

# Generowanie ruchu robota dwunożnego z wykorzystaniem danych opisujących chód człowieka

▶ Maciej T. Trojnecki

W artykule przedstawiono metodę generowania ruchu robota dwunożnego z wykorzystaniem zarejestrowanego chodu człowieka. Zarejestrowane dane zmodyfikowano uwzględniając możliwą dla napędów robota prędkość ruchu. Ponieważ zawierały one tylko wybrane kąty stawowe, dlatego uzupełniono brakujące wielkości w taki sposób, aby zapewnić balansowanie dynamiczne robota. Zrealizowano to tak, aby otrzymać odpowiednią trajektorię ruchu punktu zerowego momentu. Rozważania teoretyczne zostały poparte symulacją i animacją z zastosowaniem pakietu Matlab/Simulink i przybornika Virtual Reality, które potwierdziły poprawność proponowanej metody.

**W**spółcześnie obserwuje się burzliwy rozwój robotów kroczących, w szczególności robotów dwunożnych. Intensywne prace badawcze nad takimi robotami prowadzone są w krajach dalekiego wschodu. Podejmowane są próby budowy robotów humanoidalnych (Honda ASIMO, Sony QRIO) oraz maszyn mających zastąpić tradycyjny wózek kołowy dla osób niepełnosprawnych odpowiednikiem w postaci maszyny kroczącej. Maszyny takie (Waseda WL-16R, Toyota iFoot, KAIST Hubo FX-1) sterowane są przez człowieka.

Większość robotów dwunożnych jest z założenia przeznaczonych do edukacji i badań bądź produkowanych jako zabawki. Niektóre roboty humanoidalne, jak Honda ASIMO [1], są pomyślane jako roboty osobiste, wspomagające ludzi starszych lub niepełnosprawnych.

Projektowanie robotów kroczących jest zadaniem trudnym pod wieloma względami. Do podstawowych problemów można zaliczyć syntezę ruchu, która w przypadku lokomocji dyskretnej jest znacznie trudniejsza w porównaniu z lokomocją ciągłą. Złożonym zadaniem jest także analiza dynamiczna tego typu robotów. Badacze zazwyczaj realizują ruch robotów dwunożnych poprzez syntezę ich ruchu bazującą na tzw. kryterium ZMP [1, 2, 5–10] (ang. *zero moment point* – punkt zerowego momentu), w której rozwiązywane jest zadanie odwrotne kinematyki. Ponieważ dla wyprostowanej nogi robota występuje konfiguracja osobliwa, dlatego roboty dwunożne poruszają się zazwyczaj cały czas na lekko ugiętych nogach, co nie jest obserwowane podczas typowego chodu człowieka. Dodatkowo, ruch robota na ugiętych nogach pogarsza jego wydajność energetyczną. Z tych powodów uzasadnione jest generowanie ruchu robotów oparte

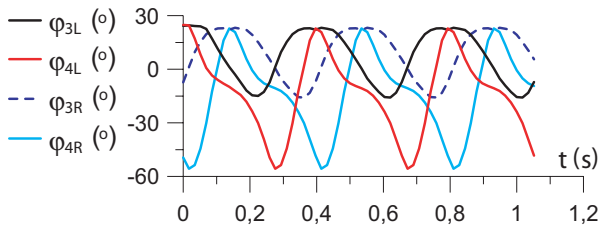
na wzorcach biologicznych, w szczególności bazujące na zarejestrowanym chodzie człowieka [11]. W pracy [12] podano metodę syntezy chodu robota dwunożnego z pominięciem konieczności rozwiązywania zadania odwrotnego kinematyki. Metoda nawiązuje do koncepcji biologicznych generatorów rytmu ruchu.

W niniejszym artykule zaprezentowano metodę generowania ruchu robota dwunożnego z wykorzystaniem wzorca chodu człowieka. Zarejestrowane dane zmodyfikowano uwzględniając możliwą dla napędów robota prędkość ruchu. Ponieważ danymi wejściowymi były jedynie kąty przegubowe w biodrach i kolanach robota, dlatego konieczna była identyfikacja faz ruchu robota na podstawie tych kątów i wyznaczenie pozostałych wielkości niezbędnych do realizacji ruchu przez robota. Kąty przegubowe w pozostałych przegubach robota wyznaczono w taki sposób, aby robot w trakcie chodu balansował ciałem. W tym celu, bazując na znanych parametrach masowych robota (masa, współrzędne środka masy, tensor bezwładności), wyznaczono zmianę w trakcie ruchu położenia środka masy robota i punktu zerowego momentu. Przechylenie robota zrealizowano w taki sposób, aby punkt zerowego momentu poruszał się po zadanej trajektorii zapewniającej odpowiednie balansowanie dynamiczne. Badania symulacyjne dla prezentowanej metody zrealizowano z zastosowaniem pakietu Matlab/Simulink. Dodatkowo wykonano animację ruchu robota z zastosowaniem przybornika Virtual Reality w celu wizualnej weryfikacji poprawności wygenerowanego ruchu.

