

Barbara SIEMIĄTKOWSKA

INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI PAN

Wykorzystanie transformaty Hough'a do lokalizacji robota mobilnego

Dr Barbara Siemiątkowska

Ukończyła Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki Uniwersytetu Warszawskiego. W 1997 r. obroniła pracę doktorską pt. „Zastosowanie metod rastrowych w nawigacji robotów mobilnych”. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN i zajmuje się zastosowaniem metod sztucznej inteligencji w robotyce mobilnej.

bsiem@ippt.gov.pl



Streszczenie

W niniejszej pracy przedstawione zostanie zastosowanie transformaty Hough'a w określeniu zmian położenia robota w środowisku, które nie jest znane. Przyjęto założenie, że robot wyposażony w laserowy czujnik odległości porusza się we wnętrzu budynku. Znajdowane są cechy charakterystyczne otoczenia - fragmenty ścian. Określenie przemieszczenia robota odbywa się na podstawie określenia zmian położenia robota względem wykrytych obiektów charakterystycznych. Odcinki wykrywane są przy pomocy transformaty Hough'a. Opisywane w poniższym artykule badania są rozszerzeniem i uzupełnieniem metody przedstawionej w [1].

Abstract

The paper presents the application of Hough transform for mobile robot localization. It is assumed that the robot acts in an unknown environment. It is equipped with the SICK laser range finder. The robot looks for segments which are features of the environment. Comparing the robot position relatively to the segments the displacement of the vehicle is computed. In this paper a certain modification of Hough transform is proposed in order to detect the segments and to compute their equations. Presented experiments show the efficiency of the proposed approach

Słowa kluczowe: roboty mobilne, lokalizacja, transformata Hough'a

Keywords: mobile robotics, localization, Hough transform

1. Wstęp

Podstawowym elementem systemów nawigacyjnych robotów mobilnych jest lokalizacja - określanie położenia robota. Metody lokalizacji możemy podzielić na dwie podstawowe grupy - śledzenie przemieszczenia robota i lokalizację globalną, której zadaniem jest określenie położenia pojazdu na podstawie danych pochodzących z sensorów i mapy metrycznej lub topologicznej otoczenia. W przypadku lokalizacji topologicznej system wyszukuje miejsce, w którym znajduje się pojazd, np. typ pomieszczenia. Jeśli w systemie nawigacyjnym wykorzystywana jest mapa metryczna, to możliwe jest obliczenie globalnych współrzędnych robota.

Podstawową metodą obliczania przemieszczeń jest odometria. Istotną wadą odometrii jest jednak to, że niedokładności pomiarów kumulują się w czasie. Powstanie błędów może być spowodowane wadami urządzenia np. nierównościami kół, ograniczoną rozdzielczością dekodery lub przypadkowymi zaburzeniami - poślizgami kół, nierównością powierzchni [2, 3]. W większości systemów nawigacyjnych układy odometryczne są wzbogacane o zewnętrzny układ lokalizacji. W pewnej klasie metod badane jest położenie robota względem sztucznych znaczników aktywnych (np. ultradźwiękowych), lub pasywnych np. obiektów o określonym kolorze i kształcie [4]. Metody takie mogą być stosowane tylko wtedy, gdy układ znaczników w pomieszczeniu nie ulegnie zmianie. Ostatnio rozwijane są systemy, w których nie zakłada się wiedzy o środowisku, a robot sam znajduje charakterystyczne, umożliwiające lokalizację

