

Bartosz MARTYNIUK<sup>1</sup>

Opiekun naukowy: Grzegorz BUDZYŃ<sup>2</sup>

## **AUTONOMICZNY ROBOT DO MAPOWANIA KSZTAŁTÓW POWIERZCHNI PŁASKICH**

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono projekt autonomicznego robota do mapowania kształtów powierzchni płaskich wraz z testowanymi algorytmami mapowania i uzyskanymi wynikami. Pomiar odległości był realizowany poprzez ultradźwiękowe czujniki odległości. Komunikacja pomiędzy robotem a komputerem odbywała się poprzez moduł Bluetooth.

**Słowa kluczowe:** robot mobilny, algorytmy mapowania, ultradźwiękowe czujniki odległości

## **AUTONOMOUS ROBOT FOR MAPPING FLOOR PLANE SHAPE**

**Summary:** In this paper a project of autonomous robot for mapping floor plane shape is described along with tested mapping algorithms and obtained results. Distance measurement was conducted using ultrasonic distance sensors. For communication between the robot and computer a Bluetooth module was used.

**Keywords:** mobile robot, mapping algorithms, ultrasonic distance sensors

### **1. Wstęp**

Ciągły rozwój układów elektronicznych i postępujący wraz z nim spadek ich ceny, miniaturyzacja i zwiększanie mocy obliczeniowej umożliwiają powstawanie coraz bardziej dokładnych urządzeń automatyczno-robotycznych. Systemy mapowania, rozpoznawania terenu i omijania przeszkód są ważnymi elementami tych urządzeń, ponieważ pozwalają na prace w niezdefiniowanym wcześniej środowisku. Aby robot mógł się bezpiecznie poruszać i wyznaczać optymalną trasę z jednej pozycji do drugiej musi posiadać wiedzę o otoczeniu. Jednym z rozwiązań służącym do jej pozyskania są algorytmy automatycznego mapowania generujące mapy pozwalające na nawigację robota w przestrzeni roboczej. Największym wyzwaniem dla projektanta robota mobilnego służącego do wykonania dokładnych map terenu było zaprojektowanie układu pomiarowego cechującego się zadawalającą dokładnością uzyskanej wartości mierzonej dla czujników odległości oraz położenia, które są

---

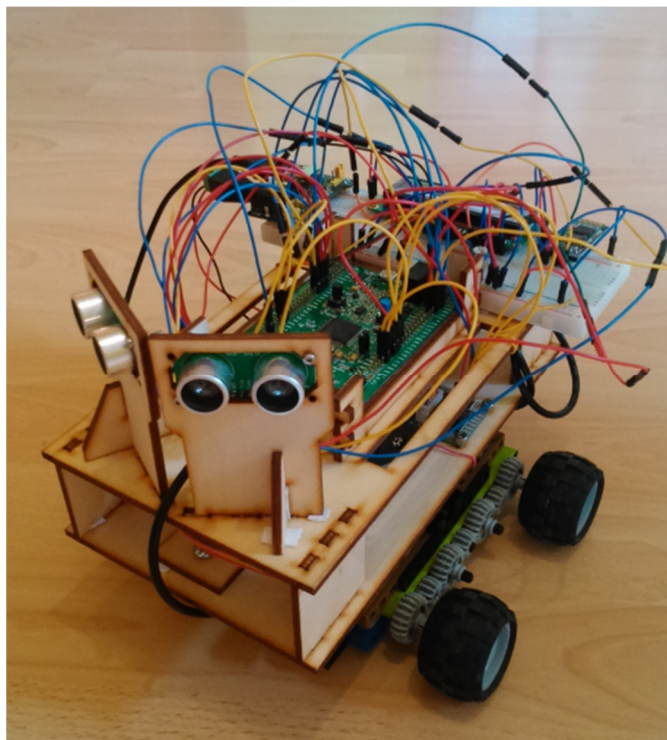
<sup>1</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, mechanika, bartosz.martyniuk@pwr.edu.pl  
bartosz.martyniuk@pwr.edu.pl

<sup>2</sup> dr inż., Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki, grzegorz.budzyn@pwr.edu.pl

związane z pomiarem przebytej drogi [1]. W celu opracowania dobrej mapy należy uwzględnić niepewności pomiarowe przy jej generowaniu.

