

Robot mobilny o zmiennym sposobie lokomocji – wyniki badań

Dawid Seredyński
Tomasz Winiarski

Zobacz więcej

Pobierz bezpłatną aplikację PAR+
App Store | Google Play



Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej, Politechnika Warszawska

Streszczenie: W artykule przedstawiono opis badań, jakie przeprowadzono na robocie mobilnym *Ryś*, który może poruszać się w dwóch trybach lokomocji: dynamicznie stabilnym oraz statycznie stabilnym. Robot może zmieniać tryb ruchu przez automatyczny manewr wstawiania do pionu.

Słowa kluczowe: robot mobilny, odwrócone wahadło, badania eksperymentalne

Robot *Ryś* to platforma mobilna o dwóch wspólnych kołach i miękkim zderzaku pełniącym rolę trzeciego punktu podparcia (rys. 1). Jest przykładem robota mobilnego działającego na zasadzie odwróconego wahadła. Tego rodzaju roboty są z powodzeniem stosowane w różnorodnych aplikacjach [1, 2]. Układ sterowania robota *Ryś* został opracowany na bazie doświadczeń zdobytych podczas realizacji podobnych projektów [3, 4], jest kaskadą regulatorów PID [5] zaimplementowaną w środowisku ROS [6].



Rys. 1. Baza jezdna robota
Fig. 1. Robot's mobile base

Robot *Ryś* został opisany w trzyczęściowym artykule. Pierwsza część tekstu [7] opisuje konstrukcję mechaniczną i elektroniczną. Druga część [8] przedstawia system sterowania. Niniejsza, trzecia część prezentuje wyniki badań przeprowadzonych na działającym robocie.

Głównym celem badań, na etapie rozwoju oprogramowania, było poszukiwanie właściwych rozwiązań w zakresie algorytmów, strojenia regulatorów oraz struktury systemu sterowania. Przedstawione wyniki badań zostały uzyskane na ostatecznej wersji systemu sterowania.

W tab. 1 przedstawiono wielkości poddane analizie w prezentowanych dalej eksperymentach. Zawierają one informację o zachowaniu się obiektu: zmienne wyjściowe oraz zmienne stanu [9].

Tab. 1. Zestawienie zmiennych układu
Tab. 1. Variables of the control system

| Zmienna | Rodzaj |
|------------------------------------|---------------|
| prąd płynący przez silnik | zm. wyjściowa |
| prąd zadany | zm. stanu |
| prędkość obrotowa silnika | zm. wyjściowa |
| kąt pochylenia | zm. wyjściowa |
| zadany kąt pochylenia | zm. stanu |
| prędkość obrotowa (wzdłuż osi kół) | zm. wyjściowa |
| prędkość liniowa robota | zm. wyjściowa |
| prędkość obrotowa robota | zm. wyjściowa |
| przyspieszenie liniowe robota | zm. wyjściowa |

Wartości zmiennych były odczytywane seriami z częstotliwością 100 Hz i zapisywane do plików w pamięci wewnętrznej laptopa sterującego robotem. Każda seria danych została zaopatrzona w znacznik czasu o dokładności 1 ns. Dzięki temu możliwe było zestawienie, w postaci wykresów, danych z różnych czujników.

Badania dotyczyły jakości działania algorytmów:

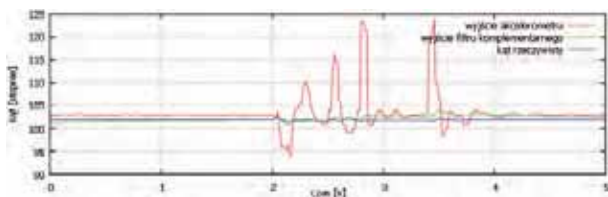
- filtru komplementarnego (pkt 1),
 - manewru wstawiania do pionu (pkt 6),
 - utrzymywania równowagi (pkt 7),
 - wyznaczania trajektorii robota na podstawie odometrii (pkt 9),
- oraz zachowania robota w różnych sytuacjach:
- przejazdu przez próg przodem (pkt 3) i tyłem (pkt 4),
 - jazdy w trybie pionowym (pkt 8),
 - pchania obiektów (pkt 5).
- Porównano także tryb jazdy w pionie z trybem jazdy w poziomie (pkt 2).

1. Działanie filtru komplementarnego

Celem zastosowania filtru było polepszenie jakości pomiaru kąta pochylenia robota, co znajdowało swoje uzasadnienie w literaturze [10]. Filtr łączy sygnały z dwóch czujników [8] o różnych właściwościach, z których żaden samodzielnie nie umożliwia wystarczająco precyzyjnego określenia tej wielkości fizycznej.

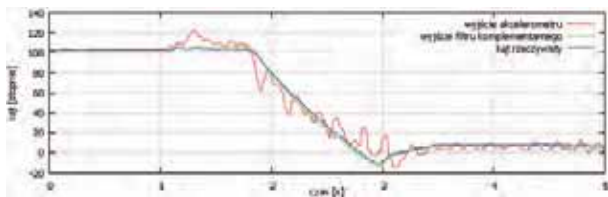
W celu sprawdzenia dokładności sygnału otrzymanego na wyjściu filtru, dodano urządzenie, które umożliwia niezależny pomiar kąta. Kąt mierzony jest przez enkoder zamontowany współosiowo z osią kół. Na rys. 2, 3 i 4 przedstawiono porównanie trzech sygnałów:

- kąta zmierzonego przy użyciu jedynie akcelerometru, sygnał ten jest wynikiem funkcji arcus tangens wyliczonej z dwóch wartości przyspieszenia w kierunku dwóch ortogonalnych wektorów;
- sygnału na wyjściu filtru komplementarnego, łączącego pomiar kąta na podstawie sygnałów z akcelerometru i żyroskopu;
- sygnału z referencyjnego urządzenia do pomiaru kąta, który można uznać za rzeczywistą wartość kąta.



