

ROLA SPRZĘŻENIA ZWROTNEGO W LOKOMOCJI: ZWIERZĘTA I MASZYNY KROCZĄCE

W pracy przedstawiono podstawowe cechy biologicznych systemów generowania ruchu (lokomocji). Pokazano analogie pomiędzy tymi systemami a systemami generowania ruchu maszyn kroczących. Omówiono najnowsze metody generowania ruchu maszyn, pokazano też struktury konkretnych realizacji systemów sterujących.

ROLE OF FEEDBACK LOOP IN LOCOMOTION: ANIMALS AND WALKING MACHINES

Author describes the main features of biological motion systems. The analogy between artificial and living control systems is underlined. Recent methods of walking machines motions generation are presented and examples of concrete realization of control systems are presented.

1 WSTĘP

Nowoczesne roboty to nie tylko roboty przemysłowe, lecz tele-manipulatory, roboty mobilne, roboty kroczące, roboty pływające czy też roboty latające. To co było fantazją w książkach, filmach i to nawet nie tak dawno, szybko przechodzi do rzeczywistości. Nasza wiedza i aktualne możliwości techniczne pozwalają na prowadzenie coraz bardziej zaawansowanych projektów. Inteligencja robotów - autonomia działania, czyli inaczej zdolność radzenia sobie w nieprzewidzianych sytuacjach jest coraz bardziej zaawansowana. Projektanci robotów coraz szerzej korzystają ze wzorców przyrody ożywionej, gdzie posiadanie odpowiednich receptorów (czujników) i umiejętność właściwego reagowania na bodźce umożliwia przetrwanie oraz celowe działanie. Wiemy powszechnie, że wynalazek koła był krokiem milowym w rozwoju środków lokomocji. Fakty historyczne pokazują, że człowiek nie tylko poszukiwał nowych rozwiązań technicznych lecz też od wielu tysięcy lat był zafascynowany urządzeniami mechanicznymi, które naśladują przyrodę ożywioną i lokomocję zwierząt. Przykładowo, archeolodzy odnaleźli mechanicznego „psa”, którego wiek określiło na około 2 tysiące lat przed naszą erą [23]. Według ksiąg *Iliady* Homera bóg Hefajstos próbował budować trójnogi na kołach, które mogły się przemieszczać. W starych legendach hinduskich można znaleźć opisy mechanicznych słoni. W 231 roku naszej ery pod patronatem urzędnika chińskiego Zhu Ge-Liang powstała drewniana maszyna krocząca MU NU LIU MA, co w wolnym tłumaczeniu oznacza pojazd, który jest tak silny jak krowa i tak szybki jak koń. Maszyna ta była wykorzystywana do transportu

żywności dla armii chińskiej. Mogła ona przenosić ciężar 200-250kG pokonując około 10 kilometrów dziennie na górzystych ścieżkach. Urządzenie to działało na zasadzie taczek, pchane przemieszczało się do przodu a dzięki skomplikowanemu systemowi drewnianych, zębatych kół przestawiało nogi tak jak krowa, czy koń przy powolnym chodzie.

W niniejszej pracy uwagę skupimy na robotach kroczących, które są historyczną kontynuacją przytoczonych wyżej faktów. Maszyna krocząca, lub inaczej robot kroczący, jest definiowana jako urządzenie techniczne, które przemieszcza się, podobnie jak większość zwierząt, używając kończyn [16]. Lokomocja maszyn kroczących jest zdyskretyzowana jako, że kontakt z podłożem ograniczony jest do szeregu odseparowanych śladów (nie jest ścieżką ciągłą jaką zostawiają pojazdy kołowe).

Badacze zajmujący się maszynami kroczącymi studiują biologiczne aspekty chodu. Przykładowo, znajomość rodzajów chodów obserwowanych w ruchu określonych zwierząt sugeruje struktury geometryczne nóg - np. [12, 10] i korpusu jakie mogą być optymalne przy danym sposobie ruchu - np.[5]. Wiadomo, że od postury nóg zależy rozkład momentów obciążających w stawach oraz rozkład sił reakcji - można być pewnym, że natura podpowie tu najlepsze rozwiązanie. Natura dostarcza wzorce chodu oraz sugeruje jak wyglądają fazy przejściowe ruchu przy zmianie rodzaju chodu. W przypadku sześcionogów dla ruchu prostoliniowego te zmiany są dobrze zidentyfikowane ponieważ zamykają się - w regule chodu falowego [21]. Podobnie jest w przypadku ośmionogów [22]. Dla czworonogów i istot dwunożnych niestety jeszcze brakuje istotnych konkluzji. Obserwacje nie doprowadziły do uogólnień. Również dla sześcionogów - w przypadku zmiany kierunku ruchu czy zmiany nachylenia terenu, bądź też przy omijaniu przez nogi przeszkód - nie ma uniwersalnych wzorców ruchu. Biologowie starają się wniknąć w mechanizmy generowania chodów, których identyfikacja może pomóc w opracowaniu metod zmian chodu to znaczy w określeniu - kiedy i jaki chód powinien być stosowany oraz jak generować ruchy przejściowe prowadzące do szybkiej zmiany jednego chodu rytmicznego na inny bez utraty stabilności postury. Może być tutaj pomocna znajomość mechanizmów działania biologicznych generatorów rytmu chodu. Istotne jest też określenie typu i roli sprzężeń zwrotnych wpływających na obraz chodu.

Według historii narodziny nowoczesnych metod analizy chodów były związane z koniem. Mianowicie w 1870 roku Leland Stanford był zarządca stanu Kalifornia założył się ze swoim znajomym Fryderykiem MacCrellish stawiając niebagatelną sumę 25 tysięcy dolarów amerykańskich na fakt, że w czasie truchtu są momenty gdy wszystkie nogi konia nie stykają się z podłożem. W celu rozstrzygnięcia tego zakładu został zatrudniony lokalny fotograf Edward Maybridge. Umieścił on szereg aparatów fotograficznych wzdłuż toru biegu konia, do spustów migawek były przywiązane cienkie nitki przecinające tor. Zwierzę biegnąc zrywało nitki i uwalniało spusty migawek - w ten sposób uzyskano dokładną rejestrację faz ruchu. Stanford wygrał zakład a Maybridge ulepszając swój pomysł robienia zdjęć w krótkich odstępach czasu stał się znanym prekursorem wynalazku kamery i powstania kina [19].

