

Sistemas Robóticos de Locomoção

- Estado da Arte -

Manuel S. Silva *

J. A. Tenreiro Machado **

* Assistente

** Professor Coordenador com Agregação

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 PORTO, Portugal

Tel.: +351 - 22 - 834 05 00

Fax: +351 - 22 - 832 11 59

{mfsilva,jtm}@dee.isep.ipp.pt

Resumo

Este artigo sintetiza o estado da arte na área dos robôs com locomoção por pernas. Assim, começa-se por analisar as diversas estruturas de veículos terrestres e as principais características de cada uma delas, dando particular ênfase à locomoção por pernas. Nesta perspectiva, apresenta-se uma resenha histórica destes sistemas, exemplificando com alguns casos que podem ser considerados como marcos desta evolução. De seguida são examinados alguns dos sistemas actuais e analisado o seu desempenho. Por último descrevem-se certos problemas ainda existentes e algumas linhas de investigação que se encontram em aberto nesta área de trabalho.

1 Introdução

Os sistemas robóticos autónomos podem-se classificar genericamente em duas grandes áreas:

- Robótica de manipulação;
- Robótica móvel.

No que concerne à robótica móvel, e relativamente à forma de locomoção a adoptar, torna-se necessário considerar os seguintes aspectos do problema:

- Os objectivos da tarefa que o robô deve cumprir;
- As restrições do terreno em que o robô vai operar;
- As limitações dos actuadores adoptados;
- A fonte de alimentação disponível para alimentar o robô e a autonomia energética necessária tendo em atenção os actuadores e controladores dos equipamentos.

Dadas estas necessárias considerações, existem três configurações fundamentais que podem ser adoptadas para a locomoção em robôs móveis:

- Dispositivos rotacionais, tais como rodas e lagartas;
- Pernas, similares às que são observadas nos animais;
- Estruturas articuladas similares ao corpo das serpentes.

Cada uma destas formas de locomoção apresenta características próprias, o que as torna indicadas para classes particulares de aplicações.

2 Formas Alternativas de Locomoção

2.1 Veículos com Rodas e Lagartas

Na civilização actual a locomoção recorrendo a veículos com rodas é dominante. Estamos tão habituados a ver e usar veículos com rodas para desempenhar as mais variadas tarefas, que somos facilmente levados a pensar ser esta a única forma possível (ou a forma mais eficaz) de locomoção. Todavia, se analisarmos com algum detalhe as características deste tipo de locomoção poderemos deparar-nos com algumas surpresas.

Desde logo convém notar que os veículos com rodas exigem superfícies pavimentadas para se deslocarem sendo inequívoco que, neste caso, conseguem ser extremamente rápidos e eficientes e os mecanismos podem ser simples e leves. No entanto, mais de 50% da superfície terrestre é inacessível a veículos tradicionais (com rodas ou com lagartas) tornando-se difícil, ou até impossível, aos veículos com rodas vencer obstáculos e desníveis de grandes dimensões. Mesmo os

veículos ditos “todo-o-terreno” não conseguem melhor do que vencer pequenos obstáculos e desníveis à custa de um elevado consumo energético [1].

Uma alternativa a este tipo de veículos consiste nos veículos dotados de lagartas. Apesar da sua maior mobilidade, em terrenos difíceis também não conseguem ultrapassar muitas dificuldades e o seu consumo energético é relativamente elevado.

Aos problemas já referidos, convém acrescentar o facto dos veículos tradicionais deixarem um rasto contínuo no solo o que em algumas situações é desvantajoso como, por exemplo, do ponto de vista ecológico.

