

## AUTONOMICZNY ROBOT MOBILNY

*Przedstawiono ogólnie problemy nawigacji w robotach mobilnych. Opisano konstrukcję mechaniczną, moduł komunikacyjny, sonar cyfrowy oraz płytę główną autonomicznego robota mobilnego przeznaczonego do zadań laboratoryjnych. Podano jego zasadę działania, opisano niektóre badania przeprowadzone na prototypie oraz przedstawiono możliwości rozwojowe robota. Wyciągnięto wnioski.*

### AUTONOMOUS MOBILE ROBOT

*Navigation problems in mobile robots are described. Mechanical construction, communication module, ultrasonic transducer and the main plate of an autonomous robot for laboratory use are described. Principle of operation is given and the results of testing are presented. Possibility of development of this project is formulated. Final conclusions are drawn.*

## 1. PROBLEMY NAWIGACJI W ROBOTACH MOBILNYCH

Zagadnienie określenia dokładnej pozycji robota mobilnego jest najpoważniejszą przeszkodą na drodze do autonomii robota [1]. Do niedawna najczęściej stosowano stałe punkty odniesienia - markery, względem których robot był pozycjonowany w przestrzeni. Było to jednak rozwiązanie skomplikowane i drogie. Później, do orientacji w terenie, zaczęto wykorzystywać systemy satelitarne GPS i dokładniejsze DGPS, lecz są one wystarczające dla dużych robotów, gdzie nie ma potrzeby wykonywania precyzyjnych ruchów. Przykładem może być robot Harunobu-6 [2] przeznaczony do zastosowań laboratoryjnych, który łączy pozycjonowanie względem danych z DGPS oraz markerów.

W celu zapewnienia orientacji w przestrzeni w robotyce korzysta się również z kompasów i żyroskopów. Zwłaszcza żyroskopy są chętnie stosowane w robotach kroczących dwunożnych jako czujniki równowagi [3]. Jednak w zastosowaniach laboratoryjnych od kilku lat dominuje sonar ultradźwiękowy, czujniki zbliżeniowe pracujące na podczerwieni, czujniki dotykowe oraz, rzadki jeszcze, radar mikrofalowy małej mocy. Ze względu na prostą budowę tych urządzeń, ale i pewne ich niedoskonałości fizycznego poznania otoczenia, często są one łączone ze sobą hybrydowo. Każdy rodzaj sensorów ma inny zakres działania ustawiony w taki sposób, by dany punkt w najbliższym otoczeniu był postrzegany przez dwa z nich. Obraz uzyskany tą drogą jest dobrym odzwierciedleniem rzeczywistego otoczenia. Ultradźwiękowe sonary są obecnie najpowszechniej stosowanym narzędziem do pomiarów odległości w robotach [4]. To jest spowodowane dostępnością potrzebnych elementów elektronicznych oraz łatwością, z jaką można przetwarzać dane pochodzące z tych urządzeń, budując mapy otoczenia robota [5].

Powstają także roboty „poznające” otoczenie przez analizę obrazu pochodzącego z kamery [6]. Niedoskonałość technik rozpoznawania obrazów oraz duża moc

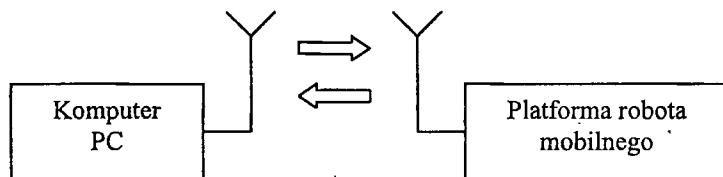
obliczeniowa stosowanych w tym celu komputerów są poważną barierą rozwoju tej metody zbierania informacji.

