

Metody syntezy chodu maszyn kroczących i robotów humanoidalnych

Teresa Zielińska*

16.1. Wstęp

Obecnie zauważa się rosnące zainteresowanie robotami usługowymi i robotami osobistymi. Roboty te muszą działać w środowisku naturalnym, typowym dla człowieka, gdzie znajduje się wiele różnorodnych obiektów, a sytuacje zmieniają się dynamicznie. Największe wyzwania badawcze dotyczą więc tej grupy robotów, a otrzymywane wyniki są spektakularne. Roboty osobiste będą wkrótce pomagać w zajęciach domowych, w opiece nad dziećmi i ludźmi starszymi, czy też osobami niepełnosprawnymi.

Takie roboty często mają postać antropomorficzną, co ułatwia ich powszechną akceptację. Antropomorfizm ułatwia też funkcjonowanie w środowisku zaprojektowanym dla człowieka, łącznie z posługiwaniem się przedmiotami codziennego użytku. Pomimo przykładów sprawnie poruszających się robotów człokształtnych, problem syntezy ich ruchu pozostaje otwarty.

Brakuje metod pozwalających na bieżące planowanie i generowanie ruchów podobnych od wzorców ruchowych człowieka. Problem ten nie dotyczy wyłącznie chodu, lecz o wiele bardziej skomplikowanych czynności takich jak przenoszenie czy podnoszenie obiektów, ale też odzyskiwanie równowagi utraconej w wyniku popchnięcia czy poślizgu. Powracając do pozornie najprostszego przykładu, czyli do chodu, należy podkreślić, iż nie tylko nogi, lecz i pozostałe części ciała wspierają proces lokomocji [25]. W czasie chodu tułów człowieka wykonuje rytmiczne przechyły do przodu i do tyłu oraz na boki, miednica podlega rotacjom, stawy biodrowe przemieszczają się naprzemiennie do przodu i do tyłu względem osi ciała, a ręce wykonują wymachy. Wszystkie te ruchy skutkują powstaniem odpowiednich sił inercjalnych oraz momentów sił, które wspomagają dynamiczną stabilizację postury. Podobną synergię ruchów staramy się uzyskać w robotach humanoidalnych, zadanie to utrudnia jednak inna niż ludzka specyfika budowy ciała i inne właściwości napędów.

Pierwsze roboty humanoidalne poruszały się na ugiętych nogach, utrzymując korpus w stałej pionowej pozycji i nie poruszając rękoma. Ugięte nogi ułatwiały w tym przypadku stabilizację postury, unikano potrzeby ruchów stabilizacyjnych wykonywanych przez inne części ciała. Współczesne roboty

Streszczenie

Na podstawie własnych badań pokazano, jak pewne wzorce biologiczne są wykorzystywane w pracach nad wielonożnymi maszynami kroczącymi i robotami humanoidalnymi. W szczególności, skupiając się na robotach humanoidalnych (antropomorficznych), omówiono, w jaki sposób odpowiednia konstrukcja stóp pozwala uzyskać synergię przechyłów korpusu i ruchu nóg wspomagającą dynamiczną stabilność chodu. W pierwszej części pracy podsumowano metody syntezy chodu wielonożnych maszyn kroczących oraz robotów humanoidalnych. Omówiono kryterium dynamicznej stabilności chodu (kryterium ZMP) powszechnie wykorzystywane do syntezy chodu dwunożnego. Kryterium to stanowiło punkt wyjściowy do wyznaczenia sił działających na stopę robota humanoidalnego. Mając na uwadze stopę podatną, opracowano metodę wyznaczania składowych sił działających na krawędzie stopy. W celu potwierdzenia przydatności metody podano przykład obliczeniowy dla chodu człowieka. Wyznaczano składowe siły wywieranych przez stopę na podłoże, uwzględniając różne wymiary stopy, oraz pokazano, jak podatność stopy wspomaga stabilność dynamiczną chodu.

coraz bardziej oddalają się od tych niezdarnych prekursorów. Niezręczne chodzące roboty dwunożne o niewielu stopniach swobody przekształciły się w skomplikowane, sprawnie poruszające się roboty humanoidalne. Roboty te wymachują rękoma i balansują górną częścią ciała podobnie jak człowiek. Istnieją też próby zbudowania robota humanoidalnego posiadającego kręgosłup [14]. Uwaga badaczy skupia się też na stopach, bowiem w uzyskaniu synerгии ruchu człowieka istotną rolę odgrywają podatne stopy.

W niniejszym rozdziale pokazujemy jak są przenoszone pewne wzorce biologiczne do obszaru wielonożnych maszyn kroczących i robotów humanoidalnych. Skupiając się na robotach antropomorficznych, pokazujemy, jak odpowiednia konstrukcja stóp wspiera proces chodu.

Chód to sposób przemieszczania się (zmiany lokalizacji) istoty żywej lub robota posiadającego kończyny dolne (nogi).

*Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska, Warszawa, teresaz@meil.pw.edu.pl; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0475-0875>

Klasyfikacja i opisy typów chodu (chodów) powstały na podstawie obserwacji świata zwierzęcego. Podstawowym wyróżnikiem rodzaju chodu jest kolejność przestawień nóg, a nie, jak mogłoby się to wydawać, prędkość ruchu. Określone sekwencje przestawień nóg są jednak dla danej grupy zwierząt typowe w określonych przedziałach prędkości.

Cechy chodu owadów zostały zidentyfikowane ponad czterdzieści lat temu na podstawie prac Hughesa i Wendlera, a następnie podsumowane przez Wilsona [24]. Zamykają się one w pięciu prostych prawidłowościach:

- nogi po jednej stronie ciała są przenoszone jedna za drugą, taka fala przenoszenia nóg przesuwa się od tyłu do przodu ciała, żadna następna noga nie będzie podniesiona, zanim noga znajdująca się za nią nie zostanie postawiona;
- czas przenoszenia jest stały dla wszystkich nóg i jest niezależny od prędkości ruchu;
- fazy ruchu naprzeciwległych nóg znajdujących się w tym samym segmencie ciała są przesunięte, czyli nogi nie są przemieszczane równocześnie;
- czas podparcia (styku nogi z podłożem) maleje w miarę wzrostu prędkości ruchu, czyli ze wzrostem prędkości rośnie częstość kroczenia, czyli częstość przestawień nóg;
- odstęp czasu między podniesieniami nóg sąsiednich z tej samej strony ciała (pomiędzy nogą znajdującą się bezpośrednio z tyłu a daną nogą oraz daną nogą i nogą ją poprzedzającą) są porównywalne, ale ta różnica czasu pomiędzy nogą tylną a przednią zmienia się proporcjonalnie do częstości kroczenia.

W 1981 roku Delcomyn [3] zaobserwował kolejną prawidłowość:

- dana noga jest podnoszona tylko wtedy, gdy noga poprzedzająca ją w sekwencji fali przemieszczeń zostanie postawiona na podłoże.

Jak łatwo zauważyć, ta reguła jest naturalną konsekwencją pierwszej i ostatniej zasady sformułowanej przez Wilsona.

Powyższe cechy są wykorzystywane do syntezy ruchu maszyn sześcionożnych. Maszyny te poruszają się przeważnie tak, jak owady. Ich chód jest statycznie stabilny. Oznacza to, iż w każdej chwili ruchu jest zachowana statyczna stabilność postury, czyli rzut środka ciężkości całej maszyny znajduje się we wnętrzu wielokąta podparcia rozpiętego na punktach śladowych podpierających nóg. Metody syntezy takich chodów nie są trudne, łatwo jest zaplanować długość zakroku i wykroku, aby był spełniony warunek statycznej stabilności dla chodów rytmicznych.

Trudniejszym problemem jest natomiast zaplanowanie regularnej sekwencji przestawień nóg wymaganej przy omijaniu przeszkód oraz dobór kształtu trajektorii końców nóg. Jest to ciągle obszerne pole do prowadzenia badań i poszukiwania efektywnych rozwiązań łączących metody percepcji otoczenia i planowania ruchu. W pracach [30, 33, 37, 44] są opisane metody generowania statycznie stabilnego ruchu maszyn sześcionożnych i systemy ich sterowania pozwalające na autonomiczną nawigację z dostosowywaniem rodzaju chodu do ukształtowania podłoża. Na rysunku 16.1 są pokazane zbudowane przez zespół prototypy maszyn sześcionożnych, na

których przetestowaliśmy wzmiankowane rozwiązania. Przedmiotem prac były również zagadnienia specyfikacji wymagań projektowych, dobór napędów z uwzględnieniem wydatków energetycznych ruchu [32] oraz metoda określania wymiarów geometrycznych nóg zapewniająca minimalizację kosztów energetycznych ruchu [34].

Wiele zwierząt, w tym człowiek, porusza się, zachowując dynamiczną, a nie statyczną stabilność chodu. Stabilność dynamiczna chodu ma miejsce wówczas, gdy skutkiem równowagi momentów sił i momentów obrotowych działających na poruszające się zwierzę lub robota, realizuje on pożądaną wypadkową trajektorię ruchu, zachowując przy tym pożądaną konfigurację ciała. Przy większych prędkościach ruchu i przy omijaniu przeszkód owady zachowują również dynamiczną, a nie statyczną stabilność ruchu. Brakuje niestety syntetycznych opisów, które, podobnie jak w przypadku stabilności statycznej, pozwoliłyby na przeniesienie wzorców dynamiki ruchu świata ożywionego do świata robotyki.

