

dr inż. Michał Gnatowski  
dr Barbara Siemiątkowska  
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

## ZASTOSOWANIE BIEGUNOWYCH SIECI KOMÓRKOWYCH W PROCESIE PLANOWANIA ŚCIEŻKI ROBOTA MOBILNEGO

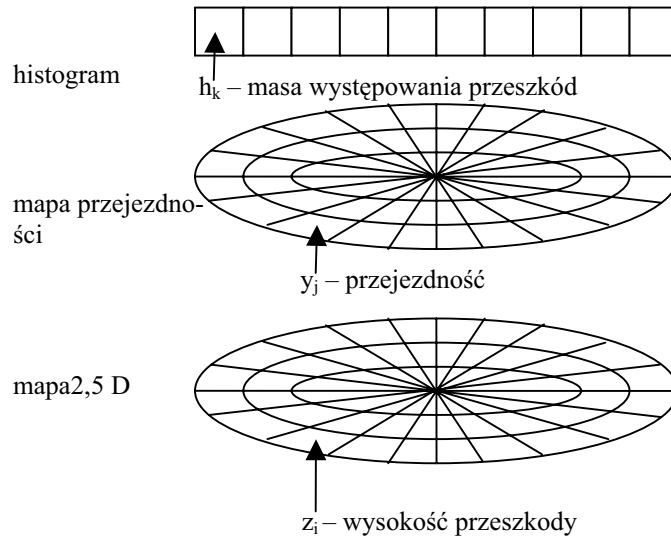
*W poniższym artykule omówiono zastosowanie biegunowych sieci komórkowych w zagadnieniu odruchowego planowania trasy dla robota mobilnego wyposażonego w skaner laserowy 3D. Dane z dalmierza są wykorzystane do zbudowania dwuwymiarowej biegunowej mapy przejezdności. Mapa biegunowa służy do określenia dopuszczalnych kierunków przemieszczania się robota, uwzględniając różnicę wysokości obszarów reprezentowanych przez poszczególne komórki. Istotną zaletą tej metody, jest możliwość przemieszczania się robota po nierównościach terenu, co nie byłoby możliwe w przypadku, gdyby mapa otoczenia była tworzona na podstawie danych pochodzących ze skanera laserowego 2D.*

### RADIAL CNN IN MOBILE ROBOT NAVIGATION

*In the article a method for path planning, based on laser3D data, for a mobile robot is presented. Data from a laser3D is used to build a 2D radial map of an environment. The map is used to determine available directions. The main advantage of the method is a possibility to generate obstacle-free path in rough terrain. It is not possible 2D laser only.*

#### 1. WSTĘP

Roboty mobilne są coraz powszechniej wykorzystywane w codziennym życiu, a umiejętność bezkolizyjnego przemieszczania się jest podstawowym wymaganiem jakie jest stawiane przed autonomicznymi pojazdami. W większości przypadków mapa otoczenia tworzona jest na podstawie wskazań dalmierzy laserowych lub sonarów, które dostarczają informacji 2D o otoczeniu. Informacja taka jest niewystarczająca, jeśli robot porusza się na zewnątrz budynku, ale nawet w przypadku pomieszczeń zamkniętych w wielu wypadkach konieczna jest informacja 3D. Reprezentacja 3D może być budowana przy pomocy kamer stereowizyjnych lub kamer dookólnych. W opisywanym w tej pracy algorytmie stosujemy dane ze skanera laserowego 3D. Urządzenie zostało stworzone na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Dostarcza ono informacji w postaci  $(\varphi_i, \phi_i, r_i)$ , gdzie  $\varphi_i$  – jest kątem skanowania w poziomie,  $\phi_i$  – jest kątem skanowania w pionie,  $r_i$  – jest odległością do przeszkody. Dane umożliwiają bezpośrednie stworzenie biegunowej reprezentacji otoczenia [6]. Na podstawie informacji zawartej w mapie 2,5D tworzona jest biegunowa mapa przejezdności, a następnie generowana jest bezkolizyjna trajektoria. Schemat opisywanego algorytmu przedstawia rys. 1.



