

## WYKORZYSTANIE WZORCÓW BIOLOGICZNYCH W MASZYNACH KROCZĄCYCH

*Streszczenie:* Omówiono główne założenia metody sterowania reaktywnego oraz behawioralnego.

*Przedstawiono problemy spotykane w trakcie projektowania maszyn kroczących, pokazano różnice występujące tu w wymaganiach projektowych, w odniesieniu do manipulatorów. Omówiono problemy związane z opracowywaniem metod generowania wartości zadanych. Pokazano, główne cechy Języka Behawioralnego stosowanego do budowy systemów sterowania maszyny kroczącej HERMES II.*

*Abstract:* The walking machines imitating living creatures should exhibit at least such autonomy of actions as the one observed in the insects world. Unfortunately modern machines still cannot cope with unpredictable situations. This is the main reason of searching if new control ideas. The mechanisms of generating insect behaviours are described by parallel structures (horizontal), where all the information from receptors is processed simultaneously on the same level of the nervous system. Such control exerted in technical devices is called reactive control. A special case arises when reactive control becomes behavioural control. Problems encountered in designing of control methods of adaptive walking machines are discussed.

### 1. WSTĘP

Badania nad maszynami kroczącymi trwają już od wielu lat. Znany jest przykład cztero-onożnej maszyny kroczącej (taczki) zbudowanej już w 231 r.n.e. w Chinach [21]. Pierwsze maszyny kroczące sterowane przy pomocy komputera pojawiły się na początku lat 60-tych. Potencjalne możliwości lokomocyjne maszyn kroczących są o wiele większe niż możliwości pojazdów zaopatrzonych w koła. Maszyny kroczące nie wymagają utwardzonej, równej nawierzchni dróg. Zwiększając pole powierzchni stóp można zapobiegać zapadaniu się stóp w miękkie podłoże. Położenie i orientacja platformy (korpusu maszyny) zależy od pozycji kończyn, można więc w dużym zakresie sterować platformą tak, aby jej ruch był płynny (bez wstrząsów i przechyłów). Maszyny kroczące mają duże możliwości omijania przeszkód, poruszania się po bezdrożach. Stąd też prowadzone są badania nad takimi urządzeniami przystosowanymi do prac w leśnictwie i górnictwie.

Badacze zajmujący się konstruowaniem tych urządzeń dążą do stworzenia maszyn zastępujących czy też wspomagających działania człowieka w otoczeniu przyjaznym (np. kroczące fotel, niebezpiecznym czy trudno dostępnym). Maszyny kroczące, których nogi mogą przytwierdzać się do podłoża mogą być stosowane do inspekcji rur, czyszczenia zbiorników, czy też do mycia szyb.

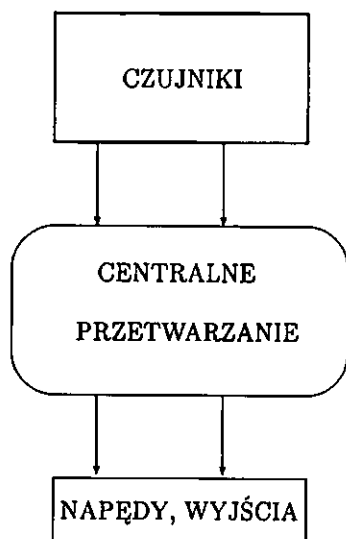
Maszyny kroczące wywodzące swój rodowód ze wzorców biologicznych powinny wykazywać przynajmniej taką autonomię działania, jaką obserwujemy w świecie owadów. Niestety

współczesne maszyny wykazują niewielkie możliwości radzenia sobie w nieoczekiwanych sytuacjach - czyli niewielką inteligencję.

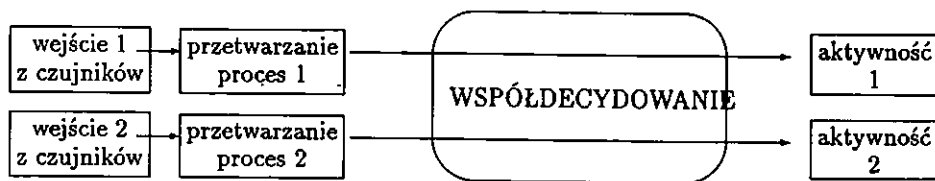
Tradycyjne metody tzw. sterowania inteligentnego wywodzą się ze starogreckiego pojmowania źródła inteligencji (Descartes). W podejściu tym podkreśla się rolę scentralizowanego, hierarchicznego systemu rozumowania korzystającego z wiedzy, pamięci, itd. (Rys.1a). Taki opis mechanizmu zachowań na długie lata zdominował prace psychologów oraz znalazł odbicie w klasycznych metodach sztucznej inteligencji. Podejście to w robotyce odzwierciedla się w koncepcjach hierarchicznych układów sterowania, gdzie decyzje poziomów wyższych są obligatoryjne dla poziomów niższych.

