

Dr inż. Maciej T. Trojnacki
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów
Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa
Telefon: +48 22 8740 341, email: mtrojnacki@piap.pl

SYNTEZA RUCHU ROBOTA CZTERONOŻNEGO

W pracy przedstawiono nowatorską metodę syntezy ruchu robota czteronożnego o strukturze ssaka, w której przenoszone są jednocześnie dwie nogi robota przy równoczesnym ruchu korpusu. Omówiono strukturę kinematyczną robota i pokazano jego model konstrukcji. Opisano sposób syntezy elementarnych ruchów robota takich, jak ruch podłużny i ruch obrotowy. Podano rozwiązanie zadania odwrotnego kinematyki dla nóg robota, umożliwiające wyznaczenie kątów przegubowych. Syntezę ruchu robota zrealizowano z uwzględnieniem położenia jego środka masy i punktu zerowego momentu.

SYNTHESIS OF MOTION FOR A FOUR-LEGGED ROBOT

This paper presents an innovative four-legged, mammal-structured robot motion synthesis method, which involves a simultaneous transfer of two of the robot's legs, along with its body. The author discusses the kinematic structure of the robot and shows its construction model. The robot's primary motion synthesis, such as rotational and straight-line motion is also mentioned. The solution to the inverse kinematics of the robot's legs is given, which makes it possible to determine their articulated angles. The robot's motion synthesis was analyzed, taking its center of gravity (CG) and zero moment point (ZMP) into consideration.

1. WPROWADZENIE

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 (roboty kołowe, gąsienicowe itp.). Złożonym problemem jest także analiza dynamiczna tego typu robotów.

Roboty kroczące posiadają różną liczbę nóg. Podobnie jak zwierzęta i ludzie, roboty zawierają parzystą liczbę nóg, w szczególności 2, 4 i 6. Konstrukcje robotów sześcionożnych były analizowane głównie w początkowym okresie rozwoju lokomocji dyskretnej i zazwyczaj zawierają one prosty wzorzec ruchu. Największe zainteresowanie obecnie należy do robotów dwunożnych, a dokładnie humanoidalnych. Nieco mniej miejsca poświęcają autorzy robotom czteronożnym. O ile roboty humanoidalne są pomyślane jako roboty osobiste, wspomagające np. ludzi starszych, to roboty czteronożne mogą znaleźć zastosowanie jako roboty usługowe, gdyż tego typu roboty lepiej nadają się np. do przenoszenia ładunków.

Roboty czteronożne mają różną strukturę kinematyczną. Najczęściej stosowana jest struktura ssaka [1,5,7,10] i kraba [3,6,8,9], rzadziej struktura owada [4]. Posiadają one różną liczbę napędów. Typowo jest ich 12 [2,3,4,5,6,7,9,10], rzadziej mniej, np. tylko 4, 8 lub więcej, tj. 21 [1]. W zdecydowanej większości przypadków stosowane napędy realizują obroty w stawach robota, choć zdarzają się także połączenia pryzmatyczne. Roboty kroczące posiadają także czasem pasywne stopnie swobody związane przede wszystkim ze stopą [5,6,9,10], co ma umożliwić dostosowanie się stopy robota do podłoża. Czasami są one również wyposażone w sprężyny [5,10], których zadaniem jest np. złagodzenie przejścia pomiędzy

fazą przenoszenia/podparcia i podparcia/przenoszenia. Zdarzają się także pasywne [8] bądź aktywne [1] stopnie swobody w tułowie robota.