2 BIOLOGICZNE MECHANIZMY RUCHU

Istoty żywe poruszają się różnymi rodzajami chodu. Istoty dwunożne mogą chodzić, biegać lub skakać. Czworonogi najczęściej chodzą, truchtają albo poruszają się kłusem. Zwierzęta zmieniają rodzaj chodu w zależności od prędkości ruchu oraz w zależności od warunków terenu. Biologowie i neurobiologowie badają organizmy żywe starając się dociec

mechanizmów generowania ruchu. Biocybernetyka rozwijająca się intensywnie kilka dekad lat temu zwróciła uwagę na rolę sprzężeń zwrotnych w mechanizmach zachowań. W pracach Arbiba [2] można znaleźć schematy ideowe pokazujące zasady wykorzystania informacji z różnych receptorów przez mózg w trakcie chodu ludzkiego. Schematy te wynikały z obserwacji „zewnętrznych” własności chodu. Mimo długoletnich prac bardzo trudno było i trudno jest zidentyfikować jak wygląda struktura przekazywania informacji oraz podejmowanie decyzji z uwzględnieniem roli poszczególnych części mózgu oraz informacji odbieranych z różnych receptorów. Pierwsze prace nad dekompozycją funkcjonalną mózgu datują się na koniec II wieku n.e. i były one prowadzone przez Klaudiusza Galena, lekarza z Pergamonu. W szerszym zakresie takie badania pojęli neurofizjologowie w XVIII i XIX wieku. Neurofizjologowie austriacy F.J.Gall i K.Spurzheim przyjmowali zróżnicowanie funkcjonalne mózgu co zostało potem potwierdzone i obecnie znana jest specjalizacja poszczególnych części mózgu. Biorąc pod uwagę lokomocję wiemy, że mózg odgrywa w niej istotną ale nie wyłączną rolę. Patrząc na miniaturowy nieskomplikowany mózg żaby, potem bardziej złożony mózg żółwia, a dalej - królika, kota, szympansa a w końcu człowieka można stwierdzić, że złożoność mózgu idzie w parze ze złożonością i różnorodnością ruchów lokomocyjnych. Należy jednak pamiętać, że chodzi tu o różnice w budowie mózgu a nie jego wagę czy też proporcję wagi do wagi całego ciała, która np. w przypadku człowieka wynosi około 1/40, w przypadku szympansa 1/100 a w przypadku kota 1/60. Do dyskusji roli mózgu w generowaniu lokomocji jeszcze wrócimy. Teraz zajmujemy się niższym poziomem generowania ruchu albo, co jest równoważne, mechanizmami generowania ruchu w przypadku organizmów mniej złożonych niż kręgowce - owadów. Po początkowym okresie fascynacji badaniami nad mózgiem w aspekcie lokomocji temat ten został odsunięty ze względu na małą wiedzę o przedmiocie badań i jego złożoność. W ostatnich latach przedmiotem intensywnych badań neurobiologów są mechanizmy generowania ruchu owadów i mechanizmy generowania ich zachowań lokomocyjnych. Stymulacją jest tutaj rozwój maszyn krocących, w których nie tylko imituje się chód zwierząt lecz też wykorzystuje wiedzę o biologicznych mechanizmach ruchu.

Wiele mechanizmów ruchu owadów udało się dobrze zidentyfikować, niemniej jednak i tak istnieją konkluzje formułowane na poziomie hipotez. Istotne jest, że mechanizmy lokomocyjne zaobserwowane u owadów występują u zwierząt wyższych, u których mózg jest „sterownikiem” poziomu najwyższego. Ruch rytmiczny organizmów żywych jest generowany przez neuronowe Generatory Rytmów.

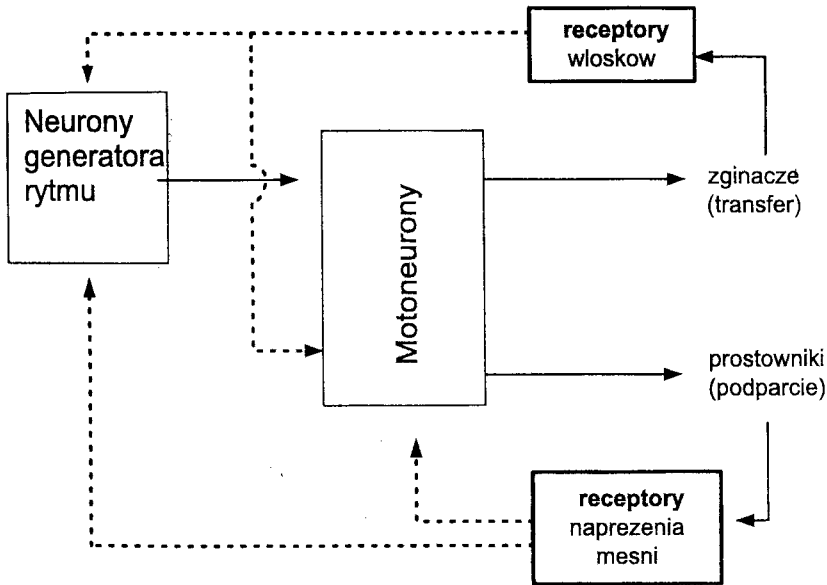
Badania eksperymentalne najpierw wykazały, że chód kręgowców jest w części sterowany przez Centralny Generator Rytmów. W 1879 roku Huxley stwierdził, że sposób ruchu pewnego gatunku ryby ryby, która wije się rytmicznie musi być stymulowany poprzez serię skoordynowanych impulsów neuronowych. W 1911 roku Brown wykazał, że impulsy wysyłane z neuronów rdzenia kręgowego pobudzają ruch kończyn tylnych kota a niedługo później (1914) opisał on generator rytmów ulokowany w rdzeniu kręgowym. Von Holst (1935) pokazał eksperymentalnie, że grupy neuronów rdzenia kręgowego koordynują ruch ryb bez sprzężenia zwrotnego pochodzącego z receptorów (według [8]). Późniejsze prace wielu badaczy potwierdziły istnienie generatorów rytmu lokomocji - nie tylko chodu, lecz lotu, czy wijącego się ruchu ciała w czasie pływania. Badania nad owadami pozwoliły dobrze zidentyfikować generatory ich chodów. Wyniki tych prac znalazły odzwierciedlenie w realizacji systemów sterujących sześcionożnymi maszynami krocącymi.

3 GENERATORY CHODU: POZIOM NAJNIŻSZY

3.1 Owady

Chód owadów jest sterowany przez sieć neuronową generatora rytmów, która jest stymulowana sygnałami pochodzącymi z receptorów oraz sygnałami interakcji międzyneuronowych - np.[18]. U insektów Centralny Generator Chodu to grupy neuronów podzielone na trzy części mieszczące się w segmentach ciała - przednim, środkowym i tylnym - są to tzw. zwoje piersiowe. Odpowiednia współpraca tych grup zapewnia generowanie rytmu chodu czyli synchronizowanie ruchu nóg co zostanie omówione dalej. Tutaj zajmiemy się tylko współpracą generatora z ośrodkami wykonawczymi - grupami mięśniowymi.