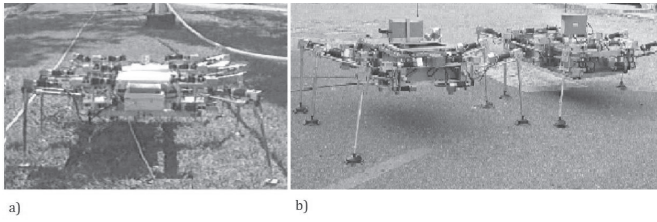
Warto tu dodać, iż najwolniejsze chody zwierząt czworonożnych są stabilne statycznie, ale niestety ich chodów nie daje się opisać tak prosto jak chodu owadów, występują tu bowiem różne kolejności przestawień nóg, różne czasy podparcia nóg oraz różne odstępy czasu pomiędzy ich przeniesieniami.

Nasze prace poświęcone lokomocji czworonogów obejmują syntezę chodu statycznie stabilnego [19, 20, 28, 33], projektowanie [42, 43], sterowanie [41] oraz generowanie chodu quasi-stabilnego dynamicznie, gdzie stabilizująca funkcję pełnią stopy z wbudowaną podatnością [45, 46]. Na rysunku 16.2 jest pokazana maszyna czteronożna konstrukcji naszego zespołu [19], którą wykorzystywano do testowania opracowanych rozwiązań. Jak widać na fotografiach, duże przestrzenie robocze nóg umożliwiają szerokie zmiany konfiguracji. Po prawej stronie jest przedstawiona sekwencja postur realizowanych przy obrocie o 180°. Taki obrót jest przydatny w maszynach kroczących realizujących zadania eksploracji w trudnych, nietypowych warunkach [36], pozwala bowiem na powrót do normalnej pozycji po przekościłkowaniu.

Można podać przykłady maszyn czteronożnych, które poruszają się szybko, zachowując dynamiczną stabilność chodu. Prekursorem w tego typu badaniach był i jest Raibert, który zbudował jednożadne, potem dwunożne, a następnie czteronożne maszyny skaczące [18]. Teraz pod jego kierunkiem powstają najbardziej imponujące maszyny czteronożne takie jak Big Dog, Spot Mini i inne. Zespół kierowany przez tego naukowca opracował też bardzo sprawne roboty humanoidalne PETMAN, ASTROMAN i ATLAS [5].

Pomimo tych spektakularnych prototypów o dużych możliwościach ruchowych nie można się jednak odwołać do uniwersalnej metody generowania skoordynowanych ruchów części ciała robota humanoidalnego. Liczni badacze poszukują wzorców ruchu człowieka, nawiązując do modelu podwójnego lub pojedynczego odwróconego wahadła [8, 9, 16]. W naszych pracach z tego obszaru uwzględniamy rekonfigurowalne wahadło o przemieszczającej się masie punktowej [48].

Inną możliwością jest nawiązanie do biologicznego generatora. We wcześniejszych badaniach odnosiliśmy się do



Rys. 16.1. Nawigacja maszyn sześcionożnych: a) maszyna poruszająca się autonomicznie po ścieżce zadanej poprzez współrzędne geograficzne, b) dwie autonomiczne maszyny wykonujące zadanie eksploracji otoczenia

neuronowego centralnego generatora wzorców generującego rytmy życiowe człowieka (ogólnie rzecz biorąc – wielu zwierząt), w tym też i rytm lokomocji [7]. Stworzyliśmy model funkcjonalny generatora rytmu chodu, wykorzystując oscylatory sprzężone van der Pola. Wykazaliśmy, iż po właściwym dobraniu wartości parametrów tych oscylatorów rozwiązania równań różniczkowych dostarczają trajektorii kątowych stawów nóg, które dobrze odwzorowują trajektorie typowe dla chodu człowieka [31, 38].

Trajektorie kątowe stawów biodrowych i kolanowych są opisane równaniami czterech oscylatorów sprzężonych:

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha}_1 - \mu_1 \cdot (p_1^2 - x_a^2) \cdot \dot{\alpha}_1 + g_1^2 \cdot x_a &= q_1, \\ \ddot{\alpha}_2 - \mu_2 \cdot (p_2^2 - x_b^2) \cdot \dot{\alpha}_2 + g_2^2 \cdot x_b &= q_2, \\ \ddot{\alpha}_3 - \mu_3 \cdot (p_3^2 - x_c^2) \cdot \dot{\alpha}_3 + g_3^2 \cdot x_c &= q_3, \\ \ddot{\alpha}_4 - \mu_4 \cdot (p_4^2 - x_d^2) \cdot \dot{\alpha}_4 + g_4^2 \cdot x_d &= q_4, \end{aligned} \quad (16.1)$$

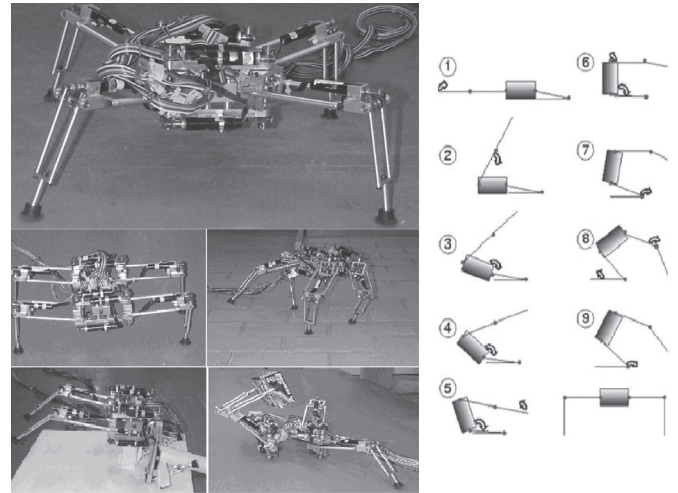
gdzie $x_a = \alpha_1 - \lambda_{21} \cdot \alpha_2 - \lambda_{31} \cdot \alpha_3$, $x_b = \alpha_2 - \lambda_{12} \cdot \alpha_1 - \lambda_{42} \cdot \alpha_4$, $x_c = \alpha_3 - \lambda_{13} \cdot \alpha_1 - \lambda_{43} \cdot \alpha_4$, $x_d = \alpha_4 - \lambda_{24} \cdot \alpha_2 - \lambda_{34} \cdot \alpha_3$.

Wyrażenia te mają 24 nieznanne parametry: $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, p_1^2, p_2^2, p_3^2, p_4^2, g_1^2, g_2^2, g_3^2, g_4^2, q_1, q_2, q_3, q_4, \lambda_{13}, \lambda_{31}, \lambda_{12}, \lambda_{21}, \lambda_{24}, \lambda_{42}, \lambda_{43}, \lambda_{34}$.

Parametry sprzężeń λ_{ij} określają rodzaj chodu, determinując zakres przesunięć fazowych pomiędzy poszczególnymi trajektoriami. Zmienne $\alpha_1^s, \alpha_2^s, \alpha_3^s, \alpha_4^s$ odpowiadają odpowiednio przeskalowanym kątom α_1 (wyrażonym w stopniach) stawów kończyn dolnych. W zastosowanej notacji przyjęto, iż kąty te są dodatnie wtedy, gdy linie uda lub podudzia są wysunięte do przodu w stosunku do linii pionowej, a ujemne w sytuacji przeciwnej (rys. 16.3).

Podstawowym problemem jest znalezienie wartości nieznanych 24 parametrów, tak aby zapewnić cykl stabilny oraz aby rozwiązania imitowały trajektorie chodu. Do tego celu wykorzystano algorytm genetyczny, a rozwiązania były porównywane ze wzorcem chodu człowieka (rys. 16.4)¹. Ostatecznie wybrane wartości parametrów były następujące [39]: $\mu_1 = \mu_3 = 3,59375$, $\mu_2 = \mu_4 = 2$, $p_1^2 = p_3^2 = 2$, $p_2^2 = p_4^2 = 1$, $g_1^2 = g_3^2 = 28,0039$, $g_2^2 = g_4^2 = 17,7031$, $q_1 = q_3 = 15,8516$, $q_2 = q_4 = -7,04492$, $\lambda_{12} = \lambda_{21} = \lambda_{34} = \lambda_{43} = -0,451172$, $\lambda_{24} = \lambda_{42} = \lambda_{31} = \lambda_{13} = 0,417969$.

Wykazaliśmy, iż odpowiednie zmiany parametrów równań



Rys. 16.2. Ilustracja rekonfiguracji czterożnożnej maszyny kroczącej

oscylatorów prowadzą do prawidłowych zmian wzorca chodu, na przykład dających trajektorie pozwalające na omijanie przez nogi przeszkód, czy zmiany prędkości ruchu. Pokazaliśmy, jak równania oscylatorów można zaimplementować w czasie rzeczywistym, uzyskując płynne korekty chodu zakłóconego czynnikami zewnętrznymi.

Metoda została zastosowana w rzeczywistym robocie dwunożnym; wyniki badań są opisane m.in. w pracach [29, 39]. Na rysunku 16.6 zamieszczono szereg zdjęć pokazujących robota w trakcie chodu.

16.2. Metody syntezy chodu robotów humanoidalnych

Skupimy się teraz na warunku stabilności dynamicznej oraz na roli stopy we wspieraniu stabilności dynamicznej ruchu.

