

**Teodora DIMITROVA-GREKOW, Monika Beata ZACH**POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA  
ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok**Asocjacyjno-metryczny sposób planowania drogi w zamkniętej przestrzeni****Dr inż. Teodora DIMITROVA - GREKOW**

Ukończyła studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Sofijskiej, Bułgaria w 1991r., obroniła pracę doktorską na Uniwersytecie Technicznym w Wiedniu w 1997r. Jest adiunktem na Wydziale Informatyki przy Politechnice Białostockiej. Jej zainteresowania naukowe to synteza układów programowalnych, robotyka, mechatronika, analiza i przetwarzanie sygnałów.



e-mail: t.grekow@pb.edu.pl

**Mgr inż. Monika Beata ZACH**

Monika Beata Zach uzyskała tytuł inżyniera informatyki w 2010 roku. Studia ukończyła w 2011 z tytułem magistra inżyniera na kierunku informatyka w specjalności Grafika i Multimedia. Od 2011 pracuje jako programista. Zainteresowania naukowe to bazy danych, aplikacje internetowe, przetwarzanie obrazów oraz robotyka.



e-mail: monikazach13@gmail.com

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono eksperyment posługujący się metodą hybrydową: asocjacyjno-wizyjne podejście - adaptacja metody QualNav oraz pomiar odległości. Do praktycznej realizacji użyte robot Lego Mindstorms NXT 2.0, kamera telefonu komórkowego oraz sonar. Eksperymenty wykazały dużą skuteczność wykonanych poleceń. Scenariusz jest bardzo aktualny dla realizacji zadań autonomicznego poruszania się w dużych salach gdzie często pozycja i orientacja przedmiotów (krzesła, fotele, skrzynie itd.) nie jest stała.

**Słowa kluczowe:** roboty mobilne, nawigacja, lokalizacja, metryczno-topologiczne strategie, edukacyjne roboty, Mindstorms NXT.

**Topological-metric indoor path planning****Abstract**

Quality strategies used in mobile robot navigation [4][6] can be successfully supplemented by quantity ones [2, 8]. In this paper we present a path-planning approach based on a hybrid [1][7], topological-metric strategy. It is based on topological navigation [5] adapted to enclosed spaces, expanded with sonar data-updating. The landmarks are assumed to possess properties common to those of office furniture, additionally marked with a color – a time-saving simplification (Fig. 1). Measurements of the distance have a secondary role: the distance was only measured if unambiguous identification of the registered objects was not obtained. What is significant in this approach is that parts of the landmarks have a non-steady position: instead by a fixed point, their presence is described by a zone (Fig. 2). The main task executed by a vehicle is to follow a route achieving the end position. The command structure (giving the route) is a data sequence – edges which have to be crossed over by the robot (Fig. 3). Besides odometry difficulties [3, 8], the great localization accuracy and the time impact of the scanning angle of a robot (Fig. 4) was experimentally proved. Dependencies between the precision of task-execution (accuracy of position achievement), work duration and the scan-angle used by the robot were examined and described. All final observations are presented in Tab.1. The scan-angle of about 25° was suggested based on investigations. The used scenario is very suitable for large office halls, where the position of the objects (chairs, armchairs, chests, etc.) is often not constant.

**Keywords:** mobile robotics, navigation, topological-metric strategies, educational robots.

**1. Wstęp**

Zdolność nawigowania to podstawowa cecha autonomicznych pojazdów. Stąd jednym z najpopularniejszych obszarów badań w robotyce mobilnej jest nawigacja, czyli najogólniej mówiąc, określanie bieżącego położenia robota w danym środowisku oraz wyznaczenie drogi do osiągnięcia założonego celu [3].

Istnieją dwie podstawowe kategorie planowania drogi: topologiczna i metryczna. Przy pierwszym podejściu nie ma konieczności brania pod uwagę informacji o rozmiarach obiektów ani

odległościach do/pomiędzy nimi, ponieważ mapę topologiczną można zdefiniować jako graf. Ten fakt tłumaczy popularność stosowania rozwiązań topologicznych w przestrzeniach otwartych. Ze względu na brak danych szczegółowych, interpretacja mapy topologicznej należy do procesów skomplikowanych w przypadku grafów złożonych [4]. Metryczne planowanie natomiast jest budowane w oparciu o mapy metryczne. Główną różnicę pomiędzy mapą topologiczną a metryczną stanowi fakt, iż mapa metryczna zawiera informacje o rozmiarze obiektów oraz o odległościach pomiędzy nimi. Najczęściej zbudowana jest ona na podstawie siatki zajętości, której odpowiednio przeskalowane pola odzwierciedlają obiekty w rzeczywistym środowisku oraz relacje pomiędzy nimi. Mapa metryczna ze względu na dużą ilość informacji jest łatwa w interpretacji, ale wymaga też większych zasobów pamięciowych [2].

