

ZASTOSOWANIE SENSORÓW W BUDOWIE MODELU OTOCZENIA ROBOTA MOBILNEGO

Streszczenie : W pracy przedstawiono analizę cech wybranych układów sensorycznych w aspekcie ich przydatności w budowie modelu otoczenia robota mobilnego. Szczególną uwagę zwrócono na dalmierze i skanery optyczne. Przedstawiono przykładową konstrukcję skanera.

Abstract : In this paper a survey of sensor systems for autonomous mobile robots is presented. Features of some sensors which are useful for world modelling are discussed. The emphasis of this article is on optical scanners and rangefinders. An example of optical scanner construction is presented.

1. SENSORY ROBOTA MOBILNEGO

Sensory pełnią kluczową rolę w budowie autonomicznych robotów mobilnych (ARM). Trudno byłoby sobie wyobrazić rozpoznanie środowiska (sceny) działania robota i budowę modelu tego środowiska bez użycia "inteligentnych czujników" — sensorów. Są one ogniwiem pośrednim między otoczeniem a systemem nawigacji robota, który przetwarza dane, tworzy model otoczenia i wypracowuje na podstawie tego modelu strategię działania ARM.

W autonomicznych robotach mobilnych używane są bardzo zróżnicowane systemy sensoryczne. Przyczyną tego jest różnorodność i złożoność środowisk, w których pracują ARM oraz różnorodność zadań stawianych sensorom zabudowanym na pokładzie robota mobilnego. Z punktu widzenia przydatności danego rodzaju sensorów jako systemu dostarczającego dane do budowy modelu otoczenia istotny jest przede wszystkim zakres postrzegania otoczenia oraz rodzaj i postać dostarczanych danych. System sensoryczny stosowany jako źródło informacji do budowy modelu otoczenia powinien charakteryzować się następującymi własnościami :

1. Dostarczona informacja powinna jednoznacznie określać położenie obiektów otaczających robota oraz pozwalać na określenie odległości między robotem a otaczającymi go przeszkodami.
2. Dostarczone dane powinny cechować się rozdzielczością i dokładnością wystarczającą do budowy na ich podstawie mapy pozwalającej bezpiecznie planować ruchy robota.
3. Sensor powinien pozwalać na dostrzeganie przeszkód odległych od robota, tzn. mieć jak największy zasięg przy wystarczającej rozdzielczości i dokładności.
4. Dostarczona informacja powinna być maksymalnie syntetyczna i nie wymagać wstępnego przetwarzania przed przystąpieniem do budowy mapy otoczenia.

5. Działanie sensora powinno być możliwie niezależne od warunków panujących na scenie (oświetlenie, zakłócenia techniczne) oraz indywidualnych cech postrzeganych obiektów (kolor, faktura powierzchni).
6. Czas akwizycji pojedynczej porcji danych przekazywanych do systemu mapującego powinien pozwalać na pracę ARM w czasie rzeczywistym.

Przedstawionych wymagań nie spełniają sensory wewnętrzne (odometryczne), będące typowym wyposażeniem każdego robota mobilnego i wykorzystywane w lokalizacji zliczeniowej [17]. Do budowy modelu otoczenia muszą zostać wykorzystane informacje dostarczone przez sensory zewnętrzne. Niewielką przydatność jako źródło danych do budowy mapy otoczenia wykazują też czujniki dotykowe (np. zderzaki) oraz sensory zbliżeniowe (bezkontaktowe). Są one powszechnie stosowane w robotach mobilnych jako element zabezpieczający pojazd przed kolizją z przeszkodami oraz używane przy omijaniu przeszkód [16] lub niskopoziomowym sterowaniu lokalnym.

Większość z przedstawionych wymagań spełniają natomiast systemy wizyjne (sensory obrazu) oraz dalmierze i skanery (optyczne i ultradźwiękowe). Ponieważ sensory te cechują się dużym zróżnicowaniem konstrukcji i właściwości użytkowych w niniejszej pracy przedstawiono krótkie charakterystyki wybranych sensorów i ich ocenę w funkcji przydatności do zastosowania w systemie budowy modelu otoczenia ARM.

