

Modularne środowisko do rywalizacji robotów sportowych śledzących linię

Maciej Węgierek, Bartosz Świstak, Tomasz Winiarski

Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa

Streszczenie: Rozmaitość zawodów robotów organizowanych na całym świecie wskazuje na to, że bez wahania możemy już mówić o robotyce sportowej – nie tylko jako dziedzinie rozrywki, ale także badań. W ostatnich latach wykreowano kilka popularnych konkurencji, dla których sformułowano wymagania dotyczące konstrukcji i oprogramowania robotów. Standaryzacja wymagań obiektywizuje wynik rywalizacji, podobnie jak ma to miejsce chociażby w wyścigach Formuły 1. Jednym z problemów standaryzacji było ujednoczenie środowiska, w którym konkurują roboty sportowe śledzące linię na czas. W artykule opisujemy działania, które doprowadziły do opracowania, wytworzenia i weryfikacji modularnego środowiska do rywalizacji robotów typu Line Follower.

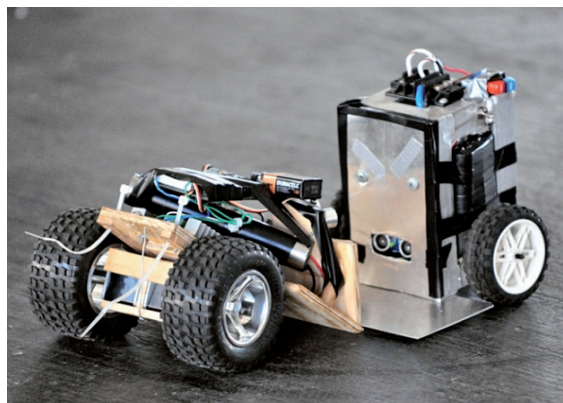
Słowa kluczowe: modularna plansza, zawody robotów, standaryzacja środowiska, roboty śledzące linię

1. Wstęp

Zawody robotów są wydarzeniem, podczas którego zbudowane i zaprogramowane przez zawodników roboty muszą wykonać zadanie konkursowe, rywalizując ze sobą. Konkretny cel działań robota określany jest przez daną konkurencję turniejową. Roboty najczęściej oceniane są pod kątem dokładności i szybkości wykonywania zadań. Niektóre dyscypliny zakładają też walkę par, w której roboty konkurują o dominację w bezpośrednim starciu.

Na świecie organizowanych jest bardzo wiele zawodów robotów. Niektóre stawiają wyzwania na granicy możliwości technicznych robotów i mają elitarny charakter. Historycznie zaliczyć do nich można zawody samochodów autonomicznych DARPA Grand Challenge [3, 13] i DARPA Urban Challenge [4, 7], a współcześnie DARPA Robotics Challenge z finałami w 2015 r. Do skomplikowanych i w swojej zasadniczej formie wymagających zaangażowania całych zespołów należą rozgrywki robotów grających w piłkę nożną RoboCup [1, 2, 6], organizowane przez The RoboCup Federation. W niniejszej pracy skoncentrujemy się na rywalizacji robotów w kategoriach indywidualnych, których konstrukcja i oprogramowanie leży w zasięgu możliwości zdolnych studentów.

Największymi zawodami robotycznymi na świecie są RoboGames [5, 11] (rys. 1), organizowane w San Mateo w Kalifornii. W ramach zawodów rozgrywane są konkurencje takie jak: Combat, Sumo, Line Follower, Maze/MicroMouse, zawody humanoidów (wyścigi, walki, zadania), Robot Soccer, Art Bots



