

Dydaktyczny robot czworonożny o krocząco-kołowym układzie lokomocyjnym

Marek Matuszak, Piotr Skrzypczyński

Instytut Automatyki i Inżynierii Informatycznej, Politechnika Poznańska

Streszczenie: Artykuł dotyczy projektu oraz wykonania czworonożnego robota kroczącego wyposażonego w hybrydowy, nożno-kołowy mechanizm lokomocji. Mechanizm ten czyni robota interesującym obiektem badawczym i dydaktycznym z punktu widzenia sterowania i planowania ruchu. Zaprezentowano budowę części mechanicznej i systemu sterowania robota oraz jego oprogramowanie. Przedstawiono podstawowe tryby ruchu, obejmujące zarówno ruch kroczący (dyskretny), jak i ruch kołowy (ciągły). Możliwości ruchowe robota zilustrowano także krótkimi filmami, udostępnionymi w Internecie.

Słowa kluczowe: robot kroczący, robot czworonożny, stabilność, układ sterowania

1. Wstęp

Roboty mobilne należą do najszybciej rozwijających się działów robotyki. Jest to obszar bogaty w problemy badawcze, a także dający perspektywy nowych zastosowań robotów. Główne obszary perspektywicznych zastosowań robotów mobilnych to usługi oraz sfera ochrony i bezpieczeństwa. Roboty mobilne różnią się budową układu lokomocyjnego w zależności od środowiska, w którym działają, i stawianych przed nimi zadań. Ciekawe perspektywy rysują się wobec zastosowań robotów kroczących. Charakteryzują się one dużymi możliwościami pokonywania trudnego terenu oraz przeszkód zbudowanych przez człowieka (np. schody), co czyni je atrakcyjnymi platformami w zadaniach patrolowych i poszukiwawczych. Możliwości ruchowe robotów kroczących pozwoliły im też znaleźć zupełnie inne zastosowania, np. w rozrywce, czego przykładem są roboty Titan [3].

Rozwój zastosowań kroczących robotów mobilnych oraz fakt prowadzenia badań w tym zakresie w licznych ośrodkach naukowych stwarza zapotrzebowanie na odpowiednie platformy dydaktyczne i badawczo-dydaktyczne, które pozwoliły by studentom oraz doktorantom na zapoznanie się ze specyfiką problemów sterowania i nawigacji robotów kroczących. Niestety, w przeciwieństwie do szerokiej oferty dydaktyczno-badawczych robotów kołowych, liczba komercyjnych robotów kroczących dostępnych na rynku jest niewielka. Sytuacja ta wynika głównie z dużej liczby stopni swobody (a więc i napędów) oraz ze znacznie bardziej skomplikowanej struktury mechanicznej robota kroczącego w stosunku do porównywalnego robota kołowego. Podwyższa to koszt wykonania robota i czyni go mniej atrakcyjnym na rynku. W rezultacie oferowane ro-

boty kroczące są drogie [5] lub bardzo uproszczone, o charakterze zabawek [4].

Powszechna obecnie dostępność takich komponentów jak serwomechanizmy (używane w modelarstwie), wydajne sterowniki mikroprocesorowe i różne rodzaje czujników czyni sensowną próbę samodzielnej budowy robota kroczącego od podstaw. Przykładem może być niewielki sześcionożny robot Ragno powstały w Instytucie Automatyki i Inżynierii Informatycznej (IAiI) Politechniki Poznańskiej [15]. Warto jednak zwrócić uwagę, że w ostatnich latach na świecie powstały zaawansowane roboty czworonożne, zarówno badawcze [11], jak i prototypy do konkretnych zastosowań, np. wojskowych [13]. Konfiguracja czworonożna wydaje się najbardziej obiecująca w praktycznych zastosowaniach. Charakteryzuje się ona najmniejszą liczbą nóg zapewniającą możliwość chodu statycznie stabilnego, a co za tym idzie mniejszą niż w robotach wielonożnych liczbą aktywnych stopni swobody (napędów) przy zachowaniu dużych możliwości pokonywania terenu. Ponadto w przypadku robotów o dużej liczbie nóg wybór optymalnego chodu do konkretnego zadania jest problemem trudnym, natomiast robot czworonożny ma jedynie sześć chodów statycznie stabilnych [10].

Biorąc pod uwagę powyższe tendencje w rozwoju robotów kroczących oraz doświadczenia zebrane w IAiI podczas budowy i eksploatacji poprzednich konstrukcji, postanowiono zaprojektować i zbudować niewielkiego robota czworonożnego, którego przeznaczeniem jest głównie dydaktyka, lecz który może być też przydatny do badania wybranych zagadnień sterowania robotów. Jednocześnie założono minimalizację kosztów robota i wykonanie go metodami warsztatowymi, co umożliwiło realizację projektu w ramach prac studentów kierunku Automatyka i Robotyka.