2. PRZYDATNOŚĆ WYBRANYCH SENSORÓW W BUDOWIE MODELU OTOCZENIA

2.1. Systemy wizyjne

Sensory wizyjne dostarczają w jednym pomiarze informację o znacznym fragmencie sceny wokół robota. Zasadniczą różnicą między sensorami wizyjnymi a innymi układami sensorycznymi jest znacznie większa ilość informacji przesyłanej przez obraz, w porównaniu z danymi dostarczonymi przez dalmierze. W związku z tym użycie sensorów wizyjnych, niezależnie od ich postaci pociąga za sobą bardzo dużą złożoność obliczeniową algorytmów przetwarzania obrazu. Większość stosowanych w robotyce systemów wizyjnych należy do sensorów pasywnych i wykorzystuje kamery wizyjne oraz naturalne oświetlenie sceny [4, 13]. Ponieważ kamery dostarczają jedynie dwuwymiarowe obrazy, do budowy modelu otoczenia konieczne jest zastosowanie metody pozwalającej określić na podstawie tych danych położenie obserwowanego punktu w przestrzeni. Możliwe jest zastosowanie w tym celu układu kilku kamer o znanych parametrach optycznych i usytuowaniu względem siebie (stereowizja), lub analiza kolejnych kadrów uzyskanych z jednej poruszającej się kamery (analiza sekwencji obrazów) [13]. Istnieją również systemy wizyjne wykorzystujące do akwizycji trójwymiarowego obrazu sceny pojedynczą kamerę i laserowe oświetlenie strukturalne [13].

Dla określenia przydatności sensorów wizyjnych w tworzeniu modelu otoczenia robota należy przedstawić ich zalety i najistotniejsze wady. Najważniejsze zalety to :

- Globalność pozyskiwanej informacji, nie ograniczona jak w przypadku dalmierzy, zasięgiem sensora.
- Duża ilość dostarczanej informacji, znacznie większa niż w jakimkolwiek innym rodzaju sensorów.

- Niezależność od rodzaju obserwowanych obiektów i ich właściwości (np. faktury powierzchni).

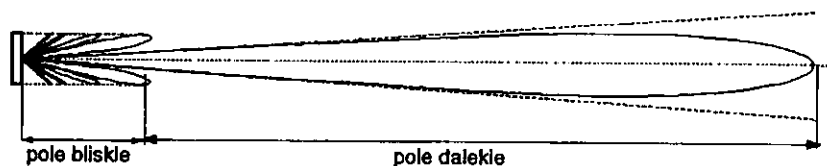
Najistotniejsze wady to :

- Bardzo duża złożoność obliczeniowa algorytmów przetwarzania obrazu.
- Trudności w przetwarzaniu danych wizyjnych w czasie rzeczywistym (wynika to z poprzedniej własności) ograniczające możliwości budowy mapy otoczenia w czasie ruchu robota, a tym samym możliwości eksploracji nieznanego otoczenia.
- Wysokie koszty części sprzętowej (głowice stereowizyjne) oraz systemu przetwarzającego o dużej wydajności.
- W przypadku systemów pasywnych problemami są też : zależność od warunków oświetlenia sceny i słaba rozróżnialność obiektów o niskim kontraście.

2.2. Dalmierze ultradźwiękowe

Zasada działania większości dalmierzy ultradźwiękowych stosowanych w robotach mobilnych opiera się na metodzie impulsowej, polegającej na wysłaniu przez sensor impulsu i pomiarze czasu do jego powrotu. Na tej podstawie obliczana jest droga przebyta przez falę dźwiękową, odpowiadająca odległości do obiektu, od którego powierzchni odbiła się fala. Prędkość rozchodzenia się dźwięku jest zależna od środowiska, w którym się on rozchodzi. Najbardziej rozpowszechnionymi dalmierzami ultradźwiękowymi są układy firmy *Polaroid* [11]. Są to sensory wykorzystujące impulsową metodę pomiaru, charakteryzujące się zwartą budową, małymi wymiarami oraz niskim kosztem pojedynczego przetwornika pomiarowego. Cechy te spowodowały, że znalazły one zastosowanie w konstrukcji wielu ARM [2, 6, 15, 14].