Rys. 1. RoboGames 2008 – konkurencja sumo (robogames.net)
Fig. 1. RoboGames 2008 – sumo competition (robogames.net)

i zawody pojazdów autonomicznych. Nie mniej ważną imprezą są mistrzostwa Europy autonomicznych robotów mobilnych – RobotChallenge [12] – organizowane w Wiedniu od 2004 r. Podczas tego wydarzenia można obserwować roboty z wielu kategorii związanych z Sumo (lego, nano, micro, mini, mega, humanoid), Line Follower, Humanoid Sprint i Freestyle. Większość robotów występujących w zawodach jest autonomiczna, a w niektórych konkurencjach (np. Robot Combat) roboty są sterowane zdalnie. Ich budowa zależy od konkurencji, w której biorą udział. Roboty walczące charakteryzują się mocną i zwartą budową, zaś jednostki wyścigowe zbudowane są z lekkich materiałów, dzięki którym zachowują małą masę, a jednocześnie osiągają podobną moc jak roboty sumo.

Z powodu względnej prostoty konstrukcji robotów i organizacji zawodów na pierwszy plan pod względem popularności wysuwają się trzy konkurencje robotów sportowych: sumo, micromouse i line followers. Dla dwóch pierwszych wypracowano już standardy dotyczące parametrów robotów i plansz, co pozwala na możliwie obiektywne wyłonienie zwy-

Autor korespondujący:

Maciej Węgierek, wegierek.maciej@gmail.com

Artykuł recenzowany

nadesłany 10.07.2015 r., przyjęty do druku 17.08.2015 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0



Rys. 2. RobotChallenge 2015 – Line Follower (Christoph Welkovits, www.robotchallenge.org)

Fig. 2. RobotChallenge 2015 - Line Follower (Christoph Welkovits, www.robotchallenge.org)

Tabela 1. Kategorie robotów sumo

Table 1. Categories of sumo robots

Klasa	Wymiary robota	Masa robota	Średnica planszy	Obwódka planszy
Mega	20 cm × 20 cm	3 kg	154 cm	5 cm
Mini/Lego	10 cm × 10 cm	500 g	77 cm	2,5 cm
Micro	5 cm × 5 cm	100 g	38,5 cm	1,25 cm
Nano	2,5 cm × 2,5 cm	25 g	19,25 cm	0,625 cm
Humanoid	50 cm × 20 cm	3 kg	154 cm	5 cm
Lego Sumo	15 cm × 15 cm	1 kg	154 cm	5 cm

Tabela 2. Przegląd wybranych zawodów robotów z konkurencją FTL w 2014 r.

Table 2. Overview of selected tournaments with FTL competition in 2014 year

Nazwa zawodów	Miejsce	Termin
Robomaticon 2014	Warszawa	8 marca 2014 r.
RobotChallenge 2014	Wiedeń	29–30 marca 2014 r.
Robotic Tournament 2014	Rybnik	12 kwietnia 2014 r.
Trójmiejski Turniej Robotów 2014	Gdańsk	24 maja 2014 r.
Robotic Day 2014	Praga	21–22 czerwca 2014 r.
Robochallenge 2014	Bukareszt	1–2 listopada 2014 r.
Sumo Challenge 2014	Łódź	15 listopada 2014 r.
Bionikalia 2014	Warszawa	6 grudnia 2014 r.
Robotic Arena 2014	Wrocław	6 grudnia 2014 r.

ciężców rozgrywek oraz, co nie mniej ważne, przygotowanie się do nich. Specyfikacja plansz i wymagania dotyczące robotów są publikowane przez organizatorów zawodów w regulaminach danych konkurencji. W konkurencji sumo typowo różni się kategorie robotów przedstawione w tabeli 1.

Z kolei dla konkurencji Micromouse określone są parametry:

- plansze: 16 × 16 komórek,
- wielkość komórki: 18 cm × 18 cm,
- wysokość ścian: 5 cm.

W artykule opisujemy działania, które doprowadziły do opracowania, wytworzenia i weryfikacji modularnego środowiska do rywalizacji robotów sportowych śledzących linię na czas. W sekcji 2 scharakteryzowano zawody takich robotów organizowane w Polsce i na świecie. W sekcji 3 przedstawiono propozycję ustandaryzowanego dla nich środowiska w postaci modularnych plansz. Środowisko to podlegało weryfikacji (sekcja 4). Całość kończy podsumowanie (sekcja 5).