## Rejestrowanie chodu człowieka

W niniejszej pracy posłużono się danymi opisującymi chód człowieka, zebranymi przez autorów publikacji [12]. Są to przebiegi czasowe kątów stawowych w biodrach (związane z unoszeniem nogi) i kolanach – rys. 1. Zarejestrowano je podczas chodu człowieka.

▶ dr inż. Maciej T. Trojnecki  
– Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów



**Rys. 1.** Wynik rejestracji chodu człowieka [12]: kąty stawowe w biodrach ( $\varphi_{3L}, \varphi_{3R}$ ) i kolanach ( $\varphi_{4L}, \varphi_{4R}$ ) (L - lewa noga, R - prawa noga)

Zastosowano konwencję, według której kąty mierzone są w stopniach względem linii pionowej, przy zachowaniu zasady, że odpowiedni człon nogi wysunięty do przodu w stosunku do linii pionowej oznacza kąt dodatni, do tyłu - kąt ujemny, w przypadku pokrywania się - kąt zerowy. Dane były rejestrowane ze stałą częstotliwością, wynoszącą 58 pakietów danych na sekundę.

## Robot dwunożny

### Struktura kinematyczna

Analizowany jest dwunożny robot kroczący o dwunastu stopniach swobody [4]. Każda noga ma 6 aktywnych stopni swobody: 3 w stawie biodrowym, 1 w kolanie i 2 w stawie skokowym. Taka struktura nóg umożliwiła realizację ruchu robota zbliżoną do człowieka. Nogi robota zakończone są stopami mającymi kształt prostokąta.

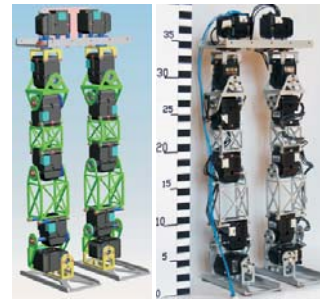
Przyjętą strukturę kinematyczną robota pokazano na rys. 2. Na rysunku wprowadzono oznaczenia członów robota, charakterystycznych punktów, kątów związanych z orientacją korpusu, układu współrzędnych zwią-

zanego z korpusem oraz kątów przegubowych dla nogi robota. Zaznaczono także istotne wymiary robota.

### Opis oznaczeń

Definiuje się dwa układy współrzędnych: układ OXYZ - nieruchomy układ odniesienia związany z podłożem oraz układ Rxyz związany z korpusem robota (rys. 2). Zakłada się, że w chwili początkowej oba układy są jednakowo zorientowane oraz dodatkowo osie obu układów pokrywają się. Indeks górny po lewej stronie symbolu danej wielkości oznacza układ odniesienia, w którym ta wielkość jest wyrażona, a indeks dolny po prawej stronie uściśla tę wielkość podając oznaczenie współrzędnej ( $x, y, z$ ), oznaczenie nogi, oraz (o ile dotyczy) numer członu nogi. Symbolem  $i$  oznacza się numer członu dalej nogi ( $i=1, \dots, 6$ ), poszczególne nogi oznaczane są indeksem  $j=\{L, R\}$ , gdzie:  $L$  oznacza lewą, a  $R$  prawą nogę. Na przykład  ${}^0v_{AL}$  oznacza wielkość  $v$  wyrażoną w układzie OXYZ przyłożoną w punkcie AL, czyli w punkcie A lewej nogi.

