

Maszyny kroczące: przeszłość — teraźniejszość — przyszłość

Streszczenie: Omawia się maszyny kroczące skonstruowane na przestrzeni wieków. Do okresu teraźniejszości zalicza się modele maszyn zbudowane w okresie ostatnich 35 lat. Wybrane ich przykłady zostały pokrótce opisane. Pełna lista modeli zawiera ponad 80 maszyn. Na podstawie ostatnich informacji o programach badawczych na lata 1997–2003 podaje się główne kierunki badań i zamierzeń technicznych.

Walking machines — past — present — future

Abstract: The paper describes selected walking machines designed in centuries. Present period deals with the machines constructed in the last 35 years. Some selected examples are given. The full list contains about 80 models. Based on the last informations given in the research programmes for 1997-2000 the main topics are listed.

1. WPROWADZENIE — PIERWSZY OKRES ROZWOJU MASZYN KROCZĄCYCH (PRZESZŁOŚĆ)

Maszyną kroczącą nazywamy urządzenie techniczne przeznaczone do realizacji wybranych funkcji podobnych do funkcji lokomocyjnych człowieka, zwierząt i owadów. Każda lokomocja maszyny kroczącej jest typu dyskretnego i może być realizowana przy użyciu jednej, dwóch, trzech, czterech, sześciu, ośmiu i większej ilości nóg jako chód, bieg i skok po twardym podłożu [1,2,3].

Historię wykorzystywania nóg przez człowieka do transportu lądowego można podzielić na kilka okresów, a mianowicie: transport, który zależał od możliwości samego człowieka, oraz okres wykorzystywania zwierząt. Wynalazek koła był niewątpliwie jednym z największych wynalazków w historii rozwoju transportu. Wynalazek silnika, budowa dróg uczyniły transport kołowy praktycznie niezastąpionym do dnia dzisiejszego.

Historycznie, pierwszą maszyną kroczącą była skonstruowana w trzecim stuleciu naszej ery maszyna chińska. W roku 231 sławny dowódca chiński Zhu Ge-Liang wykorzystywał nożne maszyny kroczące, wykonane z drewna, do transportu żywności (latająca krowa). Dopiero w latach 1821–1884 P.L. Czembyszew zaprojektował mechanizm kroczący i wykonał jego model. W roku 1893 L.A. Rygg uzyskał patent No 491, 927 na model konia mechanicznego (Mechanical Horse). W roku 1913 Reichtolsheim uzyskał patent DRD 554354 (Der Schreitwagen der Freiherrn v. Reichtolsheim) na tzw. pojazd kroczący, (walking vehicle). Były to niewątpliwie milowe kroki na drodze rozwoju kroczących maszyn i pojazdów. Brak jest informacji na temat realizacji tych patentów. Można umownie przyjąć, że pierwszy okres rozwoju trwał do roku 1913. Brak natomiast informacji o okresie 1914–1950.

2. DRUGI OKRES ROZWOJU MASZYN KROCZĄCYCH (TERAŹNIEJSZOŚĆ)

W połowie lat pięćdziesiątych różne zespoły badawcze zaczęły systematyczne studia maszyn kroczących, aby dekadę później przystąpić do ich projektowania i budowy w warunkach laboratoryjnych [4]. Tak więc terażniejszość rozpoczyna się ponad 40 lat temu (badania), a realizacja modeli laboratoryjnych ponad 30 lat temu. Jak już wspomniano, do chwili obecnej skonstruowano ponad 80 modeli laboratoryjnych w 14 krajach, a zaledwie kilka maszyn zastosowano w praktyce. Analizy przeprowadzone przez Bekkera (1960, 1969) pokazują, że transport kołowy w warunkach trudnego terenu wymaga stosowania dużej mocy około 11kW/tonę) oraz powoduje duże zniszczenie terenu. W tym przypadku transport przy użyciu pojazdów na nogach wymaga 5,14kW/tonę.

Ponadto prędkość transportu kołowego jest w tych warunkach rzędu 4,8 – 6km na godzinę, podczas gdy zwierzęta mogą osiągać prędkość rzędu 56,3km/godz w takich samych warunkach. Komfort w przypadku lokomocji nożnej jest również zaletą tego typu lokomocji. Zalety transportu nożnego w trudnym terenie można ująć następująco [4]:

1. Wyższa prędkość;
2. Oszczędność energii;
3. Większa mobilność;
4. Lepsza izolacja od nieregularności terenu;
5. Mniejsze zanieczyszczenie środowiska.

Ponieważ ponad 50% powierzchni ziemi jest niedostępne dla transportu kołowego (Anon, 1967), korzyści ze stosowania maszyn kroczących w transporcie, rolnictwie, handlu, wojskowości są tutaj oczywiste.

Jak już wspomniano, w połowie lat pięćdziesiątych wiele zespołów rozpoczęło systematyczne studia i budowę modeli maszyn kroczących.

Ważnymi przykładami zbudowanych modeli maszyn są modele: Shigley, 1960; McGhee, 1966; Vukobratović, 1972; Kato i Tsuiki, 1972; Peternella, 1972; Ignatiev, 1974; Schneider, 1974; Okhotsimsky, 1977, McGhee i Iswanaki, 1979, Hirose i Umetani, 1980; Kessis, 1981; Raibert i Sutherland, 1983, Waldron i McGhee, 1986; Morecki, 1985; Pfeiffer, 1995 [3,4].