2. Zawody robotów śledzących linię

W konkurencji „Follow the Line” głównym zadaniem robotów jest przejechanie trasy po wyznaczonej linii w jak najkrótszym czasie. Jest to jedna z najpopularniejszych dyscyplin i występuje praktycznie na każdych zawodach robotów sportowych (tab. 2), w tym na RobotChallenge (rys. 2).

Najprostszą planszą w konkurencji FTL jest tor wyklejony z taśmy na płaskiej powierzchni (rys. 3). Jest to rozwiązanie tanie, ale nie pozwala na stworzenie dwóch takich samych torów, a ponadto wykazuje dużą podatność na uszkodzenia mechaniczne, np. w wyniku przzerwania lub odklejenia taśmy. W takiej sytuacji naprawa powoduje zmianę toru i układu planszy.

Konkurencję FTL można podzielić na kategorie:

- Line Follower (klasyczne),



Rys. 3. Przykładowa improwizowana plansza na zawody FTL

Fig. 3. Sample board during FTL competition

- Line Follower Enhanced (utrudnienia),
- Line Follower Turbo (turbiny),
- Lego FTL (Mindstorms).

Każda kategoria różni się zasadami tworzenia planszy lub konstrukcjami robotów dopuszczonych do zawodów. Klasyczny Line Follower odbywa się na torze składającym się z odcinków prostych i łuków. W wersji rozszerzonej (Enhanced) mogą pojawić się chwilowe przerwania trasy, skrzyżowania, wzniesienia oraz przeszkody na drodze, które trzeba omijać, a potem wrócić na trasę. Kategoria Line Follower Turbo dopuszcza roboty z napędem tunelowym. Jego zadaniem jest wytworzenie dodatkowej siły dociskającej robota do podłoża i pozwalającej na utrzymanie się na trasie przy dużych prędkościach. W kategorii Lego FTL jedynym elementem konstrukcyjnym robota są klocki Lego i zestawy Mindstorms. Unormowane części i oprogramowanie pozwala na uczestnictwo mniej doświadczonych zawodników, dopiero stawiających pierwsze kroki w tej dziedzinie. Regulaminy dotyczące tej konkurencji robotyki turniejowej nakładają ograniczenia na wielkość robotów, nie stanowią jednak standardów dla środowiska ich rywalizacji.

3. Budowa przykładowego robota Line Follower

Typowy robot śledzący linię składa się z prostej platformy mobilnej, układu wykrywającego linię oraz modułu elektronicznego. Najbardziej popularnym rozwiązaniem bazy jezdnej jest układ dwóch współosiowych kół (rys. 4 (1)) wraz z trzecim kołem wleczonym lub elementem ślizgającym się po podłożu (rys. 4 (2)).

Jest to układ nieholonomiczny o dwóch stopniach swobody. Najważniejszym elementem robota jest układ wykrywający linię. Bazuje on na zestawie odbiciowych czujników światła (rys. 3 (3)). Uczestnicy mogą wyposażać robota w pojedynczy czujnik lub ich zestaw, zależnie od regulaminu zawodów. Sensory te umieszcza się w sposób nieruchomy w stosunku do bazy robota lub na ruchomym ramieniu o jednym stopniu swobody. W zależności od liczby czujników robot wyszukuje linię w różny sposób. Najpopularniejsze algorytmy wykorzystywane do wyznaczania trajektorii robota bazują na regulatorach PID.