Wiele robotów czworonożnych odwzorowuje posturę ssaka [11, 13], gdzie korpus jest położony powyżej stawu kolanowego i obciąża nogi w pozycji wyprostowanej, co zapewnia najlepsze parametry energetyczne i dobrą dynamikę ruchu. Konfiguracja taka jest jednak mało stabilna i dość trudna w realizacji technicznej. Dlatego wybierając konfigurację projektowanego robota zdecydowano się na posturę gada – korpus jest położony na poziomie stawu kolanowego zgiętego pod kątem prostym. Postura ta charakteryzuje się dobrą stabilnością robota i ułatwia mocowanie nóg do korpusu, a jednocześnie posiada parametry energetyczne lepsze niż w przypadku postury owada, charakterystycznej dla robotów sześcionożnych. Przyjęcie

konfiguracji gada z czterema identycznymi nogami umożliwiło budowę robota całkowicie symetrycznego, dla którego kierunki przód, tył, lewo, prawo są nierozróżnialne i robot może się poruszać w dowolnym z nich w taki sam sposób. Jest to koncepcja zbliżona do zastosowanej w dużym robocie czworonożnym SILO4 [6].

W przypadku robota czworonożnego bardzo istotnymi elementami konstrukcji są stopy, gdyż robot taki, o ile nie porusza się chodem statycznie stabilnym (ang. *quadruped crawl*), podnosząc tylko jedną nogę w każdym kroku, znajduje się w stanie równowagi dynamicznie stabilnej, a stopy pełnią rolę stabilizującą. Ponieważ jednak stopę z dodatkowymi stopniami swobody (aktywnymi lub pasywnymi) uznano za zbyt skomplikowaną dla projektowanego robota, zdecydowano się na niekonwencjonalne rozwiązanie w postaci zastąpienia stopy niewielkim, napędzanym kołem. Nie jest to koncepcja całkowicie nowa, podobne rozwiązanie z kołami napędzanymi zastosowane zostało w robotach czworonożnych PAW [14] i Hylos [7] oraz dużym robocie sześcionożnym ATHLETE [16]. Natomiast czworonożny robot Roller-Walker [8] posiada nogi zakończone swobodnymi kołami, które mogą zostać obrócone, dzięki czemu maszyna może kroczyć lub jechać odpychając się tak, jak robią to osoby jeżdżące na łyżworolkach. W przypadku projektowanego robota aktywne koła rozwiązują problem stóp, a jednocześnie pozwalają na połączenie niektórych zalet kołowego i nożnego sposobu lokomocji.

W rezultacie uwzględnienia powyższych założeń i ograniczeń opisywana konstrukcja jest czworonożnym robotem kroczącym ze stopami posiadającymi koła napędzane. Robot został wykonany w warunkach warsztatowych, a jego funkcjonalność zademonstrowano, testując chody trójpodporowe, dwupodporowe i tryb jazdy.

2. Konstrukcja mechaniczna robota

2.1. Założenia i technologia wykonania

Z powodu ograniczonych funduszy przeznaczonych na wykonanie robota komponenty jego konstrukcji mechanicznej powinny spełniać specyficzne założenia:

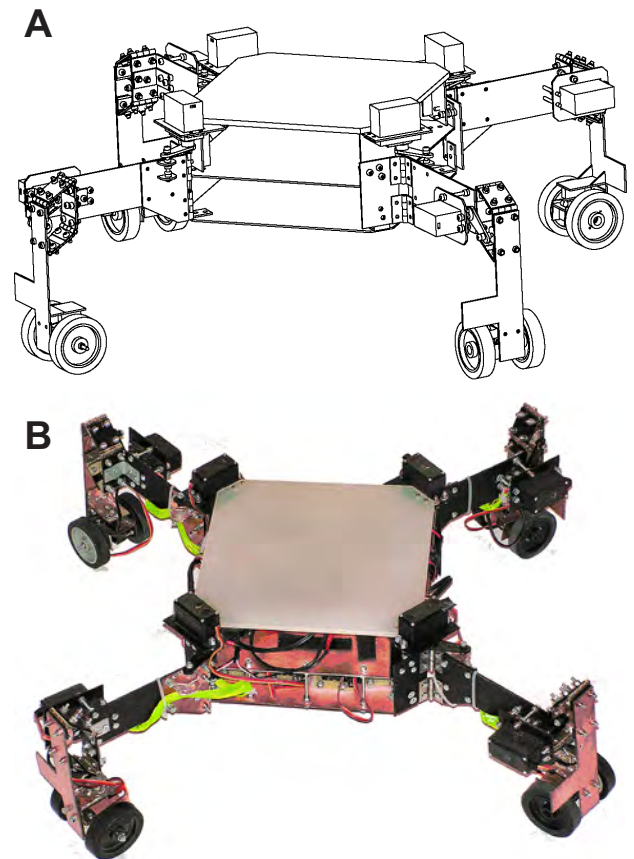
- użycie ogólnodostępnych, niedrogich, łatwych w obróbkę i lekkich materiałów,
- niedrogi i mechanicznie wytrzymały serwomechanizm jako napęd.
- metody obróbki i łączenia elementów ograniczone możliwościami pod ręcznego warsztatu.

Dodatkowo przyjęto następujące założenia dotyczące samej konstrukcji:

- korpus robota nie powinien opierać się bezpośrednio na serwomechanizmach, co zmniejszy zużycie ich przekładni,
- kąt obrotu nóg w pierwszym przegubie powinien być możliwie największy,
- wykorzystanie przerobionych serwomechanizmów jako napędu kół w stopach.

Biorąc pod uwagę powyższe założenia, większość elementów mechanicznych robota wykonano z laminatu szklano-epoksydowego FR-4 pokrytego obustronnie warstwą miedzi. Materiał ten charakteryzuje się dużą wytrzymałością mechaniczną przy niewielkiej grubości i masie

elementów. Równocześnie jest sprężysty, a wielokrotne zginanie nie powoduje pęknięcia. Istotną zaletą pokrytego miedzią laminatu FR-4 jest możliwość łączenia elementów pod dowolnymi kątami za pomocą lutowni.