3. PRÓBA SYSTEMATYZACJI I OPIS WYBRANYCH MASZYN

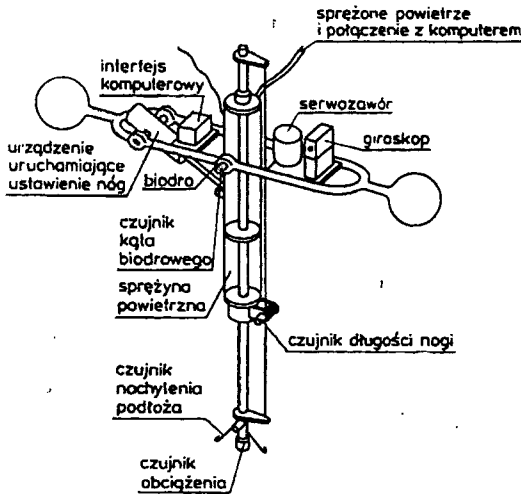
Podzielimy maszyny kroczące wg liczby nóg oraz przytoczymy wybrane przykłady realizacji, które naszym zdaniem odegrały istotną rolę w ich dalszym rozwoju. Wyróżniamy w tym podziale następujące klasy maszyn:

- 3.1 Maszyny jednożadne – pasywne lub skaczące;
- 3.2 Maszyny dwunożne – kroczące i biegające;
- 3.3 Maszyny z trzema nogami;
- 3.4 Maszyny czteronożne – kroczące i biegające;
- 3.5 Maszyny sześćonożne;
- 3.6 Maszyny ośmionożne;
- 3.7 Inne, np. wspinające się.

Opiszemy pokrótce wybrane przykłady maszyn należących do poszczególnych klas.

3.1. Maszyny jednoonożne – skaczące

W 1982 roku w Uniwersytecie Stanowym w Ohio (Vuhnout, 1982) zbudowano jedną z pierwszych maszyn na jednej nodze — Monopod. Monopod był czteroczęściowym mechanizmem o wysokości 508 mm zamontowanym na platformie trójkątnego pojazdu. Podczas jazdy noga popychała pojazd naprzód podczas fazy kontaktu. Następnie noga była unoszona przez skrócenie członu napędzającego. Do napędu stosowano silnik typu DC i mechanizm śrubowy. Do sterowania używano początkowo PDP11/17 a następnie pokładowy mikrokomputer (Intel 8086).



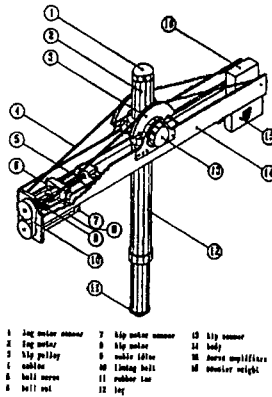
Rys. 1. Jednoonożna maszyna skacząca „kangur” w płaszczyźnie strzałkowej (Uniwersytet Carnegie Mellon) [6,7].

Kolejną maszyną jednoonożną, tym razem typu skaczącego, był monopod zbudowany w 1983 roku przez Raiberta w Uniwersytecie Cornege–Mellon (układ statycznie niestabilny).

Maszyna posiadała jedną nogę i wykonywała ruch skaczący w celu utrzymania równowagi. Posiadała trzy stopnie swobody. Ruch pionowy był realizowany przez siłownik hydrauliczny zainstalowany na pokładzie maszyny poprzez przegub Cardana. Kontrola ruchu lateralnego odbywała się za pomocą dwóch cylindrów hydraulicznych. Maszyna była sterowana z zewnątrz. Na Rys. 1 pokazano maszynę, która poruszała się skokami w przestrzeni trójwymiarowej. W kolejnych latach Raibert i współpracownicy zbudowali dwunożne i czteroonożne maszyny skaczące i biegające (Raibert, 1986) [5,6,7].

Podczas obrad Sympozjum „Recent Trends in Robot Locomotion” zaprezentowano tzw. ARL Monoped (Rys. 2). Staw biodrowy oraz noga są napędzane poprzez dwa silniki elektryczne. Maszyna posiada 5 stopni swobody w ruchu płaskim. Do sterowania wykorzystano zmodyfikowane sterowniki Raiberta. Przeprowadzono badania własności kinematycznych i energetycznych, własności dynamicznych, stabilności i krzepkości maszyny [8,37].

- Two Electrically Actuated DOF's (Hip, Leg)
- Five Planar DOF's



Rys. 2. ARL Monopod [8].

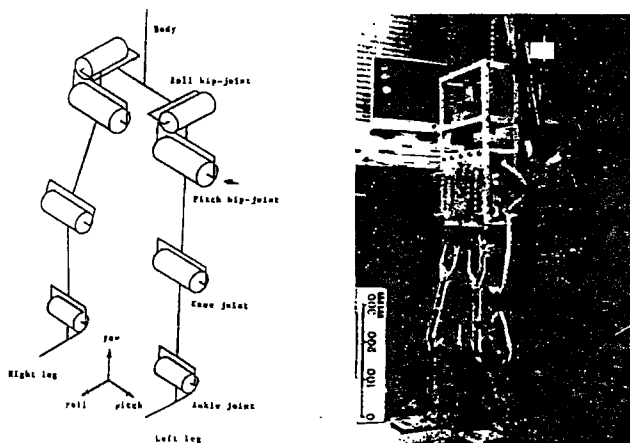
3.2. Maszyny dwunożne — kroczące i biegające

Grupa Bioinżynierów z Uniwersytetu Waseda w Tokyo w okresie 5 lat zrealizowała projekt pod nazwą WABOT (WASeda ROBOT). Maszyna ta posiada dwie kończyny górne i dolne wyposażone w czujniki symulujące propriocepcję. Posiada również sztuczne oczy i uszy oraz komunikację z operatorem w języku japońskim. Struktura robota posiada 30 stopni swobody i jest napędzana siłownikami hydraulicznymi o ciśnieniu roboczym 70ata. Masa ogólna 130kg. Po obciążeniu masą 20kg model mógł poruszać się w linii prostej lub skręcać w lewo i w prawo pod kontrolą CPU [9]. Od tego czasu, w okresie ostatnich 25 lat zbudowano wiele kolejnych modeli dwunożnych maszyn kroczących. Opiszemy dalszy rozwój konstrukcji WABOTA.