4. Modularne środowisko dla robotów śledzących linię

Jednym z czynników wpływających na sukces robota w zawodach jest środowisko, w jakim jest testowany. Plansza pozwalająca na profesjonalną weryfikację algorytmów sterowania powinna umożliwiać:

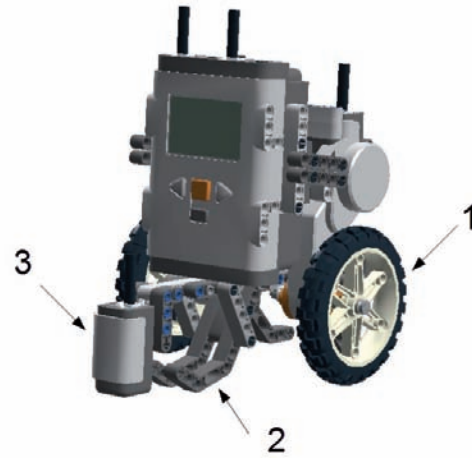
- budowanie różnych tras w krótkim czasie,
- zapamiętanie ułożonej trasy i zbudowanie takiej samej po upływie czasu,
- zbudowanie dwóch identycznych tras do przeprowadzania wyścigów równoległych,
- stworzenie unormowanego środowiska do badań.

W obliczu typowych wymiarów robotów i przebiegu tras za cel postawiliśmy sobie skonstruowanie planszy składającej się z kwadratowych elementów o wymiarach 20 cm × 20 cm. Każdy z elementów powinien mieć nadruk w postaci linii prostej, łuku lub skrzyżowania. Połączone elementy tworzyłyby gotową trasę. Zaletą takiego rozwiązania miała być ich trwałość, odporność



Rys. 5. Opracowane wzory kafli, adekwatne do typowych tras z ciągłą linią

Fig. 5. Elements patterns adequate for typical continuous line paths



Rys. 4. Model robota LineFollower zbudowanego z zestawu Lego Mindstorm (Lego Digital Designer dd.lego.com)

Fig. 4. LineFollower robot model constructed with Lego Mindstorm parts (Lego Digital Designer dd.lego.com)



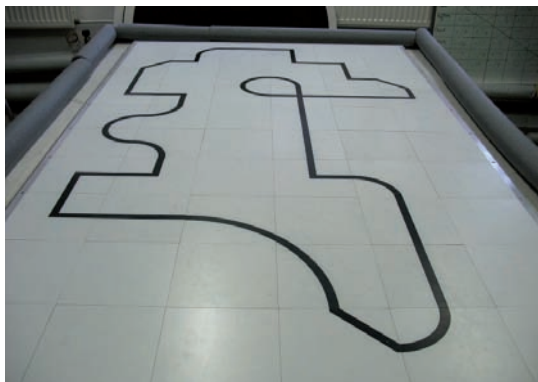
Rys. 6. Kafle w pudłach i fragment planszy w trakcie układania

Fig. 5. Elements in boxes and the board during composition

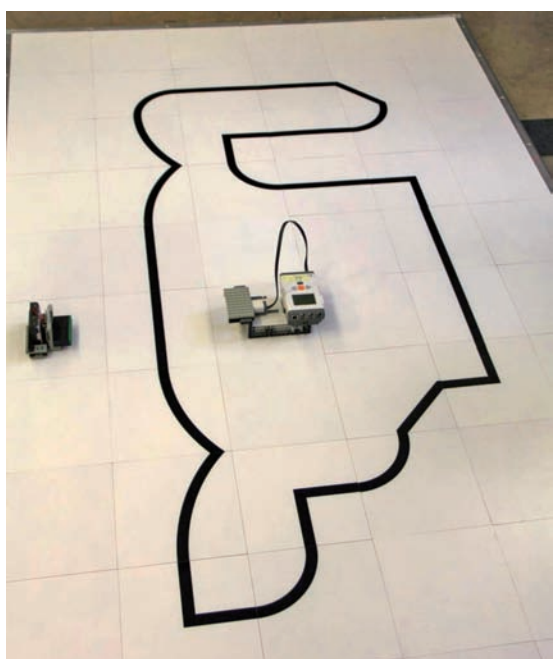




Rys. 7. Przykładowe plansze ułożone z kafli
Fig. 7. Sample boards composed of elements



Rys. 8. Plansza podczas eliminacji
Fig. 8. A board during the qualification phase



Rys. 9. Plansza podczas finałów
Fig. 9. A board during the final phase

na uszkodzenia oraz dokładność wykonania. Ponadto za bardzo ważną cechę środowiska uznaliśmy minimalną wysokość uskoków między złączonymi kafkami. Gotowa trasa miała stanowić spójną całość w postaci gładkiego toru przystosowanego niemal dla każdej konstrukcji robotów Line Follower.