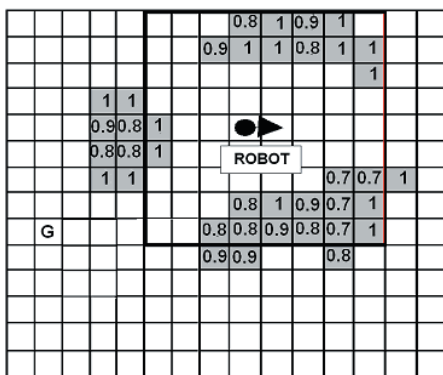
Rys. 1. Schemat algorytmu

W większości metod lokalnego planowania trasy pojazdu prędkość liniowa i kątowa określana jest na podstawie danych z pochodzących sensorów robota. Podejmowanie decyzji odbywa się przy pomocy systemów rozmytych, algorytmów genetycznych lub sieci neuronowych. Metody te nie wymagają, aby pojazd posiadał globalną mapę otoczenia. Jednym z najbardziej znanych algorytmów jest metoda pól wektorowych [1].

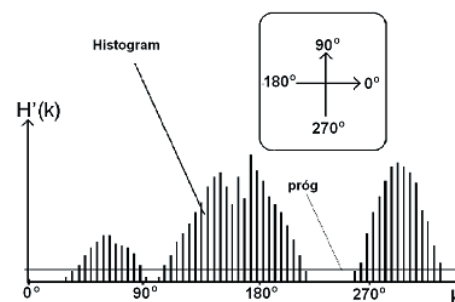
Algorytm składa się z następujących etapów:

- generowanie rastrowej mapy otoczenia. Każda komórka mapy przechowuje stopień potwierdzenia hipotezy, że jest ona zajęta przez przeszkodę. Sposób tworzenia takiej mapy jest przedstawiony w pracy [3];
- na podstawie dwuwymiarowej mapy rastrowej generowany jest jednowymiarowy histogram kierunkowy;
- na podstawie wartości histogramu i aktualnego położenia i orientacji robota generowany jest zbiór sterowań.

a)



b)

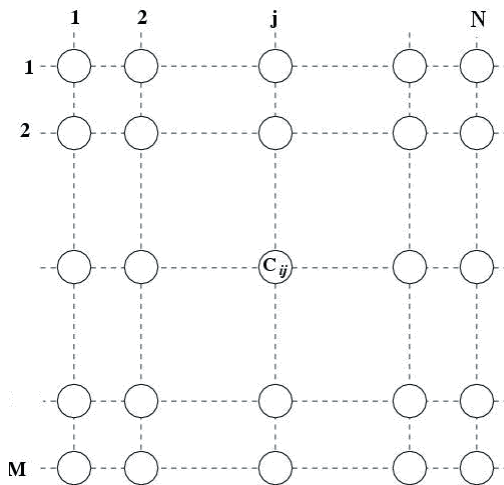


Rys. 2. Generowanie histogramów kierunkowych: a) rastrowa mapa otoczenia, b) histogram kierunkowy

Rys. 2 przedstawia sposób generowania histogramu pól wektorowych. Na rys. 2a) przedstawiono rastrową mapę otoczenia. Zaznaczone kolorem szarym komórki reprezentują fragmenty przeszkód. Liczby wewnątrz tych komórek określają stopień zajętości komórek. Z mapy otoczenia wybierane jest tzw. okno aktywne. Jedynie przeszkody występujące w tym oknie są uwzględniane w procesie generowania histogramu. Okno jest dzielone na sektory. Dla każdego z nich obliczana jest „masa” przeszkód -  $h_k$  (rys. 2b). Sektory, dla których wartość  $h_k$  jest mniejsza niż dopuszczalny  $h_{\max}$  próg wskazują kierunki dopuszczalne. W opisywanej w tej pracy algorytmie zaimplementowano metodę histogramów kątowych w postaci biegunowej sieci komórkowej. Danymi wejściowymi są informacje pochodzące ze skanera 3D.

## 2. SIECI KOMÓRKOWE

Koncepcję neuronowych sieci komórkowych (ang. Cellular Neural Network, CNN) wprowadzili w 1988 roku Leon O. Chua i L. [4]. Autorzy zaproponowali stworzenie tablicy neuronów (w dalszej części pracy nazwanych komórkami), które są połączone lokalnie. Chua wykazał, że stworzone przez niego układy są efektywnym narzędziem do wykonywania czasochłonnych zadań takich, jak przetwarzanie obrazów i rozwiązywanie równań różniczkowych. Typowa struktura sieci komórkowej jest przedstawiona na rys. 3. Podstawowym elementem jest neuron (komórka), który posiada określone pobudzenie, zbiór wartości wejściowych oraz określony sygnał wyjściowy. Zwykle neurony rozłożone są w  $N$  wierszach i  $M$  kolumnach, ale w literaturze możemy znaleźć przykłady sieci o połączeniach innego typu np. trójkątnych, heksagonalnych.



