

ZASTOSOWANIE TRANSFORMATY HOUGH'A W LOKALIZACJI ROBOTA MOBILNEGO

Abstract

This paper presents the method which allows to correct position and orientation of a mobile robot. It is assumed that the robot is equipped with a laser range finder. Modification of well known Hough Transform is used, in order to determine the position and orientation of the robot in an unknown environment. Performed experiments show that the method is very efficient.

Streszczenie

W przedstawionej poniżej pracy przedstawione zostanie zastosowanie transformaty Hough'a w określeniu położenia robota mobilnego. Przyjęto założenie, że robot przemieszcza się w otoczeniu typu wnętrze budynku i jest wyposażony w dalmierz laserowy. Znajdowane są cechy charakterystyczne otoczenia – fragmenty ścian. Obserwuje się przemieszczenie robota względem znalezionych fragmentów. Opisana metoda umożliwia bardzo precyzyjne określenie przemieszczeń robota w nieznanym środowisku oraz tworzenie map wektorowych otoczenia.

1. WSTĘP

Określenie zmian położenia robota w otoczeniu, w którym się porusza, jest jednym z podstawowych zagadnień robotyki. Istnieje wiele metod lokalizacji, ale najczęściej stosowaną, ze względu na niski koszt jest odometria [4][3], która umożliwia dokładne określenie przemieszczeń w przypadku, gdy czas jazdy pojazdu jest krótki. Podstawową wadą odometrii jest jednak to, że niedokładności kumulują się w czasie. Jest to spowodowane błędami systematycznymi np. nierównościami kół, ograniczoną rozdzielczością dekodatorów i błędami przypadkowymi np. poślizgami kół, nierównościami podłoża. Od lat rozwijane są także inne metody lokalizacji, które możemy podzielić na kilka grup. Do pierwszej należy zaliczyć badanie przemieszczeń względem sztucznych znaczników aktywnych (np. ultradźwiękowych) lub pasywnych. W tym podejściu stosuje się najczęściej triangulację.

Inną metodą lokalizacji jest określanie położenia robota na podstawie map wektorowych lub rastrowych [5]. W metodzie tej dane pochodzące z sensorów są porównywane z danymi przechowywanymi w mapie i na tej podstawie określone zostaje położenie i orientacja robota.

Podstawową wadą wymienionych powyżej metod jest to, że aby mogły być stosowane, to musi być znana mapa otoczenia i/lub dokładne położenie znaczników. Ostatnio rozwijane są metody, w których nie zakłada się wiedzy o środowisku, a robot sam znajduje cechy charakterystyczne otoczenia i określa swoje przemieszczenie względem wybranych znaczników. Wybrany obiekt powinien posiadać cechy, które nie zależą od położenia robota i jego wybór jest ściśle związany z rodzajem sensorów w jakie pojazd jest wyposażony. W przypadku, gdy robot obserwuje otoczenie przy pomocy

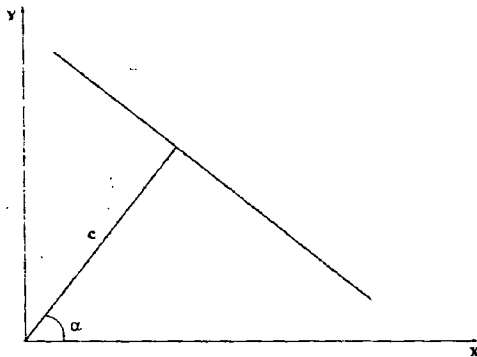
kamery, będzie to obiekt o unikalnym kolorze lub kształcie, a w przypadku czujników aktywnych znacznikami mogą być ściany, naroża, wnęki lub drzwi. W metodzie opisywanej poniżej na podstawie wskazań laserowego czujnika odległości znajdowane są fragmenty przeszkód, które można opisać łamaną. Następnie, porównywane są położenia wykrytych segmentów przy kolejnych przemieszczeniach robota. Metoda oparta jest na zastosowaniu transformaty Hough'a.

2. TRANSFORMATA HOUGH'A

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

$$x \cos \alpha + y \sin \alpha = c \quad (1)$$

gdzie α - jest kątem między normalną do danej prostej, a osią OX, c - jest odległością w kierunku normalnym danej prostej od punktu $(0,0)$.