Roboty czteronożne poruszają się zazwyczaj chodami stabilnymi statycznie, w których w danej chwili przenoszona jest tylko jedna noga robota. Odzwierciedleniem tego są liczne publikacje, m.in. [1,2,3,4,7,8]. Występuje wówczas różna liczba faz ruchu, np. 4 [2,3,8], 6 [4] i 8 [7]. W przypadku chodu statycznie stabilnego 4 fazy ruchu robota są zawsze związane z przeniesieniem pojedynczej nogi robota, a dodatkowe z przemieszczaniem korpusu, tak, aby zapewnić odpowiednią stabilność statyczną robota. W tego typu chodach, cały czas w trakcie ruchu robota rzut jego środka masy powinien znajdować się we wnętrzu wielokąta podparcia. Oczywiście taka metoda sprawdza się głównie w przypadku poruszania się robota po poziomej powierzchni.

Rzadko, ale coraz częściej można spotkać rozwiązania, w których ruch robota jest dynamicznie stabilny, realizowany jest on m.in. w pracach [5,6,9]. Ruch robota w tym przypadku jest praktycznie 2-4 krotnie szybszy w stosunku do chodu statycznie stabilnego. Wymaga on jednak zapewnienia odpowiedniej stabilności ruchu. Może to być zagwarantowane poprzez zastosowanie odpowiednio dużych stóp [10] lub układu stabilizacji ruchu, który może odpowiednio generować ruch nóg robota lub np. przemieszczać masę przeciwwagi.

Autorzy w różny sposób klasyfikują i nazywają chód robotów. Można spotkać się np. z podziałem na chody symetryczne i asymetryczne, regularne i swobodne, periodyczne i aperiodyczne [8], podstawowe i drugorzędne (ang.: primary, secondary), ciągłe i nieciągłe [4,8].

Generalnie można wyróżnić 2 zasadnicze sposoby generowania chodu robotów, tj.: oparte na wzorcach biologicznych i realizowane w oparciu o syntezę ruchu. Ruch robota w oparciu o jego syntezę jest realizowany w pracach [2,3,4,6,7,8,10]. Prace oparte na wzorcach biologicznych zazwyczaj wykorzystują ideę tzw. centralnego generatora rytmów (ang.: central pattern generator). Ruch robota realizowany jest wówczas z zastosowaniem oscylatorów sprzężonych [5,9] lub jako tzw. sieć cel.

Zasadniczą wadą podejścia opartego na centralnym generatorze rytmów są trudności w ustawieniu odpowiednich parametrów generatora w celu realizacji założonego ruchu. Zazwyczaj tą metodą realizowany jest tylko chód robota do przodu, choć w przyrodzie zwierzęta i ludzie mogą realizować także zakręcanie. Być może odpowiedzią na przyszłość jest połączenie syntezy ruchu robota z uczeniem centralnego generatora rytmów. Autor rozważa użycie takiego podejścia w przyszłych badaniach.

Autorzy generując ruch robota na drodze syntezy zazwyczaj projektują chód robota w prosty sposób. Konsekwencją takiego podejścia jest to, że występuje brak płynności ruchu korpusu robota, np. przemieszczane są tylko nogi przy nieruchomym korpusie, a następnie sam korpus przy nieruchomych stopach [4,7] lub realizują wolny chód statycznie stabilny składający się z 4 faz ruchu [2,3,8]. Często autorzy w syntezie ruchu robota koncentrują się wyłącznie na ruchu do przodu [2], a inne ruchy, np. związane z obracaniem czy zakręcaniem robota realizują w bardzo prosty sposób [3,4,7]. Rzadko realizowany jest bardziej wyrafinowany ruch robota [1].

