

METODY NAWIGACJI LASEROWEJ W AUTOMATYCZNIE KIEROWANYCH POJAZDACH TRANSPORTOWYCH

Mirosław ŚMIESZEK¹, Paweł DOBRZAŃSKI², Magdalena DOBRZAŃSKA³

W pracy przedstawiono najczęściej wykorzystywane metody służące do wyznaczania bieżącej pozycji automatycznie kierowanego pojazdu transportowego AGV. Metody te bazują na technice laserowej. W ramach pracy zaprezentowano dwie takie metody. Pierwsza z nich wykorzystuje laser do pomiarów kątów pomiędzy znacznikami. Druga metoda wykorzystuje skaner laserowy służący do budowy map numerycznych. Zawarte w pracy rozważania poparto dwoma przykładami z rzeczywistych pomiarów wykonanych przez autorów publikacji.

1. Wstęp

Do prowadzenia i określania bieżącej pozycji automatycznie kierowanego pojazdu wykorzystywane są różnorodne systemy nawigacji umożliwiające poruszanie się od punktu początkowego wzdłuż zadanej trasy do punktu docelowego. Systemy te podczas prowadzenia pojazdu wykorzystywać mogą trajektorię rzeczywistą lub wirtualną. W systemie nawigacji z trajektorią rzeczywistą pojazd porusza się po ściśle-fizycznie określonej trasie. Trasa ta może być wyznaczona za pomocą pętli indukcyjnej, pętli optycznej lub magnetycznej. W tych trzech przypadkach urządzenia zamontowane w pojeździe śledzą wyznaczoną trasę, a system kontroli i sterowania pojazdem dąży do minimalizacji odchyłki położenia pomiędzy zadaną trasą a czujnikiem lub kamerą.

W systemie nawigacji wykorzystującym trajektorie wirtualną pojazd posiada własny rozbudowany system sterowania wraz z odpowiednio dużą pamięcią. W pamięci zakodowana jest mapa obszaru i trasa wzdłuż której porusza się pojazd. System sterujący wykorzystując dane z odpowiednich czujników wyznacza bieżącą pozycję pojazdu i dalsze parametry ruchu. Podstawą do określania pozycji w tego typu nawigacji jest odometria – nawigacja obliczeniowa. Ten sposób określania pozycji pojazdu obarczony jest wieloma błędami. W celu wyeliminowania tych błędów wykorzystuje się we współczesnych pojazdach dodatkowe systemy pozwalające na zwiększenie dokładności w określaniu pozycji pojazdu. Do systemów tych zaliczyć można nawigację optyczną, magnetyczną, laserową i satelitarną GPS. W odpowiednich odstępach czasu lub po minięciu przez pojazd charakterystycznych znaków [4, 7] ma miejsce proces dokładnego wyznaczania pozycji i korekcy błędów pochodzących z nawigacji obliczeniowej - odometrii.