Neurony rytmu generują sygnał oscylacyjny przekazywany poprzez tzw. neurony pośredniczące do motoneuronów. Z motoneuronów sygnały sterujące przekazywane są do grup mięśniowych odnóży. Na odnóżach znajduje się wiele receptorów, które informują o pozycji kończyny. Sprzężenia od receptorów odnóży docierają do motoneuronów oraz też do neuronów pośredniczących i neuronów rytmu.



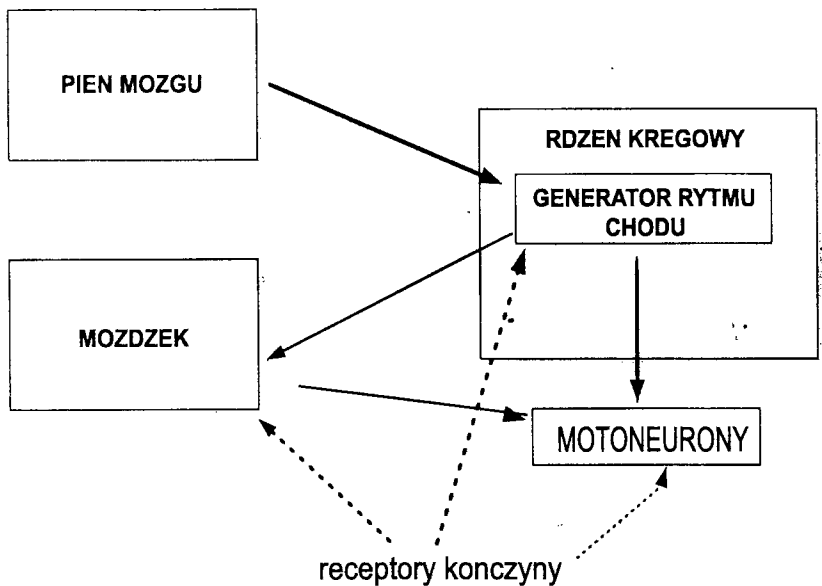
Rysunek 1: Generator ruchu owadów: poziom najniższy

Na Rys.1 pokazano schemat ogólny przepływu sygnałów generujących ruch odnóży. Sprzężenia zwrotne od receptorów nóg zaznaczono odcinkami kropkowanymi. Grupy receptorów odnóży owadów dostarczające sygnałów sprzężeń zwrotnych są dobrze zidentyfikowane i opisane (m.in.[3]), na rysunku wymieniono najważniejsze - receptory naprężenia mięśni oraz receptory włosowe (receptory włosków pokrywających odnóża). Pokazany schemat dotyczy najniższego poziomu sprzężeń zwrotnych dotyczących receptorów odnóży i najniższego poziomu generowania chodu jakim jest generowanie ruchu pojedynczej kończyny. Każde takie trzy warstwy neuronów (neurony rytmu, pośredniczące i motoneurony) wyłączając połączenia pomiędzy neuronami warstwy najwyższej - neuronami rytmu,

stanowią generator ruchu jednej nogi. Złożone zachowania lokomocyjne owadów -jak np. ucieczka stymulowana powiewem wiatru wykrytego przez receptory włosowe na odwłoku karalucha jest już przykładem współdziałania sprzężeń wyższego poziomu stymulujących zmiany oscylacji Generators Chodu i omówionych sprzężeń poziomu najniższego.

3.2 Kręgowce

Struktura neuronowa Generators Rytmu Chodu kręgowców (ssaków palchochodnych), podobnie jak generatorów innych rytmów życiowych (jak np. oddychanie, bicie serca) nie została tak dobrze zidentyfikowana jak ma to miejsce w przypadku owadów. Wiadomo, że neurony rytmu Generators, który jest częścią Generators Rytmów Życiowych umiejscowione są w rdzeniu kręgowym (np. [6, 20]) Oprócz badań eksperymentalnych zmierzających do identyfikacji tej struktury (np.[13]) prowadzone są liczne badania teoretyczne mające na celu modelowanie samego sposobu funkcjonowania Generators. Często do tego celu stosowane są modele matematyczne różnego typu oscylatorów sprzężonych albo modele funkcjonalne neuronów – np. [4, 8].



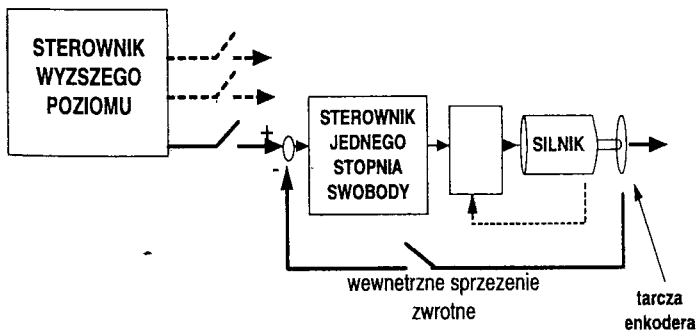
Rysunek 2: Generator ruchu kręgowców

Sprzężenie najniższego poziomu w przypadku kręgowców odgrywa podobną rolę jak w przypadku owadów. Gorzej jednak, w badaniach biologów, są zidentyfikowane receptory najniższego poziomu, które mogą być różne w zależności od gatunku i jest ich bardzo dużo. Na Rys.2 pokazano ogólny schemat przepływu sygnałów sprzężeń najniższego poziomu przy lokomocji kręgowców. Podobnie jak w przypadku owadów, sygnały z receptorów niskiego poziomu przekazywane są do motoneuronów i do neuronów Generators Rytmu Chodu (Lokomocji) ponadto dostarczane są też bezpośrednio do mózdzku, czyli też i do wyższego poziomu systemu generowania ruchu.

3.3 Maszyny kroczące

W maszynach kroczących sprzężenie zwrotne na poziomie wykonawczym, podobnie jak w robotach przemysłowych, pomaga w uzyskaniu zadanego położenia członów.