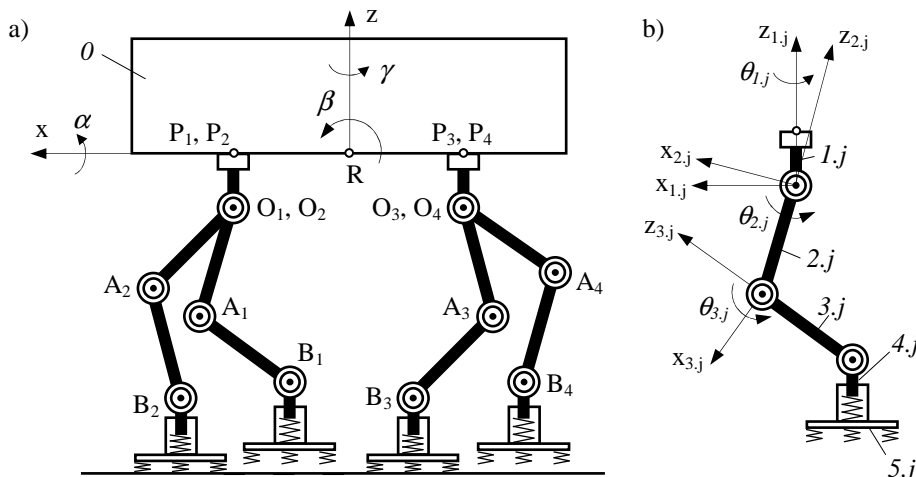
2. ROBOT CZTERONOŻNY

Praca dotyczy robota czteronożnego, którego struktura kinematyczna jest pokazana na Rys. 1a. Każda noga ma trzy aktywne stopnie swobody (Rys 1b). Przy numeracji nóg przyjęto konwencję, że pierwsza cyfra oznacza numer członu w ramach danej nogi, natomiast druga numer nogi. Na Rys. 1 zaznaczono kąty: przechylenia, pochylenia i odchylenia korpusu

(odpowiednio α , β , γ), kąty przegubowe dla j -tej nogi ($\theta_{i,j}$), gdzie: $i = 1..5$, $j = 1..4$ oraz układy współrzędnych związane z korpusem robota i z j -tą nogą.

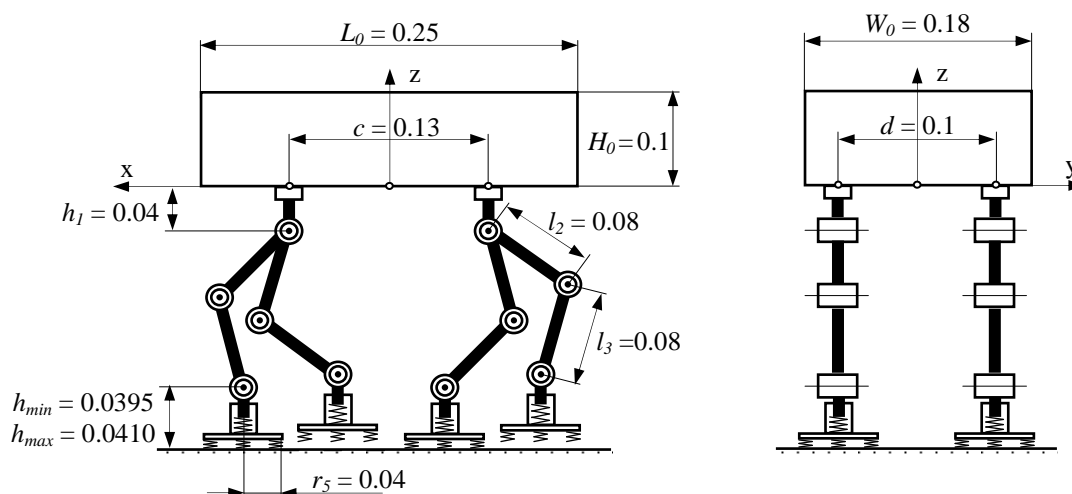
Robot składa się z następujących głównych elementów: korpusu – człón 0 , bioder – człony $1,j$, ud – człony $2,j$, goleni – człony $3,j$ i stóp – człony $4,j$ i $5,j$. Struktura kinematyczna nóg i umocowanie serwonapędów pozwala na zachowanie postury nóg podobnej do postury ssaków albo krabów. W niniejszym referacie analizuje się ruch robota dla struktury ssaka.

