

Modelowanie chodu maszyny kroczącej

Teresa Zielińska

Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Lotniczej
i Mechaniki Stosowanej, ul. Nowowiejska 22/24, 00-665 Warszawa

Wprowadzenie

Większość budowanych maszyn kroczących ma sześć nóg o strukturze kinematycznej wzorowanej na strukturze odnóży owadów (np. [3, 4]). Chód tych maszyn jest też przeważnie odwzorowaniem chodu owadów dającym się opisać prostymi regułami sformułowanymi przez Wilsona. W chodach tych istnieje bardzo prosta zależność między prędkością ruchu a sekwencją przestawień nóg (np. [11]).

Kolejność przestawień nóg jest wyróżnikiem rodzaju chodu [12].

Projektanci maszyn są coraz częściej zainteresowani wykorzystaniem wyników prac neurobiologów analizujących rolę systemu nerwowego w procesie sterowania ruchem. Przeważnie badany jest ruch patyczaków [15, 16] i karaluchów [14].

Wykorzystanie wyników takich badań odzwierciedla się w koncepcjach sterowania maszynami kroczącymi [17]. Przy próbach wykorzystania prawidłowości zaobserwowanych w organizmach żywych badacze coraz częściej stosują sztuczne sieci neuronowe (np. [5, 6]).

Sieci te pełnią funkcję podobną do roli systemu nerwowego. Przykładowo, w pracy [5] omówiono hierarchiczny sterownik neuronowy. Sieć neuronowa najwyższego poziomu reaguje tu na informacje pochodzące z czujników, sieć niższego poziomu steruje koordynacją ruchu nóg wykorzystując do tego informacje przesłane z sieci wyższego poziomu. Na najniższym poziomie hierarchii sterowania znajdują się sieci sterujące fazami ruchu każdej nogi (tzn. przenoszeniem i podpieraniem).

W pracy [6] przedstawiono sieć neuronową generującą rytm chodu. Sieć neuronowa generuje tu w kolejnych chwilach czasu wartości współrzędnych uogólnionych odpowiadające trajektorii ruchu końca nogi. Zmiany kształtu tej trajektorii (np. przy omijaniu przeszkody) można uzyskać, zmieniając odpowiednie parametry nauczonej sieci neuronowej [6].

Takie zastosowanie sieci neuronowej pozwala na generowanie trajektorii końca nogi bez konieczności wielokrotnego rozwiązywania modelu odwrotnego kinematyki.

Studia dotyczące systemu motorycznego człowieka znajdują odzwierciedlenie w licznych koncepcjach sterowników manipulatorów (skomentowanych m.in. w artykule [1]) oraz w

propozycjach sterowania dwunożnymi maszynami kroczącymi. Stosuje się tu często sieci neuronowe, jak również znane są prace w których równania dynamiki ruchu wywodzone są ze studiów nad układem ruchowym człowieka (np. [7]).

W przypadku maszyn wielonożnych (np. cztero-, sześćnożnych) problemem jest planowanie tzw. chodu swobodnego. Chodem swobodnym nazywany jest chód, w którym na bieżąco wybierana jest noga która powinna być przeniesiona [9, 10]. Chód swobodny realizowany jest wtedy, gdy ukształtowanie terenu nie pozwala na kontynuację chodu o ustalonej sekwencji przestawień nóg (chodu rytmicznego).

Do planowania chodu swobodnego stosuje się różne metody np. przeszukiwanie odpowiednio zdefiniowanych grafów stanów maszyny [8, 9], wyszukiwanie kolejnych stanów maszyny z zastosowaniem metody automatów o stanach skończonych [10] albo przeszukiwanie tzw. drzewa ruchów możliwych [12, 13].

Przy stosowaniu odrębnej metody planowania chodu swobodnego trzeba projektować w układzie sterowania dwa systemy generowania chodu - system generowania chodu swobodnego oraz system generowania chodu rytmicznego.

