

*dr hab. inż. Leszek Podśędkowski*  
*prof. dr inż. Leszek Kwapisz*  
*mgr inż. Marek Idzikowski*  
*mgr Istvan Vizvary*  
*Instytut Obrabiarek i TBM*  
*Politechniki Łódzkiej.*

## **Sterownik ruchu robota mobilnego dla częściowo znanej przestrzeni roboczej – metoda identyfikacji przeszkód i określania położenia robota.**

W artykule zawarto opis systemu sterowania robotem mobilnym. System ten składa się z czterech modułów: Interfejs użytkownika, Generator trajektorii, Pilot i Skaner. Skaner jest odpowiedzialny za obróbkę danych ze skanera laserowego i za dokładne określenie położenia robota i otaczających go przeszkód. Operuje on na dwóch typach danych opisujących przestrzeń roboczą: mapie rastrowej i mapie wektorowej prostych odcinków ścian. Mapa wektorowa umożliwia znalezienie położenia robota a mapa rastrowa zawiera informacje o istniejących przeszkodach i jest wykorzystywana przez generator trajektorii. Artykuł przedstawia wcześniej nie opisane algorytmy jak i wyniki badań doświadczalnych na rzeczywistym robocie. W artykule przedstawiono również plan dalszych badań w zakresie obróbki danych z czujników laserowych.

### **1. Wprowadzenie**

Podstawowym problemem nawigacji robotów mobilnych jest znalezienie ich położenia i orientacji w przestrzeni roboczej. Proces ten powinien być szybki i niezawodny, tak aby system sterujący mógł realizować zaprogramowaną trajektorię. Istnieje kilka sposobów określania położenia robota:

- **Pomiary odometryczne.**  
Metoda ta nie wykorzystuje żadnych zewnętrznych obiektów referencyjnych. Informacje o przemieszczeniach uzyskuje się zliczając obroty np. koła napędowego. Podstawowym jej mankamentem jest mała dokładność oraz fakt iż, błąd rośnie wraz z czasem pomiaru. Ze względu na szybkość pomiaru, metoda ta jest używana do wstępnej oceny przemieszczeń.
- **Boje nawigacyjne.**  
System określania położenia robota mobilnego oparty na bojach nawigacyjnych jest precyzyjny i niezawodny. Pozycja robota mobilnego określana jest na podstawie pomiarów odległości do kilku charakterystycznych obiektów jednocześnie. Ich dobór i rozmieszczenie musi być tak dobrane, aby w każdym punkcie przestrzeni roboczej były widoczne przynajmniej trzy boje. Stosowanie tej metody jest ograniczone do znanej przestrzeni roboczej.
- **Nawigacja sensoryczna.**  
Metoda ta polega na budowie mapy przestrzeni roboczej i porównaniu jej z mapą wzorcową. Na podstawie pomiaru wzajemnego przemieszczenia się rozpoznanych obiektów obliczane jest aktualne położenie robota. Mapa wzorcową może być wcześniej zaprogramowana lub tworzona przez system nawigacyjny na bieżąco po uruchomieniu. W pierwszym przypadku mamy do czynienia z częściowo znaną przestrzenią roboczą.

Metoda ta jest bardziej elastyczna w stosunku do poprzedniej. Łatwiej jest rozszerzyć lub zmienić obszar roboczy. Wymaga natomiast przetworzenia większej ilości informacji.

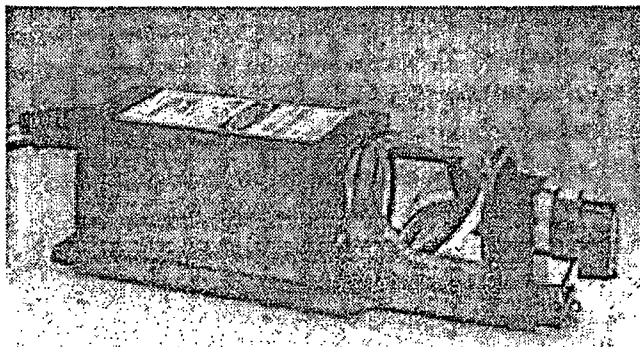
- Inne metody.

Przykładem może być wykorzystanie Global Positioning System (GPS). Jest to niezwykle prosty sposób ograniczony jednak cechami tego systemu. Mianowicie, w przestrzeni zurbanizowanej, w pobliżu wysokich budynków nie można uzyskać dokładnych pomiarów, a we wnętrzu jest to praktycznie niemożliwe.