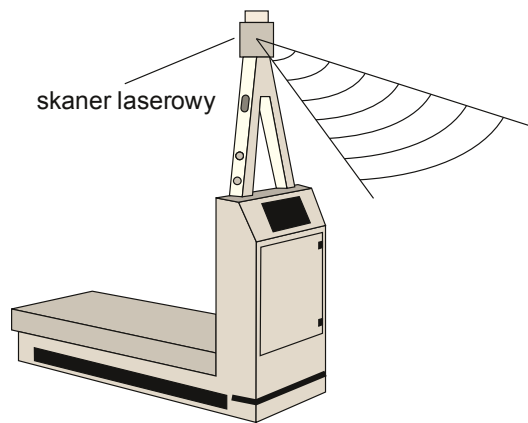
2. Nawigacja laserowa

Dalmierze i skanery laserowe to urządzenia wypromieniowujące energię w kierunku obserwowanych obiektów i odbierające energię odbitą od nich. Urządzenia te umieszczone są przeważnie na masztach przytwierdzonych do pojazdu co widać na rysunku nr1. Taki sposób mocowania ma zapewnić swobodny, niezakłócony przez przeszkody i ludzi przebieg wiązki laserowej. W zależności od budowy danego urządzenia odbite światło może być wykrywane za pomocą specjalnych detektorów, fotolinijek lub kamer wizyjnych. Dzięki możliwości odchylenia wiązki świetlnej przy pomocy odpowiedniego układu optycznego dalmierze optyczne realizowane są często jako skanery. Bardzo rozszerza to zakres możliwych zastosowań, szczególnie w przypadku pomiarów trójwymiarowych. Dalmierze i skanery laserowe zaliczyć można do grupy aktywnych sensorów wizyjnych, ponieważ mają wbudowane własne źródło

¹ Dr hab. inż. Mirosław Śmieszek prof. PRz., Wydział Zarządzania, Politechnika Rzeszowska

² Dr inż. Paweł Dobrzański, Wydział Zarządzania, Politechnika Rzeszowska

³ Dr inż. Magdalena Dobrzańska, Wydział Budowy Maszy i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska



Rysunek 1. Automatycznie kierowany pojazd transportowy AGV ze skanerem laserowym na maszcie

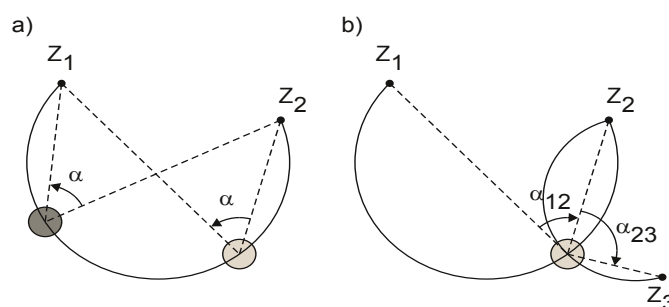
promieniowania i obserwowane otoczenie nie musi być oświetlane. Skanery są często wykorzystywane jako sensory umożliwiające lokalizację automatycznie kierowanego pojazdu w znanym otoczeniu na podstawie jego charakterystycznych cech lub też sztucznych znaczników, lub umożliwiają detekcję przeszkód i budowę dokładnej mapy otoczenia pojazdu w nieznanym środowisku [1, 3, 5, 6].

Działanie dalmierza laserowego polega na kierowaniu za pomocą układu optycznego wiązki spójnego promieniowania o określonej fazy na wybrany obiekt. Energia odbita od obiektu jest wychwytywana obiektywem odbiorczym i kierowana do układu fotodetektora.

Pomiar odległości za pomocą czujnika laserowego wykonywany jest najczęściej przy użyciu dwóch metod: poprzez pomiar czasu przelotu impulsu lub poprzez pomiar przesunięcia fazowego. Natomiast do wyznaczenia za pomocą czujnika laserowego pozycji pojazdu wykorzystywana jest najczęściej triangulacja.

2.1. Triangulacja

Triangulacja to metoda wykorzystywana w sytuacji gdy znane jest otoczenie pojazdu i na podstawie jego charakterystycznych cech lub sztucznych znaczników wyznaczana jest pozycja pojazdu [2]. Triangulacja oznacza metodę lokalizacji na podstawie pomiaru kątów, pod którymi widziane są co najmniej trzy znaczniki na płaszczyźnie. W przypadku obserwacji układu dwóch znaczników na płaszczyźnie pod kątem położenie punktu obserwacji (pojazdu) nie jest jednoznacznie określone – wiadomo tylko, że leży na okręgu, który przechodzi przez znaczniki i punkt obserwacji – rys.2. Określenie kąta obserwacji względem kolejnej pary znaczników można interpretować jako znalezienie drugiego okręgu. Jednym z punktów przecięcia tych dwóch okręgów jest punkt obserwacji (rozwiązanie jest jednoznaczne, gdyż współrzędne drugiego punktu przecięcia wynikają ze współrzędnych znacznika).