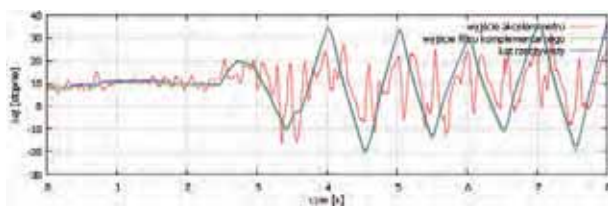
Rys. 2. Przebiegi czasowe obrazujące działanie filtru komplementarnego podczas rozpędzania robota w trybie jazdy z podparciem

Fig. 2. Plot of performance of the complementary filter during non-balancing movement



Rys. 3. Przebiegi czasowe obrazujące działanie filtru komplementarnego podczas manewru wstawiania do pionu

Fig. 3. Plot of performance of the complementary filter during automatic stand-up maneuver



Rys. 4. Przebiegi czasowe obrazujące działanie filtru komplementarnego podczas dużych oscylacji robota w trybie jazdy w pionie, wywołanych przez operatora

Fig. 4. Plot of performance of the complementary filter during movement in balancing mode with oscillations of high amplitude

Na rys. 2 przedstawiono wartości trzech sygnałów zarejestrowane podczas przyspieszania robota w pozycji poziomej, z podparciem. Na wykresie widać gwałtowne skoki wartości kąta zmierzonego na podstawie sygnału z akcelerometru. Błąd pomiaru, który sięga 125° , jest spowodowany nagłymi zmianami przyspieszenia robota w pozycji poziomej, wynikającymi z niskiej rozdzielczości enkoderów

i niskiej częstotliwości regulatora prędkości. Znacznie bliższy wartości rzeczywistej jest kąt wyznaczony przez filtr komplementarny. Nie jest tak bardzo wrażliwy na gwałtowne i krótkotrwałe zmiany przyspieszenia, lecz jego błąd narasta przy długotrwałe działającym przyspieszeniu w jednym kierunku. Błąd ten widać na wykresie: w czasie $t = 2$ s jest bliski 0, zaś dla $t = 4$ s osiąga wartość ok. 2° . Jest to maksymalna wartość błędu, gdyż w chwili $t = 4$ s robot osiąga maksymalną prędkość i nie następuje dalsze przyspieszanie w danym kierunku. Od chwili $t = 4$ s, w której robot porusza się ze stałą prędkością, błąd na wyjściu filtru komplementarnego zmniejsza się.

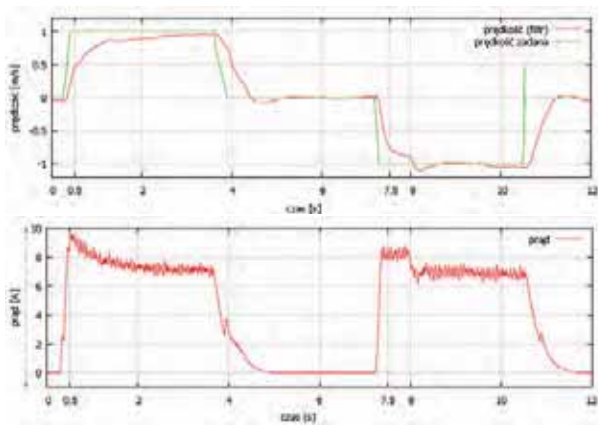
Na rys. 3 przedstawiono zestawienie wartości kąta pochylenia dla manewru wstawiania do pionu, dokładniej opisanego w punkcie 6. W tej sytuacji, w ciągu 1 s następuje duża zmiana kąta pochylenia robota – o ok. 90° . Błąd pomiaru kąta na wyjściu akcelerometru osiąga wartość do 40° i zmienia się w nieprzewidywalny sposób. Z kolei błąd pomiaru kąta na wyjściu filtru nie przekracza 5° i nie wykazuje tak gwałtownych zmian.

Na rys. 4 przedstawiono wyjątkową sytuację, w której podczas jazdy w pozycji pionowej operator zadaje sterowanie w taki sposób, aby robot osiągnął oscylacje kąta o dużej amplitudzie, sięgającej 60° . Dodatkowo, następują gwałtowne zmiany prędkości obrotowej całego robota. W tym przypadku robot podlega zmiennym przyspieszeniom w różnych kierunkach, co widać na wykresie jako chaotyczne zmiany kąta uzyskanego na wyjściu akcelerometru. Kąt zmierzony w ten sposób nie przypomina rzeczywistej wartości, zarówno pod względem amplitudy jak i okresu drgań, dlatego nie może być wykorzystany w algorytmie regulacji. Jednak i w tym przypadku dobrze sprawdza się filtr komplementarny, którego sygnał wyjściowy nie różni się od rzeczywistej wartości o więcej niż 3° .

2. Porównanie trybów jazdy

Na rys. 5 przedstawiono przebiegi czasowe prędkości i prądu dla jazdy do przodu (z ogonem z tyłu) i do tyłu (z ogonem z przodu) w trybie z podparciem. Operator najpierw zadaje maksymalną prędkość do przodu $v = 1 \frac{m}{s}$, następnie zadaje prędkość $v = 0 \frac{m}{s}$, później zadaje maksymalną prędkość do tyłu $v = -1 \frac{m}{s}$, a na końcu ponownie zadaje $v = 0 \frac{m}{s}$. Dzięki temu można na jednym wykresie obserwować niewielkie różnice między jazdą do przodu a jazdą do tyłu.

Podczas jazdy do przodu robot ma mniejsze przyspieszenie i nie osiąga zadanej prędkości, pomimo jej ciągłego wzrostu ($t \in (0 \text{ s}; 4 \text{ s})$). Z kolei podczas jazdy do tyłu, przyspieszenie jest większe, a zmierzona prędkość nieznacznie przekracza prędkość zadaną, by po niedługim czasie ustabilizować się na zadanym poziomie ($t \in (7 \text{ s}; 12 \text{ s})$). Również prąd, podczas jazdy do tyłu, jest nieznacznie mniejszy. Ta niewielka różnica wartości prądu dla jazdy do przodu i do tyłu, wynika z tego, że moment obrotowy generowany przez silniki jest w tym przypadku niewielki, gdyż robot porusza się po płaskim podłożu i silniki nie są mocno obciążone. Największe różnice pomiędzy jazdą do przodu i do tyłu występują przy dużym obciążeniu silników i związanym z tym dużym momentem obrotowym przez nie generowanym. Efekt ten można zaobserwować na wykresie

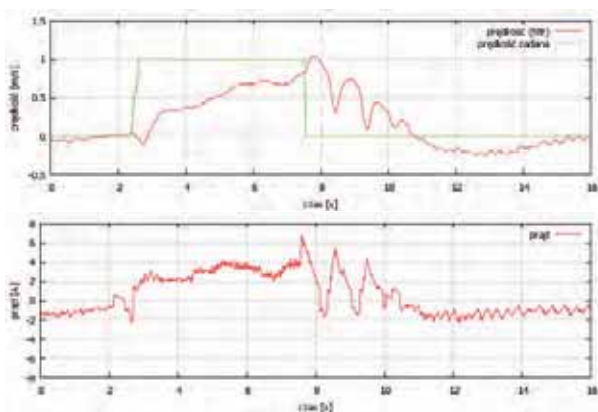


Rys. 5. Przebiegi czasowe prędkości zmierzonej i zadanej oraz prądu podczas jazdy do przodu i do tyłu w trybie z podparciem

Fig. 5. Plot of given and measured velocity and current during moving forward and backward in non-balancing mode

prądu podczas przyspieszania robota, w chwili $t \approx 0,5$ s i $t \approx 7,5$ s. Różnica wartości prądu jest wtedy największa.

