

Teresa Zielińska, John Heng

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
NANYANG TECHNOLOGICAL UNIVERSITY SINGAPORE

Maszyna czteroноżna LAVA: rozważania na temat mechaniki i sterowania

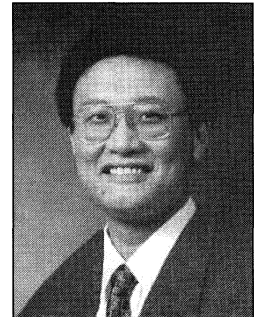
Dr hab. inż. Teresa ZIELIŃSKA

Jest pracownikiem Politechniki Warszawskiej. Od wielu lat zajmuje się problematyką maszyn krocących. Jest współprojektantką kilku maszyn krocących i autorka ich systemów sterujących.



Dr inż. John HENG

Ukończył studia magisterskie na Strathclyde University (1991) w Wielkiej Brytanii, tam też uzyskał stopień doktora w 1995. Aktualnie pracuje jako Assistant Professor w Nanyang Technological University w Singapurze zajmując się dydaktyką i badaniami naukowymi.



Streszczenie

Maszyny krocące są przykładem skomplikowanych urządzeń mechatronicznych, ich projektanci muszą wykazać się głęboką wiedzą z zakresu mechaniki, elektroniki i sterowania a projektowanie wszystkich tych elementów musi następować współbieżnie.

W artykule opisano strukturę mechaniczną i system sterowania maszyną czteroноżną

LAVA zbudowaną w Nanyang Technological University w Singapurze.

Abstract

Paper describes the mechanical design of a multifunctional 4 legged walking machine LAVA. The major factors influencing the design requirements include minimisation of the weight of the machine, large workspace of the legs, good energy efficiency and relatively high walking speed. The designed walking machine can adopt a variety of configurations such as insect, mammalian, reptile, human like or quadruped. The design is invertable and, using the legs as manipulators can even perform basic pick and place functions. The approach used for the design, considering the leg configuration, motion speed and properties of control system are shown in this paper.

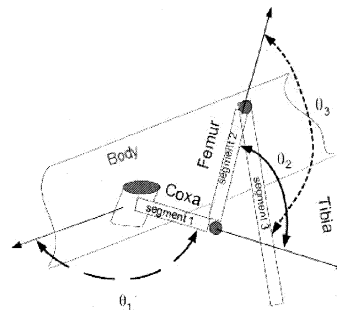
Wstęp

Od dawna człowiek był zafascynowany lokomocją dyskretną i jej potencjalnymi zaletami. Nie trzeba dla niej utwardzonych dróg, przeszkody mogą być nie tylko omijane lecz przekraczane, przeskakowane. Poprzez zmianę wielkości stóp można regulować nacisk na podłoże stąd też maszyny krocące mają lepsze, niż pojazdy kołowe, możliwości poruszania się po terenie grząskim czy śliskim. Zwierzęta wykazują przy tym dużą sprawność energetyczną lokomocji w relacji do prędkości. Niestety maszyny krocące nie są jeszcze tak doskonałe [2,3]. Według oczekiwań urządzenia te mogą być w przyszłości powszechnie stosowane do transportu po bezdrożach, mogą też pełnić rolę robotów usługowych, mogą być wykorzystywane w eksploracji np. innych planet, czy środowiska niebezpiecznego dla człowieka. Obecnie nieliczne egzemplarze takich maszyn znalazły wymienione zastosowania.

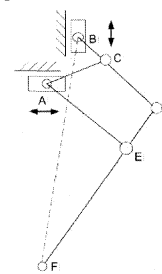
2. Struktura нóg maszyny Lava w odniesieniu do typowych struktur нóg maszyn krocących

Na rysunkach 1 do 5 pokazano najczęściej spotykane struktury нóg wielonożnych maszyn krocących.

Rys. 1 pokazuje konfigurację нóg typową dla owadów powszechnie stosowaną w szescionożnych maszynach krocących średniej wielkości (np. waga – 20kG, wymiary korpusu: 0,6m x 0,5m – LAURON), są to maszyny potrzebujące dużej powierzchni wielokątą podparcia [4, 5].

