

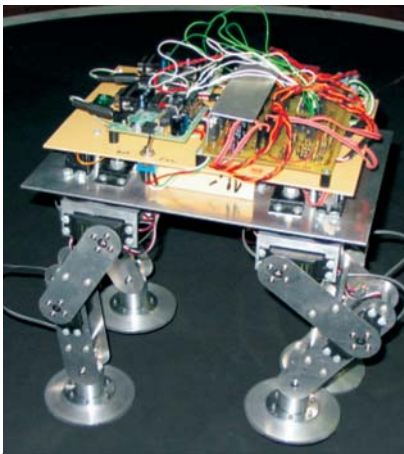
Synteza dynamicznie stabilnego chodu dwupodporowego czteronożnego robota kroczącego

Badania symulacyjne (2)

Teresa Zielińska
Maciej Trojnecki

Analiza chodu z uwzględnieniem cech i parametrów ruchu rzeczywistego robota

Bazując na wcześniejszych rozwiązaniach teoretycznych, zrealizowaliśmy badania symulacyjne z zastosowaniem pakietu Matlab/Simulink dla parametrów prototypowej konstrukcji robota (rys. 1). Rozpatrzyli-



Rys. 1. Prototypowa konstrukcja czteronożnego robota kroczącego

śmy dwa rodzaje ruchu robota: ruch postępowy oraz ruch obrotowy korpusu robota. Dla obu symulacji przyjęliśmy: wysokość podniesienia korpusu robota $H = 0,22$ m i wysokość kroku $h = 0,03$ m.

prof. dr inż. Teresa Zielińska,
Politechnika Warszawska,
dr inż. Maciej Trojnecki,
Politechnika Rzeszowska

Praca stanowi drugą część publikacji „Synteza dynamicznie stabilnego chodu dwupodporowego czteronożnego robota kroczącego”. W pierwszej części przedstawiono metodę wyznaczania sił reakcji podłoża działających na nogi robota. Dla dwupodporowego chodu diagonalnego robota czteronożnego rozwiązano zagadnienie równowagi sił i momentów sprawdzając warunek unikania poślizgu. Podano warunek utrzymania stabilnej postury z uwzględnieniem pracy elementów sprężystych zamocowanych w stopach. W niniejszej pracy pokazano przykład zastosowania tej metody przy uwzględnieniu parametrów i chodu rzeczywistego robota.

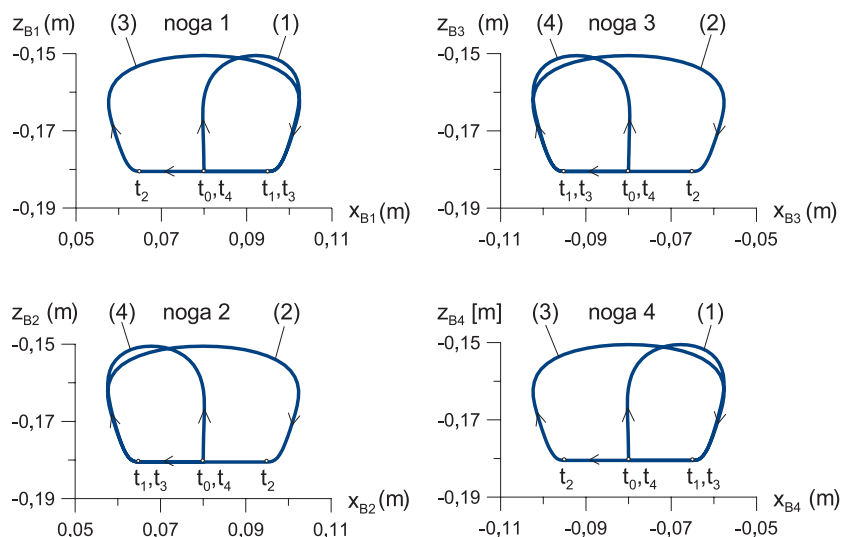
Symulacja 1

W przypadku ruchu postępowego korpusu robota założyliśmy długość kroku $k = 0,06$ m. Robot rozpoczął ruch, rozpędzając się do prędkości $u_{RC} = 0,03$ m/s oraz wykonując przemieszczenia nóg 1 i 4 o połowę nominalnej długości kroku. Później korpus poruszał się ruchem jednostajnym, a nogi 2 i 3, a następnie 1 i 4 przemieściły się o zadaną długość kroku. Wreszcie nastąpiło hamowanie korpusu robota i przemieszczenie nóg 2 i 3 o połowę nominalnej długości kroku.