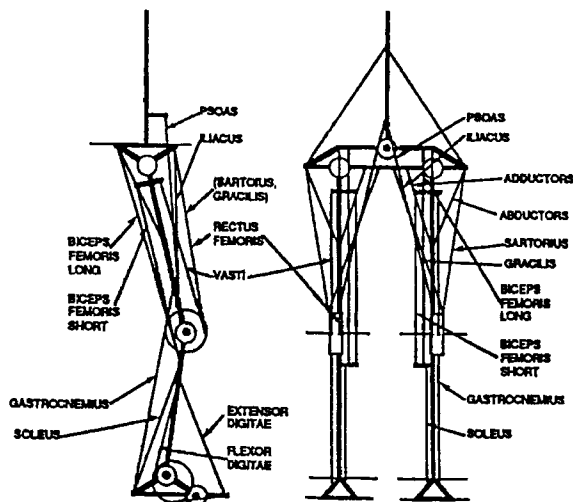
W 1990 roku zespół autorów pod kierunkiem I. Kato [10] przedstawił kolejną wersję robota dwunożnego WL-12. W porównaniu do rozwiązań z 1984 roku (WL-10 RD), który w czasie 1.3s wykonywał krok o długości 0,4m, robot WL-12 zbudowany w 1986 roku, wykorzystywał korpus do stabilizacji chodu. WL-12 realizuje różne odmiany dynamicznego chodu. Czas kroku o długości 0,3m wynosi 1.3s. Masa robota 107kg, wysokość 1,8m. Każda z dwóch kończyn dolnych posiadała 6 stopni swobody, korpus 3 stopnie swobody (30kg — masa równoważąca). Do napędu stosowano układ obrotowych siłowników elektrohydraulicznych. Jako czujniki stosowano potencjometry i tachogeneratory. Do sterowania stosowano hierarchiczny układ sterowania (16 bitowy CPU Z8002) i trzy lokalne 16 bitowe CPU.

Ostatnim najnowszym modelem z tej serii jest dwunożny, antropomorficzny, dynamiczny robot adaptujący się do podłoża WL-12RVII [11]. Jego cechą charakterystyczną jest specjalna stopa umożliwiająca uzyskanie odpowiedniej pozycji podczas lądowania i adaptacyjny system sterowania chodem, który zapewnia adaptację do nieznanego podłoża podczas lądowania w oparciu o informację uzyskaną ze stopy. Należy w tym miejscu wspomnieć o robocie-muzyku grającym na organach elektrycznych.

Na Rys. 3 pokazano schemat dwunożnego robota napędzanego przez 8 serwowmotorów, a na Rys. 3b jego widok ogólny (Emura i Arakawa, 1989) [10]. Cechą szczególną tego robota był układ sensorów podstawy. Każda noga robota posiada staw biodrowy kolanowy, skokowy. Napęd stanowią serwowsilniki oraz przekładnie śrubowe. Wysokość robota 937mm, masa 10,9kg. Sterowanie robota następuje z 16 bitowego mikrokomputera. Autorzy przeprowadzili szereg doświadczeń, które potwierdziły celowość wykorzystania sensorów tego typu [12].



Rys. 3. Dwunożny robot [12]: a) struktura robota, b) widok ogólny robota.



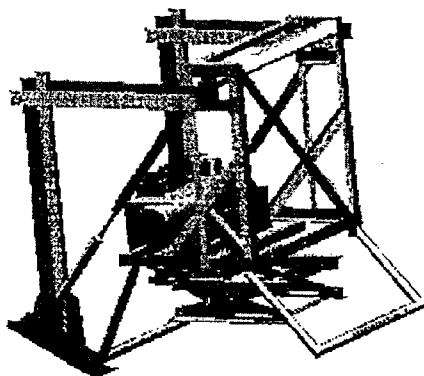
Rys. 4. Schemat dwunożnego robota antropomorficznego [wg 3,15].

Na Rys. 4 pokazano schemat kinematyczny dwunożnego robota antropomorficznego zaproponowanego przez grupę badaczy amerykańskich i polskich (Morecki, Waldron, Goswami, 1997). Wysokość i masa są zbliżone do wymiarów i masy człowieka. Łącznie model posiada 9 stopni swobody i jest obsługiwany przez 32 siłowniki mięśniowe [3,15].

W latach osiemdziesiątych Raibert przedstawił różne modele biegających robotów dwunożnych [7]. W 1972 Vukobratović w Instytucie Mihailo Pupin w Belgradzie zbudował dwunożny egzoskielet dla tetraplegików [18].

3.3. Maszyny z trzema nogami

W latach 1994–96 w ramach projektu badawczego „Ozomalti” zespół badawczy w Uniwersytecie Panamerican w Mexico City opracował maszynę kroczącą z trzema nogami [39] pokazaną na Rys. 5.



Rys. 5. Schemat maszyny z trzema nogami.

3.4. Maszyny czteronożne — kroczące i biegające

W 1968 roku czteronożna maszyna krocząca o masie 1,5 tony została zbudowana przez General Electric Corporation (Liston i Mosher, 1968; Mosher, 1968). Każda noga posiada 3 stopnie swobody (dwa w stawie biodrowym i 1 w stawie kolanowym). Każdy stopień swobody był napędzany przez liniowy siłownik hydrauliczny. Wymiary maszyny były następujące: długość 3,5m, wysokość 3m, długość nogi 2,3m.