Rys. 1. Projekt robota (A) i wykonane urządzenie (B)

Fig. 1. CAD drawing of the robot (A), and the actual machine (B)

2.2. Konfiguracja robota

Opracowana konstrukcja jest czworonożnym robotem kroczącym o posturze gada, symetrycznym, ze stopami wyposażonymi w koła napędzane. Projekt konstrukcji robota przedstawiono na rys. 1A. Można zauważyć, że osie obrotu nóg nie znajdują się dokładnie na narożnikach korpusu, co wymuszone jest sposobem ich mocowania.

Korpus robota składa się z trzech płyt o wymiarach 200×200 mm. Dwie z nich są wykonane z laminatu FR-4 i połączone ze sobą w dwunastu miejscach za pomocą dystansów wykonanych z pręta gwintowanego. Trzecia płyta jest wykonana z półprzezroczystego PMMA (tzw. plexi) o grubości 6 mm – jej zadaniem jest usztywnienie całej konstrukcji oraz osłonięcie sterownika od góry (rys. 1B). Rozmiar korpusu pozwala na zamontowanie w środku całej elektroniki sterującej, zasilającej oraz akumulatora.

Robot, po przyjęciu pokazanej na rys. 1 postury, ma wymiary 48×48×24 cm. Masa całej konstrukcji wynosi 2,98 kg, wliczając akumulator ważący 173 g.

2.3. Napędy i zasilanie

Jako napęd wybrano serwomechanizmy modelarskie. Są one produkowane masowo dla potrzeb hobbystów, a więc są łatwo dostępne i niedrogie. Dodatkowymi zaletami są

wbudowany układ sprzężenia zwrotnego służący zadawaniu i utrzymywaniu pozycji oraz łatwość sterowania.

Podstawowymi parametrami decydującymi o wyborze serwomechanizmów były ich cena oraz wytrzymałość mechaniczna. W przypadku napędów odpowiedzialnych za obrót nogi i jej podnoszenie istotny był również moment trzymający, który musiał być wystarczająco duży, aby robot mógł stać podpierając się zaledwie na dwóch nogach (chód dynamiczny). Przy maksymalnej masie robota m_R oraz długości ramienia, na którym robot jest podparty, nie większej niż d_R , minimalny moment trzymający można wyznaczyć jako:

$$M_{\min} = \frac{1}{2} m_R d_R g, \quad (1)$$

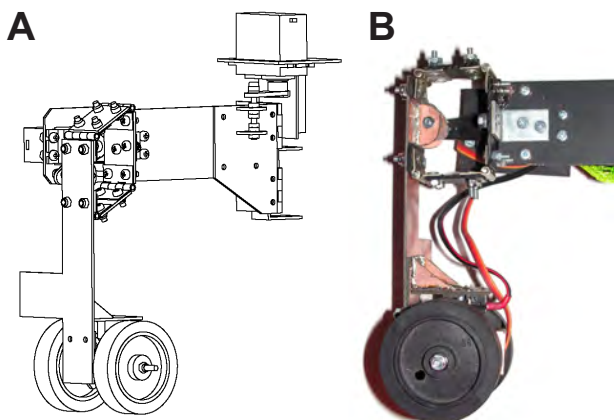
gdzie g jest wartością przyspieszenia ziemskiego (do obliczeń przyjęto $g = 10 \text{ m/s}^2$, $m_R = 3 \text{ kg}$, $d_R = 35 \text{ mm}$). Ponieważ w przypadku serwomechanizmów modelarskich przyjętą jednostką momentu jest [kgcm], ze wzoru (1) wynika, że konieczny jest serwomechanizm o momencie minimum 5,25 kgcm. Spośród dostępnych na rynku serwomechanizmów wybrany został model HX12K firmy hexTronik, charakteryzujący się pożądanymi parametrami, przekładnią wykonaną z metalu oraz przystępną ceną.

Natomiast do napędu kół w stopach zastosowano mniejsze serwomechanizmy Turnigy MG90S, także z metalową przekładnią.

Napędy są zasilane z zasilacza modelarskiego Turnigy 8-15A UBEC for Lipoly o napięciu wejściowym 12 V. Sterownik zasilany jest pojedynczym napięciem 12 V, które może pochodzić z akumulatora zamontowanego na pokładzie robota, lub też z zewnątrz. W celu ochrony akumulatora, w przypadku spadku napięcia poniżej 10 V robot uruchamia alarm i zaprzestaje ruchu.

2.4. Budowa nogi

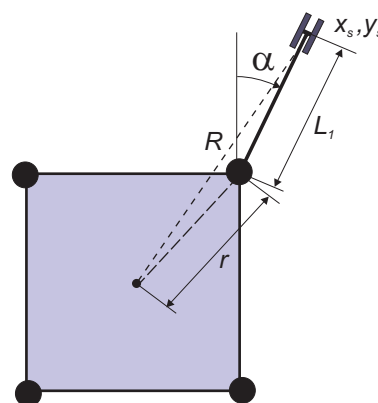
Projekt mechanizmu obrotu i podnoszenia nogi przedstawiono na rys. 2A. Dzięki zastosowaniu przeniesienia napędu przez mechanizm korzystający z zawiasów, wyeliminowano wpływ obciążeń występujących w innych osiach niż związane z wykonywaniem ruchu.