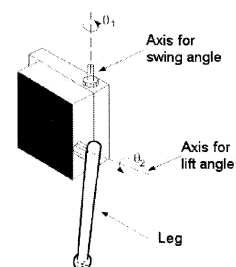


Rys. 2 pokazuje nogę typu pantografu. Punkty A i B przesuwają się (przeważnie jest tu stosowany napęd śrubowy). Przy odpowiednim doborze proporcji członów można uzyskać tu ruch liniowy punktu F czyli końca nogi co jest wymagane w fazie podparcia chodu maszyny [7].

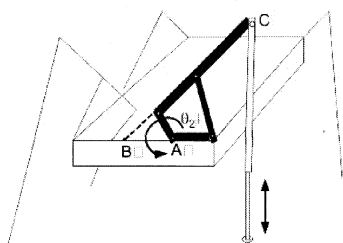


Rys. 3 ilustruje rozwiązanie stosowane zwykle w małych, lekkich (np. IOAN).

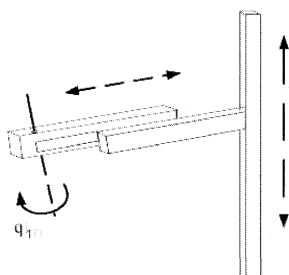
Dwa serwo-silniki są przytwierdzone wzajemnie swoimi tylnymi ścianami, jeden z silników generuje ruch podnoszenia nogi a drugi ruch obrotu (kroczenia). Przy takiej strukturze możliwe jest uzyskanie maszyny mogącej odwrócić się „grzbietem” do dołu.



Rys. 4 pokazuje tzw. projekt hybrydowy gdzie do struktury po-antograficznej nogi dodano parę przesuwającą zapewniającą podnośzenie i opuszczanie stopy



Na Rys. 5 zamieszczono schemat nogi o dwu przesuwnych stopniach swobody i jednym obrotowym. Taka konstrukcja jest stosowana m.in. w ciężkiej maszynie MELWALK.



Jak można zauważyć, w istniejących prototypach maszyn kroczących odseparowane są poszczególne stopnie swobody co oznacza, że pojedynczy silnik napędza ruch jednego stopnia swobody. W takim rozwiązaniu należy dobierać oddzielnie moc silnika podtrzymującego wagę maszyny i oddzielnie moc silnika napędzającego jej ruch. Oddzielenie funkcji silników napędzających ruch w stawie biodrowym nie jest jednak łatwe, przy dużym nachyleniu terenu czy też zmianie postury nóg silnik podpierający maszynę może stać się silnikiem napędzającym jej ruch postępowy i odwrotnie. Sprawia to kłopoty przy doborze mocy silników bowiem projektant musi z góry przewidzieć wszelkie możliwe warunki ruchu i postury nóg jakie będą stosowane w implementowanych chodach. Zastosowanie silników o nadmiarze mocy nie jest wskazane, bowiem uwidacznia się to w ich większej wadze. Maszyny kroczące, w odróżnieniu od robotów przemysłowych, muszą udźwignąć swój system napędowy i sterujący oraz dodatkowy ładunek (np. czujniki wykorzystywane do inspekcji otoczenia). Minimalizacja wagi systemu jest krytyczna bowiem uwidacznia się ona w mniejszym zapotrzebowaniu na energię napędową, która powinna pochodzić ze źródła również niesionego przez maszynę.

Inna metoda zapewnienia odpowiedniej mocy to zastosowanie dużych przełożeń w połączeniach mechanicznych co odbywa się kosztem redukcji szybkości ruchu. Maszyny kroczące poruszają o wiele wolniej niż pojazdy kołowe i wolniej niż zwierzęta o porównywalnej do nich wielkości. Celem projektantów jest zwiększanie szybkości ruchu przy jednoczesnym zmniejszaniu wagi tych urządzeń.