W zależności od rodzaju planowanej przestrzeni roboczej stosowane są różne czujniki. Najbardziej rozpowszechnione są sensory ultradźwiękowe i dalmierze laserowe. Można też spotkać czujniki radarowe i coraz częściej spotykane kamery wizyjne. Ich rosnącą popularność zawdzięczać należy powszechnie dostępnym komputerom o dużej mocy obliczeń. Do zastosowań wewnątrz budynków najlepszym rozwiązaniem wydają się być czujniki optyczne. Według nas na szczególną uwagę zasługują dalmierze laserowe (ang. laser range finder). Czas pomiaru jest praktycznie pomijalnie krótki a informacja uzyskana z czujnika może być wykorzystana bez dodatkowej obróbki. Opracowywany w naszym zespole system nawigacyjny przeznaczony jest do pojazdów poruszających się w budynkach, dlatego też zdecydowaliśmy się na dalmierz laserowy AccuRange 4000.

## 2. Czujnik.

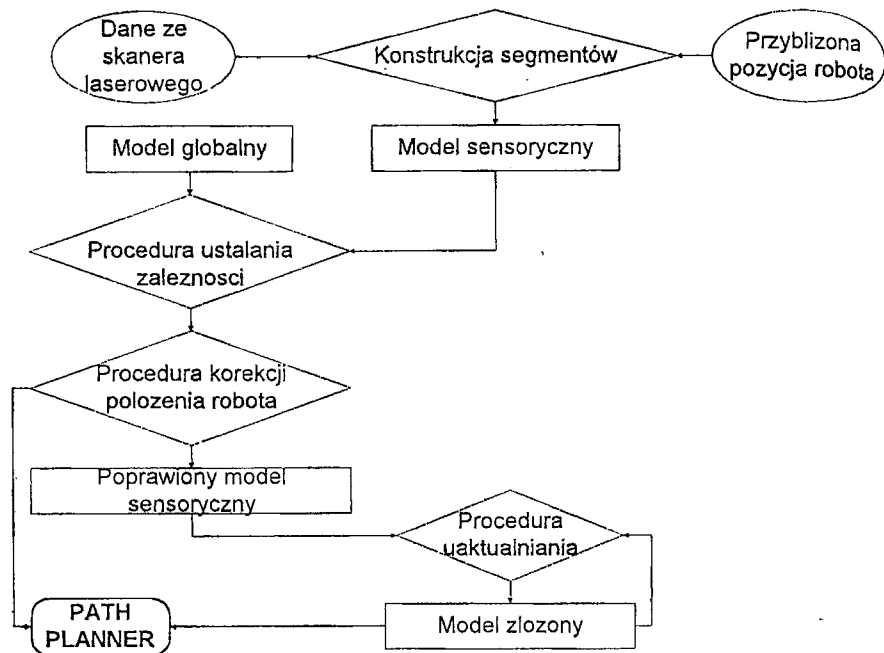
Do zbierania informacji o stanie przestrzeni roboczej użyty został dalmierz laserowy AccuRange 4000 przedstawiony na rys. 1. Pomiar odległości może być wykonany tylko w osi optycznej przyrządu. Do odchyłania wiązki lasera zastosowano obrotowe lustro co daje możliwość skanowania dookólnego. Urządzenie to charakteryzuje się wysokimi parametrami. Zasięg urządzenia wynosi około 15,5 m (52 stopy), dokładność pomiaru 2,54 mm (0,1 cala). Skaner pracuje z maksymalną częstotliwością 50kHz. Umożliwia to pracę systemu z wysokimi częstotliwościami odświeżania, przy zachowaniu wysokiej rozdzielczości kątowej.



Rys. 1. Dalmierz laserowy z lustrem.

## 3. Moduł nawigacyjny.

Sposób określania położenia robota opiera się na założeniu istnienia płaskich (prostych) fragmentów ścian. Schemat działania modułu przedstawiony jest na rys. 2. Informacje o otoczeniu przechowywane są w dwóch mapach. Pierwsza z nich to mapa rastrowa używana



Rys. 2. Schemat działania modułu nawigacyjnego.

przez moduł planowania trajektorii. Druga, wektorowa, służy do określania położenia i orientacji robota mobilnego.

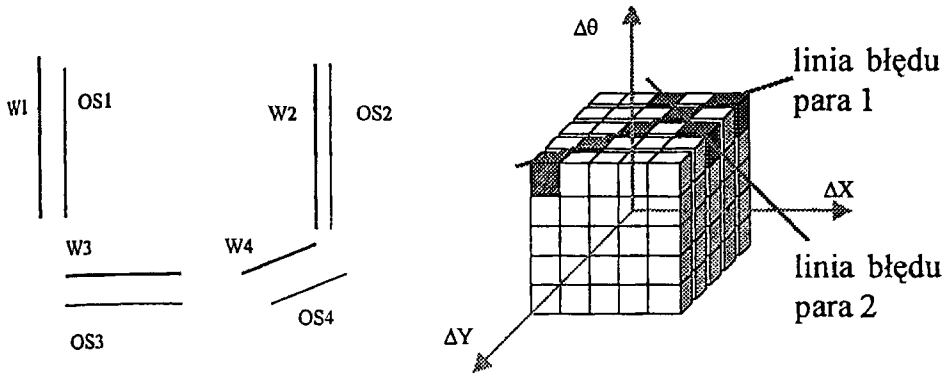
Z pomiarów odometrycznych otrzymujemy przemieszczenie robota w stosunku do poprzedniego cyklu. Na tej podstawie obliczamy aktualne położenie i orientację robota. Zakładamy, że obliczenia te są obarczone pewnym błędem oraz, że błąd ten nie może przekroczyć pewnych wartości. Ponieważ używane są trzy współrzędne do opisu położenia robota, wszystkie możliwe kombinacje błędów  $X$ ,  $Y$  i  $\Theta$  tworzą przestrzeń trójwymiarową zwaną przestrzenią błędów.