Na rys. 6 przedstawiono przebiegi prędkości i prądu dla ruchu w trybie balansowania. W tym trybie robot reaguje znacznie wolniej na zadane sterowanie, osiągając zadaną prędkość $v = 1 \frac{m}{s}$ po około 5 s. Zaletą trybu balansowania



Rys. 6. Przebiegi czasowe prędkości zmierzonej i zadanej oraz prądu podczas jazdy w trybie balansowania

Fig. 6. Plot of given and measured velocity and current during moving in balancing mode

jest mniejszy prąd pobierany przez silniki podczas jazdy. Jest to skutek mniejszego tarcia, gdyż w trybie tym zderzak nie trze o podłoże. Na zmniejszenie natężenia prądu ma wpływ także mniejsza dynamika robota, czyli powolniejsze przyspieszanie i hamowanie. W przeciwieństwie do trybu stabilnego statycznie, podczas balansowania prąd płynie przez silniki nawet podczas postoju, gdyż robot musi wykonywać niewielkie oscylacje wokół punktu równowagi.

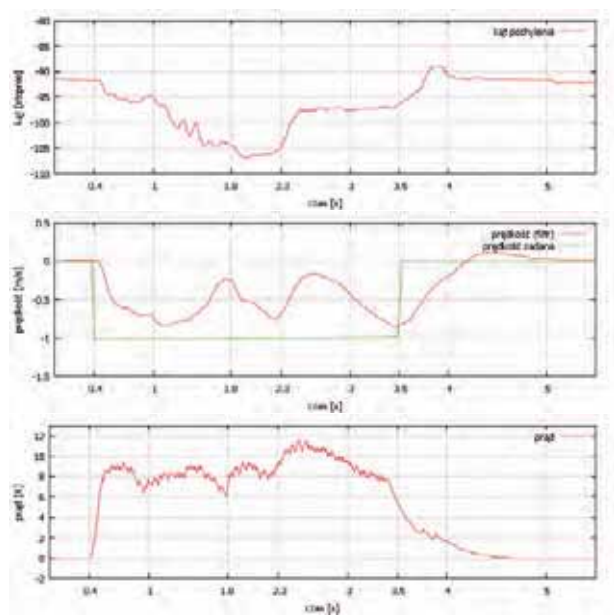
3. Przejazd przodem przez próg

Przejazd przez próg to doświadczenie, w którym robot najjeżdża na stopień o wysokości 8 cm i zatrzymuje się na nim całym swoim obrysem (rys. 7). Manewr ten, w trybie jazdy z podparciem, można wykonać w dwóch wariantach: przodem lub tyłem.



Rys. 7. Stanowisko badawcze dla manewru pokonywania progu
Fig. 7. Test environment for passing a step maneuver

Na rys. 8 przedstawiono przebiegi czasowe kąta odchylenia od pionu, prędkości zmierzonej i zadanej oraz prądu, podczas pokonywania progu przodem.



Rys. 8. Przebiegi czasowe podczas pokonywania progu przodem
Fig. 8. Plot of inclination, velocity and current during passing a step maneuver in forward direction

Manewr przebiegał według harmonogramu:

0 s – 0,4 s – robot stoi nieruchomo.

0,4 s – operator, przy użyciu zadajnika, zadaje prędkość $v = -1 \frac{m}{s}$.

0,4 s – 1,0 s – robot rozpędza się, poruszając się w stronę progu. Niewielka zmiana kąta pochylenia wynika z ugięcia się miękkiego zderzaka z tyłu robota, na skutek działającego na całą konstrukcję momentu siły. Moment ten jest reakcją na ruch obrotowy kół.

1,0 s – pierwszy kontakt kół robota z krawędzią stopnia. Trwający około 0,1 s wzrost prędkości robota wynika z chwilowej utraty kontaktu kół z podłożem. Koła mogą się wtedy swobodnie obracać i bardzo szybko zwiększa się ich prędkość obrotowa. Na rys. 8 została zaznaczona prędkość obrotowa kół. Rzeczywista prędkość robota podczas uderzenia znacznie spada.

1,0 s – 1,8 s – koła stopniowo odzyskują kontakt z podłożem. Skutkiem tego jest spadek ich prędkości obrotowej, gdyż rzeczywista prędkość robota jest znacznie mniejsza.

Kąt pochylenia robota zwiększa się, gdyż koła wjeżdżają na stopień, zaś zderzak nadal znajduje się na niższym poziomie.

1,8 s – 2,3 s – przyczepność kół i podłoża jest na tyle duża, że robot ponownie rozpędza się. Na tym etapie krawędź stopnia znajduje się między kołami a zderzakiem.

2,3 s – następuje kontakt zderzaka z progiem i ponownie prędkość robota zaczyna spadać.

2,3 s – 3,5 s – zderzak odkształca się i zostaje przeciągnięty siłą rozpędu robota przez krawędź stopnia. Po chwilowej utracie prędkości następuje ponowny jej wzrost.

3,5 s – robot znajduje się w całości na stopniu. Operator zadaje prędkość $v = 0 \frac{m}{s}$.

3,5 s – 4,0 s – robot zatrzymuje się.

Opisany manewr trwa około 3,5 s. Przez około 3 s przez silniki płynie prąd o natężeniu ponad 7 A, a w końcowej fazie osiąga wartość ponad 10 A. Pokonywanie progu przodem stanowi duże obciążenie dla akumulatora, gdyż oprócz energii zużytej na podniesienie całego robota na wysokość 8 cm, następuje wydatek energii na jego rozpędzenie oraz na odkształcenie zderzaka i opon. Robot dwukrotnie traci swoją energię kinetyczną, za pierwszym razem podczas uderzenia kół o stopień, a za drugim razem podczas uderzenia zderzaka o stopień.

4. Przejazd tyłem przez próg

Drugim sposobem pokonania progu jest przejechanie przez niego podczas jazdy do tyłu. Podobnie jak w poprzednim doświadczeniu, stopień ma 8 cm wysokości (rys. 9).



Rys. 9. Stanowisko badawcze dla manewru pokonywania progu
Fig. 9. Test environment for passing a step maneuver

Na rys.10 przedstawiono przebiegi czasowe kąta odchylenia od pionu, prędkości mierzonej i zadanej oraz prądu, podczas pokonywania progu tyłem.