2.2 Veículos com Locomoção por Pernas

2.2.1 Vantagens dos Veículos com Pernas

Do que acaba de ser exposto, conclui-se que os veículos com locomoção por pernas têm uma maior mobilidade em terrenos naturais uma vez que estes veículos podem utilizar apoios isolados para cada pé, ao contrário dos sistemas com rodas, que necessitam de uma superfície de suporte contínua. Assim, estes veículos podem andar em terrenos irregulares, variando a configuração das pernas para se adaptarem às irregularidades da superfície e, por outro lado, os pés podem contactar com o solo em pontos seleccionados de acordo com as condições do terreno. Por este motivo, as pernas são sistemas inerentemente adequados para uma locomoção em terrenos irregulares. Quando os veículos se deslocam em superfícies pouco rígidas, tais como solos arenosos, a capacidade de impor pegadas discretas no solo pode também melhorar o consumo energético, uma vez que deformam o terreno numa menor escala do que os veículos com rodas ou com lagartas e, assim, a energia necessária para sair dessas depressões é inferior [1]. A área de contacto entre o pé e o solo pode ser realizada de forma a que a pressão de suporte do solo possa ser reduzida. Além disso, a utilização de múltiplos graus de liberdade nas juntas das pernas, permite aos veículos com pernas alterar a sua direcção de movimento sem escorregar. Adicionalmente, verifica-se que é possível variar a altura ao solo, introduzindo um efeito de amortecimento e de desacoplamento entre as irregularidades do terreno e o corpo do veículo (e consequentemente a sua carga).

Por último, deve referir-se que as pernas podem ser utilizadas não só para a locomoção, mas também com o veículo imobilizado. Por exemplo, a parte superior do corpo pode ser actuada activamente enquanto os pés se encontram fixos ao solo, funcionando como uma base de suporte activo para auxiliar o movimento de um manipulador montado no corpo.

2.2.2 Limitações dos Veículos com Pernas

Apesar de os aspectos referidos indicarem a locomoção com pernas como sendo vantajosa sobre os veículos com formas de locomoção tradicionais, convém apontar que no estado actual de desenvolvimento estes veículos ainda sofrem de grandes limitações, pois exibem baixas velocidades, são difíceis de construir e necessitam de algoritmos complexos de controlo. Além disso, os mecanismos actuais são pesados, pois requerem um grande número de actuadores para mover as pernas com múltiplos graus de liberdade, ao que se junta um consumo energético elevado.

2.3 Veículos com um Corpo Articulado

Os veículos com um corpo articulado são compostos por vários segmentos corporais, interligados de forma a imitar uma cobra [2]. Através da coordenação activa do movimento dos segmentos os veículos com corpo articulado apresentam certas vantagens:

- Têm a capacidade de percorrer e atravessar terrenos irregulares e trajectos estreitos adaptando activamente o seu longo corpo ao perfil do terreno;
- Conseguem atravessar valas, endurecendo os servomecanismos das juntas de forma a formarem uma ponte sobre as valas. Conseguem igualmente atravessar, de forma estável, terrenos pantanosos, enfraquecendo os servomecanismos das juntas de forma a distribuir o seu peso por todos os segmentos;
- Apresentam uma fiabilidade e facilidade de manutenção elevadas em virtude da estrutura unificada redundante. O segmento avariado pode ser facilmente desconectado e reparado separadamente;
- Podem ser transportados facilmente, dividindo o robô nos seus segmentos elementares.

2.4 Campos de Aplicação

Quanto aos campos de aplicação dos robôs móveis, independentemente da sua forma de locomoção, pode-se dizer que são indicados para os ambientes 3-Ds (Dirty, Doll, Dangerous). No fundo são veículos capazes de substituir o ser humano de forma a evitar colocar em perigo a vida humana, em todo o tipo de trabalhos perigosos que requeiram fortes medidas de segurança ou em áreas às quais os humanos não possam aceder facilmente.

Para o caso dos robôs com locomoção por pernas, exemplos destas situações são:

1. A exploração de locais remotos:

- Em vulcões [3];
- No espaço ou em planetas [4,5];
- No fundo marinho;
- Em plataformas petrolíferas a grandes profundidades e sujeitas a pressões elevadas;

2. Ambientes hostis ou perigosos:

- Em centrais nucleares ou locais com elevados níveis de radiação;
- Em prospecção mineira [6];
- Nas tarefas de desminagem;
- Em áreas de desastre em situações de catástrofe;
- Em operações de busca e salvamento.

