



Teresa Zielińska

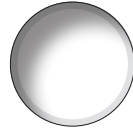
Maszyny kroczące

 PWN



Maszyny kroczące

*Eli i Cezaremu,
którzy dzielą moje hobby*



Teresa Zielińska

Maszyny kroczące

**Podstawy,
projektowanie,
sterowanie
i wzorce biologiczne**

Wydanie drugie
uzupełnione

 **PWN**

Okladkę i strony tytułowe projektował
Przemysław Spiechowski

Zdjęcie na okładce
Teresa Zielińska

Opiniodawcy
prof. Krzysztof Kozłowski
prof. Krzysztof Tchoń

Redaktor **Anna Głazewska-Czuryło**

Redaktor techniczny **Jolanta Cibor**

Łamanie **FixPoint**

Tytuł dotowany przez Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa (MEL)
Politechniki Warszawskiej

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo
Więcej na www.legalnakultura.pl
Polska Izba Książki

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2003, 2014

ISBN 978-83-01-17815-4

Wydanie II uzupełnione
Warszawa 2014

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
tel. 22 69 54 321; faks 22 69 54 288
infolinia 801 33 33 88
e-mail: pwn@pwn.com.pl; www.pwn.pl
Druk i oprawa: OSDW Azymut Sp. z o.o.

Spis treści

Przedmowa	7
Wykaz ważniejszych oznaczeń	9
1 Szkic historyczny i podstawowe wiadomości	11
1.1. Historia	11
1.2. Klasyfikacja maszyn kroczących	16
1.3. Terminologia	19
1.3.1. Chody	19
1.3.2. Stabilność	26
1.4. Przykład wstępnej analizy chodu	30
2 System mechaniczny	36
2.1. Wprowadzenie	36
2.1.1. Cel projektowania	36
2.1.2. Części składowe systemu	37
2.2. Geometria urządzenia	38
2.2.1. Nogi	38
2.2.2. Stopy	45
2.3. Wpływ geometrycznych proporcji i masy urządzenia na wydatki energetyczne chodu	48
2.4. Obliczanie mocy silników	53
2.4.1. Wiadomości ogólne	53
2.4.2. Obliczanie mocy silników maszyn kroczących	59
3 System sterujący i czujniki	62
3.1. Wprowadzenie	62
3.2. Sprzężenie zwrotne	63
3.3. Profil prędkości silnika	67
3.4. Dobór nastaw regulatora	70
3.5. Sprzęt i narzędzia programowe	72
3.6. Czujniki	75
3.7. Struktura oprogramowania	80

4	Planowanie ruchu	85
4.1.	Kinematyka nogi	85
4.1.1.	Wprowadzenie	85
4.1.2.	Zadanie proste kinematyki	87
4.1.3.	Zadanie odwrotne kinematyki	88
4.2.	Trajektoria ruchu końca nogi	90
4.2.1.	Rozważania ogólne	90
4.2.2.	Trajektoria ruchu końca nogi przy zmianach kierunku ruchu	95
4.3.	Trajektoria ruchu maszyny	100
4.4.	Synteza chodu	103
5	Adaptacja ruchu do właściwości podłoża i warunków otoczenia	109
5.1.	Wprowadzenie	109
5.2.	Sterowanie pozycyjno-siłowe	111
5.3.	Odształcenie podłoża pod wpływem siły	113
5.4.	Problem rozkładu sił reakcji	118
5.4.1.	Wprowadzenie	118
5.4.2.	Układy współrzędnych i oznaczenia	119
5.4.3.	Warunki równowagi sił i momentów sił	120
5.4.4.	Modele uproszczone	122
5.4.5.	Przykład	125
6	Generowanie chodu — wzorce biologiczne	133
6.1.	Wprowadzenie	133
6.2.	Generator chodu	133
6.2.1.	Struktura biologiczna i modele matematyczne	133
6.2.2.	Generator chodu owadów	138
6.2.3.	Generator chodu ssaków	145
6.3.	Mechanizmy zachowań	146
6.4.	Rodzaje zachowań	149
7	Roboty dwunożne	152
7.1.	Początki robotów humanoidalnych	152
7.2.	Prawo Punktu Zerowego Momentu	156
7.3.	Wykorzystanie Prawa Punktu Zerowego Momentu do syntezy chodu	158
7.4.	Zastosowanie Prawa Punktu Zerowego Momentu do korekty postury w czasie ruchu	162
7.5.	Cechy chodu człowieka	162
7.6.	Uproszczone modele chodu	165
7.7.	Synteza ruchu robota dwunożnego	169
	Podsumowanie	172
	Literatura	174
	Skorowidz	182