Rys. 3. Sieć komórkowa

Wszystkie komórki przetwarzają sygnał w identyczny sposób. Sygnałami sterującymi są:

- sygnały wejściowe  $u_{ij}$  komórek należących do  $r$ -sąsiedztwa,
- sygnały wyjściowe  $y_{ij}$  komórek należących do  $r$ -sąsiedztwa,
- stan komórki  $x_{ij}$ ,
- sygnał  $I$  zwany polaryzacją.

Wagi połączeń określające oddziaływanie sygnałów wyjściowych komórek sąsiedztwa  $a_{ij}^{kl}$  są indeksem komórki, która jest sterowana, a  $kl$  jest indeksem źródła sterowania. Wagi określające stopień sterowania sygnałami wejściowymi oznaczamy symbolami  $b_{ij}^{kl}$ . W swoich dalszych pracach Chua rozszerzył swoją teorię i wprowadził uogólnione sieci komórkowe, w których połączenia występują lokalnie, nie wymagany jest powtarzalny szablon i regularny układ połączeń. Tą cechą sieci wykorzystujemy w prowadzonych badaniach.

### 3. BIEGUNOWA SIĘĆ KOMÓRKOWA DO PLANOWANIA ŚCIEŻKI

W opisywanej pracy tworzona jest dwuwarstwowa biegunowa sieć komórkowa przedstawiona na rys. 1. Symbolem  $c_{ij}$  oznaczono komórkę reprezentującą podobszar znajdujący się w odległości  $[i^*l, (i+1)l]$  i leżący w sektorze  $[i^* \alpha, (i+1) \alpha]$ , gdzie  $l$  jest rozdzielczością liniową,  $\alpha$  jest rozdzielczością kątową.

Sieć umożliwia zaplanowanie trasy dla robota mobilnego z uwzględnieniem nierówności powierzchni, po której porusza się pojazd.

Algorytm składa się z następujących kroków:

- ustalenie wartości parametrów opisujących działanie sieci i opis sceny;
- odczytanie i przetworzenie danych z lasera 3D, określenie wartości sygnałów płynących do pierwszej warstwy;
- określenie wartości sygnałów wyjściowych i sygnałów wejściowych do kolejnej warstwy;
- obliczenie sygnałów wyjściowych drugiej warstwy;
- wyznaczenie optymalnej orientacji robota.

Ustalenie wartości początkowych, polega na przyjęciu parametrów, takich jak:

- $\alpha$  - kąt określający rozdzielczość kątową;
- $l$  - rozdzielczość liniowa;
- $z_{max}$  - maksymalna wysokość analizowanych obiektów;
- $p$  - próg przejeźdności dla danego kierunku;
- $\Delta z$  - maksymalna dopuszczalna różnica wysokości pomiędzy obszarami reprezentowanymi przez sąsiednie komórki;
- $w_{ij}$  - waga związana z daną komórką. Indeks  $j$  oznacza numer komórki, licząc od środka mapy, na danym kierunku  $i$ . Jest to procentowe określenie odległości komórki od środka mapy. Komórki bardziej odległe mają mniejszy wpływ na proces decyzji wyboru kierunku głównego, niż kierunki bliższe środka mapy;
- $c_g$  - wyróżniona komórka będąca celem.

Po otrzymaniu danych z lasera 3D, dla każdego punktu, określana jest wartość  $ij$  współrzędnych komórki, która reprezentuje podobszar w którym punkt się znajduje, obliczana jest wysokość  $z_{ij}$ , na której została wykryta przeszkoda, przyjmujemy, że  $u_{ij}(t) = z_{ij}$ . Wartość pobudzenia neuronu  $x_{ij}$  obliczana jest w następujący sposób:

- jeżeli  $x_{ij}(t) < u_{ij}(t)$  to  $x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t)$  w pozostałych przypadkach  $x_{ij}(t+1) = u_{ij}(t)$ ,
- wartość sygnału wyjściowego określa równanie:

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{gdy } |x_{ij+1} - x_{ij}| < d \\ 0 & \text{gdy } |x_{ij+1} - x_{ij}| \geq d \end{cases}$$

wartość  $y_{ij}$  jest sygnałem wejściowym do odpowiedniego neuronu drugiej warstwy. Neurony drugiej warstwy są połączone wewnątrz sektorów. W stosowanym obecnie algorytmie  $y_{ij}(t)$  przyjmuje wartości binarne, ale w przyszłości planujemy stworzyć algorytm w którym  $y_{ij}(t)$  będzie miało wartości ciągłe.