Para além deste tipo de aplicações os veículos com pernas podem também ser utilizados numa grande variedade de tarefas, como sejam:

- Em trabalhos de escavação e construção civil [7];
- No corte e transporte de árvores em florestas;
- Em trabalhos agrícolas;
- Na área dos serviços, especialmente em aplicações de apoio a pessoas dentro dos edifícios.

Além disso, previsões apontam para a introdução deste tipo de robôs nas habitações domésticas, seja dedicados a tarefas domésticas, seja como simples companhia. Por último, convém referir o sucesso que alguns robôs com locomoção por pernas têm vindo a apresentar no campo do entretenimento. No entanto, no estado de desenvolvimento em que se encontram estes

equipamentos, ainda não se pode afirmar que constituam uma forma eficaz de locomoção, uma vez que ainda permanecem por resolver vários problemas de engenharia.

3 Evolução dos Veículos com Pernas

Apesar de podermos ser levados a pensar que se está perante uma ciência “nova”, os primeiros conceitos na área da locomoção com pernas tiveram lugar há um tempo considerável.

3.1 Primeiras Ideias

As primeiras ideias para implementar veículos com locomoção por pernas datam do século XV. Entre 1495 e 1497 Leonardo da Vinci idealizou o primeiro robô articulado antropomórfico. Este robô era um cavaleiro dotado de armadura, com partes em madeira, couro e bronze, e com accionamento através de cabos [8].

Na Figura 1 apresenta-se uma gravura de um dos primeiros veículos a apresentar pernas, baseado numa locomotiva, onde a transmissão do movimento não seria efectuada pelas rodas da locomotiva mas sim por um conjunto de pernas.

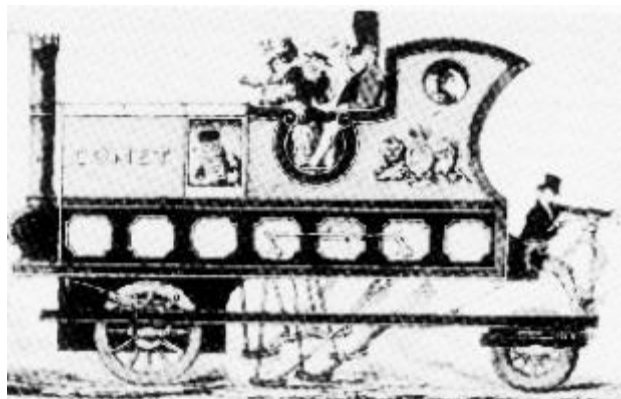


Figura 1: Gravura de um dos primeiros veículos com pernas

Na Figura 2 pode-se ver um esboço da primeira máquina quadrúpede, denominada “The Mechanical Horse” e cujo projecto se deve a L. A. Rygg.



Figura 2: Esboço da primeira máquina quadrúpede

Nesta máquina os estribos funcionavam como pedais e o seu movimento era transmitido às pernas, através de um conjunto de engrenagens. Por sua vez, as rédeas permitiam mover a cabeça e as pernas da frente de forma a controlar a direcção do veículo. Esta máquina foi patenteada em 14 de Fevereiro de 1893 mas nunca passou da fase de projecto.

Na Figura 3 apresenta-se o projecto da máquina bípede denominada “The Steam Man”. Este bípede foi projectado por Georges Moore em 1893, mas também nunca foi construído.

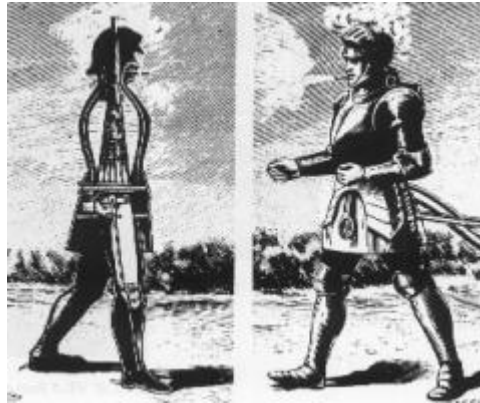


Figura 3: *Projecto da primeira máquina bípede*

Um exemplo de uma máquina mista (com rodas e com pernas) está representado na Figura 4 e data da Primeira Guerra Mundial. Este protótipo foi desenvolvido por Thring, mas nunca terá passado dessa fase.