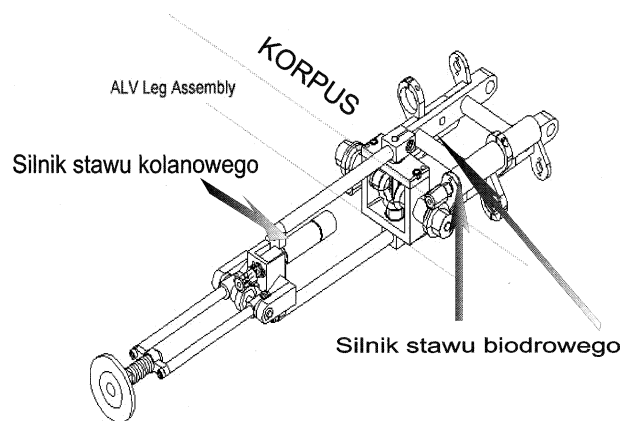
W projekcie maszyny LAVA zastosowano w stawie biodrowym mechanizm różnicowy – Rys. 6. Oznacza to, że dwa silniki wspólnie pracują na ruch podnoszenia/opuszczania i obrót pierwszego członu nogi. Nie ma tu oddzielenia funkcji silników (na podtrzymywanie maszyny i napędzanie jej ruchu) co ułatwiło dobór ich mocy. W konstrukcji zastosowano przekładnię ślimakową co zapewnia samohamowność, teoretycznie nie ma strat energii na podtrzymywanie wagi maszyny. Kosztem takiego rozwiązania jest mała sprawność takich przekładni, która wynosi 50-60%. Samohamowność przynosi jednak w sumie dużą korzyść bowiem w zada-

niach inspekcyjnych maszyny często muszą utrzymywać określoną posturę w bezruchu co, w zastosowanym rozwiązaniu, nie wymaga wydatku energii.

Inną zaletą prezentowanego rozwiązania jest możliwość różnego konfigurowania nóg. Zastosowanie mechanizmu różnicowego w stawie biodrowym i przekładni ślimakowej w stawie kolanowej oraz odpowiednie rozmieszczenie członów daje duży obszar ruchowy nóg.

Jak można zauważyć na podstawie przedstawionych wyżej schematów nóg, na ogół nie jest możliwa zmiana konfiguracji nogi czy też realizacji chodu po przewróceniu się. Tylko maszyna IOAN (Rys. 3) posiadająca nogi o dwu stopniach swobody może poruszać się po przewróceniu się na „grzbiet”, teoretycznie byłoby to też możliwe przy rozwiązaniu pokazanym na Rys. 5, jednak duży, niesymetryczny korpus maszyny MELWALK uniemożliwia to. Maszyna LAVA została zaprojektowana tak, aby nogi mogły być nie tylko ustawiane w różnych posturach, lecz też – o ile zajdzie taka potrzeba (jak np. usunięcie przeszkody na drodze ruchu) – mogły być wykorzystane jako manipulatory co ilustruje Rys. 7. Obszary ruchowe nóg są tak duże, że LAVA bez problemu może chodzić po przewróceniu się albo, wykorzystując aktywnie nogi, spowodować odwrócenie się do oryginalnej pozycji. Możliwość aktywnego „odwracania” jest istotna o ile urządzenie wykorzystywane jest w zadaniach eksploracji (np. obcych planet) i przykładowo jeden drogi czujnik jest umocowany tylko na jej „brzuchu”. Wtedy właśnie konieczne jest wymuszenie odwrócenia się korpusu. Wzmiankowana maszyna IOAN, która też może się tak odwrócić zbudowana została jako jedno z urządzeń, które mogą być w przyszłości wykorzystane w badaniach planety Mars.

Rys. 6. Rysunek projektowy nogi maszyny LAVA



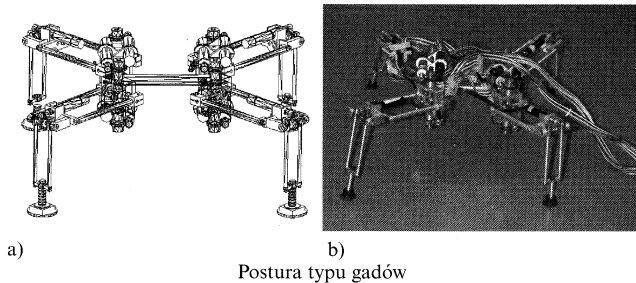
Na Rys. 7 po lewej stronie pokazano rysunki maszyny w różnych konfiguracjach, przygotowane w fazie projektowej, po prawej stronie pokazana jest LAVA w odpowiadających rysunkom konfiguracjach.