Podstawowym problemem konstrukcyjnym okazał się dobór materiału, z którego miały być wykonane kafki. Pierwszą próbą było wycinanie elementów z blachy. Tak wykonane kafki były odporne na uszkodzenia, ale nie były idealnie płaskie,

przez co po ich połączeniu powstawały uskoki utrudniające robotowi przejazd. Kolejne próby obejmowały wykorzystanie różnego rodzaju tworzyw sztucznych [10], które ocenialiśmy pod kątem sztywności, podatności na trwałe odkształcenia, wytrzymałości na uszkodzenia mechaniczne, możliwości dokładnego cięcia maszynami cyfrowymi oraz dostępnych technik malowania. Jednym z rozważanych materiałów był polichlorek winylu. Testowe kafki, wycięte za pomocą lasera, okazały się być idealnie płaskie i lekkie. Na każdym z nich wyznaczaliśmy kształt trasy za pomocą samoprzylepnej folii wyciętej również laserem. Matowa struktura otrzymanych wzorów nie odbijała światła, dzięki czemu znakomicie sprawdzała się podczas próby przejazdu robota FTL, który do wykrycia czarnej linii korzysta z fotoelektrycznego czujnika odbiciowego. Wadą tak wytworzonych elementów była bardzo niska odporność na uszkodzenia mechaniczne oraz odklejanie się folii przy krawędziach kafki. Polichlorek winylu jest tworzywem kruchym i może pękać w wyniku upadku z wysokości jednego metra na twarde podłoże. W wyniku wielu prób zdecydowaliśmy się na wykonanie toru z płyty poliwęglanowej [9], która została pocięta przez maszynę cyfrową typu waterjet. Na każdym z kafki został naniesiony nadruk przy użyciu technologii utrwalania farby promieniem ultrafioletowym.

Gotowa plansza składa się z 48 elementów o wymiarach 20 cm × 20 cm i tworzy spójną całość dzięki obramowaniu wykonanemu z płaskowników aluminiowych. W naszym laboratorium robotyki mamy do dyspozycji dwa identyczne tory. Duża liczba nadmiarowych elementów pozwala na tworzenie bardzo zróżnicowanych tras o różnym poziomie trudności. Wzory kafki, którymi dysponujemy, przedstawione są na rys. 4.

5. Weryfikacja

Gotowe plansze (rys. 6 i 7) były stosowane podczas organizacji ogólnopolskich zawodów robotów Bionikalia 2014 oraz zajęć laboratoryjnych na Wydziale Elektroniki i Techniki Informatycznych Politechniki Warszawskiej. Użycie materiału, jakim jest poliwęglan, umożliwiło wykonanie niemal idealnie płaskiego podłoża. Konstrukcja niestety nie jest pozbawiona wad. Dopracowania wymaga technologia nadrukowywania wzorów, która w przypadku omawianej planszy okazała się nie być w pełni odporna na zarysowania. Podczas zawodów Bionikalia 2014 wykorzystano różne konfiguracje tras o różnym stopniu trudności w zależności od etapu konkursu (eliminacje (rys. 8), finał (rys. 9)). Plansza finałowa została ułożona we współpracy z uczestnikami zawodów, a poziom jej skomplikowania pozwolił na pokonanie całej trasy jedynie dwóm robotom. W celu wyłonienia trzeciego miejsca na podium została prze-