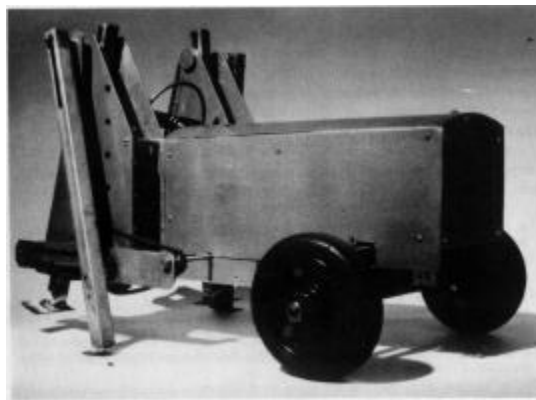


Figura 4: *Protótipo de um tractor com pernas*

Como se viu, as ideias anteriores procuravam um mecanismo que permitisse o movimento quando accionado por uma fonte de energia. No entanto, esta aproximação padecia de uma grave limitação: a solução baseada em engrenagens para transmitir o movimento às pernas restringia-se a adoptar um padrão de locomoção constante, com a colocação dos pés no solo a intervalos regulares. Isto não permitia aproveitar uma grande vantagem destes veículos a saber, a possibilidade de atravessarem terrenos irregulares. Um segundo problema consistia no facto da informação sobre o estado da máquina e do ambiente não ser utilizado no seu controlo.

3.2 Primeiros Estudos / Implementações

O primeiro estudo científico documentado da locomoção dos animais deve-se a Eadweard Muybridge que estudou os padrões de locomoção de cavalos a partir de fotografias de cavalos em trote. Os resultados deste trabalho foram publicados na revista *Scientific American* em 1878. Após este estudo inicial Muybridge dedicou-se ainda à análise dos padrões de locomoção de quarenta outros mamíferos, incluindo o dos seres humanos.

Em meados da década de 50 numerosos grupos de investigação iniciaram o estudo e o desenvolvimento de máquinas com locomoção por pernas de forma sistemática. Cerca de uma

década depois, as primeiras máquinas começaram a ser projectadas e construídas por diferentes grupos em laboratórios.

Em 1960 Shigley [9] efectuou um estudo extenso sobre os mecanismos possíveis para implementar a locomoção com pernas. No seu trabalho são propostos vários sistemas que podem ser utilizados em máquinas locomotoras, nomeadamente engrenagens de quatro barras, engrenagens com excêntricos e mecanismos pantográficos. Com base na análise desenvolvida, Shigley construiu um veículo com quatro estruturas rectangulares onde cada uma servia como uma perna. As pernas moviam-se aos pares e o deslocamento era suficientemente pequeno de forma a garantir a estabilidade estática.

Também durante os anos 60 a empresa General Space Corporation desenvolveu duas máquinas (com seis e com oito pernas), com o objectivo de aplicar os conceitos de locomoção por pernas a um veículo lunar. O hexápode era alimentado externamente, enquanto que o octópode era totalmente autónomo. Os movimentos das pernas de ambos estes veículos eram coordenados por engrenagens com excêntricos e transmitidos por ligações mecânicas. Estes veículos, apesar de cumprirem alguns dos objectivos projectados (por exemplo, o octópode conseguia virar no seu próprio comprimento, através de uma forma de derrapagem controlada), apresentavam uma fraca adaptabilidade ao tipo de terreno devido à falta de graus de liberdade necessários [10].

Um dos primeiros veículos em que era possível adoptar diferentes padrões de locomoção foi o quadrúpede da General Electric (Figura 5), desenvolvido por R. Mosher e concluído em 1968 [11].