### Konstrukcja robota

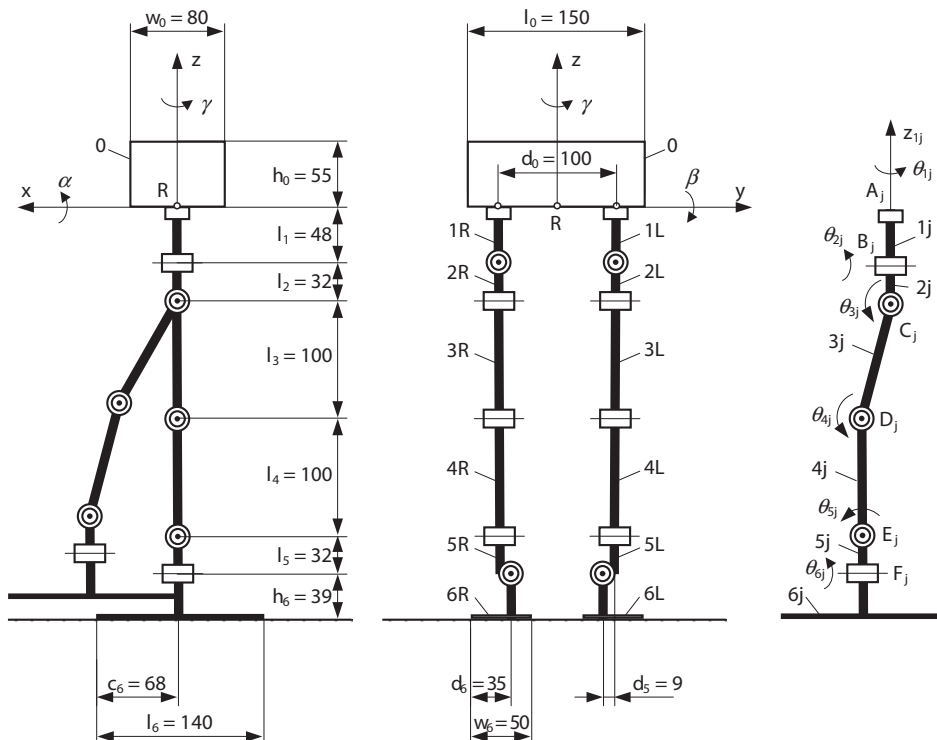


**Rys. 3.** Konstrukcja robota zaprojektowana w programie Unigraphics i konstrukcja rzeczywista [4]

Konstrukcję robota (rys. 3) zaprojektowano w programie Unigraphics i wykonano w ramach pracy [3]. W konstrukcji robota zastosowano zaawansowane technologicznie serwonapędy Dynamixel DX-113 i DX-116. Wybrane parametry tych napędów zestawiono w tab. 1.

Wynikiem projektu zrealizowanego w środowisku Unigraphics są parametry masowe robota, które uwzględniono w badaniach symulacyjnych. Masa całkowita robota wynosi około  $m=1,5$  kg, masy poszczególnych członów wynoszą odpowiednio: korpusu  $m_0=0,363$  kg, górnej części biodra  $m_1=0,096$  kg, dolnej części biodra  $m_2=0,013$  kg, uda  $m_3=0,171$  kg, goleń  $m_4=0,103$  kg, kostki  $m_5=0,092$  kg, stopy  $m_6=0,101$  kg.

Rozpoczęto prace związane z nową wersją stopy, w której zamontowane są sprężyny. Umożliwi to wprowadzenie dodatkowej podatności stopy i zapewnienie łagodniejszego przejścia z fazy podporowej do



**Rys. 2.** Struktura kinematyczna robota z zaznaczeniem istotnych wymiarów i oznaczeń kątów przegubowych dla  $j$ -tej nogi [4]

**Tab. 1.** Wybrane parametry serwonapędów zastosowanych w robocie

	DX-113	DX-116
Masa (g)	58	66
Przełożenie przekładni	192,6	142,5
Maksymalny moment trzymający (Nm) dla napięcia zasilania 12 V	2,01	2,79
Rozdzielczość (°)	0,35	0,35
Zakres kątowy (°)	300	300
Maksymalna prędkość kątowa (°/s)	400	472

fazy przenoszenia i odwrotnie. Specjalny mechanizm zatraskowy umożliwi także akumulację energii w fazie podparcia i wykorzystanie jej w chwili rozpoczęcia fazy przenoszenia.

## Generowanie ruchu robota dwunożnego

### Przekształcenie zarejestrowanych danych w kąty przegubowe robota

Przed przystąpieniem do generowania ruchu robota na podstawie zarejestrowanych kątów stawowych dla chodu człowieka, dokonano przekształcenia ich w kąty przegubowe przyjęte w modelu robota, korzystając z zależności:

$$\theta_{3j} = -\varphi_{3j}, \theta_{4j} = \varphi_{3j} - \varphi_{4j}, \theta_{5j} = -\theta_{3j} - \theta_{4j}, j = \{L, R\} \quad (1)$$

W rezultacie otrzymano 6 kątów przegubowych. Na wstępie założono, że podczas ruchu robota jego stopy nie będą pochylone względem korpusu. Tutaj analizowany jest wyłącznie ruch robota do przodu, dlatego niezbędne jest wygenerowanie dodatkowo tylko czterech kątów związanych z odwodzeniem nóg i prze-

chyłaniem stóp. Aby dostosować przebiegi czasowe kątów przegubowych robota do możliwych dla napędów robota prędkości kątowych zmieniono krok dyskretyzacji na  $dt = 0,08$  s, czyli spowolniono przebiegi w stosunku 1:4,64. W wyniku przekształceń otrzymano kąty i prędkości przegubowe pokazane na rys. 4. Maksymalne prędkości kątowe występują w kolanach i wynoszą ok. 200°/s.

### Identyfikacja faz ruchu

Na podstawie wyznaczonych kątów przegubowych robota  $\theta_{3j} - \theta_{5j}$  nie można bezpośrednio określić, kiedy dana noga jest w fazie przenoszenia, a kiedy w fazie podparcia, ani jaki jest tor ruchu punktu R korpusu. Charakterystyczne fazy ruchu robota można wyodrębnić analizując współrzędne punktów F<sub>j</sub> w układzie związanym z korpusem, korzystając z zależności:

$${}^R x_{Fj} = -l_2 s_{1j} s_{2j} - l_3 (c_{1j} s_{3j} + s_{1j} s_{2j} c_{3j}) - l_4 (c_{1j} s_{34j} + s_{1j} s_{2j} c_{34j}) - l_5 (c_{1j} s_{345j} + s_{1j} s_{2j} c_{345j}) \quad (2a)$$

$${}^R y_{Fj} = \pm d_0 / 2 \pm l_2 c_{1j} s_{2j} - l_3 (s_{1j} s_{3j} - c_{1j} s_{2j} c_{3j}) - l_4 (s_{1j} s_{34j} - c_{1j} s_{2j} c_{34j}) - l_5 (s_{1j} s_{345j} + c_{1j} s_{2j} c_{345j}) \quad (2b)$$

