

# Wykonanie i zaprogramowanie robota kroczącego

## Designing and programming of walking robot

MARIUSZ RACZYK  
TOMASZ SOBIECH  
ROBERT PIOTROWSKI\*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.4.39

Jednym z najpopularniejszych robotów kroczących jest heksapod, czyli robot o sześciu nogach. W artykule przedstawiono projekt, wykonanie i oprogramowanie heksapoda. Sterowanie nim polega na odpowiednim ustawieniu wartości wychylenia serwomechanizmów, które umożliwiają ruch poszczególnych odnóży. W urządzeniu sterującym zaimplementowano różne typy chodu robota.

**SŁOWA KLUCZOWE:** robot kroczący, projektowanie, robotyka, automatyka, mechatronika

*One of the most popular types of walking robots is a six-legged robot – hexapod. This paper presents the project, design and implementation of the robot, as well as the accompanying software. The control system of the hexapod consists in proper adjustment of inclination values of the servomechanisms, which provide the hexapod with ability to operate its subsequent legs. Different modes of the robot movements are implemented in the controller.*

**KEYWORDS:** walking robot, designing, robotics, automatics, mechatronics

Wśród robotów mobilnych wyróżnia się roboty pływające, latające, jeżdżące oraz chodzące. W celu zapewnienia robotowi dużego zapasu stabilności i zdolności do poruszania się w różny sposób wykonano heksapoda (robota kroczącego o sześciu nogach). Większa liczba odnóży oznacza możliwość zaimplementowania różnych typów chodu, zwykle wzorowanych na ruchach owadów.

Projektowanie robotów kroczących jest tematem licznych prac [np. 1, 2]. Dzięki swej budowie roboty te mogą się przemieszczać także po nierównym terenie – np. wojskowe roboty zaopatrzeniowe, takie jak LS3 (*legged squad support system*) [3].

Niniejszy artykuł ma multidyscyplinarny charakter (wykorzystano w nim wiedzę z zakresu mechaniki, elektroniki, automatyki i informatyki) i zawiera opis projektu, a także wykonania robota typu heksapod (jego części mechanicznej i elektronicznej oraz oprogramowania).

### Założenia projektowe

Przy realizacji projektu przyjęto następujące założenia:

- poruszanie się robota po płaskiej powierzchni,
- w pełni bezprzewodowa obsługa robota – zarówno w przypadku sterowania radiowego, jak i zasilania baterijnego,
- elastyczność konstrukcji,
- sterowanie z aplikacji komputerowej,
- możliwość poruszania się robota w różnych trybach.

\* Inż. Mariusz Raczyk (raczyk.mariusz@gmail.com), inż. Tomasz Sobiech (sobiech.tomasz.93@gmail.com), dr inż. Robert Piotrowski (robert.piotrowski@pg.gda.pl) – Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej

W przyszłości metody chodu można rozbudować o inne algorytmy (w tym zapewniające stabilne poruszanie się robota po nierównym terenie). Przewidziano też opcję wyposażenia robota w urządzenia pomiarowe pozwalające na określenie jego położenia w przestrzeni.

### Konstrukcja mechaniczna

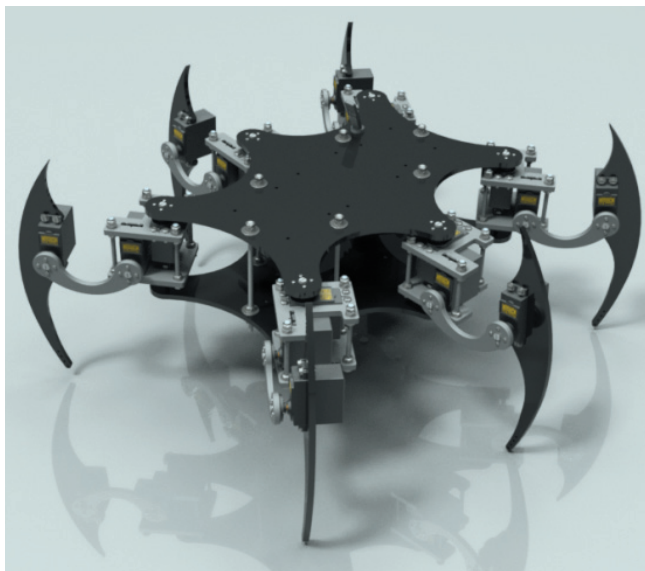
Robot składa się z dwóch ram głównych, na których znajdują się bateria i część elektroniczna, oraz z sześciu nóg. Pojedyncze odnoże heksapoda można porównać do robota o strukturze kinematycznej przegubowej o trzech osiach obrotowych. Każde z odnóży ma trzy stopnie swobody.