- druga sieć umożliwia utworzenie histogramu określającego stopień przejeźdności każdego z kierunków. Przejeźdność kierunku  $i$  określa się według wzoru:

$$h_i = \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} * \delta_{x_{ij}}, \text{ gdzie:}$$

$h_i$  – przejezdność kierunku  $i$ ,  $n$  – numer komórki, która jest celem, licząc od środka mapy,  
 $x_{ij}$  - stan komórki drugiej warstwy, przyjęto, że  $x_{ij}(t) = u_{ij}(t)$

Znając komórkę, która jest celem  $c$ , szukany jest najbliższy kierunek, którego stopień przejezdności jest mniejszy od zadanego progu  $p$ . Ten kierunek jest rozwiązaniem zadania.

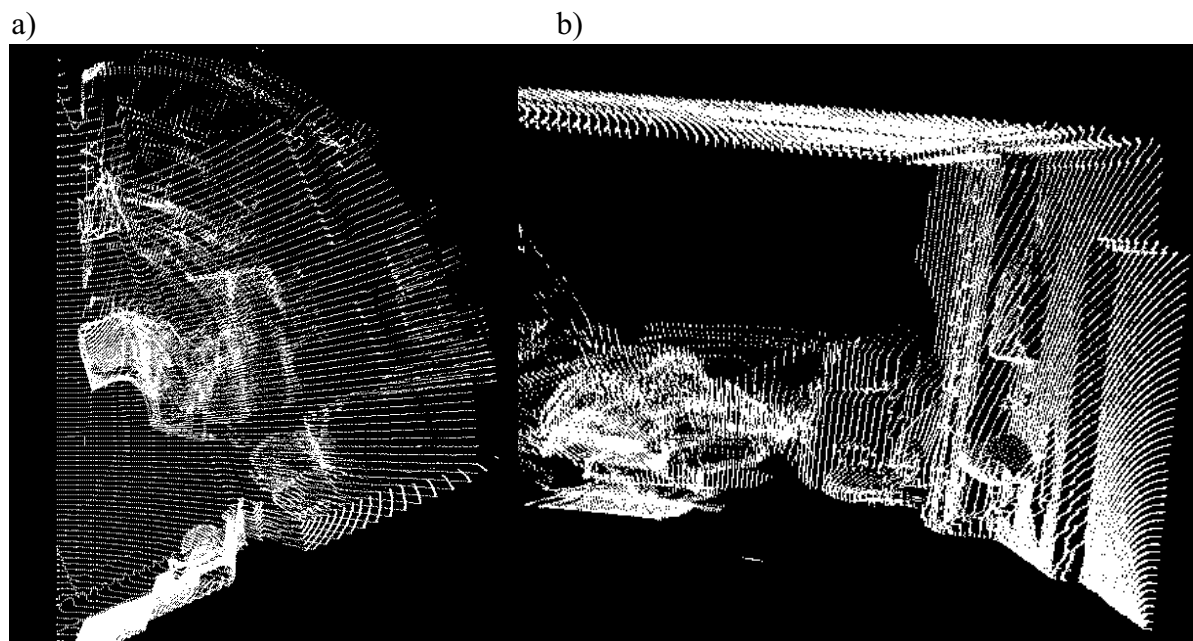
#### 4. EKSPERYMENTY

Opisana wyżej idea została zweryfikowana w procesie obróbki danych otrzymanych z lasera trójwymiarowego, w typowym biurowym środowisku.