Do obliczenia korekty położenia wykorzystywane są informacje z mapy wektorowej otoczenia: „ściany na mapie” oraz dane z aktualnego skanu. Na podstawie danych ze skanera wychwytuje się serie punktów pomiarowych tworzących odcinki proste: „obserwowane segmenty”. Następnie na podstawie przybliżonego położenia robota ściany na mapie i obserwowane segmenty łączone są w pary. Każda taka para ma przypisaną wagę zależną od wagi ściany i długości segmentu obserwowanego oraz od ilości ścian z którymi dany segment tworzy pary.

Na podstawie jednej pary możemy określić jedynie korektę w kierunku prostopadłym do kierunku obserwowanego segmentu. Graficzną tego reprezentacją jest linia prosta w przestrzeni błędów (Rys. 3.) zwaną prostą błędów.

W celu obliczenia dokładnej wartości błędów przestrzeń błędów jest dzielona na podzakresy tworząc macierz trójwymiarową. Następnie, wagi odpowiadające każdemu z podzakresów są zwiększane o wagi tych par, których proste błędów przechodzą przez dany podzakres. Podzakres, który uzyskał najwyższą wagę przyjmowany jest za przybliżoną korektę położenia robota. Do obliczenia dokładnej korekty uwzględniane są jedynie te pary „obserwowany segment – ściana na mapie”, których wagi złożyły się na wagę wybranego podzakresu. Różnice kątów w parach „obserwowany segment – ściana na mapie” są podstawą do obliczenia ostatecznej korekty orientacji robota. Następnie obliczana jest dokładna wartość

korekty przemieszczenia. Wartość korekty oblicza się metodą sumy najmniejszych kwadratów jako punkt leżący najbliżej wszystkich linii przedstawiających różnicę położenia elementów w parach.



Rys. 3. Znalezione pary „obserwowany segment (OS) – ściana na mapie (W)” oraz przestrzeni błędów.

Po obliczeniu pozycji robota system aktualizuje mapy. Procedura ta składa się z kilku faz:

- Modyfikacja danych ścian, które zostały uwzględnione w parach „obserwowany segment – ściana na mapie”.

Parametry segmentów, którym odpowiadała tylko jedna ściana są wykorzystywane do korekty parametrów ścian, z wyjątkiem oznaczonych jako niezmiennie. Im mniejszy jest współczynnik pewności ściany tym większy jest wpływ obserwowanego segmentu.

- Tworzenie nowych ścian.

Jeśli obserwowany segment nie miał swojego odpowiednika na mapie ścian to jest tworzona nowa ściana. Jej parametry (położenie i długość) są identyczne z parametrami obserwowanego segmentu. Stopień pewności takiej ściany jest ustalany na niskim poziomie.

- Określenie obszaru wolnego od przeszkód.

Na podstawie położenia i długości segmentów określany jest obszar skanowania wolny od przeszkód.

- Usunięcie zbędnych ścian.

Jeżeli ściana znajduje się w skanowanym obszarze i nie ma potwierdzenia w postaci obserwowanego segmentu jej stopień pewności jest obniżany. Jeżeli spadnie on poniżej wartości progowej to ściana jest usuwana.

Następnie uaktualniana jest mapa przeszkód. Poziom pewności komórek, w których obserwowano przeszkody jest podnoszony. Jeżeli są obserwowane po raz pierwszy to system umieszcza je na mapie przeszkód. Jeżeli cela na mapie przeszkód jest oznaczona jako zajęta i znajduje się w obszarze wolnym od przeszkód to jej stopień pewności jest obniżany i gdy spadnie poniżej progu to cela jest oznaczana jako wolna.

Po uaktualnieniu pozycji robota oraz map moduł nawigacyjny jest gotowy do obróbki danych z następnego cyklu.