Przedmowa

*Dwa zaś posągi w kształcie dwóch dziewic zrobione
Krok niepewny swym pewnym krokiem podierały:
I ruch, i głos, i rozum bogi im nadały
I przemysł, nacudniejsze dzieła robić zdolny.
Idą, pilnie zważając na krok pana wolny.*

Homer, *Iliada*, księga XVIII, przekład K.F. Dmochowski

W ostatnich latach postęp w wielu dziedzinach życia był zdeterminowany i stymulowany wprowadzeniem komputerów osobistych. Według wielu prognoz najbliższa przyszłość będzie okresem szybkiego rozwoju robotów osobistych — urządzeń, które będą pomagać człowiekowi w usługach, opiece nad dziećmi, ludźmi starszymi, osobami niepełnosprawnymi. Nie są odosobnione prace nad robotami, które mają, na podstawie mimiki twarzy i gestykulacji, rozpoznawać emocje człowieka i odpowiednio na nie reagować. Pojawiły się też prace eksperymentalne, w których badana jest możliwość sterowania ruchami robota przez impulsy elektryczne mózgu, czyli możliwość sterowania poprzez myśl. Prace takie wydają się fantazją, ale dzięki fantazji powstają realia. Idea robota — pracownika — powstała w sztuce Karela Čapka w 1921 roku (*RUR*). W latach czterdziestych dwudziestego wieku znani pisarze fantastyki naukowej Issac Asimov i John Cambell opisali inteligentne roboty wykonujące rozkazy człowieka. Roboty te podlegały trzem prawom:

- robot nie może wystąpić przeciwko człowiekowi oraz poprzez brak działania (nawet jeżeli człowiek nie wydał rozkazu jego rozpoczęcia) nie może dopuścić, aby człowiekowi stała się jakakolwiek krzywda;
- robot musi wykonywać wszystkie polecenia człowieka z wyjątkiem tych, które są niezgodne z pierwszym prawem robotyki;
- robot musi chronić swoje istnienie dopóty, dopóki nie stanie się to sprzeczne z pierwszym i drugim prawem.

Wiele lat później Joseph Engelberger uważany za jednego z ojców robotyki przemysłowej stwierdził, że fantastyka naukowa, a w szczególności prace Asimova stymulowały i kierunkowały jego badania.

Nowoczesne roboty to nie tylko roboty przemysłowe, lecz także telemanipulatory, roboty mobilne, roboty kroczące, roboty pływające czy też roboty latające. To co było fantazją w książkach, filmach, i to nawet nie tak dawno, szybko staje się rzeczywistością.

Nasza wiedza i aktualne możliwości techniczne pozwalają na prowadzenie coraz bardziej zaawansowanych prac. Inteligencja robotów — autonomia działania, czyli inaczej zdolność radzenia sobie w nieprzewidzianych sytuacjach, jest coraz większa. Projektanci robotów coraz szerzej korzystają z wzorców przyrody ożywionej, gdzie posiadanie odpowiednich receptorów (czujników) i umiejętność właściwego reagowania na bodźce umożliwia przetrwanie oraz działanie prowadzące do osiągnięcia celu. Konieczność zrozumienia mechanizmów działań istot żywych i przełożenia ich na język techniczny jednoczy badania inżynierów i biologów.