Dwa silniki napędzające ruch mechanizmu różnicowego stawu biodrowego, podobnie jak sam mechanizm stanowią część związaną z korpusem i nieprzenoszoną w fazie transferu nogi. Jedyne silnik stawu kolanowego i mechanizm przenoszenia ruchu związane są z ruchomą częścią nogi. Przenoszona część nogi zawiera o jeden silnik mniej niż w rozwiązaniach tradycyjnych (np. Rys. 1) gdzie jedynie silnik napędzający wykrok i zakrok nogi jest związany z korpusem, a silnik generujący ruch podnoszenia i silnik związany ze stawem kolanowym są w części ruchomej. Pomijając straty energii wynikające z własności systemu mechanicznego, w przypadku LAVY, mniejszy jest wydatek energii związany z przenoszeniem mniejszej masy nogi. Minimalizacja wagi (czyli też masy) nóg w stosunku do wagi (masy) korpusu jest istotna nie tylko ze względu na wydatki energetyczne lecz też ze względu na możliwości implementacji chodów w których dąży się do zachowania rzutu środka ciężkości maszyny we wnętrzu wielokąta poparcia [8]. Duża wa-

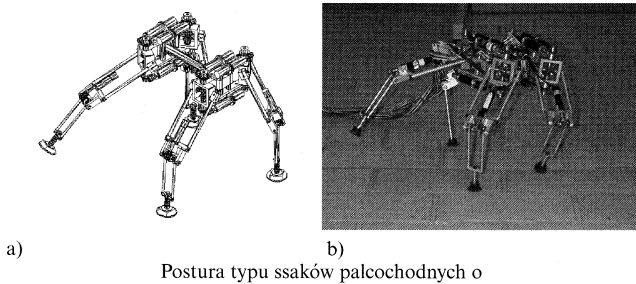
ga przemieszczających się nóg powoduje odpowiednio duże przemieszczanie się całkowitego środka ciężkości maszyny co utrudnia, o ile nie ogranicza, syntezę chodów stabilnych przy zróżnicowanych warunkach terenu.

Dwa silniki stawu biodrowego rozmieszczone są w pewnej odległości od siebie poprzecznie do osi wzdłużnej korpusu (Rys. 6). Na korpusie pozostaje dużo miejsca na umiejscowienie czujników czy też pokładowego systemu sterującego.

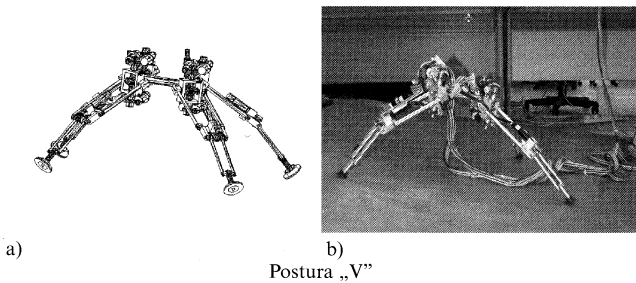
Rys. 7 LAVA: różne postury: projekt (a), implementacja (b)