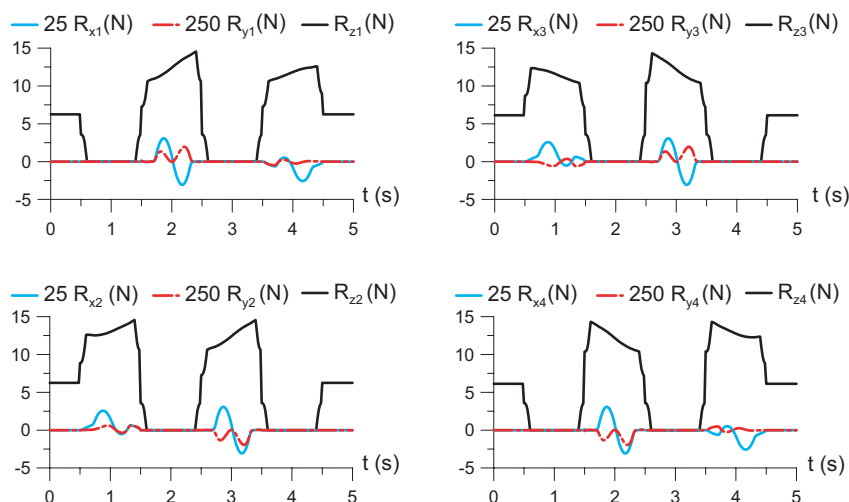
Na rys. 2 zamieściliśmy tory ruchów punktów B, tj. w kostkach nóg w układzie $Rx_0y_0z_0$ związanym z korpusem robota. Zazna-

czyliśmy kolejność przenoszenia nóg robota jako (1) – (4) oraz charakterystyczne chwile czasu $t_0 - t_4$ ($t_0 = 0,5$ s, $t_1 = 1,5$ s, $t_2 = 2,5$ s, $t_3 = 3,5$ s, $t_4 = 4,5$ s).

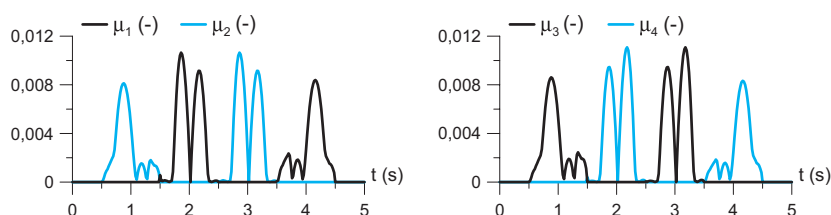
Na rys. 3 pokazaliśmy przebiegi czasowe składowych sił reakcji podłoża. W chwili rozpoczęcia przenoszenia nóg 1 i 4 składowe R_{Z1} i R_{Z4} sił reakcji dla nóg 1 i 4 zmniejszają się gwałtownie do 3 N, a następnie łagodnie do zera, co jest spowodowane działaniem sprężyn umieszczonych w stopach; natomiast składowe R_{Z2} i R_{Z3} sił reakcji dla nóg 2 i 3 zwiększają się gwałtownie, a następnie łagodnie z powodu działania sprężyn w przenoszonych nogach. Składowe R_{X2} i R_{X3} sił reakcji są na



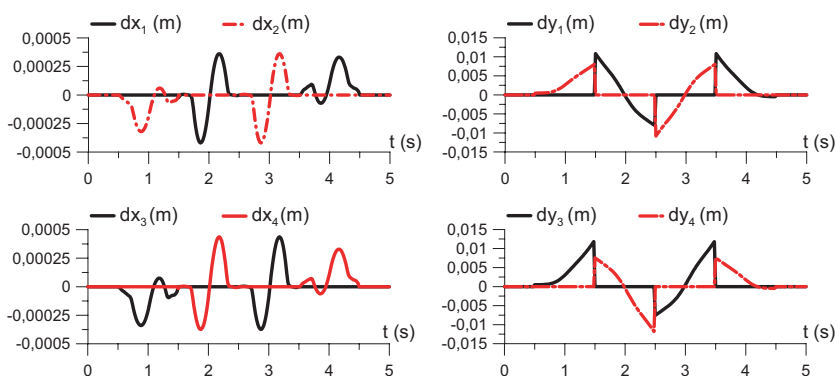
Rys. 2. Tory ruchu punktów B nóg robota w trakcie ruchu do przodu



