

ZAGADNIENIA NAWIGACYJNE DLA ROBOTÓW MOBILNYCH

Adam BORKOWSKI Artur DUBRAWSKI Barbara SIEMIĄTKOWSKA

Streszczenie

Przy projektowaniu mobilnych robotów pojęcie nawigacji obejmuje trzy zagadnienia: tworzenie i uaktualnianie mapy otoczenia robota, określanie jego bieżącej pozycji oraz planowanie trasy przejazdu. Celem niniejszej pracy jest omówienie badań prowadzonych w tej dziedzinie w Pracowni Systemów Adaptacyjnych IPPT PAN oraz usytuowanie tych badań na tle aktualnego stanu wiedzy. W szczególności, prezentowane są dwie oryginalne metody: zastosowanie neuronowej sieci komórkowej do planowania trajektorii ruchu robota oraz wykorzystanie wyróżnionych kierunków w jego otoczeniu do korygowania oceny bieżącej pozycji.

1 WSTĘP

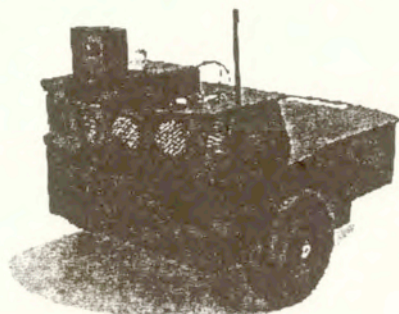
Miliony ludzi śledziło z zapartym tchem pierwsze obrazy przesyłane z Marsa przez lądownik *Pathfinder* na początku lipca 1997 (rys. 1). Widoczny na pierwszym planie tego zdjęcia robot mobilny *Sojourner* przejechał około 100 m w trudnym terenie Czerwonej Planety przekazując na Ziemię 550 obrazów, dokonując 16 analiz chemicznych skał i podłoża, badając własności mechaniczne gruntu [21]. Był to niewątpliwie najbardziej spektakularny sukces działu robotyki, dotyczącego zdalnie sterowanych robotów mobilnych.



Rysunek 1: Sonda Pathfinder na Marsie.

Ten dział robotyki rozwija się pomyślnie od wielu lat, stanowiąc przykład interdyscyplinarnego działu techniki. Budowa robota mobilnego wymaga bowiem umiejętnego zastosowania osiągnięć mechaniki, elektroniki i informatyki. Sprzęgnięte razem pozwalają one budować urządzenia zdolne do samodzielnego poruszania się w skomplikowanym, często zmiennym i słabo rozpoznanym środowisku. Wyposażone w odpowiednie urządzenia

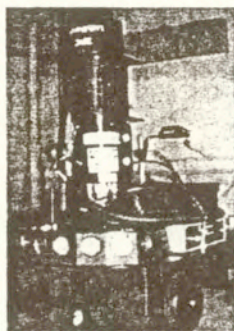
wykonawcze, roboty tego typu zastępują człowieka w sytuacjach szkodliwych dla zdrowia lub wręcz niebezpiecznych, ewentualnie wyręczają go w pracach, które człowiek uważa za żmudne i wyczerpujące.



Rysunek 2: Robot laboratoryjny Pioneer 1.



a)



b)

Rysunek 3: a) Robot laboratoryjny B14

b) Laserowy skaner TRC

Większość liczących się w świecie uczelni technicznych i instytutów naukowych prowadzi badania w dziedzinie robotów mobilnych. Tematyka ta stanowi również stały element kształcenia specjalistów z zakresu automatyki i robotyki. W Stanach Zjednoczonych jednym z wiodących jest Instytut Robotyki Uniwersytetu Carnegie-Mellon w Pittsburgu, w Japonii – Mechanical Engineering Laboratory w Tsukubie, w Europie – Instytut Techniki Procesorowej i Robotyki Uniwersytetu w Karlsruhe. Spośród wielu konferencji o zasięgu światowym poświęconych tej dziedzinie wypada wymienić IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE RSJ International Conference on Intelligent

Robotics Systems (IROS), Intelligent Autonomous Systems (IAS), czy International Symposium on Intelligent Robotic Systems (SIRS). Ta ostatnia impreza, odbywająca się w cyklu rocznym, została zapoczątkowana spotkaniem w Zakopanem w 1993 r.

W kraju zespoły zajmujące się od dłuższego czasu problematyką robotów mobilnych usytuowane są na Politechnikach Poznańskiej (prof. A. Woźniak, prof. A. Kasiński, prof. K. Kozłowski), Warszawskiej (prof. A. Morecki, dr hab. T. Zielińska) i Wrocławskiej (prof. W. Jacak, dr A. Wołczowski). Ostatnio problematyka ta pojawiła się również na innych uczelniach prowadzących studia z dziedziny automatyki i robotyki. Ważne prace z zakresu zastosowań robotów mobilnych w praktyce prowadzone są w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów (prof. A. Masłowski i doc. R. Sawwa). Forum wymiany doświadczeń, poza Krajową Konferencją Robotyki i imprezami międzynarodowymi, stanowią Warsztaty Robotów Mobilnych organizowane przez IPPT PAN w cyklu dwuletnim.

Pracownia Systemów Adaptacyjnych IPPT PAN rozpoczęła badania w tej dziedzinie w 1984 r., w ramach ówczesnego C.P.B.P. 05.12. Obecnie zespół ten uczestniczy w kilku krajowych projektach badawczych finansowanych przez KBN oraz współpracuje z ośrodkami zagranicznymi w Grenoble, Paryżu, Bonn, Stuttgarcie i Kownie. Pracownia jest dość dobrze wyposażona: dysponujemy 3 robotami Pioneer 1 (rys. 1), robotem B14 (rys. 3a) oraz skanerem laserowym TRC (rys. 3b). Do badań symulacyjnych i sterowania tymi urządzeniami służą stacje robocze Sun i komputery typu PC tworzące lokalną sieć. W dalszych rozdziałach przedstawimy wybrane wyniki naszych badań.¹

2 REPREZENTACJA OTOCZENIA RUCHOMEGO ROBOTA

Reprezentacja sceny robota musi spełniać następujące warunki: powinna istnieć możliwość agregowania danych pochodzących z różnych sensorów i różnych położenia robota, dokładność mapy powinna wzrastać wraz ze wzrostem liczby danych napływających z czujników odległości, robot może poruszać się w otoczeniu naturalnym.

Istnieją trzy podstawowe numeryczne metody reprezentacji otoczenia ruchomego robota: opis sceny w postaci grafu, reprezentacja geometryczna przestrzeni oraz reprezentacja rastrowa.

W reprezentacji grafowej otoczenia ruchomego robota nie określa się kształtu przeszkód, ale definiuje się obszar, po którym robot może się bezpiecznie poruszać. Wybierany jest zbiór punktów wolnych od przeszkód, nazywany zbiorem punktów decyzyjnych, który jest zapamiętywany w postaci węzłów grafu. Dwa węzły są ze sobą połączone, jeśli odcinek łączący odpowiadające im punkty jest wolny od przeszkód. Istnieją dwie podstawowe

¹Część sprzętu jest wypożyczona z Politechniki Warszawskiej i PIAP.

strategię automatycznego określania węzłów: z dala od przeszkód (algorytmy poszukiwania wolnej przestrzeni), blisko przeszkód (algorytmy konstruowania naroży) [34] [35] [19] [20].

Opis wektorowy znajduje się w pracach J. Crowley'a [8] [9]. W reprezentacji tej wszystkie przeszkody opisywane są jako ciągi odcinków $[\delta x_i, \delta y_i]$.

Jeśli mamy ciągi odczytów sensorów $\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$, to znając orientację i położenie robota, możemy obliczyć współrzędne globalne położenia wykrytych przeszkód.

$$x_i = X_r + R_i \cdot \cos \alpha \quad y_i = Y_r + R_i \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

Ciąg punktów $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ jest dzielony na grupy w ten sposób, że do jednej grupy należą takie punkty, że odległość między nimi nie jest większa niż średnica robota. Dla skrajnych punktów danej grupy wyznaczane jest równanie prostej $Ax + By + C = 0$, która przez te punkty przechodzi. Następnie, dla każdego punktu należącego do grupy, wyznaczona zostaje odległość e_i od wyznaczonej prostej. Aby wszystkie punkty można było zakwalifikować do wyznaczonej prostej musi być spełniony warunek:

$$\max(|e_i|) \leq \frac{\sigma_i}{2} \quad (2)$$

gdzie σ_i jest niepewnością usytuowania i -tego punktu w kierunku normalnym do prostej $Ax + By + C$. Jeśli powyższy warunek nie jest spełniony dla wszystkich punktów należących do danej grupy, to zbiór jest dzielony na dwa zbiory, w punkcie, dla którego odległość jest największa. Rekursywne poszukiwanie wektorów trwa aż do momentu, gdy warunek 2 jest spełniony dla wszystkich punktów grupy. Skrajne punkty wyznaczają poszukiwany odcinek. Z każdym odcinkiem wiąże się pewien parametr określający niepewność jego usytuowania. Wartość tego parametru zależy od dokładności sensorów robota tzn. niepewności położenia punktów należących do danej grupy względem prostej $Ax + By + C$.

Bardzo ciekawy sposób geometrycznego opisu otoczenia robota wyposażonego w sonary przedstawiony jest w pracy Leonarda i Durrant-Whyte'a [29]. Mapa otoczenia jest reprezentowana jako lista obiektów charakterystycznych: naroży, fragmentów ścian. Zauważono, że uzyskany z sonaru obraz ściany i naroża jest podobny. Obrazy te jednak można odróżnić porównując odczyty uzyskane z różnych położenia robota. Ściana bardzo silnie odbija sygnał ultradźwiękowy, natomiast w przypadku naroży następuje wielokrotne odbicie wysłanej wiązki, a to powoduje, że stosunkowo mała zmiana położenia robota powoduje duże zmiany otrzymanych odczytów sonaru. Ściana jest reprezentowana jako trójka wartości: (p_R, p_ϕ, p_V) , gdzie: p_R - minimalna odległość między początkiem układu współrzędnych, a wykrytą prostą, p_ϕ - kąt nachylenia odcinka prostopadłego do prostej i przechodzącego przez początek globalnego układu współrzędnych do osi Ox , p_V - parametr o wartościach -1 lub 1 określający z której strony prosta jest obserwowana.

Naroże jest reprezentowane jako para (p_x, p_y) , gdzie p_x, p_y są współrzędnymi globalnymi. Każdemu obiektowi przypisywana jest wartość określająca poziom wiarygodności przyjętej hipotezy. Przy zmianie położenia robota porównywane są odczyty sonaru z hipotetycznym położeniem przeszkód wykrytych w poprzednim kroku. Jeśli wynik porównania jest pozytywny, to poziom wiarygodności hipotez rośnie. Podstawową zaletą przyjętej metody jest to, że umożliwia ona samolokalizację robota poruszającego się w nieznanym otoczeniu.

Metoda rastrowa ze względu na jej elastyczność jest opisywana w wielu pracach [16] [39]. W opisie rastrowym otoczenie robota jest dzielone na elementarne podobszary, najczęściej prostokąty o wymiarach $\Delta x \times \Delta y$.