Najprostszym sposobem zadawania przemieszczeń członów robota antropomorficznego jest nagranie, a potem odtworzenie ruchu człowieka. Tak właśnie uzyskiwano ruch pierwszych humanoidów firmy Honda. Inną metodą jest wykorzystanie trajektorii ruchu wybranego stopnia swobody, np. stawu kolanowego człowieka, i odpowiednie dobranie trajektorii ruchu pozostałych członów. Winnym podejściu zadawane są trajektorie ruchu poszczególnych stopni swobody jako wielomiany o nieznanach parametrach. Dobór parametrów następuje tu z uwzględnieniem stabilności posturalnej.

Zaproponowaliśmy metodę, która uwzględnia model dynamiki ruchu robota oraz modele sterowników poszczególnych stopni swobody. Dokonaliśmy syntezy sterowania z wykorzystaniem modelu dynamiki całego robota, żądając przy tym odtwarzania zadanych trajektorii sił wywieranych przez końce nóg [17]. Metoda ta prowadzi do uzyskania stabilizujących ruchów górnej części ciała podobnych do ruchów człowieka.

Ogólnie rzecz biorąc, synteza ruchów jest zadaniem trudnym, czekającym na uniwersalne rozwiązanie pozwalające na generowanie postury całego ciała nie tylko w trakcie chodu, ale też w innych sytuacjach, jak np. podnoszenie czy przenoszenie obiektów.

Zanim nastąpi implementacja, należy sprawdzić, czy opracowany wzorzec ruchu zapewni stabilność dynamiczną, tzn. czy poruszający się robot nie będzie się przewracał. Do tego celu najczęściej wykorzystywane jest kryterium punktu zerowego momentu (ang. Zero Moment Point, ZMP), które zostało sformułowane w 1968 r. przez Vucobratovica [22, 23]. Kryterium to w wersji zmodyfikowanej jest również wykorzystywane do wyznaczenia stabilizujących korekt postury w czasie ruchu rzeczywistych robotów.

Kryterium ZMP uwzględnia warunek równowagi momentów sił w fazie podporowej. Uwzględnia się tu uproszczony model kinematyczny ciała człowieka lub robota, w którym masy rozłożone głównych części ciała są zastąpione masami skupionymi. Masy te podlegają przyspieszeniom w trakcie chodu, a więc powstają siły inercjalne. W wyniku istnienia tych sił oraz oddziaływania sił grawitacji powstają momenty sił powodujące obroty, w szczególności obroty wokół osi układu odniesienia o początku O . Punkt ten jest umiejscowiony w stawie skokowym podpierającej stopy w fazie jednopodporowej. W fazie dwupodporowej uwzględnia się momenty obrotowe wokół osi układu odniesienia o początku w wirtualnym punkcie podparcia. Punkt ten pokrywa się z rzutem pionowym wypadkowej masy robota na płaszczyznę podparcia. Człowiek lub robot nie przewraca się, gdy momenty sił są kompensowane przez moment pochodzący od wypadkowego wektora siły reakcji podłoża w fazie jednopodporowej, lub od dwu wektorów sił reakcji w fazie dwupodporowej.

Dla uproszczenia rozważań, przedstawimy formułę ZMP dla fazy jednopodporowej. Niech F_r oznacza wektor siły reakcji (rys. 16.5b). Warunek równowagi momentów opisany jest następująco:

$$\sum_i (\mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i) + \mathbf{I}_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}_i = -\mathbf{r}_P \times \mathbf{F}_r, \quad (16.2)$$

gdzie \mathbf{r}_i jest wektorem poprowadzonym od punktu O do punktu oznaczającego położenie i -tej masy punktowej (masy m_i), \mathbf{F}_i

jest wektorem sił bezwładności oraz sił grawitacji działających na i -tą masę, $\boldsymbol{\omega}_i$ jest wektorem prędkości obrotowych, \mathbf{I}_i jest tensorem bezwładności, \mathbf{r}_P jest wektorem poprowadzonym od punktu O do punktu P przyłożenia siły F_r . Punkt P jest właśnie punktem zerowego momentu (ZMP). Biorąc pod uwagę warunek równowagi (16.2), widzimy, iż P jest takim punktem na podłożu, w którym powinna być przyłożona siła reakcji F_r , aby moment pochodzący od niej równoważył moment obrotowy wynikający z ruchu ciała. Ponieważ siła reakcji podłoża dotyczy podpierającej stopy, naturalnym wnioskiem jest, iż położenie punktu P we wnętrzu śladu stopy [23] stanowi warunek stabilności postury.

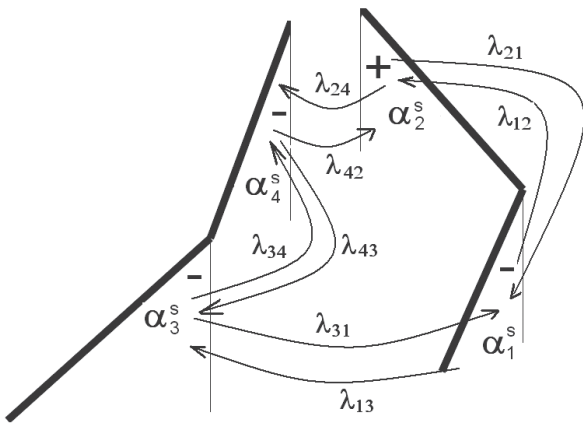
Wyznaczając położenie punktu P z uwzględnieniem zależności (16.2), uwzględnia się tylko moment M_x powodujący przechylenie (na boki) i moment M_y powodujący pochylenie (przód – tył). Niewielki moment wokół osi pionowej M_z nie jest uwzględniany w ocenie stabilności postury, jest on bowiem równoważony przez moment pochodzący od sił tarcia.

Momenty M_x, M_y wyznaczamy z następujących zależności:

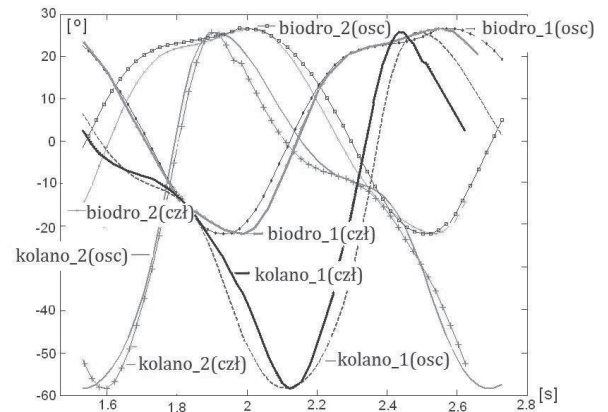
$$M_x = \sum_i [y_i(m_i \ddot{z}_i + m_i \cdot g)] - \sum_i (z_i \cdot m_i \ddot{y}_i) + \sum_i (I_{xx}^i \cdot \dot{\omega}_x^i + I_{yy}^i \cdot \dot{\omega}_y^i + I_{xz}^i \cdot \dot{\omega}_z^i) + \sum_i [\omega_y^i (I_{zx}^i \omega_x^i + I_{zy}^i \omega_y^i + I_{zz}^i \omega_z^i) - \omega_x^i (I_{yx}^i \omega_x^i + I_{yy}^i \omega_y^i + I_{yz}^i \omega_z^i)] + p_y F_z^r + h F_R^y, \quad (16.3)$$

$$M_y = - \sum_i [x_i(m_i \ddot{z}_i + m_i \cdot g)] + \sum_i (z_i \cdot m_i \ddot{x}_i) + \sum_i (I_{yy}^i \cdot \dot{\omega}_x^i + I_{yy}^i \cdot \dot{\omega}_y^i + I_{yz}^i \cdot \dot{\omega}_z^i) + \sum_i [-\omega_x^i (I_{zx}^i \omega_x^i + I_{zy}^i \omega_y^i + I_{zz}^i \omega_z^i) + \omega_x^i (I_{yx}^i \omega_x^i + I_{yy}^i \omega_y^i + I_{yz}^i \omega_z^i)] - p_x F_z^r + h F_R^x, \quad (16.4)$$

x_i, y_i, z_i to współrzędne mas punktowych m_i w układzie odniesienia $OXYZ$, p_x, p_y to współrzędne punktu P , h jest odległością punktu O od podłoża. Pomija się stosunkowo niewielką odległość h kostki od podłoża i przyjmuje jako punkt obrotu O rzut środka stawu skokowego na podłożo (rys. 16.5), czyli we wzorach (16.3) i (16.4) ZMP znika jeden, niewielki co do wartości, składnik. Składowa F_z^r siły reakcji F_r jest równa $F_z^r = - \sum_i (m_i \ddot{z}_i + m_i \cdot g)$. Tak więc:



Rys. 16.3. Definicja kątów oraz ilustracja sprzężeń pomiędzy stawami



Rys. 16.4. Trajektorie zarejestrowane w chodzie człowieka oraz trajektorie wygenerowane przez oscylatory po odpowiednim dobraniu parametrów

$$M_x = \sum_i [y_i(m_i \ddot{z}_i + m_i \cdot g)] - \sum_i (z_i \cdot m_i \ddot{y}_i) + \sum_i (I_{xx}^i \cdot \dot{\omega}_x^i + I_{yy}^i \cdot \dot{\omega}_y^i + I_{xz}^i \cdot \dot{\omega}_z^i) + \sum_i [\omega_x^i (I_{xx}^i \omega_x^i + I_{yy}^i \omega_y^i + I_{zz}^i \omega_z^i) - \omega_z^i (I_{yx}^i \omega_x^i + I_{zy}^i \omega_y^i + I_{yz}^i \omega_z^i)] - p_y \sum_i (m_i \ddot{z}_i + m_i \cdot g), \quad (16.5)$$

$$M_y = - \sum_i [x_i(m_i \ddot{z}_i + m_i \cdot g)] + \sum_i (z_i \cdot m_i \ddot{x}_i) + \sum_i (I_{yx}^i \cdot \dot{\omega}_x^i + I_{yy}^i \cdot \dot{\omega}_y^i + I_{yz}^i \cdot \dot{\omega}_z^i) + \sum_i [-\omega_x^i (I_{xx}^i \omega_x^i + I_{yy}^i \omega_y^i + I_{zz}^i \omega_z^i) + \omega_z^i (I_{yx}^i \omega_x^i + I_{xy}^i \omega_y^i + I_{xz}^i \omega_z^i)] + p_x \sum_i (m_i \ddot{z}_i + m_i \cdot g). \quad (16.6)$$

Wartości elementów tensora bezwładności I oraz prędkości i przyspieszenia kątowe są stosunkowo niewielkie, stąd też w obliczeniach często pomija się trudniejsze do obliczenia dwa przedostatnie składniki wzorów (16.5) i (16.6):

$$M_x = \sum_i [y_i(m_i \ddot{z}_i + m_i \cdot g)] - \sum_i (z_i \cdot m_i \ddot{y}_i) - p_y \sum_i (m_i \ddot{z}_i + m_i \cdot g) = 0, \quad (16.7)$$

$$M_y = - \sum_i [x_i(m_i \ddot{z}_i + m_i \cdot g)] + \sum_i (z_i \cdot m_i \ddot{x}_i) + p_x \sum_i (m_i \ddot{z}_i + m_i \cdot g) = 0. \quad (16.8)$$

Przekształcając (16.7) i (16.8), wyznacza się współrzędne p_y , p_x punktu P :

$$p_y = \frac{\sum_i [y_i(m_i \ddot{z}_i + m_i \cdot g)] - \sum_i (z_i \cdot m_i \ddot{y}_i)}{\sum_i (m_i \ddot{z}_i + m_i \cdot g)}, \quad (16.9)$$

$$p_x = \frac{\sum_i [x_i(m_i \ddot{z}_i + m_i \cdot g)] - \sum_i (z_i \cdot m_i \ddot{x}_i)}{\sum_i (m_i \ddot{z}_i + m_i \cdot g)}. \quad (16.10)$$

Niewielki błąd popełniony skutkiem pominięcia składników związanych z tensorem bezwładności jest kompensowany przez wymaganie, aby punkt P leżał w pewnej odległości od krawędzi stopy (oczywiście w jej wnętrzu).

W procesie syntezy ruchu robota dwunożnego, a w szczególności robota humanoidalnego, posługujemy się wiedzą o cechach ruchu człowieka. Przechyliły górnej części ciała wspomagają dynamiczną stabilność postury, co można łatwo uzasadnić. Przyjmijmy, iż m_1 oznacza dominującą masę tułowia. We wzorach (16.7) i (16.8) występują iloczyny, odpowiednio, $y_1 \cdot m_1 \cdot g$ oraz $x_1 \cdot m_1 \cdot g$. Ze względu na duży mnożnik m_1 nawet niewielka zmiana y_1 (przechyły boczne) oraz x_1 (pochylenie przód-tył) wpływa istotnie na współrzędne p_y i p_x . Tak więc, poprzez odpowiednie zmiany położenia masy górnej części tułowia można manipulować położeniem punktu P bez konieczności zmian wzorca ruchu kończyn dolnych.

16.3. Wspomaganie dynamicznej stabilności chodu

Człowiek, podobnie jak niektóre ssaki czteronożne, jest istotą stopochodną. To oznacza, iż w trakcie chodu są fazy, gdy cała spódna powierzchnia stopy styka się z podłożem. Stopochodna konfiguracja stopy powoduje, iż nie tylko stawy biodrowe i kolanowe, lecz też stawy skokowe odgrywają istotną rolę w lokomocji [10, 11]. Odpowiednie zmiany kąta w stawie skokowym wspomagają wybicie się stopy przy rozpoczynaniu fazy przenoszenia oraz redukują uderzenie przy stawianiu stopy na podłoże. W niektórych pracach sterowane stawem skokowym zmiany orientacji stopy porównuje się do toczenia koła [1], gdyż w momencie postawienia stopa dotyka podłoża piętą, a w fazie podparcia podszwa stopy zmienia orientację ze styku pięty z podłożem poprzez pełny kontakt do wybicia się końcami palców, co widać na rys. 16.7.

Dla utrzymania właściwej postury robota, poza zmianami orientacji stopy, istotna jest podatność. W przeszłości stopy robotów składały się wyłącznie ze sztywnych elementów, obecnie stosuje się w nich elementy podatne, oczekując, iż stopy robotów będą pracowały podobnie jak stopy człowieka [12, 13, 15, 27]. Podatność stopy może być typu aktywnego, jeśli wymusza ją odpowiedni napęd lub napędy, lub może być pasywna dzięki zastosowaniu elastycznych materiałów lub mechanicznych elementów podatnych, takich jak sprężyny i tłumiki. Pasywna podatność to prostsza konstrukcja i mniejsza masa stopy, ale też trudność w prawidłowym doborze parametrów konstrukcji.

We wcześniejszych pracach zaproponowaliśmy stopę z elementem podatnym (sprężyną) umiejscowionym w pobliżu stawu skokowego [6, 40, 49]. Studia teoretyczne oraz eksperymenty potwierdziły, iż taki element wspomaga stabilność posturalną robota. Na rysunku 16.8 jest pokazany robot, którego chód generowany jest przez oscylatory sprzężone, a każda stopa jest wyposażona w element podatny. Podobne jak na przedstawionych zdjęciach przechylenia obserwujemy w chodzie człowieka. W szczególności są one widoczne w czasie chodu małych dzieci uczących się dynamiki swego ciała.

Na rysunku 16.9 jest widoczny robot dwunożny i jego podatna stopa. Interesujące jest, iż podobną konstrukcją stosuje się również w obuwiu.

Omówimy teraz obszerniej rozszerzenie tej koncepcji, określając podatność stopy wspomagającą stabilność dynamiczną. Koncepcja jest inspirowana budową stopy człowieka, której łuk pracuje jak trójwymiarowa sprężyna [4], wprowadzając podatność boczną oraz frontowo-tylną. Na rysunku 16.10 jest pokazana struktura kostna stopy człowieka oraz jej model mechaniczny [26]. Uwzględniając główne podatności tej struktury (podatności boczne i frontowo-tylne), zaproponowaliśmy model wirtualny przedstawiony na rys. 16.11. Model ten obejmuje dwie sztywne warstwy połączone pionowymi, wirtualnymi sprężynami linowymi, co zapewnia podatność stopy w przestrzeni trójwymiarowej. Sprężyny są określone jako wirtualne, ponieważ w obliczeniach zakładamy, iż całkowita siła wywierana przez stopę rozkłada się na sprężyny boczne. Ta sama siła rozkłada się też na sprężyny przednio-tylne. Taka sytuacja jest możliwa np. przy zastosowaniu systemu sprężyn przestrzennych [2].

Pokażemy dalej, jak podatność pomaga w utrzymaniu dynamicznej stabilności chodu. Podobne zagadnienie było rozważane w pracy [50], jednak koncepcja podatności i zastosowana tam metoda obliczeniowa były uproszczone w stosunku do tu przedstawionych.

16.4. Analiza sił działających na stopę

Zakładamy, iż współczynniki sprężystości sprężyn są stałe, to znaczy, że sprężyny ulegają ścisnaniu proporcjonalnie do działających na nie sił. Rozważamy tylko składowe pionowe siły, gdyż składowe poziome są o wiele mniejsze i ich wkład w odkształcenie stopy wzdłuż osi poziomej jest pomijalny.

Na rysunku 16.12 jest przedstawiony poglądowy schemat stopy oraz wektory sił i układ odniesienia. Warunek równowagi momentów sił formułujemy, stosując analogiczne rozumowanie jak w kryterium ZMP, uwzględniając dodatkowo elementy podatne.