Manewr przebiegał według harmonogramu:

0 s – 0,45 s – robot stoi nieruchomo.

0,45 s – operator przy użyciu zadajnika zadaje prędkość $v = 1 \frac{m}{s}$.

0,45 s – 1,0 s – robot rozpędza się, poruszając się w stronę progu. Na skutek dużego przyspieszenia oraz momentu siły działającego na konstrukcję robota zderzak podnosi się nad podłoże, co widać na rys. 10 jako zmniejszenie kąta odchylenia od pionu o około 20°. Przy tak zmniejszonym kącie pochylenia zderzak znajduje się na wysokości ponad 8 cm i dzięki temu przemieszcza się nad krawędzią stopnia.

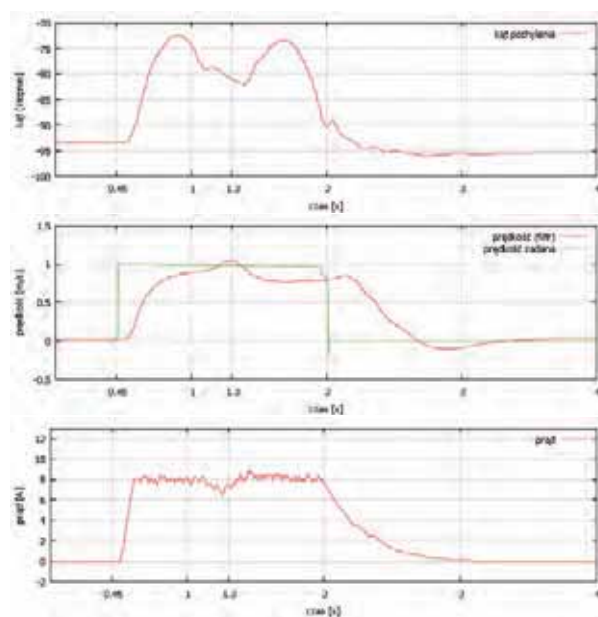
1,0 s – zderzak znajduje się już w całości nad stopniem. Następuje kontakt kół robota z krawędzią stopnia.

1,0 s – 1,3 s – uderzenie kół o próg powoduje chwilową utratę ich kontaktu z podłożem. Następuje krótki wzrost prędkości obrotowej kół w chwili $t = 1,3$ s. Uderzenie powoduje także gwałtowny wzrost kąta odchylenia od pionu i oparcie zderzaka o powierzchnię stopnia.

1,3 s – 2,0 s – koła robota wjeżdżają na stopień. Zderzak odbija się od powierzchni stopnia, co jest widoczne na rys. 10 jako chwilowe zmniejszenie kąta o około 8° i ponowne jego zwiększenie.

2,0 s – robot znajduje się w całości na stopniu. Operator zadaje prędkość $v = 0 \frac{m}{s}$.

2,0 s – 3,0 s – robot zatrzymuje się.

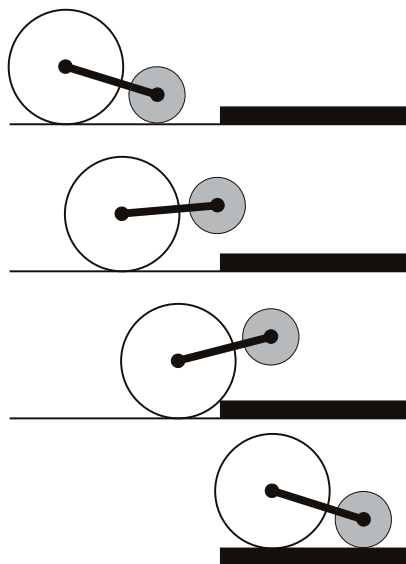


Rys. 10. Przebiegi czasowe podczas pokonywania progu tyłem
Fig. 10. Plot of inclination, velocity and current for passing a step maneuver

Opisany manewr trwa około 2,5 s, zaś prąd o natężeniu nieprzekraczającym 8 A płynie przez jedynie 1,5 s. Przejazd przez próg tyłem jest znacznie bardziej wydajnym i szybszym manewrem niż pokonanie progu przodem. Tak dobry rezultat w porównaniu z poprzednim manewrem wynika z tego, że w tym przypadku nie następuje uderzenie zderzakiem o krawędź stopnia. Zderzak na skutek przyspieszenia robota unosi się nad podłoże na wystarczającą wysokość, aby nie zahaczyć o krawędź stopnia (rys. 11). Dodatkowo, zderzak znajdujący się nad stopniem służy jako przeciwwaga dla całej konstrukcji w chwili uderzenia kół o próg.

5. Pchanie obiektów

W trybie jazdy z podparciem, robot może pchać obiekty na dwa sposoby: przodem oraz tyłem (rys. 12). Przeprowadzone doświadczenia potwierdziły, że bardziej wydajnym sposobem poruszania się w trybie jazdy z podparciem, przy dużym obciążeniu, jest jazda do tyłu. Zaobserwowano także, że pchanie obiektów przodem robota jest znacząco utrudnione przez duży poślizg kół. Znacznie lepsze efek-



Rys. 11. Kolejne etapy przejazdu tyłem przez próg
Fig. 11. Stages of passing a step maneuver

ty daje pchanie przedmiotów zderzakiem robota, podczas jazdy do tyłu.

Na rys. 13 przedstawiono przebiegi czasowe prędkości robota oraz prądu płynącego przez silniki podczas pchania obiektu o masie zbliżonej do masy robota. Obiekt był pchany zderzakiem, podczas jazdy do tyłu.

W czasie $t \in (0\text{ s}; 3,4\text{ s})$ operator, przy użyciu zadajnika, podjeżdża do obiektu. W chwili $t = 3,4\text{ s}$ następuje kontakt z obiektem i operator zwiększa zadaną prędkość. Pomimo zadania maksymalnej prędkości $v = 1\frac{\text{m}}{\text{s}}$, robot nie osiąga jej, gdyż nie pozwala na to ograniczenie prądu, zaimplementowane w sterownikach silników. Obciążenie silników jest zbyt duże, aby przy maksymalnym prądzie 10 A robot mógł rozpędzić się, wraz z pchanym przedmiotem, do prędkości zadanej.

Porównując przebiegi czasowe podczas pchania obiektu (rys. 13) z przebiegami czasowymi podczas jazdy bez dodatkowego obciążenia (rys. 5), można zauważyć różnice w osiągniętej prędkości i w płynącym prądzie. Podczas pchania prąd płynący przez silniki jest większy o około 2 A, osiągając maksymalną dozwoloną wartość, zaś uzyskana prędkość jest o połowę niższa. Różnice te są zależne od masy pchanego obiektu oraz od siły tarcia pomiędzy obiektem a podłożem.