Istnieje potrzeba opracowania metody planowania chodu bez wyróżniania jego rodzaju (tzn. wyróżniania chodu rytmicznego i chodu swobodnego). Proces planowania powinien odbywać się na bieżąco (w każdym kroku sterowania) z uwzględnieniem informacji odbieranej z różnego rodzaju czujników.

Metoda powinna mieć charakter uniwersalny to znaczy powinna ona dawać możliwość planowania chodu zarówno z uwzględnieniem kinematyki jak i dynamiki urządzenia.

Metoda interpretacji istotnych informacji; założenia ogólne

Metodę planowania chodu nazwano **metodą interpretacji istotnych informacji**.

- Nie wyróżnia się chodu rytmicznego i chodu swobodnego. W zależności od stanu otoczenia (obecności przeszkód) planowany chód może być chodem swobodnym albo chodem rytmicznym.
- Proces planowania ruchu i generowania sterowań odbywa się w dyskretnych chwilach czasu co odpowiada specyfice sterowania cyfrowego.
- Planowanie trajektorii ruchu każdej nogi odbywa się "na bieżąco", to znaczy w każdym kroku sterowania układ sterujący decyduje o kształcie małego fragmentu trajektorii. Od tej decyzji zależą sygnały sterujące.
- Decyzja podejmowana jest na podstawie analizy szeregu danych, m.in. stanu maszyny, stanu czujników oraz celu ruchu.

Podstawowe pojęcia i zależności

Rozważana jest dyskretna przestrzeń czasu.

Definiowane są następujące zmienne:

- p^i – *zrealizowany stan maszyny kroczącej* w chwili t ; ($p^i = p(t)$), Stan ten określany jako zbiór współrzędnych końców nóg w chwili t ; wyznaczony względem układu (lub układów) współrzędnych związanego z korpusem. Przykładowo stan ten może być opisywany przez zbiór współrzędnych końców nóg wyrażonych w układach kartezjańskich związanych z biodrami, tzn. (x_j^i, y_j^i, z_j^i) – stan j -tej nogi wyrażony w j -tym układzie współrzędnych, w i -tej chwili czasu. $p^i = (x_1^i, y_1^i, z_1^i, \dots, x_k^i, y_k^i, z_k^i)$, dla k -nożnej maszyny kroczącej.

Rzeczywisty stan maszyny jest określany na podstawie odczytu stanu czujników (np. pomiaru kątów w stawach nóg). Aby nie komplikować opisu, w oznaczeniu stanu maszyny, nie wprowadzamy dodatkowych parametrów.

- s_a – *aktualny stan czujników*; zapis $s_a = s_a(p^i)$ oznacza stan czujników odczytany w stanie maszyny p^i .

Czujnikami są tu zarówno czujniki informujące o położeniu końców nóg, jak i czujniki dostarczające innych informacji.

Stan czujników zależy od ich typu, np. w czujniku dotykowym można określić dwa stany: "jest dotyk", "nie ma dotyku". Stan może być stanem tzw. czujnika wirtualnego, to znaczy czujnika stworzonego sztucznie w systemie sterującym poprzez odpowiednią agregację informacji odebranej z czujników rzeczywistych. Definiowany tutaj stan czujników jest rozumiany jako takie informacje uzyskane z systemu czujników, które dostarczają wiedzy o otoczeniu (np. o odległości od przeszkód) i o maszynie (np. ograniczenia obszaru ruchowego). Stan czujników występuje jako parametr zmiennych, które są wyznaczane na podstawie informacji odebranej z czujników.

