

Waldemar Mucha

Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej
Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki
Śląskiej
ul. Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice
email: waldemar.mucha@polsl.pl

UKŁAD STEROWANIA TRÓJKOŁOWEGO ROBOTA MOBILNEGO

Streszczenie – Niniejszy artykuł poświęcony został robotyce mobilnej i dotyczy układu sterowania trójkołowym robotem mobilnym przeznaczonym do celów eksploracji i inspekcji. Układ sterowania został wykonany dla algorytmu uwzględniającego dwa tryby pracy robota: pracę w trybie manualnym, w którym robot jest zdalnie sterowany przez operatora oraz pracę w trybie autonomicznym, w którym robot porusza się samodzielnie mając za zadanie dotarcie do celu omijając przeszkody.

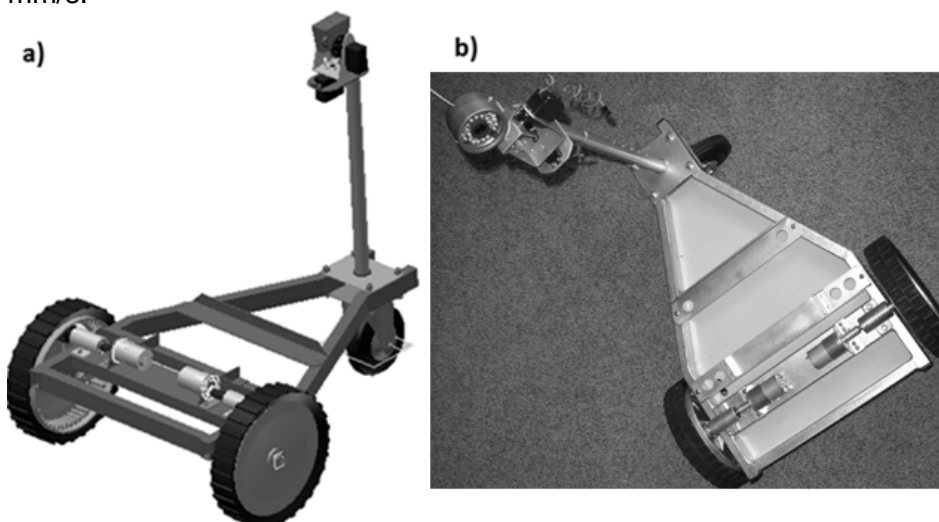
Słowa kluczowe: robotyka, robot mobilny, układ sterowania, algorytm, eksploracja

1 Wstęp

Opracowany został układ i algorytm sterowania dla autorskiego projektu kołowego robota mobilnego eksploracyjnego, na podstawie którego zbudowany został prototyp (model oraz prototyp konstrukcji mechanicznej tego robota przedstawia rys. 1). Zawieszenie trójkołowe, w które wyposażony jest robot, gwarantuje prostotę konstrukcji, małą masę, małe opory ruchu, łatwość wykonywania manewrów oraz ciągły kontakt wszystkich kół z podłożem. Ze względu na te zalety bardzo dobrze nadaje się ono do eksploracji pomieszczeń oraz w terenach zewnętrznych z wyłączeniem trudnych warunków jak błoto czy śnieg. Zawieszenie składa się z dwóch kół na osi przedniej, napędzanych oddzielnie, oraz koła tylnego wahliwego wleczonego. Sterowanie ruchem robota odbywa się poprzez różnicowanie prędkości napędów obu kół [1].

Cała konstrukcja mechaniczna zbudowana jest w oparciu o stalową ramę. Za napęd odpowiadają 2 silniki prądu stałego z wbudowanymi przekładniami mechanicznymi *Pololu 100:1 Metal Gearmotor 37Dx57L mm* o prędkości obrotowej 100 obr/min oraz momencie napędowym 16 kg•cm dla zasilania napięciem 12 V. Układ przeniesienia napędu z silnika na koło (dla każdego koła oddzielny) wyposażony jest w

przekładnię zębatą jednostopniową, która powoduje dodatkowe przełożenie, w wyniku którego maksymalna prędkość robota wynosi 184 mm/s.