3 SENSORY

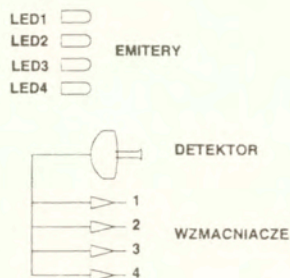
3.1 CZUJNIKI BLISKIEGO ZASIĘGU

W zbliżeniowych czujnikach podczerwieni wykorzystuje się zjawisko echa. Ze względu na dużą prędkość rozchodzenia się promieniowania trudno jest obliczyć czas między wysłaniem fali, a zarejestrowaniem fali odbitej.

Najprostsze czujniki podczerwieni składają się z diody emitującej promieniowanie podczerwone, zwierciadła parabolicznego i detektora rejestrującego, czy nastąpiło odbicie fali. Urządzenia tego typu dostarczają informacji binarnej, tzn. sygnalizują czy w kierunku skanowania występuje przeszkoda. W czujniki tego typu wyposażony jest Robot Ulisses. Zasięg czujników Ulissesa wynosi ok. 60 cm. Dokładność ta nie jest wystarczająca, jeśli robot porusza się w otoczeniu z dużą ilością przeszkód. W bardziej skomplikowane czujniki wyposażony jest robot Roborat 2 [17]. Schemat urządzenia przedstawiony jest na rysunku 4. Składa się ono z czterech diod emitujących promieniowanie bliskiej podczerwieni, zwierciadła parabolicznego i 4 detektorów o różnej czułości. Działanie sensora jest następujące: zapalona zostaje pierwsza dioda i sprawdza się, czy któryś z detektorów wykrył powracające echo. Jeśli żaden z detektorów nie zareagował, to zapalana jest kolejna dioda. Proces jest kontynuowany aż do momentu, w którym wszystkie cztery diody zostały zapalone lub któryś z detektorów zarejestrował powracającą falę. Na podstawie znajomości czułości najbardziej wrażliwego z detektorów, które odebrały echo i liczby włączonych diod oszacowywana jest odległość między czujnikiem a przeszkodą.

W robocie Nomad 200 detektory wyposażone są w fotokomórki określające natężenie powracającej fali i na podstawie porównania natężenia fali wysyłanej i odbieranej określana jest odległość.

Ze względu na małą długość fali, promieniowanie podczerwone jest mało wrażliwe na strukturę powierzchni obserwowanego obiektu i kąta padania na przeszkodę. Istotny



Rysunek 4: Schemat zblizeniowego czujnika podczerwieni

wpływ ma barwa wykrytej przeszkody. Obiekty czarne silnie pochłaniają promieniowanie świetlne i dlatego mogą zostać przez czujnik podczerwieni nie wykryte.

Ze względu na mały zasięg działania (ok. 0.7m) czujniki podczerwieni najczęściej są używane jako uzupełnienie sonarów.

3.2 CZUJNIKI ULTRADŹWIEKOWE

Przetworniki ultradźwiękowe przetwarzają energię elektryczną na energię akustyczną i odwrotnie. Jeśli np. do płytki kwarcowej przyłożymy zmienne napięcie elektryczne, to płytka ta zaczyna drgać. Jej drgania rozchodzą się w ośrodku, w którym się znajduje w postaci fal ultradźwiękowych.

Rozkład natężenia fali na osi przetwornika określany jest przez charakterystykę kierunkowości. Charakterystyka ta jest krzywą narysowaną we współrzędnych biegunowych. Na współrzędnej nachylonej pod kątem ϕ do osi głównej ($\phi=0$) odkłada się stosunek ciśnienia akustycznego fali wysyłanego w danym kierunku do ciśnienia wysyłanego w kierunku głównym. Istotną cechą charakterystyczną wiązki jest kąt rozbieżności określany jako kąt, przy którym amplituda fali spada o 3dB. Im większe są wymiary przetwornika i fala jest krótsza, tym kąt rozbieżności jest mniejszy. Dobranie właściwej charakterystyki ma bardzo duże znaczenie w układach rozpoznawania otoczenia. Wąska wiązka umożliwia bardziej precyzyjne lokalizowanie przeszkody. Na przykład, jeśli wiązka o szerokości $2r$ pada na przeszkodę kulistą o promieniu R , to aby błąd wskazania nie przekraczał wartości ε , spełniony musi być warunek [40]:

$$R \geq \frac{(r^2 + \varepsilon^2)}{2\varepsilon} \quad (3)$$

Jeśli kąt skanowania jest duży, to bardziej korzystne jest stosowanie wiązki o dużym

kącie rozbieżności, gdyż przy zbyt małym kącie przeszkody mogą zostać nie zauważone.

W sonarach wykorzystuje się zjawisko echa. Jeśli fala ultradźwiękowa pada na przeszkodę, to występuje zjawisko odbicia fali. Jeśli obliczymy czas między wysłaniem fali, a jej odebraniem, to możemy określić odległość od przeszkody zgodnie ze wzorem:

$$d = \frac{1}{2} \cdot v \cdot t \quad (4)$$

gdzie: v - prędkość fali, a t - czas między wysłaniem sygnału a jego odebraniem.

Pomiar czasu nie jest możliwy jeśli przetwornik wysyła falę ciągłą i dlatego powinien on wysyłać ciąg impulsów. Czoło impulsu jest wyróżnionym fragmentem fali. Przetwornik może wykryć echo jedynie wtedy, gdy amplituda powracającej fali przekracza pewną graniczną wartość, która zależy od szeregu parametrów. Do najważniejszych należy: amplituda wysyłanego sygnału, współczynnik tłumienia danego ośrodka, odległość od przeszkody, typ powierzchni przeszkody, kat padania wiązki na przeszkodę.

3.3 DALMIERZE LASEROWE

W ostatnich latach obserwuje się wzrost liczby zastosowań laserowych czujników odległości w systemach nawigacyjnych robotów mobilnych. Czujniki te cechuje wysoka dokładność, duża rozdzielczość kątowa i bardzo krótki czas pomiaru. Dzięki zastosowaniu światła strukturalnego i triangulacji lub poprzez obracanie wiązki pomiarowej np. przy pomocy wirujących lusterek, niektóre z czujników umożliwiają dokonywanie odczytów w przestrzeni dwu- lub trójwymiarowej [14]. Czujniki laserowe dostarczają zwykle dużo informacji ze stosunkowo dużą częstotliwością. Pojawia się w związku z tym potrzeba opracowywania efektywnych technik przetwarzania tak dużych strumieni informacji. Jedną z takich metod przedstawiamy poniżej. W tabeli 1 przedstawiono wartości podstawowych parametrów laserowego skanującego czujnika odległości Light Ranger firmy HelpMate, który był używany w opisywanych badaniach.

4 AGREGACJA POMIARÓW

4.1 PODEJŚCIE BAYESOWSKIE

Metoda zaproponowana została przez Elfesa i Moravec'a [16][39], była stosowana do tworzenia map otoczenia robota wyposażonego w sonary. Stosując wzór Bayesa, regułę agregacji można zapisać następująco:

$$P(z/d_0) = \frac{P(d_0/z) \cdot P(z)}{P(d_0/z) \cdot P(z) + P(d_0/w) \cdot P(w)} \quad (5)$$

Zakres pomiaru odległości	0.125 ÷ 10.0 m
Rozdzielczość	5 mm na dystansie 1 m 100 mm na dystansie 10 m
Rozdzielczość katowa	1°
Zakres kątów skanowania	330° (w poziomie) 45° (w pionie)
Częstotliwość pomiarów	1800 Hz
Częstotliwość skanowania w płaszczyźnie poziomej	5 Hz
Długość fali	780 nm (podczerwień)
Moc lasera	6 mW

Tablica 1: Parametry użytkowe laserowego czujnika odległości Light Ranger.

$P(z)$ - obliczona w poprzednim kroku wiarygodność hipotezy, że dana komórka jest zajęta, $P(w)$ - obliczone w poprzednim kroku wiarygodność hipotezy, że dana komórka jest wolna, $P(d_0/z)$ - stopień wiarygodności hipotezy, że dana komórka jest zajęta, przy założeniu że wartość wskazań sensora wynosi d_0 , wartość ta jest obliczana na podstawie charakterystyki sensora. $P(d_0/w)$ - wiarygodności hipotezy, że dana komórka jest wolna, przy założeniu, że wartość wskazań sensora wynosi d_0 , wartość ta jest obliczana na podstawie charakterystyki sensora. $P(w/d_0)$ - nowa wartość wiarygodności hipotezy, że dana komórka jest wolna. $P(z/d_0)$ - nowa wartość wiarygodności hipotezy, że dana komórka jest zajęta.

W ramach współpracy z Przemyslowym Instytutem Aparatury Pomiarowej prowadzono badania nad wykorzystaniem laserowego czujnika odległości do tworzenia map otoczenia. Używany w eksperymentach laser firmy Help Mate (dawniej TRC) przesyła 2000 pomiarów w ciągu jednej sekundy, a więc, aby system mógł działać w czasie rzeczywistym, niezbędne jest przetworzenie bardzo dużej liczby informacji w krótkim czasie. Ponieważ system powinien działać w czasie rzeczywistym przyjęto następujące uproszczenia: wiarygodności hipotez są obliczane z dokładnością do 0.01. Ponieważ wartości są liczbami z przedziału $[0,1]$ i obliczne są z dokładnością do 0.01, więc mogą być przechowywane w tablicy w postaci liczb całkowitych z przedziału $[0,100]$ w ten sposób, że liczba k odpowiada wartości $0.01 \cdot k$. Wartości komórek mapy lokalnej są zawsze agregowane z jedną z dwu liczb Z_z - wiarygodność hipotezy, że dana klatka jest zajęta lub Z_w - wiarygodność hipotezy, że klatka jest wolna, wartości te są wyznaczone eksperymentalnie, przy uwzględnieniu wiarygodności wskazań czujnika odległości. Wartości zapamiętywanych stopni potwierdzenia hipotez są z przedziału $[0.01,0.99]$ i zmieniają się w sposób dyskretny co 0.01. Możemy więc utworzyć tablice T_w i T_z takie, że i -ty element tablicy T_w przechowuje wartość wzoru 5 dla $P(d_0/z) = i \cdot 0.01$ i $P_z = Z_w$, a i -ty element tablicy T_z przechowuje wartość wzoru 5 dla $P(d_0/z) = i \cdot 0.01$ i $P_z = Z_z$. Jeśli dla danej klatki poprzednia wartość prawdopodobieństwa

współczynnik ufności	ilość pętli	czas w s.
0.9	2	0.20
0.8	4	0.40
0.7	6	0.60
0.6	10	1.0

Tablica 2: Zestawienie czasu obliczeń dla różnych współczynników ufności

wynosiła $k \cdot 0.001$ i na podstawie kolejnych wskazań lasera stwierdzono, że jest zajęta przez przeszkodę to nowa wartość prawdopodobieństwa wynosi $0.01 \cdot T_z[k]$. Jeśli natomiast klatka została uznana jako wolna, to nowa wartość $P(zd_0)=0.01 \cdot T_w[k]$. Powyższa metoda jest kilkakrotnie szybsza niż klasyczna metoda probabilistyczna. Dzięki dyskretyzacji wartości zmniejsza się obszar pamięci niezbędny do przechowania mapy. Nie zauważono pogorszenia dokładności mapy przy przyjętych uproszczeniach.