Alternatywne rozumienie mechanizmu inteligencji jest stosunkowo młode (jako przykłady podaje się tu najczęściej prace R.Brooksa pojawiające się od 1986r. [5, 7, 8]). Źródłem tego rozumienia są wyniki prac zoologów, którzy badając mechanizmy zachowań zwierząt niższych (najczęściej owadów) przekonali się, że skomplikowane nawet zachowania uzyskiwane są przez proste, rozłożone struktury połączeń nerwowych szybko przetwarzających informacje z receptorów na odpowiednie zachowania (aktywności) czy odruchy.

a)



b)



Rys. 1. Przetwarzanie informacji: a) scentralizowane (hierarchiczne), b) równoległe (poziome)

Mechanizmy generowania zachowań owadów opisuje się strukturami równoległymi (poziomo-

mymi), gdzie wszystkie informacje z receptorów przetwarzane są równocześnie i równolegle – Rys.1b). Informacje z receptorów odbierane są w strukturze równoległej systemu nerwowego, następnie wymieniane są sygnały wzbudzeń (można to porównać z negocjacją) między poszczególnymi torami systemu nerwowego i ustalana jest aktywność typowa dla odebranych informacji. Taka struktura generowania aktywności (w szczególności rytmów lokomocyjnych) jest doskonale widoczna u owadów. Nie ma tutaj tworzenia modelu świata zewnętrznego, modelu obiektu, czy też odwoływania się do wiedzy o prawach rządzących światem i obiektem. Takie sterowanie realizowane w urządzeniach technicznych nazywane jest reaktywnym. Rozbudowanym przykładem sterowania reaktywnego jest sterowanie behawioralne. W sterowaniu behawioralnym oprócz przejścia ze świata zwierząt niższych poziomej struktury przetwarzania informacji z czujników, stosuje się reguły decyzyjne rządzące takim przetwarzaniem (lub przynajmniej hipotezy dotyczące reguł takiego przetwarzania).

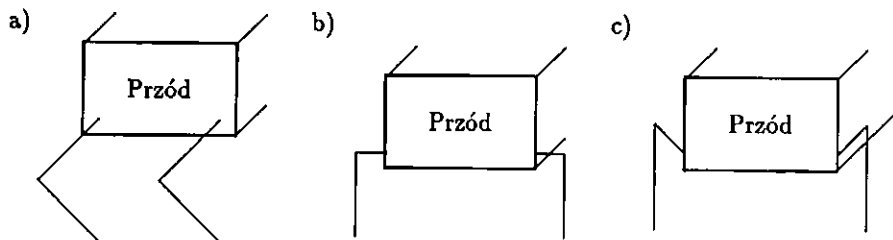
Z tego też względu często terminem sterowanie behawioralne określa się sterowanie, gdzie na podstawie informacji odbieranych z czujników określone są zachowania się obiektu na które mogą składać się z różne sekwencje ruchów a nie – proste odruchy (pojedyncze ruchy). [5, 21]. Ten drugi przypadek (sterowanie pojedynczymi ruchami) jest typowym, elementarnym sterowaniem reaktywnym.

W metodach sterowania reaktywnego autonomię działania obiektu uzyskuje się przez odpowiedni dobór możliwie prostych czujników zewnętrznych (monitorujących otoczenie) oraz czujników wewnętrznych (monitorujących obiekt) oraz przez określenie reakcji obiektu na możliwe stany (odczyty) tych czujników.

Kończąc te rozważania należy podkreślić, że między hierarchicznym a reaktywnym budowaniem inteligencji obiektów technicznych nie ma sprzeczności. W pierwszym przypadku badacze patrzą na organizmy wyżej zorganizowane i na wyższe funkcje systemu nerwowego, w drugim – badacze budują inteligencję od “podstaw” widocznych najlepiej u zwierząt niższych.

## 2. MASZYNY KROCZĄCE I ROBOTY PRZEMYSŁOWE – PORÓWNANIE

Przy projektowaniu układów mechanicznych oraz systemów sterujących maszyn kroczących istotne są inne czynniki niż w przypadku robotów przemysłowych.