Rys. 2. Konstrukcja nogi robota (A) i wykonany element (B)
Fig. 2. CAD drawing of the leg (A), and the actual element (B)

Schemat kinematyczny nogi można uogólnić jako obrót-przesuw-przesuw. Pierwszy węzeł obrotowy służy do

przeniesienia nogi, lub odpychania się nią podczas ruchu. Oś obrotu jest prostopadła do płaszczyzny korpusu robota. Drugi węzeł jest węzłem przesuwным.



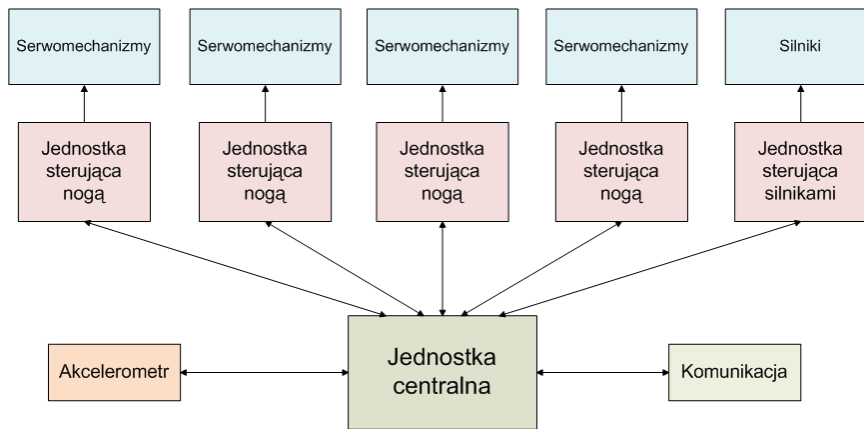
Rys. 3. Konfiguracja nogi – rzut z góry
Fig. 3. Configuration of the leg – top view

Dzięki zastosowanej konstrukcji obrót serwomechanizmu skutkuje przesunięciem liniowym, które jest proporcjonalne do sinusa kąta obrotu serwomechanizmu. Ostatni węzeł – koło napędzane można potraktować jako węzeł przesuwny o nieograniczonym zakresie przesunięcia. Podczas chodu pozwala ono na oddalanie i przybliżanie stopy robota w taki sposób, aby punkt styku z podłożem był zgodny z położeniem wynikającym z obrotu pierwszego węzła obrotowego. Prędkość obrotu koła jest zależna od prędkości obrotu nogi względem korpusu oraz jej położenia kąтового. Położenie stopy $[x_s \ y_s]^T$ względem układu współrzędnych robota zależnie od kąta obrotu nogi α dane jest zależnościami:

$$x_s = \frac{r}{\sqrt{2}} + L_1 \cos(\alpha), \quad y_s = \frac{r}{\sqrt{2}} + L_1 \sin(\alpha), \quad (2)$$

gdzie r jest odległością punktu obrotu nogi (mocowania) od środka korpusu robota, a L_1 długością pierwszego członu nogi (rys. 3). Pochodna odległości $R = \sqrt{x_s^2 + y_s^2}$ punktu podparcia od środka robota względem kąta α określa prędkość zmiany tej odległości podczas obrotu robota i pozwala wyznaczyć odpowiednią prędkość obrotową kół w stopie. Ze względu na ograniczenia zasobów obliczeniowych sterownika zależności te zostały zaimplementowane w postaci przybliżonej, która nie wymaga wyznaczania wartości funkcji trygonometrycznych kąta obrotu [9].

W sterowaniu trzeciego węzła pominięto przesunięcie wynikające z kąta obrotu serwomechanizmu w drugim węźle, gdyż jego wpływ jest niewielki w porównaniu z wpływem kąta obrotu nogi. Opis kinematyki nogi w zmodyfikowanej notacji Denavita-Hartenberga podano w tab. 1, gdzie $L_1 = 150 \text{ mm}$ i $L_2 = 90 \text{ mm}$ są długościami odpowiednio pierwszego i drugiego członu nogi robota. Długość L_2 uwzględnia wymiary stopy i koła w sytuacji, kiedy drugi serwomechanizm znajduje się w środkowej pozycji i przycisk na stopie nie jest wciśnięty, gdyż w takim przypadku następuje skrócenie o maksymalny skok przycisku – do 8 mm. Długość ta odpowiada odległości pomiędzy punktem styku koła z podłożem a płaszczyzną korpusu robota. Zakres ruchu drugiego członu wynosi około 25 mm. Noga robota może zostać uniesiona na wysokość 50 mm bez



Rys. 4. Schemat blokowy układu sterowania robota
Fig. 4. Block scheme of the robot control system

Tab. 1. Zapis kinematyki nogi robota w zmodyfikowanej notacji Denavita-Hartenberga

Tab. 1. Leg kinematics in the modified Denavit-Hartenberg convention

q_i	α_{i-1}	a_{i-1}	θ_i	d_i
q_1	0	0	0	0
q_2	0	L_1	$\frac{\pi}{2}$	$-L_2$
q_3	$\frac{\pi}{2}$	0	0	0

przechylenia się, a odległość korpusu od podłoża może się zmieniać w zakresie 65–105 mm.