Rys. 1. Konstrukcja mechaniczna robota mobilnego: a) model CAD, b) prototyp

Dodatkowo robot wyposażony jest w kamerę, przesyłającą bezprzewodowo obraz operatorowi, którą można zdalnie sterować w dwóch osiach, dzięki zastosowaniu dwóch serwonapędów *TowerPro MG995*.

Konstrukcja robota przewiduje również możliwość doposażenia jej w ramię chwytne celem wykonywania prostych prac w miejscach eksploracji.

2 Zadanie odwrotne kinematyki

Dla rozpatrywanego układu kół robota rozwiązać należy zadanie odwrotne kinematyki, w którym zakłada się ruch określonego punktu robota i wyznacza jego parametry, czyli dla przedstawionego robota prędkości obrotowe kół [2].

Do analizy przyjęto model jak na rys. 2. W przedstawionym rozwiązaniu zadania odwrotnego kinematyki rozpatrywany będzie punkt Y (miejsce montażu ramienia chwytneho) jako punkt charakterystyczny, który ma poruszać się po zadanym torze. Kąty obrotu kół napędowych (o promieniach r) o środkach geometrycznych A i B oznaczono jako φ_A oraz φ_B , a ich prędkości kątowe jako ω_A oraz ω_B . Jeżeli wektory prędkości v_A i v_B obu kół są takie same, to robot porusza się ruchem

postępowym, jeżeli są różne, to robot porusza się ruchem płaskim, a punkt O jest chwilowym środkiem obrotu ramy.

Jeżeli współrzędne punktu Y w układzie xy wynoszą:

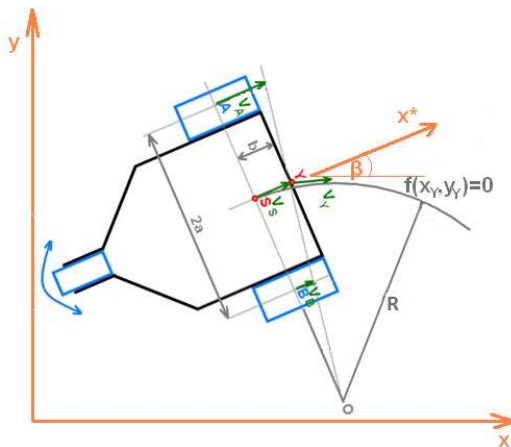
$$x_Y = x_S + b \cdot \cos \beta, \quad (1)$$

$$y_Y = y_S + b \cdot \sin \beta, \quad (2)$$

to prędkości punktu Y wynoszą:

$$v_{Yx} = v_{Sx} - b \cdot \dot{\beta} \cdot \sin \beta, \quad (3)$$

$$v_{Yy} = v_{Sy} + b \cdot \dot{\beta} \cdot \cos \beta. \quad (4)$$



Oznaczenia:

- O - chwilowy środek obrotu robota
- S - punkt środkowy pomiędzy kołami, w ich osi
- A, B - środki geometryczne kół napędzanych
- a, b, R - odległości jak na rysunku
- β - kąt pomiędzy osiami x i x*
- v_A - wektor prędkości punktu A
- v_B - wektor prędkości punktu B
- v_S - wektor prędkości punktu S
- v_Y - wektor prędkości punktu Y
- $f(x_Y, y_Y)=0$ - równanie toru ruchu punktu Y

Rys. 2. Model kinematyczny robota

Jeżeli punkt S porusza się z prędkością v_S to równania (3) oraz (4) można zapisać jako:

$$v_{Yx} = v_S \cdot \cos \beta - b \cdot \dot{\beta} \cdot \sin \beta, \quad (5)$$

$$v_{Yy} = v_S \cdot \sin \beta + b \cdot \dot{\beta} \cdot \cos \beta. \quad (6)$$