Rys. 2. Struktury nóg: a) wzorowana na ssakach, b) wzorowana na gadach, c) wzorowana na owadach.

Dobierając strukturę nóg, konstruktorzy biorą pod uwagę przewidywany udźwignięcie maszyny, jej koszt oraz zdolności lokomocyjne. W projektach nóg rozpatrywane są trzy struktury:

- nogi typu ssaków (wyprostowane w stawach kolanowych) – Rys.2a), dające większy udźwig ale powodujące problemy z zachowaniem stabilności maszyny, ciężar ciała z ładunkiem rozkłada się równomiernie na wszystkie stawy, w pozycji wyprostowanej, pasywnej ciężar ten przenoszony jest przez człony nóg, momenty napędowe w stawach są niewielkie, jednak ustawienie nóg w linii korpusu zmniejsza wielokąt podparcia), takie struktury stosowane są zwykle w maszynach dwunożnych - bipedach,
- nogi typu gadów – Rys.2b), gdzie człony ud odchodzą poziomo od korpusu a stawy kolanowe tworzą kąt prosty w widoku z przodu, stawy biodrowe i kolanowe są znacznie obciążone, pole wielokąta podparcia jest większe niż uprzednio,
- nogi typu owadów – Rys.2c), w tym przypadku ciało jest "zawieszane" na członach nóg, obciążenie stawów jest mniejsze niż w poprzednim przypadku, pole wielokąta podparcia tak jak w przypadku poprzednim jest większe niż obrys korpusu, struktury te są bardzo często spotykane w sześcionożnych maszynach kroczących.

Oprócz struktury nóg należy określić liczbę stopni swobody każdej nogi. Zwykle minimalna liczba stopni swobody wynosi dwa (wyjątkiem są mające jeden stopień swobody nogi maszyn skaczących). Im mniejsza liczba stopni swobody tym tańsza jest maszyna bowiem wymaga mniej napędów, mniej czujników wewnętrznych i prostszej struktury sprzętowej układu sterującego. Mniejsze są natomiast jej możliwości lokomocyjne. Inaczej niż w manipulatorach, w maszynach kroczących, nie jest wymagana duża dokładność pozycjonowania i odtwarzania przez końce nóg zadanej trajektorii. Dotyczy to zwłaszcza maszyn o większej liczbie nóg (sześć-, ośmiożnych, itd.) poruszającymi się chodami o tzw. statycznej stabilności [21]. Konstruktorzy zwracają głównie uwagę na uzyskanie dużego udźwigu, małego poboru mocy (maszyny autonomiczne same niosą źródło energii) oraz elastyczności konstrukcji. Ostatnio pojawiły się m.in. projekty maszyn o przegubowych korpusach [15], czy nogach o zmiennej strukturze.

Autonomiczne maszyny kroczące, w odróżnieniu od robotów przemysłowych, muszą unieść cały swój system sterujący, projektant musi przewidzieć jego umiejscowienie w korpusie i przewidzieć takie upakowanie wszelkich przewodów aby uniknąć zakłóceń elektromagnetycznych. Maszyny mają o wiele więcej czujników wewnętrznych i zewnętrznych niż manipulatory. Liczba czujników w maszynach sześcionożnych może wynosić od kilkudziesięciu do stu-kilkudziesięciu (maszyna LAURON – Kalsruhe, ma ich 150). Informacje z tych czujników muszą być przetworzone w czasie rzeczywistym i aktywnie wykorzystane do sterowania. Duża liczba czujników musi być brana pod uwagę w projekcie sprzętowym systemu sterującego, bowiem trzeba tu zwrócić uwagę na organizację szybkich kanałów transmisji danych. Następnym problemem jest ustalenie programowej dekompozycji systemu sterującego i ustalenie reguł sterowania. Maszyny kroczące z założenia powinny działać autonomicznie. Uwzględniając informacje pochodzące z czujników, system sterujący sam powinien generować trajektorie ruchu korpusu i nóg tak, aby maszyna spełniała założone zadanie. Oprogramowanie systemów sterowania maszyn kroczących wymaga więc rozwiązania zagadnień planowania ruchu z zastosowaniem szeroko rozumianych metod sztucznej inteligencji.

### 3. WYBRANE ZAGADNIENIA DOTYCZĄCE STEROWANIA

#### 3.1. Poziom wykonawczy

W istniejących wielonożnych maszynach kroczących na poziomie wykonawczym, nie stosuje się sterowania opartego na modelach dynamiki. Większość tych maszyn posiada sześć nóg a ich chód imituje dobrze zidentyfikowane statycznie stabilne chody falowe jakimi poruszają się owady.

