

# Autonomiczny robot mobilny

Andrzej J. Grono

*Opisano konstrukcję mechaniczną, moduł komunikacyjny, sonar cyfrowy oraz płytę główną autonomicznego robota mobilnego przeznaczonego do zadań laboratoryjnych. Podano jego zasadę działania, opisano niektóre przeprowadzone badania oraz przedstawiono możliwości rozwojowe robota. Wyciągnięto wnioski.*

Laboratoryjny robot mobilny z autonomiczną nawigacją, przeznaczony do dydaktycznych celów laboratoryjnych [1], składa się z platformy mobilnej oraz komputera nadzorującego pracę robota. Te urządzenia są sprzęgnięte radiomodemem poprzez łącze szeregowe RS-232 (rys. 1).

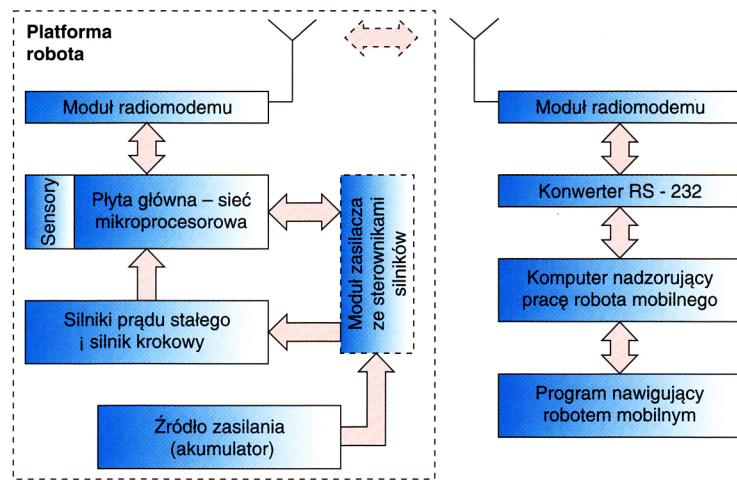
Platformę mobilną robota (rys. 2) stanowi skrecona śrubami rama aluminiowa, na której zamontowano wszystkie układy i elementy wyszczególnione na rys. 1. Rama jest wsparta na trzech kołach. Dwa koła są osadzone po dwóch przeciwległych bokach ramy i są napędzane silnikami prądu stałego. Trzecie koło (bez 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 niwelować 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 przymocowano silnik krokowy sonaru.

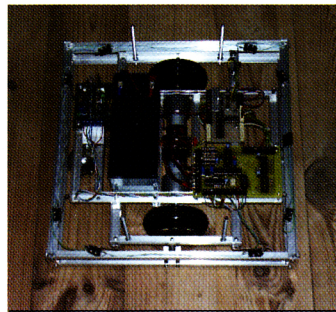
Płyta spełnia również rolę płaskiego ekranu osłaniającego głowicę sonaru przed ultradźwiękami przypadkowo odbitymi od elementów konstrukcji nośnej oraz przysłania zbyt blisko stojące, niskie przeszkody.

W module komunikacyjnym zastosowano moduły nadawczo-odbiorcze firmy DANY. Umożliwiają one dwustronną, półduplexową transmisję danych z szybkością 1200 bit/s oraz wystarczający zasięg (ok. 100 m). Urządzenie pracuje w 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.

*Prof. dr hab. inż. Andrzej J. Grono – Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki Katedra Automatyki*



Rys. 1. Struktura budowy laboratoryjnego robota mobilnego



Rys. 2. Widok platformy mobilnej robota bez płyty z sonarem cyfrowym

W omawianym projekcie zastosowano specjalnie skonstruowany dalmierz cyfrowy i osadzone go na wale silnika krokowego. Pozwala to na pomiar odległości do najbliższych przeszkód dookoła platformy mobilnej robota. Uzyskany tą drogą 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.

Komputer sterujący decyduje o zbadaniu terenu wokół platformy mobilnej robota. Wysyła w tym celu odpowiedni protokół do mikroprocesora sterującego sonarem. Po otrzymaniu tego rozkazu, za pomocą silnika krokowego ustawia głowicę sonaru w pozycji początkowej. Następuje bezruch trwający 900 ms, który służy wytlumieniu drgań konstrukcji sonaru, zakłócających jego pracę. Następnie mikroprocesor włącza generator na 800 ms, co odpowiada długości ok. 25 okresów wysłanej fali ultradźwiękowej. Z kolei, po 1,5 ms zostaje uaktywniony odbiornik, którego wyjście jest dołączone do mikrokontrolera. Program zaszyty w jego wnętrzu czeka ok. 70 ms na sygnał z odbiornika. Gdy odbiornik dokona detekcji odbitych ultradźwięków, wskazuje 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 proto-



kołu i wysyła go do komputera. Gdy odbiornik nie dokona detekcji ultradźwięków, w miejsce 16-bitowej 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.