W rozpatrywanym przypadku występują trzy pary kinematyczne – pary obrotowe należące do klasy V – i trzy ogniwa. To oznacza, że aby wyznaczyć położenie każdego z elementów nogi robota, należy podać trzy niezależne zmienne położenia [4].

Noga robota jest wyposażona w trzy serwomechanizmy (stanowiące kolejne pary obrotowe) zapewniające możliwość zmiany kąta pomiędzy poszczególnymi ogniwami nogi. Wykorzystano serwomechanizmy MG995 firmy Tower Pro, które odwzorowano w środowisku Autodesk Inventor [5].



Rys. 1. Podstawka pod serwomechanizmy ze wszystkimi elementami łączącymi

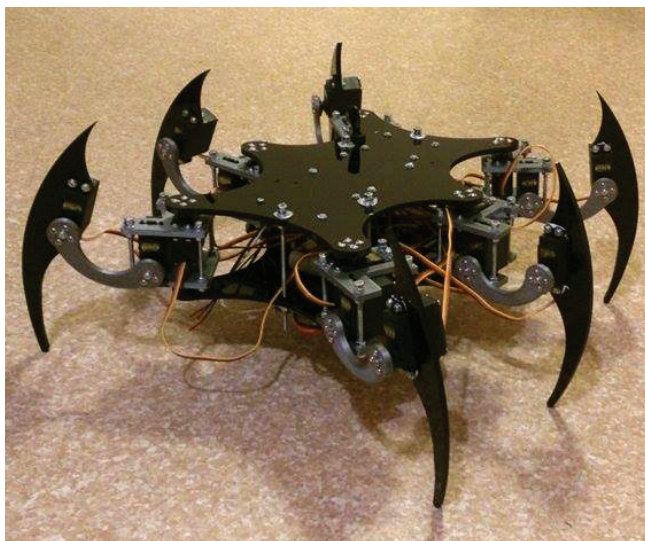


Rys. 2. Projekt konstrukcji mechanicznej robota

Poza serwomechanizmami noga robota składa się także z dwóch elementów imitujących udo i goleń owada oraz z podstawki pod serwomechanizmy, umożliwiającej ruch nogi robota w dwóch osiach.

Początkowo planowano wykonanie robota techniką druku 3D, jednak rozmiary ramy głównej były zbyt duże i dostępne urządzenia uniemożliwiały jej wydruk. Następnie rozważano wykonanie niektórych elementów z aluminium, co zapewniłoby większą wytrzymałość konstrukcji kosztem wzrostu wagi. Zaprojektowana podstawka nie mogłaby się składać z dwóch elementów, jak zakładano w projekcie. Elementy z blachy aluminiowej, wycinane metodą cięcia wodą, wymagałyby gięcia, co mogłoby spowodować zaburzenie osi obrotu nogi, a tymczasem ta oś powinna być jednakowa dla każdej z podstawek. Ostatecznie opracowano projekt konstrukcji składającej się z dwóch równoległych elementów, ale zrezygnowano z cięcia aluminium na korzyść wydruku 3D z użyciem materiału PLA (*polylactic acid*) (rys. 1). Złożone elementy (udo i goleń) zaprojektowano w środowisku Autodesk Inventor [5], a wykonano je w technologii druku 3D i frezowania.

W projektowaniu ramy należało wziąć pod uwagę rozmiary płytek z elektroniką, a także rozmiary baterii. Dodat-



