

Sławomir Jeżewski\*, Adam Wulkiewicz\*

## Koncepcja przestrzeni percepcyjnej robota mobilnego

### 1. Wprowadzenie

Nawigowanie robotem mobilnym w skomplikowanym i niestrukturalizowanym otoczeniu wymaga jednoczesnego działania trzech procesów: tworzenia mapy otoczenia, lokalizacji robota w odniesieniu do mapy i planowania ścieżki ruchu [9–12]. Wszystkie procesy współdzielą jedną dynamicznie zmieniającą się strukturę danych – mapę otoczenia. Proces tworzenia mapy nanosi nowo znalezione obiekty na mapę, zachowując relacje przestrzenne między obiektami. Nanosi obiekty na podstawie pomiarów wykonanych czujnikami bliskiego i dalekiego zasięgu i estymaty położenia robota. Estymatę położenia robota wyznacza proces lokalizacji głównie na podstawie **położenia znanych obiektów** na mapie i ich relacji do aktualnych pomiarów. Proces wyznaczania ścieżki ruchu korzysta z mapy kategoryzując obszary na niej zawarte jako dostępne (przejezdne) oraz niedostępne lub jako znane i nieznanne. Zbudowanie dobrej mapy otoczenia jest więc zadaniem kluczowym dla poprawnego sterowania robotem mobilnym. Jest również zadaniem rekurencyjnym bowiem dobrze zbudowana mapa jest potrzebna do estymowania położenia robota, a tym samym do budowania mapy. W literaturze anglojęzycznej problem ten nosi nazwę SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping Problem*) i jest przedmiotem intensywnych badań [1–5].

Centralnym aspektem zadania budowania mapy jest opracowanie właściwej struktury danych do reprezentacji i przechowywania danych pomiarowych oraz dodawania kolejnych pomiarów z uwzględnieniem zmian położenia robota. W niniejszym artykule strukturę tę określa się mianem przestrzeni percepcyjnej robota mobilnego. Dobór struktury danych determinuje algorytmy, które z niej będą korzystały, stopień ich złożoności obliczeniowej oraz jako skutek determinuje możliwości percepcyjne robota.

Robot mobilny może działać w trzech rodzajach otoczenia: w pomieszczeniach, w terenie miejskim, w terenie pozamiejskim. Każde otoczenie narzuca swoje własne wymagania odnośnie konstrukcji przestrzeni percepcyjnej. Wymagania dotyczą arealu przechowywanej przestrzeni, gęstości próbkowania, konstrukcji i charakterystyki punktów nawigacyjnych itp.

---

\* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka

- Pomieszczenia zawierają wiele obiektów o regularnym kształcie, takim jak prostopadłościanny, kule, elipsy. Obraz percepcyjny zawiera dużą ilość linii o poziomym lub pionowym przebiegu. Dystans do obiektów jest krótki. Mapa może być ograniczona do ok. 100 metrów kwadratowych. Przestrzeń ma budowę „arkadową”, tzn. jest łańcuchem obszarów zainteresowania. Podłoże jest zawsze płaskie. Algorytmy lokalizacji upraszczają się jako że robot kołowy jest zawsze poziomo zorientowany w stosunku do podłoża.
- Przestrzeń miejska ma dość podobną charakterystykę do pomieszczeń, z tym że podłoże może być traktowane jako płaskie tylko w granicach 5–10 metrów. Przewarzają w niej budowle, czyli obiekty prostopadłościenne. Duża jest odległość do obiektów, co powoduje, że do lokalizacji obiektów należy używać stereometrii, bowiem skanery laserowe mają zbyt krótki zasięg, by zbudować mapę otoczenia. Punkty nawigacyjne mają charakter geometryczny i są proste do zamodelowania matematycznego. Obszar modelowania powinien być powiązany z zasięgiem robota. Według autorów niniejszego artykułu powinien być zbliżony do 30 km<sup>2</sup>. Struktura danych dobrze nadaje się do kompresji ponieważ pomiędzy obiektami znajdują się duże puste przestrzenie.
- Otoczenie pozamiejskie charakteryzuje się przewagą roślinności w otoczeniu. Brak geometrycznych punktów odniesienia i punktów nawigacyjnych. Roślinność z racji swego charakteru z trudem poddaje się pomiarowi za pomocą skanerów laserowych. Duży obszar ze stosunkowo wysoką gęstością obiektów na mapie. Powierzchnia silnie pofalowana i pokryta trawą lub niską roślinnością nie mającą charakteru przeszkody w trakcie planowania trajektorii ruchu robota. Duża zmienność otoczenia, obiekty takie jak drzewa mogą zmieniać kształt, pozostając przy tym obiektami nieruchomymi.