Masa nóg maszyn jest mała w stosunku do masy korpusu, prędkość ruchu jest niewielka (rzędu  $0.3 - 0.2m/s$ ) a mechanizmy napędowe mogą zwykle generować momenty napędowe o wiele większe niż jest to konieczne.

Momenty napędowe są często obliczane zgodnie z zależnością:

$$\tau = k_p (\alpha - \alpha_0) - k_t (\dot{\alpha} - \dot{\alpha}_0) \quad (1)$$

gdzie:

$\alpha$ ,  $\dot{\alpha}$  - aktualna wartość współrzędnej wewnętrznej i prędkość,

$\alpha_0$ ,  $\dot{\alpha}_0$  - pożądana wartość współrzędnej wewnętrznej i jej prędkości,

$k_p$ ,  $k_t$  - współczynniki sprzężenia zwrotnego.

Aktualne i pożądane wartości współrzędnych i ich prędkości są funkcjami czasu, obliczane momenty napędowe zmieniają się więc w funkcji czasu.

Często w modelowaniu biomechanicznym przyjmuje się, że zmiany położenia i prędkości kątowych stawów zwierząt wymuszane są zgodnie z powyższą zależnością, odpowiadającą formule regulacji proporcjonalno - różniczkowej (PD).

Modele dynamiki ruchu maszyn są przeważnie wykorzystywane nie w czasie rzeczywistym (w algorytmach sterowania), lecz wcześniej przy syntezie off-line wzorców chodu oraz syntezie systemu sterującego.

Celem modelowania zjawisk dynamiki jest [21]:

- dobór wartości współczynników  $k_p$  i  $k_t$  sprzężeń zwrotnych w warstwie sterowania bezpośredniego układu sterującego,
- badanie związku między częstotliwością kroczenia a maksimum składowej normalnej siły reakcji, powstającym w momencie postawienia nogi na podłoże (uderzenie),
- wyznaczenie takich trajektorii końców nóg aby, znalezionej w toku modelowania, rozkład sił reakcji zapewniał dynamiczną stabilność lokomocji.

Istnieją też przykłady maszyn, gdzie oprócz liniowych wewnętrznych pętli sprzężeń zwrotnych w sterownikach stawów nóg (zależność (1)) dodane są zewnętrzne pętle sterowania siłą. W tym przypadku maszyny mają zainstalowane czujniki sił w nogach, a sterowanie siłowe stosuje się w celu:

- Wyznaczenia momentów napędowych koniecznych do sterowania ruchem maszyny po różnym podłożu, przy zadanym wzorcu chodu. W pracy [12] najszerszej ujmującej to zagadnienie, rozważono w badaniach symulacyjnych sześć różnych typów

podłoża. Napotkano tu jednak duże trudności z zastosowaniem opracowanej metody do sterowania ruchem maszyny w czasie rzeczywistym. Autor kończy książkę [12] konkluzją, że takie stosowanie modeli dynamiki, ze względu na nakład obliczeń, jest niecelowe.

- Sterowania siłami oddziaływania między stopami a podłożem w celu omijania przeszkód albo balansowania na grząskim podłożu. W tym przypadku uwzględniane są proste warunki równowagi sił z uwzględnieniem informacji odebranych z czujników.

Te ostatnie metody sterowania mają przyszłość w maszynach kroczących.

### 3.2. Generowanie wartości zadanych

Głównym problemem w przypadku maszyn wielonożnych jest określenie trajektorii ruchu korpusu, kolejności przestawień nóg oraz punktów stąpień. Kształt trajektorii końców nóg nie jest specjanie istotny, o ile nogi nie omijają przeszkód. Realizowana jest trajektoria o kształcie ustalonym raz na zawsze przez programistę.

Większość istniejących maszyn kroczących posiada sześć nóg o strukturze kinematycznej wzorowanej na strukturze odnóży owadów

Chód takich maszyn jest odwzorowaniem falowego chodu owadów dającym się opisać prostymi regulami sformułowanymi przez Wilsona [13]. Jest to chód stabilny statycznie, w którym rzut środka ciężkości maszyny zawsze się mieści we wnętrzu wielokąta podparcia (wielokąta rozpiętego na śladach stojących na podłożu nóg).

W sytuacjach, gdy niemożliwa jest realizacja chodu rytmicznego (falowego), bo np. przeszkody blokują te nogi, które powinny wykonać krok, maszyny poruszają się tzw. chodem swobodnym.