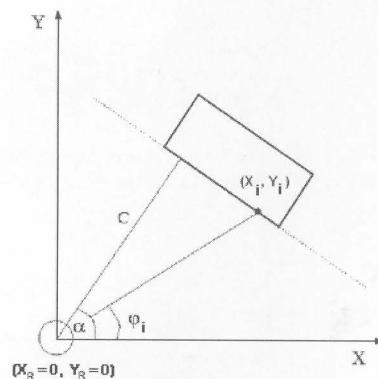
[5, 6]. Aby wybrane obiekty mogły być znacznikami, powinny być obserwowane przez ruchomy pojazd przez pewien czas i być odporne na przypadkowe szumy, np. inne poruszające się obiekty. Znaczniki są najczęściej opisywane w postaci parametrycznej - przez podanie zbioru cech. Wybrane cechy powinny być niezmiennicze tzn. niezależne od położenia i orientacji robota. Ich wybór jest ściśle związany z rodzajem sensorów, w jakie pojazd jest wyposażony. W przypadku, gdy robot obserwuje otoczenie przy pomocy kamery, będzie to obiekt o unikalnym kolorze lub kształcie. W przypadku czujników aktywnych - sonarów lub dalmierzy laserowych znacznikami mogą być ściany, naroża, wnęki lub drzwi. W metodzie opisanej poniżej przyjęto założenie, że pojazd wyposażony w dalmierz laserowy porusza się wewnątrz budynku. Jako obiekty charakterystyczne przyjęto fragmenty najdłuższych ścian. Podstawową zaletą takiego wyboru znaczników jest to, że mogą być one szybko wykryte i są odporne na szumy. Długa ściana jest widoczna nawet wtedy, gdy jest częściowo przysłonięta. Duże obiekty mogą być obserwowane przez długi czas.

Wykryte segmenty (fragmenty ścian) są opisywane w postaci parametrycznej. Jako zbiór cech wybrano wartości jedynie dwu parametrów (α, c) , gdzie α jest kątem między normalną do danej prostej, a osią OX , c - jest odległością w kierunku normalnym danej prostej od punktu $(0,0)$. Jeśli przyjmiemy, że układ współrzędnych jest związany z robotem (pojazd znajduje się zawsze w środku układu współrzędnych), to zmiana wartości parametrów (α, c) określa zmianę orientacji robota i jego przemieszczenie w kierunku prostopadłym do ściany. Opis parametryczny prostej przedstawiono na rys. 1.

W prowadzonych eksperymentach stosowano dalmierz laserowy firmy SICK, a parametry znaczników są obliczane przy pomocy zmodyfikowanej transformaty Hough'a.

2. Opis dalmierza laserowego

Dalmierz laserowy dostarcza ciąg odczytów postaci $\{R_i, \varphi_i\}$, gdzie R_i jest wskazaną przez laser odległością od przeszkody, przy kącie skanowania φ_i . W przypadku dalmierza laserowego firmy SICK rozdzielczość kąta skanowania wynosi 0.5° , a zakres wynosi 180° . Dalmierz dokonuje 20 pełnych pomiarów w ciągu sekundy.



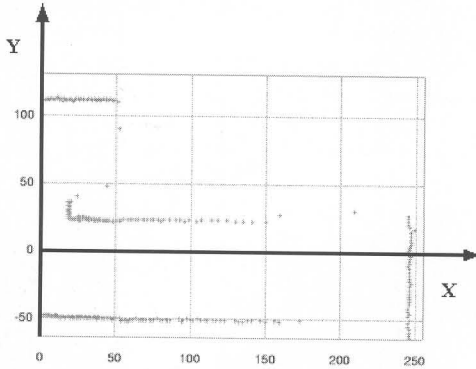
Rys. 1. Parametryczna reprezentacja prostej
Fig. 1. A line representation

Współrzędne punktów należących do krawędzi przeszkody możemy obliczyć na podstawie równania:

$$\begin{aligned} x_i &= x_R + R_i \cos \varphi_i \\ y_i &= y_R + R_i \sin \varphi_i \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie R_i jest wskazaną przez laser odległością od przeszkody, a φ_i jest kątem skanowania, para (x_R, y_R) - określa współrzędne położenie robota.

Wyniki wskazań laserowego czujnika odległości możemy przedstawić w postaci rastrowej. Elementowi (x, y) przyporządkowujemy wartość niezerową, jeśli w obszarze odpowiadającym (x, y) zostanie wykryta krawędź przeszkody. Rys. 2 przedstawia dane pochodzące z dalmierza laserowego. Czarnymi kropkami zaznaczono miejsca, w których wykryte zostały przeszkody.