Wymienione wyżej trzy typy otoczenia narzucają odmienne wymagania dotyczące przestrzeni percepcyjnej. Różnie definiują wielkość przestrzeni, w różnym stopniu wypełniają tą przestrzeń danymi. Najbardziej wymagająca jest przestrzeń pozamiejska (las, zarośla, łąki). Nawigacja w takim terenie, rozpoznawanie i lokalizowanie robota wymaga przechowywania sporej ilości danych pomiarowych.

## 2. Przestrzeń percepcyjna

Przestrzeń percepcyjna robota mobilnego to struktura danych przechowująca wyniki pomiarów wykonanych z użyciem czujników robota. Przechowuje liczbową reprezentację świata otaczającego robota mobilnego i powstaje w wyniku zestawienia pomiarów wykonanych urządzeniami pomiarowymi robota takimi jak czujniki ultradźwiękowe, skanery laserowe liniowe i przestrzenne, dalmierze laserowe itp. Analiza charakterystyki sprzętu pomiarowego wykazuje że przestrzeń percepcyjna jako struktura programistyczna powinna pozwalać na szybką integrację pomiarów (10000 próbek na sekundę) na stosunkowo prostym sprzęcie obliczeniowym (AMD GEODE lub podobnym).

Analiza przedstawionych powyżej wymagań wskazuje, że przestrzeń percepcyjna powinna umożliwiać:

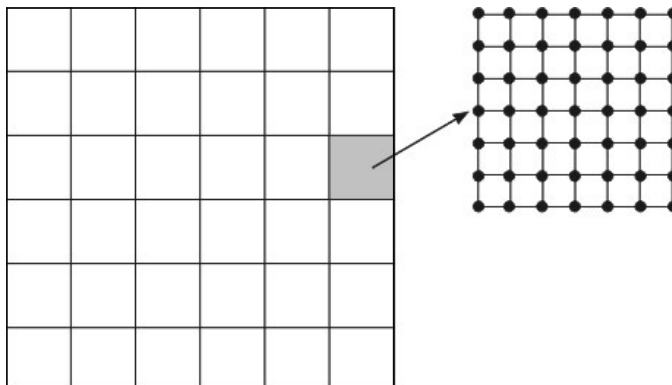
- przechowywanie dużego wycinka przestrzeni (o powierzchni 5 km na 5 km) w pamięci RAM,
- przechowywanie danych ze zmienną dokładnością, ale nie większą niż 10 cm,
- przechowywanie danych terenu z różnymi atrybutami takimi jak: teren znany, teren nieznan, teren przejezdny, teren nieprzejezdny, itp.

Ze względu na potencjalną złożoność obliczeniową struktura danych ma mieć możliwość:

- pracy w środowisku rozproszonym wieloprocesorowym lub wieloprocesowym,
- lokalnej modyfikowalności danych,
- braku konieczności globalnego blokowania struktury danych,
- zdolności do usuwania ostatnio nie używanych bloków danych do pamięci masowej.

