

## XIII MIEDZYNARODOWE KOŁOKWIUM

"MODELE W PROJEKTOWANIU I KONSTRUOWANIU MASZYN"

13th INTERNATIONAL CONFERENCE ON

"MODELS IN DESIGNING AND CONSTRUCTIONS OF MACHINES"

25-28.04.1989 ZAKOPANE

Teresa ZIELIŃSKA

Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej  
Politechnika WarszawskaKONSTRUOWANIE MODELI CHODU MASZYN KROCZĄCYCH NA PRZYKŁADZIE  
MASZYN CZTERONOŻNEJ

**Streszczenie.** W pracy omówiono zasadę wyboru rodzaju chodu czteronożnej maszyny kroczącej (tzw. chód statycznie stabilny) oraz metodę planowania ruchu maszyny w sytuacjach, gdy realizacja danego chodu jest niemożliwa.

### 1. Wprowadzenie

Rodzaj chodu utożsamiany jest z ustaloną sekwencją przestawień nóg. Rozważana jest czteronożna maszyna krocząca (maszyna MK-4 [1]). Uwzględniany jest chód nazywany statycznie stabilnym (unikanie sytuacji groźących przewróceniem się stojącej nieruchomo maszyny). Dla takiego ruchu sformułowano warunek stabilności (stateczności) maszyny. Model matematyczny maszyny oraz parametry chodu zostały omówione w innych publikacjach, np. [1], [2], [3].

### 2. Wybór rodzaju chodu

Przy wyborze rodzaju chodu opierano się na danych uzyskanych z wyników obserwacji świata zwierzęcego. Uwzględniano chody, w których maszyna opiera się co najmniej na trzech nogach (warunek konieczny statycznej stabilizacji pozycji [1]). Wyznacznikami w klasyfikacji chodów są następujące cechy:

- względny czas styku nogi z podłożem: współczynnik obciążenia (ang. duty factor) - dla każdej nogi stały w czasie realizacji określonej sekwencji przemieszczeń nóg (danego chodu),
- względna różnica czasów między stąpięciami: faza względna (ang. relative phase) - stała w czasie danego chodu dla par nóg leżących po lewej i po prawej stronie ciała.

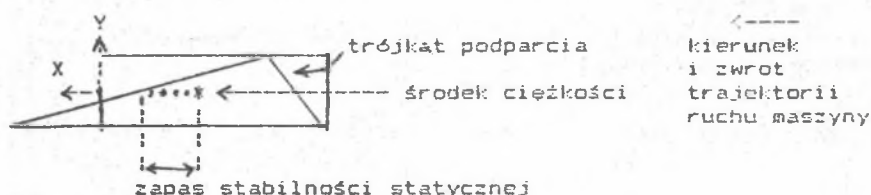
Wartości względne liczone są względem okresu chodu - czasu realizacji jednej sekwencji przestawień nóg. Wyznaczono wzór określający wartość współczynnika obciążenia dla powyższych chodów:

$$r_0 = \frac{3}{4} + \frac{3M}{2(K+2M)} \quad (1)$$

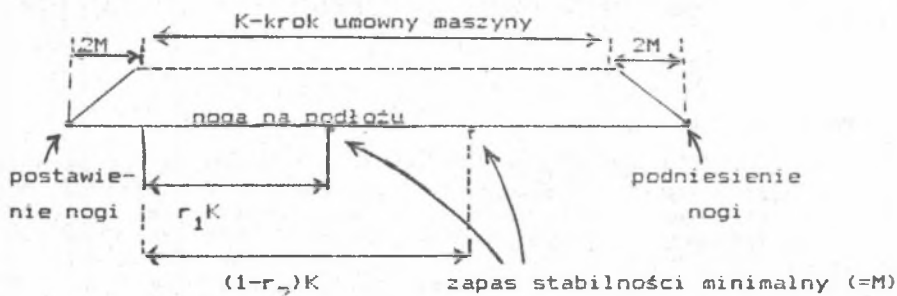
gdzie:  $K$  - długość kroku umownego - [1],

$M$  - zapas stabilności statycznej - [1] - rys.1.

Wyróżniając chwile ruchu, w których zapas stabilności statycznej ma wartość minimalną, zdefiniowano współczynniki  $r_1$  i  $r_2$ . Zapas stabilności ma wartość minimalną wówczas, gdy koniec nogi przedniej (stopa) przesunął się względem korpusu o odległość  $r_1 K$  w czasie, jaki upłynął od początku fazy trójpodporowej. Podobnie określamy odległość  $(1-r_2)K$  dla nogi tylnej - rys.2.