Niniejsza książka poświęcona robotom (maszynom) krocącym zawiera wiedzę podstawową, której poznanie jest niezbędne, aby moc później pogłębiać ją samodzielnie czy też próbować zbudować maszynę krocącą. W literaturze światowej nie ma wielu prac z tej dziedziny; w kilku znanych książkach autorzy skupili się raczej na konkretnych projektach, a z dość licznych prac doktorskich trudno nauczyć się podstaw. W tej publikacji można też znaleźć informacje na temat metod generowania chodów przez istoty żywe. Staralam się zamieścić obszerną listę publikacji z omawianej dziedziny, wybierając prace, które wydawały mi się istotne dla rozwoju wiedzy czy też dalszych studiów. Nie oznacza to jednak, że lista jest wyczerpująca — korzystałam z materiałów, które udało mi się zebrać, niektóre z nich przysłali sami autorzy.

Mam nadzieję, że niniejsza praca przyczyni się do wzrostu zainteresowania maszynami krocącymi.

Wykaz ważniejszych oznaczeń

β — współczynnik obciążenia (dla chodu)

c_i — $\cos \alpha_i$

c_{ij} — $\cos(\alpha_i + \alpha_j)$

$\mathbf{C}_l(\theta, \dot{\theta})$ — wektor sił odśrodkowych i Coriolisa

ϵ — oporność właściwa

\mathbf{F}_l — siły wywierane przez koniec nogi

\mathbf{F}_e — siły zewnętrzne

$\mathbf{G}_l(\theta)$ — wektor sił grawitacyjnych

g — stała grawitacji

\mathbf{I}_m — macierz bezwładności względem osi układu związanego ze środkiem ciężkości

m — masa

\check{m} — masa bezwymiarowa (znormalizowana)

$\mathbf{M}_l(\theta)$ — macierz bezwładności

\mathbf{M}_e — zewnętrzne momenty sił działających na układ

p_x, p_y, p_z — współrzędne końca nogi

s_i — $\sin \alpha_i$

s_{ij} — $\sin(\alpha_i + \alpha_j)$

${}^j_i \mathbf{T}$ — macierz transformacji z układu i do układu j

Γ_l — wektor momentów napędowych w stawach nogi

X_a, Y_a, Z_a — współrzędne środka masy (ciężkości)

1

Szkic historyczny i podstawowe wiadomości

1.1. Historia

Robot definiowany jest jako *urządzenie techniczne wykonujące funkcje manipulacyjne lub lokomocyjne, charakteryzujące się pewną (na razie bardzo ograniczoną) inteligencją, tzn. autonomią działania* [98].

Inna definicja robota mówi, że jest to *programowalne urządzenie, które wykorzystuje informacje pochodzące z jego czujników do przemieszczania się w całości lub do przemieszczania swoich efektorów (końcówek, np. ramion, nóg), aby zrealizować jakiś cel (np. manipulowanie obiektami fizycznymi)* [151].

Podana definicja dotyczy też maszyny kroczącej jako szczególnego rodzaju robota. W definicji precyzyjnej podkreślamy specyficzne cechy tego urządzenia.

Maszyna krocząca, lub inaczej **robot kroczący**, jest definiowana jako *urządzenie techniczne, które przemieszcza się podobnie jak większość zwierząt, czyli używając kończyn* [98]. Lokomocja maszyn kroczących jest zdyskretyzowana, jako że kontakt z podłożem ograniczony jest do szeregu odseparowanych śladów (nie jest ścieżką ciągłą, jaką zostawiają pojazdy kołowe) [98].