## 2. Projekt robota

Celem projektu było wykonanie robota pozwalającego na implementację oraz testy algorytmów mapowania kształtów powierzchni płaskich. Zdjęcie złożonego robota przedstawia rysunek 1.



*Rysunek 1. Zdjęcie wykonanego robota do mapowania kształtów powierzchni płaskich*

### 2.1. Część mechaniczna

W robocie zastosowano wielokołowy układ napędowy napędzany przez dwa silniki krokowe. Każdy silnik napędzał koła po jednej stronie robota. Aby uzyskać tą samą prędkość obrotową kół po jednej stronie robota zastosowano przekładnię zębatą 1:1 między kołami. Jako napęd zostały wybrane unipolarne silniki krokowe 28BYJ-48-5VDC z wbudowaną przekładnią zębatą 64:1 zwiększającą liczbę kroków wymaganych aby uzyskać jeden obrót wałka silnika do 2048 kroków. Silniki te pozwoliły na dokładne pozycjonowanie robota bez użycia enkoderów. Obudowa robota została zaprojektowana w programie Autodesk Inventor i wycięta ze sklejkі o grubości 3,7 mm wykorzystując wycinarkę laserową CO2.

## 2.2. Część elektroniczna

Układ elektroniczny w robocie został oparty na płytce Discovery STM32F411VE zawierającej mikroprocesor Cortex M4. Oprócz mikroprocesora płytka posiada akcelerometr, żyroskop i czujnik pola magnetycznego. Wykorzystano je do pomiaru pozycji kątowej robota. Do pomiaru odległości użyto dwa ultradźwiękowe czujniki odległości US-015 o zasięgu 4 m i dokładności  $\pm 3\text{mm} + 1\%$ . Komunikacja pomiędzy robotem a komputerem PC odbywała się używając modułu Bluetooth. Mikrokontroler sterował silnikami krokowymi poprzez dwa sterowniki ULN2003. Elektronika i silniki były zasilane z dwóch akumulatorów 18650 połączonych szeregowo.

## 2.3. Weryfikacja układu pomiarowego

Aby określić dokładność pozycjonowania robota oraz dokładność pomiaru odległości z czujników przeprowadzono testy tych układów. Dokładność pomiaru przemieszczenia sprawdzono wykonując test polegający na wysłaniu do robota komendy przemieszczenia się o 1000mm a następnie zmierzono o ile robot się przemieścił. Test powtórzono dziesięć razy. Dokładność przemieszczenia wynosiła 1000mm  $\pm 1,5\%$ . Weryfikację czujników odległości dokonano przez ustawienie czujników w odległości 500mm od przeszkody i wykonano serię dziesięciu pomiarów. Uzyskano dokładność pomiaru odległości 500mm  $\pm 4\text{mm}$ , czyli mieszczącą się w przedziale jaki podaje producent.