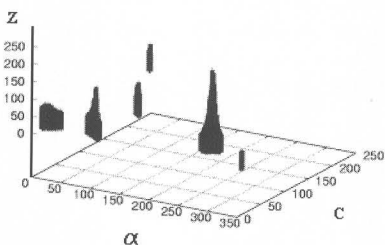
Rys. 2. Dane pochodzące ze skanera laserowego
Fig. 2. Readouts taken from the SICK laser scanner

3. Transformata Hough'a

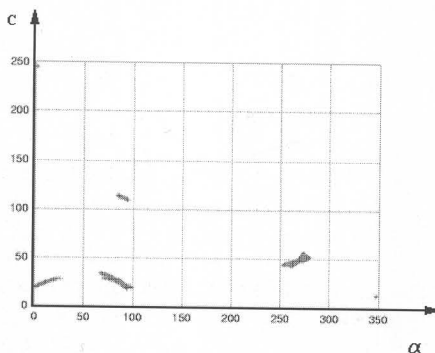
Transformata Hough'a jest od wielu lat stosowana w przetwarzaniu obrazów, zwykle do znajdowania najdłuższych odcinków linii występujących w obrazie rastrowym [7, 8]. Równanie prostej można zapisać w postaci normalnej:

$$x \cos \alpha + y \sin \alpha = c \quad (2)$$

gdzie α jest kątem między normalną do danej prostej, a osią OX, c - jest minimalną odległością danej prostej od punktu $(0,0)$. Jeśli przyjmujemy pewną dyskretyzację przestrzeni, to dla każdego punktu płaszczyzny (x, y) możemy wyznaczyć rodzinę prostych do których punkt należy, a więc także rodzinę par (α, c) . Jeśli utworzymy tablicę dwuwymiarową i elementowi (α, c) przyporządkujemy ilość pikseli obrazu leżących na wyznaczonej przez tę parę prostej, to element o największej wartości w sposób jednoznaczny wyznacza najdłuższy odcinek na obrazie.



Rys. 3. Wynik stosowania transformaty Hough'a dla danych przedstawionych na rys. 2
Fig. 3. The result of using Hough transform for data presented on the picture 2



Rys. 4. Rzut na płaszczyznę (α, c)
Fig. 4. The projection onto the plane (α, c)

Na rys. 3 i 4 przedstawiono wynik stosowania transformaty Hough'a dla danych z rys. 2. Aby zredukować wpływ szumów w opracowanej metodzie przyjęto założenie, że jeśli piksel (x, y) „głosuje” na prostą opisaną parametrami (α, c) to „głosuje” także na proste sąsiednie tzn. $(\alpha-1, c)$, $(\alpha+1, c)$, $(\alpha-1, c-1)$, ..., $(\alpha+1, c+1)$. Na osi OX zaznaczono wartości α , a na OY wartości c . Na osi OZ zaznaczono ilość „głosów” na parę (α, c) . Ze względu na czytelność rysunku nie zaznaczono wartości poniżej progu 70. Para (α, c) dla której wartość z jest największa określa parametry najdłuższej prostej znajdującej się na obrazie. Niestety w przypadku zaszumionych danych nie otrzymujemy wyraźnych maksimum, ale pewne rodziny prostych. Rys. 4 przedstawia rodziny prostych opisywanych parametrami (α, c) , które mogą reprezentować najdłuższe segmenty. Z przedstawionych danych wynika, że wykryte fragmenty przeszkód przedstawionych na rys. 2 skupiają się w otoczeniu następujących prostych opisanych parametrycznie: $\{(0 \pm \sigma, 20 \pm \Delta c), (0 \pm \sigma, 250 \pm \Delta c), (90 \pm \sigma, 30 \pm \Delta c), (90 \pm \sigma, 110 \pm \Delta c), (270 \pm \sigma, 50 \pm \Delta c)\}$. Wartość parametru σ wynosi ok. 7° , a Δc ok. 10 cm.