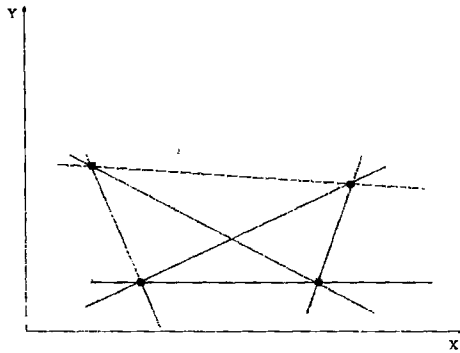


Rysunek 1: Reprezentacja punktu w transformacie Hough'a

Jeśli przyjmiemy pewną dyskretyzację przestrzeni, to dla każdego punktu płaszczyzny (x,y) możemy wyznaczyć rodzinę prostych na których punkt leży, a więc także rodzinę par (α,c) . Jeśli utworzymy tablicę dwuwymiarową i element (α,c) zapamiętuje, ile pikseli obrazu leży na wyznaczonej przez tę parę prostej, to element o największej wartości w sposób jednoznaczny wyznacza najdłuższy odcinek na obrazie.

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 nieuwzględniona jest kolejność punktów i ich wzajemna odległość. Na rysunku (2) przedstawiono przykładowy obraz składający się z czterech punktów. Stosując doń transformatę Hougha otrzymamy równania sześciu prostych, które pozwolą na wyodrębnienie tyłuż odcinków o jednakowej długości w sensie opisanego przekształcenia, jednak różniących się w sensie miary euklidesowej.

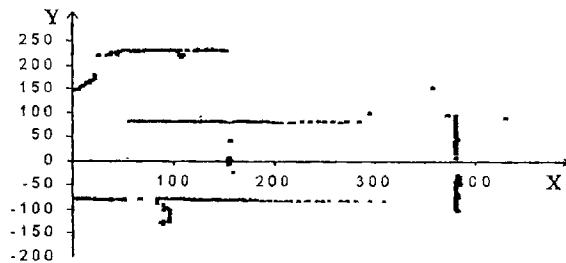
Z wymienionych powyżej powodów opisana powyżej metoda nie może być bezpośrednio stosowana do wykrywania fragmentów przeszkód, w przypadku, gdy dane pochodzą z czujników aktywnych.



Rysunek 2: Rodzina prostych wygenerowana przy pomocy transformaty Hough'a

2. OKREŚLENIE ORIENTACJI ROBOTA

W tym rozdziale przedstawione zostaną wyniki testów i porównanie wcześniej publikowanej metody d-histogramów[3][10] z klasyczną transformatą Hough'a. Wyniki wskazań laserowego czujnika odległości możemy traktować jak obraz. Piksel (x,y) ma wartość niezerową, jeśli w obszarze odpowiadającym (x,y) zostanie wykryty fragment przeszkody. Rysunek (3) przedstawia dane pochodzące z dalmierza laserowego. Czarnymi kropkami zaznaczono miejsca w których wykryte zostały przeszkody.



Rysunek 3: Dane pochodzące ze skanera laserowego

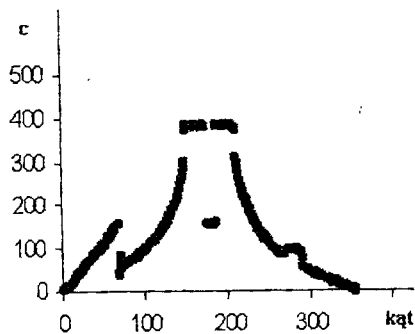
Współrzędne punktów (x,y) wyznaczamy z równania:

$$\begin{aligned} x &= x_r + R_l \cos \varphi \\ y &= y_r + R_l \sin \varphi \end{aligned} \quad (2)$$