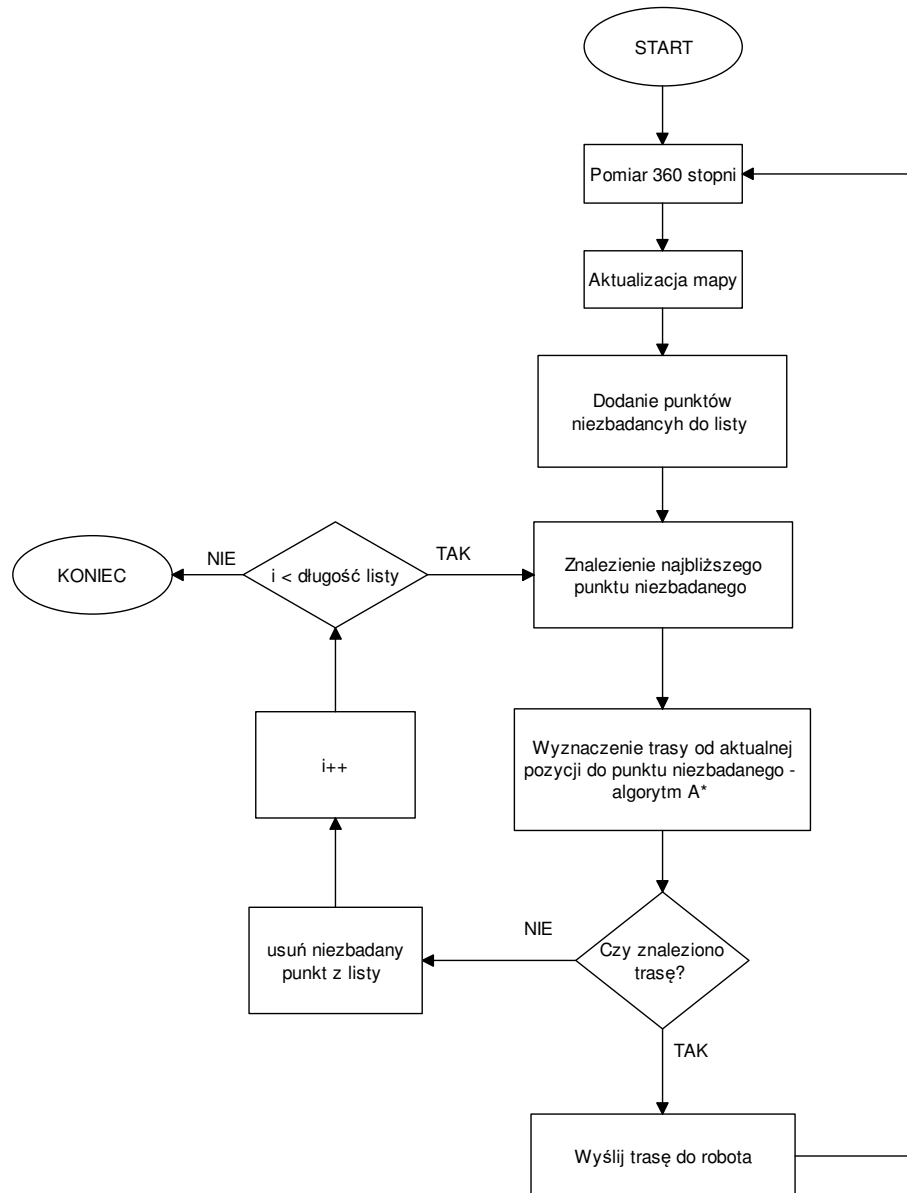
## 3. Algorytmy mapowania powierzchni płaskich

Kod programu był częściowo zapisany na mikrokontrolerze robota oraz na komputerze PC. Było to spowodowane małą ilością pamięci robota. Algorytm autonomicznego mapowania kształtów powierzchni płaskich został przedstawiony na rysunku 2. Robot rozpoczyna pomiar od wykonania obrotu o 360 stopni i pomiaru odległości z dwóch czujników. Następnie wykonywana jest aktualizacja mapy, którą robot wykorzystuje do nawigacji. Na wygenerowanej mapie wyszukiwane są wszystkie punkty, których stan jest jeszcze nie wiadomy i są przyległe do obszarów niezajętych. Następnie algorytm pobiera z listy najbliższy punkt niewiadomy i sprawdza czy istnieje bezkolizyjna droga z pozycji początkowej do wybranego punktu. Jeżeli uda się wyznaczyć bezkolizyjną ścieżkę robot podąża tą trasą i gdy dotrze do punktu końcowego znów wykonuje pomiar poprzez obrót o 360 stopni. W przypadku gdy nie można znaleźć bezkolizyjnej ścieżki, punkt niezbadany jest usuwany z listy i kolejny punkt jest sprawdzany. Algorytm kończy działanie gdy skończą się wszystkie niezbadane punkty na liście. Do wyznaczania drogi pomiędzy aktualną pozycją robota a punktem końcowym został zastosowany algorytm A\*.