Wiemy powszechnie, że wynalazek koła był krokiem milowym w rozwoju środków lokomocji. Fakty historyczne pokazują też, że człowiek od wielu tysięcy lat był zafascynowany urządzeniami mechanicznymi, które naśladują istoty żywe. Na przykład, archeolodzy odnaleźli mechanicznego „psa”, którego wiek określono na około 2 tysiące lat przed naszą erą [151]. Według ksiąg *Iliady* Homera bóg Hefajstos próbował budować różne chodzące urządzenia. W starych legendach hinduskich można znaleźć opisy mechanicznych słoni. W 231 roku naszej ery pod patronatem urzędnika chińskiego Zhu Ge-Lianga powstała drewniana maszyna krocząca MU NIU 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 przetransportować masę 200–250 kg, pokonując około 10 kilometrów dziennie na górzystych ścieżkach. Urządzenie to działało na zasadzie tacek — pchane przemieszczało się do przodu, a dzięki skomplikowanemu systemowi drewnianych, zębatych kół przestawiało nogi tak

jak krowa czy koń przy powolnym chodzie. Szkice projektowe tego urządzenia zostały odszukane w dwudziestym wieku przez inżyniera (Wang Jian) z instytutu naukowego w Xinjinag w Chinach, który zbudował kopię MU NIU LIU MA [131]. W ciągu wieków naszej ery powstało wiele projektów oraz konkretnych urządzeń naśladujących lokomocję dyskretną [139], dopiero jednak narodziny i rozwój komputerów pozwoliły budować urządzenia programowalne. Wzrost możliwości obliczeniowych komputerów, ich miniaturyzacja oraz powstawanie nowych i coraz lepszych typów czujników stymuluje badania nad maszynami kroczącymi. Przegląd dokonań w tym zakresie można znaleźć w literaturze [98, 139].

Obserwacja chodów zwierząt ma również długą tradycję. Arystoteles, opisując chód konia w dziele *De incessu animalium*, podkreślił m.in., że nogi tylne poruszają się po przekątnej w stosunku do nóg przednich, to znaczy po nodze przedniej prawej zwierzę przenosi nogę lewą tylną, potem lewą przednią a następnie prawą tylną. Obserwacja ta była prawidłowa. Dalej jednak Arystoteles stwierdził, że galop jest niemożliwy, bowiem jednoczesny transfer nóg przednich czy tylnych spowoduje przewrócenie się zwierzęcia [28]. Na początku XVII wieku Galileo Galilei posługiwał się wykonanym przez siebie mikroskopem, obserwując ruch owadów. Stwierdził on, że mogą one pokonać siłę grawitacji, gdyż chodząc po suficie, wspomagają się miniaturowymi przyssawkami lub chwytakami ulokowanymi w końcach nóg. Giovanni Borelli w książce *De motu animalium (O ruchu zwierząt)*, opublikowanej w roku 1680, stwierdził, że owady poruszają się chodem trójpodporowym, przenosząc trójki nóg: prawą środkową, lewą przednią i tylną oraz lewą środkową i prawą przednią i tylną. Jego konkluzja nie pochodziła z obserwacji, lecz z rozważań dotyczących stabilności postury. Nie mylił się, chód trójpodporowy jest najczęściej obserwowanym chodem owadów.

Według historii narodziny nowoczesnych metod analizy chodów były związane z koniem. Mianowicie w 1870 roku Leyland Stanford, zarządca stanu Kalifornia, założył się ze swoim znajomym, 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 Muybridge. 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 Muybridge, ulepszając swój pomysł robienia zdjęć w krótkich odstępach czasu, stał się znanym prekursorem wynalazku kamery i powstania kina [138].

Z późniejszych prac warto wymienić, prowadzone w latach sześćdziesiątych XX wieku, badania brytyjskiego uczonego J. Graya poświęcone analizie mechanicznej ruchu zwierząt [57]. Opracował on m.in. szkice konfiguracji układu kostnego czworonogów dla różnych pozycji ciała i wyznaczył położenia środków mas w tych pozycjach.