- st_{sens} – *rzeczywisty zapas stabilności podłużnej* [9] (statycznej [12]) albo dynamicznej [20] wyznaczony na podstawie stanu (wskazań) czujników. Zachodzi zależność: $st_{pr} = st_{sens}(s_a)$.
- o_{sens} – *ograniczenia ruchu określone* na podstawie stanu czujników, w bieżącej chwili czasu; $o_{sens} = o_{sens}(s_a)$.
- o – *znane ograniczenia ruchu* np. maksymalne możliwe wysunięcie nogi do przodu,
- mt – *kryterium komfortu ruchu*, np. nieprzekraczanie zadanej wartości granicznej przyspieszenia, żądanie ruchu jednostajnego, itd..
- g_f – *globalny cel ruchu*, np. zadany czas ruchu, droga do przebycia.
- g^i – *bieżący cel ruchu* to planowany rodzaj ruchu, np. ruch końca nogi do góry, ruch w dół. Bieżący cel ruchu zależy od celu końcowego, zrealizowanego stanu maszyny, ograniczeń ruchu (o_{sens}, o) stabilności (st_{sens}) oraz zrealizowanego bieżącego celu ruchu w momencie poprzednim ($r(g_{i-1})$ – zrealizowany bieżący cel):

$$g^i = g^i(g_f, p^{i-1}, o_{sens}(s_a), o, st_{sens}, r(g_{i-1})) \quad (1)$$

- in^i – intencja ruchu (zamiar wykonania określonego ruchu).

Zachodzi zależność:

$$in^i = in^i (mt, st_{pr}, o_{pr}, o, p^{i-1}, g^i) \quad (2)$$

- gdzie:
- o_{pr} – ograniczenia ruchu prognozowane dla zaplanowanej intencji ruchu in^i , zapis $o_{pr} = o_{pr} (in^i)$ oznacza prognozę dla intencji in^i ,
- st_{pr} – prognozowana wartość odpowiednio zdefiniowanego zapasu stabilności statycznej/dynamicznej; zapis $st_{pr} = st_{pr} (in^i)$ oznacza prognozę dla intencji in^i .

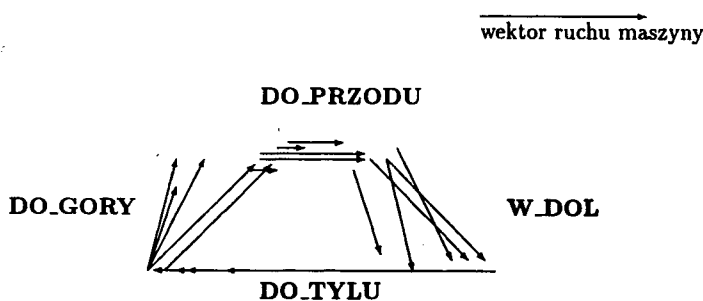
Intencjami są zamiary wykonania ruchów o określonej prędkości np. podnoszenie nogi nr i z prędkością o składowych (v_x, v_y, v_z) , przenoszenie nogi nr i z określoną prędkością.

Planowanie ruchu maszyny

Planowanie ruchu odbywa się na bieżąco w czasie chodu. Planowanie jest dwuetapowe. Najpierw określany jest bieżący cel ruchu. Potem określana jest intencja ruchu (zamiar wykonania ruchu).

Określenie bieżącego celu ruchu to inaczej określenie zbioru preferowanych trajektorii ruchu.

Przykładowo, jeżeli bieżącym celem jest podnoszenie nogi to preferowane trajektorie ruchu powinny należeć do zbioru "do góry" (Rys. 1). Na tym etapie planowania określa się jedynie nazwę zbioru trajektorii ruchu.