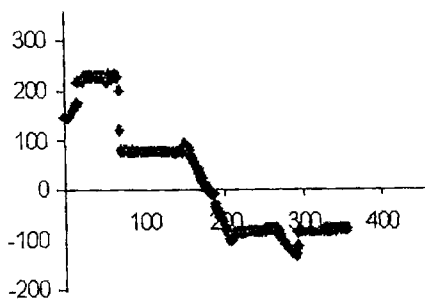
gdzie R_l jest wskazaną przez laser odległością od przeszkody, φ jest kątem skanowania, (x_r, y_r) – określa położenie robota. Przyjmując, że robot znajduje się w środku układu współrzędnych – punkcie $(0,0)$ i przekształcając równanie (1) otrzymujemy:

$$c = R_l \cos(\alpha - \varphi) \quad (3)$$

Z równania (3) wynika, że aby dokonać transformaty Hough'a nie musimy obliczać współrzędnych punktu, wystarczą dane o odległości od przeszkody przy danym kącie. Wykresy 4 i 5 przedstawiają wyniki zastosowania przekształcenia (3) dla danych z rysunku 3 dla $\alpha = 90^\circ$ i 0° . Na osi OX zaznaczono numery skanów. Na osi OY obliczone zgodnie ze wzorem 3 wartości parametru c . Punkty współliniowe, leżące na prostych wyznaczonych przez kąt α mają identyczne współczynniki c .



Rysunek 4: Wartości c dla kąta 0°



Rysunek 5: Wartości c dla kąta 90°

Idea metody polega na tym, że ciąg trójek $(c, \alpha, \text{liczba_pikseli})$ zastępujemy ciągiem $(c, \alpha, \text{długość_odcinka})$. Sposób obliczania długości odcinków jest następujący: dla każdego kąta $\alpha \in [0, 180]$ i ciągu odczytów lasera (R_i, φ_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 . Aby zredukować szumy i zwiększyć wiarygodność metody zakładamy, że przy rozdzielczości kąta skanowania 0.5° , długość ciągu powinna być dłuższa niż 5. Dla każdej sekwencji odczytów współliniowych obliczana jest długość wyznaczonego przez nie odcinka według wzoru:

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

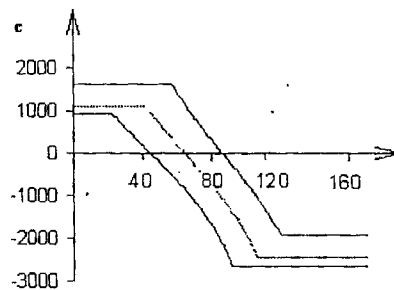
gdzie dl – jest długością segmentu, n, \dots, k są indeksami ciągu odczytów współliniowych, $\Delta\varphi$ jest jednostkowym skokiem kąta skanowania, r_n – n -ty odczyt lasera.

Badając sumę długości odcinków prostopadłych do poszczególnych kierunków możemy określić występowanie kierunków głównych. Zmiana kierunków głównych określa zmianę orientacji robota.

Opisywana metoda różni się od klasycznej implementacji transformaty Hough'a tym, że obliczana jest długość segmentu, a nie liczba punktów, które do danego segmentu należą. W przypadku czujników aktywnych jest to zaleta istotna, gdyż do segmentu „widzianego” z daleka należy mniej punktów niż do obserwowanego z niewielkiej odległości. W proponowanej metodzie uwzględnia się sąsiedztwo punktów, dzięki czemu unikamy wygenerowania linii pozornych. Jedną z możliwych implementacji opisywanej metody są d-histogramy dokładnie opisane i analizowane w pracy doktorskiej dr Artura Dubrawskiego [10].

3. OKREŚLENIE PRZESUNIĘCIA ROBOTA

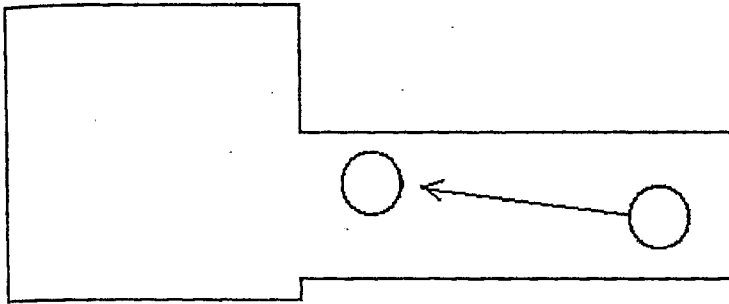
Wartość współczynnika c określa odległość robota od wyznaczonego fragmentu przeszkody w kierunku normalnym, to porównując wartości współczynników c obliczonych dla tego samego segmentu, ale obserwowanego z różnych punktów, możemy w sposób jednoznaczny określić przemieszczenie się robota w kierunku prostopadłym do danego segmentu [9] [10]. Na rysunku 6 przedstawiono wynik zastosowania przekształcenia (3) dla trzech różnych położzeń i orientacji robota w trzech kierunkach głównych.