W większości maszyn kroczących, jako napędy, stosowane są obrotowe silniki elektryczne. Enkodery umocowane na wałach silników dostarczają tu informacji o obrocie silnika - Rys.3. Te klasyczną strukturę można odnieść do struktury biologicznej i współpracy motoneuronów z grupami mięśniowymi oraz receptorami kończyn. Mimo iż maszyny kroczące są systemami silnie nieliniowymi zdają w nich dobre rezultaty sterowniki proporcjonalno - różniczkująco - całkujące (PID) bowiem - z jednej strony w lokomocji nie jest istotna wysoka precyzja ruchu - a z drugiej strony synteza sterowanie nieliniowego jest utrudniona ponieważ ze względu na liczne zamknięte łańcuchy kinematyczne, w których elementami są nogi stykające się z różnorodnym podłożem. Istnieją poważne trudności w budowie modeli uwzględniających zjawiska dynamiki. Przyjmowanie uproszczeń i założeń kończy się jakością sterowania w wiele gorszą niż sterowanie z kompensacją liniową. Budowniczo wie maszyn kroczących poprawiają jakość sterowania dodając czujniki zewnętrzne i generując ruchy kompensujące w przypadku niedokładności pozycji, czy potrzeby jej korekty. Podobnie jest w przypadku organizmów żywych, które nie obliczają lecz „czują” swoją dynamikę. W maszynach kroczących stosowane są co najmniej czujniki dotyku w końcach nóg, które informują, że należy zatrzymać ruch stawianej na podłoże nogi - bo podłoże jest wyżej niż zakładano to przy generowaniu trajektorii. Czujniki sił w końcach nóg pozwalają balansować posturę maszyny [9], zmieniać nachylenie korpusu i położenia nóg tak, aby np. uniknąć poślizgu. Analogie pomiędzy systemami biologicznymi a maszynami kroczącymi są bardziej widoczne w realizacji syntezy ruchu kończyn zwłaszcza, że projektanci maszyn często świadomie korzystają tu ze wzorców biologicznych. Dyskutując poziom najniższy sterowania dodamy tylko, iż uważa się, że sterowniki proporcjonalno - różniczkujące (PD) dobrze oddają własności biologicznych sterowników biorących udział w sterowaniu ruchem grup mięśniowych [14, 17].

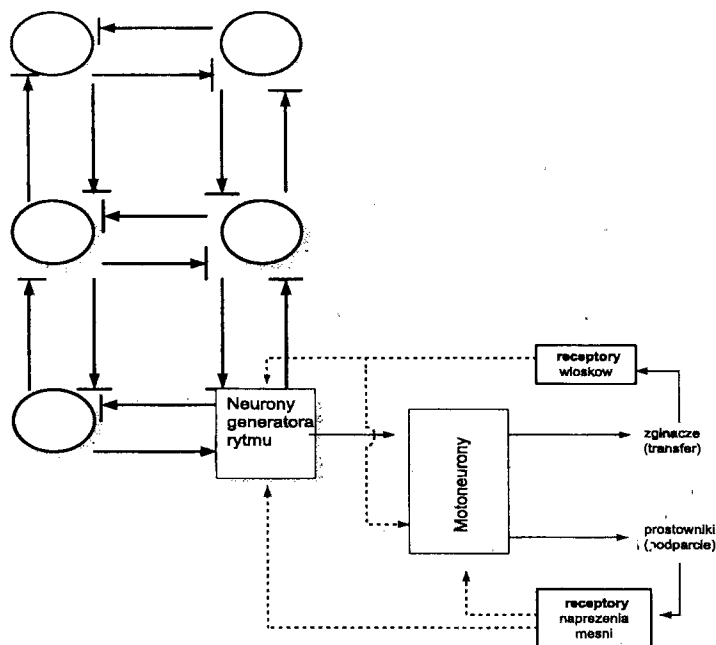


Rysunek 3: Poziom wykonawczy układu sterowania

4 POZIOMY WYŻSZE SYSTEMU LOKOMOCJI

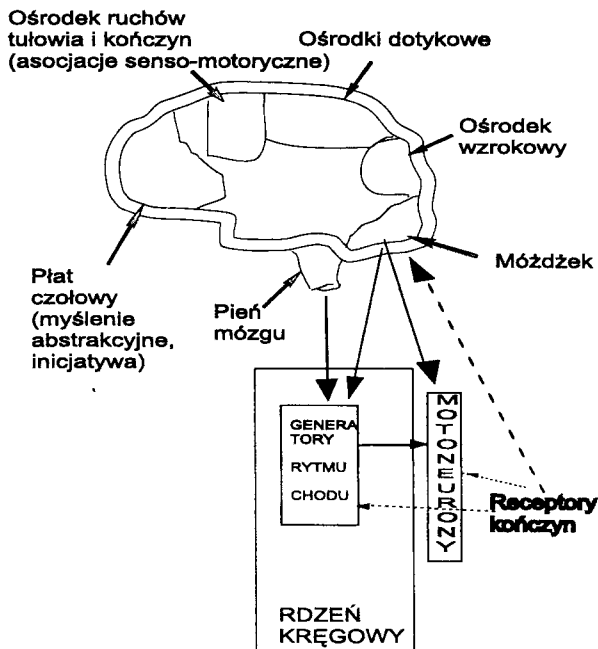
4.1 Owady

Ja już powiedziano, Centralny Generator Rytmu owadów składa się z hierarchicznie współpracujących neuronów rytmu, dalej neuronów pośredniczących (nieimpulsujących; z ang. nonspiking interneuron) a potem motoneuronów. Te trójwarstwowe struktury to zwoje piersiowe (ang. thoracic ganglia), które przestrzennie dzielą się na trzy grupy mieszczące się w trzech segmentach ciała.



Rysunek 4: Struktura powiązań grup neuronowych Generators Chodu owadów

Grupa neuronów w segmencie przednim nosi nazwę prothoracic ganglion, w segmencie środkowym - mesothoracic ganglion, a w segmencie ostatnim - methoracic ganglion. Współdziałanie neuronów rytmu jest istotne dla generowania skoordynowanego ruchu odnóży. Grupy neuronów rytmu każdego z odnóży przesyłają pomiędzy sobą sygnały wzbudzenia i wstrzymania ruchu (skurczu grup mięśniowych). Sygnały te są stymulowane określonymi informacjami pochodzącymi z receptorów - jak np. maksymalne zgięcie w stawie kolanowym sygnalizowane jest naciśnięciem na określone receptory włosowe mieszczące się w pobliżu stawu. Pomijając te szczegóły biologiczne będące jeszcze przedmiotem badań, na Rys.4 pokazujemy ogólną strukturę wymiany sygnałów pomiędzy neuronami rytmu poszczególnych kończyn. Dla ustalenia uwagi na rysunku pokazane są, dla wybranej kończyny, omówione już poziomy niższe układu generowania ruchu. Sygnały wymieniane pomiędzy generatorami rytmu odnóży inicjują wzbudzenie lub zatrzymanie określonego ruchu kończyny. Jak widać informacje są przekazywane pomiędzy generatorami naprzeciwległych kończyn oraz kończyn sąsiednich położonych z tej samej strony ciała. Dla