Rysunek 2. Ilustracja metody triangulacji: a) – dwa znaczniki: przypadek niejednoznaczny, b) – trzy znaczniki: rozwiązanie jednoznaczne.

2.2. Skanowanie

W przypadku naziemnego skanowania laserowego wykorzystuje się dwie metody pomiaru odległości:

- pomiar czasu przelotu impulsu
- pomiar przesunięcia fazowego

W metodzie opartej na pomiarze czasu przelotu impulsu mierzony jest czas, który upłynął między wysłaniem impulsu świetlnego przez nadajnik a jego odebraniem przez umieszczony bardzo blisko nadajnika odbiornik. Na podstawie pomiaru czasu (od chwili emisji impulsu do czasu powrotu impulsu odbitego od obiektu) można wyznaczyć odległość r do tego obiektu.

$$r = \frac{1}{2} ct$$

gdzie:

c - prędkość światła.

Metoda ta jest bardzo precyzyjna. Obecnie w automatycznie kierowanych pojazdach transportowych stosuje się skanery obrotowe. W zależności od konstrukcji ich kąt skanowania wynosi od 100 do 360 stopni, przy czym zakres skanowania może być ustawiany przez operatora. Działanie skanerów laserowych opiera się podobnie jak w skanerach punktowych na zasadzie pomiaru czasu przelotu światła. Pojedyncza wiązka światła wysyłana jest w ustalonym kierunku i po odbiciu od obiektu powraca do sensora. Czas jaki upływa pomiędzy wysłaniem a powrotem wiązki światła jest mierzony i zamieniany na odległość pomiędzy obiektem, a skanerem. Zamontowane w skanerze obrotowe lustro pozwala na pomiar w całym zakresie kątowym zależnym od typu skanera. Skanery laserowe stosowane są w systemach bezpieczeństwa jak i w systemach nawigacji i sterowania w automatycznie kierowanych pojazdach transportowych. Powszechnie wykorzystywane są zarówno w niewielkich przemysłowych pojazdach transportowych jak i dużych pojazdach operujących w terenie otwartym [6].

W metodzie pomiaru odległości opartej na pomiarze przesunięcia fazowego modulowanej amplitudowo wiązki odbitej od przeszkody (AMCW) ominięto problemy związane z bezpośrednim pomiarem czasu przelotu światła. Przy pojedynczej modulacji amplitudy nadawanego sygnału z częstotliwością ω przesunięcie fazowe pomiędzy wiązką odbitą od obiektu i wiązką odniesienia (nadawaną) pozwala wyznaczyć odległość do przeszkody. Przesunięcie fazowe może być w tej metodzie wyznaczone jedynie z dokładnością do połowy długości fali, w związku z czym mierzona odległość jest jednoznaczna jedynie w zakresie równym połowie długości fali modulowanej wiązki. Zwiększenie jednoznaczności w określeniu przesunięcia fazowego można uzyskać stosując podwójną modulację amplitudy z dwoma różnymi częstotliwościami. Czynnikiem wpływającym na zasięg i dokładność pomiaru czujnikami optycznymi typu AMCW jest uzyskanie odpowiedniego stosunku sygnału do szumu w detektorze. Źródłami błędów może być dryf temperaturowy układów elektronicznych jak i niedoskonałości układu optomechanicznego. Część z tych błędów może być wyeliminowana przez odpowiednią konstrukcję czujnika lub filtrację sygnału. Budowa skanera bazującego na tej metodzie jest podobna do skanerów wykorzystujących pomiar przelotu impulsu. Ze względów bezpieczeństwa nie jest możliwe poprawienie stosunku sygnał/szum w sensorach laserowych przez zwiększenie mocy wiązki padającej. Zwiększenie współczynnika odbicia obserwowanych powierzchni można uzyskać przez stosowanie sztucznych odbłyśników, ale to ogranicza funkcjonalność czujnika [6].