Dowolny zadany tor punktu Y można zapisać w postaci:

$$f(x_Y, y_Y) = 0. \quad (7)$$

Jego różniczka względem czasu ma więc postać:

$$\dot{f}(x_Y, y_Y) = 0. \quad (8)$$

Rozwiązanie układu trzech równań (5), (6) oraz (8) pozwala wyznaczyć $\beta(t)$, $x_Y(t)$ oraz $y_Y(t)$. Aby w dalszej kolejności obliczyć

prędkości obrotowe kół w funkcji czasu należy skorzystać z mechanicznej zależności, że wektor prędkości punktu A (v_A) jest sumą wektora prędkości punktu S (v_S) oraz wektora prędkości punktu A względem punktu S (v_{AS}). Rzutując to na oś x^* otrzymuje się równanie prędkości:

$$v_A = v_S + v_{AS} \cdot \quad (9)$$

Wykorzystując mechaniczne zależności, równanie (9) można przekształcić na:

$$\omega_A = \frac{\omega_S}{r} + \dot{\beta} \cdot \frac{a}{r} \quad (10)$$

Analogicznie dla koła B wyprowadzić można wzór:

$$\omega_B = \frac{\omega_S}{r} - \dot{\beta} \cdot \frac{a}{r} \quad (11)$$

Przejście pomiędzy różnymi rodzajami ruchu, np. z ruchu po prostej na ruch po okręgu, można zrealizować poprzez stosowanie tzw. funkcji przejściowych, zapewniających gładkie przejście przy łagodnych zmianach prędkości i przyspieszeń.

Powyższego wyprowadzenia dokonano w oparciu o [2], jednakże autor postanowił je uprościć przy następujących założeniach:

- rozpatrywany będzie tor ruchu dla punktu S, a nie Y (założenie możliwe, jeżeli robot niewyposażony jest w ramię chwytne w punkcie Y),
- dowolny zadany tor można przedstawić za pomocą linii prostych oraz łuków o zadanych stałych promieniach,
- przejścia pomiędzy ruchami po prostych i ruchami po łukach, jeśli tory obu ruchów nie będą do siebie styczne, odbywać się będą poprzez wyhamowanie robota oraz obrót wokół punktu S,
- ze względu na niewielkie prędkości jakie robot jest w stanie rozwinąć, za wyjątkiem rozpędzania i hamowania, ruch robota będzie zawsze z maksymalną prędkością.

Dla ruchu po linii prostej zakłada się maksymalną prędkość dla obu kół. Dla obrotów wokół punktu S zakłada się maksymalną prędkość dla obu kół, jednakże w przeciwnych kierunkach. Dla ruchu po łuku zakłada się maksymalną prędkość obrotową jednego koła a prędkość drugiego koła jest obliczana z zależności geometrycznych, np. dla jazdy po łuku w prawo zakłada się maksymalną prędkość dla koła A a dla koła B:

$$\omega_B(t) = \omega_A(t) - \frac{a - R}{a + R} \cdot \quad (12)$$

Dla rozruchu i hamowania zakłada się odpowiednio liniowe narastanie prędkości obrotowej do prędkości maksymalnej oraz liniowe wytracanie prędkości do zera.

Zaproponowane uproszczone rozwiązanie zadania kinematyki pozwala na znaczne uproszczenie sterowania robotem, jednakże czas jazdy może się zwiększyć jeżeli w zadanym torze występować będą załamania (wtedy robot musi się zatrzymać, obrócić w miejscu i znowu ruszyć).

