

## 6-NOŻNY ROBOT KROCZĄCY

*W artykule przedstawiono proces projektowania i budowy sterowanego zewnątrz mobilnego robota krocącego wyposażonego w kamerę, dzięki której można rejestrować i transmitować obraz do urządzenia zewnętrznego. Większość zaprojektowanych części zostało wykonanych przy pomocy druku 3D. Mobilność urządzenia zapewnia bateria, która pozwala na godzinę użytkowania, wprawiając w ruch dwanaście serwonapędów. Transmisja obrazu odbywa się poprzez dowolny telefon komórkowy wyposażony w kamerę, WiFi i odpowiedni program.*

### WSTĘP

Od połowy XX wieku człowiek jest świadkiem błyskawicznego rozwoju otaczającej go techniki. Prawie codziennie otrzymuje się informacje o wszelkiego typu nowościach technologicznych w wielu dziedzinach nauki. W niedalekiej przeszłości dla przeciętnej osoby pojęcie robot oznaczało fikcyjny twór występujący w dziełach science-fiction, chociaż używano już wtedy między innymi automatycznych robotów przemysłowych w fabrykach oraz prowadzono badania nad zaawansowanymi konstrukcjami sterowanymi przez człowieka lub komputer. Obecnie robotyka jest bardzo dynamicznie rozwijającą się dziedziną wiedzy, gromadzącą wokół siebie rzesze ludzi, którzy zafascynowani tematem, od podstaw starają się konstruować własne mobilne roboty, przez co zdobywają cenną wiedzę i doświadczenie.

W niniejszym artykule opisano projekt i wykonanie 6-nożnego robota krocącego, zwanego hexapodem. W ostatnich latach tego typu konstrukcje zyskały na popularności ze względu na dostęp do zaawansowanych oprogramowań wspomagających projektowanie. Przykładem takiego programu jest środowisko CATIA użyte w tej pracy. Odpowiednio zaprojektowany podzespół można następnie wyciąć w dowolnym materiale nowoczesnymi technikami cięcia wodnego, czy wydrukować na coraz częściej dostępnych drukarkach 3D. Kolejnym ułatwieniem jest zastosowanie Arduino w hexapodzie i napisanie kodu programu umożliwiającego poruszanie się robota, oraz w oparciu o wyżej wymienioną platformę wbudowanie dodatkowych urządzeń spełniających określone funkcje, takie jak ultradźwiękowy czujnik odległości, czy moduł bluetooth. Te uwarunkowania umożliwiają zastosowanie nowoczesnych technologii do budowy robotów krocących dla systemów transportowych przyszłości [4].

Jednym z powodów budowy 6-nożnego robota było głębokie zainteresowanie tematyką maszyn krocących oraz już istniejącymi konstrukcjami, na podstawie których można było określić kierunek rozwoju pracy odmienny od już wcześniej obranych. Przedstawiony w artykule hexapod jest właściwie platformą, na której docelowo można rozwijać projekt o kolejne funkcje.

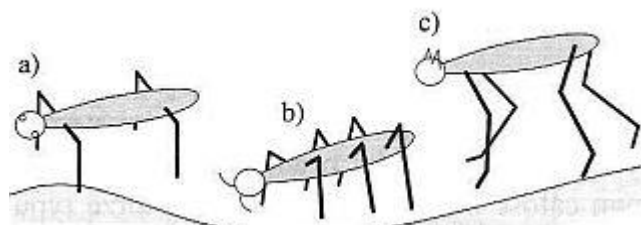
### 1. ROBOTY KROCZĄCE

Roboty kroczące to podgrupa robotów, które przemieszczają się za pomocą różnego typu kończyn. Chód tych urządzeń opiera się o schemat ruchu posiadanych przez ludzi i zwierzęta kończyn lub odnóży. Istnieje szereg klasyfikacji podziału maszyn kroczących.