Dane o otoczeniu, aby mogły być zastosowane w robocie, muszą najpierw zostać przedstawione graficznie lub liczbowo tak, aby znając sposób postrzegania przez nie otoczenia, programista mógł ułożyć odpowiedni algorytm sterowania. Wówczas robot przy pomocy pomiarów stwarza pewne punkty odniesienia, względem których może zmieniać swoją pozycję. Dlatego dane o otoczeniu są dzielone na mapy lokalne i globalne. Dane z map lokalnych są informacjami pochodzącymi z ostatniego pomiaru, zaś mapy globalne stanowią najczęściej zbiór informacji powtarzających się kilkakrotnie na mapach lokalnych. Na marsjańskim lądowniku Pathfinder [7] punktem odniesienia była mapa globalna, zbudowana na podstawie obrazu pochodzącego z kamery umieszczonej na lądowniku. Po tak skonstruowanym wirtualnym świecie łązik był w stanie dojechać do zadanego miejsca, a napotkane przeszkody (skały i kamienie) były traktowane jako punkty odniesienia służące do korekty własnej pozycji względem tej mapy.

## 2. OPIS ROBOTA MOBILNEGO

### 2.1. Konstrukcja mechaniczna

Laboratoryjny robot mobilny z autonomiczną nawigacją, przeznaczony do dydaktycznych celów laboratoryjnych [8], składa się z platformy mobilnej oraz komputera nadzorującego pracę robota (rys. 1). Te urządzenia są sprzęgnięte radiomodemem poprzez łącze szeregowe RS232.



Rys. 1. Struktura robota mobilnego

Platformę mobilną robota stanowi rama aluminiowa, która jest wsparta na trzech kołach; dwa z nich są osadzone po dwóch przeciwległych bokach ramy i są napędzane silnikami prądu stałego, trzecie koło (bez napędu) jest osadzone obrotowo z tyłu szkieletu konstrukcji nośnej. Zapewnia to pełną możliwość ruchu w dowolnym kierunku. Wykonany z podwójnej ramy aluminiowej zderzak, został przytwierdzony do konstrukcji bazowej na sprężynach, które mają łagodzić uder ewentualnego zderzenia z przeszkodą.

Od góry platforma mobilna robota jest przykryta płytą z pleksi. Jej łatwy demontaż umożliwia prostą instalację lub wymianę elementów elektronicznych platformy mobilnej. Od spodu płyty pleksi przymocowano silnik krokowy sonaru. Płyta spełnia również rolę płaskiego ekranu osłaniającego głowicę sonaru przed przypadkowo odbitymi ultradźwiękami od elementów konstrukcji nośnej oraz przysłania znajdujące się zbyt blisko niskie przeszkody.

### 2.2. Moduł komunikacyjny

W module komunikacyjnym zastosowano zespoły nadawczo-odbiorcze firmy DANY. Umożliwiają one dwustronną, półdupleksową transmisję danych z szybkością 1200

bitów na sekundę oraz wystarczający zasięg (do ok. 100 m). Urządzenie pracuje na paśmie ogólnodostępnym 433 MHz, a moc nadajnika wynosi 6 mW, co zwalnia od obowiązku ubiegania się o licencję nadawcy. Takie możliwości urządzenia okazały się w pełni wystarczające do planowanych zastosowań laboratoryjnych. Zaprojektowano jedynie odpowiedni, dwukierunkowy konwerter standardu RS-232 na sygnał wymagany przez nadajnik-odbiornik. Wybór łącza RS-232 jest oczywisty ze względu na istnienie tego rodzaju portu, zarówno po stronie komputera klasy PC, jak i po stronie mikrokontrolerów rodziny MCS'51.

### 2.3. Sonar cyfrowy

W omawianym projekcie zastosowano specjalnie skonstruowany dalmierz cyfrowy i osadzono go na wale silnika krokowego. Pozwala to na pomiar odległości do najbliższych przeszkód dookoła platformy mobilnej robota. Uzyskany w ten sposób wektor danych o otoczeniu jest transmitowany drogą radiową do komputera i przedstawiany w postaci graficznej. W sonarze wykorzystano elementy piezoelektryczne stosowane głównie w alarmach samochodowych firmy CERAD. Silnikiem krokowym zarządza mikroprocesor pośrednio poprzez układ zasilacza ze sterownikami.