3 Układ sterowania

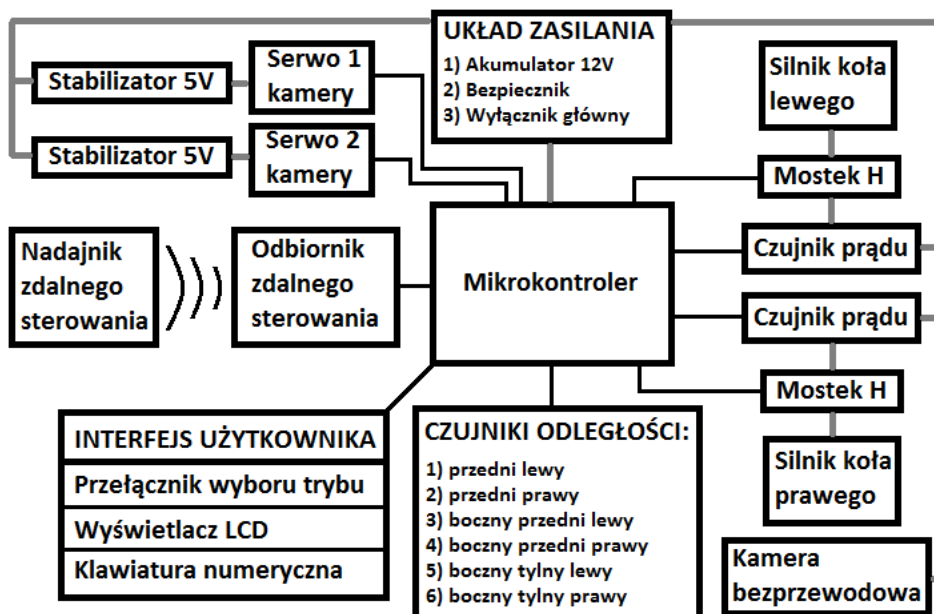
Rys. 3. przedstawia ideowy schemat blokowy układu sterowania robota mobilnego, na którym połączenia sygnałowe oznaczono cienkimi czarnymi liniami a połączenia zasilające grubymi szarymi liniami. Bloki pobierające niski prąd, takie jak odbiornik zdalnego sterowania, interfejs użytkownika oraz czujniki odległości, zasilane są z linii zasilających mikrokontrolera i połączenia te zostały na schemacie pominięte.

Algorytm sterowania robotem mobilnym składa się z dwóch niezależnych algorytmów: dla trybu manualnego oraz autonomicznego. Do przełączania pomiędzy tymi trybami służy specjalny przełącznik umieszczony na robocie, którego pozycja w chwili włączania robota determinuje, który z algorytmów ma zostać przez układ sterowania wczytany. W trybie manualnym robot będzie zdalnie sterowany przez operatora, natomiast w trybie autonomicznym będzie on miał za zadanie sam dotrzeć do wyznaczonego celu omijając przeszkody.

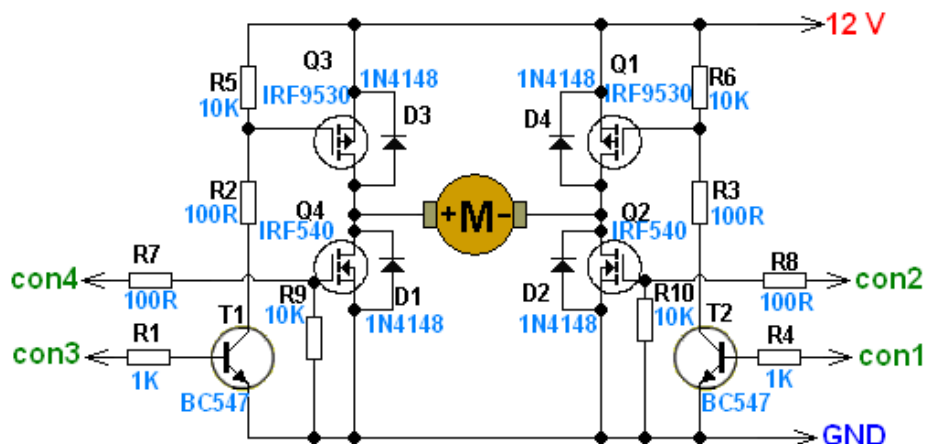
Sterowanie robotem mobilnym w trybie manualnym rozłożyć można na zdalne sterowanie dwóch kół napędowych (dwoma silnikami prądu stałego), oraz zdalne sterowanie położeniem kamery w dwóch osiach (dwoma serwonapędami). Sposób zdalnego sterowania powinien przewidywać również możliwość obsługi ramienia chwytanego, w które robot może zostać wyposażony, czyli do czterech dodatkowych serwonapędów oraz napędu chwytaka. Do zrealizowania tych zadań wybrano protokół transmisji bezprzewodowej ZigBee, oparty na standardzie IEEE 802.15.4, ze względu na swoje zalety – przede wszystkim mały pobór energii oraz duży zasięg (do 100 m). Przepustowość 250 kb/s jest w zupełności wystarczająca do wypisanych wyżej zadań.