Bardzo dobry podział zaprezentowano na forum poświęconym tematyce z zakresu konstrukcji robotów „forbot” [5].

#### Wzorzec ruchu

Podstawowa klasyfikacja wywodząca się z budowy zwierząt została przedstawiona na rysunku (rys 1).

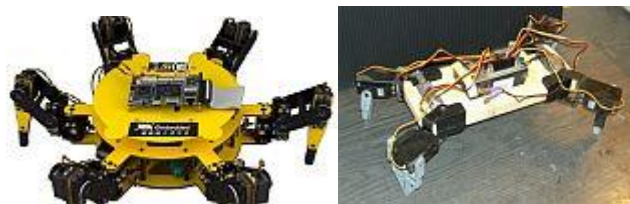


Rys. 1. Ułożenie nóg: a) gada, b) owada, c) ssaka [6]

Na podstawie tego poglądowego rysunku można stwierdzić, że najbardziej wymagającym do odwzorowania ruchem jest chód typowego czworonożnego ssaka ze względu na niesymetryczną budowę nóg przednich i tylnych. Im wyżej zamieszczony jest środek ciężkości robota, tym trudniej jest utrzymać jego równowagę, przez co fizyczne wykonanie konstrukcji jest bardziej skomplikowane.

#### Rodzaj nóg

Ta klasyfikacja podziału wynika z poprzedniej. Robot krocący może mieć nogi jednakowego kształtu i długości, ale również, jak w powyższym przykładzie (rys. 1c), istnieje możliwość konstrukcji o zróżnicowanych odnóżach, z czym wiążą się wyższe koszty, bardziej skomplikowany projekt, ale również większe możliwości ruchu. Można określić plan rozłożenia odnóży. W pierwszym przypadku konstrukcja zostaje oparta na okręgu i w zamierzeniu kończyny mają rozkład symetryczny, jak przedstawiono na rys. 2. Drugi przypadek przedstawia rozkład równoległy, w którym kończyny są rozmieszczone po obu stronach korpusu, w przybliżeniu na planie czworokąta.



Rys. 2. Robot na planie okręgu [7] i rozstawienie równoległe nóg [8]

Stabilność robota wiąże się z ilością jego nóg. Rozróżnia się 3 typy stabilności:

- chód stabilny statycznie: robot może zostać zatrzymany w każdym momencie swojego ruchu i w efekcie tego zatrzymania nie straci on swojej równowagi i nie przewróci się. Przykładem tego ruchu jest poruszanie się robota sześcionożnego ruchem trójpodporowym.
- chód dynamicznie stabilny: jest przeciwieństwem chodu stabilnego, robot nie może zostać zatrzymany w trakcie ruchu, ponieważ grozi to jego upadkiem, zaś stabilność poruszania się konstrukcji wynika z jej dynamiki. Przykładem tego ruchu jest szybkie poruszanie się robota ruchem przypominającym bieg u większości 4-nożnych ssaków.
- chód quasi statycznie stabilny: w tym ruchu, pomiędzy fazami stabilnymi, występują fazy stabilne tylko dynamicznie. Przykładem tego ruchu jest poruszanie się 2-nożnego robota- gdy ruch zostanie wstrzymany podczas stania na jednej nodze, robot przewróci się.

### Ilość nóg

Ostatnia z klasyfikacji, jest ona ściśle powiązana ze stabilnością robota. Nie ma ograniczeń co do ilości nóg posiadanych przez maszynę. Warto tutaj zwrócić uwagę na konstrukcję bez żadnego odnóża, czyli robota pełzającego, którego ruch jest oparty o wzorzec biologiczny węży, przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Robot pełzający [9]

Roboty jednożone - są to bardzo skomplikowane układy, których ruch bazuje na skakaniu. Robot posiada jedną, ale za to bardzo dobrze rozwiniętą nogę wyposażoną w szereg czujników i dobre sterowanie zabezpieczające konstrukcję przed upadkiem. Mechanizm jest idealnym przykładem chodu dynamicznie stabilnego - nawet najmniejsza ingerencja w skok doprowadzi do wyprowadzenia robota z równowagi.