### 2.4. Płyta główna

Na płycie głównej wykorzystuje się sieć mikroprocesorową, opartą na układach AT89Cx051 firmy ATMEL, taktowanych zegarem 11.059 MHz. Jest to sieć typu master-slave, gdzie master - to komputer nadzorujący pracę robota, a slave - to każdy z mikrokontrolerów na płycie głównej. Mikroprocesory mają dostęp do magistrali danych, która steruje modulem nadawczo-odbiorczym, poprzez wbudowany port RS232. Magistralę zbudowano na układach logicznych CMOS, a do podwyższenia napięcia, potrzebnego do sterowania radiomodemem, użyto transoptorów. Kontrolę pozycji zapewniają dwa wbudowane szesnastobitowe liczniki współdziałające z optycznym generatorem impulsów przejechanej drogi. Przed niezauważonymi przez sonar cyfrowy przeszkodami chroni zderzak z odpowiednimi czujnikami stykowymi.

Na osi każdego silnika napędowego zamontowano przesłone, na drodze wiązki światła z nadajnika do odbiornika. Nadajnikiem jest dioda emitująca światło podczerwone modulowane częstotliwością 38 kHz. Scalony odbiornik podczerwieni TFMS 5380 jest czuły na tak zmodulowane światło. Każde przerwanie tej wiązki przez przesłone powoduje krótką zmianę stanu wysokiego na wyjściu odbiornika na stan niski. Dzieje się tak dwukrotnie podczas jednego obrotu.

## 3. ZASADA DZIAŁANIA ROBOTA

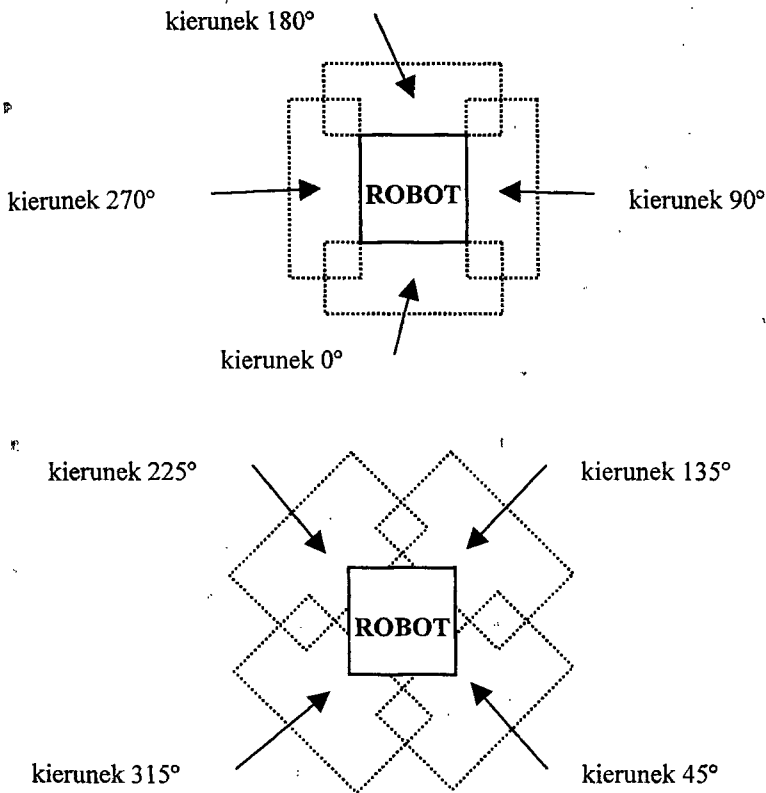
W pamięci mikroprocesora zostały zapisane dwa podprogramy, które w różny sposób sterują silnikami. Pierwszy z nich realizuje funkcje zdalnego sterowania jazdą robota. Operator ma wówczas pełną dowolność ruchu platformą mobilną robota. Naciskając odpowiednie klawisze kursorów na klawiaturze komputera sterującego powoduje ciągłe nadawanie rozkazu jazdy w zadanym kierunku. Ta część programu służy do przestawiania platformy mobilnej w miejsce rozpoczęcia eksploracji lub w miejsce postoju. Dodatkowo czynne są czujniki uderzenia w przeszkodę. W chwili, gdy którykolwiek zadziała, zdalne sterowanie zostaje zawieszona, robot zatrzymany i następnie cofnięty o 50 mm. Po upływie jednej sekundy zdalne sterowanie zostaje przywrócone. W tym podprogramie komunikacja radiowa jest jednostronna i komputer nie odbiera żadnych danych z platformy mobilnej.

