

Andrzej FORTUNA

Politechnika Śląska

METODA LOKALIZACJI ROBOTA MOBILNEGO W OTOCZENIU WZGLĘDEM PUNKTÓW CHARAKTERYSTYCZNYCH

Streszczenie: Przedmiotem pracy jest analiza wybranych elementów nawigacji autonomicznego robota mobilnego, poruszającego się w ograniczonej przestrzeni dwuwymiarowej, w której mogą znajdować się proste przeszkody, pomieszczenia, korytarze itp. System sensoryczny robota wykorzystuje laserowy dalmierz do analizy otoczenia i lokalizacji robota. W pracy przedstawiono metodę lokalizacji robota mobilnego w otoczeniu za pomocą pomiaru laserowym dalmierzem odległości do charakterystycznych punktów otoczenia ("latarni") o znanych współrzędnych i orientacji oraz kątów ich widzenia względem układu współrzędnych robota.

THE METHOD OF LOCALIZATION MOBILE ROBOT IN ENVIRONMENT IN RELATION TO CHARACTERISTIC POINTS

Summary: In this paper, problems of mobile robot navigation, which could navigate in two dimensional space, filled with simply obstacles, rooms, corridors etc are presented. Robots sensor system is using laser range-finder to analyse environment and localization of robot. In this paper is presented method of localization mobile robot in environment by laser range-finder measurement of distance to characteristic elements of environment ("lantern") with specified coordinates, orientations and angles in relation to robot coordinates.

МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА В СРЕДЕ ОТНОСИТЕЛЬНО ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ТОЧЕК

Резюме: В работе рассматривается анализ избранных элементов навигации автономного мобильного робота, движущегося в ограниченном двухмерном пространстве с простыми препятствиями, помещениями, коридорами. Сенсорная система робота использует лазерный дальномер к анализу среды и локализации робота. В работе представлен метод локализации мобильного робота в среде при помощи измерения лазерным дальномером расстояния до характеристических точек среды ("маркеры") с известными координатами и ориентацией, а также углов зрения относительно координат робота.

1. Wstęp

Autonomiczny Robot Mobilny (ARM) jest robotem potrafiącym samodzielnie poruszać się w otoczeniu o znanym lub nie znanym modelu, umiejący reagować na dynamiczne zmiany tego otoczenia, posiadający możliwość omijania przeszkód lokalnych, samodzielnego tworzenia obrazu (modelu wewnętrznego, mapy) otoczenia i rozwiązywania zadań związanych z nawigacją w tym otoczeniu.

Jednym z ważniejszych podsystemów systemu sterowania robotem mobilnym jest podsystem nawigacji. Podsystem nawigacji w celu spełnienia wymagań przedstawionych powyżej powinien umożliwiać:

- lokalizację, tj. określenie wszystkich podstawowych parametrów określających położenie i orientację ARM w otoczeniu,
- lokalizację obiektów otoczenia oraz ich współrzędnych,
- tworzenie i modyfikowanie obrazu (mapy) otoczenia,
- wyszukiwanie bezkolizyjnej trajektorii w celu realizacji zadań,
- omijanie przeszkód lokalnych.

Inteligentny system nawigacji powinien dodatkowo realizować strukturalizację obrazu otoczenia na potrzeby hierarchicznego planowania zadań, a także powinien umożliwiać uczenie się robota poruszania w środowisku roboczym.

Schemat blokowy systemu nawigacji jest przedstawiony na rys. 1.

Realizacja zadania przemieszczenia robota do zadanego położenia końcowego, sformułowana przez system planowania zadań, wymaga wstępnej dekompozycji zadania na zadania cząstkowe i alternatywne. Każde zadanie cząstkowe jest przez system planowania trajektorii lokalnej (na podstawie modelu topologicznego otoczenia) przekazywane do układów wykonawczych robota, które realizują wyznaczoną trajektorię. Tę część systemu można nazwać częścią wykonawczą dla przemieszczeń ARM w otoczeniu.