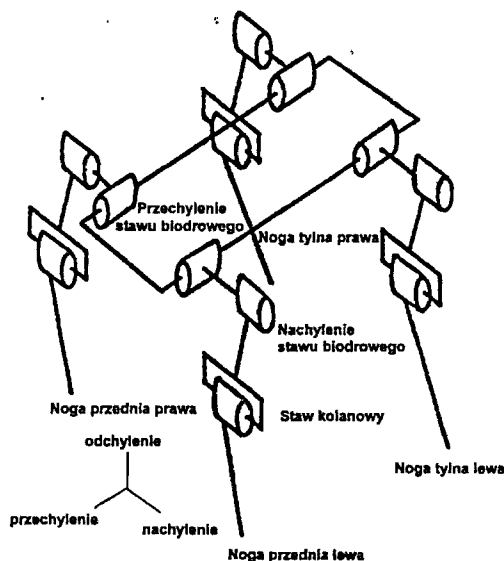
24 siłowniki były napędzane pompą, która poruszana jest 90 konnym silnikiem samochodowym. Operator siedział w kabinie na wysokości około 3,6m. Górnymi kończynami sterował ruchem kończyn przednich maszyny, zaś dolnymi kończynami ruchem tylnych kończyn maszyny. Operator sterując jednocześnie 12 napędami mógł zmieniać długość kroku i tempo chodu maszyny. Pętłe sprzężenia zwrotnego umożliwiały „czucie” oporu gruntu. Sterowanie maszyną było trudne, tylko niewielu operatorów było w stanie nauczyć się tego. Maszyna omijała przeszkody oraz wykonywała proste czynności [4,18].

Zebraane tutaj doświadczenia wyraźnie pokazują na konieczność stosowania komputera do sterowania pojazdem o wielu stopniach swobody. W 1969 roku został zbudowany największy na świecie pojazd czteronożny „Big Muskie” do prac w kopalni węgla kamiennego (Cox, 1970). Masa pojazdu wynosiła około 7500 ton. Nogi maszyny były napędzane siłownikami hydraulicznymi. [4]

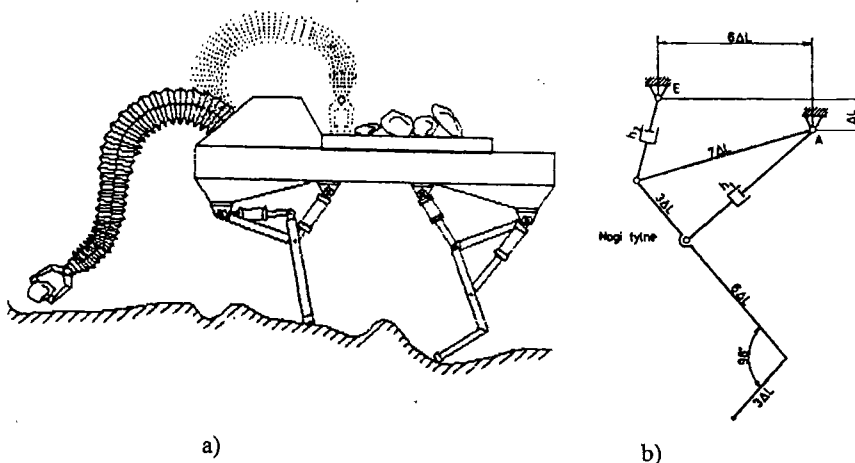
W 1966 roku w Uniwersytecie Południowej Kalifornii została zbudowana maszyna zwana „Phoney Pony” (McGhee, 1966; Frank, 1968). Była to pierwsza maszyna zdolna do autonomicznego poruszania się ze sterowaniem komputerowym [19,20].

Każda noga posiadała 2 stopnie swobody, a koordynacja ruchu realizowana była przez komputer zamiast dotąd stosowanych krzywek lub dźwigni. Noga składała się z 2 członów i 2 przegubów każdy o jednym stopniu swobody. Były one napędzane przez silniki elektryczne oraz przekładnie. Zasilanie zewnętrzne przez kabel. Były realizowane 2 rodzaje chodu, a mianowicie chód czteronożny i czteronożny kłus (trucht). Maszyna poruszała się tylko ruchem liniowym. Uczni japońscy (Taguchi, Ikeda, Matsumoto, 1976) przedstawili model czteronożnej maszyny kroczącej [21]. Do budowy nóg zastosowali mechanizm pantografu. Kolejne modele czteronożnych maszyn kroczących [22] zaprezentowali w 1978 roku Hirose i Umetani. W 1980 roku powstała maszyna zwana PV II o masie około 11kg. Poruszała się ona z prędkością 20,3mm/s i zużywała moc 10W. Kolejna wersja tej maszyny powstała w roku 1984. Titan III posiadał masę około 85kg i jego nogi były również typu pantografu. Każda z nóg miała długość około 90cm i była wykonana z kompozytów.

Na Rys. 6 pokazano jedną z ostatnich maszyn czteronożnych (Emura, Arakawa, 1989) [12]. Każda z nóg posiadała trzy stopnie swobody. Jako siłowniki zastosowano silniki elektryczne. Wysokość maszyny 450mm, długość 457mm, szerokość 218mm, masa 13,2kg. Liczba silników 12, sterowanie przez dwa 16 bitowe mikrokomputery. Przeprowadzono wiele doświadczeń różnych rodzajów chodu.



Rys. 6. Czteronożna maszyna krocząca konstrukcji japońskiej [12].



Rys. 7. Struktura maszyny i nogi polskiej maszyny kroczącej [23].