3. Przykłady zastosowań

Zadania jakie są stawiane przed automatycznie kierowanymi pojazdami transportowymi wymagają od nich znajomości (całkowitej lub częściowej) otoczenia w którym się porusza pojazd. W tym celu pojazdy te posługują się mapami lub wykorzystują charakterystyczne cechy otoczenia lub też sztuczne znaczniki.

Mapy ze względu na rozmiar zapamiętywanego obszaru i charakter znajdujących się tam obiektów dzielą się na mapy globalne lub lokalne, statyczne i dynamiczne.

Mapy 2D są to mapy, w których informacja o obszarze jest zapisana na płaszczyźnie. Dwuwymiarowe mapy dzielą się na mapy rastrowe oraz wektorowe. Mapy wektorowe są ciągłą reprezentacją otoczenia i składają się z listy prymitywów geometrycznych typu punkt, linia, obszar, itd. Punkty definiowane są poprzez ich współrzędne (x,y), odcinki definiowane są przez równanie prostej, oraz zdefiniowanie ich końców [6].

Budowanie dwuwymiarowej mapy wektorowej przebiega według następującego algorytmu:

- odczytanie danych
- podział odebranych danych na obiekty
- utworzenie listy odcinków i określenie ich parametrów
- dopasowanie i łączenie obiektów wyodrębnionych w kolejnych skanach.

Przyjmuje się, że dwa punkty $p_1(x_1,y_1)$ i $p_2(x_2,y_2)$ należą do jednego obiektu, jeżeli ich odległość jest mniejsza niż zadany próg ϵ , to znaczy spełniony jest warunek:

$$\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \leq \epsilon$$

Istnieje wiele metod generowania listy odcinków dla danego zbioru punktów. Do najczęściej stosowanych należy metoda iteracyjnego generowania odcinków lub transformata Hougha.

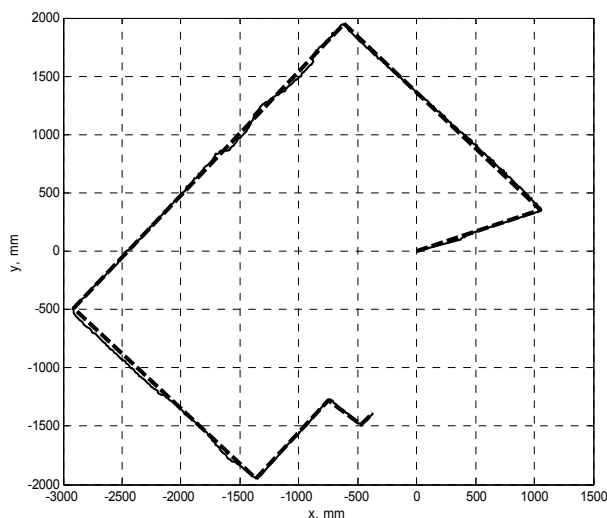
Metoda iteracyjnego generowania odcinków przebiega według następującego algorytmu:

- dla wybranych punktów (najbardziej od siebie oddalonych lub skrajnych) (p_a , p_z) obliczane jest równanie prostej $Ax+By+C=0$, która przez nie przechodzi.
- dla wszystkich pozostałych punktów obliczana jest odległość d od wyznaczonej prostej:

$$d_i = \frac{|Ax_i + By_i + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}$$

- jeśli maksymalna obliczona odległość jest mniejsza niż zadany próg to wszystkie punkty uznaje się za współliniowe
- w przeciwnym przypadku wybierany jest punkt p_m o maksymalnej odległości od wyznaczonej prostej i wyznaczane są równania dwóch prostych: pierwsza przechodzi przez punkty (p_a , p_m), a druga przez punkty (p_m , p_z),
- powyższe punkty powtarzane są dla każdego podzbioru.

Algorytm jest wykonywany do momentu aż wygenerowane zostaną wszystkie odcinki. Na rysunku 3 przedstawiony został efekt działania metody iteracyjnego generowania odcinków.