Każda noga robota jest napędzana 3. serwomechanizmami, które realizują obroty o kąty $\theta_{1,j} - \theta_{3,j}$ dla j -tej nogi robota ($j = 1..4$). Stopy robota mogą swobodnie obracać się o kąty $\theta_{4,j}$ i $\theta_{5,j}$. Zmiany kątów $\theta_{4,j}$ następują wskutek działających na stopy sił ciężkości i bezwładności. Z kolei zmiany kątów $\theta_{5,j}$ następują w efekcie zakręcania lub obrotu robota wokół osi z .



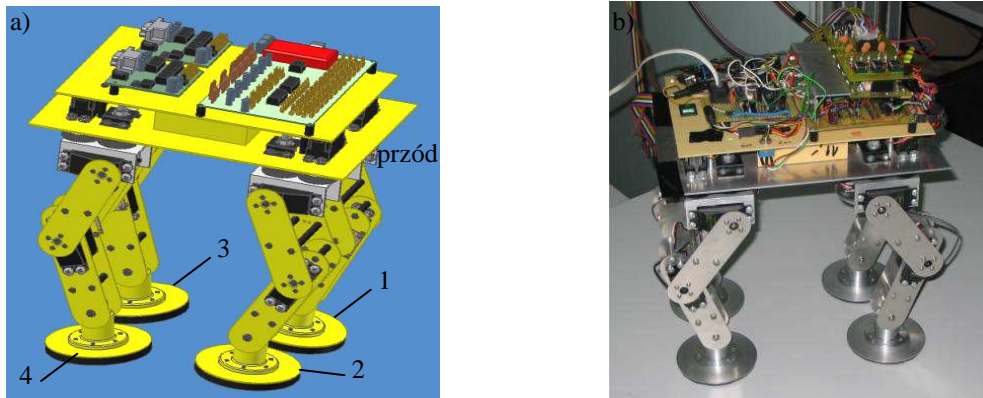
Rys. 1. Struktura kinematyczna robota czteronożnego (a), oznaczenia kątów przegubowych i układy współrzędnych (b) dla j -tej nogi

Najważniejsze wymiary robota pokazano na Rys. 2. Długość korpusu robota wynosi $L_0 = 0.25$ [m], szerokość $W_0 = 0.18$ [m], wysokość około $H_0 = 0.1$ [m], długości uda i goleni $l_2 = l_3 = 0.08$ [m]. Całkowita masa robota jest równa $m = 2.522$ [kg], masa korpusu $m_0 = 1.382$ [kg], masa biodra $m_{1j} = 0.094$ [kg], masa uda $m_{2j} = 0.034$ [kg], masa podudzia $m_{3j} = 0.08$ [kg], masa górnej części stopy $m_{4j} = 0.017$ [kg], masa dolnej części stopy $m_{5j} = 0.06$ [kg] ($j = 1..4$ – nr nogi).



Rys. 2. Struktura kinematyczna robota z zaznaczeniem najważniejszych wymiarów

Konstrukcja robota (Rys. 3a) została zaprojektowana w programie Autodesk Inventor. Na Rys. 3a pokazano sposób numeracji nóg robota. Model konstrukcji robota pokazano z kolei na Rys. 3b.



Rys. 3. Projekt konstrukcji robota opracowany w programie Inventor (a) oraz model konstrukcji robota (b)

W celu realizacji badań eksperymentalnych został opracowany prototypowy sterownik serwomechanizmów, który w zamyśle miał być sterownikiem podrzędnym dla nadrzędnego sterownika, który miał generować ruch robota. W kolanach i biodrach robota umieszczono potencjometry w celu pomiaru kątów przegubowych nóg. Opracowano także prototypowy układ do pomiaru prądu zużywanego przez poszczególne serwomechanizmy.