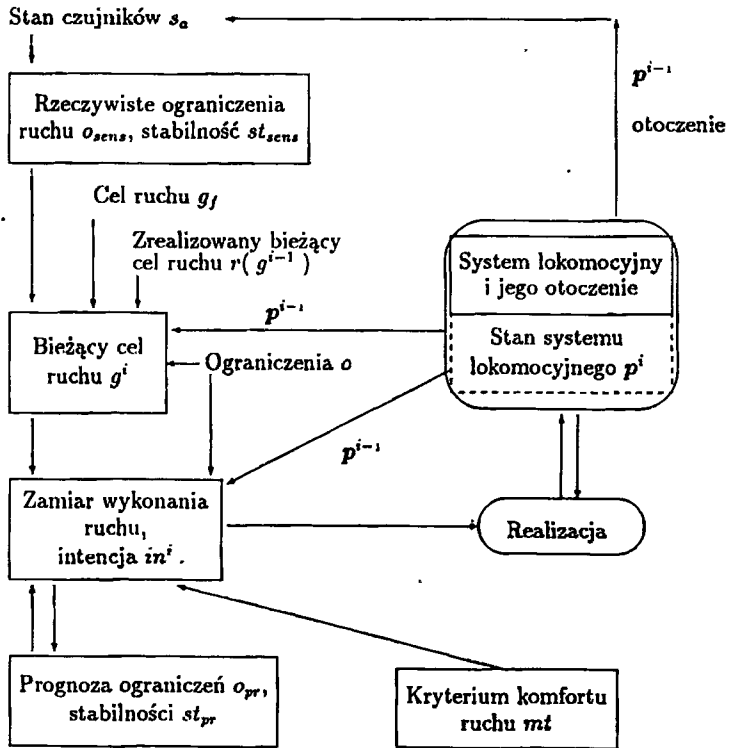


Rys. 1: Bieżący cel ruchu, wyróżnienie zbiorów trajektorii ruchu.

Określenie intencji ruchu to określenie składowych prędkości ruchu końca każdej nogi.

Intencją jest zamiar realizowania ruchu z określoną prędkością do chwili podjęcia następnej decyzji (sformułowanie następnej intencji). Inaczej mówiąc, na tym etapie, określa się zamiar realizacji konkretnych odcinków trajektorii ruchu.

Na rysunku 2 pokazano zależności uwzględniane w procesie planowania chodu maszyny kroczącej.



Rys. 2: Planowanie ruchu.

W rzeczywistości zaplanowany ruch (a więc intencja) nie musi być wykonany albo może być wykonany częściowo, ze względu na nieprzewidziane sytuacje lub omyłki w planowaniu.

Rzeczywisty stan sterowanej maszyny kroczącej wynika, w każdej dyskretnej chwili ze stopnia zrealizowania intencji ruchu.

Jeśli przez $r (in^i)$ oznaczymy całkowitą realizację intencji in^i , a przez $part r (in^i)$ oznaczymy realizację częściową, to można zapisać:

$$p^{i+1} = p^i + r (in^{i+1}) \quad (3)$$

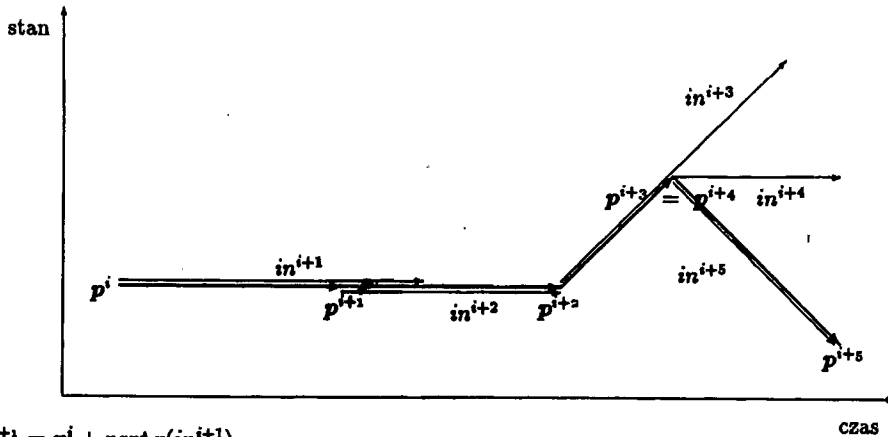
albo

$$p^{i+1} = p^i + part r (in^{i+1}) \quad (4)$$

w szczególności:

$$p^{i+1} = p^i \quad (5)$$

Rysunek 3 ilustruje koncepcję opisu zmian stanu maszyny.