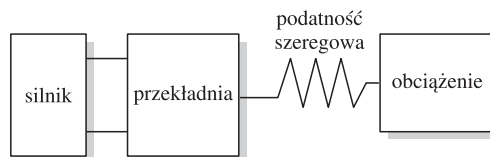
Jak widać, już od dawna człowiek był zafascynowany lokomocją dyskretną i jej potencjalnymi zaletami. Nie trzeba dla niej utwardzonych dróg, przeszkody mogą być nie tylko omijane, lecz przekraczane czy przeskakiwane. Poprzez wielkość stóp można regulować nacisk na podłoże, stąd też możliwości poruszania się po terenie grząskim, śliskim.

Zwierzęta wykazują przy tym dużą sprawność energetyczną lokomocji [139]. Niestety, maszyny kroczące nie są jeszcze tak doskonałe. Urządzenia te mogą być jednak w przyszłości wykorzystywane do transportu po bezdrożach, mogą też pełnić rolę robotów usługowych, mogą być wykorzystywane w eksploracji, np. innych planet, czy środowiska niebezpiecznego dla człowieka.

Analizując ostatnie dokonania w dziedzinie maszyn kroczących, nie można pominąć japońskiego pieska AIBO firmy SONY, czy dwunożnego robota HONDA. Nie można też pominąć badań prowadzonych w Stanach Zjednoczonych w Massachusetts Institute of Technology (MIT) nad biegającymi i skaczącymi maszynami dwunożnymi i maszynami wielonożnymi. Warto zwrócić uwagę na stosowane tu specyficzne metody opisu ruchu, które dają dobre rezultaty w implementacji. Badania w MIT nad maszynami biegającymi i skaczącymi zostały zapoczątkowane przez M. Raiberta. W 1980 roku pokazał on jednonożnego robota skaczącego, a potem robota dwunożnego i czteronożne maszyny biegające odbijające się parami nóg od podłoża. Do syntezy ruchu wykorzystano model odwróconego wahadła fizycznego, postura w biegu była stabilna, a reguły sterowania nie były skomplikowane [95, 121, 122]. Takie urządzenia nie mogły utrzymywać stabilnej postury przy zatrzymywaniu się oraz musiały ruszać z określonej pozycji. Stosowano tutaj napędy pneumatyczne, które dostarczały dużej mocy, nieosiągalnej w przypadku silników elektrycznych. Napędy pneumatyczne mają jednak dużo wad, jak mała sprawność czy potrzeba stosowania dużego zasilacza.

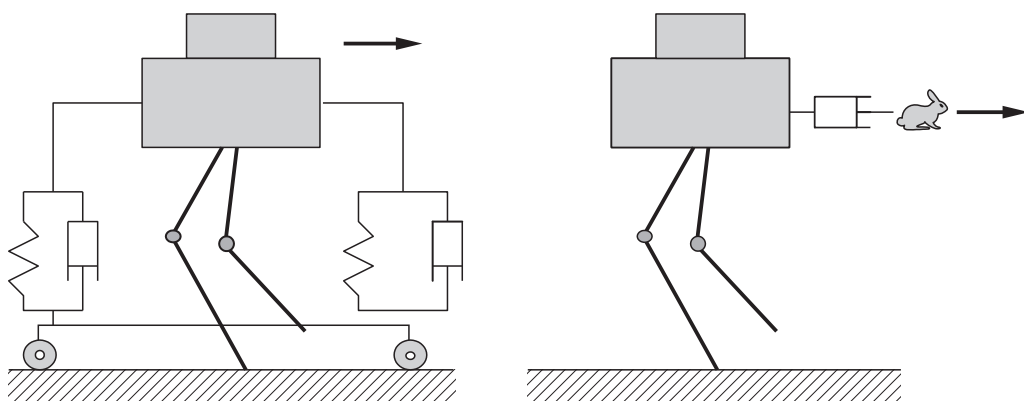
W ostatnich latach zespół z MIT (MIT Leg Lab) zbudował kilka maszyn kroczących (Spring Turkey, Spring Flamingo, Troody, M2, M4/2) poruszających się dynamicznie. Zastosowano w nich silniki elektryczne z podatnością (elastycznością) szeregową (ang. *series-elastic actuator*) [116, 115, 125]. Rozwiązanie to polega na zastosowaniu sprężyny między przekładniami głowicy redukcyjnej silnika elektrycznego prądu stałego a obciążeniem (rys. 1.1). Steruje się siłą wywieraną przez sprężynę, chociaż sprzężenie zwrotne jest typu pozycyjnego. Wykorzystuje się fakt, że wywierana siła jest proporcjonalna do iloczynu sztywności sprężyny i przemieszczenia (od położenia równowagi). Zaletą jest zdolność absorpcji uderzenia oraz podatność, która jest oczekiwana w chodzie. Zespół opracował też własną metodologię sterowania nazwaną VMC — sterowanie modelami wirtualnymi (ang. *Virtual Model Control*). Polega ona na uwzględnieniu uproszczonego modelu mechaniki robota dobrze oddającego właściwości chodu.