Oprócz testów wykonywanych w statycznym otoczeniu robota testowano także zachowanie systemu w przypadku pojawienia się przeszkód dynamicznych. Badano czas potrzebny do tego, aby klatka uznana jako wolna (prawdopodobieństwo zajetości 0.1) po pojawieniu się przeszkody została uznana jako zajęta (prawdopodobieństwo zajetości 0.9). Przyjęto założenie, że laser wykonuje 10 obrotów w ciągu sekundy. Omawiane zależności przedstawia tabela 2.

4.2 ZASTOSOWANIE MODELU DEMPSTERA-SHAFERA

Teoria Dempstera-Shafera jest teorią alternatywną do powszechnie stosowanej metody probabilistycznego przetwarzania informacji niepewnej. W przeciwieństwie do metody Bayesa dopuszcza się możliwość występowania informacji niewyspecyfikowanych. Przyjęto, że na podstawie uzyskanych informacji określamy poziomy wiarygodności następujących hipotez: h_w - klatka jest wolna, h_z - klatka jest zajęta, h_n - stan klatki jest nieokreślony. Początkowo ustala się, że dla wszystkich komórek mapy globalnej $h_w=h_z=0.1$, $h_n=0.8$. Jeśli istnieje wstępna informacja o ilości przeszkód w otoczeniu robota, to można te wartości zainicjalizować w inny sposób. Na podstawie wstępnej analizy odczytów określone są wartości bazowe hipotez dla klatek należących do obszaru obserwowanego przez sensor.

Nowe wartości wiarygodności hipotez przedstawia równanie:

$$h_w^n = \frac{h_w^p \cdot h_w + h_w^p \cdot h_n + h_w \cdot h_n^p}{1 - h_z^p \cdot h_w + h_w^p \cdot h_z} \quad (6)$$

$$h_z^n = \frac{h_z^p \cdot h_z + h_z^p \cdot h_w + h_z \cdot h_w^p}{1 - h_z^p \cdot h_w + h_w^p \cdot h_z} \quad (7)$$

$$h_n^n = \frac{h_n^p \cdot h_n}{1 - h_z^p \cdot h_w + h_w^p \cdot h_z} \quad (8)$$

h_w - wartość bazowego prawdopodobieństwa hipotezy *klatka wolna* uzyskana na podstawie pomiarów lasera, h_n - wartość bazowego prawdopodobieństwa hipotezy *klatka nieokreślona* uzyskana na podstawie pomiarów lasera, h_z - wartość bazowego prawdopodobieństwa hipotezy *klatka zajęta* uzyskana na podstawie pomiarów lasera, h_w^p - wartość bazowego prawdopodobieństwa hipotezy *klatka wolna* przechowywana w mapie globalnej, h_z^p - wartość bazowego prawdopodobieństwa hipotezy *klatka zajęta* przechowywana w mapie globalnej, h_n^p - wartość bazowego prawdopodobieństwa hipotezy *klatka wolna* przechowywana w mapie globalnej, h_w^n - nowa wartość prawdopodobieństwa bazowego hipotezy *klatka wolna*, h_z^n - nowa wartość prawdopodobieństwa bazowego hipotezy *klatka zajęta*, h_n^n - nowa wartość prawdopodobieństwa bazowego hipotezy *klatka nieokreślona*.

Początkowe wyniki stosowania metody tej były bardzo obiecujące, ale próby zastosowania jej w otoczeniu z dużą liczbą przeszkód zakończyły się niepowodzeniem. Metoda jest niestabilna numerycznie w przypadku silnie sprzecznych danych. Sytuacja taka występuje np. w przypadku pojawienia się ruchomej przeszkody.

4.3 ZASTOSOWANIE ZBIORÓW ROZMYTYCH

Dla kolejnych położenia robota, znając ciąg odczytów sensorów możemy utworzyć rodzinę zbiorów rozmytych $\{Z_k\}$, których funkcje przynależności, oznaczone symbolami μ^k przyporządkowują każdej klatce mapy wartość liczbową z przedziału $[0,1]$. Wartości funkcji μ_{ij}^k odzwierciedlają poziom wiarygodności hipotezy, że przy danym położeniu robota i danym ciągu odczytów klatka ij jest zajęta przez przeszkodę.

Tworzymy także rodzinę zbiorów rozmytych M_z^k o funkcjach przynależności oznaczonych symbolami m^k i takich, że

$$m^k : X \rightarrow [0, 1] \quad (9)$$

Zakładamy, że

$$\forall_{kl \in X} m_{kl}^0 = 0.5 \quad (10)$$

i

$$M^{k+1} = M^k \circ Z^{k+1} \quad (11)$$

\circ jest operatorem agregacji zbiorów rozmytych.

Zbiór M^k jest obrazem mapy rzeczywistego otoczenia, jaka powstaje po k odczytach sensorów.

$$\lim_{i \rightarrow \infty} M^i \rightarrow M \quad (12)$$

współczynnik b	współczynnik λ	ilość petli	czas w s.
0.6	1.2	36	3.6
0.6	2.0	22	2.2
0.8	1.2	13	1.3
0.8	1.8	9	0.9
0.8	2.0	8	0.8
0.9	1.2	10	3.6
0.9	1.6	8	0.8
0.9	1.8	6	0.6
0.9	2.0	5	0.5

Tablica 3: Zestawienie czasu obliczeń dla różnych współczynników ufności

Funkcja agregacji $h(a,b)$ może być np. określona wzorem:

$$h(a,b) = a + \lambda \cdot (b - 0.5) \cdot a \cdot (1 - a) \quad (13)$$

Postać map otrzymanych przy pomocy metod korzystających z teorii zbiorów rozmytych jest bardzo podobna do map otrzymanych przy pomocy metod statystycznych, taki sam jest również czas obliczeń, inny jest natomiast czas reakcji na obiekty ruchome. Tabela 3 przedstawia czas reakcji dla różnych wartości parametrów b i λ . Przyjęto, że dla danej klatki początkowa wartość funkcji przynależności do zbioru rozmytego *Zajęty* wynosi 0.1, a chcemy, aby po pojawieniu się nowej przeszkody wartość funkcji wynosiła 0.9.

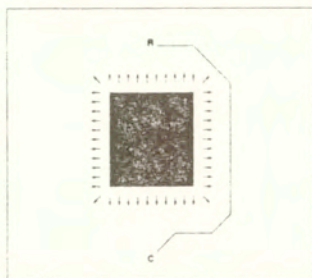
5 PLANOWANIE BEZKOLIZYJNEGO PRZEJAZDU

5.1 METODA POTENCJAŁU

Potencjalowe metody planowania ścieżki były one rozwijane przez Khatib'a i Krogh'a[23] i modyfikowane przez Thrope'a [56]. W metodzie przyjmuje się, że przestrzeń po której porusza się robot reprezentowana jest jako zbiór punktów decyzyjnych oraz punkty reprezentujące cel i pozycje robota. Każdemu elementowi tego zbioru można przyporządkować wartość funkcji (energii), która zależy od położenia punktu względem celu i względem przeszkód. Znając postać funkcji energii można określić rozkład sił powodujący ruch robota. Rozkład sił musi być taki, aby robot był przyciągany przez cel i odpychany przez przeszkody. Nazwa - metoda potencjałowa, pochodzi stąd, że wektor sił może zostać obliczony na podstawie skalarnego pola potencjałowego, w którym przeszkody są traktowane jako wzniesienia, a cel jako wgłębienie. Rozkład pola opisuje wzór:

$$V(x, y) = \sum V_p(x, y) + V_c(x, y) \quad \vec{F}(x, y) = \text{grad}(V(x, y)) \quad (14)$$

gdzie: (x, y) - współrzędne punktu, $V_p(x, y)$ - wartość funkcji potencjałowej w (x, y) obliczonej na podstawie znajomości położenia przeszkody, $V_c(x, y)$ - wartość funkcji potencjałowej w (x, y) , uwzględniającej jedynie położenie celu. $V(x, y)$ - wypadkowa wartość funkcji potencjałowej. Na jej wartość ma wpływ położenie przeszkód i celu. $\vec{F}(x, y)$ - wartość siły w (x, y) .



Rysunek 5: Ścieżka wygenerowana przy pomocy metody potencjałowej

Jeśli robot znajduje się w punkcie (x, y) to kierunek ruchu określa wektor $\vec{F}(x, y)$. Podobnie jak we wszystkich metodach gradientowych podstawowym problemem przy stosowaniu pól potencjałowych są minima lokalne, dlatego istnieje wiele metod doboru funkcji potencjałowych, najbardziej polecane są funkcje eliptyczne. [28]

5.2 POLA WEKTOROWE

W opisywanej poniżej metodzie przyjęto rastrową reprezentację sceny. Na mapie globalnej wyróżnia się pewien podobszar, zwany *aktywnym oknem*, którego środek wyznacza położenie robota x_r, y_r . Aktywne okno dzielone jest na n -sektorów, wychodzących z punktu x_r, y_r . Kąt rozwarcia α określa wzór:

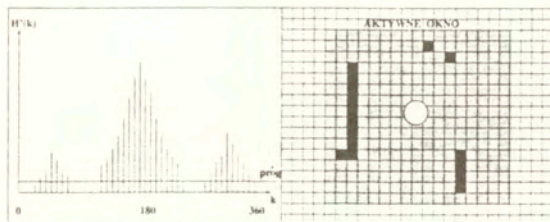
$$\alpha = \frac{360^\circ}{n} \quad (15)$$

gdzie n - stała, określająca liczbę sektorów.

Dla każdego z sektorów wyznacza się wartość funkcji h - gęstości występowania w nim przeszkód, według wzoru:

$$h_k = \sum_{ij} m_{ij} \quad m_{ij} = c_{ij}^2 \cdot (a - b \cdot d_{ij}) \quad (16)$$

Suma jest obliczana dla wszystkich komórek zajętych przez przeszkody, występujących w sektorze k . m_{ij} - określa pewność występowania przeszkody w komórce ij . a, b -stałe, c_{ij} prawdopodobieństwo występowania przeszkody w klatce ij , d_{ij} odległość między klatką ij , a położeniem robota, m_{ij} wartość siły oddziaływania komórki ij na robota.



a)

b)

Rysunek 6: *Histogramy kierunkowe*

Aby uniknąć gwałtownych zmian wartości funkcji h , jest ona wygładzana w następujący sposób:

$$h'_k = \frac{h_{k-l} + 2 \cdot h_{k-l-1} + \dots + l \cdot h_k + \dots + 2 \cdot h_{k+l-1} + h_{k+1}}{2 \cdot l + 1} \quad (17)$$

Tworzony jest histogram kierunkowy H' . Na rysunku 6 a) przedstawiono wartości funkcji H' dla sceny z rysunku 6 b). Przeszkody zaznaczono czarnymi kwadratami. Na histogramie możemy wyróżnić *piki* wyznaczające kierunki występowania przeszkód i *aleje* - ciągi kolejnych sektorów wolnych od przeszkód. Każdą *aleję* definiuje para (k_n, k_f) , gdzie k_n, k_f - numery końcowych sektorów. Następnym krokiem jest wybór kierunku poruszania się robota. Wybierana jest *aleja* k najbliższa kierunkowi wektora łączącego robota z celem.