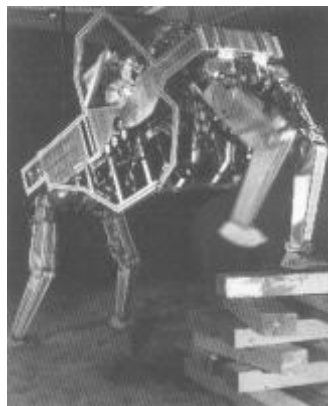


Figura 5: *O quadrúpede da General Electric*

Este veículo, com 3,3 m de altura, apresentava quatro pernas com três graus de liberdade (um no joelho e dois na anca), sendo cada eixo actuado por um cilindro hidráulico e requerendo uma alimentação externa ao veículo. O controlo deste veículo dependia de um operador bem treinado para funcionar correctamente. O operador controlava as quatro pernas do veículo através de quatro punhos e pedais que se encontravam hidraulicamente ligados às pernas do robô, com reflexão de força. O controlo do veículo era exigente (12 graus de liberdade), pelo que poucas pessoas o conseguiam manobrar, verificando-se que se cansavam ao fim de algum tempo. Apesar da sua aptidão para vencer obstáculos e da sua boa mobilidade em terrenos difíceis, tornou-se claro que era necessário um sistema de controlo por computador.

Nessa mesma época foi desenvolvido por McGhee e Frank o Phoney Poney [12]. Este quadrúpede, concluído em 1966, foi a primeira máquina com pernas a deslocar-se autonomamente sob o controlo de um “computador” e com accionamento eléctrico.

Cada perna tinha dois graus de liberdade, sendo cada uma das juntas actuada por um motor eléctrico (com alimentação externa) através de um redutor de velocidade. A coordenação das juntas era efectuada através de lógica digital simples e apresentava dois padrões de locomoção diferentes.

A sua principal limitação residia no facto de só se deslocar em linha recta, não conseguindo mudar de direcção.

Por último, é de referir o “Big Muskie”, a maior máquina com locomoção por pernas até hoje construída (15.000 toneladas) [6].

Esta máquina, construída pela Bucyrus-Erie Co em 1969, para ser utilizada numa mina de carvão ao ar livre, dispunha de quatro pernas accionadas hidraulicamente. Para se deslocar, as pernas levantavam o corpo e deslocavam-no de um passo no sentido pretendido, pousando-o de seguida no solo. Se necessário o ciclo repetia-se.

3.3 Dificuldades de Implementação

As máquinas vistas anteriormente demonstram alguma mobilidade em condições controladas, mas nenhuma delas exhibe capacidades que se aproximem dos sistemas biológicos. As razões para esta lenta evolução provêm essencialmente da complexidade do controlo das pernas e da sua coordenação, do limitado conhecimento dos padrões de locomoção e da falta de actuadores e estruturas mecânicas eficientes.

Nesta ordem de ideias, de seguida analisam-se as principais questões que condicionam o desempenho destes robôs, e que se encontram actualmente em desenvolvimento. Estas questões podem ser divididas em duas grandes áreas: o projecto e o controlo.

3.3.1 Projecto

Relativamente ao projecto de robôs com pernas existem múltiplas opções que devem ser consideradas. Assim, são de referir opções como sejam o volume de trabalho pretendido para as pernas e a sua eficiência energética, a simplicidade na estrutura para uma boa fiabilidade mecânica e a capacidade de vencer grandes obstáculos.

Ao nível da estrutura mecânica do robô deve procurar esclarecer-se qual o número óptimo de pernas num robô. Por um lado, este número deve ser o mais pequeno possível, uma vez que isto diminui o número de actuadores necessários e o peso do veículo. Por outro lado, desde que os pés não disponham de uma grande área de contacto com o solo, são necessárias pelo menos quatro pernas para o veículo efectuar a locomoção mantendo a estabilidade estática. Este tipo de locomoção é necessário para tarefas que exijam locomoção lenta mas suave, tais como tarefas de inspecção e transporte de cargas pesadas ou frágeis [13].

Frequentemente procura-se que cada uma das pernas apresente uma estrutura pantográfica já que com este tipo de estrutura se conseguem movimentos desacoplados e lineares dos pés. Esta característica torna o algoritmo de controlo mais simples e implica um menor custo computacional para calcular a trajectória dos pés.

Relativamente às pernas, uma outra questão relaciona-se com o tipo de actuadores que devem ser adoptados nas juntas. Os actuadores mais utilizados consistem em motores eléctricos rotacionais. No entanto, várias limitações destes actuadores têm vindo a apontar para o desenvolvimento de actuadores lineares que permitam emular o comportamento dos músculos dos seres vivos.