Rysunku 3. Przykład zastosowania metody iteracyjnego generowania odcinków

Drugą z metod umożliwiających generowanie listy odcinków dla zadanego zbioru punktów jest transformacja Hougha. Metoda ta jest stosowana od wielu lat w przetwarzaniu obrazów do znajdowania linii znajdujących się na obrazie. Jej podstawową zaletą jest to, że jest odporna na szumy w obrazie. Wymagane jest aby linie opisane były w sposób parametryczny. Transformata najczęściej stosowana jest do wykrywania odcinków składających się z największej liczby wykrytych punktów.

Klasyczna transformata Hougha stosowana przy rozpoznawaniu linii prostych odwzorowuje przestrzeń kartezjańską w tzw. przestrzeń Hougha, której każdy punkt jest obrazem prostej w przestrzeni kartezjańskiej. Jedną ze współrzędnych tego punktu jest odległość prostej od środka układu, drugą kąt nachylenia normalnej prostej do osi x . Odpowiednikiem punktu w przestrzeni kartezjańskiej w transformacie Hougha jest pewna krzywa. Tworzą ją punkty będące obrazami wszystkich prostych przechodzących przez ten punkt.

Równanie prostej można zapisać w postaci normalnej:

$$c = x \cdot \cos\alpha + y \cdot \sin\alpha$$

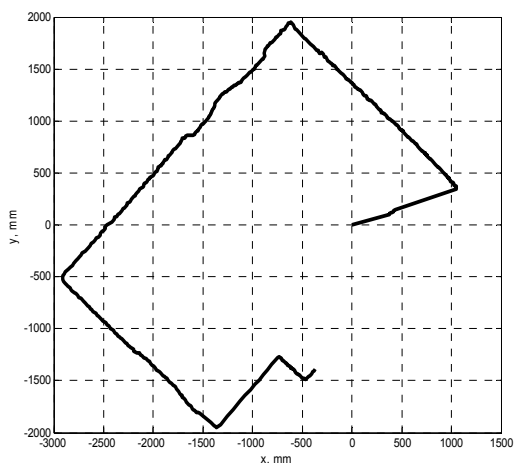
gdzie:

α – kąt między normalną do danej prostej, a osią OX ,

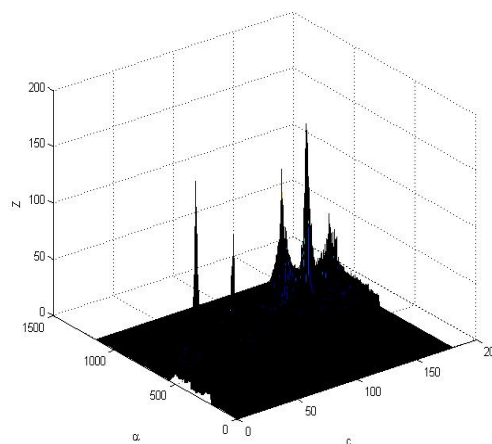
c – odległość danej prostej od punktu $(0,0)$

Dla każdego punktu płaszczyzny XY można wyznaczyć rodzinę prostych, do których punkt należy, a więc także rodzinę par (α, c) . Następnie tworzy się tablicę dwuwymiarową i elementowi (α, c) przyporządkowuje się liczbę pikseli leżących na wyznaczonej przez tę parę prostej. Komórka (α, c) przechowująca największą wartość, w sposób jednoznaczny wyznacza odcinek składający się z największej liczby pikseli [6]. Wyniki pomiarów i obliczeń przedstawiono na rysunku 4.

a)

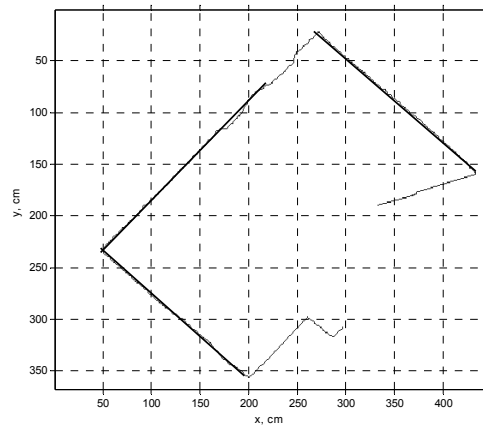


b)