### 3.1. Algorytm mapowania z rastrową mapą zajętości

Jedną z najczęściej używanych reprezentacji map jest rastrowa mapa zajętości (*ang. occupancy grid map*) [2],[3]. Przestrzeń wokół robota przedstawiona jest jako siatka metryczna. Komórki w tej siatce reprezentują obszar o wcześniej ustalonej wielkości i zawierają wartość liczbową. Jeden, jeżeli komórka jest zajęta lub zero, gdy jest pusta.

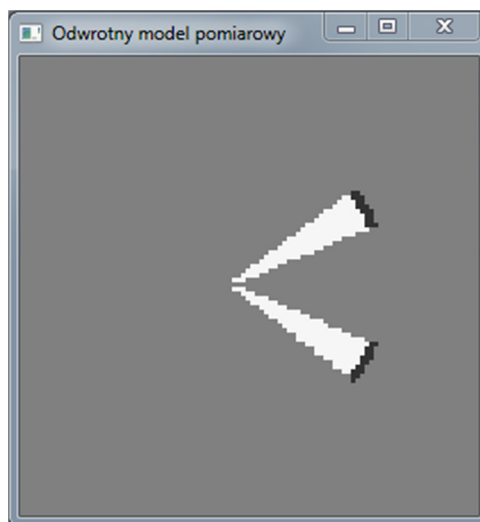
Rozmiar rastrowej mapy zajętości ustalono na 300x300 komórek. Wymiar komórek wynosił 30 mm na 30 mm. Algorytm mapowania z rastrową mapą zajętości jest wykonywany podczas wykonywania przez robota funkcji „pomiar 360 stopni”.



Rysunek 2. Algorytm autonomicznego mapowania kształtów powierzchni płaskich

Danymi wejściowymi dla algorytmu była pozycja robota oraz odległość z czujników odległości. Algorytm mapowania z rastrową mapą zajętości stosuje odwrotny model pomiarowy. Na podstawie wskazań z czujników na mapie zajętości zmieniane były

wszystkie pola znajdujące się w wycinku koła o kącie 15 stopni i promieniu wynoszącym zmierzona przez czujnik odległość. Pola znajdujące się w odległości zmierzonej +/- niepewność pomiarowa były uznawane jako zajęte (1) a reszta pól w wycinku jako pola wolne (0). Zamiana wartości komórek w takim obszarze spowodowana jest charakterystyką fali ultradźwiękowych czujników odległości. Odwrotny model pomiarowy dla obu czujników pokazano na rysunku 3.



Rysunek 3. Odwrotny model pomiarowy dla obu czujników. Odległość zmierzona 1000 mm

W algorytmie tym wyznaczono dwie wartości graniczne odległości  $z_{max}$  oraz  $z_{max2}$ . Gdy zmierzona wartość przekroczy próg  $z_{max2}$  pomiar jest uznawany jako błędny i nie jest uwzględniany. Jest to najczęściej spowodowane zwróceniem wartości maksymalnej przez czujnik. Próg  $z_{max}$  został wprowadzony aby zwiększyć dokładność otrzymywanych map. Jeżeli wartość odległości jest większa od  $z_{max}$  a mniejsza od  $z_{max2}$  na mapie jest rysowany pusty wycinek koła o promieniu 100 mm.

### 3.2. Algorytm wyszukiwania maksimum lokalnego najbardziej prawdopodobnej mapy

Algorytm wyszukiwania lokalnego maksimum najbardziej prawdopodobnej mapy jest algorytmem offline wymagającym pobrania danych ze wszystkich pomiarów i pozycji robota w celu wygenerowania mapy. W odróżnieniu od algorytmu z rastrową mapą zajętości stosowany jest tutaj prosty model pomiarowy. Algorytm na początku zeruje mapę a następnie na podstawie danych wylicza prawdopodobieństwo zajętości komórki (1) dla  $k = 1$  lub 0. Po wielokrotnym obliczaniu prawdopodobieństwa dla całej mapy uzyskuje się maksimum lokalne, które jest przybliżeniem najbardziej prawdopodobnej mapy [4].