Jeśli dla niej spełniony jest warunek:

$$|k_n - k_f| < s_{max} \quad (18)$$

gdzie: s_{max} jest zadany parametrem, to kierunek wyznaczony jest przez środek sektora o numerze $\frac{k_n + k_f}{2}$.

Jeśli warunek 18 nie jest spełniony, to wybierany jest środek sektora o numerze λ , gdzie

$$\lambda = \frac{k_n + s_{max}}{2} \quad (19)$$

gdzie k_n końcowy sektor alei bliższy kierunkowi wektora łączącego położenie robota z celem.

Na osi OX zaznaczono kąty skanowania, a na osi OY odległości od przeszkód. Jeśli znany jest kąt α nachylenia prostej łączącej robota z celem do osi OX, to nową orientację robota wyznacza kąt ϕ najbliższy α i taki, że przy kącie skanowania ϕ odległość od przeszkody nie jest mniejsza niż zadany próg. Podobnie jak w przypadku metod potencjałowych pewien problem stanowią minima lokalne, np. w przypadku, gdy robot porusza się wzdłuż długich ścian.

5.3 METODA DYFUZJI

Metoda dyfuzyjna jest opisana w artykule [53]. Obszar poruszania się robota jest dzielony na elementarne podobszary - klatki. Klatka reprezentująca pozycję robota jest nośnikiem energii o wartości F i przekazuje tę energię nie zajęтым przez przeszkody komórkom sąsiednim (stykającym się z nim bokami). Wartość energii komórek sąsiednich wynosi $F-1$. Proces dyfuzji jest kontynuowany aż do momentu, w którym fala energii dotrze do klatki reprezentującej pozycję robota. Wolna ścieżka jest generowana podobnie jak w przypadku metody potencjałowej, tzn. wyznaczona jest przez ciąg klatek o maksymalnej wartości energii.

Mimo, że metody potencjałowa i dyfuzyjna są do siebie podobne, to jednak w przypadku praktycznego zastosowania występują między nimi duże różnice: w metodzie potencjałowej przeszkody znajdujące się daleko od pozycji robota nie mają wpływu na postać zaplanowanej ścieżki. O wartości funkcji przyciągania w danej klatce decyduje jej odległość od celu i od przeszkód, natomiast wartość funkcji dla sąsiednich klatek nie ma znaczenia. Własność ta sprawia, że w przypadku pojawienia się nowej przeszkody pole potencjałowe jest zmieniane jedynie lokalnie, ale występuje możliwość powstania lokalnego minimum. W metodzie dyfuzyjnej przy obliczaniu wartości energii, wykorzystywana jest lokalna informacja o wartości energii sąsiednich klatek. W przypadku pojawienia się nowej przeszkody całe pole dyfuzyjne musi być obliczane powtórnie, ale nie występują problemy z występowaniem maksimum lokalnego. W przypadku pola potencjałowego minimalna odległość ścieżki od przeszkód jest określona przez postać funkcji odpychania. W metodzie dyfuzyjnej zaplanowana trajektoria przebiega zwykle blisko przeszkód. Pod pojęciem najkrótsza w metodzie Steels'a przyjmuje się ścieżkę przechodzącą przez najmniejszą liczbę klatek. Ścieżka taka nie musi mieć najmniejszej długości.

W metodzie dyfuzyjnej oddziałują na siebie jedynie elementy sąsiadujące i ze względu na tę własność proces planowania trajektorii może być zaimplementowany w postaci sieci komórkowej [6][51]. Dzięki takiej implementacji czas generowania ścieżki zostaje znacznie skrócony. Jeśli algorytm planowania jest sekwencyjny, to czas działania jest tym krótszy im więcej przeszkód znajduje się w otoczeniu robota.

6 OKREŚLANIE AKTUALNEJ POZYCJI ROBOTA

Jednym z podstawowych zagadnień nawigacji autonomicznego robota mobilnego jest określanie jego położenia na podstawie pomiarów odległości do otaczających obiektów. W niniejszym rozdziale przedstawiono sposób szacowania zmian orientacji robota przeznaczonego do pracy w częściowo uporządkowanych środowiskach wewnątrz budynków, wyposażonego w skanujący laserowy czujnik odległości. Przeprowadzone eksperymenty wykazały zadowalającą skuteczność proponowanej metody, którą nazwano *metodą histogramów skumulowanej długości segmentów*. Zaobserwowano znacznie większą niż w przypadku innych technik odporność na zakłócenia pomiarowe charakterystyczne dla laserowych czujników odległości. Opisana metoda może stanowić atrakcyjne uzupełnienie wielomodalnego systemu samolokalizacji autonomicznego ruchomego robota.

6.1 WPROWADZENIE

W niniejszej pracy opisujemy sposób przetwarzania danych dostarczanych przez laserowy czujnik odległości przeszukujący otoczenie w płaszczyźnie poziomej. Oszacowanie zmiany orientacji robota polega na porównaniu skanów uzyskanych w dwóch kolejnych położeniach pojazdu. W proponowanej metodzie przegląda się skany laserowe w poszukiwaniu ciągów kolejnych odczytów, które można uznać za współliniowe. Sumując długości wyodrębnionych odcinków buduje się histogram ich orientacji. Maksima tego histogramu wyznaczają dominujące kierunki orientacji obiektów liniowych (ścian) wykrytych w otoczeniu czujnika. Zmianę orientacji robota pomiędzy dwoma kolejnymi położeniami estymuje się określając położenie maksimum funkcji korelacji wzajemnej pary histogramów, obliczonych dla skanów uzyskanych w odpowiednich położeniach pojazdu.

Idea opisywanej metody jest w pewnym stopniu podobna do techniki *histogramów kątowych* [61], która również opiera się na wyznaczaniu maksimum funkcji korelacji wzajemnej pewnego rodzaju histogramów. Histogram kątowy zawiera zliczenia liczby wystąpień wartości współczynników kierunkowych odcinków łączących sąsiednie odczyty przetwarzanego skanu, względem zdyskretyzowanych orientacji takich odcinków. Okazuje się, że dla większości typowych pomieszczeń, w idealnych warunkach pomiarowych, histogram taki ma kilka (najczęściej dwa) maksimum, które odpowiadają dominującym kierunkom ścian, czy też obiektów liniowych wykrytych w otoczeniu czujnika. Porównując położenia maksimum pary histogramów obliczonych dla skanów odczytanych w kolejnych położeniach robota można określić zmianę orientacji pojazdu względem tych dominujących kierunków, czyli względem konfiguracji otoczenia. Oszacowanie zmiany orientacji takim sposobem jest na ogół wiarygodne w środowiskach statycznych i quasi-statycznych, przy założeniu stosunkowo niewielkich przemieszczeń robota pomiędzy kolejnymi punktami

skanowania.

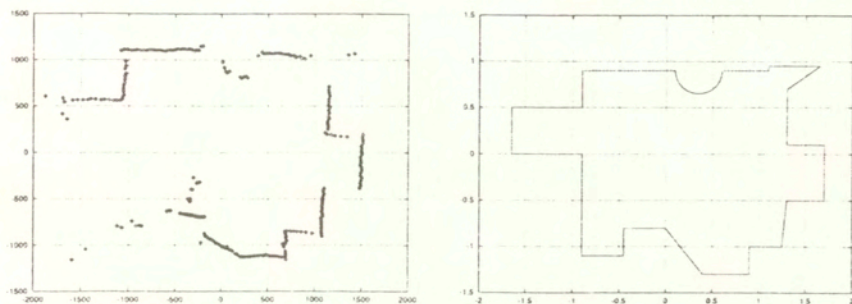
W metodzie proponowanej w niniejszej pracy buduje się histogramy skumulowanej długości segmentów współliniowych odczytów, które wykryto w przetwarzanym skanie, względem zdyskretyzowanej orientacji tych segmentów. Tak jak poprzednio obserwuje się występowanie maksimów histogramów dla kątów orientacji odpowiadających dominującym kierunkom orientacji obiektów otoczenia. Jednak wyniki przeprowadzonych eksperymentów wykazują znacznie większą, niż w przypadku metody histogramów kątowych, odporność proponowanego sposobu obliczeń na typowe zakłócenia, charakterystyczne dla laserowego pomiaru odległości.

Metoda histogramów skumulowanej długości segmentów może być porównywana z używaniem transformacji Hough'a do obróbki danych z laserowego czujnika odległości [18], gdyż tam również poszukuje się obiektów liniowych o wybranej orientacji. Jednak, zamiast operować na dwuwymiarowej rastrowej reprezentacji otoczenia, posługujemy się jednowymiarowym wektorem, którego składowe zawierają wartości wskazań sensora dla poszczególnych dyskretnych kierunków skanowania. Umożliwia to uproszczenie obliczeń i znaczne ograniczenie mocy obliczeniowej potrzebnej do efektywnego przetwarzania skanów laserowych celem określenia położenia dominujących kierunków ścian.

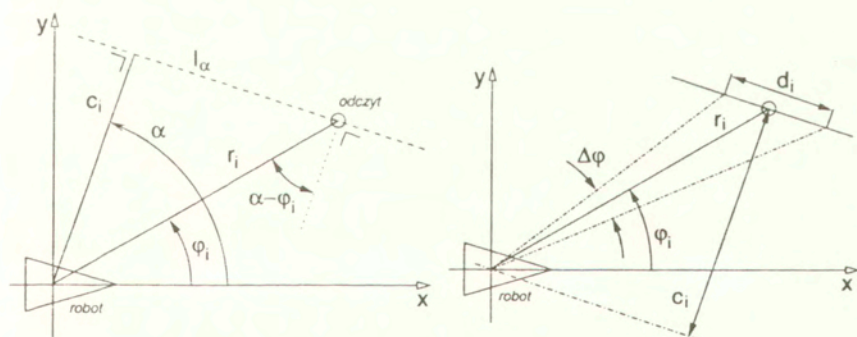
W opisywanej metodzie obliczenia są prowadzone w biegunowym układzie współrzędnych, który jest naturalnym układem w przypadku skanującego czujnika odległości. Umożliwia to taką konstrukcję algorytmu przetwarzania skanów, by obliczenia operowały na danych lokalnych w sensie pewnego sąsiedztwa i by możliwa była implementacja masowo równoległa. W dalszej części pracy omówiono pokrótce sposób implementacji zasadniczych fragmentów algorytmu proponowanej metody w postaci wielowarstwowej, jednowymiarowej neuronowej sieci komórkowej [6]. Masowo równoległa implementacja przedstawionej metody przetwarzania danych uzyskiwanych z laserowego czujnika odległości pozwoliłaby na dalsze, istotne przyśpieszenie obliczeń.

6.2 OPIS METODY HISTOGRAMÓW SKUMULOWANEJ DŁUGOŚCI SEGMENTÓW

Laserowy czujnik odległości w jednym cyklu zbierania pomiarów przesyła ciąg odczytów postaci m par (r_i, φ_i) , gdzie r_i jest mierzonym dystansem do obiektu, od którego odbiła się wiązka laserowa wyemitowana pod kątem φ_i do osi przyrządu. Kąt skanowania φ_i zmienia się skokowo co $\Delta\varphi = 1^\circ = const$, w zakresie od -165 do $+165$ stopni, ze względu na występowanie strefy martwej z tyłu czujnika. Przykładowy skan uzyskany w jednym z pomieszczeń naszego laboratorium przedstawiono na rysunku 7.