Roboty dwunożne (bipody) - ich ruch jest oparty na sposobie poruszania się człowieka. W zależności od typu konstrukcji i umieszczeniu środka ciężkości poruszają się chodem dynamicznie lub quasi- statycznie stabilnym.

Roboty czterożne (quadropody) - tę grupę charakteryzuje szeroki zakres wzorców biologicznych na podstawie anatomii gadów i ssaków, w związku z czym konstrukcje mogą być mniej lub bardziej skomplikowane. W tej grupie może wystąpić każdy rodzaj stabilności.

Roboty sześcionożne (hexapody) i ośmionożne (oktapody) - poruszają się ruchem statycznie stabilnym. Ich konstrukcja oparta jest na budowie ciała owadów, krabów czy pajaków. Ich zaletą jest fakt, że stabilność utrzymują przy użyciu tylko części ze swoich nóg, podczas gdy pozostałe odnóża mogą równocześnie szukać kolejnych punktów podporu lub prowadzić inne zadania. W zależności od projektu, każda kończyna urządzenia może posiadać od 2 do 6 stopni swobody, co wiąże się z ilością serwo mechanizmów.

Roboty wielonożne - poruszające się chodem stabilno statycznym urządzenia o liczbie nóg większej niż 8. Konstruowanie tego typu układów nadaje pracy dużych komplikacji związanych ze sterowaniem tak pokazaną liczbą odnóży. Podany w 1968 roku przez

McGee'ego wzór (1) na liczbę możliwych chodów robota, ukazuje bardzo szeroki zakres możliwych konfiguracji.

$$N=(2^k-1)! \quad (1)$$

gdzie:

N- suma możliwych typów chodu,

k- liczba nóg

Oczywiście maksymalna wartość N jest przeważnie ograniczana przez konstrukcję nogi czy dobraną ilość napędów.

Niniejszy artykuł przedstawia konstrukcję robota o optymalnym stosunku ceny komponentów i złożoności projektu, czyli hexapoda, posiadającego po dwa napędy na każde odnóże.

## 2. ZAŁOŻENIA KONSTRUKCYJNE HEXAPODA

W projekcie założono budowę robota kroczącego zdolnego do przemieszczania się na niewielkie odległości na płaskim terenie, wyposażonego w kamerę. Urządzenie to przeznaczone jest do celów inspekcyjno-zwiadowczych często w trudnodostępnym terenie [3]. Przykładowym zastosowaniem konstrukcji jest możliwość wejścia pod podwozie pojazdu w celu wykrycia usterek mechanicznych [2]. Przyjęte zostały pewne ograniczenia zapisane w założeniach, które powodują znaczne obniżenie kosztów wykonania oraz mniejszy pobór prądu, a także zwiększenie dostępności dla potencjalnych użytkowników hexapoda.

W projekcie przyjęto pięć głównych założeń konstrukcyjnych:

- Ruch w oparciu o sześć nóg;
- Każda noga robota musi posiadać 2 stopnie swobody;
- Mobilność;
- Stabilność;
- Minimalizacja kosztów wykonania oraz maksymalizacja szybkości dostępu do sterowania robotem.

## 3. PROJEKT 6-CIO NOŻNEGO ROBOTA KROCZĄCEGO

### 3.1. Model 3D

Jednym z popularniejszych programów CAD przeznaczonych do projektowania maszyn i mechanizmów jest CATIA V5. Jest to zintegrowana aplikacja służąca do komputerowego wspomaganie projektowania i wytwarzania, która ponad to została wyposażona w możliwość badań MES [1]. W programie tym wykonano model 3D poszczególnych podzespołów robota jak również całe złozenie.