##### EKSPERYMENT 1

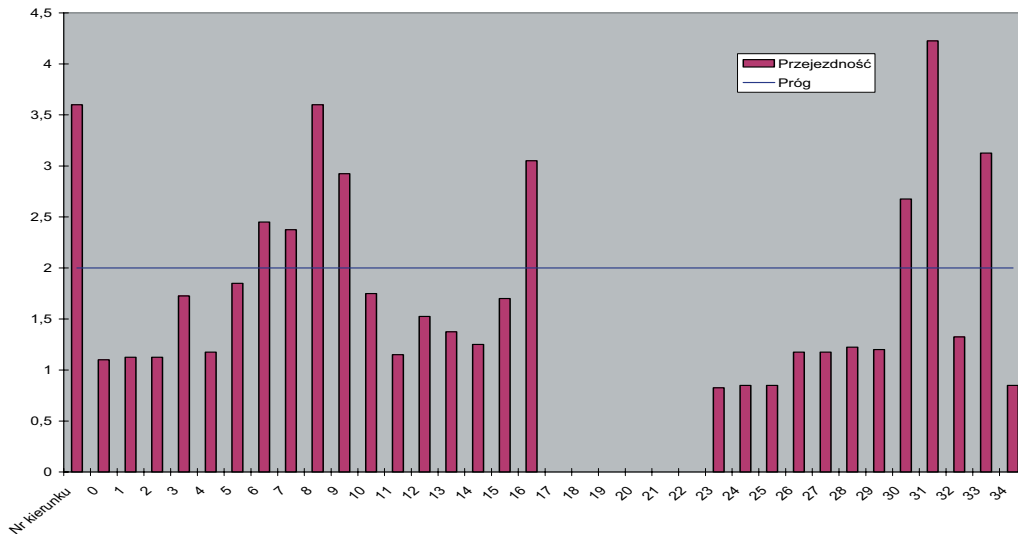
Ustawienia początkowe są następujące: szerokość klatki  $\alpha = 5^\circ$ , długość klatki  $l = 0.1$  m., maksymalna wysokość analizowanych punktów  $z_{max} = 1.5$  m., próg przejezdności kierunku  $p = 2$ , maksymalna dopuszczalna różnica między sąsiednimi klatkami  $\Delta z = 0,1$  m.

Punkty zebrane przez laser 3D, widoczne z góry i z boku są przedstawione na rys 4. Histogram przejezdności kierunków jest przedstawiony na rys 5. Mapa biegunowa zbudowana na podstawie tych punktów jest przedstawiona na rys 6. Widać tam wybrany cel robota, oraz wybrany kierunek główny.

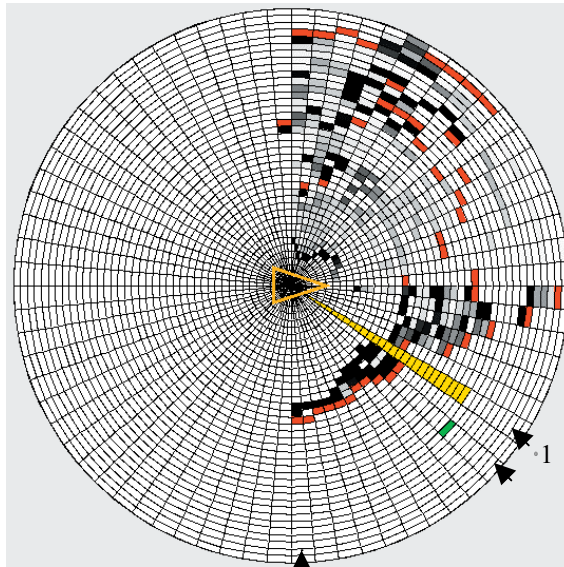


Rys. 4. Widok punktów trójwymiarowych, otrzymanych z lasera. a) rzut z góry, b) widok z boku. Z prawej strony widać drzwi, załom w murze, na wprost i z prawej strony (niewyraźnie) biurka i krzesła

Na histogramie z rys. 5, widać że kierunki „na wprost”, są najbardziej dostępne, co jest zgodne z rzeczywistością, oraz jest widoczne na mapie biegunowej na rys. 6. Kierunki po prawej stronie robota są najczęściej niedostępne, natomiast kierunki po lewej stronie robota są częściowo dostępne. Jest to logiczne, ponieważ po prawej stronie robota jest stosunkowo odległa ściana. Współczynnik  $\gamma$  powoduje, że niektóre z tych kierunków są dopuszczalne, ponieważ komórki nieprzejezdne są daleko.