System sensoryczny robota mobilnego nie jest częścią systemu nawigacji, dostarcza jednak niezmiernie istotnych danych dla tego systemu. Im więcej informacji o świecie zewnętrznym system sterowania może otrzymać, tym jego potencjalne możliwości inteligentnego zachowania się w nim są większe. System nawigacyjny potrzebuje dwóch rodzajów informacji :

1. dane o zbliżaniu się do lokalnych przeszkód, nie będących elementami stałymi otoczenia, w celu zapewnienia możliwości ich ominięcia lub podjęcia przez system sterowania

innych decyzji, mogących zmienić realizację zadań. W tym celu stosuje się proste czujniki zbliżeniowe np. ultradźwiękowe [7],[1],

2. dane o położeniu robota w otoczeniu oraz dane o położeniu innych obiektów, niezbędne do lokalizacji robota oraz do tworzenia modelu otoczenia. W projekcie badawczym HILARE[7] wykorzystano do tego celu dalmierz laserowy umieszczony na obrotowej głowicy oraz kamerę wizyjną.

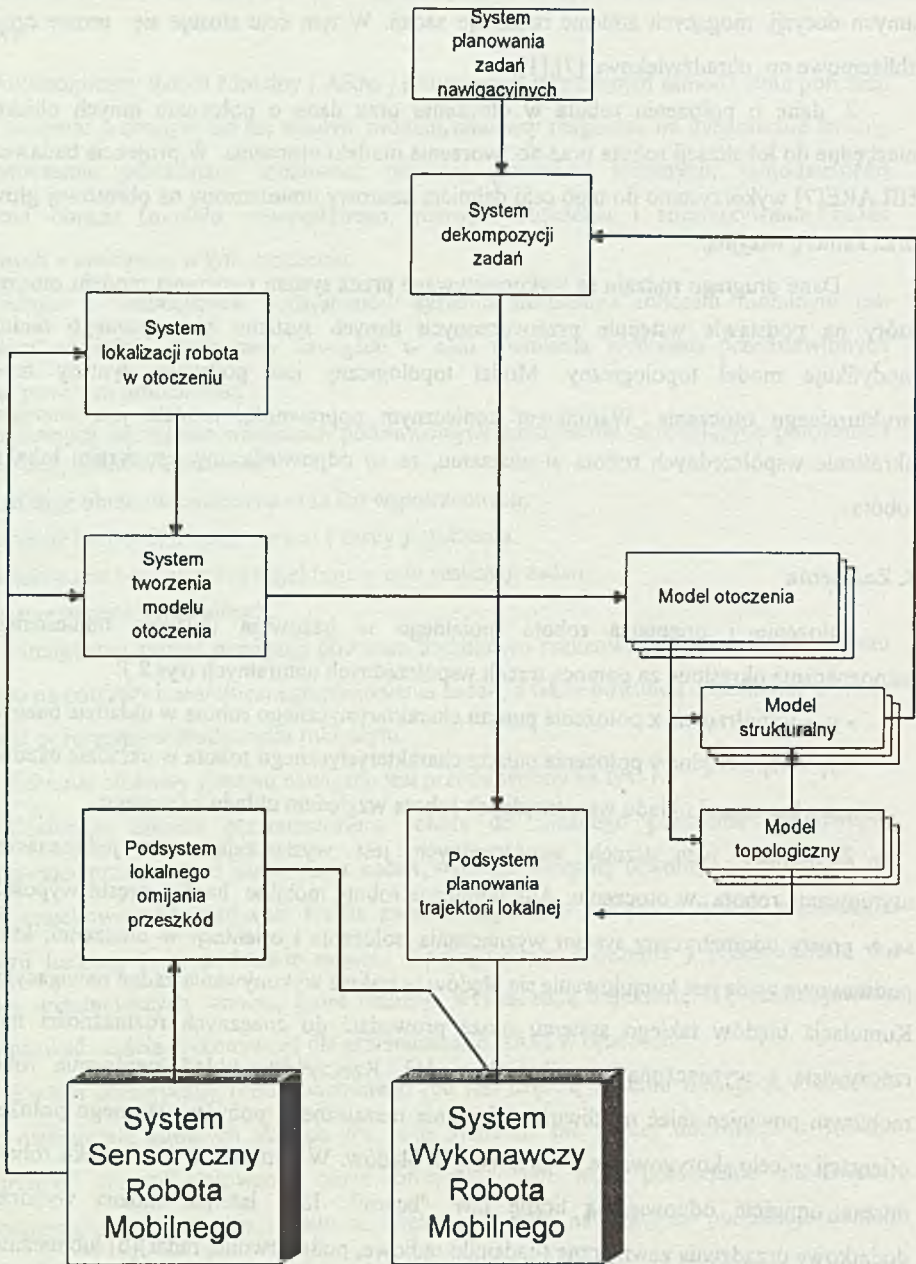
Dane drugiego rodzaju są wykorzystywane przez system tworzenia modelu otoczenia, który na podstawie wstępnie przetworzonych danych systemu sensorycznego buduje i modyfikuje model topologiczny. Model topologiczny jest podstawą syntezy modelu strukturalnego otoczenia. Warunkiem koniecznym poprawności modelu jest wiarygodne określenie współrzędnych robota w otoczeniu, za co odpowiedzialny jest system lokalizacji robota.