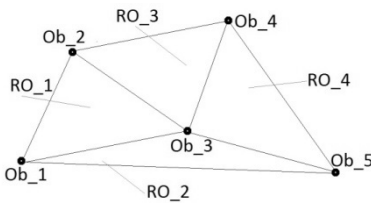
Nawigacja autonomicznych pojazdów poruszających się w przestrzeniach zamkniętych najczęściej realizowana jest na bazie metrycznych sposobów lokalizacji i planowania drogi.

W tym artykule zostanie przedstawiony eksperyment posługujący się metodą hybrydową: z jednej strony głównym orientacyjnym narzędziem są asocjacje wizyjne, tradycyjnie używane w przestrzeniach otwartych, a z drugiej – klasyczne pomiary odległości. Do realizacji orientacji wizyjnej wykorzystany został obraz z kamery telefonu komórkowego znajdującego się na pokładzie robota eksperymentalnego. Kamera pozwala na szybką rejestrację znacznej części przestrzeni (w porównaniu do któregośkolwiek z innych możliwych dalmierzy). Jednak obróbka danych w celu estymacji odległości na podstawie zdobytych obrazów, wymagała dużych nakładów obliczeniowych [6, 4]. Optymalne ze względu na czas, sprzęt i moc obliczeniową, okazało się użycie dalmierza ultradźwiękowego zamontowanego w przedniej części pojazdu. Pomiary odległości mają wtórną rolę: odległość była mierzona tylko i wyłącznie wtedy kiedy nie była możliwa jednoznaczna identyfikacja zarejestrowanych obiektów. Stosowana metoda asocjacyjna to zmodyfikowana wersja metody QualNav [5]. Zaprezentowany asocjacyjno-metryczny sposób planowania drogi został zaimplementowany na edukacyjnym robocie mobilnym Lego NXT Mindstorms za pomocą środowiska programowego Microsoft Robotics Development Studio MRDS R2 i Visual Studio 2010. Badania wykazały, że aby zmniejszyć wartości błędów odometrycznych [2, 3, 8] robot powinien obracać się o jak najmniejszy kąt przy mocy względnej silników zmniejszonej do minimum. Eksperymenty wykazały dużą skuteczność wykonanych poleceń. Scenariusz jest bardzo aktualny do realizacji zadań autonomicznego poruszania się w dużych salach, gdzie często pozycja i orientacja przedmiotów (krzesła, fotele, skrzynie itd.) nie jest stała.

## 2. Hybrydowe, topologiczno-metryczne podejście do planowania drogi

Istnieje niemała grupa podejść hybrydowych – kombinacje różnych cech planowań topologicznych i metrycznych [7, 1]. W niniejszej propozycji połączone zostały zmodyfikowana wersja metody asocjacyjnej QualNav z metrycznym podejściem w oparciu o dalmierz ultradźwiękowy.

Algorytm QualNav polega na wybraniu z danego obszaru i zapamiętaniu kilku łatwych do zidentyfikowania punktów orientacyjnych. Rozpoznanie obiektów  $Ob_i, i=1..m$  (rys. 1) odbywa się za pomocą niezmiennych, wyróżniających dany obiekt cech, takich jak kolor, kształt lub tekstura. Następnie pary punktów orientacyjnych zostają połączone linią, tworząc w ten sposób wirtualny podział obszaru na regiony orientacyjne  $RO_j, j=1..m-1$  (rys. 1). Zostaje skonstruowana sieć ścieżek pozwalająca na przemieszczanie się bezpośrednio pomiędzy kolejno widzianymi obiektami. Przekroczenie danego obszaru orientacyjnego jest równoważne z przejściem pomiędzy dwoma punktami orientacyjnymi. Robot będzie zatem posiadał wiedzę o tym w jakim regionie orientacyjnym się obecnie znajduje i jakie obiekty musi znaleźć, aby przejść do kolejnych regionów prowadzących do celu. Wiedza o własnej lokalizacji w dużej przestrzeni jest kombinacją odległości i orientacji, która jest wyrażona w odniesieniu do aktualnego obiektu i punktu odniesienia [6, 4, 5].