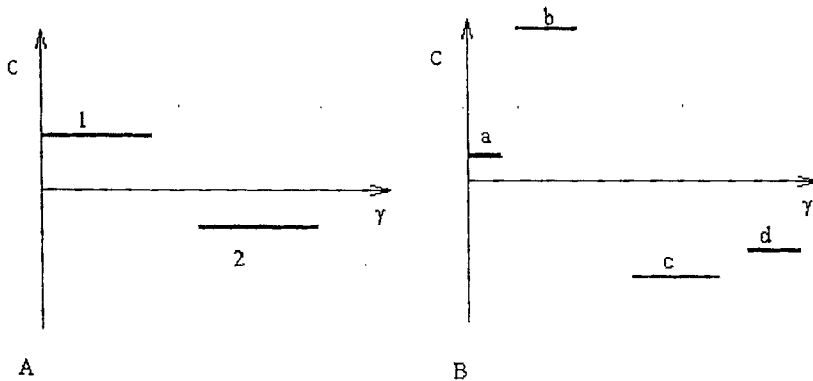
Rysunek 6: Zmiany wartości współczynników c na odpowiadających sobie kierunkach

Problem jest bardziej skomplikowany w przypadku, gdy w dwóch różnych położeniach robota widziana jest inna liczba odcinków, powstaje problem, które odcinki powinny zostać dopasowane. Jeśli robot porusza się np. w korytarzu to po określeniu kierunku ścian, różnica między obliczonymi dla dwóch ścian współczynnikami c w sposób jednoznaczny określa odległość między ścianami. Wartość ta nie jest zależna od położenia i orientacji robota. Analizując różnicę wartości współczynników c odcinków położonych na tych samych kierunkach można w sposób wiarygodny znaleźć pary odpowiadających sobie segmentów wykrytych z dwóch różnych położzeń robota (bez konieczności stosowania korelacji). Rysunek 7 przedstawia mapę otoczenia robota, rysunek 8 rozkład wartości współczynników c dla dwóch różnych położzeń pojazdu. Zgodnie z opisaną metodą odcinek 1 na rys. 8A odpowiada odcinkowi a na rysunku 8B, a odcinek 2 odpowiada odcinkowi d , gdyż różnica wartości

współczynników c jest taka sama dla odcinków 1 i 2, jak a i d oraz odcinek 1 leży po tej samej stronie robota co odcinek a , a odcinek d po tej samej stronie co odcinek 2.



Rysunek 7: Otoczenie robota



Rysunek 8: Rozkład wartości parametru c dla kierunku głównego i dwóch różnych położen robota

Podobna sytuacja występuje w przypadku odcinków nachylonych względem siebie. Wartość kąta nachylenia segmentów jest cechą niezmienniczą.

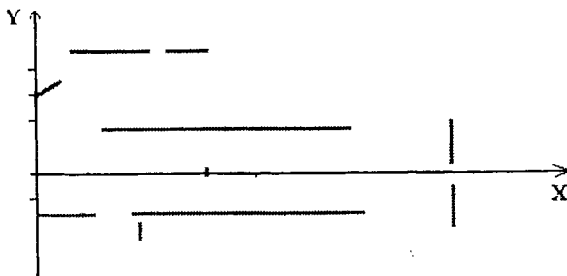
Algorytm określania przemieszczenia się robota jest następujący:

- Na podstawie danych pochodzących z lasera robot określa kierunki występowania największej liczby przeszkód w pomieszczeniu w którym się znajduje (opisaną w poprzednim rozdziale metodą).
- Dla znalezionych kierunków obliczane i zapamiętywane są wartości współczynników c
- Po przebyciu przez robota fragmentu drogi obliczane są nowe kierunki główne.