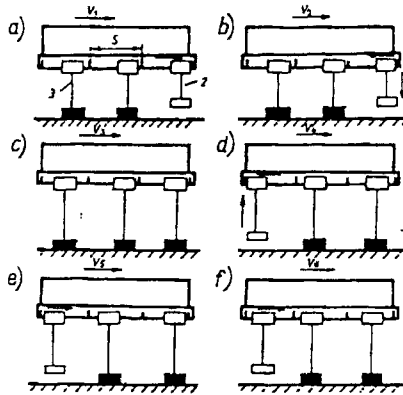
Zespół Robotyki i Biomechaniki Technicznej Instytutu Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej opracował w latach osiemdziesiątych model maszyny kroczącej, która posiadała dwie nogi tylne i dwa koła przednie [23]. Na Rys. 7a i 7b pokazano strukturę maszyny i jej nóg.

Obok maszyn kroczących w latach osiemdziesiątych powstały różne modele czteroноżnych maszyn biegających (Raibert).

3.5. Maszyny sześcionożne

W 1972 roku w Uniwersytecie Rzymskim została zbudowana sześcionożna maszyna krocząca z napędem elektrycznym (Peternella et al, 1972), [24]. Maszyna była zbliżona do maszyny Phoney Pony z tą różnicą, że posiadała 6 nóg. W 1974 roku (Schneider et al, 1974) w Uniwersytecie Moskiewskim została zbudowana maszyna sześcionożna, a w roku 1978 w Instytucie Matematyki (Okhotsimski et al, 1978) zbudowano kolejną maszynę. Pierwsza z nich była sterowana z komputera analogowego, a druga była wyposażona w układ służący do pomiaru odległości [1,18,25].

W 1974 roku w Uniwersytecie Stanowym w Ohio zbudowano sześcionożną maszynę kroczącą (McGhee et al, 1977). Model udoskonalono dodając kolejno sensory siły, giroskopy, sensory odległości, kamery telewizyjne (Buckett, 1977; Briggs, 1974; Pugh, 1982). Sterowanie odbywało się z komputera PDP11/70. Masa maszyny ok. 150kg. Każda noga posiadała 3 stopnie swobody i była napędzana przez silniki elektryczne z odpowiednimi przekładniami [4,20]. Sterowanie było typu joystick control. Interesujący model maszyny sześcionożnej został zbudowany w Instytucie Budowy Maszyn w Moskwie przez Bessonova i Umnova. Cechą charakterystyczną maszyny było wykorzystanie tylko par postępowych (Rys. 8), [26].



Rys. 8. Maszyna krocząca zrealizowana z parami postępowymi [26].

Sześcionożna maszyna krocząca została zrealizowana w Oddziale Informatyki Uniwersytetu Paryskiego VIII (Kessis et al., 1980) [27]. Noga maszyny była zrealizowana w postaci pantografu.

Do napędu wykorzystywano silniki elektryczne typu DC. Do sterowania wykorzystano wielopoziomowy układ. [27].

Oryginalną koncepcję sześcionożnej maszyny kroczącej przedstawił Oddział Zaawansowanych Inteligentnych Maszyn Odetics Inc w Kalifornii w latach osiemdziesiątych [28]. Głównym celem ODEX I było wykazanie możliwości lokomocji kroczącej w przenoszeniu ciężarów, transporcie w środowisku przeznaczonym zwyczajowo dla lokomocji kołowej (rampy, schody, wąskie przejścia, itd).

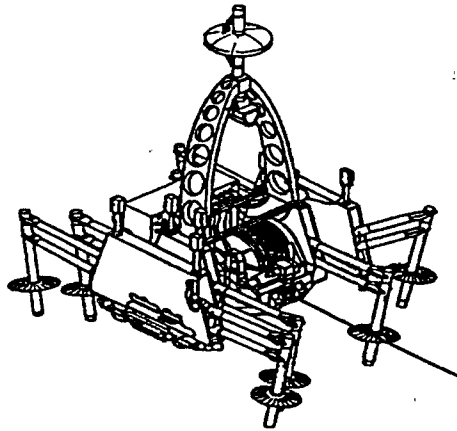
Każda noga maszyny, łącznie z siłownikiem posiadała masę około 25kg, a cała maszyna masę około 210kg i mogła się poruszać z prędkością 1 mili na godzinę. Maszyna była zasilana napięciem 28V 25A/godz. Zużycie mocy z baterii wynosiło 375W dla wolnego chodu i 650W dla szybkiego chodu. Maszyna może poruszać się w tych warunkach 1 godzinę, a następnie należy naładować baterie. Na Rys. 9 pokazano maszynę wyposażoną w manipulator.

W latach 1981–1985/86 zbudowano sześcionożną maszynę kroczącą zwaną ASV. Zbudował ją zespół około 40 osób pod kierunkiem R. McGhee i K.J. Waldrona. Wymiary maszyny: długość 5,2m, szerokość 2,4m, wysokość 3,0m. Obciążenie 220kg, prędkość 2,25m/s, a maksymalna prędkość 3,6m/s. Wysokość nogi 1,8m, przeniesienie pionowe 2,1m. Zastosowano tutaj układ sensorów do pomiaru 82 zmiennych. Układ sterowania wykorzystuje Intel 86/30. Dodatkowy układ steruje czterocylindrowym silnikiem motocyklowym o mocy ok. 50kW. Maszyna przeszła badania w terenie z wynikiem pozytywnym [4].

Prototyp maszyny do inspekcji pod wodą zbudowano w 1987 roku w Laboratorium Robotyki Port and Harbour Research Institute w Japonii [29]. Noga ma 150cm długości. Do napędu zastosowano 70-watowe silniki elektryczne typu DC oraz przekładnie harmoniczne. Do sterowania wykorzystano 16-bitowy mikrokomputer. Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych i naturalnych na głębokości 5,5m.