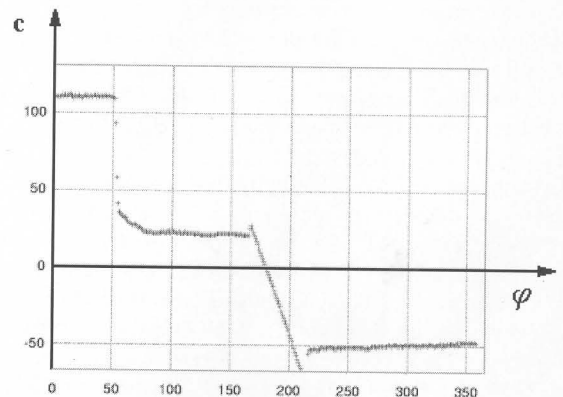
Podstawową zaletą transformaty Hough'a jest to, że jest ona odporna na szumy w obrazie. Opisana powyżej implementacja ma jednak kilka wad. O tym, który odcinek zostanie wybrany jako najdłuższy decyduje ilość punktów które doń należą, a nie jego rzeczywista długość. Inną wadą jest to, że nie uwzględniona jest kolejność punktów i ich wzajemna odległość. Długość segmentu zawierającego się w prostej opisanej parametrami $(0, 20)$ wynosi zaledwie 15 cm, a segmentu zawartego w prostej $(270, 50)$ 170 cm, ale po zastosowaniu transformaty Hough'a proste są równoważne w sensie opisywanego przekształcenia. W następnym rozdziale przedstawiona zostanie modyfikacja transformaty Hough'a, w której generowane będą parametry prostych, do których należą segmenty najdłuższe w sensie miary euklidesowej.

4. Modyfikacja transformaty Hough'a

Przyjmując, że robot znajduje się w środku układu współrzędnych w punkcie $(0,0)$ i przekształcając równania (1) i (2) otrzymujemy:

$$c = R_i \cos(\alpha - \varphi_i) \quad (3)$$

Z równania (3) wynika, że aby dokonać transformaty Hough'a obrazu otrzymanego na podstawie wskazań dalmierza laserowego nie musimy obliczać współrzędnych (x, y) punktu, wystarczą dane o odległości od przeszkody i kącie skanowania. Wykresy 5 i 6 przedstawiają wyniki zastosowania przekształcenia (3) dla danych z rys. 2 dla $\alpha=90^\circ$ i 0° . Na osi OX zaznaczono kąt skanowania. Na osi OY obliczone zgodnie ze wzorem 3 wartości parametru c . Punkty współliniowe, leżące na prostych wyznaczonych przez kąt α mają zbliżone wartości współczynników c .



Rys. 5. Wartości c dla kąta $\alpha=90^\circ$
Fig. 5. Values of the parameter c for $\alpha=90^\circ$

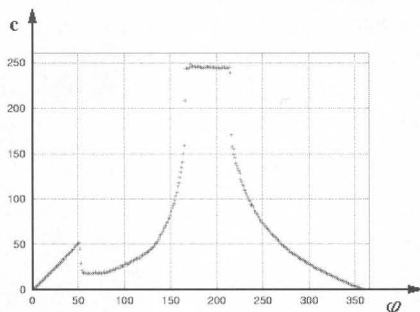
Idea proponowanej modyfikacji transformaty Hough'a polega na tym, że dla każdego kąta $\alpha \in [0, 180]$ i ciągu odczytów lasera $\{R_i, \varphi_i\}$, obliczany jest ciąg współczynników $\{c_i\}$, ciąg ten jest analizowany.

Przyjmuje się, że fragmenty przeszkód wyznaczone przez kilka kolejnych odczytów lasera są współliniowe, jeśli dla pewnego kąta α różnica między obliczonymi współczynnikami c jest mniejsza niż pewien zadany próg ϵ .

Wartość progu zależy od dokładności dalmierza, w przeprowadzanych eksperymentach przyjęto $\epsilon=1.5$ cm. Aby zredukować szumy i zwiększyć wiarygodność metody zakładamy, że przy rozdzielczości kąta skanowania 0.5° , długość ciągu odczytów współliniowych powinna być dłuższa niż 10. Dla każdej sekwencji odczytów współliniowych, korzystając z twierdzenia cosinusów obliczana jest długość wyznaczonego przez nie odcinka według wzoru:

$$dl = \sqrt{R_n^2 + R_k^2 - 2 \cdot R_n \cdot R_k \cdot \cos((k-n) \cdot \Delta\varphi)} \quad (4)$$

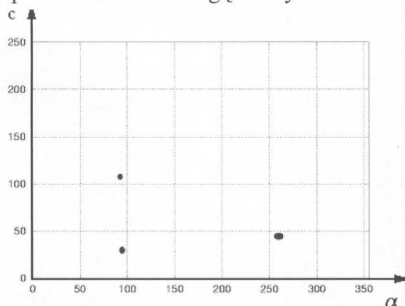
gdzie dl - jest długością segmentu, n, \dots, k są indeksami ciągu odczytów współliniowych, $\Delta\varphi$ jest rozdzielczością skanowania, R_n - n -ty odczyt lasera. Na rys. 7 przedstawiono wynik stosowania zmodyfikowanej transformaty Hough'a dla danych z rys. 2.