### 3. Koncepcja przestrzeni percepcyjnej

Przedstawiona w niniejszej publikacji koncepcja przestrzeni percepcyjnej oparta jest o probabilistyczną koncepcję danych pomiarowych. Każdy pomiar oprócz swej wartości niesie informację o niepewności pomiaru. Informacja ta ma postać funkcji gęstości prawdopodobieństwa (PDF) i jest modelowana jako rozkład normalny  $N(0, \sigma)$ . Funkcja ta jest w istocie charakterystyką urządzenia pomiarowego. Przestrzeń percepcyjna robota jest więc zbiorem punktów z przypisanym im prawdopodobieństwem istnienia przeszkody w danym punkcie. Do przestrzeni wprowadzane są funkcje PDF i integrowane z istniejącymi już pomiarami na zasadzie wagowej. Do przechowywania danych punktowych wybrano strukturę zagnieżdżonych siatek regularnych (rys. 1). Odwołania do siatek punktów przechowywane są w nadrzędnej siatce regularnej. Taka struktura odzwierciedla charakterystykę terenu zurbanizowanego i funkcjonalnie odpowiada macierzy rzadkiej.



Rys. 1. Struktura przestrzeni percepcyjnej. Siatka główna i siatka podstawowa

Dzięki przyjętej konstrukcji możliwa jest lokalna modyfikowalność danych i usuwanie fragmentów struktury do pamięci masowej. Wybór konstrukcji przestrzeni percepcyjnej jako zagnieżdżonego układu siatek regularnych poprzedzony był badaniami nad innymi strukturami podziału przestrzennego, takimi jak:

- drzewo kd,
- drzewo BSP,
- drzewo czwórkowe, ósemkowe,  
siatka nieregularna.

Więcej na temat struktur danych można znaleźć w [6]. Do tego zastosowania wybrana została siatka regularna, jako że umożliwia ona szybki dostęp do podprzestrzeni dowolnie umiejscowionej i posiadającej dowolne rozmiary oraz szybką jej modyfikację. Również ze względu na ilość zajmowanego miejsca w pamięci przez informacje organizujące strukturę danych. Argumentem przemawiającym za układem siatek jest również łatwy dostęp do sąsiednich komórek odbywający się w stałym czasie nie zmieniającym się wraz z przyrostem danych.

#### 4. Wyniki testów szybkości integracji

Dla zaproponowanej struktury przeprowadzono podstawowe testy wydajnościowe. Testy wykonywane były na komputerze z procesorem Intel Core 2 Duo 2 GHz i pamięcią 2,5 GB przy wykorzystaniu jednego rdzenia. Testy symulowały dodawanie pomiarów z urządzeń pomiarowych o różnej dokładności reprezentowanej różną wartością odchylenia standardowego. Sprawdzono wydajność procesu dodawania próbek dla stałych rozmiarów siatek. Próbkę generowano w sposób losowy. Poniżej przedstawiono wyniki testu (tab. 1) przeprowadzonego dla siatki głównej o wielkości  $40 \times 40$  komórek (rozmiar komórki  $0,5 \times 0,5$ ). Siatki podstawowe zawierały  $10 \times 10$  punktów siatkowych (odległość między punktami  $0,05 \times 0,05$ ).

**Tabela 1**  
Tempo dodawania próbek do przestrzeni percepcyjnej  
w zależności od odchylenia standardowego

Wartość odchylenia standardowego	Liczba próbek na sekundę
0,01	71418
0,05	52540
0,1	30060
0,5	2146
1	570

Kolejny test (tab. 2) dotyczył liczby dodanych próbek w zależności od liczby punktów w siatkach podstawowych. Test prowadzono przy stałej wartości odchylenia standardowego 0,1. Test przeprowadzono dla siatki regularnej  $(-10, -10)$  do  $(10, 10)$ ,  $40 \times 40$  komórek (rozmiar komórki  $0,5 \times 0,5$ ).