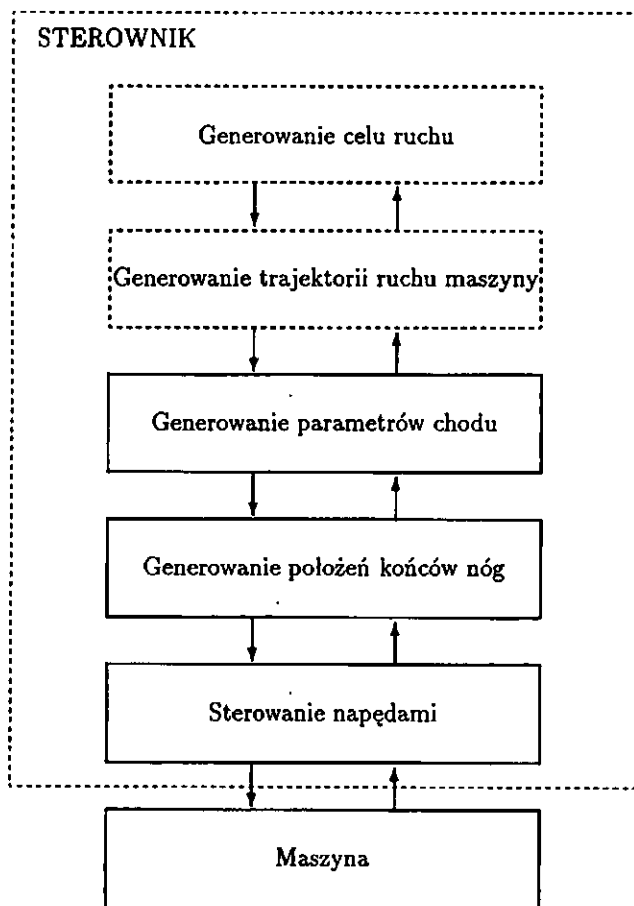
W chodzie swobodnym na bieżąco wybierana jest noga która powinna być przeniesiona. Maszyna powinna zachowywać statyczną stabilność ruchu. Stosuje się różne metody planowania chodu swobodnego np. przeszukiwanie odpowiednio zdefiniowanych grafów stanów maszyny [3, 16], wyszukiwanie kolejnych stanów maszyny z zastosowaniem metody automatów o stanach skończonych [11] albo przeszukiwanie tzw. drzewa ruchów możliwych [23, 14]. Przy stosowaniu odrębnych metod planowania chodu swobodnego i planowania chodu rytmicznego w układzie sterowania są dwa systemy generowania chodu - system generowania chodu swobodnego oraz system generowania chodu rytmicznego. Prace dotyczące generowania chodu swobodnego pojawiły się w drugiej połowie lat osiemdziesiątych.

## 4. STRUKTURY UKŁADU STERUJĄCEGO

Jedną z możliwych struktur układu sterującego, to struktura hierarchiczna dobrze znana w robotach przemysłowych. Struktura ta odpowiada centralistycznemu pojmowaniu źródła inteligencji - Rys.1a).

Strukturę takiego sterownika maszyny kroczącej pokazano na Rys. 3.

Na poziomie najniższym (wykonawczym) generowane są sygnały sterujące napędami. Poziom wyższy układu sterującego - to poziom generowania położeń końców nóg. Na tym poziomie obliczane są współrzędne końców nóg, przy uwzględnieniu reguły chodu. Na poziomie - generowania parametrów chodu wyznaczane są wartości parametrów chodu (kolejność przestawień nóg w chodzie swobodnym, długość kroku, dopuszczalne



Rys. 3. Struktura hierarchiczna sterownika

wysunięcia nóg). Kolejne możliwe poziomy to generowanie trajektorii ruchu maszyny, generowanie celu ruchu. Specyfika maszyn kroczących uwidacznia się głównie w działaniu niższych – niż te dwa ostatnie, poziomów układu sterującego. Zagadnienia generowania trajektorii i – celu ruchu maszyny można rozwiązywać metodami stosowanymi dla pojazdów mobilnych.

W zależności od liczby nóg, ich konstrukcji i pożądaných możliwości ruchowych maszyny (np. możliwości skręcania, omijanych rodzajów przeszkód) funkcje przypisane warstwom układu sterującego mogą być realizowane w różny sposób. Hierarchiczny podział struktury układu sterującego, ułatwia projektowanie maszyn kroczących. Struktura układu narzuca kolejność rozwiązywania poszczególnych zadań i ich wzajemną zależność (np. wyznaczenie parametrów chodu, wyznaczenie trajektorii końców nóg itd.).