Rys.1. Zapas stabilności statycznej  
Fig.1. Static stability margin



Rys.2. Trajektoria ruchu końca nogi względem korpusu.  
Fig.2. Leg-end trajectory relative to the body

Rozważane są przy tym nogi przednia i tylna leżące na przekątnej korpusu maszyny. Wartości współczynników  $r_1$  i  $r_2$  są różne dla różnych rodzajów chodu statycznie stabilnego. Rozpatrzmy możliwe chody (możliwe sekwencje):

- sekwencja O: noga lewa przednia, -prawa tylna, -prawa przednia, -lewa tylna,
- sekwencja A: noga lewa przednia, -lewa tylna, -prawa tylna, -prawa przednia,
- sekwencja B: noga lewa przednia, -prawa przednia, -lewa tylna, -prawa tylna,
- sekwencja C: noga lewa przednia, -prawa przednia, -prawa tylna, lewa tylna,
- sekwencja D: noga lewa przednia, -lewa tylna, -prawa przednia, -prawa tylna,
- sekwencja E: noga lewa przednia, -prawa tylna, -lewa tylna, -prawa przednia.

Łatwo stwierdzić, że sekwencje D i E nie zapewniają stabilności statycznej (kolejne trójkąty podparcia nie mają punktów wspólnych). Dla pozostałych sekwencji współczynnik obciążenia określa wzór (1). Różne są współczynniki  $r_1$  i  $r_2$  przypisane poszczególnym chodom:

$$\text{-sekwencja O: } r_1 = \frac{2(K-M)}{3K}, \quad 0.5 < r_1 < 0.6 \quad (2)$$

$$r_2 = r_1 + \frac{2M}{K} \quad (3)$$

dla pozostałych:

$$r_1 = \frac{K-4M}{3K}, \quad 0.0 < r_1 < \frac{1}{3} \quad (4)$$

oraz zachodzą związki: -sekwencja A:  $r_2 = 0.0$ ,

-sekwencja B:  $r_2 = 1.0 - r_1$ ,

-sekwencja C:  $r_2 = 0.0$ .

Po uwzględnieniu ograniczonych obszarów ruchowych (maksymalny wykrok i zakrok) oraz powiązaniu wartości zapasu stabilności statycznej ze współrzędną rzutu środka ciężkości, uzyskuje się:

$$(S_1 + (1-r_1)K) \leq x_c^1 \leq (S_2 - r_1K) \quad (5)$$

$$(S_3 + r_2K) \leq x_c^1 \leq (S_4 - (1-r_2)K) \quad (6)$$

gdzie:  $x_c^1 \leq 0.0$  - współrzędną rzutu środka ciężkości maszyny [1],

$x_c^1 = x_c - H \operatorname{tg}(\alpha)$  ( $x_c$  - współrzędną środka ciężkości,

$H$  - wysokość maszyny [1],  $\alpha$  - kąt nachylenia terenu),

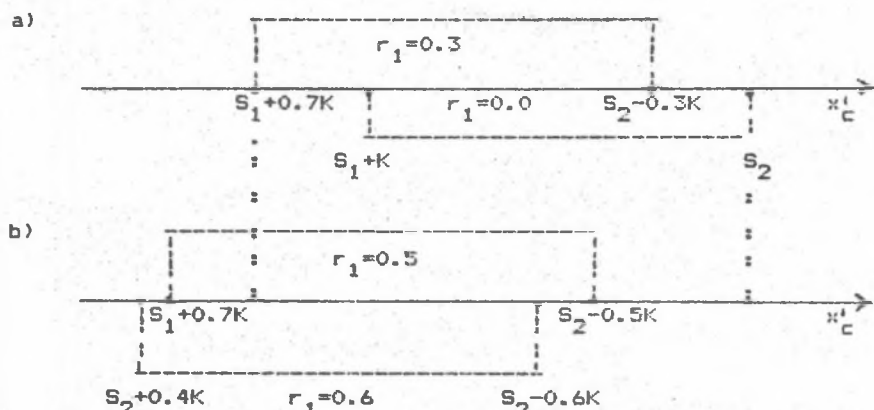
$S_1, S_2, S_3, S_4$  - współczynniki równe sumom parametrów

geometrycznych maszyny oraz wielkości określających obszary ruchowe nóg ( $S_1 = D - S_p, S_2 = D - S_p, S_3 = D - S_t, S_4 = D - S_t; S_p, S_t$  - sumy parametrów geometrycznych maszyny,  $D$  - parametr określający obszar ruchowy nóg).