Rys. 3. Widok gotowego robota

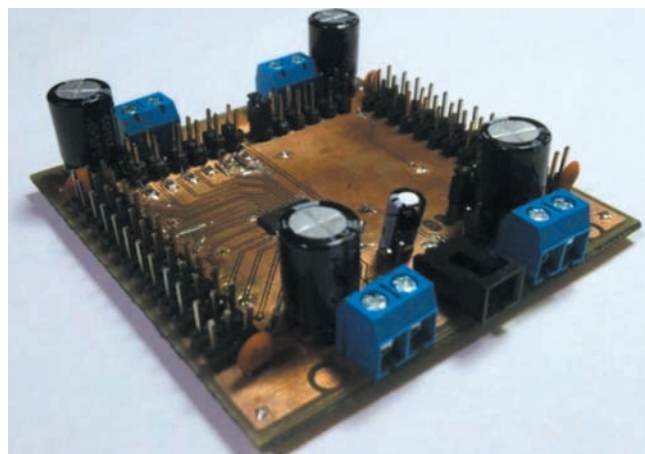
kowo rama musiała zapewniać jak najlepszą stabilność robota. W związku z tym trzeba było odpowiednio rozplanować miejsca przytwierdzenia nóg z serwomechanizmami. Początkowo przyjęto, że będą one rozłożone symetrycznie, tworząc prostokąt. Po przeanalizowaniu środowiska naturalnego oraz uwzględnieniu faktu, że owady mają szerszej rozstawione środkowe odnóża, co daje im dodatkowy zapas stabilności [2], zdecydowano się na inne rozwiązanie. Ramy wycięto z czarnego szkła akrylowego. Przy tworzeniu modelu komputerowego w środowisku Autodesk Inventor [5] (rys. 2) wzięto pod uwagę zależności występujące w połączeniach elementów, a także wszystkie dodatkowe elementy konstrukcyjne (np. śruby i nakrętki), co pozwoliło na precyzyjne odwzorowanie robota i jego ruchów, a także zapewniło dopasowanie wszystkich elementów. Na rys. 3 przedstawiono gotowego robota.

### Konstrukcja elektroniczna

Część elektroniczną podzielono na kilka podzespołów. Autorski projekt płytki drukowanej PCB (*printed circuit board*) pozwolił na elastyczne rozmieszczenie elementów elektronicznych oraz otworów montażowych. Każdy podzespół zaprojektowano tak, aby zminimalizować zajmowany przez niego obszar. W tym celu wykorzystano zarówno elementy THT (*through-hole technology*) – do montażu przelotowego, jak i znacznie mniejsze elementy SMD (*surface mounted devices*) – do montażu powierzchniowego.

Płytkę drukowaną zaprojektowano w środowisku Eagle [6] i wykonano metodą termotransferu. Polega ona na przeniesieniu wydrukowanego na drukarce laserowej projektu na fragment laminatu pokrytego warstwą miedzi. Właściwości tonera drukarki laserowej umożliwiają jego ponowne rozgrzanie i przyklejenie. Niezbędne jest dopasowanie kartki z nadrukiem do laminatu oraz rozgrzanie obu powierzchni. Starannie dobrana temperatura tonera umożliwi uzyskanie lepszej jakości nadruku na laminacie. Następnie należy usunąć papier i wytrawić płytkę odpowiednim roztworem kwasu. Płytkę jest gotowa do wiercenia i lutowania. Na rys. 4 przedstawiono efekt uzyskany w jednej z płytek PCB.

Rolę głównego sterownika robota pełni mikrokontroler Atmega32 umieszczony na centralnej jednostce sterującej. Podzespół ten odpowiada za najważniejsze obliczenia – algorytm liczący kinematykę i trajektorie odnóży robota. Poza tym realizowana jest komunikacja mikrokontrolera z magistralą SPI (*serial peripheral interface*),



Rys. 4. Końcowa wersja sterownika serwomechanizmów



umożliwiająca łączenie się z modułem radiowym RFM12B oraz – w dalszej kolejności – z komputerem i zainstalowaną na nim aplikacją sterującą.

Centralna jednostka sterująca ma wyprowadzone niemal wszystkie piny wyjściowe, które obecnie nie są używane, lecz zostały przygotowane na potrzeby dalszych prac projektowych. Bardzo ważnym zadaniem tego elementu jest też komunikacja między mikroprocesorem a sterownikiem serwomechanizmów, który używa dwóch układów scalonych – 16-kanalowych generatorów PWM (*pulse width modulation*) PCA9685. Wykorzystują one magistralę I2C do komunikacji z mikrokontrolerem.

### Algorytmy chodu

Istotnym elementem prac projektowych jest zapewnienie wystarczającej stabilności podczas ruchu robota kroczącego. Do jej określenia wprowadza się pojęcie wielokąta podparcia. Jest to figura geometryczna, której wierzchołki znajdują się w punktach podparcia robota. Określenie stabilności robota jest możliwe po przyjęciu następującego uproszczenia: waga poszczególnych kończyn jest na tyle mała, że nie wpływa na środek ciężkości robota. Przy tym założeniu umiejscowienie środka ciężkości nie zmienia się nawet podczas ruchu nóg [3].

Podczas sterowania robot musi mieć zapewniony odpowiedni zapas stabilności. W przypadku maszyn kroczących zapasem stabilności nazywa się odległość pomiędzy środkiem ciężkości a jedną z krawędzi wielokąta podparcia.