VMC jest w zasadzie językiem opisującym wspólne oddziaływanie wielu sił w układzie mechanicznym. Symulacja zachowania wirtualnych składników mechanicznych jest potem przekładana na rzeczywiste momenty czy siły sterujące.



Rys. 1.1. Schemat blokowy napędu z podatnością szeregową

Idea ta nie jest nowatorska, m.in. M. Raibert sterował czteronożnymi maszynami biegającymi, stosując model dwu wirtualnych nóg wychodzących z centrum korpusu — każda noga odpowiadała parze lub czterem nogom rzeczywistym [122, 123]. Systemy VMC buduje się, stosując modele mas, sprężyn i tłumików, co było też zaproponowane i stosowane przez innych badaczy [64, 76, 127]. W przypadku badań zespołu MIT, te proste elementy mogą być zastosowane we wszelkich konfiguracjach — chodzi o to, aby za ich pomocą oddać dobrze ruch, jaki będzie potem realizowany przez prototyp. Parametry sprężyn, tłumików, działające siły i parametry chodu są dobierane na podstawie analizy zachowania modelu VMC. Należy zwrócić uwagę, że nie modeluje się tu dynamiki rzeczywistego robota, lecz buduje się robota wirtualnego tak, aby się on odpowiednio poruszał. Potem model ten przekłada się na rzeczywistą konstrukcję mechaniczną.



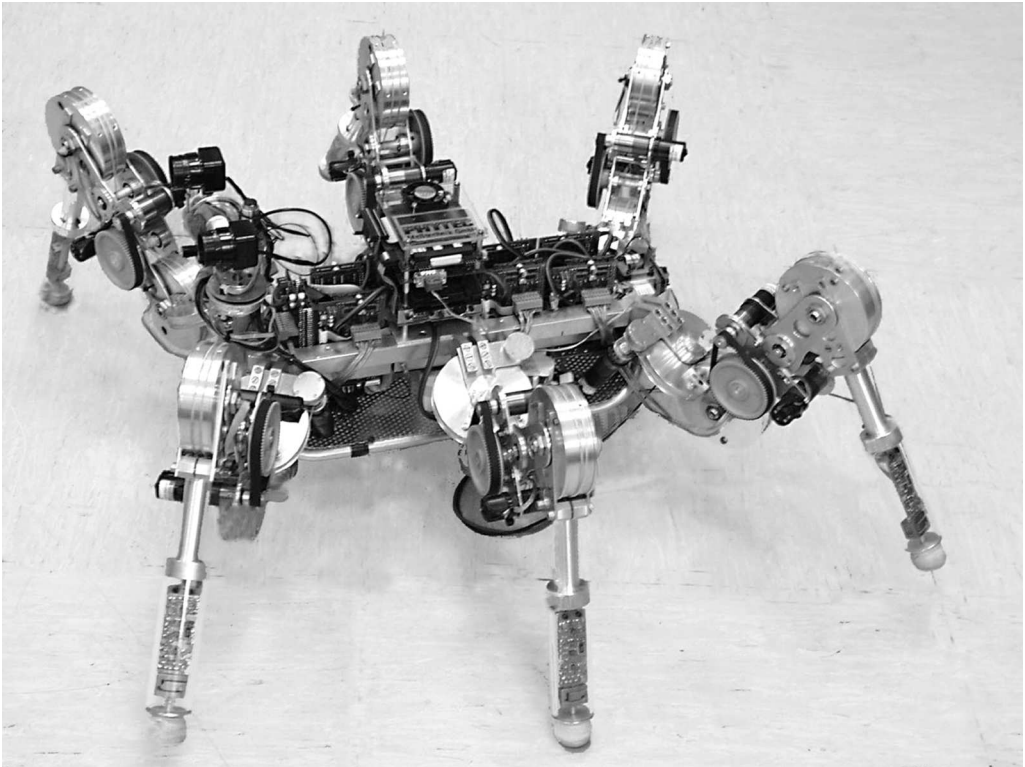
Rys. 1.2. Sprężysty Indyk (Spring Turkey) i wirtualny model mechanizmu kroczenia