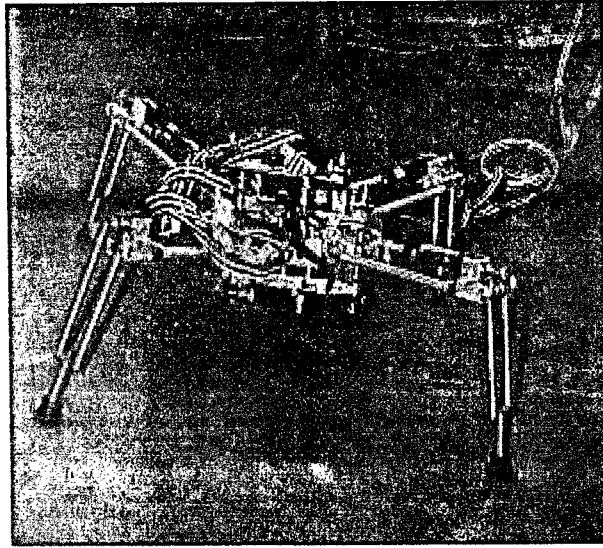
Rysunek 5: Lokalizacja wybranych funkcji mózgu i Generator Rytmu¹

wyczerpania tematu trzeba dodać, że hierarchicznie wyżej - nad zwojami piersiowymi, jest jeszcze zwój mózdzku (ang. cerebral ganglion). Jego rola jest podobna do roli mózgu kręgowców w sterowaniu ruchem - z tym, że jest to zagadnienie oczekujące zbadania.

4.2 Kręgowce

Eksperymenty prowadzone przez biologów wykazały, że sygnały wysyłane z pnia mózgu do Generatorów Chodu rdzenia kręgowego stymulują zmiany chodu np. przy omijaniu przeszkód. Sygnały tych zmian generowane są na podstawie informacji odebranych przez mózg a pochodzących z receptorów wysokiego poziomu - jak wzrok, zmysł równowagi (błądźnik), itd., oraz - wnioskowania. W przypadku chodu planowanego pod nadzorem mózgu receptory odbierają i przekazują do mózgu informacje o stanie otoczenia i organizmu. Informacje te są przetwarzane w Ośrodku ruchów przedniej części mózgu na tzw. „programy ruchu” (gdzie się ruszać), dalej stymulowane są regiony pnia mózgu odpowiedzialne za wzbudzenie Centralnego Generatora Chodu, który odpowiednio pobudza grupy mięśniowe - np. [7]. Generator Chodu jest odpowiedzialny za odpowiednią koordynację pobudzeń grup mięśniowych tak, aby ruchy nóg (czy ciała) były ruchami lokomocji.

Realizacja chodu rytmicznego odbywa się bez „interwencji” wyższych poziomów systemu sterującego, nie odgrywają wtedy istotnej roli receptory dostarczające informacje do mózgu. Inaczej mówiąc - o ile są wykorzystywane informacje dostarczane przez sprzężenia zwrotne - to dotyczą one tylko niższych poziomów systemu nerwowego i prostych receptorów. Potwierdziły to eksperymenty w których zaobserwowano, że przy zablokowaniu sygnałów wysyłanych z przedmózgowia współpracującego z receptorami wyższego poziomu zwierzęta są w stanie chodzić, natomiast nie omijają przeszkód (nie są w stanie

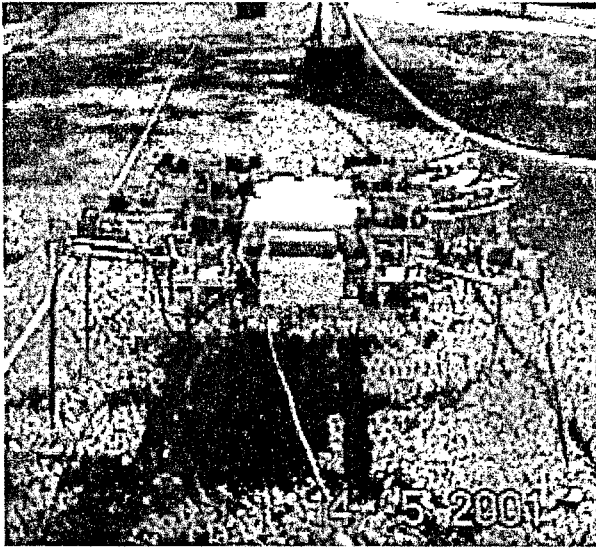


Rysunek 6: Czteronożna maszyna krocząca LAVA

zmienić wzorca chodu). Na Rys.5 pokazano szkic mózgu z zaznaczeniem niektórych jego wyspecjalizowanych regionów. Planowanie ruchu należy postrzegać nie jako wyłącznie wynik funkcjonowania określonych okolic mózgu lecz jako złożone, dynamiczne współdziałanie wielu regionów. Jedna z hipotez dotyczących planowania ruchu [1] mówi, że w regionie asocjacji senso-motorycznych powstaje ogólny plan ruchu (gdzie przenieść), a w mózdzek dba o jego właściwe wykonanie (jak przenieść). Planowanie przeplata się z wykonaniem, w ruchu planowanym pod nadzorem mózgu zaraz po decyzji "gdzie" podejmowanej przez ośrodek asocjacji senso-motorycznych, w mózdzku zapada decyzja "jak" - i ruch jest wykonywany. Cały czas, na podstawie informacji pochodzącej z receptorów, aktualizowany jest plan „gdzie”, mózdzek koryguje dyrektywy „jak” i tak dalej.

4.3 Maszyny kroczące

Liczba czujników w maszynach kroczących jest o wiele większa niż w przypadku manipulatorów. Najczęściej, w maszynach wielonożnych, każda noga ma 3 stopnie swobody co wystarcza do osiągnięcia przez stopę każdego punktu w przestrzeni roboczej (orientacja stopy jest już niesterowalna). Maszyna sześcionożna ma 18 stopni swobody, czyli 18 czujników wewnętrznych. Do tego dochodzą czujniki zewnętrzne dostarczające niezbędnych informacji o otoczeniu. Czujniki dotyku w końcach nóg są potrzebne przy chodzie adaptacyjnym do podłoża bowiem informują o kontakcie czy braku kontaktu stopy z podłożem. Takich czujników jest 6 (w maszynie sześcionożnej), o nachyleniu korpusu informują inklinometry. O ile urządzenie ma poruszać się autonomicznie w terenie, powinno mieć kompas oraz system pozycjonowania GPS albo DGPS. Czujniki zbliżeniowe albo czujniki odległości zainstalowane na korpusie potrzebne są przy realizacji ruchu z omijaniem przeszkód.