Trzeba podkreślić, że gdy robot porusza się np. po równi pochyłej, wówczas w celu wyznaczenia zapasu stabilności należy uwzględnić rzut środka ciężkości na płaszczyznę horyzontalną, a nie na płaszczyznę, po której porusza się robot [3].

Najprostszym algorytmem ruchu jest ruch falowy, polegający na cyklicznym wykonywaniu wybranego typu chodu. Każdy z tych typów ma współczynnik obciążenia określający, jaką część okresu chodu robota stanowi czas, gdy noga robota nie jest podparta – znajduje się w powietrzu, w fazie protrakcji. W projekcie przewidziano trzy algorytmy chodu [2]:

- metachroniczny,
- gąsienicowy,
- trójpodporowy.

W ruchu metachronicznym współczynnik obciążenia wynosi 1/6, co oznacza, że przemieszcza się tylko jedna noga, natomiast pozostałe znajdują się na podłożu i podtrzymują heksapoda. Ten rodzaj chodu zapewnia bardzo duży zapas stabilności – robot pozostaje stabilny nawet w razie napotkania przeszkody.

Chód gąsienicowy (czteropodporowy) to taki sposób przemieszczania się, w którym podczas ruchu robota cztery z jego sześciu nóg znajdują się w fazie refrakcji. W tym przypadku współczynnik obciążenia wynosi 1/3.

Chód trójpodporowy najlepiej odwzorowuje sposób poruszania się owadów sześcionożnych. Poza tym że zapewnia stabilność przemieszczania się, jest to chód najszybszy. Podczas ruchu robota jego trzy nogi w jednym momencie znajdują się w powietrzu, co oznacza, że współczynnik obciążenia wynosi 1/2. W projekcie uwzględniono również fakt, że w środowisku naturalnym stabilność owadów przemieszczających się w ten sposób poprawia szersze rozstawienie środkowych nóg.

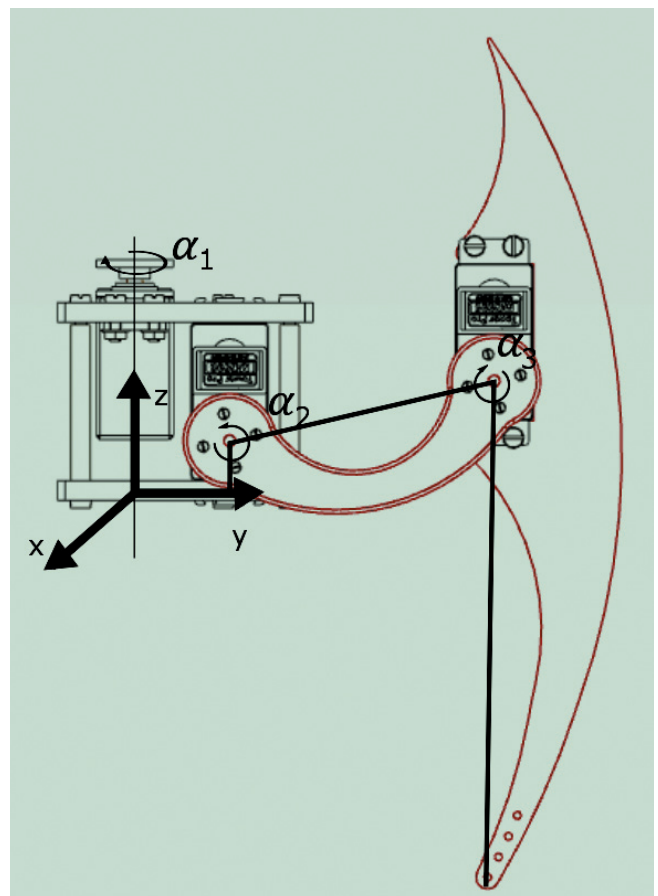
### Kinematyka odwrotna

Do zrealizowania określonych algorytmów chodu niezbędne jest zastosowanie rozwiązania kinematyki odwrotnej. Pozwala to na obliczenie parametrów łańcucha kinematycznego (wszystkich możliwych kątów odchylenia pomiędzy ogniwami mechanizmu) na podstawie współrzędnych położenia końcówki ramienia w kartezjańskim układzie współrzędnych [7]. Kinematyka odwrotna umożliwia ustawienie każdej z nóg w pozycji bazowej, od której zaczyna się ruch, a następnie przemieszczenie nóg do zadanej lokalizacji.