**Tabela 2**  
Tempo dodawania próbek do przestrzeni percepcyjnej  
w zależności od rozmiaru siatki podstawowej

Rozmiar siatki podstawowej	Liczba próbek na sekundę
25	50628
100	30068
400	11482
900	5664

Ostatni z przedstawionych testów (tab. 3) ilustruje zależność liczby dodanych próbek od liczby komórek siatki głównej. Test prowadzono przy stałej wartości odchylenia standardowego 0,1. Próbkę wygenerowano w sposób losowy. Test przeprowadzono dla siatki głównej o wielkości  $(-10, -10)$  do  $(10, 10)$ . Liczba punktów w siatce podstawowej  $10 \times 10$ .

**Tabela 3**  
Tempo dodawania próbek do przestrzeni percepcyjnej  
w zależności od rozmiaru siatki głównej

Rozmiar siatki głównej	Liczba próbek na sekundę
100	65824
400	51728
900	37892
1600	30036

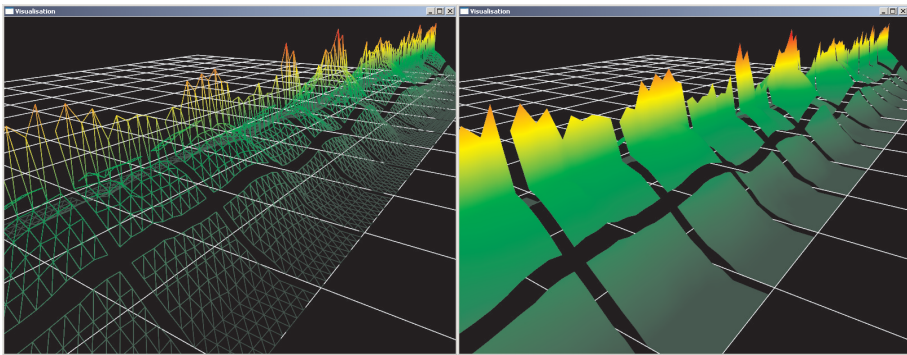
Przedstawione powyżej wyniki testów wskazują że prędkość dodawania próbek do struktury danych z zapasem pokrywa możliwości pomiarowe robota wyposażonego w dwa lub trzy liniowe skanery laserowe i 12–18 skanerów ultradźwiękowych.

## 5. Wizualizacja

Przeźren percepcyjna jest strukturą danych, na podstawie której budowane będą algorytmy lokalizacji robota lub też algorytmy budowania syntaktycznej mapy otoczenia. Łatwość tworzenia takich algorytmów i wyszukiwania w nich błędów uzależniona jest od możliwości intuicyjnego przedstawienia danych zawartych w przestrzeni percepcyjnej.

Według autorów publikacji jest to tak samo istotna cecha struktury danych jak tempo dodawania danych czy stopień upakowania danych w strukturze.

Jeśli przestrzeń percepcyjna jest przestrzenią dwuwymiarową. Możliwe jest jej przedstawienie na obrazie dwuwymiarowym, na którym różne wartości prawdopodobieństwa przedstawione są za pomocą różnych kolorów pikseli. W naszej koncepcji, w celu zwiększenia intuicyjności wizualizacji, punkty wyznaczają powierzchnię określoną w trójwymiarowym układzie współrzędnych. Kolor punktów powierzchni i ich wysokość wyznaczana jest przez prawdopodobieństwo istnienia przeszkody. Na rysunku 2 przedstawiono dane wizualizujące ścianę postrzeganą dwoma rodzajami czujników: dalmierzami laserowymi i czujnikami ultradźwiękowymi.



**Rys. 2.** Wizualizacja dwuwymiarowej przestrzeni percepcyjnej. Po lewej: siatka trójkątów. Po prawej: powierzchnia wyznaczona przez punkty