Zadaniem nadajnika jest przesyłanie zakodowanych informacji dotyczących ustawiania prędkości obrotowych kół napędowych oraz położenia serwonapędów do odbiornika zintegrowanego z układem sterowania robota. Układ sterowania na podstawie odebranych informacji zmienia wypełnienie (PWM) sygnałów sterujących silnikami napędowymi oraz przesyła zadane położenia do serwonapędów. Jeśli robot ma stać w miejscu i żadna operacja nie ma być wykonywana,

nadajnik powinien również takie informacje przesyłać. Sterowanie kołami napędowymi opiera się na ustawieniu pewnej prędkości i kierunku obrotów silników zgodnie z informacją otrzymaną z nadajnika i utrzymanie tych parametrów aż do czasu otrzymania informacji o zmianie.



Rys. 3. Schemat blokowy układu sterowania robota mobilnego



Rys. 4. Schemat elektryczny mostka H do sterowania pojedynczym silnikiem napędowym

Nadajnik powinien przysyłać informacje co około 100 ms. Jeżeli w ciągu 1 sekundy odbiornik nie otrzyma żadnej informacji od nadajnika – silniki napędowe powinny zostać wyłączone. Jest to zabezpieczenie przed kolizją w przypadku zerwania komunikacji np. z powodu awarii nadajnika bądź utraty zasięgu.

W prototypie do sterowania pojedynczym silnikiem prądu stałego zbudowano układ elektroniczny przedstawiony na rys. 4. Tranzystory MOSFET (2 z kanałem wzbogaconym typu P i 2 z kanałem wzbogaconym typu N) oznaczone jako Q1 – Q4 tworzą mostek typu H, pozwalający na sterowanie silnikiem w dwóch kierunkach, zgodnie z tabelą 1. Celem sterowania prędkością obrotową do wejść sterujących *con2* i *con4* należy podać sygnały PWM.

Tabela. 1. Sterowanie silnikiem napędowym przy użyciu mostka typu H

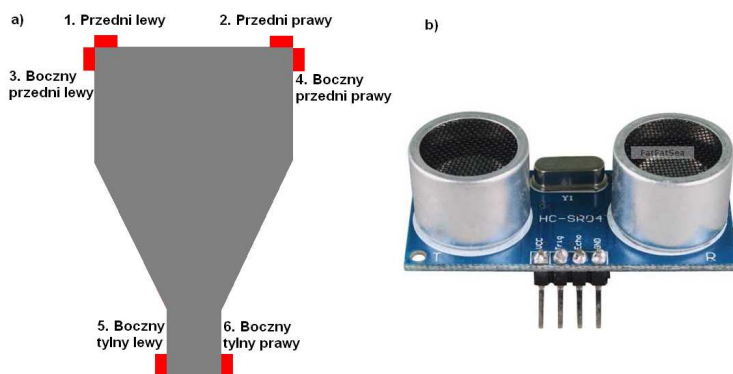
	Obroty prawe	Obroty lewe	Hamowanie elektryczne		Stany zabronione	
<i>con1</i>	H	L	H	L	X	H
<i>con2</i>	L	H	L	H	X	H
<i>con3</i>	L	H	H	L	H	X
<i>con4</i>	H	L	L	H	H	X
<u>Oznaczenia:</u> H – stan wysoki, L – stan niski, X – stan dowolny						

Układ sterowania wyposażono w dwa zabezpieczenia elektryczne - przed swobodnym stoczeniem się robota oraz przed uszkodzeniem silnika wskutek zablokowanego koła. Jak widać w tabeli 1, przewidziane jest tzw. hamowanie elektryczne koła. Gdy robot ma za zadanie się zatrzymać – oba wyprowadzenia elektryczne silnika poprzez mostek typu H łączone są z jednym potencjałem („+” lub „-” akumulatora), co przeciwdziała pracy prądnicowej silnika i powoduje dodatkowy opór przed obrotem wału. To zabezpieczenie elektryczne wspólnie z oporem przekładni zębatej skutecznie zapobiega przed swobodnym stoczeniem się robota z wzniesienia. Celem zapobiegnięcia uszkodzeniu się silnika wskutek zablokowanego koła (przepaleniu się cewek) podczas pracy robota monitorowany jest prąd pobierany przez silniki. Dla normalnej pracy wynosi on około 200 mA, natomiast w stanie zablokowanego wału około 2 A. Zasilanie obu silników powinno zostać odłączone, jeżeli prąd pobierany przez co najmniej jeden z silników przekroczy wartość 1 A i nie spadnie poniżej tej wartości przez 2 sekundy. Wprowadzenie tego warunku czasowego było konieczne ze względu na chwilowe skoki wartości prądu, które mają miejsce podczas gwałtownej zmiany prędkości w układzie sterowania bądź krótkotrwałego zablokowania się koła.