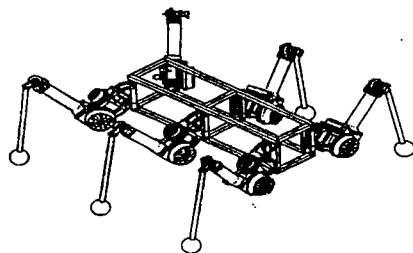
Rys. 9. Maszyna ODEX I zmodernizowana [28]: układ maszyna — manipulator.



Rys. 10. Robot typu DANTE: widok robota.



Rys. 11. Fiński robot kroczący [31].



Rys. 12. Sześcionożna maszyna krocząca TUM [32].

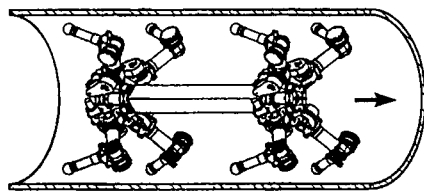
Na Rys. 10 pokazano robota typu DANTE przeznaczonego do eksploatacji krateru wulkanu. Dante ma szerokość 2,5m, długość 3,8m, wysokość 4m. Masa robota 770kg. Rysunek 11 pokazuje widok maszyny skonstruowanej w Finlandii i przeznaczonej do prac w lesie [31].

Na Rys. 12 pokazano widok ogólny sześcionożnej maszyny kroczącej skonstruowanej w Uniwersytecie technicznym w Monachium (Pfeiffer i inni, 1995), [32]. Noga posiada trzy stopnie swobody, masę 28kg. Masa całej maszyny 23kg, masa nóg 17,5kg, masa korpusu 1,5kg, masa układu sterowania 3,5kg. Ostatni przykład dotyczy sześcionożnej maszyny LAURON, skonstruowanej w Centrum Badawczym Informatyki (FZI) w Karlsruhe przez zespół Bernsa i współpracowników [33]. Zarówno konstrukcja maszyny jest wzorowana na budowie owada jak i chód maszyny wykorzystuje prawa ruchu owada. Układ sterowania jest typu uczącej się sieci neuronowej. Maszyna jest kolejną udoskonaloną wersją całej rodziny modeli, które powstały w ostatnich latach w tym ośrodku.

Celem przeglądu maszyn sześcionożnych było przybliżenie czytelnikowi różnych rozwiązań. Ocenia się, że w Europie i Japonii zbudowano kilkadziesiąt modeli i prototypów tych maszyn. Można je zgrupować w dwóch grupach, a mianowicie maszyny typu „ssaka” lub „owada”. Wydaje się, że jak dotąd przeważają maszyny należące do drugiej grupy.

3.6. Maszyny ośmionożne

Ta grupa maszyn jest stosunkowo mało liczna. Ocenia się, że występuje tutaj kilka różnych modeli. Wynika to przypuszczalnie z trudności zarówno mechanicznych jak i sterowania tak dużą liczbą siłowników (minimum 25–28). Jako przykład podamy tutaj ośmionożną maszynę przeznaczoną do inspekcji we wnętrzu rur o dużej średnicy (Rys. 13) — robot pełzający (Pfeiffer, 1997), [32]. Nogi robota usytuowane są w układzie gwiazdowym.



Rys. 13. Ośmionożna maszyna pełzająca wewnątrz rur [wg 32].

3.7. Maszyny wspinające się lub pełzające

Klasę maszyn wspinających się stanowią maszyny przemieszczające się po ścianach budynków lub dużych zbiorników wykorzystywane w budownictwie oraz do inspekcji np. spawów. Oddzielną grupę tych maszyn stanowią pojazdy wężopodobne (Hirose Umetani, 1973) [1]. W ostatnich latach skonstruowano różne modele i prototypy takich maszyn głównie w Japonii, Rosji, a ostatnio w Anglii.

4. PRZYSZŁOŚĆ — DOKĄD ZMIERZAMY

Omówimy pewne kierunki badań, które będą prowadzone w najbliższych latach. Tematykę badawczą i techniczną podaną niżej oparto o materiały programu badawczego uruchomionego w RFN w roku 1997 pod nazwą AUTONOMES LAUFEN (Bonn, marzec 1997), [34] oraz spotkania pod nazwą „Recent Trends in Robot Locomotion” (IEEE IRAC, Albuquerque, NM, April, 1997), [35] oraz ICAR'97 [39]. Lista tematów wybranych do badań na lata 1997–2002 obejmuje:

- mikrosensory;
- podatność i energia w dwunożnych robotach kroczących;
- optymalny chód;
- budowa i badanie cztero- i sześcionożnych maszyn;
- koordynacja ruchu przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych;
- roboty wspinające się po ścianach;
- dynamika czteronożnych maszyn kroczących.

Przytoczone przykładowo kierunki badań przewidują w okresie najbliższych dwóch lat realizację 18 tematów. Nakłady przewidziane na badania są wysokie.

Kolejna grupa tematów, która była przedstawiona podczas workshopu w kwietniu 1997 roku obejmowała zagadnienia [36]:

- projektowanie (design) maszyn kroczących;
- moc zużywana przez autonomiczne, stabilne, dynamiczne maszyny kroczące;
- animacja ćwiczeń w atletyce (modele dwunożne do różnych ćwiczeń, np. rzut oszczepem) lokomocja pływania przy wykorzystaniu algorytmów genetycznych;
- dynamika inspirowanych biologicznie robotów lokomocyjnych.

Interesujące propozycje podano podczas ostatniego spotkania (ICAR'97, Workshop II), [37]. Tematyka tego spotkania była zgrupowana wokół:

- nowych mechatronicznych i sensorycznych koncepcji;
- nowych koncepcji sterowania;
- zastosowań maszyn kroczących i wspinających się.