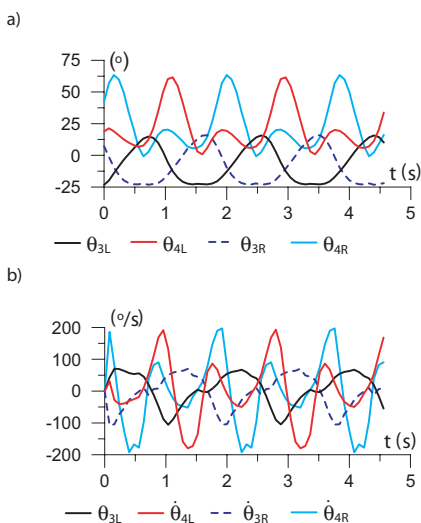
$${}^R z_{Fj} = -l_1 - l_2 c_{2j} - l_3 c_{2j} c_{3j} - l_4 c_{2j} c_{34j} - l_5 c_{2j} c_{345j} \quad (2c)$$

gdzie:

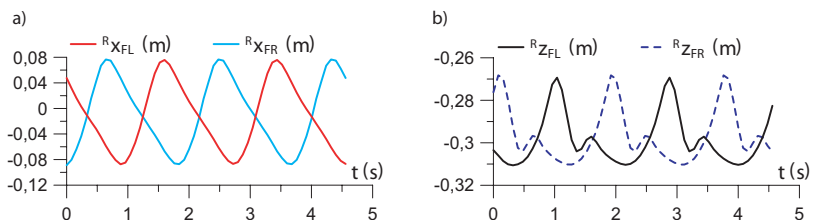
$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}, c_{ij} = \cos \theta_{ij}, s_{34j} = \sin(\theta_{3j} + \theta_{4j}), c_{34j} = \cos(\theta_{3j} + \theta_{4j}), s_{345j} = \sin(\theta_{3j} + \theta_{4j} + \theta_{5j}), c_{345j} = \cos(\theta_{3j} + \theta_{4j} + \theta_{5j}).$$

Dla  $j=L$  w równaniu (2b) w miejsce  $\pm$  należy wstawić znak „+”, a dla  $j=R$  znak „-”.

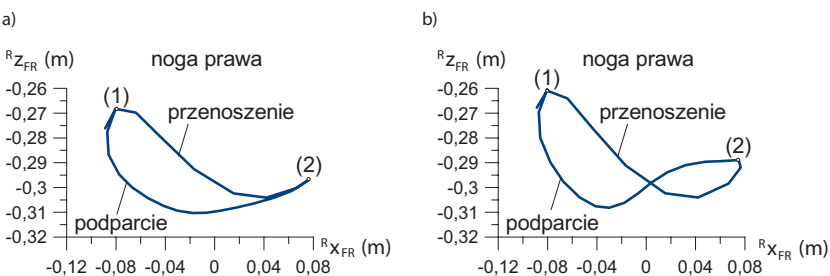
Uzyskane przebiegi współrzędnych pokazano na rys. 5, a na rys. 6a tor ruchu dla prawej nogi. Przebiegi pokazane na rys. 5 oraz tor ruchu punktu FR z rys. 6a są wyznaczone wstępnie, zakładając brak balansowania ciałem ( $\theta_{2j} = \theta_{6j} = 0$ ).



**Rys. 4.** Kąty i prędkości kątowe w przegubach robota otrzymane w wyniku przekształcenia kątów stawowych zarejestrowanych w trakcie chodu człowieka

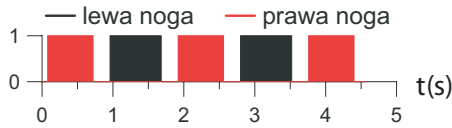


**Rys. 5.** Przebiegi czasowe współrzędnych x i z punktów F dla lewej i prawej nogi w układzie związanym z korpusem robota w przypadku braku balansowania



**Rys. 6.** Tory ruchu punktu F dla prawej nogi w płaszczyźnie xz układu związanego z korpusem robota w przypadku braku balansowania ciała (a), oraz dla balansowania (b)

Bazując na przebiegach współrzędnych punktów F<sub>j</sub> (rys. 5) zidentyfikowano fazy ruchu robota związane z przenoszeniem i podparciem poszczególnych nóg, co pokazano na rys. 7. Wartość 0 oznacza fazę podparcia, a 1 fazę przenoszenia danej nogi.