Warunek równowagi sił w układzie OXYZ jest następujący:

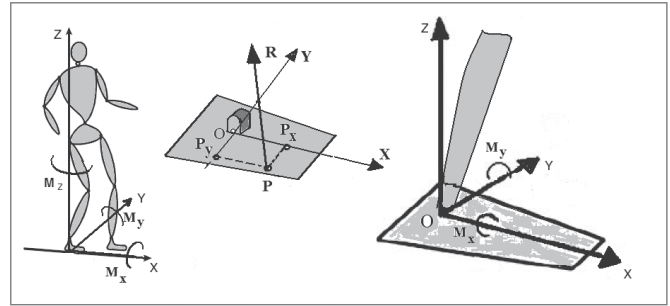
$$\sum_i m_i ({}^O\ddot{\mathbf{r}}_i + {}^O\mathbf{g}) = {}^O\mathbf{F} = [{}^OF_x, {}^OF_y, {}^OF_z]^T, \quad (16.11)$$

gdzie m_i jest masą i -tego segmentu ciała robota, ${}^O\mathbf{r}_i = [{}^Ox_i, {}^Oy_i, {}^Oz_i]^T$ jest wektorem pomiędzy punktem O a masą punktową m_i , ${}^O\mathbf{g} = {}^O[0, 0, -g]^T$ to stała grawitacji, składnik $m_i({}^O\ddot{\mathbf{r}}_i + {}^O\mathbf{g}) = {}^O\mathbf{F}_i$ reprezentuje siłę grawitacji działającą na masę m_i wraz z siłą bezwładności, ${}^O\mathbf{F}$ to wektor siły wypadkowej działającej na punkt O :

$${}^O\mathbf{F} = \sum_j {}^O\mathbf{F}_j, \quad j = \{fr, ba\} \text{ albo } j = \{le, ri\}, \quad (16.12)$$

${}^O\mathbf{F}_{fr}$, ${}^O\mathbf{F}_{ba}$ oraz ${}^O\mathbf{F}_{le}$, ${}^O\mathbf{F}_{ri}$ to odpowiednio siły wypadkowe działające na przednią, tylną, lewą i prawą krawędź stopy. Całkowita siła reakcji jest równa $(-{}^O\mathbf{F})$. W posturze dynamicznie stabilnej momenty obrotowe od tej siły względem osi układu $OXYZ$ równoważą momenty wynikające z dynamiki ruchu całego ciała (inaczej mówiąc, równoważą wszystkie momenty składowe $(\sum_i {}^O\mathbf{r}_i \times {}^O\mathbf{F}_i)$ pochodzące od sił ${}^O\mathbf{F}_i$):

$$\sum_i {}^O\mathbf{r}_i \times {}^O\mathbf{F}_i = \sum_j {}^O\mathbf{r}_j \times {}^O\mathbf{F}_j. \quad (16.13)$$



Rys. 16.5. Prawo punktu zerowego momentu - rysunek poglądowy

Na podstawie lewej strony równania (16.13) wyznacza się momenty M_x^B oraz M_y^B pochodzące od poruszającego się układu (ciała człowieka lub robota):

$$M_x^B = \sum_i ({}^Oy_i {}^OF_{zi} - {}^Oz_i {}^OF_{yi}), \quad (16.14)$$

$$M_y^B = \sum_i (-{}^Ox_i {}^OF_{zi} + {}^Oz_i {}^OF_{xi}).$$

Tak jak w kryterium ZMP pomija się składniki wynikające z obrotów brył oraz rozważa jedynie momenty M_x i M_y , pomijając M_z . Na podstawie wzorów (16.13) oraz (16.14) jest:

$$\begin{aligned} \sum_i ({}^Oy_i {}^OF_{zi} - {}^Oz_i {}^OF_{yi}) &= \sum_j ({}^Oy_j {}^OF_{zj} - {}^Oz_j {}^OF_{yj}), \quad \text{dla } j = \{ri, le\}, \\ \sum_i (-{}^Ox_i {}^OF_{zi} + {}^Oz_i {}^OF_{xi}) &= \sum_j (-{}^Ox_j {}^OF_{zj} + {}^Oz_j {}^OF_{xj}), \quad \text{dla } j = \{fr, ba\}. \end{aligned} \quad (16.15)$$

Przyjmując teraz, iż wysokość kostki nad podłożem Oz_j jest stała i wynosi h (${}^Oz_j = h$) oraz odpowiednio grupując składniki wzorów (16.15), otrzymujemy:

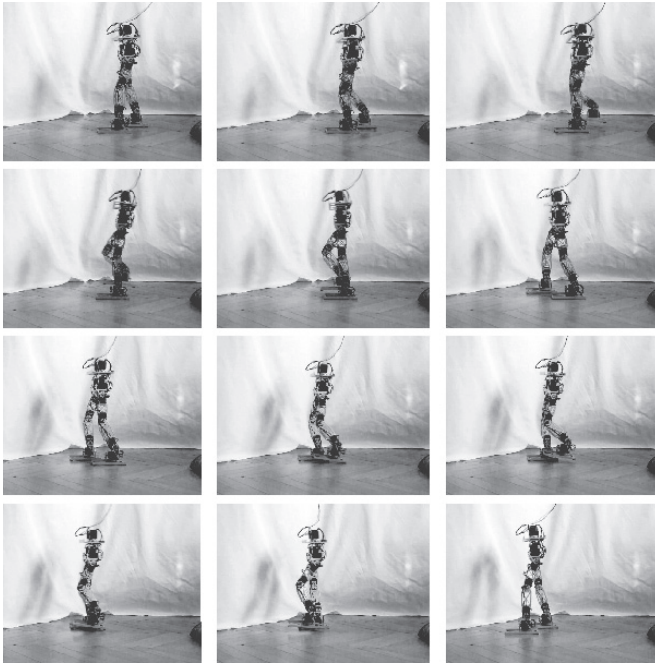
$$\begin{aligned} {}^OF_{zri} &= \frac{{}^Oy_{le} {}^OF_z - h {}^OF_y - M_x^B}{{}^Oy_{le} - {}^Oy_{ri}}, \\ {}^OF_{zle} &= {}^OF_z - {}^OF_{zri}, \\ {}^OF_{zfr} &= \frac{{}^Ox_{ba} {}^OF_z - h {}^OF_x + M_y^B}{{}^Ox_{ba} - {}^Ox_{fr}}, \\ {}^OF_{zba} &= {}^OF_z - {}^OF_{zfr}. \end{aligned} \quad (16.16)$$

Siłę OF_z wyznaczamy, wykorzystując (16.12), gdzie M_x^B , M_y^B są wyrażone wzorami (16.14).

16.5. Wykorzystanie podatności do stabilizacji postury

16.5.1. Rozkłady sił na przykładzie chodu człowieka

Przeanalizujmy działanie podatnej stopy w trakcie chodu. Aby dobrać sztywność wirtualnych sprężyn, uwzględnimy chód człowieka oraz parametry kinematycznie jego ciała. Do obliczeń wartości sił i momentów M_x^B , M_y^B według zależności (16.16) został wykorzystany uproszczony model ciała człowieka [40] pokazany na rys. 16.13. Model dotyczy 50-centylowego mężczyzny o wzroście 1,75 m i masie ciała 75 kg. Stosujemy zarejestrowany dla tej osoby wzorzec chodu i wyznaczamy przemieszczenia poszczególnych mas punktowych modelu oraz



Rys. 16.6. Robot poruszający się zgodnie ze wzorcem wygenerowanym przez oscylatory sprzężone



Rys. 16.7. Sekwencja konfiguracji stopy w fazie podparcia

ich przyspieszenia, co pozwala na obliczenie sił bezwładności, a w rezultacie też momentów sił. Zarejestrowany chód spacewowy był realizowany z typową prędkością 3,5 km/h. Dla tych danych na podstawie wzoru (16.16) wyznaczamy siły działające na stopę, badając jak zmiany szerokości ${}^0y_{le}$, ${}^0y_{ri}$ i długości ${}^0x_{ba}$, ${}^0x_{fr}$ stopy wpływają na rozkład sił krawędziowych w fazie podporowej.

Pokazane na rys. 16.14 wyniki dotyczą prawej stopy (wyniki dla lewej stopy będą analogiczne). Jak widać, przy szerszej stopie mniejsze jest zróżnicowanie składowych sił działających na krawędzie boczne, podobnie przy dłuższej stopie różnica pomiędzy przednią a tylną składową siły jest mniejsza.

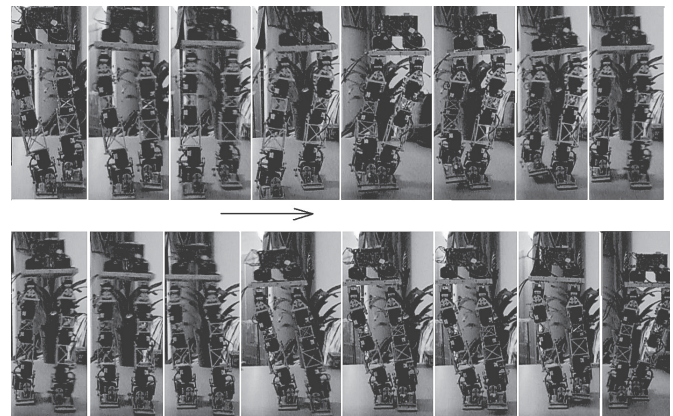
Na rysunku 16.14c jest pokazane, jak brak symetrii w budowie stopy wzdłuż osi Y wpływa na rozkłady sił. Przy szerszej zewnętrznej partii stopy (od kostki do prawej krawędzi) różnica pomiędzy siłami działającymi na lewą i prawą krawędź rośnie w miarę upływu fazy podparcia. Sytuacja jest odwrotna, gdy zewnętrzna część stopy jest węższa. Przedstawione wykresy potwierdzają, iż zmiany wymiarów stopy wpływają odpowiednio na rozkłady sił oddziałujących na jej krawędzie.