Rysunek 7: Przykładowe wartości wskazań laserowego czujnika odległości (rysunek z lewej) uzyskane w środowisku o konfiguracji przedstawionej na sąsiednim rysunku.



Rysunek 8: Obliczenie odległości normalnej c_i dla odczytu (r_i, φ_i) i wybranego kierunku α (po lewej). Obliczenie jednostkowej długości d_i segmentu odczytów współliniowych przypadającej na odczyt (r_i, φ_i) (po prawej).

Równanie normalne prostej na płaszczyźnie (x, y) ma postać:

$$x \cdot \sin \alpha + y \cdot \cos \alpha = c \quad (20)$$

w której $|c|$ określa odległość prostej od środka układu współrzędnych $(x = 0, y = 0)$.

Biorąc pod uwagę, że $x_i = r_i \cdot \cos \varphi_i$ i $y_i = r_i \cdot \sin \varphi_i$ możemy określić dystans c_i dla prostej l_α opisaną równaniem postaci (20), która przecina dany punkt (x_i, y_i) (lub równoważnie (r_i, φ_i)) w kierunku normalnym α (zob. rys. 8) następująco:

$$c_i = r_i \cdot \cos(\alpha - \varphi_i) \quad (21)$$

Dwa punkty (r_i, φ_i) i (r_j, φ_j) należą do tej samej prostej zorientowanej w kierunku prostopadłym do α , gdy $c_i = c_j$.

Powyższe zależności stanowią podstawę algorytmu wyszukiwania sekwencji odczytów, które można uznać za współliniowe elementy skanu. Mówimy, że odczyt (r_i, φ_i) należy w przybliżeniu do segmentu linii prostej zorientowanej prostopadłe do α , jeśli ten odczyt i jego $2n$ sąsiadów spełnia następujące kryterium:

$$\forall_{i-n \leq k \leq i+n} |c_k - 0.5 \cdot (c_{i-n} + c_{i+n})| \leq \epsilon \quad (22)$$

gdzie ϵ jest tolerancja współliniowości, która powinna odzwierciedlać charakterystykę niedokładności czujnika odległości.

Każdy odczyt, którego przynależność do segmentu kolejnych współliniowych odczytów potwierdza spełnienie warunku (22), wnosi pewną jednostkową długość d_i do całkowitej długości segmentu (rys. 8):

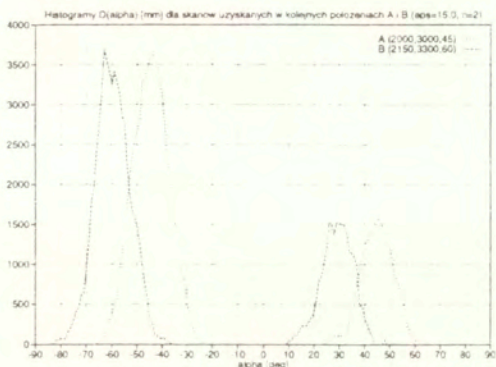
$$d_i = \left| \frac{c_i \cdot \sin \Delta\varphi}{\cos^2(\alpha - \varphi_i) - \sin^2(0.5\Delta\varphi)} \right| \quad (23)$$

Jeśli (r_i, φ_i) nie spełnia warunku (22) dla wybranego α , to pomijamy jego wpływ przyjmując $d_i = 0$.

Biorąc pod uwagę, że w naszym systemie $\Delta\varphi = 1^\circ$, możemy pominać $\sin^2(0.5\Delta\varphi)$ jako małą wyższego rzędu we wzorze (23) i obliczać d_i w przybliżeniu jako:

$$d_i \approx \frac{|c_i| \cdot \sin \Delta\varphi}{\cos^2(\alpha - \varphi_i)} \quad (24)$$

Warto zauważyć, że formuła (24) staje się niestabilna przy małych wartościach wyrażenia $\alpha - \varphi_i$, to znaczy przy ostrych kątach obserwacji. Jednakże typowe laserowe czujniki odległości, używające bezpiecznych laserów niewielkiej mocy, cechuje znaczna niedokładność pomiarów w przypadku obiektów obserwowanych pod ostrymi kątami [14]. Z praktycznego punktu widzenia celowe jest ignorowanie wpływu odczytów, które by



Rysunek 9: Histogramy $D(\alpha)$ uzyskane w dwóch kolejnych położeniach robota.

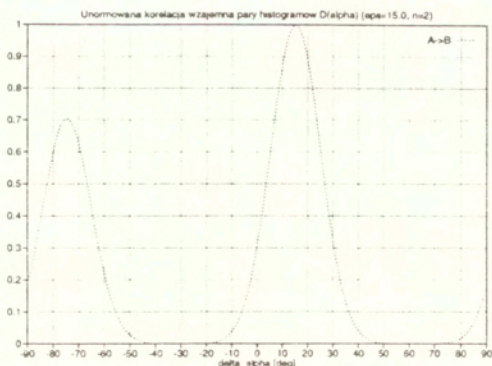
może należą do segmentów współliniowych, lecz zostały zaobserwowane pod zbyt ostrymi kątami. Krytyczny kat wykrycia obiektu zależy od odległości i refleksyjności oświetlanej powierzchni [14]. W naszym przypadku rozsądnie jest pomijać wpływ odczytów, dla których $|\alpha - \varphi_i| < 22.5^\circ$, co równocześnie zabezpiecza stabilność wzoru (24).

Korzystając ze wzorów (21), (22) i (24) możemy iterować poprzez kolejne wartości kątów orientacji segmentów $\alpha_j \in (-90^\circ, +90^\circ)$, obliczając dla każdej z nich sumy D_j jednostkowych długości $d_i(\alpha_j, \varphi_i)$ odpowiadających odczytom uznanym za współliniowe:

$$\forall_{-90 \leq \alpha_j \leq 90} D_j = D(\alpha_j) = \sum_{i=-180}^{180} d_i(\alpha_j, \varphi_i) \quad (25)$$

Histogram $D(\alpha)$ powinien mieć maksima dla kątów α odpowiadających dominującym kierunkom ścian w otoczeniu czujnika, o ile takie kierunki istnieją. Istotnie - histogramy przedstawione na górnym wykresie rys. 12 (obliczone dla różnych rozmiarów sąsiedztwa n) mają wyraźne maksima dla kierunków odpowiadających najbardziej dominującym orientacjom obiektów otoczenia oraz minima w położeniach kierunków najmniej dominujących. W typowych wnętrzach mamy zwykle do czynienia z dwoma maksimami, które odpowiadają (najczęściej) parze kierunków mniej więcej prostopadłych.

Porównując histogramy obliczone dla dwóch skanów odczytanych w dwu nieodległych położeniach robota (zob. rys. 9) spodziewamy się, że położenia ich ekstremów będą przesunięte w dziedzinie α o kąt odpowiadający zmianie orientacji robota względem obserwowanych obiektów otoczenia. Okazuje się, że położenie maksimum funkcji korelacji wzajemnej pary histogramów jest wobec poszukiwanej zmiany orientacji estymatą o największej wiarygodności. Składowe funkcje korelacji wzajemnej dla kolejnych kątów α



Rysunek 10: Unormowana korelacja wzajemna pary histogramów $D(\alpha)$ przedstawionych na rys. 9.

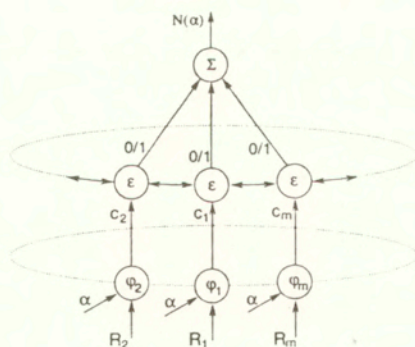
obliczamy według:

$$C_k^{(\alpha)} = C^{(\alpha)}(\Delta\alpha_k) = \sum_{j=-90}^{90} D_j^{(1)} \cdot D_{j-k}^{(2)} \quad (26)$$

gdzie indeksy $^{(1)}$ i $^{(2)}$ oznaczają kolejne skany.

Na rysunku 10 przedstawiono korelację wzajemną histogramów z rys. 9. Położenie maksimum wskazuje na $\Delta\alpha = +15^\circ$ jako najbardziej prawdopodobną estymatę zmiany orientacji robota, która nastąpiła pomiędzy kolejnymi punktami skanowania.

6.3 IMPLEMENTACJA W POSTACI SIECI KOMÓRKOWEJ



Rysunek 11: Schemat neuronowej sieci komórkowej realizującej algorytm budowy histogramów skumulowanych długości segmentów.

Opisana metoda obliczeniowa może być zaimplementowana w postaci wielowarstwowej jednowymiarowej kołowej sieci komórkowej, której schemat został przedstawiony na rysunku 11. Każdy z m elementów (neuronów) pierwszej warstwy sieci jest pobudzany sygnałem wejściowym proporcjonalnym do r_i oraz stałą w bieżącej iteracji, jednakową dla wszystkich elementów wartością α . Kąt skanowania φ_i jest stałym parametrem sprzętowym dla danego neuronu warstwy wejściowej i jest w nim trwale zakodowany. Wartości sygnałów wyjściowych neuronów pierwszej warstwy c_i obliczane są według wzoru (21).

W drugiej warstwie, której neurony pobudzane są sygnałami wyjściowymi generowanymi w warstwie poprzedniej, sprawdzany jest warunek współliniowości (22). W tym celu neurony tej warstwy mają połączenia oboczne, w ogólnym przypadku każdy z każdym, o wagach połączeń dobranych tak, aby sygnały przekazywane były tylko w obrębie zadanego sąsiedztwa o rozmiarze n . Jeśli dana komórka spełnia test współliniowości, to wartość jej sygnału wyjściowego jest równa jej pobudzeniu zewnętrznemu (c_i) albo przyjmuje wartość zero w przeciwnym przypadku.

W trzeciej warstwie odbywa się obliczanie jednostkowych długości segmentów współliniowych według formuły (24). Sygnały wyjściowe neuronów trzeciej warstwy są zerowe, jeśli odpowiednie pobudzenia były zerowe lub też wynoszą d_i .

Na wyjściu sieci umieszczony jest sumator, który wyprowadza skumulowaną długość segmentów współliniowych zorientowanych w wybranym kierunku prostopadłym do α .

Przedstawiony cykl obliczeń przeprowadzany jest dla kolejnych j wartości kątów α z zakresu od -90 do $+90$ stopni (w naszym przypadku dyskretyzujemy orientację segmentów z rozdzielczością 1°). Proces może mieć charakter sekwencyjny przy użyciu pojedynczej struktury przedstawionej na rysunku 11 albo przebiegać równocześnie na j strukturach obsługujących poszczególne dyskretne wartości α .