Rys. 6. Wartości c dla kąta $\alpha=0^\circ$

Fig. 6. Values of the parameter c for $\alpha=0^\circ$

Wykres 7 przedstawia rodzinę prostych opisywanych parametrami (α, c) wygenerowaną przy pomocy zmodyfikowanej transformaty Hough'a. Niedokładność określenia wartości parametrów (α, c) uległa znacznemu zmniejszeniu w porównaniu z klasyczną transformatą Hough'a. Jeśli uwzględniane będą jedynie wartości maksymalne, to błąd określania orientacji segmentu nie przekracza 2° . Nie zostały także wygenerowane proste do których należą krótkie segmenty, które w procesie badania przemieszczeń nie są przydatne, gdyż w przypadku zmiany położenia robota mogą nie być widoczne.



Rys. 7. Wynik stosowania zmodyfikowanej transformaty Hough'a

Fig. 7. The result of application modified of Hough transform

4. Korekcja parametrów

Ze względu na przyjętą dyskretyzację parametrów α i c nie jest możliwe osiągnięcie dokładności obliczenia parametrów większej niż zadana rozdzielczość. W przedstawionych powyżej wynikach dokładność obliczania kąta α wynosi 2 stopnie, a wartości parametru c 2 cm. Jeśli chcemy otrzymać większą dokładność wartości parametrów, to dla zbioru odczytów współliniowych $\{R_i, \varphi_i\}$, należy znaleźć takie wartości parametrów (α, c) , dla których błąd średniokwadratowy ϵ opisany równaniem (5) jest najmniejszy:

$$\epsilon = \frac{\sum (R_i \cos(\alpha - \varphi_i) - c)^2}{N} \quad (5)$$

gdzie N jest ilością odczytów współliniowych.

Istnieją wzory analityczne umożliwiające znalezienie optymalnych wartości parametrów (α, c) , ale stosowanie ich jest dość czasochłonne. W tej pracy proponujemy obliczanie wartości (α, c) w następujący sposób:

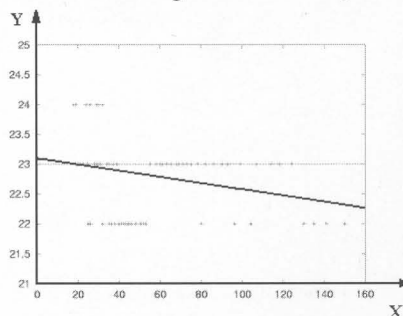
Dla ustalonej wartości parametru a funkcja określająca błąd średniokwadratowy jest wielomianem drugiego rzędu ze względu na parametr c , a więc osiąga minimum dla c określonego wzorem:

$$c = \frac{\sum R_i \cos(\alpha - \varphi_i)}{N} \quad (6)$$

gdzie N jest ilością odczytów współliniowych.

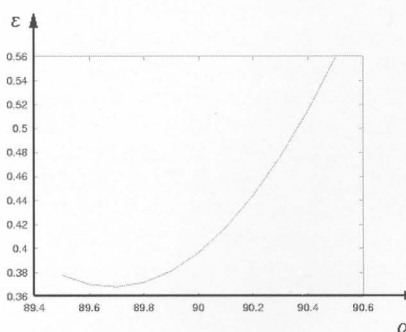
Stosując zmodyfikowaną transformatę Hough'a otrzymujemy przybliżone wartości parametrów (α, c) i zbiór punktów współliniowych leżących w pobliżu prostej opisanej przez (α, c) . Otoczenie α : $[\alpha - \Delta\alpha, \alpha + \Delta\alpha]$, jest dyskretyzowane: $[\alpha - \Delta\alpha, \alpha - \Delta\alpha + \Delta\eta, \alpha - \Delta\alpha + 2\Delta\eta, \dots, \alpha + \Delta\alpha]$

Dla wszystkich zdyskretyzowanych wartości kątów z przedziału $[\alpha - \Delta\alpha, \alpha + \Delta\alpha]$ obliczana jest optymalna wartość współczynnika c i błąd średniokwadratowy. Jako optymalną wartość kąta przyjmujemy α , dla której błąd średniokwadratowy jest najmniejszy, optymalną wartość c określa wzór 6. Na rys. 8 przedstawiono zbiór punktów uznanych za współliniowe, prostą wygenerowaną przy pomocy zmodyfikowanej transformaty Hough'a opisaną parametrami $(90, 23)$ i prostą zmodyfikowaną (dla której błąd średniokwadratowy jest najmniejszy) opisaną parametrami $(89.7, 23.1)$. Rys. 9 przedstawia rozkład błędu średniokwadratowego w otoczeniu kąta 90° .