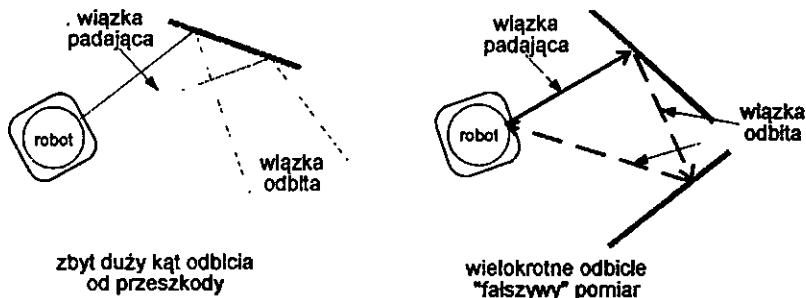
Zasięg dalmierzy ultradźwiękowych w powietrzu ograniczony jest do kilkunastu metrów przez duże tłumienie sygnału w tym ośrodku. Minimalny zasięg pomiarów uwarunkowany jest kształtem charakterystyki kierunkowej wiązki pomiarowej (rys. 1). Ze względu na interferencje nakładających się maksimów lokalnych, wiarygodne pomiary mogą być wykonywane jedynie w polu dalekim wiązki [9]. Dla sensorów *Polaroid 6500 series* zasięg maksymalny wynosi 10.5m, minimalny 20cm a rozdzielczość 1% mierzonej odległości [11].



Rysunek 1: Charakterystyka kierunkowa źródła fal ultradźwiękowych

Zasada działania dalmierzy ultradźwiękowych powoduje, że otrzymane za ich pomocą pomiary odległości obciążone są często błędami. Na wynik pomiaru wpływa wiele czynników zewnętrznych, takich jak zmiany prędkości rozchodzenia się fali (wywołane zmianami wilgotności i temperatury powietrza), faktura i sprężystość powierzchni przeszkód, kształt wiązki. Podstawowymi przyczynami błędnych pomiarów sensorami ultradźwiękowymi są

jednak : występowanie granicznego kąta widzenia powierzchni przeszkód oraz zjawisko wielokrotnych odbić od obiektów znajdujących się w otoczeniu robota. Wyeliminowanie tych błędów jest dość trudne i opiera się głównie na kwalifikowaniu odczytów prawdziwych oraz ich archiwizacji zgodnie z odpowiednio założonymi regułami [7]. Na rysunku 2 przedstawiono typowe sytuacje w których sensory ultradźwiękowe dostarczają błędne wyniki pomiarów. Podstawowe zalety sensorów ultradźwiękowych w funkcji ich przydatności



Rysunek 2: Przykłady błędnych pomiarów sensorami ultradźwiękowymi

jako źródła danych do budowy modelu otoczenia to :

- Bezpośrednie dostarczanie danych o odległości do przeszkód.
- Znaczny zasięg (wystarczający do pracy w pomieszczeniach zamkniętych).
- Zdolność dostrzegania niewielkich przeszkód (np. nogi stołów, krzeseł) oraz przeszkód "niewidzialnych" dla sensorów optycznych (np. przezroczystych lub silnie pochłaniających światło).
- Niskie koszty sensorów.

Natomiast główne wady to :

- Duża ilość błędnych pomiarów powodowanych wielokrotnymi odbiciami oraz innymi, przedstawionymi powyżej przyczynami znacznie obniża wiarygodność dostarczonej informacji.
- Niska rozdzielczość kątowa uwarunkowana dużą szerokością wiązki pomiarowej.
- Ograniczony kąt widzenia powierzchni przeszkód.
- Duża wrażliwość na indywidualne własności otoczenia, takie jak faktura i konfiguracja przeszkód.

2.3. Dalmierze i skanery optyczne

Dalmierze optyczne to sensory wypromieniowujące energię (światłą, mikrofałe) w kierunku obserwowanych obiektów i odbierające energię odbitą od nich. W zależności od konstrukcji danego sensora odbite światło może być wykrywane za pomocą specjalnych detektorów (fotodiod) lub kamer wizyjnych. Ze względu na łatwość odchylenia wiązki świetlnej przy pomocy odpowiedniego układu optycznego dalmierze optyczne realizowane

są często jako *skanery*. Znacznie rozszerza to zakres możliwych zastosowań takich dalmierzy (w porównaniu z np. sonarami), szczególnie w przypadku pomiarów trójwymiarowych. Obecnie skanery optyczne znalazły szereg zastosowań w budowie ARM. Są często wykorzystywane jako sensory umożliwiające lokalizację robota mobilnego w znanym otoczeniu na podstawie jego charakterystycznych cech, bądź też sztucznych znaczników (landmarków) [2]. Dane dostarczane przez skaner optyczny stanowią też dobrą podstawę do budowy modelu otoczenia robota [5, 12, 14]. W dalmierzach i skanerach pomiaru odległości dokonuje się metodą triangulacyjną lub przez wyznaczenie czasu przelotu wiązki energii odbitej od obiektu.