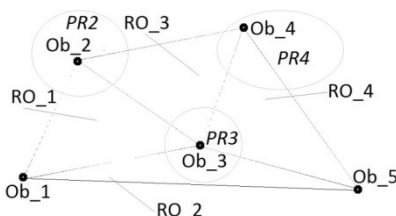


Rys. 1. Reprezentacja topologiczna w postaci regionów orientacyjnych  $RO_j$   
Fig. 1. Topological representation of the orientation regions  $RO_j$

Nowością w niniejszym rozwiązaniu jest koncepcja znaczników. Muszą one odpowiadać na następujące założenia:

- Indywidualna kolorystyka – warunek zapewnia łatwą identyfikację obiektów, co gwarantuje szybkie działanie systemu nawet dla skomplikowanych grafów;
- Charakterystyczne kształty – używane w biurach, urzędach, do których jest skierowana domyślnie idea wdrożenia projektu.

W odróżnieniu od oryginalnego zamysłu, tu scenariusz przyjmuje domyślnie pracę w przestrzeni zamkniętej, w której jest dużo jednakowych znaczników – biurka, krzesła, szafki. Część z obiektów ma pozycję i orientację stałą, natomiast część ma prawo być ruchoma. Jednak każdy z obiektów ruchomych ma a priori zdefiniowaną *przestrzeń roboczą*  $PRk, k=1..n, n \leq m$ , z której nie wychodzi (rys. 2).



Rys. 2. Reprezentacja topologiczna uwzględniająca przestrzenie robocze  
Fig. 2. Topological representation considering the presence zones of the objects

Zadania robota zawsze składają się z przynajmniej dwóch etapów. Pierwszy to podjechanie do konkretnego regionu  $RO_x$ , co jest obiektem rozważań w tym artykule. Formalnie robot dostaje sekwencję z  $n$  uporządkowanych par:

$$\{(Ob_{-1}, Ob_{-2}), (Ob_{-2}, Ob_{-3}), \dots, (Ob_{-n-1}, Ob_{-n})\} \quad (1)$$

Każda para obiektów określa kolejną krawędź grafu, przez którą robot ma przejechać [3].

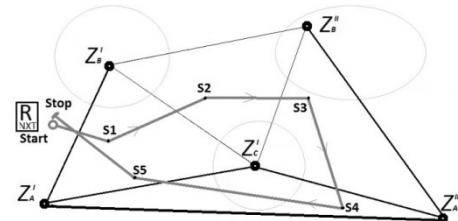
W przypadkach, kiedy początek  $n$ -tej pary pokrywa się z końcem pary poprzedzającej  $n-1$ , notacja może być uproszczona notując tylko raz powtarzające się elementy, tzn. zamiast:

$$\{ \dots (Ob_{i-2}, Ob_{i-1}), (Ob_{i-1}, Ob_i), (Ob_{i+1}, Ob_{i+2}), \dots \} \quad (2)$$

zapisalibyśmy:

$$\{ \dots Ob_{i-2}, Ob_{i-1}, Ob_i, (Ob_{i+1}, Ob_{i+2}), \dots \} \quad (3)$$

Charakterystyczny kształt znaczników umożliwia zastosowanie jednego z najprostszych narzędzi do rozpoznawania obiektów – czujnika ultradźwiękowego (sonar). Stabilny w szerokim zakresie, sonar jest idealnym detektorem prostopadłościów lub bloków prostokątnych. Dobrze można nim rozpoznać formę cylindryczną, a również jednoznacznie zidentyfikować kant prostopadłości. Skoro przyjęliśmy że, występuje tylko kilka różnych znaczników wielokrotnie powtórzonych, można wywnioskować, że jeżeli zdefiniujemy typy znaczników  $A..N$ , to wszystkie znaczniki typu  $A$  mogłyby być zapisane jako  $Z_A$ . Ich wyróżnikiem byłby indeks górny opisujący kolejność danego typu znacznika na mapie topologicznej z punktu startowego robota. W ten sposób otrzymujemy następującą notację znaczników:  $Z_A^N$ , a mapa topologiczna z rys. 2 będzie miała postać jak na rys. 3.