Przedziały zmienności  $x_c^1$  dla dopuszczalnych wartości współczynnika  $r_1$  w chodach O, A, B i C pokazano na rys.3. Na rys.4 pokazano analogiczne przedziały wynikające z zależności  $x_c^1$  od  $r_2$  (nierówności (6)). Przedział zmienności  $x_c^1$  jest w chodach A, B, C

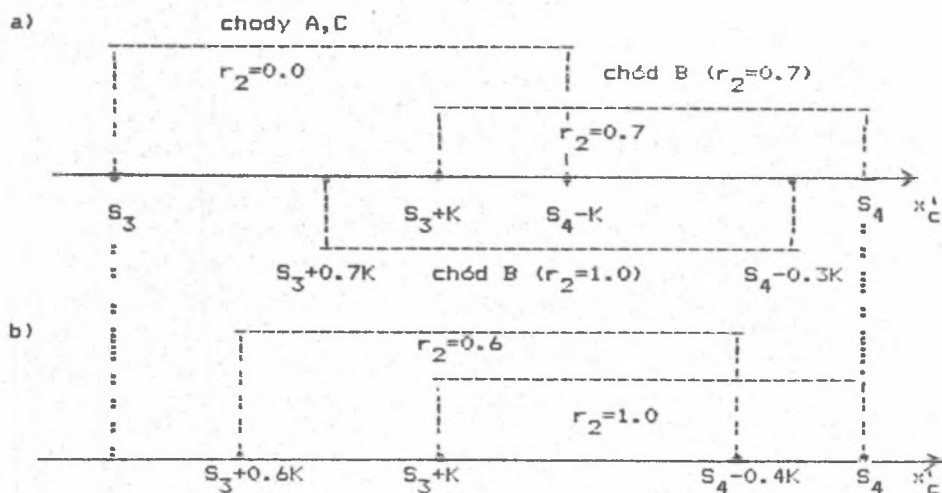
przesunięty w kierunku wartości dodatnich w stosunku do przedziału z rys.3b). Przesunięciu  $x_c^1$  w stronę wartości dodatnich odpowiada większe nachylenie terenu przy schodzeniu maszyny w dół ( $\alpha < 0.0$ ). Zgodnie z powyższym można stwierdzić, że ze względu na ograniczenie (5) chody o sekwencjach A, B, C mogą być uwzględniane przy nachyleniach terenu mniejszych niż nachylenia, gdzie wykonywany jest chód O. Analiza zależności (6) (rys.4a), 4b)) prowadzi do spostrzeżenia, że ze względu na przesunięcie wartości  $x_c^1$  w stronę wartości ujemnych chody A i C (rys.4a)) powinny być zalecane dla nachyleń terenu większych w porównaniu z chodem O. Chody A i C niosą więc zawężenie możliwości ruchowych (w sensie dopuszczalnych nachyleń terenu) w porównaniu z chodem O. Stwierdzamy, że ze względu na warunek (5), chód B powinien być zalecany dla nachyleń mniejszych niż uwarunkowania chodu O. W przypadku różnych maszyn chód O będzie zalecany dla takich, których środek ciężkości jest bardziej przesunięty do tyłu korpusu

niż w maszynach, dla których preferowany jest chód B (przy takiej samej długości i szerokości korpusu). Ze względu na warunek (6) chody B i O są porównywalne.



Rys.3. Przedziały zmienności  $x_c^I$  w zależności od  $r_1$ : a) chody A, B, C, b) chód O.

Fig.3. The range of variability of  $x_c^I$  as a function of  $r_1$ : a) gaits A, B, C, b) gait O.



Rys.4. Przedziały zmienności  $x_c^I$  w zależności od  $r_2$ : a) chody A, B, C, b) chód O.

Fig.4. The range of variability of  $x_c^I$  as a function of  $r_2$ : a) gaits A, B, C, b) gait O.

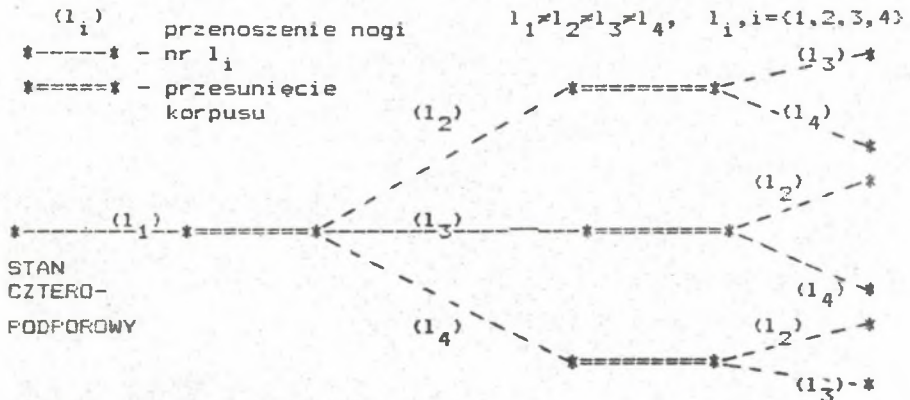
### 3. Planowanie chodu swobodnego

W czasie ruchu maszyny mogą zdarzyć się sytuacje, gdy niemożliwe jest podniesienie tej nogi, której ruch jest wymagany ze względu na regułę chodu. Maszyna wykonuje wówczas chód swobodny umożliwiający później kontynuowanie chodu o przyjętej regule. W metodzie planowania chodu swobodnego [11], wykorzystano własności chodów statycznie stabilnych:

- dla danego chodu i danego nachylenia terenu względne położenia nóg opierających się o podłoże są jednoznacznie określone,
- położenia względne nóg można wyznaczyć uwzględniając regułę chodu i parametry geometryczne maszyny.

Położenia względne końców nóg wyznaczone w układzie współrzędnych związanym z korpusem nazwano relacjami. Sytuacja, gdy chód o danej regule jest niemożliwy, jest równoznaczna z niemożnością spełnienia określonych relacji. Wyszukiwane są takie ruchy, aby relacje zostały spełnione. Jeśli rozważany jest chód, w którym występują sekwencje trójkątów podparcia, to każda faza trójkopodporowa cechująca dwie relacje: między wybraną nogą a dwoma pozostałymi - wszystkimi stojącymi na podłożu. W programie sterującym pamiętane są wszystkie możliwe w danym chodzie relacje w postaci parametrycznej (parametrami są m.in. parametry geometryczne maszyny). Dla danych warunków ruchu obliczana jest wartość relacji, następnie program sterujący przeszukuje tzw. drzewo ruchów możliwych (takich, że zachowana jest w nich stateczność - stabilność statyczna - maszyny). Sekwencja ruchów możliwych dla maszyny czteronożnej szukana jest wśród ciągu ruchów: -przemieszczenie nogi (spełnienie jednej relacji), -przesunięcie korpusu (ruch stabilizujący), -przesunięcie nogi (spełnienie drugiej relacji), -przesunięcie korpusu (ruch stabilizujący i zapewniający zgodność z regułą chodu), podniesienie i przemieszczenie nogi (zgodność z regułą chodu). Dana noga nie może być dwukrotnie przemieszczana. Drzewo ruchów możliwych pokazano na rys.5. Przy sprzyjających warunkach (zachowanie stateczności) analizowane są cztery drzewa ( $l_1=1,2,3,4$ ). Przykładowo dla maszyny sześcionożnej jest sześć

drzew ruchów rozbudowanych proporcjonalnie do liczby relacji charakteryzujących dany chód.



Rys.5. Drzewo ruchów możliwych  
 Fig.5. The tree of possible motions

#### 4. Wyniki badań

Przedstawiona metoda wyboru rodzaju chodu oraz planowania chodu swobodnego została zastosowana do maszyny czteronożnej o ustalonej konstrukcji. Proponowane rozwiązania zostały sprawdzone metodami symulacji komputerowej a obecnie są wykorzystywane przy programowaniu systemu sterującego ruchem rzeczywistej maszyny. Prace nad maszyną kroczącą prowadzone są przez Zespół Robotyki i Biomechaniki Technicznej ITLiMS Politechniki Warszawskiej w ramach tematu CPBP 02.13 koordynowanego przez IPPT PAN.

#### LITERATURA

- [1]. T. ZIELIŃSKA: Modelowanie chodu czteronożnej maszyny kroczącej. Rozprawa doktorska (promotor A. Morecki). Politechnika Warszawska 1986.
- [2]. T. ZIELIŃSKA: Model matematyczny maszyny kroczącej. I Krajowa Konf. Robotyki. Wrocław 1985.
- [3]. T. ZIELIŃSKA: Modelowanie chodu czteronożnej maszyny kroczącej. II Krajowa Konf. Robotyki. Wrocław 1988.
- [4]. A. MORECKI, T. ZIELIŃSKA: Description of a Quadruped Walking Machine Motion. 3rd Conf. on CAD/CAM & Factories of the Future. Aug. 1988. Southfield, Michigan.

ПОСТРОЙКА МОДЕЛЕЙ ПОХОДКИ ЧАГАЮЩИХ МАШИН: НА ПРИМЕРЕ ЧЕТЫРЕХНОЖНОЙ МАШИНЫ

#### Р е з ю м е

В работе дается способ выбора типа походки и метод планирования свободной походки.

THE CERTAIN OF WALKING-MACHINE GAIT MODELS: ON AN EXAMPLE OF A FOUR LEGGED WALKING-MACHINE

#### S u m m a r y

The paper describes the principles of selecting the gait rule and the method of free-motion planning.

Recenzent: dr inż. A. Nowak

Wpłynęło do Redakcji 5.XII.1988 r.