Sonar cyfrowy ma możliwość pomiaru odległości od 450 mm do 2 m, z pewnymi istotnymi ograniczeniami. Robot nie dostrzeże przeszkody odbijającej fale dźwiękowe pod kątem większym niż ok.  $45^{\circ}$ . Dodatkowo energia echa fali akustycznej jest zależna od powierzchni przeszkody oraz jej faktury, np. ściana w odległości 2 m będzie wykryta, a nie zostanie dostrzeżona bryła w kształcie walca znajdująca się w odległości 1 m.

Na płycie głównej znajduje się sieć mikroprocesora oparta 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 sterującej modulem nadawczo-odbiorczym, poprzez wbudowany port RS-232. Magistralę zbudowano na układach logicznych CMOS, a do podwyższenia napięcia, potrzebnego do sterowania radiomodemem, użyto transoptorów. Kontrolę pozycji zapewniają dwa wbudowane 16-bitowe 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 przesłonę, która przysyła wiązkę światła wysłaną 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 przerwianie tej wiązki przesłoną powoduje krótką zmianę stanu wysokiego na wyjściu odbiornika na stan niski. Dzieje się tak dwukrotnie podczas jednego obrotu. Sygnał ten trafia do wejść licznikowych mikroprocesora i odpowiednio zmienia ich stan. Program mikrokontrolera pilnuje, aby dla jazdy wprost stany liczników przyporządkowanych obu silnikom były jednakowe. Dodatkowo, w programie zawarto procedurę, która pozwala miękko wyhamowywać silniki podczas zatrzymania. Mikrokontroler steruje silnikami prądu stałego poprzez moduł zasilacza ze sterownikami.

## Zasada działania robota

W pamięci mikroprocesora zapisano dwa podprogramy w różny sposób sterujące silnikami. Pierwszy z nich realizuje funkcję zdalnego sterowania jazdą. Operator ma wówczas pełną dowolność ruchu platformą mobilną robota. Wciskając odpowiednie klawisze na klawia-

turze komputera sterującego, powoduje ciągle 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 przeszko-  
dę; gdy którykolwiek zadziała, zdalne sterowanie zostaje zawieszona, robot zatrzymany, po czym cofnięty o 50 mm, a po 1 s zostanie przywrócone zdalne sterowanie. W tym podprogramie komunikacja radiowa jest jednostronna i komputer nie odbiera żadnych danych z platformy mobilnej.

Drugi podprogram jest przeznaczony do wykonywania rozkazów o ściśle określonych parametrach takich jak: obrót o dany kąt lub przemieszczenie o zadaną drogę. Jest przewidziany głównie do autonomicznego sterowania robotem. Mikrokontroler dostaje rozkazy rodzaju: jedź do przodu 150 mm, obróć się w lewo o  $45^{\circ}$ . W postaci protokołu wygląda to odpowiednio:

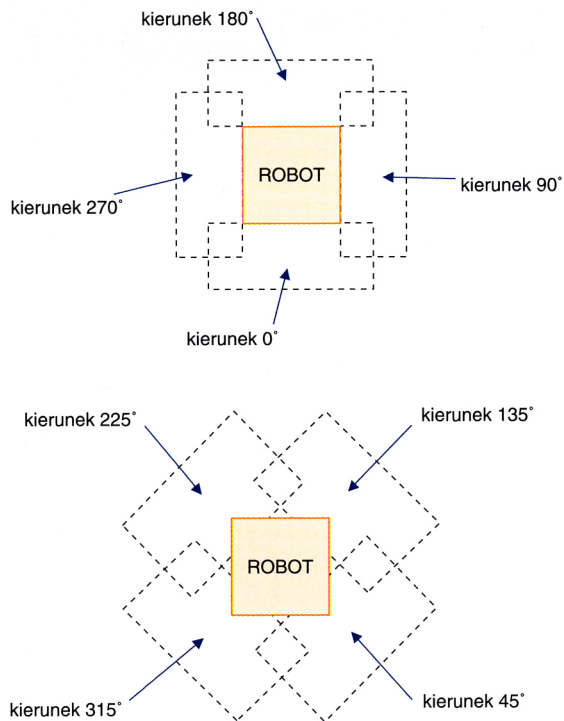
- 55H. 55H. 50H. AFH. 00H. FFH. 67H. 89H oraz
- 55H. 55H. 60H. 9FH. 00H. FFH. 3EH. C1H.