#### Noga

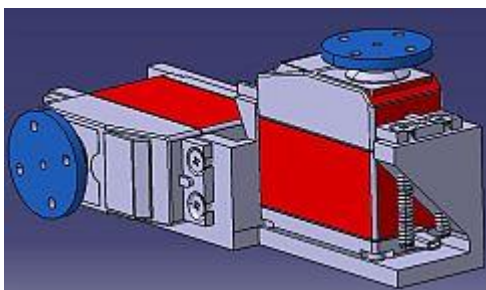
Pierwotny kształt nogi został zaczerpnięty z budowy ciała Kraba Łądowego. Ruch nogi w kierunku górnej podstawy tułowia wymusił jednak zmianę kształtu odnóża na bardziej wklęsły, co zagwarantowało zwiększenie zakresu ruchu. Ze względów wytrzymałościowych każda noga składa się z dwóch identycznych części połączonych ze sobą za pomocą trzech 15 mm tulejek dystansowych i takiej samej ilości śrub M3 o długości 30 mm skręconych nakrętkami. Do jednej z dwóch podstaw nogi przykręcona jest nakładka gwintowana osadzona na wale serwonapędu i połączona z nim gwintem wewnętrznym wału i śrubą M3x30 (rys. 4).



Rys. 4. Projekt nogi

## Koszyk

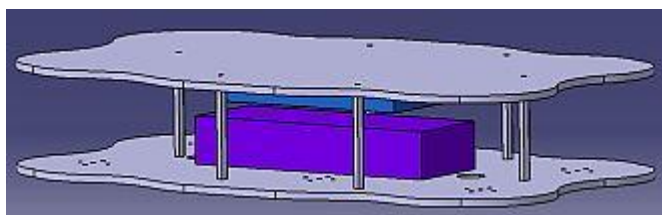
Założenia konstrukcyjne zakładały dwa stopnie swobody dla każdej nogi, w tym celu wszystkie z nich zostały wyposażone w dwa serwonapędy. Jeden z nich odpowiadał za ruch nogi w poziomie, a drugi za podnoszenie i opuszczanie odnóża. Problem ten wymagał zaprojektowania elementów utrzymujących silniki. W tym celu wykonane zostały specjalne koszyki (rys. 5), na których umieszczone są oba serwonapędy. Jeden przymocowany jest pionowo, a drugi poziomo za pomocą wkrętów M3 o długości 16 mm.



Rys. 5. Koszyk

## Podstawa

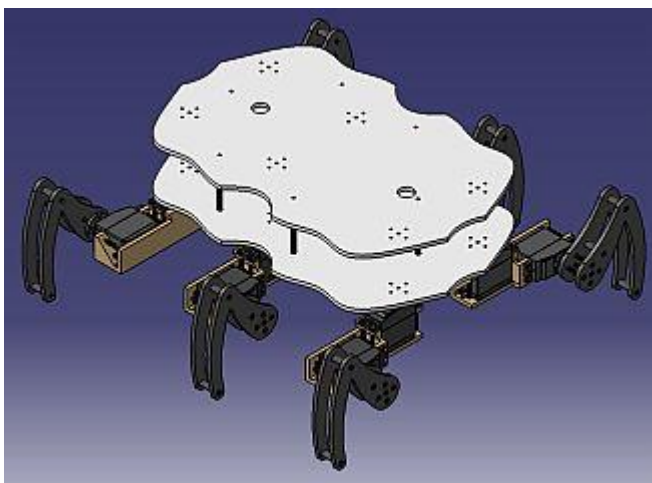
Podstawa (rys. 6) pełni dwie funkcje, jest miejscem przymocowania sześciu nóg, a także rozlokowane są na niej wszelkie elementy elektroniczne takie jak Arduino, bateria, moduł bluetooth, czy przewody. Jedynym kryterium jakim kierowano się przy jej projektowaniu była odpowiednia wielkość, która mogłaby pomieścić wszystkie niezbędne elementy. Ze względu na potencjalnie dużą wagę tej części, wykonane zostały zaokrąglenia i wycięcia.