Uporządkowane wartości wyjściowe $D(\alpha_j)$ tworzą histogram skumulowanych długości segmentów. Korelacja wzajemna pary histogramów uzyskanych dla skanów odczytanych w dwóch kolejnych położeniach robota pozwala określić zmianę orientacji pojazdu w sposób opisany w poprzednim podrozdziale.

6.4 EKSPERYMENTY

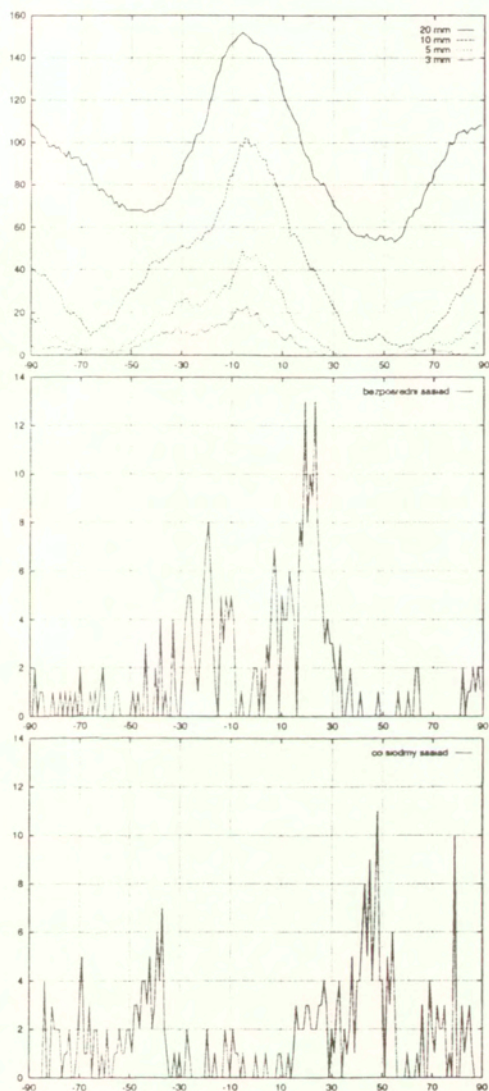
Eksperymenty opisywane w niniejszej pracy zostały przeprowadzone przy użyciu laserowego czujnika odległości firmy HelpMate i robota mobilnego RWI Pioneer-1. Laser skanował otoczenie w płaszczyźnie poziomej. Próby przeprowadzono w środowisku, w którym znajdowały się obiekty o różnym kształcie, wykonane z różnych materiałów, lecz dominowały elementy typu ściana (rys. 7).

Zadowalające wyniki otrzymano dla wszystkich spośród kilkuset par skanów zarejestrowanych w realistycznym otoczeniu i obarczonych wpływem typowych zakłóceń laserowej metody pomiaru odległości. Z rysunku 12 (wykres u góry) widać, że kształt otrzymywanych histogramów zależy od wyboru parametrów metody, w tym przypadku tolerancji współliniowości ϵ (analogiczne zjawiska obserwuje się przy zmianie rozmiaru sąsiedztwa). Jednak położenia maksimów, które odpowiadają dominującej orientacji ścian pozostają mniej więcej stałe bez względu na wybór ϵ .

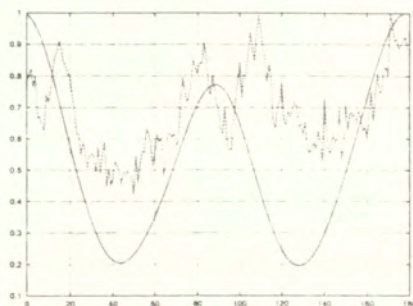
Pozostałe wykresy na rysunku 12 przedstawiają histogramy katowe obliczone metodą opisaną w pracy [61]. Rysunek środkowy jest wynikiem bezpośredniego zastosowania algorytmu [61], w którym analizuje się kierunki prostych zawierających kolejne składniki skanu, które są bezpośrednimi sąsiadami (sąsiedztwo równe 1). Jak łatwo zauważyć otrzymany wykres nie jest gładki, a co więcej położenia jego maksimów odbiegają o około 30° od położenia rzeczywistych. Przyjęcie zasady analizowania par najbliższych sąsiadów prowadzi do nadmiernego uwrażliwienia metody histogramów katowych na typowy шум pomiarowy używanego przez nas czujnika. Na dolnym wykresie z rysunku 12 przedstawiono wyniki otrzymane metodą histogramów kierunkowych, gdy do określania kierunków prostych brano kolejne pary złożone z co siódmymi składnikami skanu. Dzięki takiemu zabiegowi wpływ szumu pomiarowego udało się nieco ograniczyć, a co więcej położenia maksimów otrzymanych histogramów okazały się znacznie bliższe rzeczywistym. Mimo wszystko, krzywe obliczone metodą opisywaną w niniejszej pracy (przedstawione na górnym wykresie rys. 12) są znacznie bardziej gładkie i przekonujące, niż najlepsze wyniki uzyskane metodą histogramów kierunkowych opisaną w [61].

Na rysunku 13 przedstawiono unormowane korelacje wzajemne histogramów otrzymanych metodą skumulowanych długości segmentów oraz metodą kierunkową. Jak widać ta ostatnia krzywa jest w znacznym stopniu poszarpana i celem określenia położenia maksimum należałoby ją wstępnie wygładzić. Zupełnie gładki przebieg jest z kolei cechą linii obliczonej metodą skumulowanej długości segmentów. Ma ona dwa wyraźne maksima przesunięte względem siebie o mniej więcej 90° , co wynika z ogólnie prostokątnego układu obiektów tworzących otoczenie robota. Maksimum o większej amplitudzie odpowiada $\Delta\alpha = 178^\circ$, co oznacza, że najbardziej wiarygodne oszacowanie zmiany orientacji robota wynosi $178^\circ - 180^\circ = -2^\circ$.

Warto w tym miejscu zauważyć, że amplituda funkcji korelacji wzajemnej par histogramów może posłużyć jako kryterium oceny wiarygodności uzyskanego oszacowania $\Delta\alpha$. Na przykład w środowisku, w którym nie da się wyróżnić dominujących kierunków ścian (pomieszczenia owalne lub na tyle obszerne, by ze względu na ograniczony zasięg roboczy czujnika odległości nie można było wykryć ścian), uzyskiwanoby korelacje wzajemne o zerowej amplitudzie. W takiej sytuacji oszacowanie zmiany orientacji robota



Rysunek 12: Histogramy $D(\alpha)$ obliczone dla skanu z rysunku 7 przy $n = 1$ oraz ϵ równym odpowiednio 20, 10, 5 i 3 mm (u góry); oraz wyniki uzyskane metodą histogramów kątowych dla $n = 1$ (w środku) i $n = 7$ (u dołu)



Rysunek 13: Unormowane korelacje wzajemne histogramów otrzymane metodą skumulowanych długości segmentów (linia ciągła) oraz metodą kierunkową z sąsiedztwem równym 7 (linia przerywana).

opisywaną metodą byłoby całkowicie niewiarygodne. Wraz z pojawianiem się w otoczeniu robota wykrywalnych obiektów o liniowych kształtach amplituda korelacji wzajemnej par histogramów stopniowo rośnie, zaś generowane estymaty zmian orientacji stają się bardziej wiarygodne.

Wyniki dotychczas przeprowadzonych eksperymentów wykazały bardzo zachęcającą dokładność oszacowań zmiany orientacji. Największy błąd nigdy nie przekroczył 3° , a większość prób zakończyła się wynikami o błędach mieszczących się w zakresie do 1.5° .

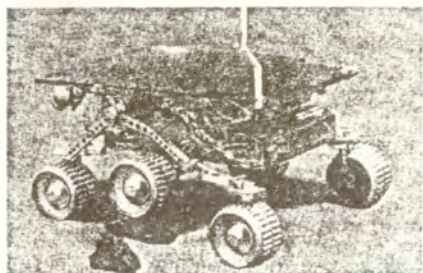
Opisywany algorytm został zaimplementowany w obecnej postaci na komputerze sekwencyjnym klasy Pentium 200. Stwierdzono, że uzyskana szybkość przetwarzania pomiarów odległości jest wystarczająca i porównywalna z maksymalną częstotliwością losowania danych przez czujnik, która wynosi około 5 Hz.

6.5 PODSUMOWANIE

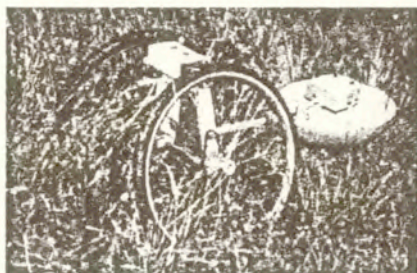
W pracy przedstawiono nowe podejście do określania zmian orientacji robota mobilnego wyposażonego w skanujący optyczny czujnik odległości, poruszającego się w dowolnym, częściowo uporządkowanym wnętrzu. Algorytm obróbki sygnałów otrzymywanych z czujnika skonstruowany jest w taki sposób, by umożliwić implementację zasadniczych operacji w postaci komórkowej sieci neuronowej i masowo równoległe przetwarzanie. Eksperymenty przeprowadzone w naturalnym środowisku pracy robota wykazały, że zaproponowana metoda jest efektywna obliczeniowo i odporna na niekorzystny wpływ typowych niedokładności laserowej metody pomiaru odległości w znacznie większym stopniu, niż porównywalne rozwiązanie problemu przedstawione w pracy [61]. Przedstawiony w pracy sposób śledzenia zmian orientacji może, ze względu na stosunkowo wysoką dokładność, stanowić bardzo atrakcyjny składnik wielomodalnego systemu samolokalizacji robota mobilnego.

7 PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ ROBOTÓW MOBILNYCH

Pierwszym zdalnie sterowanym pojazdem, jaki został wysłany w przestrzeń kosmiczną był radziecki *Lunochod*. Dwukrotnie w latach 1970 i 1972 roboty te lądowały na Księżycu i poruszały się po jego powierzchni przekazując na Ziemię obrazy z kamery i dane z przyrządów pomiarowych.



a)



b)

Rysunek 14: a) Mikrorobot Sojourner b) Robot do wykrywania i rozbrajania min

Niespełna 30 lat, jakie dzielą misje na Księżycu i na Marsie to cała epoka pod względem postępu technicznego. Można by się zatem dziwić, dlaczego pod względem funkcji *Sojourner* (Rys. 14a) nie różni się w sposób istotny od *Lunochoda*: jest to również 6-kołowy pojazd, sterowany zdalnie z Ziemi, pobierający energię z ogniw słonecznych i wyposażony w skromny zestaw sensorów (analizator chemiczny i uproszczony dalmierz laserowy). Zadecydowały o tym: oszczędnościowy charakter projektu², większa odległość do pokonania i mniej dokładnie rozpoznany teren po którym robot miał się poruszać. W kolejnych misjach marsjańskich, których celem będzie między innymi dostarczenie na Ziemię próbek gruntu, prawdopodobnie zostaną wykorzystane roboty o większym stopniu autonomii.