3. SYNTEZA RUCHU

W pracy dokonuje się syntezy ruchu robota dla przypadków jego ruchu po nieruchomej poziomej powierzchni. Zakłada się, że robot ze względu na korpus 0 może realizować ruch: podłużny (do przodu lub tyłu), obrotowy w lewo lub prawo (wokół osi z), boczny (w lewo lub prawo), zakręcanie (w lewo lub prawo i do przodu lub tyłu o zadany promień), podnoszenie lub opuszczenie korpusu, które mogą być realizowane równoległe z wyżej wymienionymi rodzajami ruchu. W trakcie każdego ruchu robota (poza podnoszeniem i opuszczaniem korpusu) przeniesione są jednocześnie dwie nogi, tj.: 1 i 4 lub 2 i 3.

W niniejszej pracy szczegółowo rozpatruje się dwa rodzaje ruchu korpusu robota: ruch podłużny i ruch obrotowy. Ruch boczny robota szczegółowo analizowany jest w pracy [10].

3.1. Ruch podłużny

Dla ruchu podłużnego korpusu robota do przodu lub tyłu zadaje się prędkość jego ruchu u_{RC} , długość kroku l , wysokość podniesienia nogi h i wysokość podniesienia korpusu robota H . W pierwszej kolejności wyznacza się współrzędne punktu R korpusu oraz punktów B_j stóp robota (Rys. 1) w nieruchomym układzie współrzędnych OXYZ. Zakłada się, że nieruchomy układ odniesienia znajduje się na poziomie gruntu. W pozycji początkowej oś z układu współrzędnych związanego z robotem pokrywa się z osią Z układu nieruchomego, a pozostałe osie układu związanego z robotem mają identyczną orientację osi jak układ nieruchomy. Współrzędne punktów R i B_j w układzie OXYZ opisane są za pomocą wielomianów czwartego stopnia ze względu na czas t , co zapewnia, że przebiegi prędkości i przyspieszeń tych punktów są funkcjami ciągłymi.

Ruch podłużny korpusu robota podzielono na 3 etapy:

- rozpędzanie – korpus jest rozpędzany od prędkości $u_R = 0$ do u_{RC} , natomiast nogi 1 i 4 przemieszczają się w tym samym czasie o połowę długości kroku ($l/2$),
- ruch ustalony – korpus przemieszcza się ze stałą prędkością $u_R = u_{RC}$, a nogi (1 i 4 lub 2 i 3) wykonują przemieszczenia o zadanej długości kroku l ,
- hamowanie – korpus jest hamowany od prędkości $u_R = u_{RC}$ do 0, podczas gdy nogi (1 i 4 lub 2 i 3) przemieszczają się o połowę długości kroku ($l/2$).

3.2. Ruch obrotowy

W przypadku ruchu obrotowego korpusu robota wokół osi z zadaje się analogiczne parametry jak w przypadku ruchu podłużnego, z tym, że tym razem zamiast prędkości u_{RC} zakłada się maksymalną prędkość kątową $\dot{\gamma}_C$, z jaką obraca się korpus robota. W trakcie jednego pełnego cyklu obracania prędkość kątowa obrotu własnego korpusu robota $\dot{\gamma}$ zmienia się od 0 do $\dot{\gamma}_C$, a następnie od $\dot{\gamma}_C$ do 0.

W wyniku obu cykli obracania korpus robota obraca się o kąt:

$$\Delta\gamma = 125\pi l / 180 \text{ [rad]}. \quad (1)$$

Przed rozpoczęciem obracania robot znajduje się w pozycji wyjściowej, w której odległości punktów B_j stóp lewych od prawych wynoszą $2r = d$, natomiast przednich od tylnych $c + 2l_0$. W związku z tym odległości punktów B_j ($j = 1..4$) od punktu R po zrzutowaniu na płaszczyznę Rxy wynoszą (Rys. 4):