Rys. 7. Fazy ruchu nóg: 0 - podparcie, 1 - przenoszenie

## Balansowanie dynamiczne

Bez dodatkowego balansowania robot przewróciłby się już na początku ruchu, dlatego na podstawie znajomości faz ruchu robota oraz kątów przegubowych  $\theta_{3j} - \theta_{5j}$  opracowano metodę balansowania dynamicznego. W tym celu przyjęto założenia, że w trakcie balansowania korpus robota nie ulega przechyleniu ( $\alpha = 0$ ), a jedynie bocznemu wychyleniu oraz że między kątami przegubowymi  $\theta_{2j}$  i  $\theta_{6j}$  zachodzi zależność:

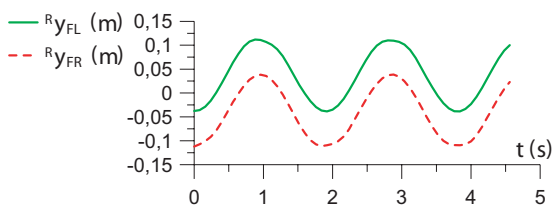
$$\theta_{2j} = -\theta_{6j} \quad (3)$$

Kąty te wygenerowano w taki sposób, aby zapewnić balansowanie dynamiczne robota, tj. aby punkt zerowego momentu poruszał się po odpowiedniej trajektorii. Założono, że maksymalne przechylenie powinno występować w połowie fazy dwupodporowej.

Przejście między jednym a drugim skrajnym przechyleniem powinno następować łagodnie - przebiegi kątów  $\theta_{2j}$  i  $\theta_{6j}$  mogą mieć kształt sinusoidy, a ich amplituda powinna być tak dobrana, aby przy maksymalnym bocznym wychyleniu korpusu robota punkt zerowego momentu znajdował się we wnętrzu powierzchni stopy tej nogi, która za chwilę jako jedyna będzie w fazie podparcia.

Dla omawianej konstrukcji robota amplituda ta wynosi około 18°. Efektem wprowadzenia balansowania dynamicznego robota była modyfikacja toru ruchu punktów F<sub>j</sub> (rys. 6b).

Przed wprowadzeniem balansowania ciałem, współrzędne  ${}^R y_{Fj}$  tych punktów były stałe i wynosiły  $d_0/2$ , natomiast po wprowadzeniu balansowania mają one postać pokazaną na rys. 8.



Rys. 8. Przebiegi czasowe współrzędnych y punktów F dla lewej i prawej nogi w układzie związanym z korpusem robota po wprowadzeniu balansowania ciałem

## Położenie środka masy i punktu zerowego momentu

Aby zweryfikować przyjętą metodę balansowania dynamicznego obliczono, jak w trakcie ruchu zmieniają się współrzędne środka masy robota i punktu zerowego momentu.

Współrzędne środka masy robota (CG) w układzie Rxyz wyznacza się z zależności:

$${}^R w_{CG} = \frac{m_0 {}^R w_0 + \sum_i \sum_j m_i {}^R w_{ij}}{m} \quad (4)$$

gdzie:  $i$  - numer członu robota w ramach danej nogi ( $i = 1 \dots 6$ ),  $j = \{L, R\}$  - oznaczenie nogi,  ${}^R w_0, {}^R w_{ij}$  - odpowiednia współrzędna środka masy,  $w = \{x, y, z\}$ ,  $m_0$  - masa korpusu,  $m_i$  - masa członu  $i$  należącego do nogi (lewej lub prawej),  $m$  - masa całkowita robota.

Punkt zerowego momentu (ZMP) ma dwie interpretacje [10]. Według jednej z nich jest to punkt, w którym całkowity moment pochodzący od sił ciężkości i bezwładności działających na robota ma składowe poziome równe zero. Według drugiej interpretacji jest to punkt, w którym składowe poziome momentów pochodzących od sił i momentów sił reakcji są równe zero.

Jeżeli punkt zerowego momentu zawiera się we wnętrzu powierzchni podparcia, kontakt pomiędzy podłożem, a podpartą nogą (lub podpartymi nogami) jest stabilny tj. nie występują żadne obroty względem krawędzi stopy (lub stóp).

Współrzędne ZMP wg pierwszej interpretacji można określić z zależności:

$${}^R x_{ZMP} = \frac{m_0 ({}^R \ddot{z}_0 - {}^R g) {}^R x_0 + \sum_i \sum_j m_i ({}^R \ddot{z}_{ij} - {}^R g) {}^R x_{ij} - m_0 {}^R \ddot{x}_0 {}^R z_0 - \sum_i \sum_j m_i {}^R \ddot{x}_{ij} {}^R z_{ij}}{m_0 ({}^R \ddot{z}_0 - {}^R g) + \sum_i \sum_j m_i ({}^R \ddot{z}_{ij} - {}^R g)} \quad (5a)$$

$${}^R y_{ZMP} = \frac{m_0 ({}^R \ddot{z}_0 - {}^R g) {}^R y_0 + \sum_i \sum_j m_i ({}^R \ddot{z}_{ij} - {}^R g) {}^R y_{ij} - m_0 {}^R \ddot{y}_0 {}^R z_0 - \sum_i \sum_j m_i {}^R \ddot{y}_{ij} {}^R z_{ij}}{m_0 ({}^R \ddot{z}_0 - {}^R g) + \sum_i \sum_j m_i ({}^R \ddot{z}_{ij} - {}^R g)} \quad (5b)$$