Wojsko i policja są zainteresowane stosowaniem robotów mobilnych do rozbrajania min i ładunków wybuchowych. Jak przypomniano na niedawnej konferencji pod auspicjami ONZ, w krajach takich jak Laos, Birma, Kuwejt, Afganistan, Etiopia czy Bośnia pozostały po konfliktach wojennych miliony min rozrzuconych po dużych obszarach. Zbierają one krwawe żniwo, głównie wśród dzieci i stanowią poważną przeszkodę w przywracaniu normalnego życia w tych krajach. Prace nad skonstruowaniem robota do wykrywania i rozbrajania min prowadzone są w wielu ośrodkach, m. in. w *Ecole Fédérale Polytechnique de Lausanne (EPFL)*, o czym opowiadał prof. B. Nicoud w czasie swej wizyty w Polsce w

²Misja *Pathfinder* kosztowała tyle co nakręcenie przeciętnego filmu w Hollywood.

ubiegłym roku. Skonstruowany przez niego lekki i tani robot (Rys. 14b) porusza się po trajektorii wężykowatej na 2 kołach rowerowych. Głównym problemem przy budowaniu tego typu robotów jest opracowanie czujnika, który byłby w stanie wykryć drobne miny wykonywane z materiałów niemagnetycznych. Prace w tym kierunku prowadzone są m.in. w Trinity College w Dublinie pod kierunkiem prof. K. Dawson-Howe'a.

Tragedia, jaka się wydarzyła na stacji benzynowej Shella w Warszawie, gdzie przy rozbijaniu bomby zginął pirotechnik oraz prawie cotygodniowe alarmy bombowe w polskich miastach uświadamiają nam, jak palącym problemem staje się wyposażenie odpowiednich służb w roboty mobilne do wykrywania i neutralizowania bomb. Pojedyncze egzemplarze tego typu robotów, zostały już zakupione za granicą, wiąże się to jednak z dużymi kosztami. Należy zatem mieć nadzieję, że za parę lat ruszy produkcja krajowego robota policyjnego, którego prototyp powstał w PIAP w ramach projektu finansowanego przez KBN [37].

Innego rodzaju wojskowe zastosowania robotów mobilnych wiążą się z rozpoznawaniem nieprzyjaciela i wspomaganiem podejmowania decyzji na polu walki. Jak opisano w artykule [33], w *US Army* utworzono specjalną jednostkę zwiadu wyposażoną w autonomiczne pojazdy terenowe (Rys. 15). W czasie manewrów pojazdy te były w stanie samodzielnie przemieścić się na odległość 6 km w stronę linii obronnych przeciwnika, zając odpowiednie pozycje i korygować ogień własnej artylerii. Prowadzone są również prace nad robotami-sanitariuszami, których zadaniem jest zabieranie rannych z pola walki. Jest sprawą oczywistą, że większość zastosowań wojskowych pozostaje poza kręgiem ogólnie dostępnych czasopism i konferencji naukowych.



Rysunek 15: Pojazd zwiadu armii amerykańskiej

Wśród zastosowań cywilnych warto podkreślić pierwsze próby automatyzacji transportu samochodowego. Wydaje się bowiem, że nieuchronnie zbliża się czas, gdy samoczynnie sterowany samochód będzie występował równie często, jak obecnie samochód z automatyczną skrzynią biegów. Analogia ta idzie zresztą dalej: oba rodzaje usprawnień pojazdu mają dogodniejsze warunki rozpowszechniania się w Stanach Zjednoczonych niż w Europie. Olbrzymia przestrzeń tego kraju pokryta siecią *interstate highways* stanowi doskonały poligon do wprowadzania różnego rodzaju autopilotów. Jeden z projektów, finansowany przez rząd USA, przewiduje wydzielenie na autostradach specjalnych pasów dla aut prowadzonych automatycznie [55]. Zadaniem kierowcy będzie jedynie wprowadzanie samochodu na taki pas i zjeżdżanie z pasa w wybranym przez siebie miejscu. Testy wykazały, że jazda z autopilotem na długich odcinkach prostych wyeliminuje wypadki spowodowane znużeniem, czy wręcz zasypianiem kierowcy. Równie męcząca dla człowieka jest jazda w ciasnej kolumnie. Kolumna pojazdów wyposażonych w autopiloty może łatwiej utrzymać stałą prędkość i dostosowane do tej prędkości bezpieczne odstępy między samochodami.

Europejskie koncerny samochodowe również wprowadzają różnego rodzaju elementy automatyzacji prowadzenia pojazdu. Po upowszechnieniu się systemów stabilizujących pojazd podczas nagłego hamowania lub przyspieszania coraz więcej samochodów wyposażane jest w nawigacyjne komputery pokładowe. Pozwalają one zarówno wybierać optymalne trasy dalszego zasięgu, jak i poruszać się pewnie w nieznanym mieście. W droższych modelach firmy Daimler-Benz pojawiły się niedawno ultradźwiękowe czujniki ułatwiające parkowanie oraz radary ostrzegające przed zderzeniem i umożliwiające jazdę z ustalonym odstępem w kolumnie.

Ciekawy projekt jest realizowany we współpracy Uniwersytetów w Grenoble i Singapurze. Jest to mała taksówka o napędzie elektrycznym, która ma się poruszać autonomicznie. Bezpieczne poruszanie się po mieście jest znacznie trudniejsze, niż jazda po wydzielonym pasie autostrady. Wypada zatem życzyć, by projekt francusko-singapurski zakończył się sukcesem.

Automatyzacja transportu wewnątrz zakładu pracy jest zadaniem znacznie prostszym. Początkowo systemy tego rodzaju wykorzystywały wózki poruszające się po stałych trasach, np. wzdłuż kabla ułożonego w podłodze, i sterowane centralnie. W zautomatyzowanych fabrykach nowszej generacji pojawiają się autonomiczne wózki transportowe, ponieważ rozproszona inteligencja sprzyja adaptacji systemu do zmiennych warunków produkcji. Przykład wózka transportowego pokazany jest na Rys. 16.

Ważną ze względów społecznych dziedziną zastosowań mobilnych robotów jest wspomaganie osób niepełnosprawnych. Przykładem jest "mechaniczny pies" prowadzący nie-

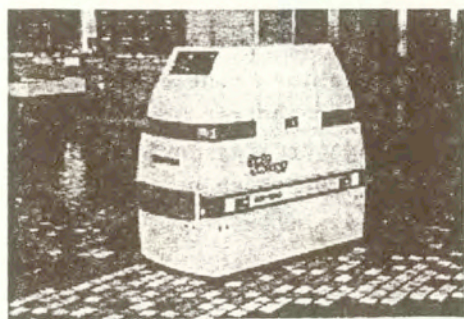


Rysunek 16: Robot prowadzący osobę niewidoma

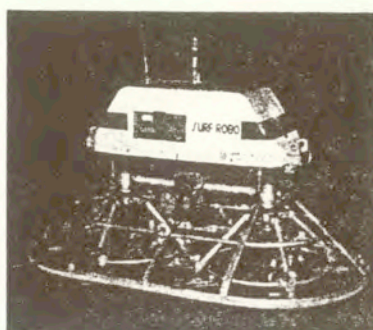
widoma osobę na Rys. 16. Zarówno w Europie, jak i w Japonii i Stanach Zjednoczonych prowadzone są intensywne prace nad zautomatyzowaniem prowadzenia samobieżnych wózków inwalidzkich. Po wyposażeniu w odpowiednie sensory wózek taki może bezpiecznie poruszać się wewnątrz budynku, wymagając od pasażera jedynie zgrubnego określenia kierunku jazdy. Kolejnym etapem może być wyposażenie wózka w system nawigacji jakościowej i układ analizy-syntezy mowy. Wystarczy wówczas wydać polecenie "jedź do kuchni".

Roboty mobilne dobrze nadają się do obróbki dużych powierzchni. Przykładem może być odkurzacz przemysłowy z Rys. 17a. Urządzenia tego typu wykorzystywane są do sprzątania peronów w metrze paryskim. Prosta geometria peronu i okoliczność, że można go sprzątać w nocy po zamknięciu metra znakomicie upraszczają sprawę. Przeszkodą w automatyzacji odkurzacza domowego jest na razie cena takiego sprzętu, kłopotliwe zasilanie i konieczność sprawnego lawirowania wśród mebli. Na razie prowadzone są prace studyjne, m.in. na zlecenie firmy Siemens.

Na tle dużego zainteresowania robotyką w Japonii roboty mobilne nie stanowią wyjątku. Firmy japońskie oferują samobieżne urządzenia do czyszczenia, malowania i polerowania dużych powierzchni w budownictwie i budowie statków. Przykładem może być automatyczna szlifierka betonowych posadzek z Rys. 17b. Ze względu na pył praca ta jest szkodliwa dla człowieka, a poruszanie się robota po pustym pomieszczeniu nie nastroża problemów. Japończycy opracowali imponujący zestaw robotów dla potrzeb budownictwa: od małych półautomatycznych narzędzi, po przez maszyny do układania glazury, cegieł i izolacji cieplnej aż po systemy montujące szkielet całego budynku. Świadczy to dobitnie o deficycie siły roboczej w tym sektorze gospodarki japońskiej. Dostępność taniej siły roboczej jest bowiem głównym czynnikiem hamującym na razie robotyzację budownictwa w USA i Europie.



a)



b)

Rysunek 17: a) Odkurzacz przemysłowy b) Robot do szlifowania posadzek betonowych

8 WNIOSKI

Wydaje się, że sumaryczne wyniki osiągnięte na świecie w dziedzinie robotyki mobilnej przekroczyły już wartość krytyczną, która pozwala na pokonanie bariery stosowalności praktycznej. Wskazują na to liczne przykłady udanych zastosowań i rosnące zainteresowanie tą tematyką ze strony przemysłu. W warunkach polskich sytuacja jest odmienna ze względu na opóźnienie technologiczne rodzimego przemysłu, niepewną sytuację finansową wielu firm oraz ograniczony rynek zbytu na tego typu urządzenia. Wysiłek wdrożeniowy powinien zatem iść w kierunku poszukiwania luk podaży na rynku europejskim, które mogłyby zapewnić rentowność małym lub średnim przedsiębiorstwom produkującym wyspecjalizowane roboty mobilne opracowane w kraju. Oprócz podjętej już przez PIAP próby zbudowania robota saperskiego warto rozważyć takie dziedziny zastosowań, jak wspomaganie osób niepełnosprawnych, obróbka dużych powierzchni w budowie statków i budownictwie, inspekcja rurociągów i zbiorników cieczy i gazu, czy samobieżne urządzenia dla rolnictwa i gospodarstwa domowego. Sukces jednego lub paru celowych projektów badawczych tego typu przelamałby nieufność ze strony przemysłu i pozwolił na dalszy harmonijny rozwój tej dziedziny badań.

PODZIĘKOWANIE

Autorzy pragną wyrazić serdeczne podziękowanie dr Ryszardowi Sawwie i jego współpracownikom z Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów w Warszawie za udostępnienie aparatury i wszechstronną pomoc w realizacji badań opisanych w niniejszej pracy.

Abstract

Navigation is understood in Mobile Robotics as a union of 3 tasks: world modeling, selflocalization and motion planning. The aim of this paper is to present current research conducted in that area in the Division of Adaptive Systems of the IFTR and to situate this activity over general state-of-art panorama of the field. In particular, two original methods are discussed in detail: the application of dedicated cellular neural network for path planning and the positioning procedure based upon detecting principal directions in the environment.

