion Analysis*. 2004 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, University of Parma, Parma, 2004, 527–532
- [12] Fatemi A., Lecocq H.: *Mobile robot navigation in an unknown environment*. Measurement and Control in Robotics, 1996
- [13] Faugeras O., Hotz B., Matthieu H., Vieville T., Zhang Z., Fua P., Theron E., Moll L., Berry G., Vuillemin J., Bertin P., Proy C.: *Real Time Correlation- Based Stereo: Algorithm, Implementations and Applications*. INRIA Technical Report, 1993, 2013
- [14] Hu Z., Uchimura K.: *Motion Detection from a Moving Observer Using Pure Feature Matching*. Publication of Department of Computer Science. Faculty of Engineering, Kumamoto University
- [15] Idzikowski M.: *Laserowy system nawigacyjny robotów mobilnych*. Politechnika Łódzka, 2005 (praca doktorska)
- [16] Kondo K.: *Motion planning with six degrees of freedom by multistrategic bidirectional Heuristic free-space enumeration*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 7, No. 3, 1991, 267–277
- [17] Krishna K., Kalra P.: *Detection, Tracking and Avoidance of Multiple Dynamic Objects*. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 33: Kluwer Academic Publishers, 2002, 371–408
- [18] Latombe J.C.: *Robot Motion Planning*. Kluwer Academic Publishers, 1991
- [19] Lefaix G., Marchand E., Bouthemy P.: *Motion-based Obstacle Detection and Tracking for Car Driving Assistance*. IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition, ICPR'2002, vol. 4, 74–77
- [20] Malotau E., Falkenauer E., van Muysewinkel A.: *The motion planning problem: from global to local*. ISATA 1994, LEAN/AGILE Manufacturing in the Automotive industries, Aachen

- [21] Matthies L., Xiong Y., Hogg R., Zhu D., Rankin A., Kennedy B.: *A Portable, Autonomous, Urban Reconnaissance Robot*. International Conference on Intelligent Autonomous Systems, Venice 2001
- [22] Murray D. Little J.: *Using real-time stereo vision for mobile robot navigation*. Autonomous Robots, vol. 8, Issue 2, 2000, 161–171
- [23] Newman P.M., Bosse M., Leonard J.: *Autonomous feature-based exploration*. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 1, 2003, 1234–1240
- [24] Newman P. M., Durrant-Whyte H. F.: *A New Solution to the simultaneous localisation and map building (SLAM) problem – the GPF*, 2000
- [25] Nowakowski J., Kaczorowski D.: *3D Flow reconstruction and visualization by use of ultrasound tomography*. Proceedings of 4th World Congress on Industrial Process Tomography Aizu 2005, 2005, 492–495
- [26] Okada R., Tanoguchi Y., Furukawa K., Onoguchi K.: *Obstacle Detection Using Projective Invariant and Vanishing Lines*. Tech. Report, Multimedia Laboratory, Corporate Research & Development Center, Toshiba Corporation
- [27] Pfister S.T., Roumeliotis S.I., Burdick J.W.: *Weighted Line Fitting Algorithms for mobile robot map building and efficient data representation*. ICRA'03, 2003
- [28] Podsekowski L.: *Dynamiczne planowanie trajektorii robotów mobilnych w zmiennej przestrzeni roboczej*. Zeszyty Naukowe PŁ, nr 809, 1999
- [29] Podsekowski L., Kwapisz L., Idzikowski M., Vizvary I.: *Sterownik ruchu robota mobilnego dla częściowo znanej przestrzeni roboczej*. PAR XII'00, 2000
- [30] Rennekamp T., Homeier K., Kroeger T.: *Distributed Sensing and Prediction of Obstacle Motions for Mobile Robot Motion Planning*. Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, 2006
- [31] Sekhavat S., Švestka P., Laumond J.-P., Overmars M.H.: *Multilevel Path Planning for Nonholonomic Robots Using Semiholonomic Subsystems*. The International Journal of Robotics Research, vol. 17, No. 8, August 1998, 840–857
- [32] Skrzypczyński P., Drapikowski P.: *Environment modelling in a multi-agent mobile system*. EUROBOT'99, 1999
- [33] Stamos I., Allen P.K.: *Integration of range and image sensing for photorealistic 3D modeling*. ICRA'00, 2000
- [34] Thrapp R., Westbrook C., Subramanian D.: *Robust localization algorithms for an autonomous campus tour guide*. 2001
- [35] Thrun S., Gutmann J.S., Fox D., Burgard W., Kuipers B.J.: *Integrating Topological and Metric Maps for Mobile Robot Navigation: a statistical approach*. AAAI'98, 1998
- [36] Tomoaki Y., Akihisa O., Shin'ichi Y.: *Braille Block Detection for Autonomous Mobile Robot Navigation*. Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems
- [37] Wang D., Hamam Y.: *Optimal Trajectory Planning of manipulators with collision detection and avoidance*. The International Journal of Robotics Research, vol. 11, No. 5, October 1992, 460–468
- [38] Williamson T., Thorpe C.: *A trinocular stereo system for highway obstacle detection*. International Conference on Robotics and Automation (ICRA'99) 1999
- [39] Zelinsky A.: *Using Path Transform to Guide The Search for Findpath in 2D*. The International Journal of Robotics Research, vol. 13, No. 4, 1994
- [40] Zhang Q., Pless R.: *Constraints for Heterogeneous Sensor Auto-Calibration*. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, 2004, 38
- [41] Zhigang Z.: *On Environment Modelling for Visual Navigation*. Tsinghua University 1997 (PhD Dissertation)