Do wizualizacji przestrzeni percepcyjnej robota został wykorzystany silnik graficzny OGRE. OGRE (*Object-oriented Graphics Rendering Engine*), czyli „Zorientowany obiektowo silnik graficzny”. Dostępny jest na licencji LGPL, na systemach operacyjnych: Windows, MacOS i Linux. OGRE wykorzystuje do wyświetlania bibliotekę OpenGL lub DirectX. Jest on silnikiem graficznym o otwartej architekturze. Mimo iż nie zawiera on symulacji zjawisk fizycznych, biblioteki do obsługi dźwięku, interfejsu użytkownika czy komunikacji sieciowej w łatwy sposób można połączyć jego funkcjonalności z dedykowanymi bibliotekami realizującymi wyżej wymienione zadania. Możliwe jest również uaktualnianie danych czasie rzeczywistym w oparciu o połączenie TCP/IP. Tę właściwość autorzy wykorzystali dopisując bibliotekę do transmisji danych z systemów wewnętrznych robota [7] i z systemów symulacyjnych [8]

## 6. Wnioski

Opisana struktura danych umożliwia szybkie dodawanie nowych próbek do istniejącej już puli danych. Ze względu na zagnieźdżoną tablicową budowę czas dodawania pojedyn-

czej próbki nie zmienia się w miarę upływu czasu i przyrostu ilości danych. Klatkowa budowa przestrzeni zapewnia lokalizowanie zmian i precyzyjne wskazywanie regionów podlegających modyfikacjom. Zastosowanie funkcji Gaussa jako funkcji rozkładu prawdopodobieństwa spowalnia dodawanie pomiarów do struktury danych. W celu ewentualnego przyspieszenia integracji próbek konieczne jest opracowanie innej metody wyznaczania wartości funkcji Gaussa dla obszaru zawierającego punkty siatkowe. Struktura pozwala na intuicyjne wizualizowanie przestrzeni percepcyjnej robota mobilnego, co jest niezwykle istotne w procesie tworzenia i testowania oprogramowania.

## Podziękowania

*Niniejsza publikacja powstała w ramach grantu MNiSW w latach 2009–2011 jako element robota mobilnego [6].*

## Literatura

- [1] Bailey T., *Mobile Robot Localisation and Mapping in Exetensive Outdoor Environments*. University of Sidney, NSW, Sidney, Australia, 2002 (Phd thesis).
- [2] Cole D.M., Newman P.M., *Using Laser Range Data for 3D SLAM in outdoor Environment*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA 2006.
- [3] Dissanayake M.W.M.G., Newmann P.M., Clark S., Durrant-Whyte H.F., Csorba M., *A Solution to the Simulatneous Localisation and Map Building. (SLAM) Problem*. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 17(3), 2001, 229–241.
- [4] Folkesson J., Christensen H., *Outdoor Exploration and SLAM using a Compressed Filter*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2003), Taipei, Taiwan, September 2003, 419–426.
- [5] Frese U., *Efficient 6-DOF SLAM with Treemap as a Generic Backend*. Proceedings of the IEEE Internation Conference on Robotics and Automation (ICRA 2007), Rome, Italy, April 2007.
- [6] Havran V., *Heuristic Ray Shooting Algorithms*. Praga, 2000.
- [7] Jeżewski S., Sankowski D., Dadan W., *Koncepcja autonomicznego robota pola walki przeznaczanego do zadań zwiadu i wykrywania min*. Automatyka (półrocznik AGH), t. 13, z. 3, 2009, 1107–1116.
- [8] Jeżewski S., Łaski M., *Przegląd i porównanie środowisk symulacji robotów mobilnych*. Automatyka (półrocznik AGH), t. 13, z. 3, 2009, 1095–1106.
- [9] Nüchter A., *3D Robotic Mapping, The Simultaneous Localization and Mapping Problem with Six Degrees of Freedom*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009, ISBN 978-3-540-89883-2
- [10] Stachniss C., *Robotic Mapping and Exploration*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009, ISBN 978-3-642-01096-5.
- [11] Siciliano B. i in. (ed.), *The 2005 DARPA Grand Challenge, The Great Robot Race*. 2007 Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, ISBN 03-540-73428-7.
- [12] Wolter D., *Spatial Representation and Reasoning for Robot Mapping, A Shape-Based Approach*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008, ISBN 978-3-540-69011-5.