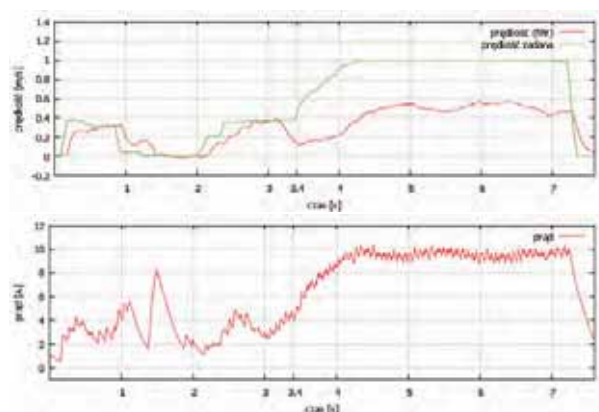
6. Manewr wstawiania do pionu

Wstawianie robota do pozycji pionowej jest manewrem automatycznym. Pozwala na szybkie przejście od trybu jazdy w pozycji poziomej do trybu balansowania w pozycji pionowej. W celu opisanego działania robota podczas tego manewru, na rys. 14 przedstawiono przebiegi czasowe pięciu sygnałów:

- kąta pochylenia robota, wyliczonego przez filtr komplementarny na podstawie sygnałów z żyroskopu i akcelerometru,
- prędkości kątowej robota będącej różnicą kąta pochylenia w aktualnej iteracji i w poprzedniej,



Rys. 12. Robot pchający obiekty o masie zbliżonej do jego własnej
Fig. 12. Robot pushing obstacles

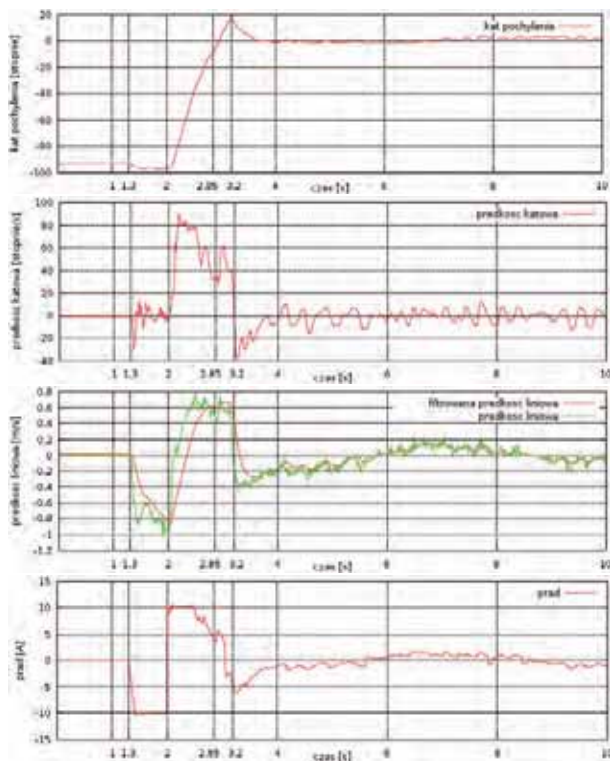


Rys. 13. Przebiegi czasowe podczas pchania obiektu
Fig. 13. Plot of velocity and current when pushing obstacles

- prędkości liniowej robota, wyznaczonej na podstawie danych odometrycznych, będącej rzeczywistą, średnią prędkością kół,
- filtrowanej prędkości liniowej robota, czyli wartości wyznaczonej przez filtr komplementarny, analogiczny do

filtru kąta, lecz operujący na sygnale z akcelerometru (całka przyspieszenia) i na danych odometrycznych,

– wartości średniej prądu płynącego przez silniki.



Rys. 14. Przebieg czasowy kąta pochylenia, prędkości kątowej, prędkości liniowej oraz prądu podczas wstawiania do pionu

Fig. 14. Plot of inclination, angular velocity, linear velocity and current during automatic stand-up maneuver

Manewr był realizowany według następującego harmonogramu:



Rys. 15. Położenie robota podczas automatycznego wstawiania do pionu w chwilach 1,3 s, 2,0 s, 2,8 s, 3,2 s, 4,0 s

Fig. 15. Stages of automatic stand-up maneuver at 1.3 s, 2.0 s, 2.8 s, 3.2 s, 4.0 s

0 s – 1,3 s – robot stoi nieruchomo na płaskim, poziomym podłożu.

1,3 s – operator za pomocą zadajnika uruchamia manewr wstawiania do pionu.

1,3 s – 2,0 s – robot zaczyna poruszać się do przodu z maksymalnym przyspieszeniem. Ten etap zawsze trwa 0,7 s.

2,0 s – po 0,7 s zmienia się sterowanie silników, które zaczynają się obracać w przeciwnym kierunku.

2,0 s – 2,85 s – następuje gwałtowny skok prędkości kątowej robota, który zaczyna wstawać do pionu (rys. 14). Podczas realizacji tego manewru prąd płynący przez silniki jest regulowany jedynie za pomocą regulatora pro-

porcjonalnego. Regulator ustala prąd proporcjonalnie do różnicy kąta zmierzonego i kąta równowagi. W przedziale $t \in (2,0 \text{ s}; 2,5 \text{ s})$ prąd osiąga wartość maksymalną, a w przedziale $t \in (2,5 \text{ s}; 2,85 \text{ s})$ widać proporcjonalną zależność prądu od różnicy kątów. Etap ten trwa tak długo, aż robot osiągnie kąt pochylenia bliski kątowi równowagi, lecz nie dłużej niż 1,3 s.

2,85 s – w chwili osiągnięcia kąta pochylenia w przedziale $(-10^\circ; +10^\circ)$ względem kąta równowagi, manewr wstawania zostaje zakończony, robot przechodzi w tryb balansowania.

4,0 s – po ok. 3 s od rozpoczęcia manewru, robot osiąga stabilną dynamicznie pozycję pionową.

Na rys. 14 widać nieznaczną zmianę kąta w przedziale $t \in (1,3 \text{ s}; 2,0 \text{ s})$, która wynika z podatności zderzaka na działającą na niego siłę. Siła ta jest skutkiem dociążenia punktu podparcia, jakim jest zderzak, podczas przyspieszania całej konstrukcji.