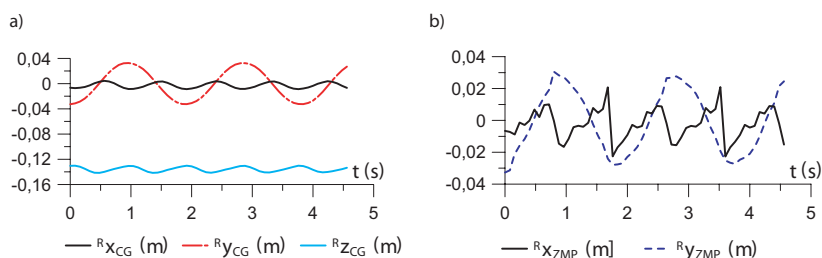
gdzie:  ${}^R \ddot{u}_0, {}^R \ddot{u}_{ij}$  - odpowiednia składowa przyspieszenia środka masy korpusu lub członu  $i$  należącego do nogi  $j$ ,  $w = \{x, y, z\}$ ,  ${}^R g$  - przyspieszenie ziemskie wyrażone w układzie korpusu robota.

Jeżeli znane są współrzędne punktu CG, współrzędne ZMP można także obliczyć z prostszej zależności:

$${}^R x_{ZMP} = {}^R x_{CG} - \frac{{}^R \ddot{x}_{CG}}{{}^R \ddot{z}_{CG} - {}^R g} {}^R z_{CG} \quad (6)$$

$${}^R y_{ZMP} = {}^R y_{CG} - \frac{{}^R \ddot{y}_{CG}}{{}^R \ddot{z}_{CG} - {}^R g} {}^R z_{CG}$$

Podobną zależność na współrzędne ZMP można odnaleźć w pracy [2], gdzie pominięto przyspieszenie  ${}^R \ddot{z}_{CG}$ . W wyniku obliczeń współrzędnych środka masy robota i punktu zerowego momentu uzyskano przebiegi czasowe pokazane na rys. 9.



Rys. 9. Przebiegi czasowe współrzędnych środka masy robota (a) i punktu zerowego momentu (b) w układzie związanym z korpusem robota

Porównując uzyskane przebiegi czasowe punktu zerowego momentu z fazami ruchu robota (rys. 7) i współrzędnymi punktów Fj można zauważyć, że tak jak zakładano, maksymalne przechylenie robota występuje w połowie fazy dwupodporowej i w stronę tej nogi, która za chwilę jako jedyna będzie w fazie podparcia. Podczas maksymalnego przechylenia robota współrzędna  ${}^R y_{ZMP}$  wynosi około  $\pm 30$  mm, a współrzędne  ${}^R y_{Fj}$  wynoszą około  $\pm 40$  mm, co przy przesunięciu  $d_5 = \pm 9$  mm powoduje, że ZMP znajduje się wówczas we wnętrzu powierzchni stopy. Współrzędne  ${}^R y_{Fj}$  w trakcie przenoszenia nóg zmieniają się na przeciwnie w sposób łagodny. Najszybsze zmiany współrzędnych  ${}^R x_{Fj}$  występują w fazie dwupodporowej. W fazie jednopodporowej współrzędne te zmieniają się już łagodnie.

### Kinematyka charakterystycznych punktów robota

Na podstawie znajomości faz ruchu robota oraz kątów przegubowych określono, w jaki sposób zmieniają się współrzędne charakterystycznych punktów robota w nieruchomym układzie odniesienia. Było to niezbędą czynnością przed przystąpieniem do animacji ruchu robota, która umożliwiła wizualną weryfikację poprawności wygenerowanego ruchu.

Algorytm wyznaczania charakterystycznych punktów robota w układzie nieruchomym opiera się na założeniu, że podparta stopa robota nie zmienia swojego położenia względem nieruchomego układu odniesienia i może tymczasowo stanowić układ odniesienia, umożliwiając – na podstawie znajomości kątów przegubowych robota – wyznaczenie pozostałych współrzędnych punktów robota w nieruchomym układzie odniesienia.

Obliczenia z wykorzystaniem tej metody wykonano wg następującego algorytmu:

1. Początkowo korpus robota nie jest przechylony, pochylony, ani odchylony ( $\alpha = 0, \beta = 0, \gamma = 0$ ). Współrzędne punktów R, Fs1 i Fs2 ( $s1 = \{L, R\}$  – podparta noga,  $s2 = \{R, L\}$  – druga z nóg) w układzie nieruchomym są na początku znane i wynoszą:

$$\begin{aligned} {}^O x_R &= 0, {}^O y_R = 0, {}^O z_R = h_6 - {}^R z_{Fs1}, {}^O x_{Fs1} = {}^R x_{Fs1}, \\ {}^O x_{Fs2} &= {}^R x_{Fs2}, {}^O z_{Fs1} = h_6, {}^O z_{Fs2} = {}^O z_R + {}^R z_{Fs2}. \end{aligned}$$

Jeżeli  ${}^R z_{FL} \leq {}^R z_{FR}$ , wówczas:  $s1 = L, s2 = R,$   
 ${}^O y_{Fs1} = d_0/2, {}^O y_{Fs2} = -d_0/2$ , w innym przypadku:  
 $s1 = R, s2 = L, {}^O y_{Fs1} = -d_0/2, {}^O y_{Fs2} = d_0/2,$