$$p^{i+1} = p^i + part r (in^{i+1})$$

$$p^{i+2} = p^{i+1} + r (in^{i+2})$$

$$p^{i+3} = p^{i+2} + part r (in^{i+3})$$

$$p^{i+4} = p^{i+3} + part r (in^{i+4}) = p^{i+3}$$

$$p^{i+5} = p^{i+4} + r (in^{i+5})$$

Rys. 3: Zmiany stanu maszyny

Przykład planowania chodu, omijanie przeszkód

W przykładzie rozważamy maszynę czteronożną. Do każdej nogi przymocowany jest czujnik zbliżeniowy pozwalający na określenie odległości między końcem nogi a przeszkodą znajdującą się na podłożu. Do potrzeb planowania chodu zasięg czujnika powinien być porównywalny z długością przeciętnego kroku maszyny. Błąd odczytu powinien

być nie większy niż maksymalna długość odcinka jaki może przebyć koniec nogi w jednym kroku sterowania.

Maszyna porusza się chodem statycznie stabilnym co oznacza, że w każdej chwili ruchu conajmniej trzy nogi muszą stykać się z podłożem.

Ponadto zakładamy, że każda noga powinna mieć zdolność omijania przeszkód o wysokości nie większej niż maksymalna wysokość podniesienia nogi i długości nie większej niż maksymalna długość kroku. Przeszkody mogą być zarówno wzniesieniami terenu jak i zagłębieniami. Zadaniem układu sterowania jest takie sterowane ruchem nóg aby były zachowane wymogi stabilności, ograniczeń a przeszkody były ominięte.

Dla uproszczenia rozważań będzie rozpatrywany ruch prostoliniowy maszyny.

Bieżący cel ruchu to zamiar wykonania ruchu należącego do jednego z wyróżnionych zbiorów; DO_TYLU, DO_PRZODU, DO_GORY, W_DOL (rys. 1).

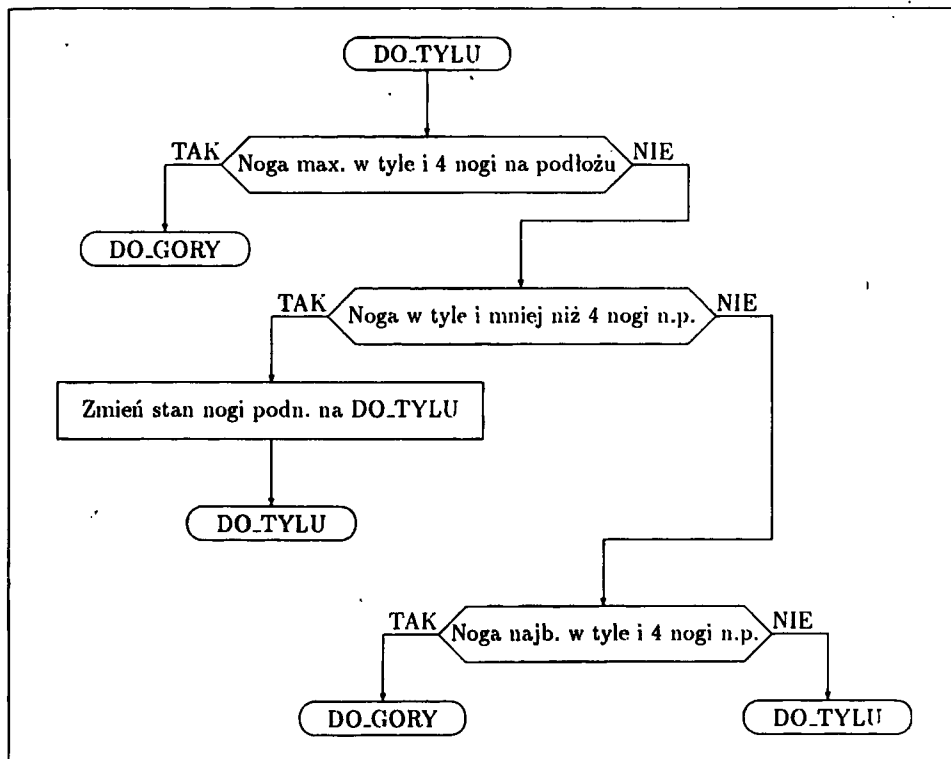
Przy określeniu bieżącego celu ruchu uwzględniane są, jak ustalono, następujące wielkości:

$$g_f, p^{i-1}, o_{sens}, (s_a), o, st_{sens}, r(g_{i-1})$$

- Cel ruchu g_f formułujemy jako polecenie realizacji ruchu jednostajnego, prostoliniowego, statycznie stabilnego.
- Stan maszyny p^{i-1} to rzeczywiste wartości współrzędnych końców jej nóg.
- $o, o_{sens}(s_a)$ to wszelkie uwzględniane w sterowaniu ograniczenia ruchu. W omawianym przykładzie uwzględniamy ograniczenia obszaru ruchowego końca każdej nogi oraz przeszkody pojawiające się w obsze ruchowym końców nóg. Osiągnięcie punktu granicznego w obszarze ruchowym może być bezpośrednio sygnalizowane przez czujniki, albo może być obliczone na podstawie stanu maszyny i znanego opisu obszaru ruchowego. Przyjmujemy, że wykrywane są następujące sytuacje:
 - osiągnięcie maksymalnego wysunięcia do tyłu nogi opierającej się o podłoże (ograniczenie ruchu DO_TYLU),
 - osiągnięcie maksymalnego wysunięcia do przodu nogi przenoszonej do przodu (ograniczenie ruchu DO_PRZODU),
 - osiągnięcie maksymalnego wysunięcia do przodu nogi opuszczanej w dół,
 - zetknięcie nogi z podłożem (ograniczenie ruchu W_DOL),
 - noga podniesiona na maksymalną wysokość (ograniczenie ruchu DO_GORY),
 - obecność przeszkody (w zależności od stanu maszyny i odległości końca nogi od przeszkody może być ograniczeniem ruchu DO_PRZODU, DO_GORY, W_DOL),
- st_{sens} - zapas stabilności statycznej wyznaczony na podstawie stanu maszyny, przy określaniu bieżącego celu ruchu sprawdzany jest wymóg konieczny zachowania stabilności statycznej to znaczy konieczność podpierania maszyny przez conajmniej trzy nogi.

- $r(g_{i-1})$ - oznacza zrealizowanie ruchu należącego do jednego ze zbiorów: DO_TYLU, DO_PRZODU, DO_GORY, W_DOL.

Wybór bieżącego celu ruchu można przedstawić w postaci schematu blokowego. Na rysunku 4 pokazano przykładowo, jaki cel ruchu zostaje wybrany jeżeli poprzednim bieżącym celem był ruch DO_PRZODU.



Rys. 4: Ilustracja planowania ruchu maszyny

Po wyborze bieżącego celu ruchu następuje określenie intencji ruchu. Uwzględniane są tutaj wartości współrzędnych końców nóg, odległości końców nóg od brzegów ich obszaru ruchowego oraz wartość zapasu stabilności.

Zakończenie

W artykule przedstawiono najistotniejsze założenia opracowanej metody oraz skrótowo omówiono przykład.

W celu przetestowania założeń metody opracowano program symulacyjny sterujący chodem czteroноżnej maszyny kroczącej. Nogi maszyny miały omijać przeszkody o niewielkiej wysokości. Założono, że w każdej nodze zainstalowany jest czujnik zbliżeniowy. Proces planowania chodu przebiegał poprawnie.

Jako dalszy etap prac planuje się uwzględnienie zjawisk dynamiki ruchu oraz sterowanie prędkościami stawianych na podłożu nóg tak, aby minimalizować możliwości poślizgu. Omówiona wyżej metoda planowania chodu została przetestowana metodami symulacji komputerowej.

Powyższa praca prowadzona jest w ramach grantu KBN 3 3001 9203.