Z kolei w chwili $t \approx 2,85 \text{ s}$ następuje przełączenie robota w tryb balansowania. Postępujące dalej od tego momentu zwiększanie kąta wynika z działania regulatora kąta pochylenia, który po włączeniu wymaga pewnego czasu na ustalenie swojej wartości.

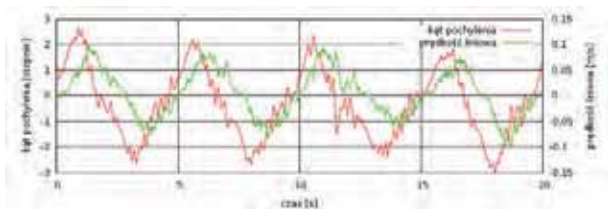
Podobnie, regulator prędkości w trybie balansowania również wymaga ustalenia swojej wartości, co widać na rys. 14 w przedziale $t \in (4,0 \text{ s}; 10,0 \text{ s})$. Wartość kąta równowagi nie jest dokładnie znana i jest korygowana poprzez regulator prędkości. Kąt równowagi to taki kąt pochylenia, w którym robot zachowuje stabilną dynamicznie pozycję pionową przy średniej prędkości postępowej $v \approx 0,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Ze względu na dużo wolniejsze działanie tego regulatora, powolne zmiany prędkości następują jeszcze przez kilka sekund po wstaniu do pionu.

Na rys. 14 przedstawiono przebiegi prędkości zmierzonej na dwa sposoby: przez odometrię oraz przez całkowanie przyspieszenia w osi poziomej. Różnice pomiędzy tymi wartościami w przedziale czasu $t \in (1,3 \text{ s}; 2,0 \text{ s})$ obrazują poślizg kół podczas nagłych zmian zadanego prądu oraz gromadzenie energii poprzez odkształcenie sprężystego zderzaka w początkowej fazie ruchu. Z kolei różnice w przedziale czasu $t \in (2,0 \text{ s}; 4,0 \text{ s})$ wynikają z tego, że w pozycji pionowej akcelerometr znajduje się na pewnej wysokości nad podłożem, na odwróconym wahadle, przez co zmiana prędkości obrotowej kół nie jest ściśle związana z przyspieszeniem mierzonym w punkcie, w którym znajduje się czujnik.

Na rys. 14 w przedziale czasu $t \in (1,4 \text{ s}; 2,5 \text{ s})$ widać efekt ograniczenia maksymalnego prądu płynącego przez każdy z silników. Jest to zabezpieczenie chroniące silniki i układy elektroniczne przed uszkodzeniem oraz chroniące akumulator przed zbyt szybkim rozładowaniem.

7. Utrzymywanie równowagi

Robot stojący w pozycji pionowej wykazuje niewielkie oscylacje w okolicach punktu równowagi. Wykres kąta pochylenia oraz prędkości liniowej robota w stanie równowagi dynamicznej jest przedstawiony na rys. 16. Kąt pochylenia zmienia się w granicach 3° , zaś prędkość oscyluje w granicach $0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Okres oscylacji wynosi około 5 s. Dzięki zastosowaniu regulatora prądu, robot balansując w ustalonej pozycji pionowej, dąży do utrzymania stałej pozycji.

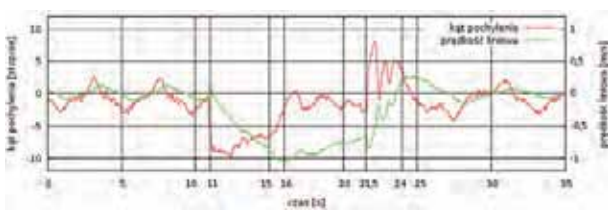


Rys. 16. Przebiegi czasowe podczas utrzymywania równowagi w ustalonej pozycji pionowej
Fig. 16. Plot of inclination and velocity during standing in balancing mode

Przy stosunkowo niewielkich zmianach prędkości robota i jego kąta pochylenia, na wykresie widoczne stają się niewielkie, chaotyczne zmiany obu tych wartości, o częstotliwości rzędu kilkudziesięciu Hz. Wynikają one z niskiej dokładności przyrządów pomiarowych (czujników) oraz niedostatecznej precyzji i rozdzielczości enkoderów. Objawia się to poprzez niewielkie drgania całej konstrukcji, które jednak nie mają większego wpływu na poprawne działanie robota w opisanych tu manewrach.

8. Przyspieszanie i hamowanie w trybie balansowania

W przedstawionym systemie sterowania zaimplementowano możliwość sterowania prędkością postępową i obrotową robota utrzymującego równowagę w pozycji pionowej. Funkcja ta pozwala w pełni wykorzystać zwrotność robota, czyli jego zdolność do obracania się w miejscu, w obszarze wyznaczonym jedynie przez obrys kół. Wprawienie robota stojącego w pozycji pionowej w ruch obrotowy jest trywialne, gdyż wystarczy zadać różne prędkości obrotowe na każde z kół. Znacznie trudniejsze jest nadanie prędkości postępowej, gdyż wiąże się to także ze zmianą kąta pochylenia i uzależnieniem docelowego kąta równowagi od uchybu prędkości. Na rys. 17 przedstawiono zmiany prędkości liniowej i kąta pochylenia robota podczas manewru przyspieszania i hamowania.



Rys. 17. Przebiegi czasowe podczas przyspieszania i hamowania w pozycji pionowej
Fig. 17. Plot of inclination and velocity during acceleration and deceleration

Manewr przebiegał według harmonogramu:

0 s – 11 s – robot utrzymuje równowagę w ustalonej pozycji pionowej.

11 s – operator za pomocą zadajnika zadaje stałą, określoną prędkość. Człon różniczkujący regulatora prędkości gwałtownie zmienia docelowy kąt pochylenia. Z kolei regulator kąta uruchamia silniki robota, które na krótką chwilę zaczynają obracać się w przeciwnym kierunku, dopóki kąt nie osiągnie poziomu zadanego. Jest to widoczne na wykresie

się jako pik prędkości i jednoczesny, nagły skok wartości kąta pochylenia (rys. 17).

11 s – 16 s – od tej chwili robot zaczyna przyspieszać w zadanym kierunku i w miarę zwiększania jego prędkości, zmniejsza się kąt odchylenia od pionu.

16 s – 21,5 s – kiedy zostaje osiągnięta zadana prędkość, robot porusza się ruchem jednostajnym, a kąt odchylenia od pionu jest bliski zeru, podobnie jak podczas stania w miejscu.