Rys. 6. Podstawa

## Złożenie całkowite

Po zamodelowaniu podstawowych podzespołów wykonano złożenie całkowite hexapoda (rys. 7).



Rys. 7. Złożenie końcowe 3D

## 3.2. Elektronika

Zaprojektowanie konstrukcji robota zostało poprzedzone skompletowaniem odpowiednich części składowych. Hexapod inspekcyjno-zwiadowczy wymagał zastosowania dodatkowych czujników i elementów umożliwiających realizację zadanych mu prac, z czym wiąże się także dobór odpowiedniej platformy programistycznej oraz serwonapędów o odpowiedniej mocy, zdolnej utrzymać ciężar własny konstrukcji.

### Serwomechanizmy nóg

Na podstawie wzoru (2):

$$M_{min} = \frac{F * a}{3} = \frac{(m * g) * a}{3} = \frac{(2,2 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}) * 0,145 \text{ m}}{3} = 1,043 \text{ Nm} \quad (2)$$

gdzie:

- m- masa,
- g- przyspieszenie ziemskie,
- a- długość ramienia robota,
- 3- cyfra określona przez ruch trójpodporowy.

Postanowiono zastosować serwomechanizmy firmy TowerPro, model MG-995. Są to urządzenia o standardowej wielkości pośród rodziny serwonapędów. Charakteryzują się bardzo dużym momentem w porównaniu do standardowych serwonapędów. Poniższy rysunek przedstawia widok serwa MG-995 (rys. 8).



Rys. 8. Serwonapęd TowerPro MG-995 - zestaw [10]

### Platforma programistyczna

Jako platforma programistyczna do sterowania hexapodem została wybrana płytko Arduino Mega (rys. 9). Jest to największy z dostępnych modeli na rynku.



Rys. 9. Arduino Mega [11]

Arduino Mega posiada:

- 54 cyfrowe wejścia/wyjścia,
- 15 kanałów PWM,
- 4 złącza RX/TX,
- 16 wejść analogowych,
- 256 kB pamięci flash (tylko 32 kB w Arduino Uno),
- 4 kB EEPROM (1 kB w Arduino Uno),
- 8 kB pamięci RAM (2 kB w Arduino Uno),
- wejście złącza DC dla zasilania od 7 V do 12 V,
- wydajność prądowa pojedynczego wyjścia wynosi 40 mA (50 mA dla wyjścia 3,3 V).

### Moduł Bluetooth

Moduł Bluetooth HC-06 (rys. 10) umożliwia bezprzewodowe kontrolowanie działań robota za pomocą dodatkowej aplikacji wgranej na smartphona z systemem Android.





**Rys. 10.** Moduł bluetooth HC-06 [12]

### Kamera

Kamera OV7670 VGA (rys. 11) to urządzenie wyprodukowane specjalnie pod zastosowania związane z tworzeniem projektów na Arduino.



**Rys. 11.** Kamera OV7670 VGA [13]

### Czujnik odległości

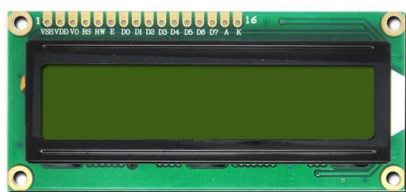
Ultradźwiękowy czujnik odległości HC-SR04 (rys. 12) zapobiega wypadkom związanym z przypadkowym uderzeniem robota w jakiś przedmiot podczas ruchu. Czujnik określa dystans dzielący go od najbliższej przeszkody i na jego podstawie może wycofać hexapoda.



**Rys. 12.** Moduł ultradźwiękowy HC-SR04 [14]

### Wyświetlacz LCD

Wyświetlacz LCD 1602 2x16 (rys. 13) to prostokątny ekran posiadający dwa wiersze przystosowane do wyświetlania danych. Ekran ten zastosowano w celu przekazywania użytkownikowi podstawowych informacji o wykonywanej obecnie czynności przez robota.