2. Założenia

Położenie i orientacja robota mobilnego w bazowym układzie odniesienia są jednoznacznie określone za pomocą trzech współrzędnych naturalnych (rys.2.):

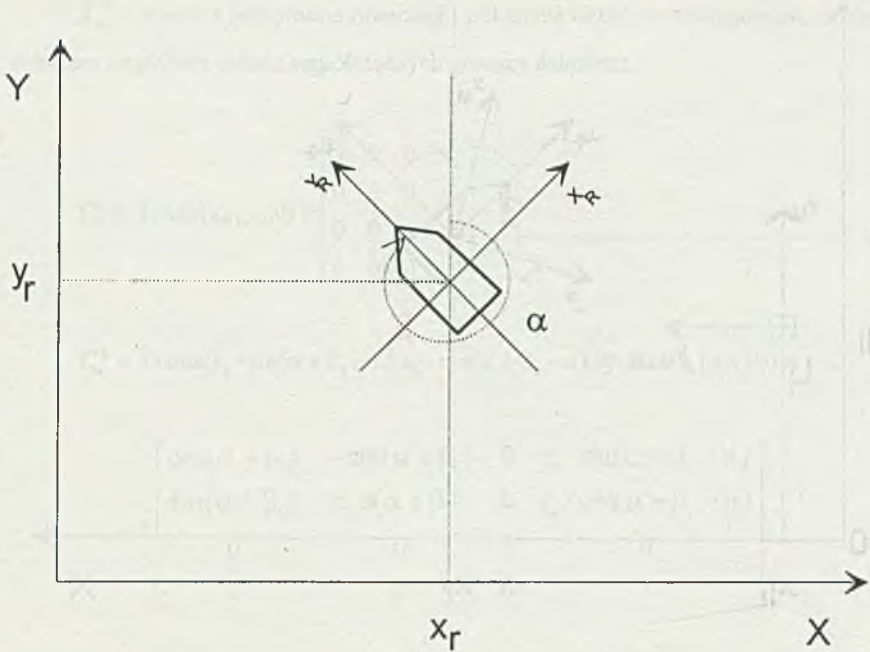
- x_r - współrzędna x położenia punktu charakterystycznego robota w układzie bazowym,
- y_r - współrzędna y położenia punktu charakterystycznego robota w układzie bazowym,
- α - kąt rotacji układu współrzędnych robota względem układu bazowego.

Znajomość tych trzech współrzędnych jest wystarczająca do jednoznacznego usytuowania robota w otoczeniu. Autonomiczne roboty mobilne bardzo często wyposażone są w prosty odometryczny system wyznaczania położenia i orientacji w otoczeniu, którego podstawową wadą jest kumulowanie się błędów w trakcie wykonywania zadań nawigacyjnych. Kumulacja błędów takiego systemu może prowadzić do znacznych rozbieżności między rzeczywistą i wyznaczoną pozycją robota [1]. Rzeczywisty układ sterowania robotem mobilnym powinien mieć możliwość dokonania niezależnego pomiaru własnego położenia i orientacji w celu skorygowania występujących błędów. W tym celu w środowisku roboczym można umieścić odpowiednią liczbę tzw. "latarni". Jako latarnie można wykorzystać dodatkowe urządzenia zewnętrzne (nadajniki radiowe, podczerwone, radar)[6] lub niezmiennie elementy otoczenia robota (budynki, słupy, ściany). Układ sensoryczny robota musi mieć możliwość identyfikacji każdej latarni i wzajemnej lokalizacji, co powinno wystarczyć do wyznaczenia lokalizacji robota w układzie bazowym.