Bibliografia

- [1] BAŁ R., KASIŃSKI A., NOWAK A., *Stereo vision for indoor mobile robot navigation*, Proc. 3rd Int. Symp. on Intelligent Robotic Systems (SIRS'95), Pisa, Italy, 265-270.
- [2] BERNS W., CORDES S., EBERL M. and DILLMANN R., *A wheeled multijoint robot for autonomous sewer inspection*, Proc. IEEEERSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'97), Grenoble, France, 1687-1693.
- [3] BORKOWSKI A., KAŻYS R., KUNDROTAS K., DZIMIDAVIČIUS V., MAŽEIKA, L., *Programmable ultrasonic range finder for mobile robot*, Robotersysteme, 7, 1991, pp. 101-106.
- [4] BROOKS, R.A., *A robust layered control system for mobile robot*, IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-2, 1, 1986, pp. 14-23.
- [5] CHENAVIER F. and CROWLEY J.L., *Position Estimation for a Mobile Robot Using Vision and Odometry*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Nice, France, 1992, 2588-2593.
- [6] CHUA O., YOUNG L., *Cellular Neural Network Application*, IEEE Transaction on Circuits and Systems 35, October, 1988, pp. 1273-129.
- [7] COURTNEY J.D., JAIN A.K., *Mobile Robot Localization via Classification of Multisensor Maps*, Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation, San Diego, USA, 1628-1634.
- [8] CROWLEY J.L., *Dynamic World Modeling for an Intelligent Mobile Robot Using a Rotating Ultrasonic Ranging Device*, IEEE Conf. on Robotics and Automation, pp. 128-135, 1985.

- [9] CROWLEY J.L., *Navigation for an Intelligent Mobile Robot*, IEEE Journal of Robotics, 1989.
- [10] CROWLEY J.L., *World modelling and position estimation for a mobile robot using ultrasonic ranging*, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, USA, 1989, pp. 674-680.
- [11] CROWLEY, J.L. and CAUSSE, O. and REIGNIER, P., *Layers of control in autonomous navigation*, in: MacConaill, P.A. and Drews, A. and Robrock, K.H. (eds.): *Advances in Design and Manufacturing: Mechatronics and Robotics I*. IOS Press, 1991, pp. 67-76.
- [12] DARIO P., (ed.) *Sensors and Sensory Systems for Advanced Robots*. NATO ASI, Series F: Computer and Systems Sciences. Springer-Verlag, Berlin, 1986.
- [13] DEVY M., CHATILA R., FILLATREAU P., LACROIX S., NASHASHIBI F., *An Autonomous Navigation in Natural Environment*, Proc. Int. Symposium on Intelligent Robotic Systems'94 (IRS'94), Grenoble, France, 213-220.
- [14] DUBRAWSKI A. and SAWWA R.: *3D laser range finders for mobile robots (in Polish)*, Proc. 5th Polish Conf. on Robotics, 1997, Świeradów Zdrój, Poland
- [15] EISELE T., *Real-time self-localization in unknown indoor environments using a panorama laser range finder*, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'97), Grenoble, France, 697-703.
- [16] ELFES, A., *A sonar-based mapping and navigation system*, Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Washington D.C., USA, 1986, pp. 1151-1156.
- [17] EVERETT H.R., *Sensors for mobile robots: theory and application*, A.K. Peters, Ltd, 1995.
- [18] FORSBERG J., LARSSON U., AHMAN P., WERNERSSON A. *Navigation in Cluttered Rooms Using a Range Measuring Laser and the Hough Transform*, *Intelligent Autonomous Systems IAS-3*, 248-257, Pittsburgh, USA, February 1993.
- [19] GIRALT G., *Mobile Robots*, Proc. NATO ASI on Robotics and Automation, 1984.
- [20] GIRALT G., SOBK R., CHATILA R. *A Multi-Level Planning and Navigation System for a Mobile Robot, A First Approach to HILARE*, 1985 6th IJCAI, Tokyo.
- [21] GOLOMBEK M. P., *Misja Pathfinder*, Świat Nauki, 1998, Nr 9 (85), 56-65.

- [22] HAGER G.D., *Task-Directed Sensor Fusion and Planning: a Computational Approach*, Kluwer Academic Publ., 1990.
- [23] KHATIB O., *Real Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots*, IEEE Conference on Robotics and Automation, 1985.
- [24] KIMOTO K., THORPE Ch., *Map building with radar and motion sensors for automated highway vehicle navigation*, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'97), Grenoble, France, 1721-1728.
- [25] KLIR G. J., FOLGER T. A., *Fuzzy sets, Uncertainty and information*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
- [26] KREZMER B., *Environment model for mobile robot navigation*, Proc. 4th Int. Symp. on Intelligent Robotic Systems (SIRS'96), Lisbon, Portugal, 337-344.
- [27] KUIPERS, B.J., BYUN Y.T., *A qualitative approach to robot exploration and map learning*, Proc. IEEE Workshop on Spatial Reasoning and Multi-Sensor Fusion. Morgan Kaufmann, 1987, pp. 390-404.
- [28] LATOMBE J. C., *Robot motion planning*. Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [29] LEONARD J.J., *Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation*. Kluwer Academic Publ, 1991.
- [30] LEVITT T., LAWTON D., CHELBERG D., NELSON P., *Qualitative navigation*, Proc. DARPA Image Understanding Workshop. Morgan Kaufmann, 1987, pp. 447-465.
- [31] LEVITT T, LAWTON D., CHELBERG D., KOITZSCH, K., DYE J.W., *Qualitative navigation 2* Proc. DARPA Image Understanding Workshop. Morgan Kaufmann, 1988, pp. 319-326.
- [32] LOPUSZYŃSKI M., *Qualitative navigation system in Prolog (in Polish)*. BSc-thesis at the Faculty of Aeronautics, Warsaw University of Technology.
- [33] LOVECE J., *Metal protectors*, Unmanned Vehicles, Vol. 1, No. 3, 18-20.
- [34] LOZANO-PEREZ T., WESLEY M., *Algorithm for Planning Collision-Free Paths among Polyhedral Obstacles*, Conf. of the ACM, Vol. 22, No. 10, pp. 560-570, 1979.
- [35] LOZANO-PEREZ T., WESLEY M., *Automatic Planning of Manipulator Transfer Movements*, IEEE Trans., SMC-11, No. 10, pp. 681-698, 1981.

- [36] LOZANO-PEREZ, T., *Spatial Planning a Configuration Space Approach*, IEEE Trans.Comp., C-32, 1983.
- [37] MASŁOWSKI A., SZYŃKARCZYK P., ANDRZEJUK A., *New Methods in Development of Semi-Autonomous Surveillance an Security Mobile Robots*, MMAR'98, Międzyzdroje, Poland 1998.
- [38] MORAVEC H.P., ELFES.A., *High resolution maps from wide angle sonar*, Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation, St. Louis, USA, 1985, pp. 116-121 .
- [39] MORAWEC, H.P., *Sensor fusion in certainty grids for mobile robots*, Artificial Intelligence Magazine, 4, 1988, pp. 61-74.
- [40] PAJEWSKI W., SZALEWSKI M., *Piezoelektryczne przetworniki ultradźwiękowe promieniujące do powietrza*, Prace IPPT vol. 4, 1992.
- [41] PIASECKI M., *Global sonar-based localization for mobile robots*, Proc. 2nd Int. Symp. on Intelligent Robotic Systems (IRS'94), Grenoble, France, 221-237.
- [42] *Polaroid Ultrasonic Ranging System Handbook, Application Notes and Technical Papers*. Polaroid Corp., 1987.
- [43] RACZ J., MIELESZENKO W., *Mobile Robot for Inspection of Nuclear Installations*, Archives of Machine Building, 1-2, 79-90.
- [44] RACZ J., WOLCZOWSKI A., *An Experiment in Navigation of an Autonomous Mobile Robot*, Proc. Int. Workshop on Intelligent Robotic Systems'93 (IRS'93), Zakopane, Poland, 32-43.
- [45] RACZ J., SIEMIATKOWSKA B., SAWWA R., PETZ M., *Map Building Based on LRF Readouts*, Proc. 3rd Int. Symp. on Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje, Poland,
- [46] REINA A. and GONZALES J., *Characterization of a radial laser scanner for mobile robot navigation*, Proc. IEEEERSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'97), Grenoble, France, 579-585.
- [47] RUOCCO, S.R., *Robot Sensors and Transducers*. Halsted Press, 1987.
- [48] SABATINI A.M., Di BENEDETTO, O., *Towards a Robust Metodology for Mobile Robot Localization Using Sonar*, Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation, San Diego, USA, 3142-3147.

- [49] SCHIELE B., CROWLEY J. L., *Certainty grids: perception and localization for a mobile robot*, Proc. Int. Symp. on Intelligent Robotic Systems (IRS'93), Zakopane, Poland, 159-165.
- [50] SCHIELE B., CROWLEY J. L., *Where to look next and what to look for*, Proc. 4th Int. Symp. on Intelligent Robotic Systems (SIRS'96), Lisbon, Portugal, 139-146.
- [51] SIEMIĄTKOWSKA B., *Cellular Neural Network for Path Planning*, Proc. of International Workshop on Intelligent Robotic Systems'94, Grenoble July, 1994.
- [52] SIEMIĄTKOWSKA B., *Rastrowa reprezentacja otoczenia nawigacji robotów mobilnych*, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa.
- [53] STEELS, L., *Steps towards common sense*, Proceedings ECAI-88, pp. 49-54, Munchen 1988.
- [54] THORPE Ch., *Vision and Navigation: the Carnegie Mellon Navlab*. Kluwer Academic Publ., 1990.
- [55] THORPE Ch., *Mixed traffic and automated highways*, Proc. IEEEERSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'97). Grenoble, France, 1011-1017.
- [56] THORPE C. E., *Path Relaxation, Path Planning for a Mobile Robot*, Proc. of the 4th National Conference in Artificial Intelligence, Austin, 1984.
- [57] TRIGGS B., *Model-Based Sonar Localisation for Mobile Robots*, Proc. Int. Workshop on Intelligent Robotic Systems'93 (IRS'93), Zakopane, Poland, 1-13.
- [58] WALLNER F., *Potential Field Based Locomotion Reflexes*, Praca doktorska, 1991.
- [59] WECKESSER P., APPENZELLER G., VON ESSEN A., DILLMANN R., *Exploration of environment with laser scanner and digital cameras*, Proc. 4th Int. Symp. on Intelligent Robotic Systems (SIRS'96), Lisbon, Portugal, 49-56.
- [60] WEIGL M., SIEMIĄTKOWSKA B., SIKORSKI K.A., BORKOWSKI A., *Grid-based mapping for autonomous mobile robot*, Journal of Robotics and Autonomous Systems, 11, 13-21.
- [61] WEISS G., WETZLER C., VON PUTTKAMER E. *Keeping Track of Position and Orientation of Moving Indoor Systems by Correlation of Range-Finder Scans*, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS'94*.
- [62] WOLCZOWSKI A., *Autonomous Mobile Robot ULYSSES*, Proc. 7-th Int. Conf. AI in Engineering, Waterloo, Canada, 335-337, 1979. and Automation, 1985.