**Rys. 13.** LCD 1602 [15]

### Bateria

Zastosowanie w hexapodzie dwunastu serw MG 995, które pracują pod dużym obciążeniem, wymagało dobrania odpowiedniej baterii (rys. 14). Wybrano baterię LiPo 2S, 5200 mAh, 7,4 V, 60°C.



**Rys. 14.** Bateria Li-Po [16]

### Przetwornica DC-DC Step-Down 300 W

Zasilanie serwonapędów wymagało zastosowania odpowiedniej przetwornicy napięcia stałego. Problem związany z poprawnym zasilaniem wynikał z faktu, że naładowany pakiet LiPo posiadał na wyjściu napięcie ponad 8 V. Tak wysoka wartość mogłaby uszkodzić silniki, których nominalne napięcie zasilające waha się od 4,8 V do 6 V. Poniższy rysunek (rys. 15) prezentuje zastosowane urządzenie.



**Rys. 15.** Przetwornica DC-DC [17]

## 4. WYKONANIE HEXAPODA

Koszyki oraz nogi wykonano za pomocą wydruku 3D (rys. 16).



**Rys. 16.** Koszyki i noga wykonane technologią druku 3D

Podstawę wykonano ze szkła akrylowego, które docięto metodą cięcia wodnego (rys. 17). Wykonano dwa takie elementy.



**Rys. 17.** Podstawa ze szkła akrylowego

Koszyk za pomocą specjalnych wypustek połączono z dwoma serwonapędami. Każdy silnik przymocowany jest co najmniej dwoma wkrętami, które nie wymagają zastosowania nakrętek (rys 18).



**Rys. 18.** Połączenie koszyka z serwonapędami

Na podstawie (rys. 19) umieszczono wszelkiego rodzaju podzespoły i elementy elektroniczne, takie jak mikrokontroler Arduino (1), bateria Li-Po (2), regulator napięć (3) oraz zestaw dodatkowych modułów do sterowania robotem: ekran LCD (4), ultradźwiękowy czujnik odległości (5), moduł bluetooth (6), potencjometr (7).

Bateria Li-Po, ze względu na bardzo dużą masę względem pozostałych elementów, została umiejscowiona na środku konstrukcji,

by nie zmienić położenia środka ciężkości, co spowodowałoby komplikacje przy prawidłowym ruchu robota. Z jednej strony baterii, na krańcu powierzchni podstawy zostały poprowadzone dwie linie zasilające wszystkie silniki (8), natomiast z drugiej umieszczono przetwornicę napięcia. Z tyłu robota dodano wyłącznik (9).



**Rys. 19.** Rozmieszczenie elementów elektroniki w robocie

Zaprojektowana platforma inspekcyjno-zwiadowcza wymagała napisania kodu dla Arduino IDE w języku Wiring.

W kodzie sterującym został zadeklarowany moduł bluetooth oraz zapisano informacje, za pomocą których wspomniany moduł wysła odpowiednie sygnały na mikrokontroler Arduino, który podany sygnał odczytuje i przekazuje na serwonapędy, dzięki czemu robot wykonuje określony ruch. Żeby hexapod mógł poruszać się w taki sposób, jaki zażyczy sobie użytkownik, potrzebna jest dodatkowa aplikacja zewnętrzna, w tym przypadku wgrana na telefon z systemem Android, za pomocą której można wybrać (switch case), co robot ma wykonywać w danej chwili.

## WNIOSKI

Zbudowany robot spełnia wszystkie założenia konstrukcyjne, po wgraniu kodu sterującego, podłączeniu układu zasilającego hexapoda i uruchomieniu odpowiedniej aplikacji sterującej jest on gotowy do pracy (rys. 20).