Rys. 1. Schemat blokowy systemu nawigacji ARM

Fig. 1. Schematic diagram of ARM navigation system



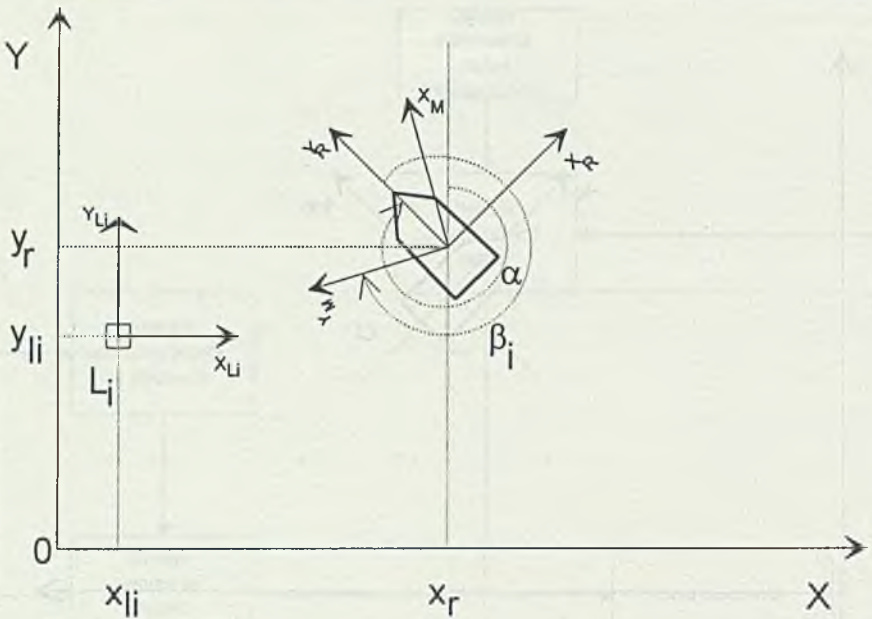
Rys.2. Układ współrzędnych robota mobilnego $X_R Y_R$ względem układu bazowego

Fig.2. Coordinates system of mobile robot $X_R Y_R$ in relation to base coordinates

W systemach triangulacyjnych do wyznaczenia położenia (x i y) w sposób jednoznaczny wystarczy pomiar odległości do trzech latarni, pozostaje jednak nieznaną orientacją robota. Poniżej zaproponowano metodę wyznaczenia położenia i orientacji robota w oparciu o pomiar odległości i kąta widzenia dwóch latarni za pomocą dalmierza laserowego, umieszczonego na obrotowej głowicy układu jeźdnego robota. Na rys. 3. przedstawiono ideę takiego pomiaru.

Poszczególne układy współrzędnych to:

- OXY - bazowy układ odniesienia,
- $OX_R Y_R$ - układ współrzędnych skojarzonych z robotem mobilnym,
- $OX_M Y_M$ - układ współrzędnych związany z obrotową głowicą dalmierza,
- $OX_{Li} Y_{Li}$ -układ współrzędnych skojarzony z i-tą latarnią.



Rys.3. Układ współrzędnych skojarzony z robotem mobilnym

Fig.3. Coordinates system concerned with mobile robot.