2. W kolejnych krokach współrzędne punktu R korpusu w układzie nieruchomym wyznacza się jako (w anali-

zowanym przypadku ruchu robota do przodu  $\gamma = 0$ ):

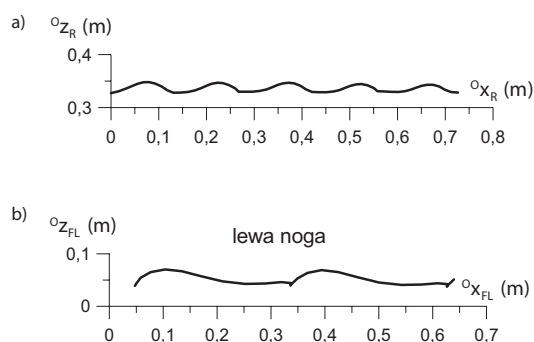
$$\begin{aligned} {}^O x_R &= {}^O x_{Fs1} - {}^R x_{Fs1} \cos \gamma + {}^R y_{Fs1} \sin \gamma, \\ {}^O y_R &= {}^O y_{Fs1} - {}^R x_{Fs1} \sin \gamma - {}^R y_{Fs1} \cos \gamma, \\ {}^O z_R &= {}^O z_{Fs1} - {}^R z_{Fs1}. \end{aligned}$$

3. Znajac współrzędne punktu R w układzie nieruchomym, orientację korpusu i kąty przegubowe dla drugiej nogi, oblicza się współrzędne punktu Fs2 ( $s2 = \{R, L\}$ ) drugiej nogi (podpartej lub przenoszonej)

w układzie nieruchomym z zależności:

$$\begin{aligned} {}^O x_{Fs2} &= {}^O x_R + {}^R x_{Fs2} \cos \gamma - {}^R y_{Fs2} \sin \gamma, \\ {}^O y_{Fs2} &= {}^O y_R + {}^R x_{Fs2} \sin \gamma + {}^R y_{Fs2} \cos \gamma, \quad {}^O z_{Fs2} = {}^O z_R + {}^R z_{Fs2}. \end{aligned}$$

4. Obliczenia z punktów 2–3 powtarza się aż do zakończenia fazy podporowej dla pierwszej nogi.
5. Następnie zakłada się, że pierwszą nogą (podpartą) staje się poprzednio druga noga, a drugą nogą staje się poprzednio pierwsza (do niedawna podparta) i powtarza obliczenia od punktu 2 aż do zakończenia ruchu robota.



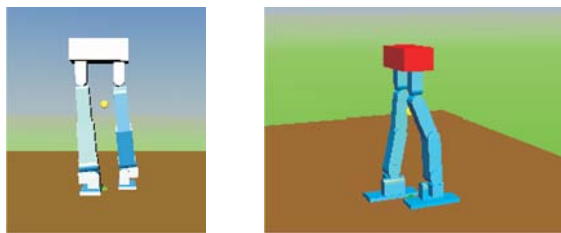
Rys. 10. Tory ruchu punktu R (a) oraz punktu F lewej nogi (b) w nieruchomym układzie odniesienia

W wyniku obliczeń uzyskano tory ruchu punktów R i FL pokazane na rys. 10. W trakcie ruchu robota współrzędna z punktu R zmienia się w niewielkim zakresie (o ponad 20 mm), długość kroku robota wynosi około 300 mm, a wysokość podniesienia stopy osiąga maksymalną wartość w chwilę po rozpoczęciu podnoszenia nogi i wynosi około 30 mm.

### Animacja ruchu robota

Równoległe z symulacją ruchu robota realizowana była animacja jego ruchu wykonana z zastosowaniem przybornika Virtual Reality pakietu Matlab/Simulink. Przybornik ten pozwala tworzyć realistyczne trójwymiarowe animacje. Umożliwia zadawanie parametrów ruchu układu podczas symulacji. Dzięki temu podczas symulacji można w bardzo szybki i wygodny sposób zrozumieć działanie projektowanego układu oraz przetestować go w czasie rzeczywistym poprzez zastosowanie dodatkowo przybornika Real Time Windows Target. Za pomocą bloku VR Sink definiuje się m.in., jakie elementy robota będą napędzane. Możliwe jest zadawanie zarówno przesunięć, jak i obrotów. W trakcie animacji, która odbywa się w osobnym oknie można manipulować animowaną sceną, w tym przełączać między zdefiniowanymi wido-

kami z różnych kamer. Przy pomocy przybornika Virtual Reality animowane są zarówno proste modele fizyczne, jak i złożone, zaprojektowane w takich programach jak 3DStudio Max, czy AutoCAD. Istnieje także możliwość obsługi joysticka.



Rys. 11. Animacja ruchu robota z zastosowaniem przybornika Virtual Reality pakietu Matlab/Simulink

Do animacji niezbędnymi danymi były: współrzędne punktu R korpusu w układzie nieruchomym, orientacja korpusu i kąty przegubowe  $\theta_{ij}$ . Rys. 11 ilustruje dwa przykładowe widoki robota w trakcie animacji: odpowiednio widok z przodu i z prawej strony robota. Filmy prezentujące te animacje zamieszczone są pod następującymi adresami:

[http://www.youtube.com/watch?v=\\_CajdsOFqSQ](http://www.youtube.com/watch?v=_CajdsOFqSQ),  
<http://www.youtube.com/watch?v=UoKVuQpL6hg>.