Rys. 8. Wygenerowane proste dla układu punktów współliniowych

Fig. 8. The line computed based on the set of collinear points



Rys. 9. Rozkład błędu średniokwadratowego w otoczeniu 90° , dla zbioru punktów współliniowych przedstawionych na rys. 8

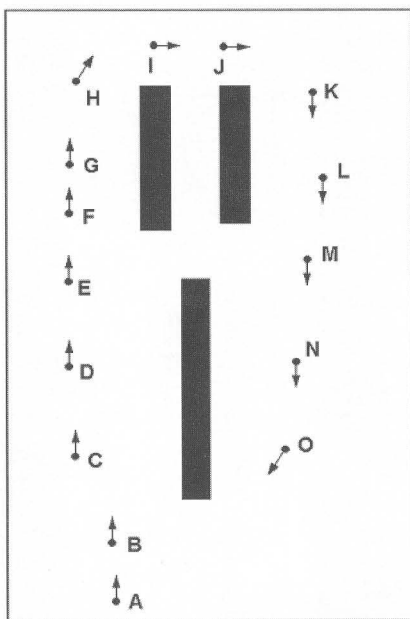
Fig. 9. Least squares error for the data presented on Fig. 8

5. Określenie zmian orientacji i przesunięcia robota

Eksperymenty przeprowadzono w pomieszczeniu laboratoryjnym w którym ustawiono przeszkody o kształcie prostokątów. Plan pomieszczenia przedstawia rys. 10. Pomieszczenie miało wymiar 4 m na 3 m. Czarnymi kropkami zaznaczono punkty pomiarowe.

Przybliżone dane pochodzące z odometrii i analiza wartości parametrów wygenerowanych prostych umożliwia określenie relacji

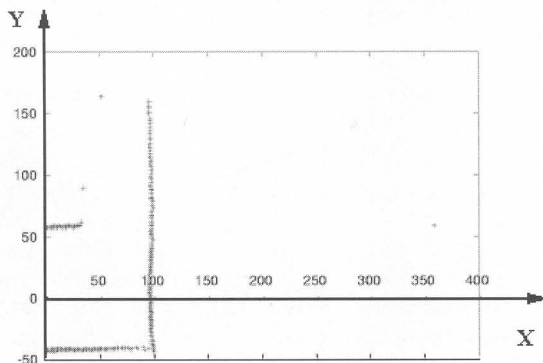
między segmentami opisującymi przeszkody. Np. jeśli robot porusza się w korytarzu, to generowane są dwie proste równoległe. Różnica między obliczonymi współczynnikami c w sposób jednoznaczny określa odległość między ścianami. Wartość ta nie jest zależna od położenia i orientacji robota. Podobna sytuacja występuje w przypadku odcinków nachylonych względem siebie. Wartość kąta jest cechą niezmienniczą względem położenia i orientacji robota. Dzięki opisywanym właściwościom i przybliżonym danym z odometrii, na podstawie analizy wartości parametrów (α, c) można w sposób wiarygodny znaleźć pary odpowiadających sobie segmentów wykrytych z dwóch różnych położeń robota.