Serwonapęd jest układem automatycznej regulacji prędkości lub położenia. Typowy serwomechanizm składa się z silnika prądu stałego,

przekładni mechanicznej, enkodera i elektronicznego układu sterowania. Zwykle do jego obsługi wystarczą 3 przewody: 2 zasilające i sygnałowy. Sterowanie serwonapędem polega więc na podaniu mu wartości zadanej położenia czyli sygnału sterującego będącego impulsem elektrycznym o dokładnym czasie trwania [3], [4]. Wykorzystane serwonapędy do sterowania położeniem kamery posiadają ograniczony kąt obrotu do 180 stopni.

Do autonomicznego poruszania się robota używa się algorytmu opartego na metodzie lokalnej znajdowania ścieżki, czyli podejmowaniu decyzji wyłącznie na podstawie informacji o najbliższym otoczeniu robota. Do zbierania tych informacji o wykorzystano 6 czujników odległości, które mają za zadanie wykrywać przeszkody. Zdecydowano się na użycie czujników ultradźwiękowych HC-SR04, ze względu na mały rozmiar, niską cenę oraz zakres pomiaru od 2 cm do 4 m. Ich zasada działania polega na wysyłaniu dźwięku o wysokiej częstotliwości (około 40 kHz) oraz nasłuchiwanie echa tego dźwięku (sygnału odbitego od przeszkody). Znając prędkość dźwięku i czas pomiędzy nadaniem sygnału a odebraniem jego echa można w łatwy sposób obliczyć odległość czujnika od przeszkody. Wygląd opisywanego czujnika oraz ich rozmieszczenie na robocie przedstawia rys. 5.

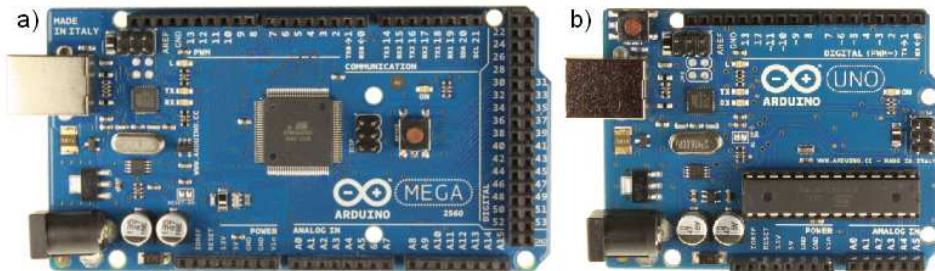


Rys. 5. Wykrywanie przeszkód w trybie autonomicznym: a) rozmieszczenie czujników, b) fotografia czujnika

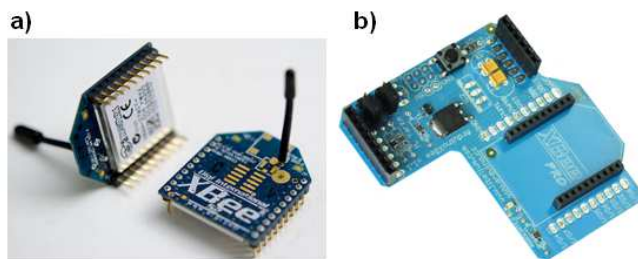
Zadanie wyznaczenia przebytej drogi można zrealizować na trzy sposoby: a) wyliczać z zadanych prędkości kąt napędowych (rozwiązanie najmniej dokładne, jeśli prędkość z jakiegoś powodu będzie się różnić od zadanej), b) wyliczać z prędkości kąt napędowych mierzonych za pomocą enkoderów (rozwiązanie dokładne przy braku poślizgu), c) korzystając z akcelerometrów (po prawidłowym wyeliminowaniu zakłóceń rozwiązanie najbardziej dokładne). W prototypie zastosowano rozwiąza-

nie pierwsze, czyli wyliczenia przebytej drogi w czasie rzeczywistym na podstawie przebiegu sygnałów sterujących silnikami napędowymi. Rozwiązanie to ma tą wadę, iż z miarę przyrostu drogi błąd jest kumulowany.