Triangulacja jest znaną od dawna zasadą pomiaru odległości. Opierające się na niej skanery optyczne składają się ze źródła światła i odbiornika (matryca lub linijka CCD). O znanym wzajemnym położeniu i nierównoległych osiach optycznych. Odbiornik rejestruje część wiązki pomiarowej odbitej od przeszkody. Położenie punktu o największej intensywności w obrazie na odbiorniku CCD określa odległość do obserwowanego obiektu. Istotną wadą metody triangulacyjnej jest brak możliwości wykonania pomiaru, gdy obiekt oświetlony wiązką pomiarową nie jest widziany przez odbiornik. Sytuacja ta występuje tym rzadziej im bliżej siebie położone są nadajnik i odbiornik, zmniejszenie bazy powoduje jednak obniżenie rozdzielczości skanera. Metoda triangulacyjna pozwala uzyskać dużą dokładność, co wymaga jednak znacznej długości detektora. Pomimo znacznej złożoności konstrukcyjnej skanery laserowe działające na zasadzie triangulacji znalazły szereg zastosowań w budowie robotów mobilnych [2].

Inną metodą optycznego pomiaru odległości jest wyznaczenie czasu, który upłynął między wysłaniem impulsu świetlnego przez nadajnik a jego odebraniem [1]. Na podstawie pomiaru czasu t od chwili emisji impulsu do czasu powrotu impulsu odbitego od obiektu można wyznaczyć odległość r do tego obiektu, $r = \frac{1}{2}ct$, (gdzie c - prędkość światła). Metoda ta jest bardzo precyzyjna przy pomiarach odległości większych niż ok. 5m. Dla krótszych odległości konieczny jest pomiar przedziałów czasowych rzędu pikosekund. Dalmierze tego rodzaju wykorzystywane są często w zastosowaniach, w których mierzone są znaczne odległości (np. geodezja i systemy militarne) [1].

W celu ominięcia problemów związanych z bezpośrednim pomiarem czasu przelotu światła opracowane zostały metody optycznego pomiaru odległości oparte o pomiar przesunięcia fazowego. Przy pojedynczej modulacji amplitudy nadawanego sygnału z częstością ω przesunięcie fazowe ϕ pomiędzy wiązką odbitą od obiektu i wiązką odniesienia (nadawaną) pozwala wyznaczyć odległość r . Przesunięcie fazowe może być w tej metodzie wyznaczone jedynie co do 2π [16], w związku z czym mierzona odległość jest jednoznaczna jedynie w zakresie $r = \frac{1}{2\omega}$, równym połowie długości fali modulowanej wiązki :

$$r = \frac{c}{2\omega}\phi + n\frac{c\pi}{\omega} \quad (1)$$

gdzie $n=1,2,3,\dots$ Dalmierze i skanery optyczne działające na opisanej powyżej zasadzie są obecnie najpopularniejszymi optycznymi urządzeniami do pomiaru odległości stosowanymi w budowie ARM [2, 3, 14, 15]. Charakteryzują się one najlepszym stosunkiem parametrów użytkowych (rozdzielczość, dokładność, powtarzalność) do kosztów sensora. Również w tej grupie sensorów optycznych istnieje najwięcej urządzeń komercyjnych. Sensory optyczne są bardzo przydatnym źródłem danych dla systemu budującego model otoczenia. Dotyczy to szczególnie skanerów optycznych wyposażonych w możliwość dokonywania pomiarów trójwymiarowych. Podstawowe zalety dalmierzy i skanerów optycznych to :

- Dostarczanie bezpośrednich danych o odległości do przeszkód. Dane są bardziej syntetyczne niż otrzymane z pasywnych układów wizyjnych (kamer) a nakład obliczeń potrzebny dla ich przetworzenia jest znacznie mniejszy, co ułatwia spełnienie wymogów działania w czasie rzeczywistym.
- Możliwość wykonywania pomiarów w na scenie trójwymiarowej (skanery).
- Duża rozdzielczość i dokładność pomiarów, nieporównywalna z innymi rodzajami sensorów.
- Wysoka pewność i powtarzalność pomiarów (np. w porównaniu do sonarów).
- Niezależność od poziomu i sposobu naturalnego oświetlenia sceny.
- Możliwość kształtowania pola widzenia i strategii akwizycji danych w zależności od aktualnych potrzeb [3, 5].