Drugi podprogram jest przeznaczony głównie do autonomicznego sterowania robotem. Urządzenie wykonuje rozkazy o ściśle określonych parametrach, w których jest zawarta informacja o przemieszczeniu o zadaną drogę lub obrocie o zadany kąt. Informacja ta ma postać liczby impulsów podawanych do liczników mikroprocesora, przy czym jednej jednostce drogi odpowiada 1,4563 mm, a jednej jednostce kąta obrotu 0,7258°. Program mikrokontrolera pilnuje, by dla jazdy wprost stany liczników przyporządkowanych obu silnikom były jednakowe. Dodatkowo, w programie zawarto również procedurę, która pozwala miękko wyhamowywać silniki podczas zatrzymania. Mikrokontroler steruje silnikami prądu stałego poprzez moduł zasilacza ze sterownikami.

Po zakończeniu zadanego ruchu platforma mobilna robota wysyła do komputera potwierdzenie wykonania rozkazu w postaci takiej samej, jaką otrzymała, lecz z zerowymi bajtami informacji. Ten tryb sterowania uaktywnia również zderzak, ale wywołuje on inną reakcję. Po uderzeniu w przeszkodę kontrolę przejmuje procedura, która zawróci robota do miejsca rozpoczęcia ostatniego ruchu, po czym wyśle informację o napotkanej przeszkodzie i jej lokalizacji. Usytuowanie uderzonej przeszkody jest zapisane w protokole w bajtach informacji.

Podprogram nawigacyjny steruje wszystkimi modułami platformy mobilnej robota według odpowiedniego algorytmu. Odbywa się to cyklicznie w następującej sekwencji czasowej:

- wysyła się przez łącze RS232 i dalej przez radiomodem do sonaru rozkaz wykonania badania terenu,
- sygnał ten jest odbierany przez radiomodem zainstalowany na platformie mobilnej robota i wysyłany do sieci mikroprocesorowej,
- każdy z mikroprocesorów analizuje wiadomość i decyduje o tym, czy jest ona skierowana do niego,
- na ten sygnał reaguje wyłącznie mikroprocesor odpowiedzialny za obsługę sonaru i rozpoczyna pomiary,
- pomiary polegają na ustawieniu głowicy sonaru pod kątem  $n \cdot 3^\circ 36'$  (gdzie:  $n \in \{0, 1, \dots, 99\}$ ) i określaniu odległości od środka platformy mobilnej do najbliższej położonej przeszkody,
- wynik pomiaru jest natychmiast transmitowany do komputera i tam zapamiętywany w postaci wektora liczb szesnastobitowych,
- wektor ten jest następnie przeliczany na odległości w centymetrach i przedstawiany w postaci graficznej na ekranie komputera, gdzie jednemu centymetrowi odpowiada jeden piksel,
- tak powstaje mapa lokalna i na jej podstawie sprawdza się, w który z ośmiu możliwych „kierunków” można przemieścić platformę mobilną robota (rys. 2),
- następnie analizuje się algorytm eksploracji terenu i na tej podstawie wyznacza się następny ruch platformy mobilnej robota oraz jego kierunek,
- wektor danych zostaje przeniesiony i zapamiętany na mapie globalnej, po czym jest wyświetlany w postaci graficznej na monitorze komputera jako zbiór wszystkich pomiarów,
- wyznaczony uprzednio ruch robota zostaje zamieniony na odpowiedni rozkaz ruchu i wysłany do platformy mobilnej robota.