Można wyróżnić dwa rodzaje rozwiązań nieliniowego zadania kinematyki odwrotnej: numeryczne i w postaci jawnej. Rozwiązanie w postaci jawnej jest łatwiejsze we wdrożeniu i dlatego na nie się zdecydowano. Dodatkowo można je uzyskać dwiema metodami: algebraiczną lub geometryczną [4]. Druga z nich, wykorzystana w projekcie, pozwala na wyznaczenie kątów odchylenia w parach kinematycznych za pomocą prostych zależności trygonometrycznych. Początek układu współrzędnych przyjęto w miejscu zaczepienia nogi w podstawie robota. Każda z nóg ma osobny układ współrzędnych z osiami (rys. 5):

- X – przód–tył (półoś dodatnia skierowana do przodu),
- Y – prawo–lewo (półoś dodatnia skierowana na zewnątrz – zarówno z lewej, jak i prawej strony robota),
- Z – góra–dół (półoś dodatnia skierowana ku górze).

Ze względu na konieczność wyeliminowania rozwiązań wielokrotnych (oznaczających, że osiągnięcie danego punktu w przestrzeni jest możliwe na więcej niż jeden sposób [4]) wprowadzono dodatkowe warunki. Kąty w parach kinematycznych wyznaczone w danej chwili porównywano z kątami wyznaczonymi w chwili poprzedniej – wybierano kąt, którego aktualna zmiana była najmniejsza.

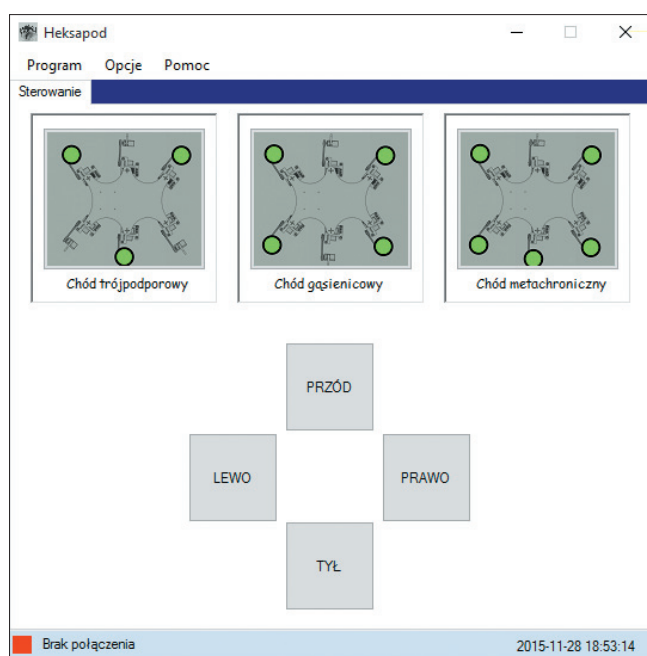


Rys. 5. Struktura i schemat kinematyczny nogi robota

Z powodzeniem przeprowadzono również testy uzyskanego zadania kinematyki odwrotnej dzięki zbudowaniu modelu komputerowego w środowisku Matlab.

## Oprogramowanie

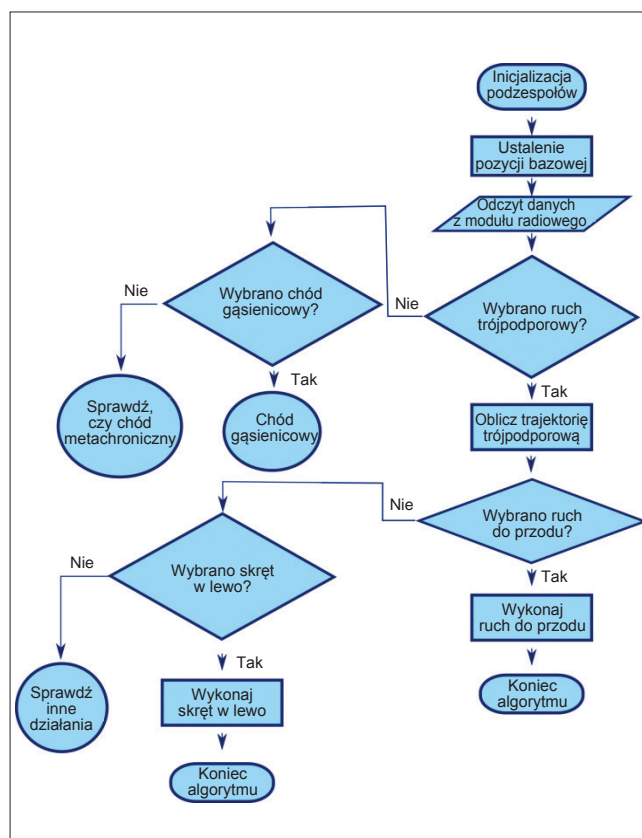
Zaprogramowano elementy elektroniczne i dzięki temu nawiązano komunikację na linii komputer – robot. Poprzez komunikację pomiędzy centralną jednostką sterującą a sterownikiem serwomechanizmów następuje wysyłanie danych sterujących urządzeniami wykonawczymi. Oprogramowanie napisane w języku C# pozwala ponadto na zastosowanie w robocie konkretnych trybów sterowania i przełączania się między nimi. Przykładowe okno aplikacji pokazano na rys. 6. Cztery przyciski (przód, tył, lewo, prawo) służą do sterowania ruchem robota, a dodatkowe trzy elementy (widoczne w górnej części okna) umożliwiają zmianę trybu chodu.