Układ sterowania robotem mobilnym musi zostać oparty na mikrokontrolerze, który spełnia wszystkie w/w wymagania tj. dostateczną liczbę wejść i wyjść, obsługę PWM, obsługę serwonapędów, możliwość obsługi czujników ultradźwiękowych, wystarczające możliwości obliczeniowe itd. Do sterowania prototypem użyto dwóch platform Arduino (rys. 6.): Mega2560 (do obsługi silników, serwonapędów, pomiaru prądu, komunikacji bezprzewodowej oraz interfejsu użytkownika czyli przełącznika trybu pracy, klawiatury numerycznej i wyświetlacza ciekłokrystalicznego) oraz Uno (do obsługi czujników ultradźwiękowych) [5]. Nastąpiła konieczność zastosowania dwóch platform, ponieważ podczas testów, gdy pierwsza obsługiwała również czujniki ultradźwiękowe jej czas cyklu się wydłużał i spadała dokładność obliczania położenia robota.



Rys. 6. Fotografie zastosowanych platform Arduino: a) Mega2560, b) Uno



Rys. 7. Osprzęt do komunikacji bezprzewodowej: a) para modułów XBEE, b) nakładka na Arduino ArduinoXbee v1.1

W prototypie, do komunikacji bezprzewodowej, wykorzystano XBee. Są to moduły radiowe firmy Digi International, o możliwościach (pod względem zasięgu i przepustowości) dorównujących ZigBee. Protokoły komunikacji ZigBee i XBee na warstwie fizycznej są takie same, różnią

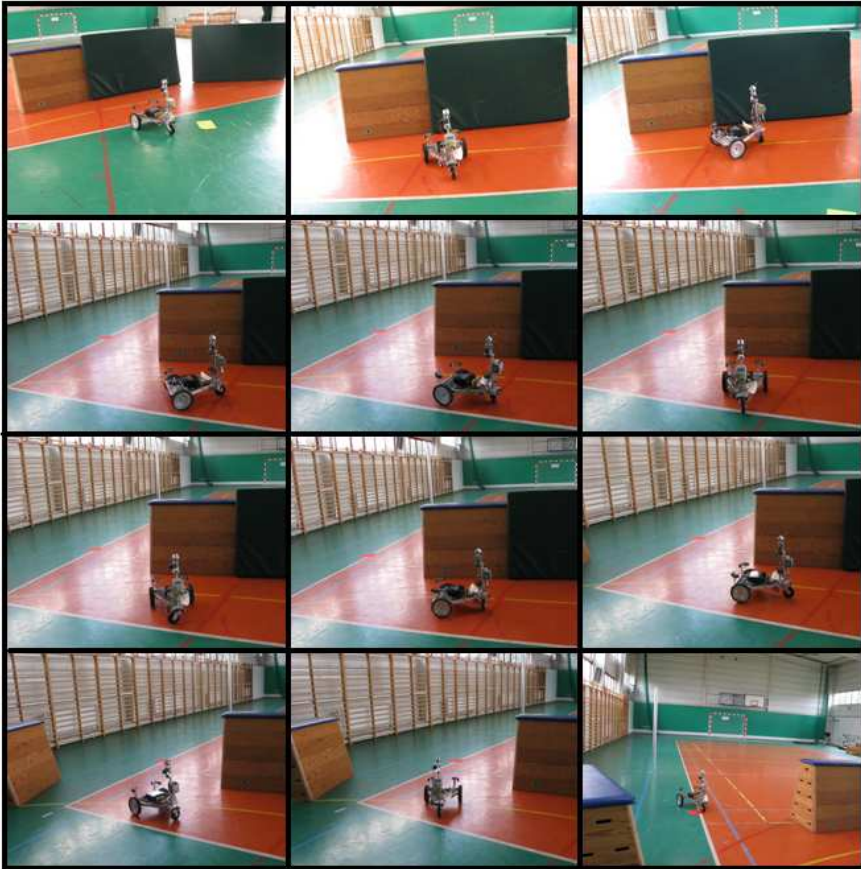
się dopiero na wyższych warstwach. Podłączenie modułu radiowego do Arduino zostało zrealizowane za pomocą specjalnej nakładki ArduinoXbee v1.1 (przedstawionej razem z samymi modułami XBee na rys. 7.). Zdalnie sterować robota można za pomocą dowolnego urządzenia współpracującego z drugim modułem radiowym, np. mikrokontrolera lub komputer PC.