Stopa robota posiada platformę z kołem napędzanym serwomechanizmem (rys. 2B). Jest ona zamocowana do nogi poprzez luźny zawias płaski. W przypadku kontaktu z podłożem następuje obrót stopy wokół zawiasu i dochodzi do naciśnięcia mikroprzełącznika, co jest wykrywane przez sterowniki nóg. Ponieważ pojedyncze koło zastosowane początkowo w projekcie stopy odchyłało się zbyt mocno od pionu ze względu na luzy na zawiasie i elastyczność orczyka serwomechanizmu, zdecydowano się zamontować wspólnie z kołem napędzanym drugie koło podporowe, mogące się swobodnie obracać. Zastosowane koła mają średnicę 52 mm, dzięki czemu maksymalna prędkość liniowa bez obciążenia przy zastosowanym napędzie wynosi 0,27 m/s.

3. System sterowania robota

3.1. Założenia

Przystępując do projektowania układu sterowania robota przyjęto podstawowe założenie, że układy elektroniczne mieć będą budowę modułową (rys. 4), aby w razie awarii lub konieczności przyszłych modyfikacji wymieniony mógł zostać tylko konkretny moduł. W związku z tym przyjęto następujące założenia szczegółowe:

- rozdzielenie sterowników nóg od sterownika nadrzędnego,
- każda noga robota sterowana niezależnie od pozostałych,
- oddzielny stabilizator napięcia zasilającego dla każdego modułu,

- komunikacja jednostki centralnej z modułami poprzez interfejs SPI.

3.2. Sterownik nadrzędny

Zadaniem nadrzędnego sterownika robota jest obsługa komunikacji z komputerem PC oraz wyznaczanie wartości zadanych dla serwomechanizmów umieszczonych w węzłach kinematycznych nóg robota w oparciu o jego model kinematyczny i wartości zadane przychodzące z warstwy wyższej. Dodatkowym zadaniem jest obsługa akcelerometru mającego za zadanie pomiar przyspieszeń związanych z przechyleniem się robota podczas chodu statycznie niestabilnego.

Nadrzędny sterownik robota wykorzystuje mikrokontroler LPC2103 [12] z rdzeniem ARM7TDMI. Akcelerometr został umieszczony na oddzielnej płytce oraz przymocowany do jednostki centralnej za pomocą gumowych amortyzatorów, mających za zadanie tłumienie drgań mogących wpływać na poprawność pomiaru. Zastosowano układ MMA7361LC, o czułości 1.5 g. Posiada on wyjścia analogowe, dzięki czemu odczyt może być w prosty sposób wykonywany za pomocą przetwornika A/C sterownika nadrzędnego robota. Pomiar przyspieszenia są filtrowane w sposób programowy w oknie od długości 32 próbek, aby usunąć zakłócenia o dużej częstotliwości. Jako ostateczny pomiar jest wykorzystywana mediana z trzech ostatnio wyznaczonych wartości przyspieszenia. Pojedynczy pomiar jest otrzymywany z częstotliwością 89 Hz. Ponieważ położenie nóg jest aktualizowane co 40 ms, częstotliwość ta jest wystarczająca.

Komputer PC komunikuje się z robotem przez jeden z dwóch portów szeregowych (UART) dostępnych w sterowniku nadrzędnym. Do sterowania robotem wykorzystywane są proste komendy o długości czterech znaków. Transmisja szeregową odbywa się z prędkością 1200 bps, aby sterowanie mogło być realizowane także za pomocą najprostszycy układów transmisji bezprzewodowej, które często mają ograniczenie prędkości transmisji. Sterownik odbiera maksymalnie 25 znaków na sekundę, a tym samym jest możliwy odczyt komunikatu co 160 ms. Przejście pomiędzy trybami ruchu następuje liniowo od aktualnej konfiguracji napędów, do konfiguracji początkowej dla nowego

trybu poruszania się, dzięki czemu możliwy jest np. ruch mieszany – kołowo-kroczący.

Program sterownika został przygotowany w języku C w środowisku Eclipse, oraz skompilowany za pomocą kompilatora ARM GCC zawartego w GNU ARM.

3.3. Sterownik nogi

Zgodnie z przyjętym założeniem o modułowej budowie, każda noga posiada oddzielny sterownik. Do zadań sterownika nogi należy generowanie sygnałów dla dwóch serwomechanizmów, w tym także sterowanie z trapezoidalnym profilem prędkości oraz pomiar prądu napędów nogi.

Jako układ sterujący wybrano mikrokontroler ATmega8 [1]. Rozmiar płytki PCB pojedynczego sterownika wynosi 40×74 mm – wszystkie sterowniki nóg zajmują razem mniej niż połowę miejsca dostępnego wewnątrz korpusu robota.

Z jednostką nadrzędną sterownik komunikuje się poprzez SPI. Sterowniki nóg są układami podrzędnymi w komunikacji SPI. Zdefiniowano prosty protokół komunikacji między sterownikiem nadrzędnym a sterownikami nóg oparty na ramkach o stałej długości. Po odebraniu znaku początku ramki, sterownik nogi zaczyna wysyłać informacje o aktualnym położeniu, prędkościach i prądach serwomechanizmów. Sterownik nogi otrzymuje natomiast ze sterownika nadrzędnego bajt określający tryb działania (ograniczenia prądu poszczególnych napędów), docelowe położenia serwomechanizmów, oraz maksymalne prędkości i przyspieszenia dla trapezoidalnego profilu prędkości.