3. Model matematyczny

Położenie i orientację robota w bazowym układzie odniesienia z wykorzystaniem *i*-tej latarni można przedstawić za pomocą macierzy jednorodnej $T_R^{o,u}$, która jest równa :

$$T_R^{o,u} = T_L^o \cdot T_M^u \cdot T_R^M \quad (1)$$

gdzie

$T_R^{o,u}$ - macierz jednorodna orientacji i położenia układu współrzędnych robota względem układu bazowego, wyrażona poprzez *i*-tą latarnię,

T_L^o - macierz jednorodna orientacji i położenia układu współrzędnych, skojarzonego z *i*-tą latarnią względem układu bazowego,

T_M^u - macierz jednorodna orientacji i położenia układu współrzędnych, skojarzonego z głowicą obrotową dalmierza laserowego względem układu współrzędnych *i*-tej latarni,

T_R^M - macierz jednorodna orientacji i położenia układu współrzędnych, skojarzonego z robotem względem układu współrzędnych głowicy dalmierza.

$$T_U^O = \text{Trans}(x_{ii}, y_{ii}, 0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{ii} \\ 0 & 1 & 0 & y_{ii} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_M^U = \text{Trans}(r_{ii} \cdot \sin(\alpha + \beta_1 - \pi), r_{ii} \cdot \cos(\alpha + \beta_1 - \pi), 0) \cdot \text{Rot}(z, (\alpha + \beta)) =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\alpha + \beta_1) & -\sin(\alpha + \beta_1) & 0 & r_{ii} \cdot \sin(\alpha + \beta_1 - \pi) \\ \sin(\alpha + \beta_1) & \cos(\alpha + \beta_1) & 0 & r_{ii} \cdot \cos(\alpha + \beta_1 - \pi) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_R^M = \text{Rot}(z, 2\pi - \beta_1) = \begin{bmatrix} \cos\beta_1 & \sin\beta_1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta_1 & \cos\beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Przyjęto następujące założenia dotyczące powyższych układów współrzędnych :

- wszystkie układy współrzędnych skojarzone z latarniami posiadają orientację zgodną z układem bazowym (2),
- oś obrotu głowicy dalmierza jest zaczepiona w punkcie charakterystycznym robota i nie występuje tutaj dodatkowa translacja (4),
- β_1 jest kątem pomiędzy osią Y_R układu współrzędnych skojarzonych z robotem a osią Y_M układu współrzędnych głowicy i jest wielkością znaną dla układu sterowania,
- x_{ii} oraz y_{ii} są współrzędnymi i-tej latarni w układzie odniesienia i są wielkościami znanymi oraz niezmiennymi,
- r_{ii} jest odległością wyznaczoną w wyniku pomiaru pomiędzy głowicą dalmierza a i-tą latarnią.

Po podstawieniu (2),(3) i (4) do (1) otrzymujemy następującą postać macierzy jednorodnej $T_R^{o,u}$:

$$T_R^{o,u} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 & r_{ii} \cdot \sin(\alpha + \beta_i - \pi) + x_{ii} \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 & r_{ii} \cdot \cos(\alpha + \beta_i - \pi) + y_{ii} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Ponieważ orientacja i położenie robota w bazowym układzie odniesienia jest niezależne od wybranej latarni, zachodzi następująca równość:

$$T_R^{o,u} = T_R^{o,u} \quad (6)$$

Równość ta jest nietrywialna dla $i \neq j$.

Z (5) i (6) wynika następujący układ równań będący podstawą obliczania współrzędnych położenia i orientacji robota w otoczeniu:

$$\begin{aligned} r_{ii} \cdot \sin(\alpha + \beta_i - \pi) + x_{ii} &= r_{ij} \cdot \sin(\alpha + \beta_j - \pi) + x_{ij} \\ r_{ii} \cdot \cos(\alpha + \beta_i - \pi) + y_{ii} &= r_{ij} \cdot \cos(\alpha + \beta_j - \pi) + y_{ij} \end{aligned} \quad (7)$$

Układ równań (7) pozwala na wyznaczenie kąta α , a następnie współrzędnych położenia x_R oraz y_R na podstawie wzorów:

$$\begin{aligned} x_R &= r_{ii} \cdot \sin(\alpha + \beta_i - \pi) + x_{ii} \\ y_R &= r_{ii} \cdot \cos(\alpha + \beta_i - \pi) + y_{ii} \end{aligned} \quad (8)$$

Przeprowadzone testy symulacyjne za pomocą programu Mathematica for Windows v.2.1 pokazały, że wzory (7) i (8) określają położenie i orientację robota w sposób jednoznaczny na podstawie współrzędnych dwóch latarni oraz kątów β_i oraz β_j . Szczegółowe przykłady obliczeniowe zaprezentowano w pracy [11].