Já ao nível do robô deve ser equacionado cuidadosamente quais os padrões de locomoção a adoptar pelo veículo. Verifica-se que os padrões de locomoção periódicos permitem aos veículos atingir velocidades de locomoção elevadas com um custo computacional reduzido. No entanto, estes padrões de locomoção não permitem que o robô se desloque em terrenos com irregularidades pronunciadas, perdendo desta forma uma das suas principais potencialidades. Para a locomoção neste tipo de superfícies, torna-se necessário a adopção de padrões de locomoção não-periódicos

(muitas vezes denominados padrões livres), que implicam maiores custos computacionais, requerendo maiores capacidades de sensorização e acarretando menores velocidades de locomoção.

3.3.2 Controlo

Ao nível do controlo existem também bastantes questões por resolver, sendo de realçar a forma como deve ser efectuada a coordenação das várias cadeias cinemáticas. Assim, os sinais de comando devem coordenar os múltiplos graus de liberdade promovendo uma distribuição adequada das forças nas pernas e mantendo a estabilidade dinâmica.

Os robôs apresentados na secção 3.2 representam uma classe denominada de robôs com locomoção estática. As suas estruturas são diferentes nos detalhes construtivos mas, todas elas mantêm no chão um número suficiente de pés para manter o centro de gravidade sobre a base de suporte resultante.

A resolução da questão da estabilidade dinâmica é muito importante, uma vez que velocidades elevadas só são alcançadas nessa situação. Quando um sistema se move a uma velocidade considerável, a geometria (estabilidade estática) não é condição suficiente e a estabilidade dinâmica tem que ser considerada. Apesar de já existirem veículos que conseguem manter a estabilidade dinâmica, o problema situa-se na forma de transição entre a estabilidade estática e a estabilidade dinâmica, ao iniciar ou ao parar o movimento.

Por último, é ainda de referir a utilização de sensores, atendendo às dificuldades em reconhecer as características do terreno, o que torna difícil decidir qual a estratégia na colocação dos “pés”.

4 Exemplos Actuais de Veículos com Locomoção por Pernas

4.1 Robôs com uma Perna

No caso de robôs com uma única perna a sua locomoção realiza-se por saltos (“hopping robots”). Apesar do exemplo prático mais próximo da locomoção por saltos ser o canguru, este modelo também se aplica a bípedes em corrida (“one-foot gait”). Estas máquinas mantêm um equilíbrio activo à medida que se deslocam, obtendo assim a estabilidade dinâmica, permitindo compreender melhor as trocas de energia que se verificam ao longo de um ciclo de locomoção e realçando os problemas do balanceamento activo e dinâmico, sem haver a preocupação relativa à coordenação das pernas.

Matsuoka foi o primeiro a construir uma máquina que corria de acordo com estes conceitos, ou seja, onde existem períodos de voo balístico nos quais os pés perdem o contacto com o solo. O seu objectivo foi modelizar os saltos repetitivos no humano [14]. Matsuoka formulou um modelo, consistindo num corpo e numa perna sem massa (para simplificar o problema), considerando que a duração da fase de suporte era muito curta comparada com a fase de voo balístico. Este padrão de locomoção, no qual quase todo o ciclo é passado na fase de transferência, minimiza a influência da inclinação durante a fase de suporte.

Para testar o seu sistema de controlo, Matsuoka construiu uma máquina de salto planar com uma perna. A máquina posicionava-se sobre uma mesa inclinada de 10° com a horizontal, rolando sobre rolamentos. Um solenóide eléctrico fornecia um impulso rápido no pé, de forma que o período de suporte era reduzido. A máquina saltava no local a um ritmo de 1 salto/seg e podia andar para a frente e para trás sobre a mesa.

Raibert também se dedicou a estudar sistemas de locomoção dinâmica e, em 1983, construiu na Carnegie Mellon University (CMU) uma máquina de “salto”. Este sistema, constituído por um corpo e por uma única perna, precisava de saltar continuamente de modo a manter o equilíbrio [15].