Fotografię gotowego prototypu przedstawia rysunek 8.



Rys. 8. Fotografia prototypu robota mobilnego

Prototyp robota zintegrowany z układem sterowania został przetestowany. Układ sterowania działa prawidłowo zarówno dla trybu pracy manualnego jak i autonomicznego. Zdalne sterowanie oraz zabezpieczenie przed zablokowaniem koła działają bez zarzutów. Robot nie stacza się stojąc na wzniesieniu. W trybie autonomicznym duże przeszkody są wykrywane za pomocą czujników ultradźwiękowych i skutecznie omijane, jak przedstawia rys. 9. Skuteczne wykrywanie mniejszych przeszkód byłoby możliwe przy zwiększeniu liczby czujników. Obliczanie swojej pozycji na podstawie przebiegu sygnałów sterujących silnikami kół nie zawsze działa dokładnie, zwłaszcza przy dużych odległościach. Dokładność tą można by zwiększyć stosując wyposażając prototyp w akcelerometry bądź enkodery.



Rys. 9. Kolejne położenia robota w teście omijania przeszkód

4 Podsumowanie

W opisanym projekcie opracowany został układ sterowania robotem mobilnym, który pozwala na jego zdalne sterowanie przez operatora (na podstawie obrazu otrzymywanego z kamery bezprzewodowej) jak również na samodzielne poruszanie się robota. Celem autora było opracowanie możliwie prostego i taniego układu sterowania, który jest w stanie spełnić wszystkie te wymagania. Rozwiązane zostało odwrotne zadanie kinematyki w sposób uproszczony, pozwalający na znaczne uproszczenie algorytmu oraz układu sterowania kosztem ewentualnego względnie niewielkiego zwiększenia czasu jazdy. W projekcie zastosowane zostały bardzo proste i skuteczne zabezpieczenia elektryczne przed uszkodzeniem silnika oraz swobodnym stoczeniem robota. Pokazana została możliwość zastosowania zestawu czujników ultradźwiękowych do wykrywania przeszkód w otoczeniu robota.

Zaprezentowano możliwość wykorzystania taniej i łatwej (w opinii autora) w programowaniu platformy Arduino do sterowania prototypem.

5 Literatura

- [1] Sandin P.E., *Robot Mechanisms and Mechanical Devices Illustrated*, The McGraw-Hill Companies, 2003
- [2] Giergiel M.J., Hendzel Z., Żylski W., *Modelowanie i sterowanie mobilnych robotów kołowych*, PWN, Warszawa, 2013
- [3] Kaczorek T., Dzieliński A., Dąbrowski W., Łopatka R., *Podstawy teorii sterowania*, WNT, Warszawa, 2009
- [4] Sawicz D., *Hobby Servo Fundamentals*, dostępny pod adresem <http://www.princeton.edu/~mae412/TEXT/NTRAK2002/292-302.pdf> z dn. 12.12.2013
- [5] Margolis M., *Arduino Cookbook*, O'REILLY, Sebastopol, 2011

CONTROL SYSTEM OF TRICYCLE MOBILE ROBOT

Summary: This article is devoted to mobile robotics and relates to a control system of a three-wheeled mobile robot for exploration and inspection purposes. The control system has been made for an algorithm that includes two operation modes: manual mode, in which the robot is remotely controlled by an operator and autonomous mode, where the robot moves independently and has to reach a target avoiding obstacles on the way.

Keywords: robotics, mobile robot, control system, algorithm, exploration