Wydaje się, że podstawową sprawą jest określenie takich dziedzin zastosowań, w których pojazdy kroczące mogą być konkurencyjne w stosunku do mobilnych ze szczególnym uwzględnieniem tych dziedzin, gdzie maszyny kroczące są jedynym, możliwym środkiem transportu. Uważa się, że następujące dziedziny zastosowań będą w przyszłości domeną maszyn kroczących i wspinających się:

- rolnictwo i przemysł leśny;
- eksploracja planet i dna morskiego;
- inspekcja kraterów wulkanów;

- prace specjalne;
- roboty do prac domowych (personal robots).

Roboty wspinające się mogą głównie znaleźć zastosowanie do:

- inspekcji dużych zbiorników w przemyśle chemicznym i atomowym;
- inspekcji ścian w przemyśle budowlanym;
- inspekcji mostów, rur, platform wiertniczych.

Badania w zakresie maszyn kroczących są obecnie prowadzone na całym świecie w wielu ośrodkach — w USA (10 ośrodków), Meksyku (3), Chinach (2), Japonii (3–5), w Europie — Belgia (2), Rosja, Polska (2–5), Finlandia (3), Francja (2), Niemcy (9), Anglia (3), Szwajcaria (2), Włochy (2), Hiszpania (1). Razem 48. Lista jest raczej niepełna i należy przypuszczać, że w wielu innych miejscach są prowadzone badania w tym zakresie. Ocenia się liczbę modeli maszyn i mikromaszyn kroczących oraz wspinających się (z 1, 2, 3, 4, 6, 8 nogami) na około 80.

Analiza aktualnie prowadzonej problematyki badawczej i technicznej pozwala na sformułowanie kilku ogólnych zadań stojących obecnie przed zespołami badawczymi:

- opracowanie ogólnych metod projektowania maszyn kroczących i wspinających się;
- opracowanie metod analizy kinematycznej i dynamicznej maszyn wielonożnych;
- opracowanie zasad korzystania z układów wielosensorycznych;
- opracowanie nowych koncepcji sterowania ruchem oraz programowania dla tych maszyn;
- określenie intensywności zastosowań.

Studium przeprowadzono w ramach projektu badawczego KBN Nr 7 T071303109 „Badania inteligentnego układu milimaszynowego — czterożna maszyna krocząca i manipulator elastyczny.

LITERATURA

- [1] Podstawy robotyki. Teoria i elementy manipulatorów i robotów. Praca zbiorowa pod red. A. Moreckiego i J. Knapczyka. Wyd. drugie. WNT Warszawa 1994, str. 551.
- [2] Morecki A., Ekiel J., Fidelus K.: Cybernetics systems of Limb Movements in Man, Animals, Robots, PWN-Ellis Horwood Limited Publishers, Chichester, 1984, pp.55–61.
- [3] Morecki A.: Modelling and Simulation of Human and Walking Robot Locomotion. Human and Machine Locomotion, CISM Courses and Lectures – No.375, Ed. by A. Morecki and K.J. Waldron, Springer, Wien, New York, 1997, pp.42–47.
- [4] Shin-Min Song and Kenneth J. Waldron: Machines that Walk: The Adaptive Suspension Vehicle. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 1989, pp.5–7.
- [5] Raibert M. H.: Dynamic stability and resonance in a one legged hopping machine. Proceed. 4th Symp. on Theory and Practice of Robots and Manipulators. Ed. by A. Morecki, G. Bianchi, K. K. dzior, PWN Warszawa, 1983, pp.352–367.
- [6] Murphy K.N. and Raibert M. H.: Trotting and Bounding in a Planar Two-legged Model. Proceed. of Ro.Man.Sy'84. Ed. by A. Morecki, G. Bianchi, K. K. dzior. Kogan Page, London Hermes Publishing, 1985, pp.411–420.