#### 4. Rozpoznanie przestrzeni roboczej.

Ze względu na przyjęty algorytm konieczne jest zdefiniowanie mapy wzorcowej (model globalny) aby umożliwić nawigację. Można to przeprowadzić na kilka sposobów. Pierwszy z nich polega na wprowadzeniu danych o istotnych przeszkodach takich jak np. ściany pomieszczeń z dokumentacji. Ściany na mapie ścian zdefiniowanej w ten sposób powinny

posiadać maksymalny i niezmienny stopień pewności. Następnie system buduje na tej podstawie bitową mapę przeszkód. Metoda ta daje najlepszą dokładność tworzonej mapy, zakładając, że budynek został wykonany zgodnie z planem.

Drugi sposób polega na tym, że robot tworzy samodzielnie mapę ścian i przeszkód. W pozycji początkowej, tak dobranej aby widoczna była jak największa ilość płaskich fragmentów ścian, robot wykonuje serię pomiarów. Następnie przemieszcza się o niewielki dystans zatrzymując się i wykonuje następną serię pomiarów. Taka procedura pozwala na precyzyjne utworzenie mapy ścian, a na jej podstawie mapy przeszkód.

Ostatnia z metod jest podobna do poprzedniej. Robot z pozycji początkowej zaczyna przemieszczać się i dokonuje pomiarów bez zatrzymywania się. W wyniku powstaje mapa ścian o nieco gorszej dokładności niż w metodzie z wymuszonym zatrzymaniem.

W naszym laboratorium wykorzystaliśmy i przetestowaliśmy drugą z metod. Podczas nawigacji przy tak stworzonej mapie ścian pomiary położenia robota były stabilne a dokładność określenia położenia nie przekraczała 10 mm.



Rys. 4. Ogólny widok laboratorium (przestrzeni roboczej).

## 5. Testy laboratoryjne.

Opisywany system został przetestowany na zbudowanym w naszym Instytucie robocie mobilnym. Na zdjęciu (Rys. 4.) przedstawiony jest ogólny widok laboratorium. Widoczne są osłony zapewniające bezkolizyjną jazdę w związku z płaskim systemem identyfikacji przeszkód. Reprezentację przestrzeni roboczej w postaci mapy przeszkód i mapy ścian przedstawia Rys. 5. W tak złożonym środowisku robot poruszał się sprawnie, co dowodzi stabilności pomiarów położenia. Dokładność określenia położenia nie przekraczała 10 mm. Biorąc pod uwagę że jest ona wynikiem działania całego systemu sterowania oraz wielkość celi mapy rastrowej 100 mm należy uznać ją za wysoką.



Rys. 5. Wektorowa mapa ścian i rastrowa mapa przeszkód.

## 6. Dalsze badania.

System nawigacji pracujący w jednej płaszczyźnie jest w pełni wystarczający do dokładnego znalezienia położenia robota mobilnego. Nie jest on w pełni wystarczający do planowania trajektorii w pełni bezpieczny sposób. Dobrym przykładem na zilustrowanie tego problemu jest obiekt typu stół. System nawigacyjny stwierdzi że, robot przejedzie pomiędzy nogami. W rzeczywistości uderzy on o blat stołu. Rozwiązaniem tego problemu jest trójwymiarowy system identyfikacji przeszkód. Do jego zbudowania należy rozwiązać szereg zagadnień. Pierwszym problemem jest możliwość kierowania wiązki lasera w przestrzeni. Aby to osiągnąć zespół nasz opracowuje mechanizm obracający lustro w dwóch wzajemnie prostopadłych osiach. Oba obroty muszą być niezależne ze względu na planowany sposób skanowania przestrzeni. Opracowywane są dwie metody, które będą wykorzystywane w zależności od rodzaju zadania. Pierwsza z nich to typowe zbieranie informacji dookoła robota wykonywane przy intensywnych manewrach bądź tworzeniu mapy nazwana przez nas radarową. Druga polega na obserwacji kwadrantu przestrzeni w kierunku ruchu pojazdu. Takie rozwiązanie umożliwi zwiększenie rozdzielczości katowej bez wzrostu ilości danych do obróbki. Uważamy, że takie rozwiązanie wyznaczy nowy standard w nawigacji pojazdów autonomicznych.

## 7. Literatura

- [1] SERRADILLA F. KUMPEL D., *Robot navigation in a partially known factory avoiding unexpected obstacles*, Intelligent Autonomous Systems 2, The International Conference, Amsterdam, 1989, str. 972-980.
- [2] DUBRAWSKI A., SIEMIĄTKOWSKA B., *A Method for Tracking Pose of a Mobile Robot Equipped with a Scanning Laser Range Finder*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, 1998, str. 2518-2523.
- [3] LU F., MILIOS E., *Robot pose estimation in unknown environments by matching 2-D range scans*, IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, 1994, str. 935-938
- [4] BORENSTEIN J., EVERETT H., FENG L., *Where am I? Sensors and Methods for Autonomous Mobile Robot Positioning* University of Michigan Tech Report, 1996.