Rysunek 7: Sześcionożna maszyna GROVEN

Systemy sterujące sześcionożnych autonomicznych maszyn koczających GROVEN¹ (GROVEN I, GROVEN II, GROVEN III, GROVEN IV) o wadze 25-50kg [25, 26] - Rys.7, oraz maszyny czterożnej LAVA o wadze 1.2-2kg [24, 27] -Rys.6 zostały opracowane z udziałem autorki.

W maszynach GROVEN zainstalowano 5 ultradźwiękowych czujników zbliżeniowych. Omówiono lista czujników nie jest wyczerpana, bowiem można mówić o czujnikach sił w końcach nóg, czujnikach dotyku zamocowanych z przodu maszyny („wąsy”), wizji, laserowych czujnikach odległości, itd. W maszynach GROVEN liczba czujników wynosi 32 (18 czujników wewnętrznych położenia kątownego, 6 czujników dotyku w końcach nóg, inklinometry, kompas, GPS, 5 czujników zbliżeniowych) i informacje pochodzące z nich muszą być odpowiednio odebrane, przetworzone i wykorzystane w systemie sterującym. Liczba tych czujników jest oczywiście mniejsza niż liczba receptorów istot żywych ale nie jest mała jeśli odniesiemy się do autonomicznych systemów technicznych. Odpowiednia dekompozycja systemu sterowania i oraz dobór schematów przekazywania informacji są tu bardzo istotne. Rozwiązanie zagadnienia planowania chodu modyfikowanego w zależności od otoczenia (tzw. chodu swobodnego) jest warunkiem koniecznym, o ile rozważany jest ruch w naturalnym terenie. Problem ten nie jest banalny, trwają poszukiwania metod generowania chodu które byłyby szybkie, proste obliczeniowo i efektywne - gwarantujące lokomocję w trudnym terenie - jak np. górzysty rezerwat leśny.

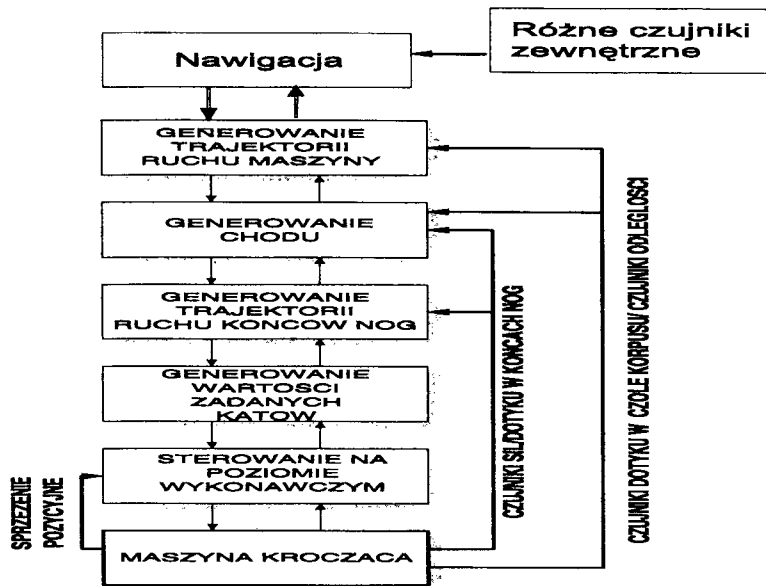
Projektanci maszyn koczających przy dekompozycji systemu sterowania często odwołują się do wzorców biologicznych. Powszechnie znana jest, pochodząca z połowy lat osiemdziesiątych, koncepcja rozwoju inteligencji zrealizowana w postaci sterowania behawioralnego według R.Brooks'a. Zastosowana ona została m.in w sześcionożnych maszynach koczających HERMES. W ostatnich kilku miesiącach duże wrażenie zrobiła maszyna sze-

ścionożna Scorpion o dużych możliwościach lokomocyjnych, gdzie wymiana sygnałów koordynujących ruch nóg jest taka jak w generatorze rytmu owadów [15] - Rys.4. Scorpion waży trochę mniej niż 10kG, do jego napędu zastosowano obrotowe silniki elektryczne z enkoderami. Modyfikacja ruchu pojedynczej nogi następuje podobnie jak ma to miejsce u owadów - gdzie informacje z odpowiednich receptorów odnóży inicjują określone zmiany ruchu kończyny. W Scorpionie monitorowany jest błąd położenia w stawie. Jeśli w czasie ruchu nogi do przodu w poszczególnym stopniu swobody wykryty zostanie duży błąd położenia, interpretowane jest to jako zablokowanie nogi. Powoduje to wygenerowanie sygnału wzbudzającego ruch nogi w tył i do góry. Sygnał ten jest aktywny przez pewien krótki czas a potem układ generuje chód rytmiczny podobnie jak ma to miejsce w przypadku owadów. W zależności od stanu ruchu danej nogi wzbudzane lub wstrzymywane są określone stany ruchu pozostałych nóg tak jak ma to miejsce przy synchronizacji ruchu odnóży owada. Ponadto podejmowana jest też decyzja o zmianie kierunku ruchu maszyny (czyli zmianie rodzaju chodu) o ile za dużo nóg zostanie zablokowanych. W maszynie sześcionożnej LAURON III (ok.23kG) zastosowano natomiast koordynację ruchów nóg, która nie wymaga centralnej synchronizacji co porównano do działania generatora ruchu pojedynczej nogi owada - Rys.1. Każda z nóg na swoją trajektorię nominalną, której realizacja zapewnia skoordynowany ruch nóg. O ile noga dotknie podłoża szybciej niż wymaga tego trajektorii nominalna, noga jest podnoszona na chwilę, zatrzymywana a potem stawiana na podłoże zgodnie z jej wzorcem ruchu. W przypadku kolizji nogi z przeszkodą realizowana jest trajektoria o specyficznym kształcie [11].