**Rys. 20.** Wykonany 6-cio nożny robot krocący

Kod umożliwia: wstawanie, ruch do przodu i do tyłu, skręcanie w lewo i w prawo oraz cofanie po wykryciu przeszkody. Dodatkowo posiada możliwość lekkiego uniesienia się dla inspekcji podwozia.

## BIBLIOGRAFIA

1. Wyleźoł M., *Modelowanie brylowe w systemie Catia. Przykłady i ćwiczenia*, Wydawnictwo Helion, Gliwice 2002.
2. Gad S., Gad R., Olszowski S., *Metoda pozyskiwania informacji dla systemu monitorowania stanu technicznego pojazdów*, Autobusy 12/2016, s. 922-926.
3. Krogul P., Przybysz M., Rubiec A., *Transport w trudnodostępnych terenach z wykorzystaniem bezałogowej platformy lądowej*, Autobusy 6/2016, s. 615-620.
4. Zajkowski K., Wiśniewska J., Szczepański W., *Nowoczesne technologie w systemach transportowych przyszłości*, Autobusy 8/2016, s. 346-351.
5. Teorie i zasady projektowania robotów kraczących <http://forbot.pl/blog/artykuly/teoria/roboty-krocza-ce-teoria-podstawy-projektowania-id976>, dostęp: 19.01.2016.
6. Ułożenie nóg: a) gada, b) owada, c) ssaka <http://forbot.pl/blog/wp-content/uploads/2013/12/krocza-ce1.jpg>, 18-01-2016.
7. Robot na planie okręgu, <http://technowinki.onet.pl/aktualnosc/czy-polskie-roboty-podbija-swiat/3b5xv>, dostęp: 18-01-2016
8. Rozstawienie Równoległe, <http://www.forbot.pl/forum/topics7/krocza-ce-robot-krocza-ce-4-nogivt232.htm?sid=6dea17f04c8d3a451ae8fd07a141cd51>, dostęp: 19.01.2016.
9. Robot pelzający, <http://www.asimo.pl/image/modele/acm-1.jpg>, dostęp: 19.01.2016.
10. Zestaw Serwo TowerPro MG-995, <http://www.elecfreaks.com/3514.html>, dostęp: 20.01.2016.
11. Arduino Mega, <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMegaADK>, dostęp: 22.01.2016.
12. HC-06, <http://www.sunfounder.com/index.php?c=show&model=HC-06&id=39>, dostęp: 17.01.2016.
13. Kamera OV7670 VGA, <http://tinkersphere.com/arduino-compatible-components/944-ov7670-vga-camera-module-for-arduino.html>, 19.01.2016.
14. HC-SR04, <http://botland.com.pl/ultradzwiekowe-czujniki-odleglosci/1420-ultradzwiekowy-czujnik-odleglosci-hc-sr04-2-200cm.html>, dostęp: 15.01.2016.
15. LCD 1602, <http://www.buydisplay.com/default/character-2x16-1c-d-display-modules-hd44780-controller-black-on-yg>, 17.01.2016.
16. Bateria Li-Po, <http://www.ebay.com/itm/261492797277>, dostęp: 17.01.2016.
17. Przetwornica Step-Down, <http://propix.com.pl/userdata/gfx/30791474b43a862e975d5300d12d7abb.jpg>, dostęp: 19.01.2016

### 6-legged walking robot

*The paper shows a process of designing and constructing an externally, remotely controlled mobile robot equipped with a camera to record and transmit the video to an external device. Most designed parts were manufactured using 3D printing. Mobility of the device is provided by a battery, that allows it to be used for an hour and is responsible for the movement of twelve servos. Video transmission takes place via any mobile phone equipped with a camera, WiFi connection and a suitable program.*

Autorzy:

dr inż. **Przemysław Filipek** – Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Mechatroniki  
 inż. **Łukasz Madej** – Politechnika Lubelska, absolwent  
 inż. **Michał Marciniuk** – Politechnika Lubelska, absolwent  
**Patryk Buk** – Politechnika Lubelska, student