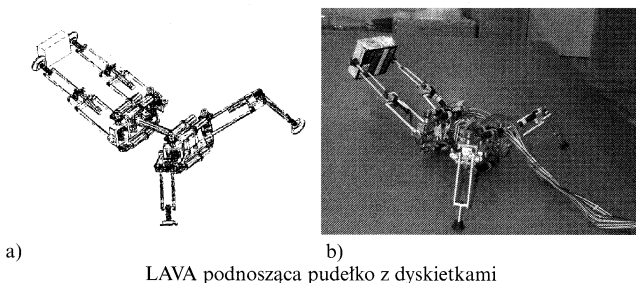
Postura typu gadów



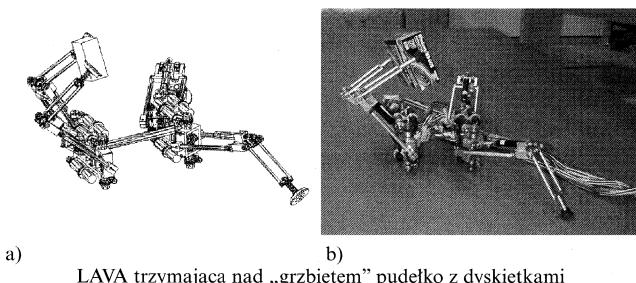
Postura typu ssaków palchochodnych o



Postura „V”



LAVA podnosząca pudełko z dyskami



LAVA trzymająca nad „grzbietem” pudełko z dyskami

Waga maszyny LAVA wynosi poniżej 2kG, waga jednej nogi (jej części poruszającej się) jest 0,2-0,3kG (w zależności od stopy,

która jest wymienna). W stawie biodrowym zastosowano silniki o mocy 4,5W każdy a stawie kolanowym – silnik o mocy 2,7W. Każda noga ma 0,15m długości, a korpus ma wymiar 0,07 na 0,08m.

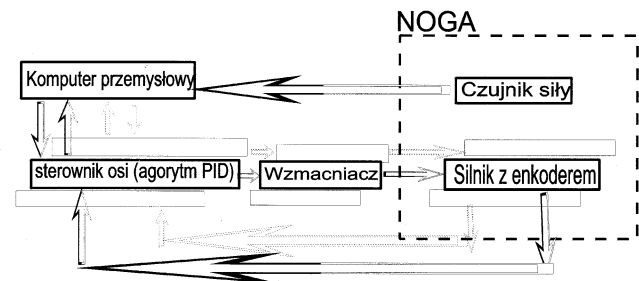
3. System sterowania

Struktura sprzętowa systemu sterowania obejmuje komputer przemysłowy PC, sterowniki osi (sterowania PID), które poprzez zasilacze ze sterowaniem wypełnieniem impulsu (PWM) napędzają silniki szczotkowe. Sterowniki osi połączone są z portami wejść/wyjść komputera. Odbierają one z komputera rozkazy ruchu (komendy w języku assemblera) oraz wartości zadane.

Sprzężenie zwrotne od położenia zapewnia zastosowanie enkoderów o 16 liniach. Sprzężenie zwrotne od siły wywieranej przez nogę realizowane jest przy pomocy czujników piezoelektrycznych trzech składowych – Rys. 9. Sterowniki osi dokonują automatycznego odczytu stanu enkoderów z częstotliwością równą czasowi mikro-kroku sterowania. Wartość ta jest specyfikowana przez użytkownika i zadawana (wraz z odpowiednią komendą) z poziomu komputera PC. Czas realizacji jednego kroku sterowania (czyli jednej wartości zadanej) jest również zadawany pośrednio z poziomu wyższego. Mikrokomputer sterownika automatycznie dzieli wartość zadaną na części jakie powinny być zrealizowane w każdym mikro-kroku sterowania przy utrzymaniu trapezoidalnego profilu prędkości silnika – Rys. 10. W każdym mikro-kroku sterownik generuje sygnał korekty położenia obliczony na podstawie algorytmu PID.

Dla LAVY dobrano czas kroku sterowania równy 40ms i czas mikro-kroku równy 4ms. Program sterujący wyższych poziomów wykonywany przez przemysłowy komputer PC został napisany w języku Watcom C pod systemem czasu rzeczywistego QNX.