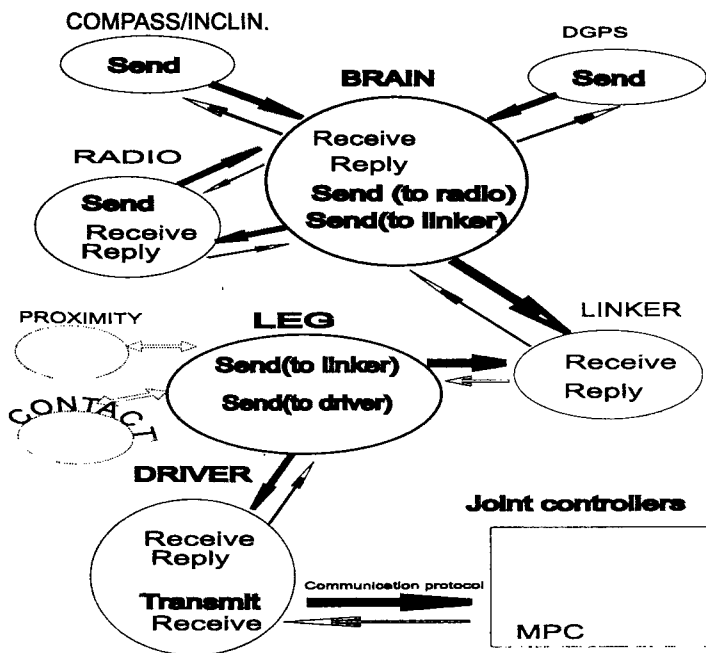
Nasza wiedza dotyczących złożonych biologicznych mechanizmów planowania ruchu i podejmowania decyzji o określonych ruchach jest jeszcze bardzo ograniczona i trudno ją wykorzystać do syntezy systemów sterowania. Niewiele jest też maszyn kroczących o autonomii działania, które bez interwencji operatora mogłyby w sposób celowy zmieniać trasę ruchu.

Przy projektowaniu sterowników maszyn GROVEN i LAVA nie nawiązywano ściśle do koncepcji biologicznych. Struktury wymiany informacji w systemie sterującym zostały dobrane z zastosowaniem metod opisu automatów o stanach skończonych. Zadania realizowane przez sterowniki maszyn GROVEN, podobnie jak innych wielonożnych maszyn kroczących, przedstawia się jako hierarchicznie współzależne - w tym sensie, że decyzje podejmowane na poziomie wyższym (jak np. zmiana kierunku ruchu korpusu) wpływają na działanie poziomu niższego (np. rodzaj chodu). Na Rys.8 pokazano taką strukturę.

Dekompozycja zadań systemu sterującego i ustalenie zasad współdziałania poszczególnych części jest bardzo istotna bowiem wiąże się ona nie tylko z efektywnością (szybkością) działania lecz też z łatwością wprowadzania modyfikacji czy też z łatwością rozbudowy systemu. W systemie sterującym maszyn GROVEN wyróżniono kilka procesów działających równolegle o różnych współzależnościach. Część nawigacyjna nazwana BRAIN (jest tu jednak pewna analogia do systemu biologicznego) odbiera informacje z procesów zbierających dane z czujników niezbędnych do nawigacji - systemu globalnego pozycjonowania - GPS, kompasu, inklinometrów. Ponadto proces współpracujący z nadajnikiem/odbiornikiem radiowym dostarcza do części nawigacyjnej współrzędne geograficzne punktów trasy ruchu odebrane drogą radiową od operatora stacji nadrzędnej i inne komendy (jak np. stop), zwrotnie wysyła przekazane z części nawigacyjnej - poprzez proces obsługi radia (nadajnik) aktualne geograficzne współrzędne maszyny i inne informacje o ruchu (jak np. położenie przeszkód zarejestrowanych przez czujniki zbliżeniowe). BRAIN nie tylko współpracuje z radiem i odbiera dane z wymienionych czujników lecz określa i wysyła do procesu sterowania ruchem maszyny nazwanego LEG - komendy kontynu-



Rysunek 8: Współzależność funkcji systemu sterującego



Rysunek 9: Współpraca procesów systemu sterującego

owania ruchu albo dane kolejnego punktu trasy ruchu o ile poprzedni został zrealizowany wraz z przetworzonymi danymi z odpowiednich czujników. Proces LEG przesyła do BRAIN informacje, iż realizacja danego odcinka trajektorii jest w toku, albo że dany odcinek został właśnie zrealizowany. Łącznie z tą informacją przesyłane są współrzędne maszyny wyrażone w umownym układzie lokalnym i dane o przeszkodach. Proces LEG „dysponuje” kilkunastoma chodami oraz procedurą omijania przeszkód. Wykorzystując te „narzędzia” ma on za zadanie zrealizować ruch do każdego podanego przez BRAIN punktu trasy. Czujniki zbliżeniowe dostarczają dane bezpośrednio do procesu LEG i na jego żądanie. Maszyna pod nadzorem LEG dąży do kolejnego punktu trasy omijając przeszkody w ramach zdefiniowanej szerokości ścieżki. Proces LEG generuje trajektorię ruchu korpusu i chody w zależności od tej trajektorii i warunków terenu (nachylenie, zmienność nachylenia terenu monitorowana przez inklinometry). Identyfikator wybranego przez LEG chodu przesyłany jest do procesu DRIVER który współpracuje bezpośrednio z poziomem wykonawczym systemu sterującego, monitoruje on stan systemu wykonawczego a po wykonaniu jednego kwantu chodu (jednej sekwencji ruchów nóg typowej dla danego chodu) czeka on na kolejne wytyczne procesu LEG. Procesy BRAIN i LEG wymieniają informacje wtedy kiedy jest to dla nich wygodne - np. BRAIN wysyła dane z czujników lub sygnał wstrzymania ruchu wtedy gdy je odebrał, LEG wysyła informacje o kontynuacji ruchu co pewien (definiowalny) odcinek drogi albo wtedy gdy następuje awaria lub ruch jest zablokowany przez przeszkody. Aby uzyskać czasową niezależność tych procesów i umożliwić dostarczenie informacji danemu z procesów wtedy, gdy on jej potrzebuje pomiędzy procesami BRAIN i LEG umieszczono proces łącznika nazwany LINK. LINK odbiera dane z BRAIN lub LEG na każde ich żądanie. Informacja przekazywana jest do procesu odbiorcy (BRAIN, LEG) tylko na jego żądanie. Na Rys.9 pokazano ogólny schemat systemu. Czarnymi strzałkami zaznaczono drogi przesyłania informacji od nadawcy do odbiorcy (przesyłanie z własnej inicjatywy), strzałki białe pokazują drogi potwierdzenia/odpowiedzi (tylko na żądanie lub jako potwierdzenie uzyskania informacji).