O corpo constituía a estrutura principal que transportava os actuadores e a instrumentação necessária para a operação da máquina. A perna podia ser estendida, variando o seu comprimento e era equipada com molas ao longo deste eixo. Um conjunto de sensores mediam o ângulo de inclinação do corpo, o ângulo da anca, o comprimento da perna, a tensão na mola da perna e o contacto com o solo. Esta primeira máquina estava limitada a operar no plano e, portanto, só se podia mover para cima e para baixo, para a frente e para trás, ou rodar no plano. Uma segunda máquina de salto (“Pogostick”), apresentada na Figura 6, dispunha de uma junta adicional na anca para permitir à perna mover-se para os lados bem como para a frente e para trás. Em operação, este robô equilibrava-se à medida que ia saltando, deslocando-se a uma velocidade máxima de 2,2 m/s. Um cabo ligava a máquina à alimentação eléctrica e ao computador de controlo. Para esta máquina, o ciclo de corrida / salto apresentava duas fases: suporte (a perna suporta o peso do corpo e o pé permanece numa localização fixa no solo) e voo (o centro de gravidade desloca-se balisticamente com a perna sem carga e livre de se mover). O controlo desta máquina era implementado por um conjunto pequeno de algoritmos simples [15]. Mais recentemente Raibert e os seus colegas construíram uma sistema bípede e um sistema quadrúpede com base nos mesmos algoritmos de controlo [15].

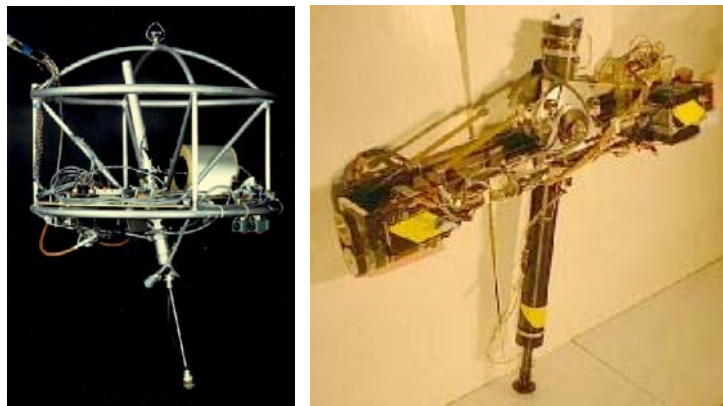


Figura 6: Pogostick e ARL Monopod II

O ARL Monopod II (Figura 6), com dois graus de liberdade e accionamento eléctrico, é um exemplo mais recente deste tipo de máquinas. Este robô apresenta duas partes: o corpo (que carrega os sensores e actuadores) e a perna (que permite o deslocamento). O ARL Monopod II dispõe de um motor eléctrico que actua um parafuso sem fim, bem como de um sistema de armazenamento / recuperação de energia através de molas.

À primeira vista pode-se pensar que não existem aplicações práticas para equipamentos com esta configuração. No entanto, a realidade é bem diferente. Estes robôs permitem saltar sobre obstáculos ou posicionar-se em locais onde existam zonas disponíveis para pousar os pés sem haver a preocupação com a estabilidade estática. Por exemplo, é de referir que em 1945 Wallace patenteou um tanque “saltitante” [16]. Segundo ele, o facto de o tanque se deslocar recorrendo a uma única perna, levaria a que tivesse uma trajectória saltitante e errante e daí a dificuldade em ser alvejado.

Uma aplicação potencial deste tipo de robôs consiste na exploração de pequenos corpos celestes (satélites, asteróides, núcleos de cometas) com uma reduzida força da gravidade. Nesta perspectiva, em 1967 Seifert propôs utilizar-se um veículo deste tipo, que denominou de “Lunar Pogo”, como um meio de locomoção eficiente dos astronautas no solo lunar [17].

Um exemplo concreto é o do veículo ППОП–Ф (“Hopper”) concebido pelo “Russian Mobile Vehicle Engineering Institute” [4]. Este robô, com uma massa de 45 Kg, era capaz de se deslocar por saltos, realizar experiências científicas e transmitir para a Terra os dados recolhidos e os resultados das experiências através de comunicação por um canal rádio, tendo sido enviado numa missão espacial a Phobos em 1998.