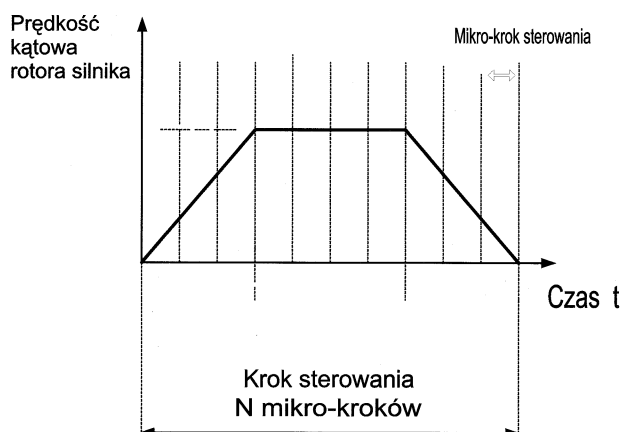
Rys. 9. Struktura sprzętowa systemu sterowania



Komunikacja pomiędzy procesami (zadaniami) systemu następuje z wykorzystaniem wzorca klient-obsługujący. Tak zwany proces nóg (*leg process*) jest klientem w stosunku do procesu czujnika (*sensor*) siły oraz tzw. procesu sterownika (*driver*). Proces *leg* generuje trajektorie końców nóg odpowiadające różnym chodom (według specyfikacji programisty), proces *sensor* odbiera i przetwarza dane z czujnika siły, a proces *driver* jest odpowiedzialny za współpracę systemu ze sterownikami osi. Przesyła on w odpowiednim formacie dane wygenerowane przez proces *leg*, przekazuje komendy sterujące w języku assemblera do sterowników osi oraz monitoruje status silników (w ruchu, w pozycji, przekroczenie błędu, itd.) odczytując słowo stanu sterowników osi. Proces ten przekazuje też, na żądanie, dane do procesu *leg*. Proces *leg* korzysta z biblioteki zawierającej procedury generowania różnych chodów. Chody zostały zaprojektowane tak, że pozycja końcowa nogę po realizacji jednego cyklu przestawień nóg w danym chodzie odpowiada pozycji początkowej dla każdego z pozostałych chodów. Dzięki temu programista może budować dowolne trajektorie ruchu maszyny określając ile kroków ma być wykonanych oraz jakim chodem. Do tego celu w przypadku LAVY są procedury chodu do przodu i do tyłu wzdłuż linii prostej, procedury chodu bocznego (w bok – w le-

wo, w bok – w prawo), procedury generujące skręt korpusu (dla generowania chodu wzdłuż krzywej) oraz generatory chodu po nachyleniu. We wszystkich tych przypadkach w danym momencie przenoszona jest tylko jedna noga a sekwencja przestawień nóg odpowiada czterożonemu pełzaniu, w którym przenoszona jest najpierw noga prawa przednia, potem – lewa tylnia, prawa – tylnia a następnie – lewa przednia. Jest to sekwencja powszechnie stosowana w maszynach czterożonych bowiem zapewnia najlepszą stabilność postury. W przypadku realizacji chodu po naturalnym terenie nie zawsze możliwa jest realizacja chodu sekwencyjnego, może się bowiem zdarzyć, że noga nie znajduje odpowiedniego podparcia lub jej ruch blokowany jest przez przeszkodę – np. kamień. Wtedy musi być realizowany chód swobodny, gdzie na bieżąco wybierana jest noga, która może być przeniesiona z uwzględnieniem wymogu zachowania stabilnej postury i ominięcia przeszkody. Planowanie chodu swobodnego nie jest zadaniem banalnym, wymaga ono analizy wielu zależności i w większości metod konieczna jest znajomość mapy terenu z zaznaczonymi dopuszczalnymi punktami stąpania. W naszych pracach opracowaliśmy kilka metod planowania chodu swobodnego [6, 10, 11] jedna z nich działa przy założeniu, że w końcach nóg zainstalowane są czujniki odległości wykrywające przeszkody, które powinny być przez nogi ominięte [11]. W innej metodzie połączono zadanie planowania chodu swobodnego z zadaniem planowania trajektorii ruchu całej maszyny w terenie pełnym przeszkód [6]. W oprogramowaniu systemu sterującego ruchem maszyny LAVA nie zaimplementowano narażenie generatora chodu swobodnego. Przed wyborem metody należy bowiem ustalić skąd będzie pochodzić opis terenu czyli jak rodzaj czujników zewnętrznych zostanie tu wykorzystany. W chwili obecnej zaimplementowano jedynie algorytm sterowania siłą wywieraną przez nogę oraz przeprowadzono prace teoretyczne, w których na podstawie warunków równowagi statycznej generowane są siły jakie powinny być wywierane na podłożu przez nogi maszyny [1]. Uzyskane wyniki mogą być również wykorzystane do syntezy chodów swobodnych w przypadku, gdy czujnikami zewnętrznymi maszyny są czujniki sił zainstalowane w końcach nóg.