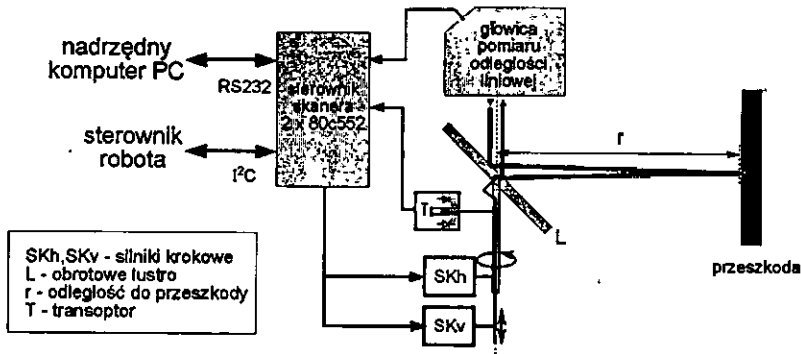
Natomiast charakterystyczne wady to :

- Konieczność zapewnienia bezpieczeństwa ludzi (ochrona wzroku) znajdujących się w obszarze działania sensorów laserowych. Sensory muszą spełniać odpowiednie normy bezpieczeństwa [8].
- Znaczny czas akwizycji danych. Dotyczy to szczególnie prostych skanerów 3D.
- Wrażliwość na rodzaj powierzchni obserwowanych przeszkód oraz ich położenie względem sensora. W szczególności błędne wskazania mogą dotyczyć powierzchni ciemnych (pochłaniających światło), silnie błyszczących lub przezroczystych [10]. Zjawiska te nie występują jednak tak silnie jak dla dalmierzy ultradźwiękowych.
- Wysoki koszt. Dotyczy to zwłaszcza skanerów laserowych wyposażonych w precyzyjny mechanizm odchylenia wiązki.

2.4. Skaner optyczny KARiI

Skaner optyczny opracowany¹ w *Katedrze Automatyki, Robotyki i Informatyki (KARiI)* [3, 12, 17] należy do grupy urządzeń działających na zasadzie pomiaru przesunięcia fazowego. Wyposażono go w mechanizm odchylenia wiązki pozwalający na wykonywanie pomiarów na scenie trójwymiarowej. Do budowy skanera wykorzystano komercyjną głowicę pomiaru odległości firmy *PEPPERL & FUCHS GmbH* opartą o zasadę pomiaru przesunięcia fazowego modulowanej wiązki promieniowania podczerwonego. Źródłem fali optycznej jest półprzewodnikowa dioda LED emitująca promieniowanie o długości 880nm. Wiązka pomiarowa zmodulowana jest sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości 8MHz. Moc nadajnika i czułość odbiornika urządzenie zezwala na pomiary odległości w zakresie od 0.1m do 5.0m. Pomiary przekraczające 5.0m traktowane są jako błędne i odrzucane przez sterownik skanera. Szerokość kąтова wiązki pomiarowej wynosi 1.1°. Ze względu na wymagany czas ustalania sygnału w głowicy pomiaru odległości, przy pomocy skanera można wykonać maksymalnie do 100 pomiarów na sekundę. Odchylenie wiązki pomiarowej uzyskano poprzez umieszczenie na jej drodze obrotowego lustra (rys. 3). Wiązka pomiarowa może być odchylana w zakresie 45° w pionie i 360° w poziomie. Z pola obserwacji wyłączony

¹Urządzenie to zostało opracowane w ramach grantu KBN.



Rysunek 3: Schemat budowy skanera optycznego

jest jedynie niewielki obszar zajmowany przez wspornik głowicy pomiarowej. Jako źródło napędu zastosowano silniki krokowe. Na korpusie kolumny lustra umieszczono przesłonę przecinającą strumień promieniowania transpatora szczelinowego którego sygnał wykorzystywany jest do pozycjonowania urządzenia. Do sterowania skanerem opracowany i wykonany został sterownik [3] oparty o dwa mikrosterowniki jednocukładowe 80552. Do przetwarzania sygnału wykorzystano 10-bitowy przetwornik A/C wbudowany w mikrokontroler. Sterownik wyposażony jest w dwa kanały łączności: łącze szeregowe RS232 do łączności z komputerem nadrzędnym, oraz łącze szeregowe I²C do łączności ze sterownikiem pokładowym robota mobilnego.

Skaner ten jest stosunkowo prostym urządzeniem, mającym jednak parametry użytkowe wystarczające do zastosowania go jako podstawowego sensora przy budowie mapy otoczenia ARM. W szczególności zapewnia on dużą wiarygodność i powtarzalność pomiarów. Sensor ten spełnia sformułowane na wstępie warunki przydatności jako źródło informacji do budowy modelu otoczenia.