Według początkowych założeń sterowanie obrotem kół miało się odbywać poprzez podawanie sygnału na zmodyfikowane serwomechanizmy w stopach robota. Po wykonaniu prób okazało się jednak, że wewnętrzne sterowniki wybranych serwomechanizmów nie działają poprawnie, gdy serwomechanizm używany jest jako silnik. Spowodowało to konieczność budowy dodatkowego modułu odrębnego sterownika silników kół napędowych. Moduł ten komunikuje się poprzez SPI z jednostką nadrzędną i umożliwia niezależne sterowanie czterema silnikami z wykorzystaniem regulacji PWM (ang. *Pulse Width Modulation*) ich prędkości oraz możliwością pomiaru prądu. Jako układ sterujący, ze względu na liczbę dostępnych kanałów PWM wybrano mikrokontroler ATmega88 [2].

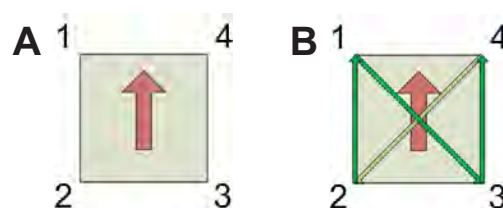
Oprogramowanie sterowników nóg zostało przygotowane w języku C w środowisku AVRStudio.

4. Funkcjonalność robota i wyniki eksperymentalne

Skonstruowany robot ma służyć do celów dydaktycznych, a w szczególności do badania zróżnicowanych trybów kroczenia. Aby wykazać jego przydatność do tych zadań, przeprowadzono serię testów sprawdzających poprawność realizacji podstawowych trybów ruchu. Na potrzeby prezentacji badanych chodów przyjęto numerację nóg robota taką, jak przedstawiona na rys. 5A.

4.1. Chody statycznie stabilne

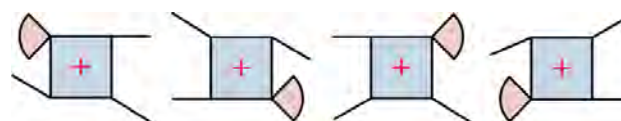
Chód trójpodporowy jest chodem statycznie stabilnym, czyli środek ciężkości zawsze znajduje się wewnątrz wielokąta podparcia. Kolejność przestawiania nóg to 1-3-4-2 i



Rys. 5. Przyjęta numeracja nóg (A) i kolejność ich przestawiania podczas chodu trójpodporowego (B)

Fig. 5. Assumed numbering of the legs (A), and the sequence in which the legs are moved during the quadrupedal crawl (B)

została ona przedstawiona na rys. 5B. Położenia nóg w kolejnych etapach chodu przedstawia natomiast rys. 6. Ponieważ robot jest symetryczny i w każdym kierunku może się poruszać w taki sam sposób określenie, która noga jest którą z kolei, zależy od kierunku ruchu. Robot wykonuje ruch stabilnie, z wybraną prędkością. Ruch w tym trybie został przedstawiony na filmie dostępnym pod adresem: <http://lrm.cie.put.poznan.pl/chod3p.avi>.



Rys. 6. Kolejne stany nóg w chodzie trójpodporowym
Fig. 6. Consecutive leg states in the quadrupedal crawl gait

W przypadku obrotu trójpodporowego korpus robota pozostaje w tym samym miejscu, a poszczególne nogi są podnoszone i opuszczane w kolejności 1-2-3-4. Trajektorie kolejnych nóg są przesunięte względem poprzednich o $1/4$ pełnego cyklu. Każda noga wykonuje obrót o kąt prawie 180° . W każdym momencie wszystkie nogi się poruszają, dzięki czemu ruch jest płynny, a obrót może być wykonywany najszybciej, jak na to pozwalają napędy. Ruch ten jest w pełni stabilny, gdyż środek ciężkości zawsze znajduje się wewnątrz trójkąta podparcia. Ruch robota w tym trybie został przedstawiony na filmie dostępnym pod adresem: <http://lrm.cie.put.poznan.pl/obrot3p.avi>.

5. Chody dynamiczne

Chód dwupodporowy jest znacznie trudniejszy w realizacji od chodu trójpodporowego, gdyż środek ciężkości nie znajduje się wewnątrz wielokąta podparcia. Oznacza to, że robot nie jest w stanie równowagi statycznej, a jedynie dynamicznej.



Rys. 7. Kolejne stany nóg w chodzie dwupodporowym
Fig. 7. Consecutive leg states in the two-beat diagonal gait

W przypadku badanego robota środek ciężkości na zmianę znajduje się z przodu lub z tyłu linii łączącej punkty podparcia nóg (rys. 7). Z tego powodu podczas ruchu dwupodporowego na robota działa moment obrotowy, powodujący przechylenie. Robot może się przechylić jedynie

o niewielki kąt zanim dotknie podniesioną nogą podłoża, gdyż możliwości podniesienia nogi w stosunku do rozmiarów fizycznych robota, są stosunkowo nieduże. Istnieje kilka możliwych rozwiązań tego problemu:

- doświadczalne dobranie parametrów ruchu, tak, aby robot nie zdążył się wystarczająco przechylić, zanim nastąpi zamiana nóg podpierających z przenoszonymi,
- zmniejszenie długości kroku i zwiększenie szybkości poruszania nogami, tak, aby robot nie zdążył się przechylić,
- reagowanie na bieżąco na przechył na podstawie danych z akcelerometru.