Rys. 3. Przebiegi czasowe składowych sił reakcji podłoża w przypadku ruchu postępowego korpusu robota



Rys. 4. Przebiegi czasowe minimalnych dopuszczalnych wartości współczynników tarcia w przypadku ruchu postępowego korpusu robota



Rys. 5. Zmiana przesunięć punktów stykności nóg robota względem osi obrotu stóp w trakcie ruchu robota do przodu

początku głównie dodatnie (pchają rozpędzający się korpus do przodu), ale przez chwilę są również ujemne wskutek hamowania przenoszonych nóg. Po wyhamowaniu, stopy 1 i 4 przemieszczają się już pionowo w dół, stąd składowe te są ponownie dodatnie.

Następnie realizowany jest ustalony ruch korpusu robota. Podobnie jak poprzednio dla składowych normalnych sił reakcji można zaobserwować działanie sprężyn w po-

czątkowej i końcowej fazie przenoszenia oraz podparcia nóg. W tym czasie składowe styczne sił reakcji w kierunku osi x początkowo się nie zmieniają, gdyż w tym czasie przenoszone stopy przemieszczają się pionowo do góry, następnie są one dodatnie z powodu przyspieszonego ruchu przenoszonych nóg, później odwrotnie ujemne skutkiem hamowania tych nóg i wreszcie ponownie równe zero podczas pionowego ich opuszczania. W końcowym

okresie ruchu robota, gdy następuje jego hamowanie, składowe te mają odwrotny przebieg w porównaniu z fazą rozpędzania. Podczas maksymalnego ugięcia sprężyn dla nóg będących w fazie podparcia można zaobserwować zmiany składowych normalnych sił reakcji, które są spowodowane ruchem środka masy robota, w szczególności składowe te zwiększają się dla nóg przednich wskutek przenoszenia masy robota na przednie nogi przy ruchu do przodu. Dla nóg tylnych sytuacja jest odwrotna. W czasie ruchu robota do przodu składowe styczne sił reakcji w kierunku osi y są bardzo małe w porównaniu z pozostałymi składowymi. Dla obu podpartych nóg mają one te same wartości, ale zwroty przeciwne.

Na rys. 4 zamieściliśmy wykresy przebiegów czasowych minimalnych dopuszczalnych wartości współczynników tarcia podłoża-stopy

$$\mu_k = \sqrt{R_{xk}^2 + R_{yk}^2} / |R_{zk}|$$

Największe ich wartości są w chwilach wystąpienia największych wartości składowych R_{xk} sił reakcji podłoża. Asymetria tych przebiegów w trakcie ustalonego ruchu korpusu robota do przodu wynika ze stopniowego przenoszenia masy robota na przednie nogi, w związku z czym zwiększają się składowe R_{z1} i R_{z2} sił reakcji dla nóg przednich, a zatem minimalna dopuszczalna wartość współczynnika tarcia μ_1 maleje. Dla nóg tylnych sytuacja jest odwrotna.

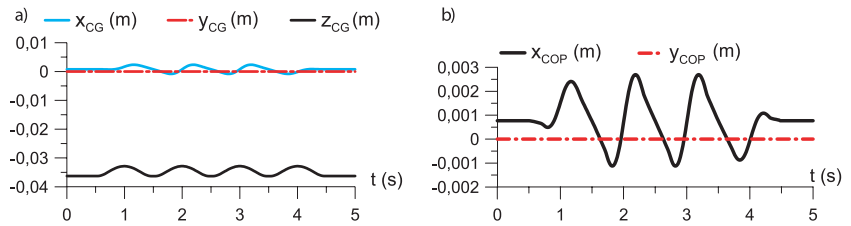
Na rys. 5 pokazaliśmy przesunięcia punktów stykności względem osi obrotu stóp. Z uzyskanego rozwiązania widać, że przesunięcia te są niewielkie, wyraźnie większe są w kierunku osi y, co wynika z rozstawu nóg robota, tj. dla analizowanej postury ssaka rozstaw nóg w kierunku osi x jest większy niż w kierunku osi y, a moment przechylający jest większy niż pochylający.