16.5.2. Wpływ podatności na dynamiczną stabilność chodu

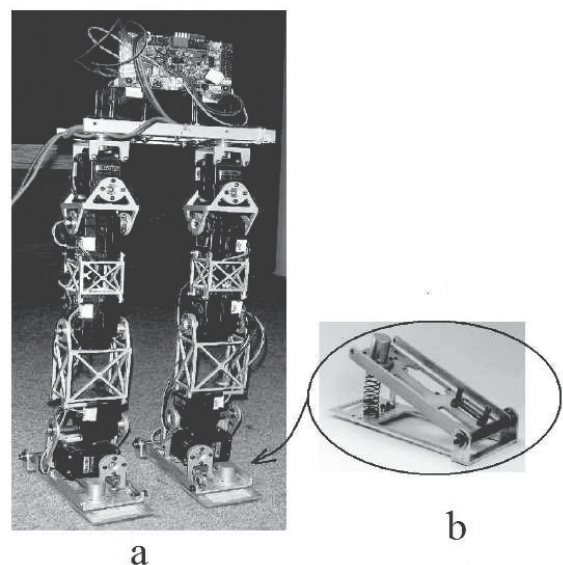
Właściwie dobrana podatność stopy wspomaga stabilność dynamiczną chodu. Przyjmujemy, iż konstrukcja stopy

zapewnia inne linowe sztywności dla sił bocznych oraz inne dla sił przednio-tylnych. Dobierzemy teraz podatności stopy tak, aby wspomagała ona dynamiczną stabilność chodu. Ugięcie liniowe wirtualnej sprężyny jest proporcjonalne do działającej siły: $\Delta h_j = \frac{{}^0F_{zj}}{k_j}$ ($j = \{ri, le\}$ oraz $j = \{fr, ba\}$), gdzie k_j jest współczynnikiem sztywności j -tej sprężyny. Uwzględniamy typowe wymiary stopy dorosłego mężczyzny. Odległość od kostki (od punktu obrotu w stawie skokowym) do przedniego końca stopy wynosi 20 cm, odległość od kostki do tylnej krawędzi – 8 cm, środek stawu skokowego znajduje się pośrodku szerokości stopy równej 6 cm.

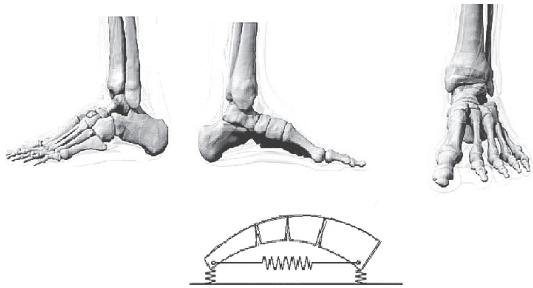
Pod wpływem działających sił górna warstwa zaproponowanego modelu stopy przechyla się proporcjonalnie do wartości współczynników sztywności. Dobieramy iteracyjnie takie sztywności sprężyn, aby przechylenia górnej warstwy modelu stopy nie były większe niż typowe przechylenia tułowia człowieka. Przykładowo, dla uwzględnionego modelu współczynnik sztywności przedniej jest równy 0,05 MN/m, – tylnej 2 MN/m, oraz identyczny dla lewej i prawej strony – wynoszący 0,9 MN/m. Uzyskane dla tych danych wyniki są pokazane na



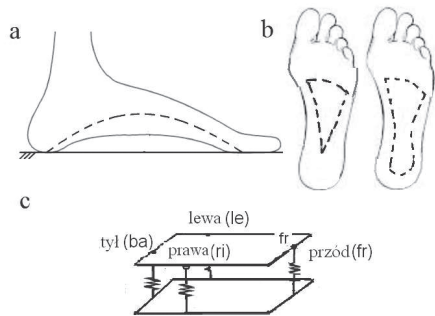
Rys. 16.8. Chód robota ze stopami podatnymi (z naszych prac)



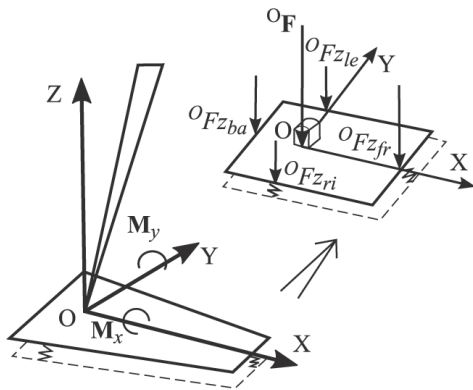
Rys. 16.9. Robot własnej konstrukcji wykorzystywany w badaniach: a) widok robota, b) widok jego stopy z wbudowanym elementem podatnym



Rys. 16.10. Stopa człowieka i jej uproszczona reprezentacja [26]



Rys. 16.11. Podatność stopy: a) widok boczny z zaznaczonym łukiem stopy, b) widok z góry pokazujący łuk poprzeczny oraz obrys całkowitego łuku stopy, c) model podatnej stopy



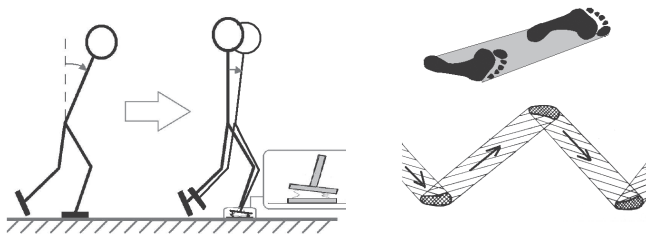
Rys. 16.12. Siły działające na stopę, początek układu odniesienia OXYZ znajduje się w stawie skokowym (w obrotowym mocowaniu stopy)

rys. 16.15. Przechylenie boczne górnej warstwy stopy ilustruje rys. 16.15a, a przechylenie przód – tył – rys. 16.15b.

Na rysunku 16.16 porównano położenie ZMP wyznaczone dla tych sztywności w fazie jednopodporowej stopy podatnej z położeniem ZMP dla stopy bez podatności. W celu wykazania zalety stopy podatnej założono, iż dla stopy bez podatności górna część ciała jest mniej pochylana niż ma to miejsce w przypadku człowieka. Przyjęto przednio-tylne pochycenie tułowia mieszczące się w zakresie $[0^\circ, 1^\circ]$, a boczne przechylenie $[-0,2^\circ, 0,2^\circ]$. Dla porównania w chodzie człowieka przechylenie przód-tył wynosi przeciętnie $[-8^\circ, 8^\circ]$, a przechylenie boczne jest nie mniejsze niż $[-4^\circ, 4^\circ]$. Przechylenia te ilustruje rys. 16.17.

W przedstawionym przykładzie dla stopy bez podatności w końcu fazy podporowej nie jest zachowana stabilność dynamiczna, gdyż współrzędna p_x ZMP przekracza graniczną wartość 20 cm.

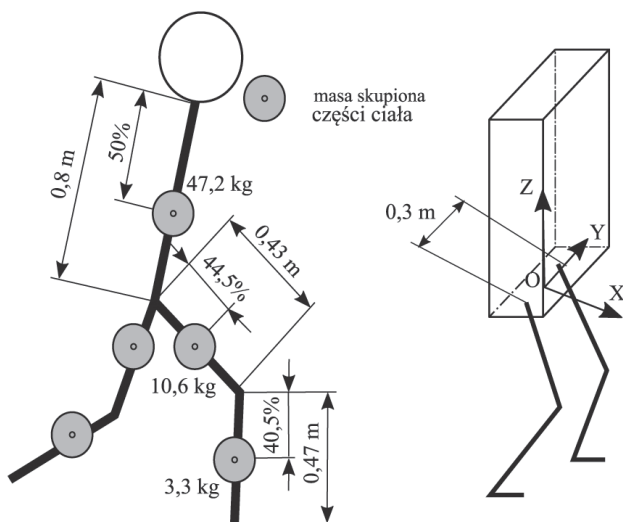
Oznacza to, iż robot będzie przewracał się do przodu. Natomiast dodatkowe pochylenie ciała uzyskane dzięki ugięciom stopy (rys. 16.15) wprowadza ZMP do wnętrza śladu stopy, ponieważ p_x w całym okresie podparcia mieści się z powrotem w granicy 20 cm. Uzyskane dzięki sprężynom przechyły boczne powodują, iż współrzędna p_y ZMP zmienia się w większym niż uprzednio zakresie, pozostając jednak w granicach ± 3 cm. Należy dodać, iż większe niż bez podatności przesunięcie p_y w kierunku dodatnim w końcu fazy jednopodporowej stwarza właściwe warunki początkowe dla rozpoczęcia fazy dwupodporowej, w której to punkt ZMP przenosi się z punktu śladowego prawej nogi do nogi lewej (patrz dolna część rys. 16.18). Zamieszczone wykresy ilustrują, jak stabilność posturalna jest wspomagana przez stopy o odpowiednich podatnościach.