- [7] Raibert M. H., Sutherland I.E.: *Machines that Walk*. Sciences of America, 1983.
- [8] Buehler M., Ahmadi M., Gregoria P., Mennitto G.: *Advances Towards Power Autonomy of Dynamically Stable Legged Robots*. *Proceed. „Recent Trends in Robot Locomotion”*, IEEE IRAC Albuquerque, NM, April 1997, pp.2-19.
- [9] Kato I. et al: *Information — Power Machine with Senses and Limbs (WABOT 1)*. *Ro.Man.Sy'73, First CISM-IFTToMM Symposium, on Theory and Practice of Robots and Manipulators, 5-8 September 1973, Vol.1, Udine 1974, Springer-Verlag, Wien, New York, pp.11-24.*
- [10] Takanishi A., Ecura Y., Tochizawa M., Takeya, Kato I.: *Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized with Trunk Motion*, *Ro.Man.Sy'7, Proceed. of Seventh CISM-IFTToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators*. Ed. by A. Morecki, G. Bianchi, K. Jaworek, HERMES, 1990, pp.69-79.
- [11] Yamaguchi J. and Takanishi A.: *Development of a Biped Walking Robot Adapting to the Real World*. *Ro.Man.Sy.'11, Proceed. of the Eleventh CISM-IFTToMM Symposium*. Ed. by A. Morecki, G. Bianchi, C. Rzymkowski, Springer, Wien, New York, 1997, pp.141-148.
- [12] Emura T. and Arakawa A.: *A Study of Walking Robots Controlled with Attitude Sensors*. *Advanced Robotics 1989. Proceed. of the IVth ICAR*. Columbus, Ohio, June 13-15, 1989, Springer-Verlag, K.J. Waldron (ed.), pp.640-651.
- [13] Figliolini G. and Ceccareli M.: *Design of an Anthropomorphic Electropneumatic Walking Robot*. *Ro.Man.Sy'11, Proceed. of the Eleventh CISM-IFTToMM Symposium*. Ed. by A. Morecki, G. Bianchi, C. Rzymkowski, Springer, Wien, New York, 1997, pp.141-148.
- [14] Formalsky A.M.: *Ballistic Locomotion of a Biped*. *Human and Machine Locomotion*. Ed. by A. Morecki, K.J. Waldron, Springer, Wien, New York, pp.224-229.
- [15] Kędzior K., Morecki A., Wojtyra M., Zagrajek T., Zielińska T., Goswami A., Waldron M. and Waldron K.: *Development of Mechanical Simulation of Human Walking*. *Ro.Man.Sy'11, Proceed. of the Eleventh CISM-IFTToMM Symposium*. Ed. by A. Morecki, G. Bianchi, C. Rzymkowski, Springer, Wien, New York, 1997, pp.175-187.
- [16] De Man D.H., Lefeber D., Vermeulen J. and Verrelst B.: *Simulation of an Anthropomorphic Running Robot Using the Multibody Code Mechanica Motion*. *Ro.Man.Sy'11, Proceed. of the Eleventh CISM-IFTToMM Symposium*. Ed. by A. Morecki, G. Bianchi, C. Rzymkowski, Springer, Wien, New York, 1997, pp.149-156.
- [17] Morecki A., Oderfeld J.: *Teoria maszyn i mechanizmów*, PWN, 1987, str.338-339.
- [18] Morecki A.: *Manipulatory bioniczne*, PWN, 1976, str.179-180.
- [19] McGhee R.B.: *Finite State Control of Quadruped Locomotion*, *Proceed. of the Second Inter. Symp. on External Control of Human Extremities*, Dubrovnik, Yugoslavia 1967, pp.221-231.
- [20] McGhee R.B. and Frank A.A.: *On the Stability Properties of Quadruped Creeping Gaits*. *Mathematical Biosciences*. Vol.3, 1968, pp.331-351.
- [21] Taguchi K., Ikeda K., Matsumoto S.: *Four-Legged Walking Machine*. *Proceed. by Second Inter. CISM-IFTToMM Symposium*. Ed. by A. Morecki/K. Kędzior, PWN-Elsevier Scientific Publishing Company, 1977, pp.162-171.
- [22] Hirose S., Umetani Y.: *Some Consideration on a Feasible Walking Mechanism as a Terrain Vehicle*. *Proceed. of the Third Inter. CISM-IFTToMM Symposium*. Udine, Sept.12-15, 1978. PWN-Elsevier Scientific Publishing Company, 1980, pp.357-375.

- [23] Morecki A., Zielińska T.: Locomotion of a Machine of a Static Crawler Type: Gait Modelling. *Advanced Robotics*, 1989. Proceed. of 4th ICAR, Columbus, Ohio, June 13–15, 1989, pp.664–675.
- [24] Peternella M., Sulinari S.: Feasibility study on six legged walking robots. Proceed. of 4th ISIR, Tokyo, Japan, 1974.
- [25] Okhotsimski, Platonov A.K.: Walker's Motion Control. Second Inter. CISM–IFTToMM Symp. Warsaw, Poland, 14–17 Sept. 1976. Proceed. ed. by A. Morecki/K. K. dzior. PWN–Elsevier Scientific Publishing Company, 1977, pp.216–224.
- [26] Bessonov A.P., Umnov N.: Choice of Geometric Parameters of Walking Machines. Second Inter. CISM–IFTToMM Symposium. Warsaw, Poland, 14–17 Sept. 1976. Proceed. ed. by A. Morecki/K. K. dzior. PWN–Elsevier Scientific Publishing Company, 1977, pp.62–73.
- [27] Kessis J.J., Rambaut J.P., Penne J.: Walking robot multi-level architecture and implementation. Fourth Inter. CISM–IFTToMM Symposium, Zaborów, Poland, Sept.8–12, 1981, Proceed. ed. by A. Morecki/G. Bianchi and K. K. dzior. PWN, Warszawa, 1983, pp.297–304.
- [28] Bertholet S.J.: The Education of Odetics Walking Machine Technology. Proceed. of SPIE — the Int. Soc. For Optical Engng., Vol.727, Mobile Robots. 30–31 Oct. 1986 Cambridge, Massachusetts. Published by SPIE, pp.25–31.
- [29] Akzano J., Iwasaki M., Nemoto T., Asakura O.: Development on Walking Robot for Underwater Inspection. *Advanced Robotics*. Proceed. of 4th ICAR, Columbus, Ohio, June 13–15, 1989, Springer–Verlag, Ed. K.J. Waldron, 1989, pp.652–663.
- [30] Bares J.: Lessons from DANTE II, 93rd ICAR.
- [31] Plustech. Tampere, Finland. <http://www.plustech.fi/>
- [32] Pfeiffer F., Rossman Th. and Steuer J.: Theory and Practice of Machine Walking. Human and Machine Locomotion, Ed. by A. Morecki and K.J. Waldron, Springer, Wien, New York, 1977, pp.264–278.
- [33] Berns K., Ilg W., Dillman R. (Hrsg.): Untersuchung der Anwendung Neuronaler Netze zur Steuerung einer Laufmaschine, FZI, 1995, pp.151–152.
- [34] Schwerpunktprogramm „Autonomes Laufen“, Deutsche Forschungsgemeinschaft, March, Bonn, 1997.
- [35] Recent Trends in Robot Locomotion. IEEE, IRAC Albuquerque New Mexico, April, 1997.
- [36] Full R.J.: Poly–Pedal Animal Locomotion: Lesson for the Design of Legged Robots. Recent Trends in Robot Locomotion. IEEE, IRAC Albuquerque New Mexico, April, 1997.
- [37] ICAR'97, 8th ICAR, Workshop II, New Approaches on Dynamic Walking and Climbing Machines, Monterey, CA, July 7–9, 1997.