$$R_{B0} = \sqrt{r^2 + (c/2 + k_0)^2}. \quad (2)$$

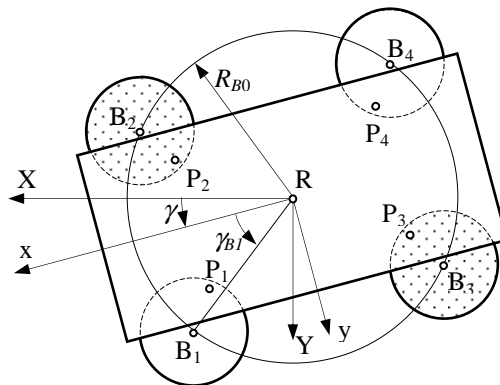
Z kolei początkowe wartości kątów γ_{Bj} wynoszą:

$$\gamma_{B0} = \text{atan} \left[r / (c/2 + k_0) \right] \quad (3)$$

W trakcie pierwszego cyklu obracania korpusu kąty γ_{Bj} zmieniają się od wartości γ_{B0} do $\gamma_{B0} + \Delta\gamma/2$, a w trakcie drugiego od wartości $\gamma_{B0} + \Delta\gamma/2$ do γ_{B0} , czyli po dwóch cyklach obracania nogi robota powracają do pozycji wyjściowej względem korpusu.

Na Rys. 4 pokazano robota w trakcie pierwszego cyklu obracania w lewo. W przypadku obracania korpusu robota w lewo w pierwszym cyklu obracania przenoszone są nogi 1 i 4, a w drugim nogi 2 i 3. Jeżeli korpus robota obraca się w prawo sytuacja jest odwrotna.

Zakłada się, że zmiana ruchu obrotowego korpusu robota na inny rodzaj ruchu np. podłużny, może nastąpić po wykonaniu obu cykli.



Rys. 4. Ilustracja obracania się korpusu robota wokół osi z

3.3. Zadanie odwrotne kinematyki

Znając wartości współrzędnych punktów B_j stóp w układzie nieruchomym OXYZ dokonuje się transformacji tych współrzędnych do układu Rxyz związanego z robotem. Następnie rozwiązuje się zadanie odwrotne kinematyki wyznaczając wartości kątów w przegubach robota $\theta_{i,j}$, gdzie: $i = 1..3, j = 1..4$. Kąty te wyznacza się stosując podejście geometryczne z zależności:

$$\theta_{1,j} = \text{atan} 2(y_{Bj} - y_{Oj}, x_{Bj} - x_{Oj}), \quad (4a)$$

$$\theta_{2,j} = \text{atan} 2(-x_{1Bj}, -z_{1Bj}) - \text{atan} 2(l_3 \sin \theta_{3,j}, l_2 + l_3 \cos \theta_{3,j}), \quad (4b)$$

$$\theta_{3,j} = -\text{atan} 2(\pm \sqrt{1 - D_j^2}, D_j), \quad D_j = (x_{1Bj}^2 + z_{1Bj}^2 - l_2^2 - l_3^2) / 2l_2l_3, \quad (4c)$$

gdzie: x_{1B_j}, z_{1B_j} - współrzędne punktu B_j w układzie $O_jx_{1,j}y_{1,j}z_{1,j}$, $x_{O_j}, y_{O_j}, x_{B_j}, y_{B_j}$ - współrzędne punktów O_j i B_j w układzie $Rxyz$ korpusu.

Wybierając znak \pm w równaniu (4c) decyduje się o konfiguracji j -tej nogi robota. Kąty $\theta_{3,j}$ są wyznaczone przed kątami $\theta_{2,j}$. Dla znanych wartości kątów przegubowych $\theta_{i,j}$ wyznaczone są prędkości i przyspieszenia kątowe oraz wartości sterowań PWM serwomechanizmów $u_{i,j}$.

3.4. Środek masy i punkt zerowego momentu

Równoległe z syntezą ruchu robota analizowane jest teoretyczne położenie środka masy robota i położenia punktu zerowego momentu w układzie $Rxyz$ związanym z robotem.