Rys. 3. Reprezentacja topologiczna: znaczniki i kontury  
Fig. 3. Topological representation: landmarks and edges

## 3. Eksperymenty

Przeprowadzone badania miały na celu zweryfikowanie skuteczności teoretycznych założeń. Pierwotnie testy wykonywały następujący scenariusz: robot przejeżdżał wielokrotnie zadaną ścieżkę, przy czym obserwowana była dokładność i szybkość wykonania sekwencji ruchów.

W trakcie badań zauważono, iż bardzo istotny wpływ na dokładność wykonania zadania ma kąt  $\theta$  – najmniejszy skręt robota podczas skanowania terenu. Jego wielkość jest odwrotnie proporcjonalna do dokładności pracy systemu, a proporcjonalna do czasu wykonania jazdy. Stąd szczególnie interesujące okazały się badania wpływu kąta  $\theta$  na pracę systemu.

Dalej zostaną opisane badania, bazujące na rozstawieniu znaczników jak pokazano na rys. 3. Pokonywana przez robota droga odpowiada sekwencji:

$$\{Z_A^I, Z_B^I, Z_C^I, Z_B^{II}, (Z_A^{II}, Z_C^I), Z_A^I, Z_B^I\} \quad (4)$$

Przeprowadzono pięć serii testów dla różnych wartości kąta  $\theta$ . Każda seria została powtórzona dziesięciokrotnie.

Biorąc pod uwagę kąt minimalnego skrętu  $\theta$ , każdorazowo rejestrowane były:

- czas przebycia trasy  $T$ ;
- odchylenia  $\Delta$  od każdego punktu zatrzymywania (punkty zostały ustalone a priori).

Wyliczono następnie ich wartości średnie.

#### Warunki przeprowadzenia testów:

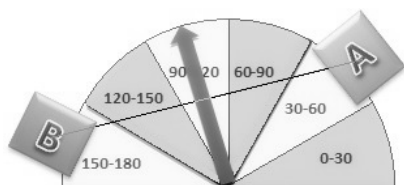
- Przestrzeń eksperymentalna: sala o rozmiarach 2,0m x 3,8m;
- Znaczniki: zielone, niebieskie i czerwone prostopadłościowy:  $Z_L, Z_N, Z_C$ ;
- Robot: Mindstoms NXT 1.5, konstrukcja TriBot;
- Środowisko programistyczne:
  - Microsoft Robotics Development Studio R2;
  - Visual Studio 2010.
- Kamera telefonu Samsung Omnia Lite;

#### Przebieg testów:

Po otrzymaniu rozkazu ruchu w postaci sekwencji  $n$  krawędzi, robot powtarza  $n$  razy następujące kroki:

- 1) Skanuje przestrzeń w poszukiwaniu odpowiednich znaczników skracając  $i$  razy o kąt  $\theta$ ;
- 2) Jeżeli nie wystąpiło podwójne namierzenie któregoś z nich, robot kieruje się ku środkowi zidentyfikowanej krawędzi; jeżeli wystąpiła niejednoznaczność, decyzję podejmuje system metryczny i wtedy robot kieruje się ku środkowi zidentyfikowanej krawędzi (Rys. 4);
- 3) Robot jedzie w wybranym kierunku, korygując na bieżąco kurs jazdy: znaczniki mają być jednakowo oddalone od środka obrazu kamery;
- 4) Po utracie znaczników z pola widzenia kamery, robot jedzie jeszcze czas  $T$  ustalony empirycznie na 5sec;

Po przekroczeniu ostatniej krawędzi robot się zatrzymuje sygnalizując wykonanie zadania.



Rys. 4. Przykładowe wykrywanie pary znaczników, skanując kątem  $30^\circ$

Fig. 4. Edge crossing after landmark detection by  $30^\circ$  scanning angle

#### Wyniki

W tab. 1 zostały przedstawione wartości dokonanych pomiarów.