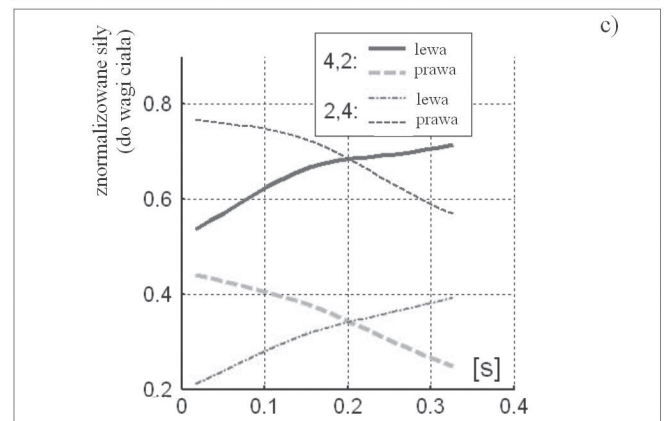
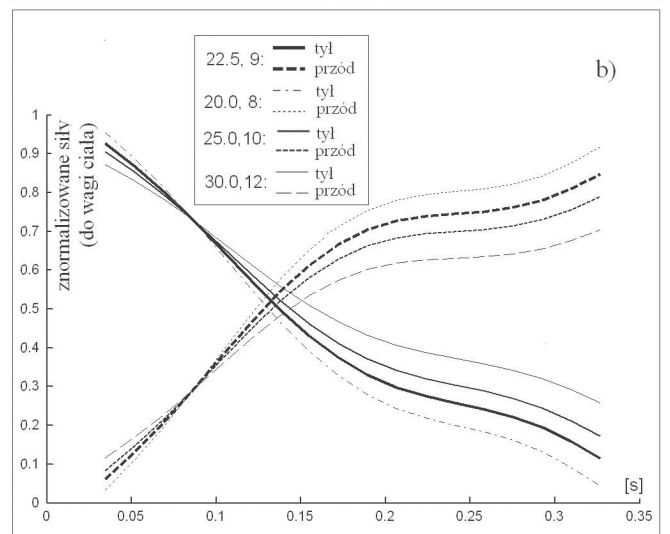
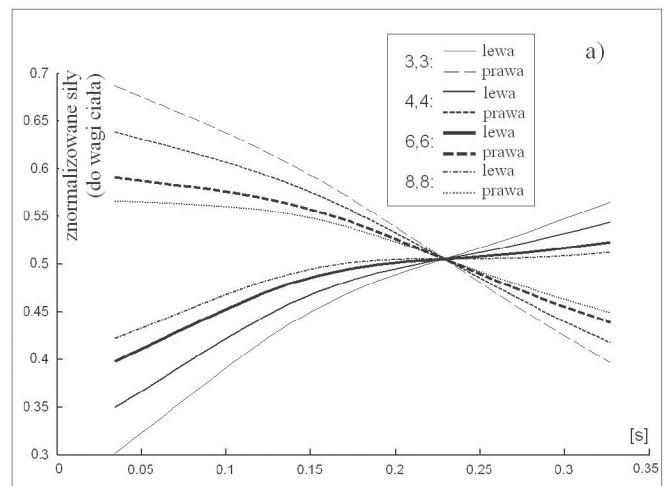
Rys. 16.18. a) Zmiana postury uzyskana dzięki podatnej stopie, b) szkic trajektorii ZMP w fazie dwupodporowej [22]

16.6. Podsumowanie i wnioski

Niniejszy rozdział przedstawia syntetyczne spojrzenie na zagadnienie generowania chodu maszyn kroczących i robotów humanoidalnych. Szczególną uwagę poświęcono roli



Rys. 16.13. Uwzględniony w obliczeniach model ciała



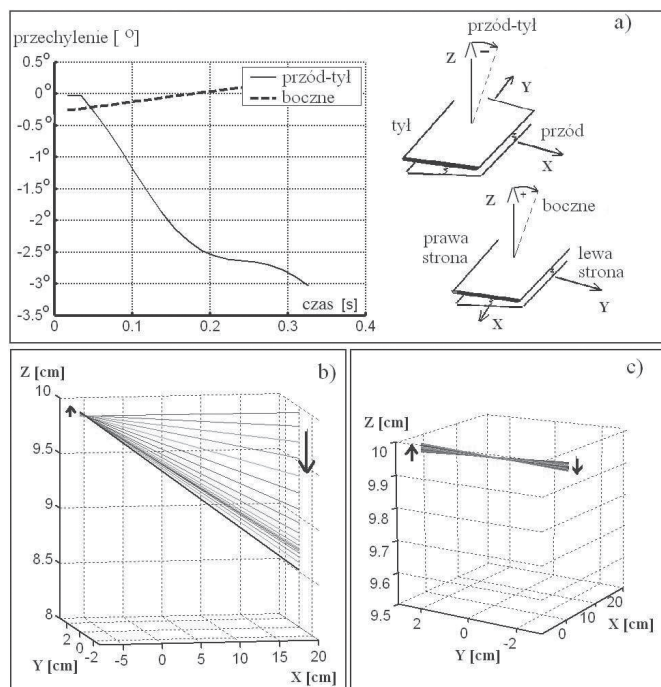
Rys. 16.14. Siły znormalizowane (w stosunku do wagi ciała) w fazie jednopodporowej: a) siły boczne w zależności od wymiarów stopy (w legendzie pierwsza podana wartość to odległość od kostki do prawej krawędzi, druga - do lewej krawędzi), b) siły przednie i tylne (w legendzie pierwsza podana wartość to odległość od kostki do przedniej krawędzi, druga - do tylnej krawędzi), c) siły boczne dla stopy niesymetrycznej (legenda jest analogiczna jak w a). Terminy lewa, prawa, przód, tył oznaczają odpowiednio siły działające na lewą, prawą, tylną i przednią sprężynę wirtualną.

podatności w chodzie dwunożnym. Jest to zagadnienie bardzo istotne, gdyż uzyskanie podatnych stóp i odpowiednio podatnego całego ciała, to ostatni konstrukcyjny krok na drodze do zbudowania sprawnie poruszającego się robota asystenta.

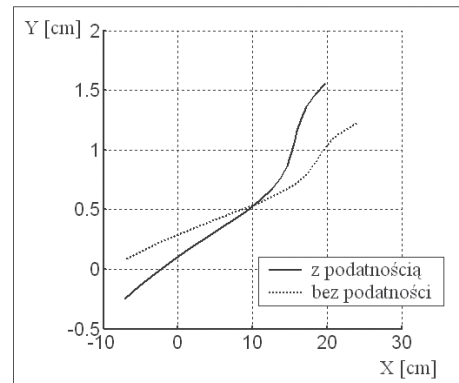
Pasywna podatność stóp może być stosowana jako wyłączny element wspierający dynamiczną stabilność chodu. W tym rozwiązaniu zaletą jest uproszczenie, gdyż zarówno w projekcie, jak i w syntezie ruchu robota można pominąć stopnie swobody odpowiedzialne za przechyły korpusu. Drugim rozwiązaniem jest połączenie przechyłów korpusu i pracy stóp, czyli zbudowanie robota pełniej imitującego cechy ciała człowieka.

Współczesne konstrukcje stóp robotów coraz bardziej przypominają stopy człowieka, brakuje jednak metody wyznaczania podatności. Stopy są przeważnie budowane z komponentów sztywnych, wspomaganym przez wbudowane elementy podatne. Nie stosuje się rozwiązań zapewniających przestrzenną podatność podobną do podatności stopy człowieka. Połączenie prac nad sprężynami przestrzennymi z przedstawioną koncepcją podatnej stopy jest obiecującą alternatywą.

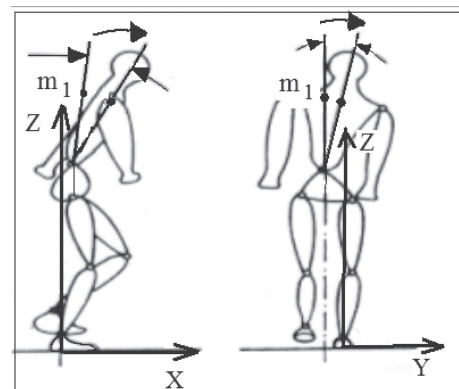
Jak wynika z treści niniejszego rozdziału, wykorzystanie wzorców biologicznych jest istotne dla współczesnej robotyki. Znajomość cech lokomocji zwierząt i budowy ich ciała jest wykorzystywana przy budowaniu robotów wspomagających człowieka – robotów humanoidalnych i maszyn kroczących. Omówione zagadnienia dotyczą wyłącznie przemieszczania się, jednak wykorzystanie wzorców biologicznych w robotyce sięga znacznie dalej i dotyczy np. rozpoznawania emocji człowieka przez robota, wyrażania emocji, przewidywania działań



Rys. 16.15. Przechylenia górnej warstwy stopy: a) kąty przechylenia – ujemna wartość oznacza przechylenie do przodu albo odpowiednio, w prawą stronę, b) graficzna ilustracja zmiany przechylenia przód-tył (strzałki wskazują upływ czasu), c) graficzna ilustracja zmiany przechylenia na boki (strzałki wskazują upływ czasu)



Rys. 16.16. Trajektorie ZMP przy zastosowaniu stopy sztywnej i rozważanej stopy podatnej



Rys. 16.17. Przechylenia górnej części ciała zmieniające położenie masy m_1 . Największe pochYLENIE korpusu człowieka do przodu jest w połowie fazy przenoszenia nogi (po lewej), przechylenie boczne w kierunku nogi podpierającej jest największe w połowie fazy przenoszenia przeciwległej nogi (po prawej).

człowieka [21] oraz ich wspomaganie, czy też inteligentnej współpracy z człowiekiem [35, 47].

Przypisy

- [1] Na rysunku przyjęto następujące oznaczenia: $biodro_i(osc)$ ($i = 1, 2$) oznacza trajektorię kątową stawu biodrowego i -tej nogi wygenerowaną przez oscylator, $biodro_i(czł)$ ($i = 1, 2$) oznacza trajektorię kątową stawu biodrowego i -tej nogi człowieka, analogiczną notację zastosowano dla stawu kolanowego. Widoczne niewielkie różnice pomiędzy trajektoriami człowieka oraz wygenerowanymi przez oscylatory są w pełni akceptowalne, gdyż wygenerowany chód jest stabilny dynamicznie. Chód ludzki też nie jest idealnie powtarzalny, z kroku na krok różnice mogą wynosić kilka stopni, co również uzasadnia dopuszczalność niedokładności.