Pojawienie się zdecentralizowanego spojrzenia na mechanizmy inteligencji, podkreślenie roli receptorów w generowaniu zachowań autonomicznych ujawniło się, jak już wspomniano, w innych rozwiązaniach układów sterujących. W tym przypadku trudno tu mówić o ustalonych strukturach układów. Kolejność realizacji działań i drogi przesyłania sygnałów wynikają z odwołania się do wzorca biologicznego.

Przykładem stosowania nowych zasad planowania ruchu (chodu) są układy sterowania zrealizowane na sztucznych sieciach neuronowych.

W maszynach sześcionożnych badacze starają się tak zaprojektować systemy sterujące aby sztuczne sieci pełniły funkcje podobne do roli systemu nerwowego owadów. Sieci neuronowe sterują ruchem nóg tak, jak wcześniej zostały tego nauczone. Ich zaletą jest szybkość obliczeń oraz możliwość prawidłowej reakcji w sytuacjach podobnych lecz nie identycznych do sytuacji wzorcowych na których sieci były uczone. W przypadku sieci neuronowych układ sterujący "pamięta" nie algorytm (metodę) postępowania lecz wzorzec reakcji na daną sytuację.

Przykładowo, w pracy [1] omówiono sterownik neuronowy zrealizowany w sześcionożnej maszynie LAURON.

Sieć neuronowa najwyższego poziomu reaguje tu na informacje pochodzące z czujników, sieć niższego poziomu steruje koordynacją ruchu nóg wykorzystując informacje przesłane z sieci wyższego poziomu. Na najniższym poziomie struktury sterowania znajdują się sieci sterujące fazami ruchu każdej nogi (tzn. przenoszeniem i podpieraniem). Do projektu takiego układu sterowania wykorzystano rezultaty badań struktury układu nerwowego pajączaków [9, 10].

R. Brooks w budowanych przez siebie systemach sterowania robotów mobilnych i maszyn kroczących stosuje struktury takie, jak pokazano to na Rys.1b).

Podstawą dekompozycji układu sterowania jest nie podział funkcjonalny (występujący w sterownikach hierarchicznych) lecz podział według aktywności. Aktywność jest to wzorzec związku ze światem (*cyt. ang.*: "an activity is a pattern of interaction with the world" [5]). Podział według aktywności pozwala wyodrębnić, w systemie sterowania warstwy. Zadaniem każdej warstwy jest realizacja przypisanych jej zachowań (aktywności) na podstawie informacji odbieranych z czujników i informacji odebranych z warstw sąsiednich.

Kontynuując badania nad nowymi metodami sterowania ruchem, R.A. Brooks i jego zespół wykonali układy sterujące ruchem kilku sześcionożnych maszyn kroczących [4, 6, 7, 8]. Układy sterowania tych maszyn są zdekomponowane według aktywności (zachowań), maszyny mogą uczyć się koordynacji ruchów nóg. Sterowniki mają tzw. współdziałającą strukturę warstwową (*ang.* subsumption architecture) - Rys.1b).



## 5. JĘZYK BEHAVIORALNY MASZYNY HERMES II

Sześćcionożna maszyna HERMES II została zbudowana w zespole R. Brooks'a. Oprogramowanie jej systemu sterującego zrealizowane jest przy pomocy Języka Behavioralnego (BL), na który składa się biblioteka podprogramów napisanych w języku LISP.

BL posiada syntaktykę języka LISP (i wykorzystuje jego translator). Wykorzystując procedury BL użytkownik definiuje zbiór zachowań składających się na system sterujący maszyną. Zbiór zachowań powinien być tak dobrany (przez projektanta), aby maszyna realizowała zamierzony cel, np. chód z omijaniem przeszkód. Projektant powinien, przy tym zwrócić uwagę na zachowania w sytuacjach awaryjnych, nietypowych (tzw. emergent functionality).

Każde zachowanie opisane jest zbiorem tzw. reguł czasu rzeczywistego, zapisywanych w poniżej postaci.

(whenever *condition* &rest *body-forms*)

albo:

(exclusive &rest *whenever-forms*)

Pole *condition* oznacza tzw. regułę czasu rzeczywistego, która mówi kiedy ma być wykonany ciąg instrukcji *body-forms*.