Tab. 1. Zależność błędu określenia lokalizacji i czasu jazdy od kąta skanowania  
Tab. 1. Impact of the scanning angle on the localization accuracy and execution duration

$\theta, [^\circ]$	$\Delta, [\%]$				
	5	10	15	30	45
S1	7,5	7,5	7,5	37,5	67,5
S2	2	7	22	52	52
S3	0	0	0	30	60
S4	0	0	0	0	60
S5	5	5	5	35	65
Stop	0	10	10	40	70
$\Delta\hat{r}, [\%]$	2,42	4,92	7,42	32,42	62,42
$T_{QS}, [s]$	125,4	100,1	76,6	42,9	24,1

W praktyce zmniejszanie kąta sprowadza się do wykonania większej ilości operacji, częstszego zatrzymywania robota oraz wysyłania żądania obrotu. Stąd testy w jaki sposób zadany robotowi kąt obrotu wpływa na czas wykonywania algorytmu. Z Tab. 1 można wywnioskować, że optymalnym kątem skanowania byłby kąt o wartości ca  $25^\circ$ .

Dodatkowo zrobiono wiele serii innych badań dotyczących dokładności identyfikacji znaczników:

- w zależności od odległości od kamery;
- w zależności od oświetlenia.

#### 4. Wnioski

Przedstawiony eksperyment zademonstrował metodę hybrydową planowania drogi, złożoną z połączenia metody asocjacyjnej (zmodyfikowana wersja metody QualNav) i klasycznego pomiaru odległości. Do realizacji orientacji wizyjnej wykorzystany został obraz z kamery telefonu komórkowego znajdującego się na pokładzie robota edukacyjnego. Optymalne ze względu na czas, sprzęt i moc obliczeniową, okazało się użycie dalmierza ultradźwiękowego. Testy wykazały dużą skuteczność wykonanych poleceń. Przedstawiony problem jest bardzo aktualny do realizacji zadań autonomicznego poruszania się w dużych salach, gdzie często pozycja i orientacja przedmiotów (krzesła, fotele, skrzynie itd.) nie jest stała. Zaprezentowane podejście jest jednym z dobrze rokujących kierunków jego rozwiązań.

Perspektywicznym kierunkiem rozwoju metody mógłby być eksperyment na robotach o lepszych możliwościach sprzętowych – doskonalsza odometria, oraz dokładność dalmierza pokładowego.

#### 5. Literatura

- [1] Poncela A., Urdiales C., Trzegnies C., Sandoval F.: A new sonar-based landmark for localization in indoor environments, *Soft Comput* 11, pp. 281–285, Springer-Verlag 2006.
- [2] Tsubouchi T., Shigematsu B., Yuta S., Ohno K.: Differential GPS and odometry-based outdoor navigation of a mobile robot. In: *Advanced Robotics*, Vol. 18, No.6, pp. 611 – 635, 2006.
- [3] Borenstein J., Everett H. R., Fen, L.: Where am I? *Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning*. The University of Michigan, 1996.
- [4] Fogliaroni P., Wallgruen J. O., Clementini E., Tarquini F., Wolter D.: A qualitative Approach to Localization and Navigation Based on Visibility Information. In: K. Stewart Hornsby et al. (eds.) *COSIT, LNCS 5756*, pp. 312–329. Springer, Berlin Heidelberg, 2009.
- [5] Arkin R. C., Lawton D. T.: Reactive Behavioral Support for Qualitative Visual Navigation. In: *IEEE International Workshop of Intelligent Motion Control*, pp. IP21 – IP28, 1990.
- [6] Fromberger L.: Representing and Selecting Landmarks in Autonomous Learning of Robot Navigation. In: C. Xiong et al. (eds.) *ICIRA Part I, LNAI 5314*, pp. 488 – 497. Springer, Berlin Heidelberg, 2008.
- [7] Tomatis N.: Hybrid, Metric- Topological Representation for Localization and Mapping. In: M.E. Jefferies et al. (eds.) *Robot & Cogn. Approach. To Spat. Map.*, STAR 38, pp. 43 – 64. Springer, Berlin Heidelberg, 2008.
- [8] Dimitrova-Grekow T.: Quasi-autonomiczny pojazd na bazie zestawu Lego Mindstorms NXT, PAK nr 08, s. 839-841, 2011.

otrzymano / received: 11.04.2012

przyjęto do druku / accepted: 01.06.2012

artykuł recenzowany / revised paper