Rys. 2. Sposób określenia możliwości ruchu w danym kierunku

Cykl ten powtarza się wielokrotnie, co pozwala na otrzymanie zarysu pomieszczenia laboratoryjnego. Algorytm eksploracji terenu składa się z dwóch części. Pierwsza, działająca bezpośrednio po uruchomieniu robota, wytycza jazdę na wprost, aż do napotkania przeszkody. Wówczas robot zostaje skierowany w inne miejsce a program zapamiętuje, że nastąpił kontakt z przeszkodą, np.: ze ścianą laboratorium. Następnie ścieżka algorytmu trafia w pętlę, która pozwala robotowi na eksplorację pomieszczenia, w którym się znajduje.

Komputer sterujący decyduje o zbadaniu terenu wokół platformy mobilnej robota. Wysyła w tym celu odpowiedni protokół do mikroprocesora sterującego sonarem. Po otrzymaniu tego rozkazu ustawia głowicę sonaru w pozycji początkowej przy pomocy silnika krokowego. Następuje bezruch trwający 900 ms, który służy wy tłumieniu drgań konstrukcji sonaru, zakłócających jego pracę. Następnie mikroprocesor włącza generator na czas 800  $\mu$ s, co odpowiada długości około dwudziestu pięciu okresów wysłanej fali ultradźwiękowej. Z kolei, po czasie 1,5 ms zostaje uaktywniony odbiornik, którego wyjście jest dołączone do mikrokontrolera. Program zaszyty w jego wnętrzu czeka około 70 ms na sygnał z odbiornika. Gdy odbiornik dokona detekcji odbitych ultradźwięków, wystawia stan wysoki na odpowiednim wyjściu układu TBA 2800. Na

ten znak mikrokontroler przerywa odliczanie czasu rozpoczęte po nadaniu ultradźwięków, zapisuje dane o pomiarze w postaci protokołu i wysyła go do komputera. Gdy zaś odbiornik nie dokona detekcji ultradźwięków, w miejsce szesnastobitowej danej zostają wstawione bajty FFH oznaczające przepełnienie licznika. W protokole znajduje się też informacja o kącie obrotu silnika krokowego. Pomiary powtarzane są 100 razy, lecz za każdym razem zwiększa się kąt obrotu silnika krokowego o kąt  $3^{\circ} 36'$ . Znając kąt obrotu sonaru i odległość, komputer nadzorujący pracę robota szkicuje na ekranie wirtualny obraz przestrzeni, w której znajduje się robot. Po zakończeniu procedury głowica sonaru wraca do położenia bazowego.

Eksploatacja terenu polega na poruszaniu się wzdłuż granicy pomieszczenia lewym bokiem platformy mobilnej z utrzymaniem odległości od linii przeszkód w granicach od 10 cm do 40 cm. Nawigacja robotem mobilnym polega wyłącznie na analizowaniu danych pochodzących z sonaru. Dlatego ważne jest, aby przeszkody, z jakimi robot może mieć kontakt, były odpowiednio dobrane. Wysokość przeszkód powinna wynosić około 50 cm. Narożniki przeszkód powinny być zaokrąglone, aby wiązka ultradźwięków po odbiciu mogła powrócić do sonaru w postaci echa. Robot nie dostrzeże przeszkody odbijającej fale dźwiękowe pod kątem większym niż ok.  $45^{\circ}$ . Sonar cyfrowy zapewnia możliwość pomiaru odległości od 450 mm do 2000 mm z pewnymi ograniczeniami, bowiem energia echa fali akustycznej jest zależna od powierzchni przeszkody oraz jej faktury, więc np.: ściana w odległości 2 m będzie wykryta, a nie zostanie dostrzeżona bryła w kształcie walca znajdująca się w odległości 1 m.