*condition* może być:

- wartością odstępu czasu  $t$  określającą co ile mają być wykonywane instrukcje *body-forms*, odstęp  $t$  jest nazywany charakterystycznym czasem systemu i jest wartością stałą dla konkretnej implementacji sterownika,
- zmienną aktywacji *monostable*, jeżeli zmienna *monostable* została wzbudzona instrukcje *body-forms* są wykonywane przez cały czas jej aktywności,
- negacją zmiennej aktywacji *not monostable*, jeżeli zmienna *monostable* nie została wzbudzona instrukcje *body-forms* są wykonywane przez cały czas braku jej aktywności,
- wartością opóźnienia *delay*  $\tau$ , które ma podobne znaczenie jak  $t$  z tym, że jest podawane przez użytkownika i może być inne w kolejnych regułach czasu rzeczywistego,
- specyfikacją rejestru, w którym ma być odebrana wiadomość – (*received? register*). Jeżeli, w wyspecyfikowanym rejestrze *register* pojawia się wiadomość, wówczas jest wyznaczany waunek *body-forms*.
- w specyfikacji (*exclusive &rest* pole warunku przybiera postać *and* | *or* &rest i jest logiczną kombinacją wyżej wymienionych specyfikacji.

Zachowania mogą być pojedynczymi regułami czasu rzeczywistego:

(defmachine *name declarations rule*)

albo zbiorami zawierającymi kilka/kilkanaście reguł:

(defbehavior *name inputs outputs declarations rules*)

*name inputs outputs* są rejestrami wejściowymi/wyjściowymi, istniejącymi przy wyspecyfikowanych zachowaniach.

Te rejestry (a więc i zachowania) mogą być łączone ze sobą "przewodami" zgodnie z żądaniami projektanta:

*(connect source dest1 &rest more-dest)*

HERMES zaopatrzony jest m.in. w dwa czujniki podczerwieni umiejscowione w przodzie maszyny. W ramach badań HERMESA II sporządzono wykresy odczytu czujników podczerwieni od w funkcji kąta ustawienia przeszkody względem czoła maszyny, sporządzono krzywe czułości czujników w funkcji wielkości i odległości obiektów, zdjęto też charakterystyki czujników dla wykrywanych obiektów o różnej barwie oraz o różnej fakturze. Wyniki badań podane są w pracy [17].

Charakterystyki określające wartość odczytu czujników w zależności od odległości od przedmiotu mogą być przykładowo wykorzystane do budowy nowego zachowania określonego jako zmniejszanie prędkości ruchu maszyny w miarę zbliżania się do przeszkody:

*(defbehavior moderate*

*:outputs(velocity)*

*:decls (( max\_velocity: additive (0 63): init 63))*

*:processes((whenever(or(>= (get-ir-reading: right-front) 0)*

*(>=(get-ir-reading:left-front) 0))*

*(output velocity - max\_velocity & max right-front left-front))))*

W tym przykładzie wartości odczytów z czujników powodują modyfikację prędkości ruchu maszyny. Odczytywany jest stan lewego i prawego czujnika (*get-ir-reading:right-front*, *get-ir-reading:left-front*). Prędkość ruchu maszyny *velocity* jest równa prędkości maksymalnej *max\_velocity* pomniejszonej o większy z odczytów stanu dwu czujników *max right-front left-front*.

Ponieważ odczyt z czujników jest liczbą odwrotnie proporcjonalną do odległości od przeszkody, im bliżej przeszkody tym prędkość ruchu maszyny *velocity* jest mniejsza.

## 6. WNIOSKI

W najbliższej przyszłości będzie pojawiać się coraz więcej metod planowania chodu maszyn kroczących (jak też i robotów mobilnych i manipulatorów) należących do metod reaktywnych, czy behawioralnych. Świadczą o tym mnożące się prace badawcze, zaawansowane badania ruchu owadów oraz coraz intensywniejsze kontakty neurobiologów z projektantami maszyn kroczących. Powodzenie metod sterowania reaktywnego R.Brooksa, jak też inne - liczne przykłady sterowania reaktywnego i behawioralnego pokazują, że przyroda ożywiona może wnieść wiele inspiracji do syntezy systemów sterowania urządzeniami technicznymi.