21,5 s – operator zadaje prędkość $v = 0 \frac{m}{s}$. Człon różniczkujący regulatora prędkości gwałtownie zmienia zadany kąt pochylenia. Regulator kąta zwiększa zadany prąd w celu zwiększenia kąta pochylenia tak, aby rozpocząć hamowanie. Jest to widoczne na wykresie jako niewielki pik prędkości oraz jednoczesny skok wartości kąta odchylenia od pionu.

21,5 s – 24 s – prędkość robota maleje, kąt pochylenia oscyluje wokół wartości 4° .

24 s – 30 s – po osiągnięciu zadanej prędkości $v = 0 \frac{m}{s}$, następuje ustalenie pozycji i kąta równowagi.

30 s – 35 s – robot osiągnął równowagę i zachowuje się w podobny sposób jak przed wykonaniem manewru.

Podczas manewru przedstawionego na rys. 17 robot przebył drogę około 8 m w czasie około 13 s. Zarówno manewr przyspieszania oraz manewr hamowania trwają ok. 3 s. Manewry te różnią się nieznacznie od siebie. Hamowanie zachodzi w sposób bardziej gwałtowny, pojawiają się wtedy nagłe zmiany kąta pochylenia i prędkości, widoczne dla $t \in (21,5 \text{ s}; 24, 0 \text{ s})$. Różnice wynikają m.in. z nieliniowej charakterystyki silników i przekładni w zależności od ich prędkości obrotowej. Szczotkowy silnik elektryczny generuje moment obrotowy zależny głównie od płynącego prądu oraz prędkości obrotowej. Regulatory prędkości i prądu działają tak samo dla różnych prędkości robota, lecz moment obrotowy generowany przez silniki, a zatem ich odpowiedź na zadane sterowanie są zależne od prędkości z jaką się obracają. Można zilustrować to następującym przykładem, rozpatrując dwa przypadki:

- 1) robot balansując w pozycji pionowej przy prędkości $v \approx 0 \frac{m}{s}$ zostaje odchylny o kąt $\alpha = 10^\circ$ od pozycji równowagi.
- 2) robot jadąc w pozycji pionowej z prędkością $v \approx 1 \frac{m}{s}$ zostaje odchylny o kąt $\alpha = 10^\circ$ od pozycji równowagi w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu.

W drugim przypadku moment obrotowy, który powstanie po osiągnięciu zadanego prądu, będzie większy niż w pierwszym, gdyż zostanie do niego dodany moment związany z oporami ruchu silnika, przekładni i kół. Całkowity moment obrotowy, przy tym samym prądzie, będzie się znacząco różnił w obu przypadkach.

9. Odometria

Robot został wyposażony w enkodery na silnikach, dzięki czemu możliwy jest pomiar kąta, o jaki obróciło się każde koło w danym przedziale czasu. Pozwala to na zastosowanie odometrii.

Przedstawione doświadczenie ukazuje pokrótce możliwości robota w dziedzinie odometrii. Doświadczenie polegało na zdalnym sterowaniu robota w taki sposób, aby poruszał się po trajektorii zbliżonej do wzorcowej. Za wzór przyjęto



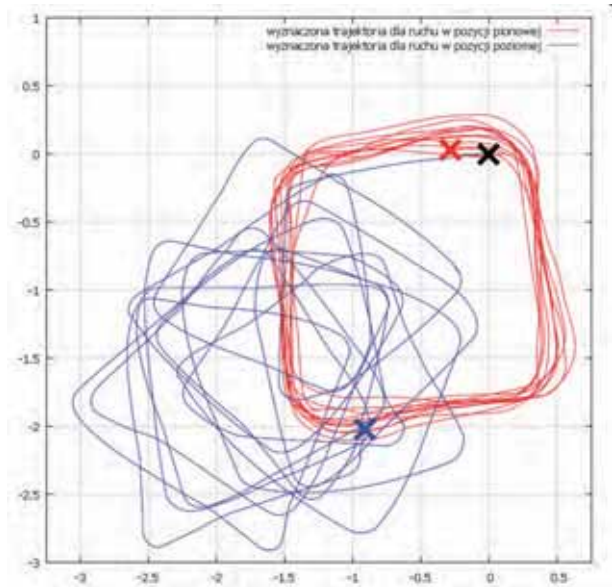
Rys. 18. Stanowisko badawcze dla doświadczenia wyznaczania trajektorii

Fig. 18. Test environment for the odometry experiment

kwadrat o boku 1,8 m (rys. 18). Doświadczenie przeprowadzono w dwóch wariantach: w trybie jazdy z podparciem oraz w trybie utrzymywania równowagi. W obu przypadkach robot miał okrążyć wyznaczony obwód kwadratu 11 razy i zatrzymać się w punkcie startowym. Ruch robota był kontrolowany przez operatora zadającego odpowiednie sterowanie w zależności od obserwowanej rzeczywistej pozycji robota.

Dane z enkoderów zamontowanych na silnikach były przeliczane z częstotliwością 100 Hz na zmianę pozycji robota. Pozycję robota określają trzy zmienne: współrzędne na płaszczyźnie (x , y) oraz orientacja (obrót w osi pionowej). Taka reprezentacja pozycji robota jest uzasadniona przy założeniu, że porusza się on po płaskim, poziomym podłożu.

Rezultat, będący wyznaczoną przez robota trasą po wykonaniu 11 okrążeń po obwodzie kwadratu i zatrzymaniu się w tym samym miejscu, przedstawiono na rys. 19. Czarnym znakiem X oznaczono punkt startowy dla obu przejazdów. Linia czerwona zaznaczono estymowaną trasę dla ruchu w trybie jazdy z utrzymywaniem równowagi (w pionie) zaś linią niebieską zaznaczono estymowaną trasę w trybie jazdy z podparciem. Czerwonym znakiem X oznaczono punkt, w którym zatrzymał się robot po wykonaniu 11 okrążeń w trybie jazdy w pionie, zaś niebieskim znakiem X oznaczono punkt, w którym robot zatrzymał się po 11 okrążeń w trybie jazdy z podparciem.



Rys. 19. Estymowana trajektoria robota po wykonaniu 11 okrążeń po obwodzie kwadratu w trybie jazdy z podparciem (kolor niebieski) oraz dla trybu balansowania (kolor czerwony)

Fig. 19. Estimated robot's trajectory after 11 laps along a square. The blue is for trajectory in non-balancing mode, and the red colour is for trajectory in balancing mode

Różnice w dokładności estymowanej trasy są widoczne na pierwszy rzut oka. Robot był sterowany przez człowieka i w związku z tym, rzeczywista trasa robota była jedynie zbliżona do kwadratu o zaokrąglonych rogach. Dołożono jednak wszelkich starań, aby punkt startowy i końcowy były oddalone od siebie o nie więcej niż 0,1 m.