3. WNIOSKI

Jak wynika z powyższych rozważań wszystkie rodzaje sensorów mają charakterystyczne cechy predystynujące je do określonych zastosowań w systemie nawigacji ARM. Wszystkie mają też pewne wady oraz odmienne charakterystyki dokładności pomiarów. Stwarza to konieczność budowy wielosensorycznych systemów nawigacji robotów mobilnych [15] oraz konstrukcji układów sensorycznych opartych na agregacji danych uzyskanych z różnych sensorów (np. dalmierzy optycznych i kamer wizyjnych).

Spośród przedstawionych sensorów wymagania dla źródła danych do budowy modelu otoczenia robota mobilnego najlepiej spełniają skanery optyczne. Ze względu na swe zalety sensory tego rodzaju są coraz częściej stosowane w budowie robotów mobilnych. Również w KARIi prace nad tego rodzaju sensorami oraz metodami przetwarzania pozyskanej z nich informacji będą prowadzone dalej.

LITERATURA

- [1] R. Czechowicz, J. Szydłak. *Impulsowe metody pomiarów odległości*, V Krajowa Szkoła Optoelektroniki 'Metrologia Laserowa', Waplewo 1991. str. 23-54.

- [2] L. Feng, J. Borenstein, H. R. Everett, *Where am I. Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning*, Technical Report, University of Michigan, 1995.
- [3] T. Jedwabny, P. Skrzypczyński, G. Wiczyński, *Skaner optyczny*, IV Konferencja Naukowa COE'96, Szczyrk 1996, tom 1, str. 71-74.
- [4] A. Kasiński, T. Piaścik, *Charakterystyka systemów aktywnej stereowizji do rekonstrukcji modelu sceny trójwymiarowej*, Prace Naukowe Instytutu Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej. V KKR, Wrocław 1996. tom 1, str. 346-353.
- [5] A. Kelly, *Concept Design of a Scanning Laser Rangefinder for Autonomous Vehicles*, CMU Robotics Institute Technical Report, 1994.
- [6] J.J. Leonard, H.F. Durrant-Whyte, *Directed Sonar Navigation*, Kluwer Academic Press, 1992.
- [7] J. Majchrzak *Tworzenie modelu otoczenia robota mobilnego przy wykorzystaniu ultradźwiękowego systemu sensorycznego*, Prace Naukowe Instytutu Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, V KKR, Wrocław 1996, tom 2, str. 39-44.
- [8] Z. Niechoda, M. Nowicki, *Przepisy BHP przy pracy z laserami*, V Krajowa Szkoła Optoelektroniki 'Metrologia Laserowa', Waplewo 1991. str. 128-143.
- [9] J. Obroz, *Ultradźwięki w technice pomiarowej*, WNT, Warszawa 1983.
- [10] M. Petz, R. Sawwa, *Zastosowanie laserowego czujnika odległości do nawigacji robotów mobilnych*, Prace Naukowe Instytutu Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, V KKR, Wrocław 1996, tom 2, str. 45-51.
- [11] Polaroid, *Ultrasonic Ranging System*, Polaroid Corp., 1991.
- [12] P. Skrzypczyński, T. Jedwabny, *Zastosowanie dalmierza IR do tworzenia mapy otoczenia robota mobilnego*, II Krajowa Konferencja Naukowo Techniczna Mechatronika'94, Warszawa 1994, tom 2, str. 579-583.
- [13] J. Takeno, U. Rembold, *Stereovision Systems for Autonomous Mobile Robots*, Proc. IAS 4 Conf. Karlsruhe 1995, str. 26-41.
- [14] J. Vandorpe, H. Van Brussel, H. Xu, *Exact Dynamic Map Building for a Mobile Robot using Geometrical Primitives Produced by a 2D Range Finder*, IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom., 1996, Vol 1. str. 901-908.
- [15] A. Woźniak, A. Kasiński, P. Skrzypczyński, J. Majchrzak, P. Drapikowski, *Wielosensoryczny system nawigacji dla robota mobilnego*, Prace Naukowe Instytutu Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, V KKR, Wrocław 1996, tom 2, str. 85-92.
- [16] Praca zbiorowa, red. A. Woźniak, *Autonomiczne roboty mobilne. Laboratorium*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1994.
- [17] Sprawozdanie z grantu KBN *Wielosensoryczny system nawigacji dla autonomicznego robota mobilnego*, KARiI, Politechnika Poznańska 1995.