Badacze podkreślają, że trudność wygenerowania chodu dynamicznego istniejącego robota oznacza głównie nie brak wiedzy z zakresu sterowania, lecz to, że robot został źle zaprojektowany. Przy stosowaniu metody VMC mechanika jest tak projektowana, aby istniała analogia między zbudowanym modelem wirtualnym a prototypem — nie oznacza to wcale identyczności. Prototyp ma być taki, aby zaplanowany ruch był możliwy. Dla przykładu odwołamy się tutaj do modelu Spring Turkey (Sprężysty Indyk). Rzeczywisty prototyp to robot dwunożny o małym prostokątnym korpusie w kształcie pudełka i dwu dosyć długich nogach. Cztery silniki napędzające stawy biodrowe i kolanowe są umieszczone w korpusie; stosuje się tu silniki z elastycznością szeregową, nogi nie są ciężkie w porównaniu z korpusem. Model wirtualny maszyny obejmuje system sprężyn i tłumików podpartych na „balkoniku” z kółkami (rys. 1.2). W fazie dwupodporowej ruch postępowy wymusza się przez „królika” połączonego z modelem poprzez tłumik. „Królik” obrazuje siłę „ciągnącą” maszynę kroczącą. Jest on stymulatorem ruchu, analogicznie do sztucznego królika stosowanego na torze treningu psów.

W rzeczywistej realizacji systemu sterującego w języku VMC podane są rozkazy, które przekładane są na działania systemu sterującego. Lista rozkazów jest następująca:

- utrzymuj stałą wysokość i przechylenie przód/tył,
- przejście z fazy dwupodporowej do jednopodporowej ma nastąpić wtedy, gdy określony punkt korpusu znajdzie się prawie pionowo nad przednią stopą podporową (trzeba przenieść nogę znajdującą się w tyle do przodu),
- przejście z fazy jednopodporowej do dwupodporowej ma nastąpić wtedy, gdy korpus znacząco przesunął się do przodu w stosunku do podpierającej stopy (trzeba korpus „podeprzeć z przodu”, inaczej się przewróci),
- staraj się tak przenosić nogę niepodporową, aby stopa była postawiona z zachowaniem nominalnej długości kroku,
- w czasie fazy dwupodporowej staraj się korygować zaburzenia prędkości ruchu.

Rozkazy wydają się nieskomplikowane. Można zauważyć analogie do specyfiki ruchu organizmów żywych, które chodzą nie dlatego, iż potrafią obliczyć wartości sygnałów sterujących ruchem grup mięśniowych, lecz dlatego, że mają odpowiednie receptory,



Rys. 1.3. Sześcionożna maszyna LAURON III