*Prezentowane prace są prowadzone w ramach grantu KBN nr 7T07B03109*

## LITERATURA

- [1] K.Berns: *Steuerungsansatze auf der Basis Neuronaler Netze fur Sechsheinige Laufmaschinen*. Praca doktorska, recenzenci: R.Dillman, W.Menzel, Karlsruhe 1994.
- [2] R.A.Brooks: *Planning is Just a Way of Avoiding Figuring out What to do Next*. MIT 1987, Working Paper 303, Sept. 1987, str.1-5.
- [3] A.V.Bogutsky: *Control of a Walking Machine on Extra-Complex Terrain*. Proceedings of European Control Conference'93, 1993, str.1261-1264.
- [4] R.A.Brooks, A.M.Flynn: *si Fast, Cheap and Out of Control: A Robot Invasion of the Solar System*. Journal of the British Interplanetary Society, vol.42, 1989, str.478-485.
- [5] R.A.Brooks: *Intelligence without Representation*. Artificial Intelligence, no.47, 1991, str.139-159.
- [6] R.A.Brooks: *New Approaches to Robotics*. American Association for the Advancement of Science. Reprint Series, vol.253, 13 Sept. 1991, str.1227-1232.
- [7] R.A. Brooks: *The Whole Iguana*. Report of Workshop on Coordinated Multiple Robot Manipulators: Planning, Control, and Applications. Ed.by: G.Koivo and G.A.Bekey, 1987.
- [8] R.A. Brooks and L.A. Stein: *Building Brains for Bodies, Autonomous Robots*. 1994, vol.1, str.7-25
- [9] J.Dean: *A Model of Leg Coordination in the Stick Insect, Carausius morosus*. Biological Cybernetics, vol.64, Springer Verlag 1991, str.393-411.
- [10] J.Dean: *A Model of Leg Coordination in the Stick Insect, Carausius morosus*. Biological Cybernetics, vol.66, Springer Verlag 1992, str.335-355.
- [11] A.Halme, K.Hartikainen, K.Karkkainen: *Terrain Adaptive Motion and Free Gait of a Six Legged Walking Machine*. European Colloquium Euromech'307 "Walking Machines" (na prawach rękopisu), Duisburg 1993.
- [12] D.J.Manko: *A General Model of Legged Locomotion on Natural Terrain*. Kluwer Academic Publishers 1992.
- [13] A.Morecki, J.Ekiel, K.Fidelus: *Cybernetyczne Systemy Ruchu Zwierząt i Robotów*. PWN 1979.
- [14] A.Morecki, K.Jaworek, W. Pogorzelski, T.Zielińska, J.Frączek, G.Malczyk: *Robotics System - Elephant Trunk Type Elastic Manipulator Combined with a Quadruped Walking Machine*. Proc. of the Second Int. Conf. of Robotics and Factories of the Future'87. Springer Verlag 1988, str.649-648.
- [15] A.Morecki, T.Zielińska: *Walking machines, new ideas in design and control*. ISIR'27, Październik 1996, Milano - Italy
- [16] P.K.Pal, K.Jayrajan: *Generation of Free Gait- A Graph Search Approach*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.7, no.3, June 1991, str.299-305.
- [17] P.Szabelak: *Identyfikacja parametrów maszyny kroczącej HERMES II*. Politechnika Warszawska 1996. Praca magisterska, pod kier. T.Zielińskiej. 66 stron.
- [18] P. Szabelak: *Instrukcja obsługi maszyny kroczącej HERMES II*. Politechnika Warszawska 1996. 48 stron.
- [19] T.Zielińska: *Walking Machines: Selected Problems of Design and Control*. Proc. of the Third Int. Symposium on Methods and Models in Automation and Robotics - MMAR'99. Ed. Bańka S., Domek S., Emirsajłow Z., Międzyzdroje 1996, vol.III, str.1005-1010.
- [20] T.Zielińska, P.Szabelak: *Methods of Modelling of Walking Machine Gaits*. IEE Colloquium: Information Technology for Climbing and Walking Robots. Portsmouth, 29 Oct.1996, str.4/1 -4/4.

- [21] T.Zielińska: *Wykorzystanie Własności Chodu Człowieka i Zwierząt do Syntezy Ruchu Maszyn Kroczących. Monografia. Prace Instytutu Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej. Nr 40, Warszawa 1995.*
- [22] T.Zielińska: *Konstruowanie Modeli Chodu Maszyn Kroczących na Przykładzie Maszyny Czteronożnej. XIII Międzynarodowe Kolokwium "Modele w Projektowaniu i Konstruowaniu Maszyn" , Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, 1989, str. 271-276.*
- [23] T.Zielińska: *Modelowanie Chodu Czteronożnej Maszyny Kroczącej. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska 1986 (promotor – prof A.Morecki).*