#### 4. BADANIA I EKSPERYMENTY

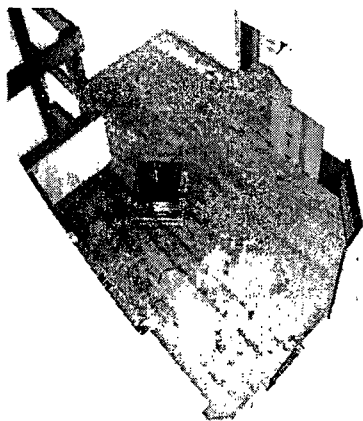
Przedmiotem badań było przede wszystkim postrzeżenie otoczenia sonarem ultradźwiękowym oraz dotyk zderzakiem przeszkód, które nie zostały wykryte przez sonar. Eksperymentowano również z zasięgiem działania radiomodemu.

Pierwsze badania sonaru ultradźwiękowego polegały na ustaleniu, jakie przeszkody robot jest w stanie wykryć i z jakiej odległości. Ustawiano w tym celu przedmioty (pułdła kartonowe) o różnych kształtach, rodzajach powierzchni, kątach odbicia względem głowicy sonaru w odległościach pięćdziesięciu, stu, stu pięćdziesięciu i dwustu centymetrów, licząc od środka bazy robota mobilnego. Zaobserwowano, zgodnie z przypuszczeniami, iż przeszkody o dużych powierzchniach, ustawione prostopadle do wiązki ultradźwięków, są odbijane najlepiej, przez co sonar wykrywał je z odległości nawet dwóch metrów. Natomiast, gdy kąt padania był mniejszy od  $45^{\circ}$ , przeszkody nie były zauważane. Rodzaj powierzchni również miał tu znaczenie. Okazało się, że im bardziej chropowata była powierzchnia tym lepiej były wykrywalne przeszkody ustawione pod kątem większym niż  $45^{\circ}$ , ale za to były gorzej postrzegane ze wzrostem odległości.

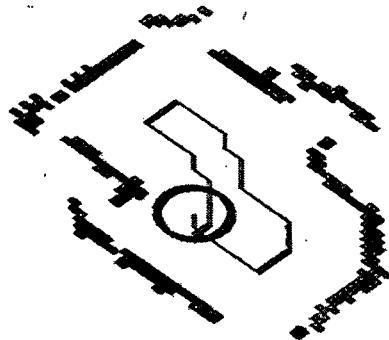
Eksperymenty wykazały nieprzydatność sonaru do detekcji przeszkód charakteryzujących się wypukłościami w kształcie trójkąta o kącie ostrym lub prostym. Przeszkody bez kątów ostrych były znakomicie wykrywane przez sonar. Dotyczyło to także wzajemnego łączenia tego rodzaju kształtów. W przypadku wklęsłego kąta prostego sam narożnik nie był postrzegany bądź też powstawało przekłamanie, polegające na generowaniu obrazu ścianki przeszkody w narożniku, która tam nie istniała. Zjawisko to jest związane z podwójnym odbiciem fali ultradźwiękowej od obu ścian leżących na ramionach kąta prostego i jej powrocie do sonaru.

Na podstawie przeprowadzonych badań można było ustalić, jakie przeszkody nadają się do wykorzystania w laboratorium. Stwierdzono, że przede wszystkim ich wysokość powinna wynosić przynajmniej 40 cm, ze względu na usytuowanie głowicy sonaru. Można było także wykorzystać ściany laboratorium, w którym robot miał się poruszać. Jednak w celu zróżnicowania terenu eksploracji robota zdecydowano się na wykorzystywanie przeszkód kartonowych o różnych kształtach.

Najważniejszymi i najciekawszymi badaniami były jednak eksperymenty z nawigacją autonomiczną robota mobilnego. Ustawiano przeszkody w różnych konfiguracjach i umieszczano wśród nich robota. Następnie obserwowano zachowanie się robota w tak zadanym środowisku laboratoryjnym. Okazało się, że podczas takich eksperymentów robot sprawnie omijał przeszkody lewym bokiem. Był również w stanie spenetrować wnękę (np.: wjazd do korytarza) o minimalnej szerokości 80 cm. Zarysy otoczenia, w którym porusza się robot, są przedstawiane na ekranie monitora i odpowiadają scenie rzeczywistej robota z dokładnością do 5 cm (rys. 3 i rys. 4). Osiągnięcie większej dokładności będzie możliwe po zastosowaniu bardziej precyzyjnych urządzeń pomiarowych na osiach kół napędowych. Zwykle w takich rozwiązaniach są stosowane czujniki Halla, lecz w tym przypadku (silniki RH158.12.75 użyte do napędu) takie czujniki nie były dostępne. W związku z tym na osi wirnika każdego silnika napędowego zamontowano czujniki optyczne.