Rys. 6. Okno aplikacji „Heksapod”

Podczas pracy z programem należy przed ustawieniem komunikacji odpowiednio skonfigurować połączenie. Aplikacja pozwala na zmianę wykorzystywanego portu oraz poszczególnych parametrów wysyłanej ramki danych. Interfejs ten został wykorzystany do zapewnienia komunikacji robota z komputerem. W celu wywołania ruchu robota najpierw trzeba wybrać odpowiedni tryb jego poruszania się.

Poza stworzeniem aplikacji niezbędne było zaprogramowanie mikroprocesorów. Zaprogramowano je w języku C. Wymagało to umiejętnego zarządzania dostępną pamięcią, właściwego operowania na bitach i rejestrach oraz – co najważniejsze – prawidłowego zrozumienia zasad działania procesora [8]. Na rys. 7 pokazano uproszczony schemat blokowy oprogramowania centralnej jednostki sterującej heksapoda. Ze względu na złożoność całego procesu nie jest możliwe przedstawienie na prostym schemacie blokowym pozostałych funkcji realizowanych przez mikroprocesor, np. obliczeń związanych z wyznaczaniem trajektorii lub kątów wychyleń każdego z ramion.



Rys. 7. Uproszczony schemat blokowy oprogramowania

## Podsumowanie

Główny cel, jakim było zaprojektowanie, wykonanie i zaprogramowanie robota kroczącego, został zrealizowany. Zbudowano działającego robota, sterowanego i zasilanego bezprzewodowo. Aplikacja sterująca zapewnia podstawowe ruchy robota po płaskiej powierzchni. W najbliższej przyszłości planuje się wyposażenie go w urządzenia pomiarowe (np. do pomiaru odległości) i stworzenie aplikacji umożliwiającej lokalizację robota w przestrzeni. Rozwój w kierunku autonomiczności robota będzie związany z implementacją zaawansowanych algorytmów sterowania. Poza tym heksapod nie musi być sterowany z użyciem modułów radiowych. Można zastosować moduł Bluetooth, który umożliwia połączenie z aplikacją na smartfonie. Rozwiązanie to wstępnie przetestowano i będzie ono rozwijane.

## LITERATURA

1. Patro M. „Sterowanie sześcionożnym robotem krocącym w nierównym terenie”. Praca dyplomowa magisterska. Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, 2014.
2. Trzmiel A., Góra M. „Modelowanie chodu robota sześcionożnego w środowisku Catia v5 i Embarcadero”. *Mechanik*. Nr 2 (2013) CD.
3. [www.darpa.mil/program/legged-squad-support-system](http://www.darpa.mil/program/legged-squad-support-system) (dostęp: 01.2016 r.).
4. Craig J. „Wprowadzenie do robotyki. Mechanika i sterowanie”. WNT, Warszawa 1995.
5. Jaskulski A. „Autodesk Inventor Professional 2015PL/2015+ Fusion/Fusion 360”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2014.
6. Wiecek H. „Eagle, pierwsze kroki”. Warszawa: Wydawnictwo BTC, 2007.
7. Morecki A., Knapczyk J. „Podstawy robotyki. Teoria i elementy manipulatorów i robotów”. Warszawa: WNT, 1999.
8. Kardaś M. „Mikrokontrolery AVR. Język C. Podstawy programowania”. Szczecin: Wydawnictwo Atnel, 2011.