5 WNIOSKI

W artykule scharakteryzowane mechanizmy generowania ruchu zidentyfikowane w żywych organizmach oraz przedstawiono przykładowe realizacje systemów generowania ruchu w maszynach kroczących. Porównując omówione systemy techniczne ze zwierzętami można dopatrzeć się wielu analogii. Niejednokrotnie analogie te są wynikiem celowego działania projektantów - jak w maszynach LAURON czy Scorpion. W przypadku systemów sterujących maszyn GROVEN można też zauważyć podobieństwo dekompozycji zadań planowania ruchu do przyrody ożywionej. Aktualne tendencje rozwojowe zmierzają w kierunku tzw. robotyki innowacyjnej, która ma doprowadzić do powstawania systemów autonomicznych o dużych możliwościach lokomocyjnych co jest niezbędne w wielu praktycznych aplikacjach robotów. Innowacyjność oznacza tu nie tylko naśladowanie przyrody ożywionej lecz twórcze przejmowanie i modyfikowanie jej pozytywnych własności. Dotyczy to nie tylko koncepcji i realizacji systemów sterowania lecz też innowacyjnych konstrukcji mechanicznych. W części początkowej pracy mówiono o odwzorowaniu struktur kończyn zwierząt w maszynach kroczących, należy jednak zaznaczyć, że wierne odwzorowywanie tej kinematyki w realizacjach mechanicznych jest musi być rozwiązaniem najlepszym. Napędy i czujniki stosowane w technice nie mają przecież identycznych cech jak ich odpowiedniki biologiczne. Jednym z nowych rozwiązań pokazujących zalety podejścia innowacyjnego są maszyny sześcionożne o „nogach” przypominających koła poruszające się

chodami typowymi dla owadów. Maszyny te są szybkie, mają dużą mobilność i mogą też pływać. Innowacyjność w robotyce to też prace nad nowymi typami systemów napędowych czy też ulepszanie istniejących. Napędy typu sztuczne mięśnie są teraz tak dostępne jak i inne silniki. Sztuczne mięśnie zostały zastosowane w co najmniej kilku prototypach maszyn kroczących a teraz trwają prace nad syntezą ich sterowania.

Literatura

- [1] Allemand S., Blanc F., Burnod Y., Dufosse M., Lavayssiere L.: A Kinematic and Dynamic Robotic Control Based on Cerebro-Cerebellar Interaction Modelling. Neural Networks in Robotics. Ed. by Bekay G.A., Goldberg K.Y., Kluwer Academic Publishers, USA 1993
- [2] Arbib M.A.: The Methaphorical Brain. An Introduction to Cybernetics as Artificial Intelligence and Brain Theory. John Wiley, 1972
- [3] Bassler U.: The Walking- (and searching-) pattern Generator of Stick Insects, a Modular System Composed of Reflex Chains and Endogenous Oscillators. Biological Cybernetics, 69, 1993, 305-317
- [4] Bay J.S., Hemami H.: Modelling of a Neural Pattern Generatpr with Coupled Non-linear Oscillators. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol.BME-34, no.4, 1987, 297-306
- [5] Biewender A.A., Blickhan R.: Kangaroo Rat Locomotion: Design for Elastic Energy Storage or Accelleration. Journal of Experimental Biology, no.140, 1988, 243-255
- [6] Cohen A.H., Rossignol S., Grillner S.: Neural Control of Rhythmic Movements in Vertebrates. John Wiley and Sons. 1988
- [7] Collins J.J.: Gait Transitions. The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Arbib M.A. - edycja. The MIT Press. 1995.
- [8] Collins J.J., Steward I.N.: Coupled Nonlinear Oscillators and the Symmetries of Animal Gaits. Journal of Nonlinear Science. vol. 3, 1993, 349-392
- [9] Debao Zhou, Low K.H., Zielinska T.: An Efficient Force-Distribution Algorithm for Quadruped Walking Robot. Robotica, vol.18, 1999, 403-413
- [10] Gambaryan P.: How Mammals Run: Anatomical Adaptations. John Wiley ans Sons, 1974
- [11] Gassmann B., Scholl K.U., Berns K.: Behaviour control of LAURON III for walking in unstructured terrain. 4th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots. Ed. by K.Berns, R.Dillmann, Professional Eng. Publishing, London 2001, pp.651-658
- [12] Gray J.: Animal Locomotion. Weinfeld and Nickolson. 1964
- [13] Grillner S.: Control of Locomotion in Bipeds, Tetrapods and Fish. Handbook of Physiology. Brookhat J.M., Mountcastle V.B. - wydawcy. American Physiological Society. 1981, 1179-1236.

- [14] Kandel E.R., Schwartz J.H., Jessel T.M.: Principles of Neural Science. Elsevier. New York 1991
- [15] Kirchner F., Spenneberg D.: Omi-directional walking in multi-pod-robots based on feedback driven oscillators and local reflex mechanism. 4th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots. Ed. by K.Berns, R.Dillmann, Professional Eng. Publishing, London 2001, pp.643-650
- [16] Morecki A., Knapczyk J. - wydawcy. Basics of Robotics. CISM Courses and Lecture Notes no.402, Springer Verlag 1999. Morecki A., Knapczyk J., Galicki M., Wiliński A., Zielińska T.
- [17] Quinn R.D., Lin N.: Dynamics and Simulation of an Insect-like Walking Robot. Proc. of the 9th VPI and SU Symp. on Dynamics and Control of Large Structures. USA. 1993
- [18] Pearson K.G.: Central Programming and Reflex Control of Walking of Cocroach. Journal of Experimental Biology, no.56., 1972, 173-193
- [19] Taft R.: An Introduction; Eadward Muybridge and his work. W pracy: Muybridge E.: Human Figure in Motion. Dover Publication. New York. Preprint 1955
- [20] Willer B.E., Miranker W.L.: Neural Organization of the Locomotive Oscillator. Biologically Cybernetics, vol.68, 1993, pp.307-320
- [21] Wilson D.M.: Insect Walking. Annual Review of Etomology, 11, 103-122, 1966
- [22] Wilson D.M.: Stepping Patterns in Tarantula Spiders. Journal of Experimental Biology. no.47, 1967, 133-151
- [23] Wolovich W.A.: Robotics: Basic Analysis and Design. Holt, Rinehart and Winston, 1987
- [24] Zielińska T., Heng J.: Maszyna Czteronożna LAVA: Rozważania na Temat Mechaniki i Sterowania. Pomiar, Automatyka, Kontrola, nr 1, 2002, str.6-9
- [25] Zielińska T.: Synthesis of control system - gait implementation problems. 4th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots. Ed. by K.Berns, R.Dillmann, Professional Eng. Publishing, London 2001, pp.489-496
- [26] Zielinska T.: Efficiency Analysis in the Design of Walking Machines. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 3(38), 2000, pp.693-708
- [27] Zielinska T., Heng J., Goh T.: Design of a Mechanical and Control System of a Walking Machine. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 3(38), 2000, pp.709-725