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

$$w_{CG} = \frac{m_0 w_0 + \sum_i \sum_j m_{ij} w_{ij}}{m} \quad (5)$$

gdzie: i - numer członu robota w ramach danej nogi ($i = 1...5$), j - nr nogi ($j = 1...4$), $w = \{x, y, z\}$, w_0, w_{ij} - odpowiednia współrzędna środka masy, m_0 - masa korpusu, m_{ij} - masa członu i należącego do nogi j , m - masa całkowita robota.

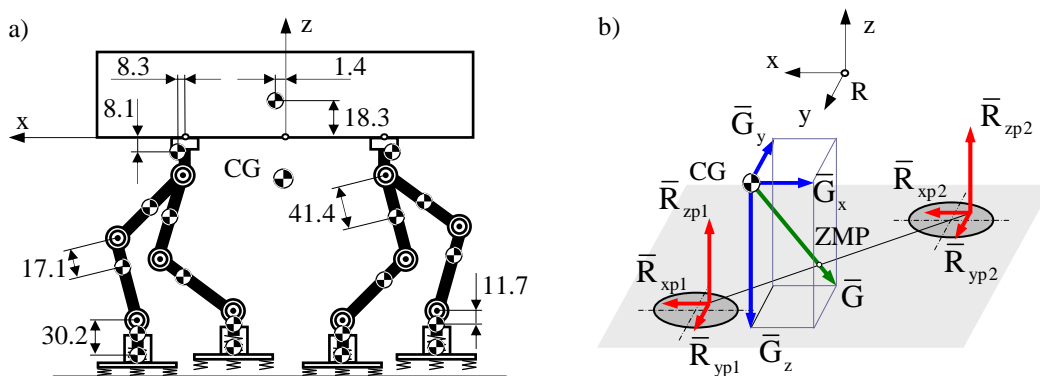
Rozkład mas robota w płaszczyźnie Rxz pokazano na Rys. 6a (wymiary w mm). Na podstawie znajomości współrzędnych środka masy robota obliczane są składowe siły działającej na środek masy robota (pochodzące od siły ciężkości i bezwładności) z zależności:

$$\mathbf{G} = -m_0 (\ddot{\mathbf{r}}_0 - \mathbf{g}) - \sum_i \sum_j m_{ij} (\ddot{\mathbf{r}}_{ij} - \mathbf{g}) = -m (\ddot{\mathbf{r}}_{CG} - \mathbf{g}) \quad (6)$$

gdzie: \mathbf{r}_0 - wektor wskazujący środek masy korpusu, \mathbf{r}_{ij} - wektor wskazujący punkt o masie m_{ij} (środek masy członu i,j), \mathbf{r}_{CG} - wektor określający położenie środka masy robota $\mathbf{r}_{CG} = [x_{CG}, y_{CG}, z_{CG}]^T$, \mathbf{g} - wektor grawitacji $\mathbf{g} = [g_x, g_y, g_z]^T$ ($\mathbf{g} = [0, 0, -g]^T$, $g = 9.81$ - przyspieszenie ziemskie).

Położenie punktu zerowego momentu (ZMP) wyznacza się na podstawie sił ciężkości i bezwładności działających na środek masy robota (Rys. 6b). Współrzędne punktu ZMP wynoszą:

$$x_{ZMP} = x_{CG} - \frac{G_x}{G_z} (H + z_{CG}), \quad y_{ZMP} = y_{CG} - \frac{G_y}{G_z} (H + z_{CG}), \quad z_{ZMP} = -H. \quad (7)$$



Rys. 5. Rozkład mas robota w płaszczyźnie Rxz (a), punkt zerowego momentu (ZMP) i siły działające na robota (b)

W trakcie syntezy ruchu robota analizuje się położenie zarówno środka masy robota, jak i punktu zerowego momentu. Ruch robota realizuje się ostatecznie w taki sposób, aby w każdej chwili czasu teoretyczne położenie punktu zerowego momentu znajdowało się w obszarze podparcia utworzonym przez stopy znajdujące się w fazie podparcia. Zazwyczaj w syntezie ruchu robotów uwzględnia się wielokąt podparcia, lecz w tym przypadku ze względu na to, że dwie nogi robota znajdują się w trakcie ruchu w fazie podparcia niezbędne jest rozpatrzenie płaszczyzny podparcia.

6. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono metodę syntezy dwóch elementarnych ruchów robota czteronożnego o strukturze ssaka, tj. ruchu podłużnego i obrotowego. W syntezie ruchu robota uwzględniono położenie środka masy robota i punktu zerowego momentu. Omówiono strukturę kinematyczną robota i pokazano model jego konstrukcji.

W pracy zastosowano inne niż zazwyczaj podejście, mianowicie opracowano nowatorską metodę chodu robota, w której jednocześnie przenoszone są dwie jego nogi przy równoczesnym ruchu korpusu, dzięki czemu występują tylko dwie fazy ruchu. W konsekwencji tego ruch robota jest szybszy oraz korpus przemieszcza się w sposób ciągły. Aby poprawić stabilność robota zastosowano wymienne okrągłe stopy o różnych średnicach. Każda z nich zawiera dodatkowo wyłącznik chwilowy ze sprężyną w celu wprowadzenia niewielkiej podatności i uzyskania informacji o zetknięciu stopy z podłożem.

Z dotychczasowych badań dotyczących stabilności ruchu robota [10] wynika, że zmiana położenia zarówno środka masy robota (CG), jak i punktu zerowego momentu (ZMP) jest niewielka. Zarówno punkt zerowego momentu, jak i rzut środka masy robota na płaszczyznę podłoża, znajdują się we wnętrzu płaszczyzny podparcia dla wszystkich rozpatrywanych rodzajów ruchu robota.

Literatura

1. Albiez J.C., Luksch T., Berns K., Dillmann R.: *Reactive reflex-based control for a four-legged walking machine*, Robotics and Autonomous Systems 44 (2003), 181–189.
2. Brown C.C., Huissoon J.P.: *Temporal gait control of a quadruped robot*, Robotics and Autonomous Systems 30 (2000) 305–314.
3. Chen, Xuedong; Watanabe, Keigo; Kiguchi, Kazuo; Izumi, Kiyotaka: *A Real-Time Kinematics on the Translational Crawl Motion of a Quadruped Robot*, Journal of Intelligent and Robotic Systems Volume: 29, Issue: 2, October 2000, 111 – 131.
4. Gonzalez de Santos P., Jimenez A.: *Path tracking with quadruped walking machines using discontinuous gaits*, Computers Elect. Engng 1995, vol. 21, 383-396.
5. Hiroshi Kimura, Yasuhiro Fukuoka, Avis H. Cohen: *Biologically inspired adaptive walking of a quadruped robot*, Phil. Trans. R. Soc. A (2007) 365, 153–170.
6. Kurazume, Ryo; Yoneda, Kan; Hirose, Shigeo: *Feedforward and Feedback Dynamic Trot Gait Control for Quadruped Walking Vehicle*, Autonomous Robots Volume: 12, Issue: 2, March 2002, 157 – 172.
7. Mahajan A., Figueroa F.: *Four-legged intelligent mobile autonomous robot*, Robotics & Computer-Integrated Manufacturing 1997, vol. 13, no. 1, 51-61.
8. Sehoon Park, Yun-Jung Lee: *Discontinuous zigzag gait planning of a quadruped walking robot with a waist-joint*, Advanced Robotics, Vol. 21, No. 1–2, pp. 143–164 (2007).
9. Takemura H., Deguchi M., Ueda J., Matsumoto Y., Ogasawara T.: *Slip-adaptive walk of quadruped robot*, Robotics and Autonomous Systems 53 (2005), 124-141.
10. Trojnacki M.: *The modeling, programming and computer simulation of motion for a four-legged robot*, Projektowanie Mechatroniczne, Red. T. Uhl, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji - PIB, Kraków 2006, s. 149-160.