Rys. 10. Profil prędkości silnika zadawany przez sterownik



3. Wnioski

Mobilność maszyn kroczących może być istotnie zwiększona przy zastosowaniu systematycznego podejścia przy projektowaniu i uwzględnieniu nie tylko w mechanice tecz w strukturze systemu elektronicznego i oprogramowania specyfiki tych urządzeń. Maszyna LAVA pozwala na łatwe mocowanie dodatkowych czujników, podobnie struktura oprogramowania systemu jest otwarta na włączanie procesów nowych czujników. Oprogramowanie pozwala na zmiany liczby nóg urządzenia i w związku z tym generowanie

różnych chodów. Koncepcja została sprawdzona w praktyce jako, że pierwotnie sterowano prototypem o dwu nogach i dwu kołach, obecnie LAVA jest maszyną czterożoną a osnowa opracowanego systemu sterowania została wykorzystana w maszynach szesciożonnych GROVEN [9] o podobnej strukturze mechanicznej.

Podziękowania

Authorzy wyrażają podziękowania Dr. G. Seet dyrektorowi NTU Robotics Research Centre, który wspomógł powyższe badania.

Literatura

- [1] Debao Zhou, Low K. H., Zielinska T. *An Efficient Force-Distribution Algorithm for Quadruped Walking Robot*. Robotica, vol. 18, 1999, pp. 403-413
- [2] McGhee, R. B. (1985). *Vehicular Legged Locomotion*. *Advances in Automation and Robotics*, Vol. 1, pp. 259-284
- [3] Naua, P., K. J. Waldron (1995). *Energy comparison between trot, bound, and gallop using a simple model*. Transactions of ASME, vol. 117, pp. 466-473
- [4] Pfeiffer, F., H. J. Weideman and P. Danowski (1990). *Dynamics of the Walking Stick Insect*. Proc. of the 1990 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1458-1463.
- [5] Pfeiffer, F., J. Eltze and H. J. Weidemann (1995). *Six-Legged Technical Walking Considering Biological Principles*. Robotics and Autonomous Systems, No. 14, pp. 223-232.
- [6] Shaoping Bai, K. H. Low, T. Zielinska: *Quadruped Free Gait Generation for Straight-line and Circular Trajectories*. *Advanced Robotics*, 13 (5), 1999, 513-538
- [7] Song, S. M., K. J. Waldron (1986). *Geometric design of a walking machine for optimal mobility*. ASME: Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design., pp. 1-15
- [8] Todd, D. J. (1985). *Walking Machines: An Introduction to Legged Robots*. Kogan Page.
- [9] Zielinska, T., T. Goh, and K. C. Choong (1999). *Design of Autonomous Hexapod*. IEEE Workshop on robot Motion and Control, Technical University of Zielona, Gora, pp. 65-69.
- [10] Zielinska, T. (1999) *Walking machines*. *Basics of Robotics: Theory and Components of Manipulators and Robots*. A. Morecki, J. Knapczyk (Ed.) CISM Courses and Lectures no. 402. Springer Verlag 1999
- [11] Zielinska T. *Utilisation of biological patterns in reference trajectories generation of walking machines*. IEEE 8th Int. Conference on Advanced Robotics. Workshop II: New Approaches on Dynamics Walking and Climbing Machines. Monterey. California, USA, 1997, pp. 92-104
- [12] Zielinska T. *Efficiency Analysis in the Design of Walking Machines*. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 3 (38), 2000, pp. 693-708