W trakcie animacji ilustrowany był także ruch środka masy robota (żółty punkt) i punktu zerowego momentu (zielony punkt).

## Podsumowanie i kierunki dalszych badań

W pracy opisano metodę generowania ruchu robota dwunożnego w oparciu o zarejestrowany chód człowieka. Zarejestrowane dane dostosowano do konstrukcji robota i uzupełniono brakujące wielkości w taki sposób, aby zapewnić balansowanie dynamiczne robota. Wyniki badań poparto symulacją i animacją ruchu robota z zastosowaniem pakietu Matlab/Simulink i przybornika Virtual Reality. Zweryfikowały one poprawność proponowanej metody.

Prezentowane badania dotyczą ustalonego ruchu robota do przodu, kierunki dalszych badań będą związane z realizacją faz przejściowych (np. zmiany rodzaju chodu) oraz będą dotyczyć krzywoliniowych trajektorii ruchu. Wymagać to będzie zastosowania nowych danych zarejestrowanego chodu człowieka, lub opracowania takich ruchów na drodze syntezy, opierając się częściowo na dotychczasowych danych rzeczywistego chodu. Pierwszym etapem takich badań może być parametryzacja uzyskanych przebiegów, a następnie uzależnienie ich od długości i wysokości kroku oraz kątów  $\theta_{1j}$  obrotu nóg.

Modyfikacji wymagają także kąty  $\theta_{5j}$  związane z pochylaniem stóp, gdyż w fazie dwupodporowej współrzędne  $Rz_{Fj}$  punktów  $Fj$  obu nóg robota w układzie związanym z jego korpusem różnią się od siebie. W trakcie zakroku stopa człowieka wspiera się na palcach, a podczas wykroku na pięcie. Konsekwencją tej modyfikacji dla robota może być wprowadzenie pochylania korpu-

su robota lub dodatkowa modyfikacja kątów  $\theta_{5j}$  w biodrach, aby wyeliminować takie pochylanie.

W celu dalszej weryfikacji dokładności prezentowanej metody może być także zrealizowana symulacja dynamiczna robota z zastosowaniem specjalizowanego pakietu (np. Adams). Kierunki przyszłych badań mogą być również związane z wyznaczeniem rozkładu sił reakcji podłoża z uwzględnieniem wpływu zamontowanych w stopach robota dodatkowych sprężyn.

*Praca została zrealizowana w ramach projektu badawczego finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego pt. „Analiza mechanizmów stabilizacji lokomocji dwunożnej, opracowanie metod syntezy ruchu z wykorzystaniem wzorców biologicznych” o numerze N N514 297935.*

## Bibliografia

1. ASIMO - Technical Information, American Honda Motor Co., Inc., Corporate Affairs & Communications, 2003 (www.honda.com).
2. Jung-Yup Kim, Ill-Woo Park, Jun-Ho Oh: Walking Control Algorithm of Biped Humanoid Robot on Uneven and Inclined Floor, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 48, No. 4 (2007), 457-484.
3. Kryczka P.: An anthropomorphic biped: prototype and control system. Praca dyplomowa inżynierska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2007.
4. Kryczka P., Chee-Meng Ch.: The Design of a Humanoidal Biped for the Research on the Gait Pattern Generators, Advances in Climbing and Walking Robots, Eds. Ming Xie et al., World Scientific 2007, 435-444.
5. Hun-ok Lim, Atsuo Takanishi: Compensatory motion control for a biped walking robot, Robotica (2005) Vol. 23, 1-11.
6. Lim Hun-ok, Setiawan Samuel A., Takanishi Atsuo: Balance and Impedance Control for Biped Humanoid Robot Locomotion, Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Maui, Hawaii, USA, Oct. 29 - Nov. 03, 2001, 494-499.
7. Mitobe K., Capi G., Nasu Y.: A new control method for walking robots based on angular momentum, Mechatronics 14 (2004), 163-174.
8. Pandu Ranga Vundavilli, Dilip Kumar Pratihari: Soft computing-based gait planners for a dynamically balanced biped robot negotiating sloping surfaces, Applied Soft Computing 9 (2009), 191-208.
9. Peiman Naseradin Mousavi, C. Nataraj, Ahmad Bagheri, Mahdi Alizadeh Entezari: Mathematical simulation of combined trajectory paths of a seven link biped robot, Applied Mathematical Modelling 32 (2008), 1445-1462.
10. Vukobratović M., Borovac B.V.: Zero-Moment Point - thirty five years of its life, International Journal of Humanoid Robotics, Vol. 1, No. 1 (2004), 157-173.
11. Zielińska T.: Maszyny kroczące. Podstawy, projektowanie, sterowanie i wzorce biologiczne, PWN, Warszawa 2003.
12. Zielinska T., Chee-Meng Ch., Kryczka P., Jargilo P.: Robot Gait Synthesis using the scheme of human motion skills development, Mechanism and Machines Theory, Elsevier 2008, 2008.09.07. ■