Rys. 5. Histogram, zbudowany na podstawie danych z rys. 4. Słupki oznaczają koszt przejazdu w danym kierunku, granatowa linia przedstawia ustalony próg. Kierunki, które mają mniejszy koszt przejazdu niż ustalony próg są kierunkami dopuszczalnymi



Rys. 6. Mapa biegunowa zbudowana na podstawie danych z rys. 4. Na środku widać położenie i zwrot robota. Szary kolor komórki oznacza różnicę wysokości w stosunku do komórki bliżej robota. Kolorem czerwonym oznaczono komórki, których stan jest nieznan. Kolor zielony przedstawia komórkę, która jest celem, a kolor żółty przedstawia optymalny kierunek

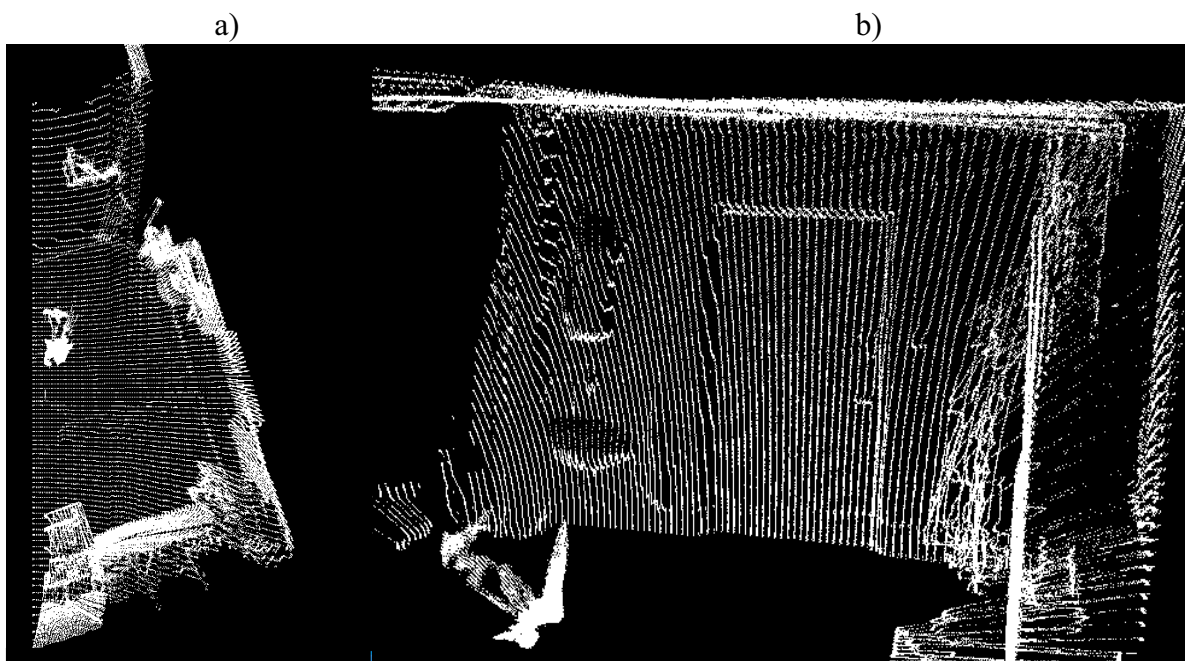
Przedstawione na rys. 6 ciemnoszare komórki po lewej stronie robota przedstawiają znajdujące się tam biurka. Ciemnoszary kolor oznacza dużą różnicę wysokości pomiędzy podłogą a biurkiem. Następne komórki są przedstawione kolorem jasnoszarym, ponieważ różnica wysokości pomiędzy kolejnymi komórkami nie jest już tak duża. Na rys 6 zielonym kolorem przedstawiono cel robota, który znajduje się na kierunku nr 9. Z histogramu na rys. 5 widać, że przejezdność tego kierunku jest powyżej dopuszczalnego progu, w związku z tym poszukiwany jest najbliższy dopuszczalny kierunek. Na histogramie widać, że sąsiednie kierunki, 7,8,10 też są niedopuszczalne a najbliższy dopuszczalny jest kierunek nr 11. Dlatego ten kierunek został wybrany jako optymalny, co jest przedstawione kolorem żółtym na rys 6.