Rys. 3. Widok rzeczywistego terenu poddanego eksploracji



Rys. 4. Widok ekranu komputera po eksploracji terenu

## 5. MOŻLIWOŚCI ROZBUDOWY

Robot mobilny powstał z myślą o stanowisku laboratoryjnym oraz o jego przyszłej rozbudowie. W tym celu na płycie głównej zostawiono miejsce pod dwa mikrokontrolery AT89Cx051 lub AT90S23xx oparte na technologii RISC. Mają one zapewnione równorzędne prawa dostępu do sieci komunikacji *master-slave*, przy czym płyta główna będzie działać niezależnie od ich obecności. Zostawiono również w płycie głównej miejsce do wlotowania wyprowadzeń urządzeń zewnętrznych współpracujących z dodatkowymi mikroprocesorami. Zamontowano także wszystkie

niezbędne części do uruchomienia dodatkowych mikrokontrolerów nie licząc rezonatora kwarcowego, który należy dobrać pod kątem potrzeb przyszłego układu.

## 6. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone rozległe badania laboratoryjne opracowanego robota mobilnego w pełni potwierdziły przyjęte założenia [8]. Urządzenie, mimo iż jest stosunkowo proste i bardzo tanie, z powodzeniem spełnia swoje zadania w laboratorium dydaktycznym, umożliwiając przybliżenie studentom frapującej tematyki robotów mobilnych. Przewidziana możliwość rozbudowy umożliwia kontynuację tej tematyki w ramach dalszych prac.

## LITERATURA

- [1] Grono A. J., Szypliński M.: *Problemy nawigacji w robotach mobilnych*. III konferencja Awioniki WARMIA 2001. Waplewo k/Olsztyna, 12-15 września 2001. Materiały konferencyjne wydane jako ZNPR, z. 56, Tom 2, str. 487-494.
- [2] Kotani S., Kaneko K., Shinoda T., Mori H.: "Mobile Robot Navigation Based on Vision and DGPS Information", Proceedings of the 1998 IEEE, International Conference on Robotics & Automation, Leuven, Belgium-May 1998, str. 2524-2529.
- [3] Okuyama Y., Yabu A., Takemori F.: "Attitude Control of a Biped Walking Robot Model with Circular Arced Soles Using a Gyroscope", Proceedings of the 1998 IEEE, International Conference on Robotics & Automation, Leuven, Belgium-May 1998, str. 1379-1384.
- [4] Laubach S., Burdick J., Matthies L.: "An Autonomous Path Planner Implemented on the Rocky7 Prototype Microrover", Proceedings of the 1998 IEEE, International Conference on Robotics & Automation, Leuven, Belgium-May 1998, str. 292-297.
- [5] Thrun S., Fox D., Burgard W.: "Probabilistic Mapping of an Environment by a Mobile Robot", Proceedings of the 1998 IEEE, International Conference on Robotics & Automation, Leuven, Belgium-May 1998, str. 1546-1551.
- [6] Kruse E., Wahl F.: "Camera-based Observation of Obstacle Motions to Drive Statistical Data for Mobile Robot Motion Planning", Proceedings of the 1998 IEEE, International Conference on Robotics & Automation, Leuven, Belgium-May 1998, str. 662-667.
- [7] Olson C., Matthies L.: "Maximum Likelihood Rover Location by Matching Range Maps", Proceedings of the 1998 IEEE, International Conference on Robotics & Automation, Leuven, Belgium-May 1998, str. 272-277.
- [8] Szypliński M.: *Koncepcja i konstrukcja laboratoryjnego robota mobilnego z autonomiczną nawigacją*. Praca dyplomowa magisterska. Opiekun pracy: Grono A. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki. Gdańsk 2000.