Pierwsze i drugie rozwiązanie nie nadaje się do implementacji w badanym robocie ze względu na dużą elastyczność konstrukcji oraz zbyt wolne serwo mechanizmy – by uniknąć przechyłów, nogi robota nie mogą być przestawiane wystarczająco często.

Podjęto próbę implementacji chodu dwupodporowego z wykorzystaniem informacji o przechylenie otrzymywanej z akcelerometru, która jednak nie zakończyła się pełnym sukcesem. Ze względu na duże luzy w niektórych węzłach oraz elastyczność materiału konstrukcyjnego (laminat) korpus robota drży i “kołysze” się nawet podczas chodu statycznie stabilnego. Program sterujący może oczywiście ignorować te wskazania akcelerometru. Jednak w przypadku chodu dwupodporowego, gdy przechylenie korpusu przekroczy wartości, które powinny być ignorowane, robot nie jest już w stanie zareagować, co także jest związane przede wszystkim z elastycznością konstrukcji oraz zbyt małą prędkością zastosowanych serwo mechanizmów. Tym samym robot nie ma możliwości skutecznej realizacji chodu dwupodporowego. Efekty wykonanych prób przedstawione zostały na filmie dostępnym pod adresem: <http://lrm.cie.put.poznan.pl/chod2p.avi>.

Możliwa była natomiast implementacja obrotu dwupodporowego. Podczas tego ruchu w każdej chwili dwie przeciwstawne nogi są opuszczone i odpowiadają za ruch robota, a pozostałe dwie są podniesione i przenoszone.

Schemat ruchu jest następujący:

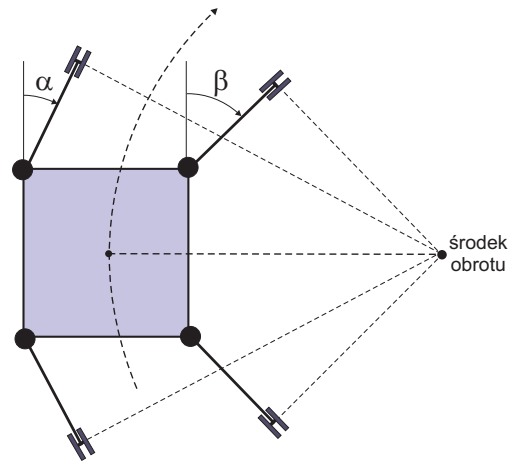
- nogi 1 i 3 są oparte i opuszczone,
- nogi 2 i 4 są podniesione i przenoszone poprzez obrót w kierunku przeciwnym niż nogi 1 i 3,
- po wykonaniu pełnego zakresu obrotu, następuje zamiana i podniesienie nóg 1 i 3 oraz opuszczenie 2 i 4.

Podnoszenie i opuszczanie nogi jest realizowane z różną prędkością, ponieważ podnoszenie wiąże się ze zmniejszaniem obciążenia nogi, natomiast przy opuszczaniu poza zwiększaniem obciążenia (podparcie) może dojść do uderzenia stopą o podłoże w przypadku nierówności terenu lub przechylenia robota.

6. Ruch kołowy i zmiana trybu ruchu

Ponieważ robot został wyposażony w koła, poza możliwością kroczenia posiada także możliwość jazdy. W przypadku jazdy na wprost sterowanie jest trywialne, gdyż wystarczy ustawić nogi równoległe oraz napędzać koła umieszczone w stopach. Jednakże w przypadku skrętu promienie skrętu kół lewych i prawych są różne. Takie samo zjawisko

występuje w pojazdach samochodowych. Także w przypadku robota należy uwzględnić odpowiednik kompensacji Ackermanna (rys. 8). Aby móc poprawnie sterować, należy znaleźć zależność między kątami α oraz β . Ponieważ otrzymana zależność $\beta = f(\alpha)$ jest funkcją uwikłaną i silnie nieliniową [9], do realizacji kompensacji w sterowniku mikroprocesorowym robota przygotowano stabilizowane wartości skorygowanych kątów skrętu kół.



Rys. 8. Kompensacja Ackermanna w ruchu kołowym robota
Fig. 8. Ackermann steering geometry used in the wheeled motion mode

Program sterujący robota umożliwia także płynną zmianę trybu ruchu. Odbywa się to w następujący sposób:

- określenie zadanej pozycji wszystkich ogniw nóg w chwili początkowej w nowym trybie ruchu,
- wyznaczenie kątów, o które każda noga musi zostać obrócona,
- noga o największej różnicy kąta bieżącego względem zadanej zostaje podniesiona, pozostałe zostają opuszczone,
- nogi z określoną prędkością obracają się w kierunku zadanej pozycji,
- po osiągnięciu zadanej pozycji, rozpoczynany jest ruch w nowym trybie.



Rys. 9. Robot podczas festiwalu CybAiRBot
Fig. 9. Presentation of the robot during the CybAiRBot festival

Wyniki przykładowych testów zostały przedstawione na filmie dostępnym pod adresem:

<http://lrm.cie.put.poznan.pl/cybaibot.avi>, zrealizowanym podczas festiwalu robotów CybAiRBot 2011 (rys. 9). Podczas dynamicznej prezentacji można zauważyć, że robot bez problemów zmienia tryb pomiędzy chodem i jazdą oraz zmienia kierunek ruchu.