Literatura

- [1] Dynamic Interactions In Neural Networks: An Introductory Perspective. M.A.Arbib. Dynamic Interactions in Neural Networks: Models and Data. Ed. M.A.Arbib, Shun-ichi Amari. Springer Verlag 1989.
- [2] Robustness of a Distributed Neural Network Controller for Locomotion in a Hexapod Robot. H.J.Chiel, R.D.Beer, R.D.Quinn, K.S.Espenschied. IEEE Transactions on Robotics and Automation. Vol.8,no.3, pp.293-303,1992.
- [3] Dynamics and Simulation of an Insect-Like Walking Robot. R.D.Quinn, N.Lin. Proceedings of the 9-th VPI and SU Symposium on Dynamics and Control of Large Structures. USA, 1993.
- [4] Dynamics of the Walking Stick Insect. F.Pfeiffer,H.J.Weidemann, P.Danowski. Proceedings of the 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation, USA 1990.
- [5] Learning Control of Walking Machines.K.Berns, St.Piekenbrock, R.Dillman. Materiały Euromech'307 "Walking Machines", Duisburg 1993.
- [6] Sieć Neuronowa jako Generator Chodu. I Krajowa Konferencja Sieci Neuronowe i ich Zastosowania. Kule 1994.
- [7] Postural Control of Living Organisms and Its Engineering System. K.Nishihara, M.Wada, R.Hashimoto. Journal of Robotics and Mechatronics, vol.4, no.3, 1992.
- [8] Control of a Walking Machine on Extra-Complex Terrain. A.V.Bogutsky. Proceedings of European Control Conference'93. pp.1261-1264.
- [9] Generation of Free Gait- A Graph Search Approach. Prabir K.Pal, K.Jayrajan. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 7,no. 3, June 1991, pp.299-305.

- [10] Terrain Adaptive Motion and Free Gait of a Six Legged Walking Machine. A.Halme, K.Hartikainen. K.Karkkainen. *Materiały Euromech'307 "Walking Machines"*, Duisburg 1993.
- [11] *Cybernetyczne Systemy Ruchu Zwierząt i Robotów*. A.Morecki, J.Ekiel, K.Fidelus. PWN Warszawa 1979.
- [12] *Modelowanie Chodu Czteronożnej Maszyny Kroczącej*. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 1986.
- [13] Robotics System: Elephant Trunk Type Elastic Manipulator Combined with a Quadruped Walking Machine. A.Morecki, K.Jaworek, W.Pogorzelski, T.Zielińska, J.Frączek, G.Malczyk *Proceedings of the 2-nd International Conference on Robotics and Factories of the Future*, 1987. Springer-Verlag 1988.
- [14] The Neural Organization of Cocroach Escape and its Role in Context Dependent Orientation. R.E.Ritzmann. *Biological Neural Networks in Invertebrate Neuroethology and Robotics*. Ed. R.D.Beer, R.E.Ritzmann, T.McKenna. Academic Press Inc.1993.
- [15] A Model of Leg Coordination in the Stick Insect, *Carausius morosus*. *Biological Cybernetics*, no.64, pp.393-411, Springer Verlag 1991.
- [16] A Model of Leg Coordination in the Stick Insect, *Carausius morosus*. *Biological Cybernetics*, no.66, pp.335-355, Springer Verlag 1992.
- [17] Kinematic Model of a Stick Insect as an Example of a Six-Legged Walking System. U.Muller-Wilm, H.Cruise, J.Eltze, J.Dean, H.J.Weidemann, F.Pfeiffer. *Adaptive Behavior*, vol.1, no.2, pp.155-170. The Massachusetts Institute of Technology 1992.
- [18] INFANT Neural
Controller for Adaptive Sensory-Motor Coordination. M.Kuperstein. *Neural Networks*, no.4, pp.131-145,1991.
- [19] *Neural Networks in Robotics*. T.Zielińska. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*,no.3(31),pp.591-600,Warszawa 1993.
- [20] *Modelling the Gait of a Four-Legged Walking Machine*. T.Zielińska, ARCHIWUM BUDOWY MASZYN, PWN. Vol.36, No.2-3, 1989.