4. Wnioski i uwagi końcowe

Przedstawiony w pracy sposób lokalizacji robota na podstawie informacji sensorycznej pozwala na jednoznaczne określenie jego pozycji i orientacji względem bazowego układu odniesienia. Metoda ta może być wykorzystana w praktyce, gdyż większość badawczych autonomicznych robotów mobilnych wyposażona jest w sensor pomiaru odległości do obiektów znajdujących się w bezpośrednim otoczeniu robota.

W wielu projektach badawczych [7] [1] również wykorzystuje się różnego rodzaju układy triangulacyjne, względem których robot może określać swoje położenie. Ogranicza to jednak środowisko działania robota do przestrzeni, w której rozmieszczono odpowiednią liczbę latarni. Zaproponowana metoda może określać położenie i orientację robota w środowisku względem dowolnych obiektów, które system sensoryczny może rozpoznać. Dzięki temu w przypadku przesłonięcia przez inny obiekt latarni, jej rolę może przejąć inny element otoczenia, który został rozpoznany we wcześniejszej fazie modelowania otoczenia, dla którego znane są współrzędne i orientacja. Pomocny w takich przypadkach może być również inercyjny system nawigacyjny.

Przedstawiona metoda wymagałaby jednak uogólnienia, zapewniającego robotowi lokalizację trójwymiarową.

LITERATURA

- [1]. Cox I.J., *Autonomous Robot Vehicles*, Springer-Verlag, 1990.
- [2]. Borkowski A. et in., *Grid-based mapping for autonomous mobile robot*, *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 11, Number 1, May 1993.
- [3]. Craig I.I., *Introduction to Robotics. Mechanics and Control*, Addison-Wesley Publ., 1986.
- [4]. Szkodny T., *Manipulatory robotów przemysłowych. Modele matematyczne*. Skrypt Pol. Śl. nr 1530, Gliwice 1990.
- [5]. C.Cordell Green, *Application of Theorem Proving to Problem Solving*; in B.L.Webber, N.J.Nilsson, *Readings in Artificial Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers, 1981.
- [6]. R.Fikes, P.Hart, N.Nilsson, *Learning and Executing Generalized Robot Plans*, in B.L.Webber, N.J.Nilsson, *Readings in Artificial Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers, 1981.
- [7]. G.Giralt, *Mobile Robot*, in M.Brady, L.Gerhardt, H.Davidson, *Robotics and Artificial Intelligence*, Springer Verlag, 1984.

- [8]. L.Boissier, Modelisation de l'Environnement et Localisation du Robot Mobile HILARE par Telemetrie Laser, Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systemes, Toulouse,1985, Praca doktorska.
- [9]. D.Michie, On Machine Intelligence, Ellis Horwood Limited, 1986.
- [10] K.S.Fu, R.C.Gonzales, C.S.G.Lee, Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence, McGraw-Hill Book Company, 1989.
- [11] A.Fortuna, "Wybrane problemy nawigacji inteligentnym robotem mobilnym. Praca badawcza realizowana w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej BW-326/RAu1/93, temat 14. Praca niepublikowana.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Jerzy Cyklis

Wpłynęło do redakcji do 30.04.1994r.

Abstract

In this paper problems of navigation of mobile robot, which could navigate in two dimensional space filled with simply obstacles, rooms, corridors etc are presented. A robot sensor system uses laser range-finder to analyse environment and localization of a mobile robot. In the environment there are some objects called "lantern", which coordinates and orientation related to base coordinate system are known.

A robots localization system can define coordinates and orientation of the robot in the environment using measurement of distance to two different "lantern" and angles related to robot coordinate system. An idea of this method is shown in fig.3. This method can be used to a wide class of mobile robots, because most of them are equipped with range-finder sensor. The localization of a mobile robot in the environment computed by this method is uniquely defined.

When predefined "lantern" are invisible to a robot sensor system, the localization system can use other objects, which coordinates and orientation in environment are known or use inertial navigation methods.