Rysunek 4. Zastosowanie transformaty Hougha: a) wyniki uzyskane na podstawie pomiarów dalmierza, b) wyniki stosowania transformaty Hougha przy obliczaniu odległości c i kąta α

Rysunek 4b przedstawia wynik obliczeń uzyskanych za pomocą transformaty Hougha dla pomiarów uzyskanych z dalmierza laserowego (rys. 4a).

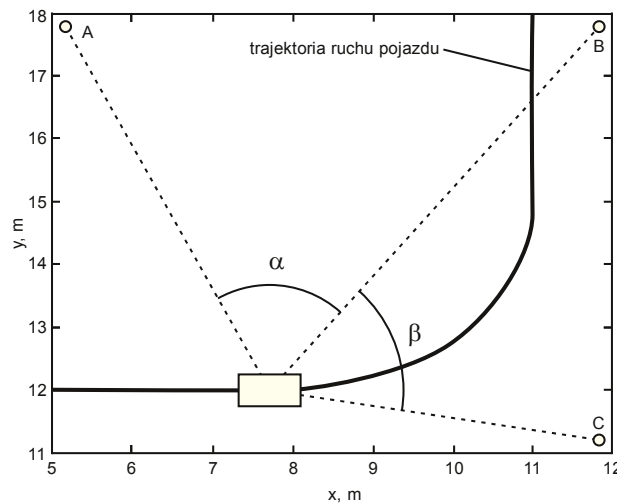


Rysunek 5. Obraz uzyskany po zastosowaniu transformaty Hougha

Na rysunku 5 przedstawiono linię przerywaną odcinki wygenerowane przy wykorzystaniu wartości promienia c i kąta α uzyskane z przekształcenia za pomocą transformaty Hougha dla pomiarów przedstawionych na rysunku 4a. W stosunku do rys.4a nastąpiło przesunięcie początku układu współrzędnych.

Przedstawiona powyżej metoda ma też kilka wad. Jedną z głównych wad tej metody jest sposób wyboru najdłuższego odcinka. O tym, który odcinek zostanie wybrany jako najdłuższy decyduje liczba punktów, które do niego należą, a nie jego rzeczywista długość. Ma to bardzo duże znaczenie w przypadku danych uzyskanych z pomiarów za pomocą dalmierza laserowego. Wynik klasyfikacji jest wówczas zależny od odległości i kąta widzenia, pod którym obserwowany jest obiekt. Inną z wymienianych wad jest to, że ponieważ punkty głosują na proste niezależnie, nie uwzględniona jest informacja o położeniu punktów sąsiednich.

Kolejną przedstawioną metodą jest triangulacja. Metoda ta umożliwi na podstawie charakterystycznych cech otoczenia lub sztucznych znaczników wyznaczyć pozycję pojazdu (rys. 6).



Rysunek 6. Przykładowy przebieg trajektorii pojazdu z zaznaczonymi znacznikami i kątami nmiaru

Na podstawie pomiarów kątów α i β wykonywanych przez skaner laserowy z częstotliwością co najmniej 5 – 10 razy na sekundę uzyskuje się szereg danych pomiarowych. Dane te są następnie wykorzystywane do obliczeń w czasie rzeczywistym współrzędnych x i y . Przykładowe dane zawierające zmierzone w trakcie ruchu pojazdu kąty α i β oraz wyniki obliczeń współrzędnych x , y pokazano w tabeli 1.