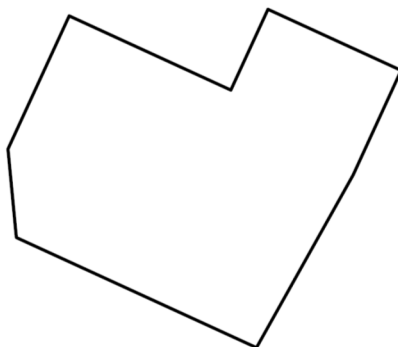
$$m_i = \arg \max \left( (l_0)^k + \sum_i \log (f(z_i, x_i, m \text{ dla } m_i = k)) \right) \quad (1)$$

gdzie:  $l_0$  jest logitem prawdopodobieństwa wstępnego zajętości pola  $a$ ,  
 $f(z_i, x_i, m \text{ dla } m_i = k)$  jest modelem pomiarowym.

Prosty model pomiarowy na podstawie pozycji  $x_t$  oraz mapy  $m$  zwraca logarytm prawdopodobieństwa pomiaru. Pomiar dzielony jest na serię pomiarów liniowych, których średnia wyznacza prawdopodobieństwo pomiaru. Prawdopodobieństwo pojedynczego pomiaru jest wyznaczane na podstawie prawdopodobieństwa rozkładu normalnego, gdzie  $z$  jest zmienną losową,  $l_{min}$  – odległość do pierwszego zajętego pola na mapie średnią.

#### 4. Wyniki pomiarów

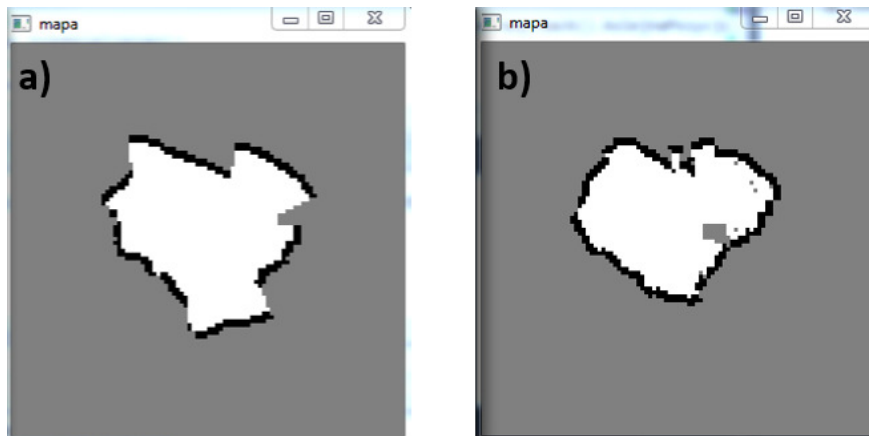
Algorytmy testowano na torze pomiarowym, którego kształt jest pokazany na rysunku 4. Robot był umieszczany wewnątrz toru pomiarowego i algorytm autonomicznego mapowania był uruchamiany.



Rysunek 4. Kształt toru pomiarowego

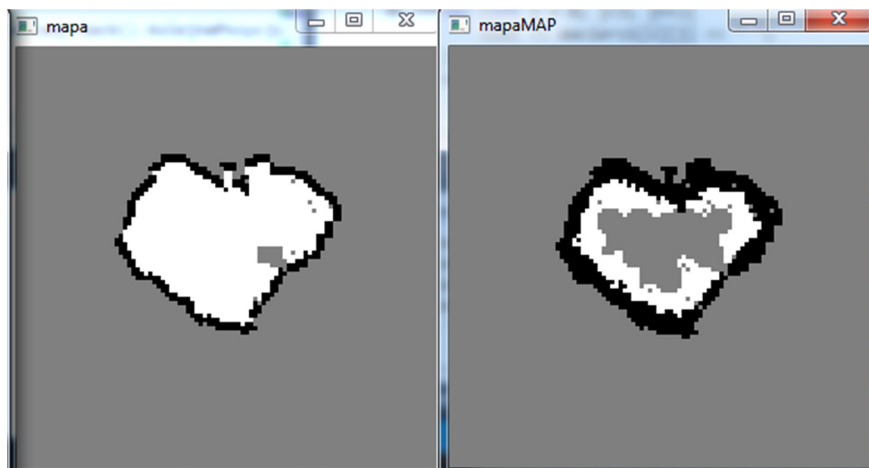
Dla algorytmu mapowania z rastrową mapą zajętości testowano dwie odległości graniczne  $z_{max}$  równe 700 mm oraz 350 mm. Wyniki działania algorytmu pokazano na rysunku 5.