Na rys. 6 zamieściliśmy przebiegi czasowe współrzędnych środka masy robota i punktu środkowego nacisku. Współrzędne środka masy robota (rys. 6a) zmieniają się głównie w kierunku osi z, co jest związane z cyklicznym podnoszeniem

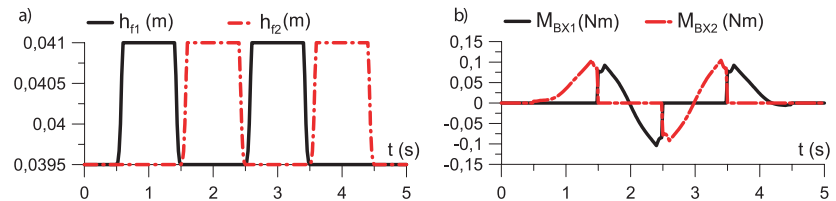
i opuszczaniem nóg; współrzędne x zmieniają się również cyklicznie, lecz w mniejszym stopniu, a współrzędne y nie ulegają zmianie.

Z rys. 6b wynika, że tylko współrzędna x punktu środkowego nacisku zmienia się w trakcie ruchu robota do przodu. Na wykresie można zaobserwować asymetrię przebiegu, która jest związana z niezerową wartością współrzędnej x_0 środka masy korpusu.

Na ostatnim rysunku dla prezentowanej symulacji pokazaliśmy zmianę wysokości stóp 1 i 2 robota w trakcie jego ruchu oraz wartości momentów M_{BX} przenoszonych przez konstrukcję tych stóp. Największe momenty działające na stopy występują tuż przed zmianą fazy podporowej na fazę przenoszenia i odwrotnie.



Rys. 6. Przebiegi czasowe współrzędnych: środka masy robota (a) i punktu środkowego nacisku (b) w trakcie ruchu robota do przodu



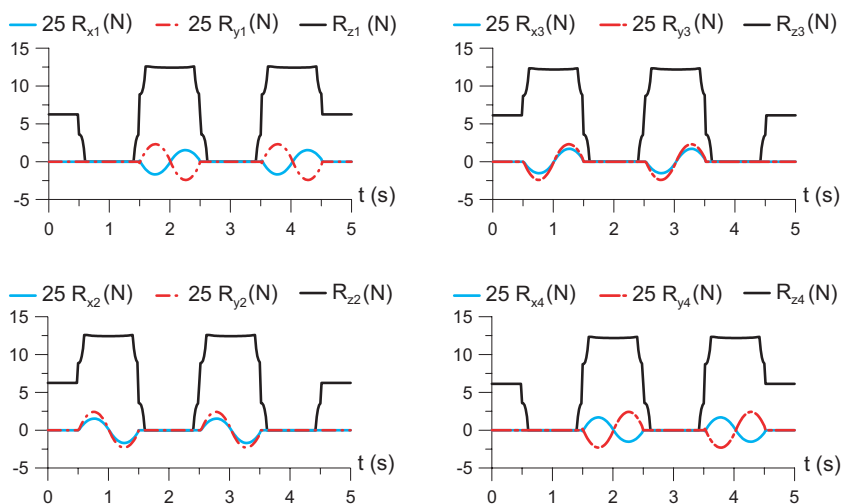
Rys. 7. Zmiana wysokości stóp robota (a) i momentów M_{BX} przenoszonych przez stopy (b) dla nóg 1 i 2 w przypadku ruchu robota do przodu

Symulacja 2

Dla ruchu obrotowego korpusu robota w lewo przyjęliśmy maksymalną prędkość kątową obrotu równą $\dot{\gamma} = 10^\circ/\text{s}$. Obrót korpusu robota następował w czterech cyklach. W pierwszym cyklu nogi 1 i 4 (przenoszone) wykonywały obrót w lewo, a 2 i 3 (podparte) w prawo przy równocześnie obracającym się w lewo korpusie robota. W ten sposób korpus robota obrócił się w lewo o 5° . W drugim cyklu nogi 2 i 3 wykonywały obrót w lewo, a 1 i 4 w prawo, w efekcie czego korpus obrócił się o kolejne 5° , a nogi powróciły do pozycji wyjściowej względem korpusu. Podobna sytuacja miała miejsce w pozostałych dwóch cyklach ruchu. W trakcie każdego z cykli prędkość kątowa obrotu własnego korpusu zmieniała się od zera do $\dot{\gamma}_C$, a następnie od $\dot{\gamma}_C$ do zera, czyli korpus raz był rozpędzany w ruchu obrotowym, a raz hamowany.