W protokole droga, jaką mają przejechać oba koła napędowe jest podana w postaci liczby impulsów podawanych do liczników mikroprocesora. Można przeliczyć, że jednej jednostce drogi w takiej postaci odpowiada 1,4563 mm lub  $0,7258^{\circ}$ . 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 robot 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:

- rozkaz wykonania badania terenu wysyła się przez łącze RS-232 i dalej przez radiomodem do sonaru;
- 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  $n \times 3^{\circ}36'$  (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 16-bitowych;
- wektor ten jest następnie przeliczany na odległości w centymetrach i przedstawiany w postaci graficznej na ekranie komputera, gdzie jednemu centymetrowi odpowiada jeden piksel;





Rys. 3. Sposób określenia możliwości ruchu w danym kierunku

- tak powstaje mapa lokalna i na jej podstawie sprawdza się, w który z ośmiu możliwych kierunków można przemieścić platformę mobilną robota (rys. 3);
- następnie analizuje się algorytm eksploracji terenu i na tej podstawie wyznacza się sterowanie, czyli następny ruch platformy mobilnej robota oraz 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.

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 np.: ze ścianą laboratorium. Następnie ścieżka algorytmu trafia w pętlę, która pozwala robotowi na eksplorację pomieszczenia, w którym się znajduje.

Eksploracja 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 ok. 50 cm. Narożniki przeszkód powinny być zaokrąglone, aby wiązka ultradźwięków po odbiciu mogła powrócić do sonaru w postaci echa.

## Badania

Przedmiotem badań było przede wszystkim postrzeganie 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 (pudła kartonowe) o różnych kształtach, rodzajach powierzchni, kątach odbicia względem głowicy sonaru w odległościach 50, 100, 150 i 200 cm od środka bazy robota mobilnego. Zaobserwowano, zgodnie z przypuszczeniami, że przeszkody o dużych powierzchniach, ustawione prostopadle do wiązki ultradźwięków są odbijane najlepiej, dzięki czemu sonar wykrywał je z odległości nawet 2 m. Natomiast, gdy kąt padania był mniejszy niż  $45^\circ$ , przeszkody nie były zauważane. Rodzaj powierzchni również miał znaczenie – im bardziej chropowata była powierzchnia tym lepiej były wykrywalne przeszkody ustawione pod kątem większym niż  $45^\circ$ , ale za to były gorzej zauważane ze wzrostem odległości.

Eksperymenty wykazały nieprzydatność sonaru do detekcji przeszkód mających wypukłości 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 widziany 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 umieszczenie głowicy sonaru. Można było także wykorzystać ściany laboratorium, w którym robot miał się poruszać. Jednak w celu zróżnicowania terenu eksploracji robota zdecydowano się na kartony o różnych kształtach.

Najważniejszymi i najciekawszymi były jednak eksperymenty z nawigacją autonomiczną robota mobilnego. Ustawiano różne konfiguracje przeszkód i umieszczano wśród nich robota. Następnie obserwowano jego zachowanie w tak zadanym środowisku. Okazało się, że 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 robot się porusza są przedstawiane na ekranie monitora i odpowiadają scenie rzeczywistej robota z dokładnością do 5 cm (rys. 4 i 5). Osiągnięcie większej dokładności będzie możliwe po zastosowaniu bardziej precyzyjnych urządzeń pomiarowych na osiach kół napędowych. Zwykle w takich rozwiązaniach są stosowane czujniki Halla, lecz



Rys. 4. Widok rzeczywistego terenu poddanego eksploracji



Rys. 5. Widok ekranu komputera po eksploracji terenu

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.

## 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 wlutowania wyprowadzeń urządzeń zewnętrznych współpracujących z dodatkowymi mikroprocesorami. Zmontowano także wszystkie niezbędne części do uruchomienia dodatkowych mikrokontrolerów nie licząc rezonatora kwarcowego, który należy dobrać odpowiednio do potrzeb przyszłego układu.

## Wnioski końcowe

Przeprowadzone rozległe badania laboratoryjne opracowanego robota mobilnego w pełni potwierdziły przyjęte założenia [3]. Urządzenie, mimo iż jest stosunkowo proste i tanie, z powodzeniem spełnia swoje zadania w laboratorium dydaktycznym, umożliwiając przybliżenie studentom frapującej tematyki robotów mobilnych. Przewidziana możliwość rozbudowy uzasadnia kontynuację tej tematyki.

## Bibliografia

1. 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.
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, s. 2524–2529.
3. Grono A. J., Szypliński M.: Problemy nawigacji w robotach mobilnych. III konferencja Awioniki WARMIA 2001. Waplewo k. Olsztyna, 12–15 września 2001. Mat. konferencyjne ZNPR, z. 56, tom 2, s. 487–494. ■

## Streszczenia artykułów naukowych

**Autonomiczny robot mobilny**, Andrzej J. Grono – s. 22

Opisano konstrukcję, moduł komunikacyjny, sonar cyfrowy oraz płytę główną autonomicznego robota mobilnego do zadań laboratoryjnych. Omówiono przeprowadzone badania i możliwości rozwoju robota.

**Autonomous mobile robot**, Andrzej J. Grono – p. 22

Mechanical construction, communication module, ultrasonic transducer and the main plate of an autonomous robot for laboratory use are described. Tests that were carried out are described and prospects of development of this project are formulated.