Przy nastawie  $z_{max}$  700 mm widoczne są częściowo zmapowane ściany. Widać również dużą niedokładność pomiaru w rogach toru pomiarowego spowodowaną wielokrotnym odbiciem się fali od ścian powodującym zawyżenie mierzonej odległości. Przy nastawie 350 mm otrzymywana jest bardziej dokładna mapa. Wyniki pomiarów oraz pozycje robota otrzymane przy  $z_{max}$  równym 350 mm posłużyły jako dane dla algorytmu wyszukiwania maksimum lokalnego najbardziej prawdopodobnej mapy.



Rysunek 5. Wynik działania algorytmu mapowania z rastrową mapą zajętości dla  $z_{max}$  równego a) 700 mm, b) 350 mm

Porównanie wyników dwóch różnych algorytmów zamieszczono w tabeli 1 oraz na rysunku 6.



Rysunek 6. Porównanie działania algorytmów. Z lewej strony algorytm mapowania z rastrową mapą zajętości. Z prawej strony algorytm wyszukiwania maksimum lokalnego najbardziej prawdopodobnej mapy.

Tabela 1. Różnice pomiędzy algorytmem mapowania z rastrową mapą zajętości (1) z algorytmem wyszukiwania maksimum lokalnego najbardziej prawdopodobnej mapy (2).

ALGORYTM 1	ALGORYTM 2
Cieńsze ściany	Grubsze ściany
Ostre rogi mapy	Rogi mapy zaokrąglone
Nieciągłe ściany	Ciągłe ściany
Algorytm online	Algorytm offline
Krótkie obliczenia	Długie obliczenia

Dzięki algorytmowi mapowania z rastrową mapą zajętości uzyskuje się mapę z cienkimi i ostrymi krawędziami lecz nie pozbawioną błędów takich jak nieciągłości w ścianach. Jest to algorytm online przez co możliwa jest szybka generacja mapy i jej użycie do nawigowania w nieznanym środowisku.

Natomiast algorytm wyszukiwania maksimum lokalnego najbardziej prawdopodobnej mapy generuje mapę o grubszych i zaokrąglonych krawędziach wygładzając nieciągłości w ścianach mapy. Algorytm ten może zwrócić mapę lepiej odwzorowującą otoczenie jednakże nie można tworzyć mapy w trakcie pracy robota.

## 5. Wnioski

Ultradźwiękowe czujniki odległości pomimo wad związanych z szerokim stożkiem pomiarowym i problemami wynikającymi z wielokrotnym odbijaniem się fali ultradźwiękowej są ekonomicznym rozwiązaniem do tworzenia map przez autonomiczne roboty.

Wraz z zmniejszaniem maksymalnej dopuszczalnej odległości pomiarowej w algorytmie mapowania z rastrową mapą zajętości wzrasta dokładność mapy.

Dokładność tworzonych map z użyciem obu algorytmów jest również zależna od ilości dostępnej pamięci.

## LITERATURA

1. THURN S., BURGARD W., FOX D. , Probabilistic Robotics, The MIT Press, 2005.
2. SCHRÖTER C., HANS-JOACHIM B., HORST-MICHAEL G.: Memory-Efficient Gridmaps in Rao-Blackwellized Particle Filters for SLAM using Sonar Range Sensors, Proc. 3rd European Conference on Mobile Robots (ECMR), (2007), 138-143
3. COLLINS T., COLLEENS J.J., RYAN D.Ł Occupancy Grid Mapping: An Empirical Evaluation, Mediterranean Conference on Control and Automation, (2007).
4. THRUN S.Ł Learning Occupancy Grid Maps with Forward Sensor Models, Autonomous Robots, 15(2003) 2, 111-127