## EKSPERYMENT 2

Ustawienia początkowe zostały przyjęte jak w poprzednim przypadku. Scena, zbiór punktów, histogram i mapa biegunowa zostały przedstawione na rysunkach 7-9. Eksperyment został przeprowadzony w tym samym miejscu, jednak robot został obrócony przodem do znajdujących się tam drzwi.

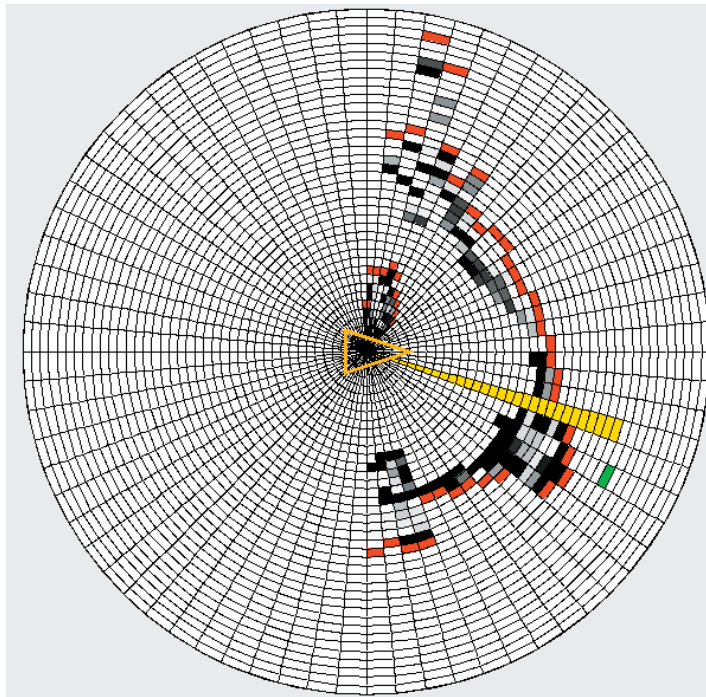


Rys. 7. *Miejsce zbierania danych. Na pierwszym planie widać laser 3D. Na wprost ściana z drzwiami*



Rys. 8. *Widok punktów trójwymiarowych, otrzymanych z lasera. a) rzut z góry, b) widok z boku. Na wprost widać ścianę z drzwiami i umywalką na lewo od drzwi. Z prawej strony jest ściana, z lewej niewidoczna dalsza część pomieszczenia*

Porównując rysunki 7 - 9 widać, że ściana na wprost i z prawej strony, oraz krzesło i wolna przestrzeń z lewej strony potwierdzają się na każdym rys. Na rys 9 widać wybrany cel i wskazany optymalny kierunek.



Rys. 9. Mapa biegunowa zbudowana na podstawie danych z rys. 8.  
Oznaczenia identyczne z rys. 6.

## 5. WNIOSKI

W powyższym artykule przedstawiono oryginalną architekturę biegunowej sieci komórkowej. Struktura sieci umożliwia bezpośrednie wykorzystanie danych napływających ze skanera laserowego 3D i utworzenie reprezentacji 2.5D środowiska w którym porusza się robot. Mapa umożliwia generowanie bezkolizyjnej trasy. Zastosowano zmodyfikowaną metodę histogramów kątowych.

*Prace opisywane w powyższym artykule, były finansowane z grantu MNiSW, nr 4311/B/T02/2007/33.*

## LITERATURA

1. J. Borenstein, Y. Koren, *Real-time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 7, pp. 1179-1187, 1989.
2. J. Borenstein, Y. Koren, *Real-time Map-building for Fast Mobile Robot Obstacle Avoidance*, SPIE Symposium on Advances in Intelligent Systems, 1990.
3. L. Chua, L. Young, *Cellular Neural Network*, IEEE Transaction on Circuit System, pp. 500-505, 1999.
4. H.P. Moravec, *Sensor fusion in certainty grids for mobile robots*, AI Magazine, s. 61-74, 1988.
5. B. Siemiątkowska, M. Gnatowski, A. Zychowicz, *Fast Method of 3D Map Building Based on Laser Range Data*, Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems, vol. 2, ss. 5, 2007.
6. B. Siemiątkowska, M. Gnatowski, A. Zychowicz, *Tworzenie map otoczenia robota mobilnego na podstawie wskazań skanera 3D*", PAR 3/2007, s. 8.