- Analizowane dane pochodzące z kolejnych odczytów i wyszukiwane są pary odpowiadających sobie segmentów.
- Dla każdego kierunku głównego obliczana jest różnica wartości współczynników c odpowiadających sobie segmentów, a następnie wartość średnia różnic. Liczba ta określa przemieszczenie w danym kierunku.

Analogiczny algorytm może być zastosowany do określania położenia robota w znanym otoczeniu – poszukujemy w mapie segmentów o odległości odczytanej z pomiarów (różnica wartości współczynnika c), a następnie określamy położenie robota względem znalezionych fragmentów. Proponowana metoda jest szybka i odporna na szumy.

Powyższą metodę testowano przy użyciu dalmierza laserowego firmy SIC. Przyrost kąta skanowania wynosi 0.5. Uzyskano błąd określania orientacji robota nie przekraczający 1° , a błąd współrzędnych 1cm.



Rysunek 9: *Metryczna mapa otoczenia zbudowana na podstawie odczytów przedstawionych na rys. 3.*

Przeprowadzono również przy pomocy symulatora eksperymenty, których celem było sprawdzenie jaki wpływ na dokładność korekcji orientacji robota ma jego prędkość. Największe błędy występują w przypadku, gdy robot porusza się pod kątem 45° do kierunków występowania największej liczby przeszkód i dla dużych prędkości (10m/s) błąd nie przekracza 3° , przy założeniu, że czujnik dostarcza 10 pełnych pomiarów otoczenia w ciągu 1s. Czas działania algorytmu określenia przemieszczenia robota w nieznanym otoczeniu nie przekracza 5ms, metoda może być więc stosowana w czasie rzeczywistym. Eksperymenty przeprowadzono na komputerze PC z zegarem 800Mhz.

W opisywanej powyżej implementacji transformaty Hough'a określany jest kierunek i długość segmentów otoczenia, a więc metoda może być stosowana także do budowy precyzyjnych metrycznych map otoczenia robota. Na rysunku 9 przedstawiono mapę otoczenia robota zbudowaną na podstawie wskazań pokazanych na rysunku 3.

4. WNIOSKI

W poniższej pracy przedstawiono implementację powszechnie znanej 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 opis symboliczny pomieszczeń. Czas działania algorytmu nie przekracza 5ms na komputerze z zegarem 800Mhz.

Chciałabym bardzo podziękować dr Bogdanowi Kreczmerowi, za pomoc w powstaniu powyższego artykułu i udostępnienie pomiarów uzyskanych z dalmierza laserowego.

LITERATURA

- [1] Duda O., Hart P., „Use of Hough Transformation To Detect Lines and Curves in Picture”, *Communication of the ACM*, 15(1), 1972
- [2] Burgard W., Armin B., Thrun S., „Position Estimation for Mobile Robot in Dynamic Environment”, *AAAI 98*, Madison, Wisconsin 1998
- [3] Bolles R.C., Bunke H., „Intelligent Robots – Sensing Modelling and Planning”, *World Scientific*, 1997
- [4] Borenstein J., Feng L., „Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots”, *Transactions on Robotics and Automation*, Vol.12, No.6, 1996.
- [5] Dudek G., Zhang C., „Vision-based robot localization without explicit object models”, *Proc. Int. Conf. Robotics and Automation*, 1996
- [6] Wijk O., Christensen H.I., „Sonar Based Pose Tracking Using Natural Landmarks”, *SIRS 1999*, Portugal, 1999, pp. 245 - 253.
- [7] Leonard J.J., Durrant-Whyte H.F., „Direct Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation”, *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht 1992
- [8] Gonzales R.C., „Digital Image Processing”, *Addison-Wesley*, 1987
- [9] B. Siemiątkowska, A. Dubrawski, „Cellular Neural Networks for Navigation of a Mobile Robot”, *R SCT'98*, June 1998
- [10] A. Dubrawski, *Neural Networks for self-localization of mobile robots*, doctoral thesis, 1999.