Rys. 10. Plan pomieszczenia z zaznaczonymi punktami pomiarowymi
Fig. 10. The map of the environment

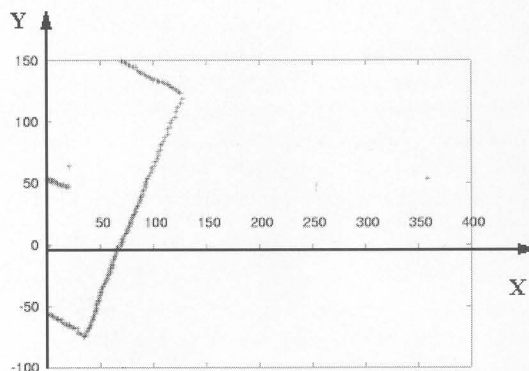
Ponieważ wartość współczynnika c określa odległość robota od wyznaczonego fragmentu przeszkody w kierunku normalnym, to porównując wartości parametru α można określić zmianę orientacji pojazdu. Badając różnicę wartości współczynników c obliczonych dla tego samego segmentu, ale obserwowanego z różnych punktów, możemy w sposób jednoznaczny określić przemieszczenie się robota w kierunku prostopadłym do danego segmentu. Rys. 11 przedstawia plan pomieszczenia, w którym testowano opisywaną metodę. W punkcie N obliczono następujące parametry prostych. N1:(0, 97.8) i N2:(270, 41.97). Jeśli robot znajduje się w położeniu O to prostej N1 odpowiada prosta O1: (-26.1, 62.01), a O2 prosta (244, 47.11).

Obliczony kąt zmiany orientacji robota wynosi 26° , przesunięcie w kierunku równoległym do osi OX wynosi -35.79 cm, a przesunięcie w kierunku równoległym do osi OY 5.14 cm. W rzeczywistości robot zmienił orientację o 26° i przesunął się o wektor [-36.0, 5.0].



Rys. 11. Wskazania dalmierza laserowego w punkcie N
Fig. 11. The laser readouts taken in point N

W przedstawionych na rysunkach punktach pomiarowych błąd określania zmian orientacji robota nie przekraczał 0.5° , a błąd przesunięcia 0.5 cm.



Rys. 12. Wskazania dalmierza laserowego w punkcie O
Fig. 12. The laser readouts taken in point O

Metoda może być stosowana w trakcie przemieszczania się pojazdu. Przy dużych prędkościach (powyżej 1 m/s) wskazane jest wykorzystanie przybliżonej informacji pochodzącej z czujników odometrycznych.

Algorytm opisaną powyżej metody był implementowany w języku programowania C, w systemie Linux, na komputerze z zegarem 800 MHz. Czas określania zmian położenia pojazdu nie przekraczał 20 ms, a więc metoda może być stosowana w czasie rzeczywistym. Efektem ubocznym metody jest tworzenie mapy metrycznej otoczenia, która nie zawiera drobnych elementów, ale też jest wolna od szumów.

6. Wnioski

W przedstawionej pracy przedstawiono implementację transformaty Hough'a. Metoda umożliwia określenie zmian orientacji i położenia robota wyposażonego w dalmierz laserowy. Przyjęto założenie, że robot porusza się w otoczeniu typu wnętrze, ale nie zakłada się, że dostępna jest wiedza o pomieszczeniu. Algorytm jest bardzo efektywny, a błąd lokalizacji jest niewielki, nawet wtedy, gdy robot w czasie dokonywania pomiarów przemieszcza się.

Opisywana metoda może być stosowana także do określania położenia robota w znanym pomieszczeniu, a także może ułatwiać tworzenie mapy metrycznej otoczenia, które nie jest znane. Czas działania algorytmu nie przekracza 20 ms.

Literatura

- [1] B. Siemiątkowska, A. Dubrawski: "Cellular Neural Networks for Navigation of a Mobile Robot, RSCT'98, June 1998
- [2] J. Borenstein, L. Feng: „Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots”. Transactions on Robotics and Automation, Vol. 12, No. 6, 1996.
- [3] J.J Leonard, H.F. Durrant-Whyte: Direct Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1992.
- [4] R.C Bolles, H. Bunke: Intelligent Robots - Sensing Modelling and Planning. World Scientific, 1997.
- [5] W. Burgard, B. Armin, S. Thrun: Position Estimation for Mobile Robot in Dynamic Environment, AAAI 98, Madison, Wisconsin 1998.
- [6] G. Dudek, C. Zhang: Vision-based robot localization without explicit object models. Proc. Int. Conf. Robotics and Automation, 1996.
- [7] O. Duda, P. Hart: Use of Hough Transformation To Detect Lines and Curves in Picture, Communication of the ACM, 15(1), 1972.
- [8] R. C. Gonzales.: Digital Image Processing. Addison-Wesley, 1987.

Title: Hough Transform for Mobile Robot Localization