Trasa wyznaczona w trybie jazdy w pionie (kolor czerwony) przypomina kwadrat o boku 1,8 m, o zaokrąglonych rogach, a punkt końcowy leży w odległości około 0,3 m od punktu startowego. Z kolei trasa wyznaczona w trybie jazdy z podparciem wygląda bardziej chaotycznie, a punkt końcowy leży w odległości około 2,5 m od punktu startowego.

Tak duże różnice w dokładności wyznaczonej trasy w trybie jazdy z podparciem wynikają ze znacznego poślizgu kół podczas skręcania, przyspieszania i hamowania. Poślizg ten jest wynikiem odciążenia obu kół przez trzeci punkt podparcia – zderzak. W trybie jazdy w pionie robot stoi jedynie na dwóch punktach, przez co siła nacisku na każde koło jest większa. Dzięki temu większa jest także maksymalna siła tarcia, przy której koło nie wpada w poślizg. Dodatkowo, w trybie jazdy w pionie robot porusza się wolniej i bardziej płynnie niż w trybie jazdy z podparciem. Wykonanie 11 okrążeń w trybie jazdy w pionie trwało 202 s, zaś w trybie jazdy z podparciem 107 s.

10. Podsumowanie

Robot mobilny *Ryś* to platforma o dużych możliwościach. Sprawnie porusza się w dwóch trybach jazdy: pionowym i poziomym, oraz może samodzielnie wstawać do pionu. Dzięki temu łączy w sobie zalety robotów balansujących oraz robotów stabilnych statycznie. W trybie stabilnym statycznie robot może poruszać się po nierównym podłożu, pchać różne przedmioty, mieści się w niskich przejściach

oraz może poruszać się szybciej, z większą dynamiką. Odbywa się to kosztem większego tarcia i związanego z tym większego poboru mocy. Z kolei, w trybie pionowym koła są lepiej dociskane do podłoża oraz nie występuje tarcie zderzaka. Dzięki temu robot pobiera mniej mocy podczas jazdy oraz charakteryzuje się znacznie dokładniejszą odometrią. W trybie tym, jego ruchy są powolniejsze i bardziej płynne. Robot jest wyższy niż w trybie poziomym oraz zajmuje mniejszą powierzchnię. Potrafi dzięki temu zawracać w ograniczonej przestrzeni. Wadą balansowania jest ciągły pobór mocy, nawet podczas stania w miejscu, związany z niewielkimi ruchami koniecznymi do utrzymywania równowagi.

Ze względu na niewielką zajmowaną powierzchnię oraz stosunkowo dużą wysokość, w przyszłości robot mógłby wykonywać takie zadania jak:

- patrolowanie terenu,
- śledzenie lub wskazywanie drogi (np. robot–przewodnik),
- informowanie (np. mobilna informacja turystyczna).

Podziękowania

Tomasz Winiarski dziękuje za wsparcie otrzymane w postaci stypendium współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, które przyznawane jest przez Centrum Studiów Zaawansowanych Politechniki Warszawskiej w ramach projektu „Program Rozwojowy Politechniki Warszawskiej”. Projekt był finansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2012/05/D/ST6/03097.

Bibliografia

1. Stilman M., Olson J., Gloss W. (May, 2010): *Golem Krang: Dynamically Stable Humanoid Robot for Mobile* William Gloss, [in:] IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA'10, IEEE.
2. Cazzolato B. S., Harvey J., Dyer C., Fulton K., Schumann E. J., Zhu T., Prime Z. D., Davis B., Hart S. C., Pearce E., et al., *Modeling, simulation and control of an electric diwheel*, [in:] Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA), 2011.
3. Zieliński C., Kornuta T., Trojanek P., Winiarski T., *Metoda projektowania układów sterowania autonomicznych robotów mobilnych. Część 1. Wprowadzenie teoretyczne*, "Pomiary Automatyka Robotyka" 9/2011, 84–87.
4. Zieliński C., Kornuta T., Trojanek P., Winiarski T., *Metoda projektowania układów sterowania autonomicznych robotów mobilnych. Część 2. Przykład zastosowania*, "Pomiary Automatyka Robotyka" 10/2011, 84–91.
5. Chang W.-D., Hwang R.-C., Hsieh J.-G., *A self-tuning PID control for a class of nonlinear systems based on the Lyapunov approach*, "Journal of Process Control" 2/2002, 233–242.
6. Cousins S., *ROS on the PR2 [ROS Topics]*, "Robotics & Automation Magazine, IEEE" 3/2010, 23–25.
7. Seredyński D., Winiarski T., Banachowicz K., Walęcki M., Stefańczyk M., Majcher P., *Robot mobilny o zmiennym sposobie lokomocji – konstrukcja mechaniczna i elektroniczna*, "Pomiary Automatyka Robotyka" 1/2013, 162–167.

8. Winiarski T., Seredyński D., *Robot mobilny o zmiennym sposobie lokomocji – system sterowania*, "Pomiary Automatyka Robotyka" 5/2013, 93–99.
9. A. Markowski A. L.J. Kostro (1985): *Automatyka w pytaniach i odpowiedziach*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
10. Kim Y., Kim S. H., Kwak Y. K., *Dynamic analysis of a nonholonomic two-wheeled inverted pendulum robot*, "Journal of Intelligent & Robotic Systems" 1/2005, 25–46. ■

Mobile robot with two modes of locomotion – experimental results

Abstract: The article describes experiments performed on mobile robot that can move in two modes of locomotion: dynamically stable and statically stable. The robot can switch between these two modes with automatic maneuver.

Keywords: mobile robot, inverted pendulum, experimental results

mgr inż. Dawid Seredyński

W 2012 r. ukończył Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej. Był aktywnym członkiem koła robotyki „Bionik” na macierzystym wydziale, gdzie tworzył i rozwijał układy sterowania robotów mobilnych. Podsumowaniem badań prowadzonych w trakcie studiów była praca magisterska „System sterowania dwukołowym robotem mobilnym o zmiennym sposobie lokomocji”, która została obroniona z wyróżnieniem, a rok później uzyskała także wyróżnienie w V edycji konkursu „Młodzi Innowacyjni” PIAP.
e-mail: dawid.seredyński@gmail.com



dr inż. Tomasz Winiarski

Jest adiunktem w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej. Sprawuje funkcje kierownika laboratorium robotyki w macierzystym instytucie, a także opiekuna studenckiego koła naukowego „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 PW, w 2011 r. wyróżnienie w konkursie „Innowator Mazowsza”, 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.
e-mail: tmwiniarski@gmail.com