Literatura

- [1] Adamczyk P.G., Collins S.H., Kuo A.D.: The advantages of a rolling foot in human walking, *Journal of Experimental Biology*, 209(20): 3953 – 3963, 2006.
- [2] Choi K., Jiang S., Li Z.: Spatial stiffness realization with parallel springs using geometric parameters, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 18(3): 274 – 284, 2002.
- [3] Delcomyn F.: Insect locomotion on land. *Locomotion and exercise in antropods*, Herreid C.F., Fournier C.R. (red.), Plenum, Nowy Jork 1981, str. 103 – 125.
- [4] Elftman H.: Dynamic structure of the human foot, *Artificial Limbs*, 13(1): 49 – 58, 1969.
- [5] Feng S., Whitman E., Xinjilefu X., Atkeson Ch.G.: Optimization based full body control for the atlas robot, *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2014, str. 120 – 127.
- [6] Gonz´alez de Alba A., Zielińska T.: Postural equilibrium criteria concerning feet properties for biped robots, *J. of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 6(1): 22 – 27, 2012.
- [7] Grillner S.: Control of locomotion in bipeds, tetrapods and fish. *Handbook of Physiology. The Nervous System, Motor Control*, tom 2, Brooks V.B. (red.), American Physiological Society, Bethesda 1986, str. 1179 – 1236.
- [8] Hwang J., Suh I.H., Park G., Kwon T.: Human character balancing motion generation based on a double inverted pendulum model, *10-th International Conference on Motion in Games (ACM)*, str. 1 – 11, 2017.
- [9] Kajita S., Kanehiro F., Kaneko K., Yokoi K., Hirukawa H.: The 3d linear inverted pendulum model: a simple modeling for a biped walking pattern generation, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1: 239 – 246, 2001.
- [10] Lark S.D., Buckley J.G., Bennett S., Jones D., Sargeant A.J.: Joint torques and dynamic joint stiffness in elderly and young men during stepping down, *Clinical Biomechanics*, 18(9): 848 – 855, 2003, doi: 10.1016/S0268-0033(03)00150-5.
- [11] Ludvig D., Pfeifer S., Hu X., Perreault E.J.: Time-varying system identification for understanding the control of human knee impedance, *IFAC Proceedings Volumes*, 45(16): 1306 – 1310, 2012.
- [12] Manoonpong P., Kulvicius T., Wörgötter F., Kunze L., Renjewski D., Seyfarth A.: Compliant ankles and flat feet for improved self-stabilization and passive dynamics of the biped robot „runbot”, *11th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, str. 276 – 281, 2011, doi: 10.1109/Humanoids.2011.6100804.
- [13] Meyer F., Sprowitz A., Lungarella M., Berthouze L. Simple and low-cost compliant leg-foot system, *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*(IEEE Cat. No.04CH37566, tom 1, str. 515 – 520, 2004, doi: 10.1109/IROS.2004.1389404.
- [14] Nakanishi Y., Namiki Y., Hongo K., Urata J., Mizuuchi I., Inaba M.: Design of the musculoskeletal trunk and realization of powerful motions using spines, *7th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, str. 9 – 101, 2001, doi: 10.1109/ICHR.2007.4813854.
- [15] Omer A., Ghorbani R., Hashimoto K., Hun-ok Lim, Takanishi A.: A novel design for adjustable stiffness artificial tendon for the ankle joint of a bipedal robot: modeling and simulation, *Machines*, 4(2): 1 – 22, 2015.
- [16] Omran S., Sakka S., Aoustin Y.: Using the generalized inverted pendulum to generate less energy-consuming trajectories for humanoid walking, *Archive of Mechanical Engineering*, 63(2): 245 – 262, 2016.
- [17] Ramamoorthy L., Zielińska T.: Robot motion synthesis using ground reaction forces pattern, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 14(4): 1 – 12, 2017.
- [18] Raibert M.H.: *Legged robots that balance*, MIT Press, Cambridge, MA, 1986).
- [19] Shaoping B., Low K.H., Zielinska T.: Quadruped free gait generation based on the primary/secondary gait, *Robotica*, Int17: 405 – 412, 1999.
- [20] Shaoping B., Low K.H., Zielinska T.: Quadruped Free Gait Generation for Straight-line and Circular Motion, *Advanced Robotics Journal*, 13(5): 513 – 538, 1999.
- [21] Vibekananda D., Zielińska T.: Predicting human actions taking into account object affordances, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 90: 1 – 17, 2018.
- [22] Vukobratovic M.: *Szagajuszczije masziny i antropomoficzieskij mechanism*, MIR, Moskwa 1978.
- [23] Vukobratovic M., Borovac B.: Zero-moment point – thirty five years of its life, *International Journal of Humanoid Robotics*, 1(1): 157 – 173, 2004.
- [24] Wilson D.M.: Insect walking, *Annual Review of Entomology*, 11: 103 – 122, 1966, doi: 10.1146/annurev.en.11.010166.000535.
- [25] Winter D.A.: Human balance and posture control during standing

reklama

- and walking, *Gait and Posture*, 3(4): 193 – 214, 1995.
- [26] Wright W.G., Ivanenko Y.P., Gurfinkel V.S.: Foot anatomy specialization for postural sensation and control, *Journal of Neurophysiology*, 107(5): 1513–1521, 2012.
- [27] Zhang P., Zhou C., Zhang L., Tian Y., Liu Z.: Adaptive compliant control of humanoid biped foot with elastic energy storage, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, str. 928 – 933, 2009.
- [28] Zhou D., Low K.H., Zielinska T.: An efficient foot-force distribution algorithm for quadruped walking robots, *Robotica*, 18: 403 – 413, 2000.
- [29] Zielinska T.: Biological inspiration used for robots motion synthesis, *Journal of Physiology-Paris*, 103(3 – 5): 133–140, 2009.
- [30] Zielinska T.: Control and navigation aspects of a group of walking robots, *Robotica*, textbf 24: 23 – 29, 2006.
- [31] Zielinska T.: Coupled oscillators utilised as gait rhythm generators of two legged walking machine, *International Journal of Biological Cybernetics*, 4(3): 263 – 273, 1996.
- [32] Zielinska T.: Design issues and robots autonomy, [w:] *New Trends in Mechanisms and Machine Science. Theory and Applications in Engineering*, Viadero F., Ceccarelli M. (red.), Springer, 2013, str. 691 – 699.
- [33] Zielinska T.: *Maszyny kroczące*, wyd. 2, WN PWN, Warszawa 2014.
- [34] Zielińska T.: Minimizing energy cost in multi-legged walking machines, *Journal of Intelligent Robotic Systems*, 85: 431 – 447, 2017.
- [35] Zielińska T.: Professional and personal service robots, *International Journal of Robotics Applications and Technologies*, 4(1): 63 – 82, 2016.
- [36] Zielinska T.: Robots for space exploration: barriers, perspectives and implementations, [w:] *Aerospace Robotics II*, J. Sasiadek (red.), Springer, 2015, str. 1 – 11.
- [37] Zielinska T.: Self-navigation principles for a team of walking robots, *Electro-mechanical Review*, 82(1): 53 – 57, 2006.
- [38] Zielinska T.: Utilisation of biological patterns in biped gait generation, *Journal of Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 18(102): 79 – 88, 1998.
- [39] Zielinska T., Chew C-M., Kryczka P., Jargiło T.: Robot gait synthesis using the scheme of human motion skills development, *Mechanism and Machine Theory*, 44(3): 541 – 558, 2009.
- [40] Zielińska T., Chmielniak A.: Biologically inspired motion synthesis method of two-legged robot with compliant feet, *Robotica*, 29: 1049 – 1057, 2011.
- [41] Zielińska T., Heng J.: Development of walking machine: mechanical design and control problems, *Mechatronics*, 12(5): 737 – 754, 2002, doi: 10.1016/S0957-4158(01)00017-4.
- [42] Zielińska T., Heng J.: Mechanical design of multifunctional quadruped, *Mechanism and Machine Theory*, 38(5): 463 – 478, 2003, doi: 10.1016/S0094-114X(03)00004-1.
- [43] Zielińska T., Heng J.: Multifunctional quadruped, *Robotica*, 20: 585 – 593, 2002.
- [44] Zielińska T., Heng J.: Real-time control system for a group of autonomous walking robots, *Advanced Robotics*, 20(5): 543 – 561, 2006.
- [45] Zielińska T., Trojnecki M.: Dynamical approach to the diagonal gait synthesis: theory and experiments, *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 3(2): 3 – 7, 2009.
- [46] Zielińska T., Trojnecki M.: Analiza rozkładu sił reakcji podłoża podczas dynamicznie stabilnego chodu robota dwunożnego, *Pomiary Automatyka Robotyka*, 13(7 – 8): 6 – 10, 2009.
- [47] Zieliński C., Zielińska T.: Cyfrowa opieka, *Niezbędnik inteligenta*, nr 2/2017: 43–45, 2017.
- [48] Żurawska M., Szumowski M., Zielińska T.: Reconfigurable double inverted pendulum applied to the modelling of humanoid robot motion, *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 11(2): 12 – 20, 2017.
- [49] Żurawska M., Zielinska T.: Feet compliance in two legged locomotion, [w:] *New Trends in Mechanism and Machine Science. From Fundamentals to Industrial Applications*, Flores P., Viadero F. (red.), Springer, 2015, str. 595 – 602.
- [50] Żurawska M., Zielińska T., Szumowski M.: The role of compliant elements in two legged robot foot's model, *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 9(1): 68 – 76, 2015.