Tabela 3. Wyniki eliminacji konkurencji Lego Line Follower

Table 3. Qualification phase results – Lego Line Follower

Miejsce	Robot	Czas (s)
1.	Jeździec Apokalipsy	10,07
2.	Protodragon	11,18
3.	Śledź	11,49
4.	Jednoręki T-Rex	12,04
5.	Berpin	12,52
6.	Beton	13,21
7.	Kret	13,56
8.	ROBOBOT	14,41
9.	Cleaner	16,42
10.	Za_lornete	18,09
11.	Monia	18,26
12.	Kwant	22,25
13.	Dziadek	23,23
14.	VERSAL	25,12
15.	Follower	26,15
16.	Chopper	30,41
17.	Linek	33,08
18.	Pisz_Bartek	35,38
19.	Linio Wąchacz	36,63
20.	asdf	39,05

Tabela 4. Wyniki fazy finałowej konkurencji Lego Line Follower

Table 4. Final phase results – Lego Line Follower

Miejsce	Robot	Czas (s)
1.	Jednoręki T-Rex	13,59
2.	Beton	25,01
–	Kret	–
–	Jeździec Apokalipsy	–
–	ROBOBOT	–
–	Śledź	–
–	Berpin	–
–	Protodragon	–

Tabela 5. Dogrywka konkurencji Lego Line Follower

Table 5. Overtime phase results – Lego Line Follower

Miejsce	Robot	Czas (s)
3.	Berpin	16,48
4.	ROBOBOT	20,15
–	Kret	–
–	Jeździec Apokalipsy	–
–	Śledź	–
–	Protodragon	–

przewodzona dogrywka, podczas której ponownie jedynie dwa roboty pokonały całą trasę. Wyniki poszczególnych etapów zostały przedstawione w tabelach 3, 4 i 5.

Możliwości gotowej planszy przedstawiliśmy na filmie: <https://www.youtube.com/watch?v=922RQBibau4>.

5. Podsumowanie

Przegląd zawodów robotów śledzących linię skłonił nas do podjęcia prac nad stworzeniem uniwersalnego i łatwego w rekonfiguracji środowiska ich rywalizacji. Opracowano modułarne plansze, które sprawdziły się już jako element zawodów Bionikalia 2014, a także jako baza do prowadzenia zajęć dydaktycznych na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej. Sukces opracowanego rozwiązania skłania do zaproponowania rozgrywek pucharowych w ramach polskiej serii zawodów w omawianej konkurencji. Ustandaryzowana wersja tras pozwala w szczególności na prowadzenie badań nad algorytmami sterowania robotów, które znajdą zastosowanie podczas wyścigów na trasach budowanych według tych samych, znanych kryteriów.

Podziękowania

Pragniemy podziękować wszystkim osobom z Koła Naukowego Robotyki „Bionik”, bez zaangażowania których organizacja zawodów Bionikalia 2014 nie byłaby możliwa. Podziękowania należą się też Rektorowi Politechniki Warszawskiej, Dziekanowi Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych, Dyrektorowi Instytutu Automatyki i Informatyki Stosowanej, Kołom Naukowym KNTG Polygon, KNEST i KNR, a także sponsorom, którzy istotnie wsparli projekt finansowo i organizacyjnie.