Na rys. 8 zamieściliśmy przebiegi czasowe składowych sił reakcji podłoża uzyskane w trakcie symulacji.

Analizując przebiegi składowych normalnych sił reakcji podłoża można zauważyć łagodną zmianę przebiegów w początkowej i końcowej fazie przenoszenia i podparcia nóg, która jest spowodowana działaniem sprężyn umieszczonych w stopach. Można także dostrzec symetrię



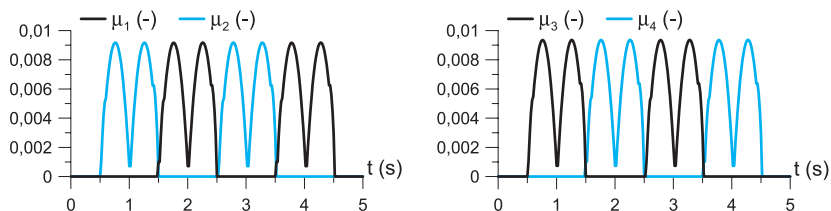
Rys. 8. Przebiegi czasowe składowych sił reakcji podłoża w przypadku ruchu obrotowego korpusu robota

tych przebiegów spowodowaną symetrycznym ruchem nóg w trakcie obracania korpusu. Składowe x i y sił reakcji zależą przede wszystkim od momentu M_Z . Ponieważ odległość podpartych stóp robota od osi obrotu w kierunku osi x jest większa niż na kierunku y , dlatego składowe x sił reakcji są proporcjonalnie mniejsze od składowych y . Znaki tych składowych sił zależą od kierunku działania wypadkowej reakcji stycznej do podłoża, więc przy podparciu nogami 2 i 3 mają one znaki zgodne, a przy podparciu nogami 1 i 4 przeciwne. Przebiegi te zmieniają się cyklicznie, mając raz znaki dodatnie, a raz ujemne, co jest spowodowane

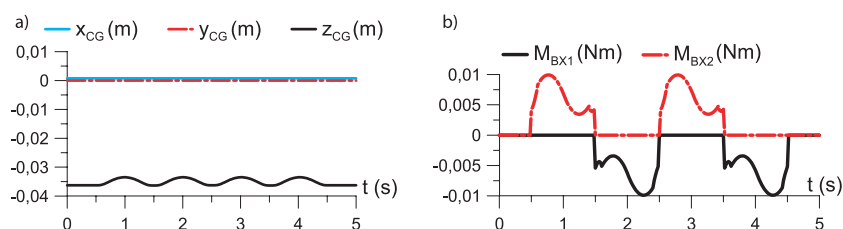
wane ruchem obrotowym korpusu, który w trakcie każdego z cykli jest rozpędzany i hamowany, w związku z czym moment M_Z raz jest dodatni, a raz ujemny.

W trakcie ruchu obrotowego maksymalne wartości składowych stycznych sił reakcji podłoża w kierunku osi x są nieco mniejsze niż w przypadku ruchu postępowego, natomiast składowe y są znacznie większe, co wynika z rozkładu sił stycznych.

Pokazane na rys. 9 wartości minimalnych dopuszczalnych współczynników tarcia są nieco mniejsze w porównaniu z przypadkiem ruchu robota do przodu.



Rys. 9. Przebiegi czasowe minimalnych dopuszczalnych wartości współczynników tarcia w przypadku ruchu obrotowego korpusu robota



Rys. 10. Przebiegi czasowe: współrzędnych środka masy robota (a) i momentów M_{BX} przenoszonych przez stopy dla nóg 1 i 2 (b) w przypadku obrotu robota w lewo

Środek masy robota (rys. 10a) przemieszcza się cyklicznie tylko w kierunku osi z . Współrzędne punktu środkowego nacisku nie ulegają zmianie w trakcie obrotu korpusu robota (co jest spowodowane symetrycznym ruchem nóg względem środka geometrycznego korpusu) dlatego nie zostały one zamieszczone.