Tabela 1. Dane uzyskane z pomiarów kąta α i β oraz wyniki obliczeń współrzędnych x, y

Kąty z namiaru		Obliczone współrzędne	
$\alpha, ^\circ$	$\beta, ^\circ$	x, m	y, m
57,1	64,8	5,0	12,0
58,6	67,3	6,5	12,0
59,9	70,0	8,0	12,0
61,3	72,5	9,2	12,3
62,0	73,6	9,7	12,5
62,7	74,5	10,0	12,8
63,3	75,2	10,2	13,0
63,9	75,8	10,4	13,3
64,4	76,3	10,6	13,5
65,0	76,8	10,7	13,8
65,5	77,2	10,8	14,0
66,1	77,5	10,9	14,3
66,6	77,8	11,0	14,5
67,1	78,0	11,0	14,8
67,6	78,2	11,0	15,0
69,6	78,7	11,0	16,0
71,8	79,1	11,0	17,0
74,1	79,4	11,0	18,0

Powyższa metoda jest wystarczająco dokładna dla zastosowań praktycznych w pojazdach pracujących w warunkach przemysłowych i w magazynach. Błąd w określaniu pozycji jest mniejszy od 1 cm. Metoda ta wymaga jednak czystego pola pomiarowego, braku przeszkód na trasie laser odbłyśnik.

4. Podsumowanie

Współczesna technika pomiarowa i obliczeniowa pozwala na uzyskiwanie dużych dokładności w określaniu pozycji rzeczywistej pojazdu w obszarze jego działania. Najczęściej stosowanymi metodami są metody wykorzystujące technikę laserową. W pomieszczeniach zamkniętych takich jak hale fabryczne lub magazynowe wykorzystuje się metodę triangulacyjną. Metoda ta charakteryzuje się dużą dokładnością i niskimi kosztami instalacji. Jej wadą jest konieczność zainstalowania znacznej liczby znaczników o ściśle określonej pozycji. W otwartych przestrzeniach umieszczenie tego typu znaczników jest praktycznie niemożliwe. W tych warunkach urządzenia laserowe wykorzystywane są do skanowania otoczenia i budowy map. Mapy te porównywane są z kolei z mapami otoczenia zapisanymi w pamięci komputera. Na tej podstawie wyznaczana jest pozycja pojazdu. Tego typu rozwiązanie wymaga posiadania dokładnych map numerycznych otoczenia i znacznych mocy obliczeniowych komputerów pokładowych.

Literatura

- [1] Borges G.A., Aldon M.J.: Robustified estimation algorithms for mobile robot localization based on geometrical environment maps. *Robotics and Autonomous Systems* 45 (2003), 131–159.
- [2] Casanova E.Z., Quijada S.D., García-Bermejo J.G., González J.R.P.: Microcontroller based system for 2D localization. *Mechatronics* 15 (2005) 1109–1126.
- [3] Diosi A., Kleeman L.: Advanced sonar and laser range finder fusion for simultaneous localization and mapping. *Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS2004, Sendai Japan 1854-1859.*
- [4] Giergiel J., Śmieszek M.: Automatycznie kierowane pojazdy transportowe – roboty mobilne. *Kwartalnik AGH Mechanika, Tom 17, Zeszyt 4, Kraków 1998, str. 511-539.*
- [5] Martinelli A., Tomatis N., Siegwart R.: Simultaneous localization and odometry self calibration for mobile robot. *Autonomous Robot* 2007, 75-85.
- [6] Siemiątkowska B.: *Reprezentacja otoczenia robota mobilnego. Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa 2011.*

- [7] Śmieszek M., Dobrzańska M.: Przegląd metod nawigacji automatycznie kierowanych pojazdów transportowych ze szczególnym uwzględnieniem odometrii. Prace Akademii Transportu Ukrainy Zachodnie Centrum pt. „Proektuawanja, virobnictwo ta ekspluatacja avtotransportnich zasobiv i poizdiv”. Lwów 2003, t. 10, str. 215-223.

Laser navigation methods in automated guided vehicle

The paper presents the most commonly used method for determining the current position of the automated guided vehicle. These methods are based on laser technology. The paper presents two of the methods. The first one uses a laser to measure the angles between the markers. The second method uses a laser scanner used for the construction of digital maps. Included in the study consideration supports two examples of actual measurements made by the authors of the publication.