Bibliografia

1. Sven Behnke, Manuela Veloso, Arnoud Visser, Rong Xiong. *RoboCup 2013: Robot Soccer World Cup XVIII*. Springer, 2014.
2. Reinaldo A. C. Bianchi, H. Levent Akin, Subramanian Ramamoorthy, Komei Sugiura. *RoboCup 2014: Robot Soccer World Cup XVII*. Springer, 2015.
3. Martin Buehler, Karl Iagnemma, Sanjiv Singh. *The 2005 DARPA Grand Challenge: The Great Robot Race*. Springer, 2007.
4. Martin Buehler, Karl Iagnemma, Sanjiv Singh. *The DARPA Urban Challenge: Autonomous Vehicles in City Traffic*. Springer, 2009.
5. Calkins D., *An Overview of RoboGames*. IEEE Robotics & Automation Magazine, March 2011, DOI: 10.1109/MRA.2010.940146.
6. Xiaoping Chen, Peter Stone, Luis Enrique Sucar, Tijn van der Zant. *RoboCup 2012: Robot Soccer World Cup XVI*. Springer, 2013.
7. Effertz J., *Sensor Architecture and Data Fusion for Robotic Perception in Urban Environments at the 2007 DARPA Urban Challenge*, [w:] Sommer G., Klette R. (red.), *Robot Vision*, Springer, 2008.
8. Kopacek P., *Automation in Sports and Entertainment*, [w:] Shimon Y. Nof (red.), *Springer Handbook of Automation*. Springer, 2009.
9. Praca zbiorowa, *Poliwęglany*. WNT, 1971.
10. Rabek Jan F., *Polimery: Otrzymywanie, metody badawcze, zastosowanie*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2013.

11. [<http://robogames.net/>] – strona organizatorów zawodów RoboGames.
12. [<http://www.robotchallenge.org/>] – strona organizatorów zawodów RobotChallenge.
13. Thrun S., *Winning the DARPA Grand Challenge*, [w:] Fürnkranz J., Scheffer T., Spiliopoulou M. (red.), *Machine Learning*. ECML 2006. Springer, 2006.

Modularized environment for Line Follower robots

Abstract: The number of worldwide robotic competitions led to the conclusion that sport robotics became an important area of both entertainment and research. The competitions evolve to standardize assumptions for hardware and software of participating robots. This makes the tournament results impartial analogically to Formula 1 car racings. In sport robotics the standardization of competition environment still remains the problem for Line Follower robots. In the article we present research on the specification, development and verification of modularized boards for these robots.

Keywords: modularized environment, robotic competitions, Line Follower, modularized board

Maciej Węgierek

wegierek.maciej@gmail.com

Jest studentem Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej oraz prezesem Koła Naukowego Robotyki „Bionik”. W 2014 r. pełnił funkcję koordynatora zawodów robotów sportowych Bionikalia 2014 w ramach Grantu Rektora Politechniki Warszawskiej. Jego główne zainteresowania naukowe obejmują robotykę manipulacyjną i techniki rozpoznawania obrazów.



inż. Bartosz Świszak

bartswis@gmail.com

Jest studentem Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej oraz wiceprezesem Koła Naukowego Robotyki „Bionik”. W latach 2013–2014 współorganizował zawody robotów sportowych Bionikalia oraz brał udział w dwóch Grantach Rektora Politechniki Warszawskiej. Prowadził też prace badawcze w ramach Grantu Dziekana Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej, a także w projekcie RobREx, finansowanym przez Narodowe Centrum Badan i Rozwoju.



dr inż. Tomasz Winiarski

tmwiniarski@gmail.com

Jest adiunktem w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej. Sprawuje funkcję kierownika laboratorium robotyki w macierzystym instytucie, a także opiekuna studenckiego Koła Naukowego Robotyki „Bionik”, które współtworzył i z którym organizował imprezy popularyzujące robotykę oraz realizował granty badawcze. W 2010 r. otrzymał za osiągnięcia naukowe nagrodę indywidualną drugiego stopnia Rektora Politechniki Warszawskiej, w 2011 r. wyróżnienie w konkursie „Innowator Mazowska”, a także pierwszą nagrodę w konkursie „Młodzi Innowacyjni” PIAP. Jego zainteresowania naukowe dotyczą z jednej strony konstrukcji i nawigacji robotów mobilnych dedykowanych do zadań usługowych, z drugiej strony specyfikacji i implementacji zadań manipulatorów i chwytaków ze szczególnym uwzględnieniem hybrydowego sterowania pozycyjno-siłowego oraz sterowania impedancyjnego. W swoich pracach kierował grantami rektorskimi, dziekańskimi, a także finansowanymi przez Narodowe Centrum Nauki.