7. Podsumowanie i wnioski

Przedstawiony w niniejszym artykule prototyp robota czworonożnego wykonany został od podstaw w ramach pracy dyplomowej magisterskiej realizowanej w Instytucie Automatyki i Inżynierii Informatycznej Politechniki Poznańskiej [9]. Dowodzi to prawdziwości założenia o możliwości wytworzenia tego rodzaju robota do celów dydaktycznych w warunkach warsztatowych, przy zastosowaniu jedynie najprostszyc technologii wykonania i powszechnie dostępnych komponentów.

W konstrukcji i oprogramowaniu robota udało się zrealizować większość przyjętych założeń, w szczególności dotyczących otwartości i rozszerzalności konstrukcji oraz jej niewielkiego kosztu. Koszt materiałów i komponentów robota pozwala na budowę większej liczby egzemplarzy lub indywidualne wykonanie przez studentów lub inne osoby zainteresowane robotami kroczącymi. Zademonstrowano podstawową funkcjonalność robota w zakresie chodów statycznie stabilnych i częściowo chodów dynamicznych, a także użyteczność trybu jazdy na kołach, pozwalającego osiągać większe prędkości.

Zauważone podczas testów problemy wynikają głównie z niedoskonałości konstrukcji mechanicznej robota oraz zastosowania (ze względu na koszty) serwomechanizmów o zbyt słabej dynamice. Wymiana głównych napędów nóg na szybsze pozwoli zapewne na pełną realizację chodu dwupodporowego.

Bibliografia

- [<http://www.atmel.com/atmel/acrobat/doc2467.pdf>] – *Atmega8(L) datasheet*.
- [www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2545.pdf] – *Atmega88(L) datasheet*.
- [www.cyberstein.co.uk] – *Titan the Robot*.
- [www.robotshop.com/dagu-quad-bot-quadruped-walking-robot-2.html] – *Quad Bot Quadruped Walking Robot*.
- [www.robotshop.com/dasa-robot-genibo-robot-dog-2.html] – *Genibo Robot Dog*.
- Gonzalez de Santos P., Galvez J. et al. (2003): *SILO4 - A True Walking Robot for the Comparative Study of Walking Machine Techniques*, IEEE Robotics & Automation Magazine, 10(4), 23–32.
- Grand C., Benamar F. et al. (2004): *Decoupled Control of Posture and Trajectory of the Hybrid Wheel-Legged Robot Hylos*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, New Orleans, 5111–5116.
- Hirose S., Takeuchi H. (1995): *Roller-Walker: a Proposal of New Leg-Wheel Hybrid Mobile Robot*, Proc. Int. Conf on Advanced Robotics, Barcelona, s. 917–922.
- Matuszak M., (2011): *Projekt i wykonanie robota czworonożnego do badania zróżnicowanych trybów kroczenia*, praca dyplomowa magisterska, Politechnika Poznańska.
- Morecki A., Knapczyk J. (1999): *Podstawy robotyki. Teoria i elementy manipulatorów i robotów*, WNT, Warszawa.
- Murphy M., Saunders A. et al. (2011): *The LittleDog Robot*, „Int. Journal of Robotics Research”, 30(2), 145–149.
- [www.nxp.com/documents/user_manual/UM10161.pdf] – *LPC2101/02/03 user manual*.
- Raibert M., Blankespoor K. et al. (2008): *BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot*, Proc. 17th IFAC World Congress, Seoul, CD-ROM.
- Smith J., Sharf I., Trentini M. (2006): *PAW: a Hybrid Wheeled-Leg Robot*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, Orlando, 4043–4048.
- Walas K., Belter D., Kasiński A. (2008): *Control and Environment Sensing System For a Six-Legged Robot*, „Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems”, 2(3), 26–31.
- Wilcox B., Litwin T. et al. (2007): *ATHLETE: A Cargo Handling and Manipulation Robot for the Moon*, „Journal of Field Robotics”, 24(5), 421–434.

An educational quadruped robot with hybrid leg-wheel locomotion

Abstract: This paper considers the issues of design and implementation of mechanics, control system and software of a quadruped walking robot. The robot has a hybrid leg-wheel locomotion mechanism, which makes it an interesting subject for studies in robot control and motion planning. The design of the robot's hardware is shown in details, followed by a presentation of the implemented motion strategies, which involve both the legged (discrete) and the wheeled (continuous) modes of locomotion. Results are presented also on movie clips, which are made available in the Internet.

Keywords: walking robot, quadruped, stability, controller

mgr inż. Marek Matuszak

Marek Matuszak ukończył studia w 2011 r. na kierunku Automatyka i Robotyka na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Jego zainteresowania są związane z projektowaniem i programowaniem sterowników m.in. do robotów mobilnych oraz małych urządzeń elektronicznych z uwzględnieniem kosztów produkcji. Obecnie pracuje jako inżynier elektronik w C&C Technology Sp. z o.o. e-mail: matuszak.marek@gmail.com

dr hab. inż. Piotr Skrzypczyński

Piotr Skrzypczyński jest absolwentem Automatyki i Robotyki na Politechnice Poznańskiej (1993). Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w roku 1997, a doktora habilitowanego w roku 2007, oba na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Obecnie profesor nadzwyczajny w Instytucie Automatyki i Inżynierii Informatycznej, a także kierownik Laboratorium Robotów Mobilnych IAIII. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się wokół zagadnień percepcji i nawigacji autonomicznych robotów mobilnych. e-mail: piotr.skrzypczynski@put.poznan.pl