W trakcie obracania korpusu robota przesunięcia punktów styczności nóg względem osi obrotu stóp są bardzo małe – szczególnie w kierunku osi x , dlatego można przyjąć, że są one równe zero.

Zmiana wysokości stóp robota w trakcie obracania jest analogiczna jak dla ruchu robota do przodu, natomiast przebiegi czasowe momentów M_{BX} mają przebieg pokazany na rys. 10b. Są one mniejsze w stosunku do przypadku ruchu robota do przodu.

Podsumowanie i wnioski

Ze względu na zachowaną równowagę momentów nie powinno wystąpić przechylenie i pochylenie robota, jednak w trakcie badań eksperymentalnych zostało to zaobserwowane. Jest to spowodowane błędami realizacji ruchu przez zastosowane napędy. Celowa jest więc kompensacja tego przechylenia poprzez wybić się z tej przenoszonej nogi, w której stronę ma nastąpić przechylenie. Wielkość tego wybi-

cia można już określić na drodze eksperymentalnej. Takie rozwiązanie pozwoli również na zmniejszenie wymiarów stopy. Podczas badań eksperymentalnych zaobserwowano poślizgi nóg robota w trakcie poruszania się po gładkiej powierzchni oraz zwiększenie przechylenia i pochylenia robota w przypadku, gdy poruszał się on po chropowatym podłożu.

Kolejne prace poświęcone będą wyznaczeniu momentów napędowych robota z zastosowaniem równań dynamiki oraz rozbudowie metod sterowania ruchem z uwzględnieniem oddziaływania niejednorodnego podłoża, co ma doprowadzić do autonomicznej kompensacji przechyleń robota. Zaplanowany zakres prac podyktowany jest zamiarem opracowania robota mogącego poruszać się bez problemów po podłożu o różnym ukształtowaniu, różnej chropowatości i różnej twardości. Mamy tutaj na uwadze fakt, że przy wykorzystaniu robota do celów inspekcyjnych powinna istnieć możliwość autonomicznej zmiany jego postury czy sposobu ruchu, w zależności od cech podłoża.

Praca była finansowana przez Uczelniany Program Badawczy Politechniki Warszawskiej „Heterogeniczna sieć współpracujących robotów mobilnych”.

Bibliografia

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. Gardner J.F.: *Efficient computation of force distribution for walking machines on rough terrain*, Robotica 10 (5) (1992) 427–433.
3. Klein C.A., Kittivatcharapong S.: *Optimal force distribution for the legs of a walking machine with friction cone constraints*, IEEE Transactions on Robotics and Automation 6 (1) (1990) 73–85.
4. Martins-Filho L.S., Prajoux R.: *Locomotion control of a four-legged robot embedding real-time reasoning in the force distribution*, Robotics and Autonomous Systems 32 (2000), 219–235.
5. Pfeiffer F., Eltze J., Weidemann H.J.: *Six-legged Walking Considering Biological Principles*, Robotics and Autonomous Systems 1995, vol. 14, 223–232.
6. Takemura H., Deguchi M., Ueda J., Matsumoto Y., Ogasawara T.: *Slip-adaptive walk of quadruped robot*, Robotics and Autonomous Systems 53 (2005), 124–141.
7. Trojnecki M.: *Opis ruchu cztero-nóżnego robota kroczącego*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Nr 222, Rzeszów 2005, 357–364.
8. Trojnecki M.: *The modeling, programming and computer simulation of motion for a four-legged robot*, Projektowanie Mechatroniczne, Praca zbior. pod red. T. Uhla, Wydawnictwo Katedry Robotyki i Dynamiki Maszyn AGH, Kraków 2006, 149–160.
9. Zhou D., Low K.H., Zielińska T.: *An efficient foot-force distribution algorithm for quadruped walking robots*, Robotica (2000) vol. 18, 403–413.
10. Zielińska T.: *Maszyny kroczące*, PWN, Warszawa 2003.
11. Zielińska T., Heng J.: *Development of a walking machine: mechanical design and control problems*, Mechatronics 12 (2002), 737–754.
12. Zielińska T., Trojnecki M.: *Cztero-nóżny robot kroczący: analiza ruchu z uwzględnieniem interakcji nóg z podłożem*, Pomiary Automatyka Robotyka 2/2007. ■