4.2 Robôs Bípedes

A investigação em locomoção bípede tem avançado mais lentamente quando comparado com o caso da locomoção multi-pernas, devido à dificuldade em estabelecer um controlo estável, uma vez que os robôs bípedes são mais exigentes relativamente à estabilidade dinâmica.

Desde os finais da década de 60 que a Universidade de Waseda, no Japão, tem desenvolvido uma série de sistemas bípedes controlados por computador. Em 1969 Ichiro Kato desenvolveu o robô bípede WAP-1 (Figura 7) no Humanoid Research Laboratory. Para a sua actuação, este robô dispunha de músculos artificiais em borracha, actuados pneumaticamente, e a locomoção bípede era conseguida através da repetição de movimentos ensinados previamente.



Figura 7: *Bípede WAP-1*

A maior limitação inicial destas máquinas era a sua baixa velocidade, sendo necessários 90 seg. para completar um passo. Avanços mais recentes têm permitido alcançar velocidades próximas da atingida pelo ser humano.

Já no início da década de 80, Kato e os seus colaboradores construíram o bípede WL-9DR que andava com um padrão de locomoção quase-dinâmico. Esta máquina apresentava dez graus de liberdade actuados hidraulicamente e dois pés relativamente largos.

Este sistema adoptava um modo de locomoção estático, deslocando-se ao longo de uma trajectória pré-planeada, de forma a manter o centro de gravidade dentro da base de suporte fornecida pelo pé de suporte. No entanto, uma vez em cada ciclo de locomoção, a máquina “destabilizava-se” temporariamente (inclinando-se para a frente) de forma a que o suporte fosse transferido rapidamente de um pé para o outro. Antes que a transferência se concretizasse, o pé da frente posicionava-se de forma a retornar a máquina passivamente ao equilíbrio, sem necessitar de um controlo activo. Em 1984 esta máquina foi controlada através de um padrão de locomoção quase-dinâmico, demorando cerca de um minuto para executar uma dúzia de passos de 0,5 m.

Presentemente um dos robôs bípedes que apresenta melhores capacidades de locomoção é o Honda Humanoid Robot (Figura 8). O desenvolvimento deste robô iniciou-se em 1986 e as ideias chave adoptadas para o desenvolvimento deste robô eram “inteligência” e “mobilidade”, pois o robô deveria coexistir e cooperar com os seres humanos. A ideia da Honda era criar um robô que pudesse ser utilizado na vida diária, ao contrário de um robô desenvolvido para uma aplicação particular, visando a sua introdução nas fábricas.



Figura 8: *Honda Humanoid Robot, modelo P3*

A Honda especificou também três funções que tinham que ser cumpridas: a velocidade de locomoção deveria corresponder à de um ser humano (aproximadamente 3 Km/h), a estrutura do robô deveria estar preparada para suportar braços com mão e deveria ter a capacidade de subir e descer escadas. O robô foi desenvolvido tendo por base os dados retirados da locomoção humana. A última versão deste robô, o modelo P3, foi terminado em Setembro de 1997 e apresenta uma altura de 1,6 m e um peso de 130 Kg. Dispõe de 30 graus de liberdade, accionados electricamente, e pode carregar 5 Kg em cada mão. É um robô completamente autónomo, quer em termos de capacidade de processamento, quer em termos de alimentação (carrega às costas um conjunto de baterias que lhe permitem uma autonomia de 15 minutos).

O robô bípede WABIAN (WAseda BIpedal humANoid) (Figura 9) é um dos exemplos mais avançados dos robôs bípedes que têm vindo a ser desenvolvidos no Japão no âmbito do “Humanoid Project”. O objectivo principal deste programa consiste no desenvolvimento de um robô antropomórfico que partilhe o mesmo espaço trabalho e que apresente padrões de pensamento e comportamento semelhantes ao do ser humano. Pretende-se conseguir um robô que seja capaz de interagir com os seres humanos de uma forma natural, nomeadamente ser capaz de falar e apresentar emoções.

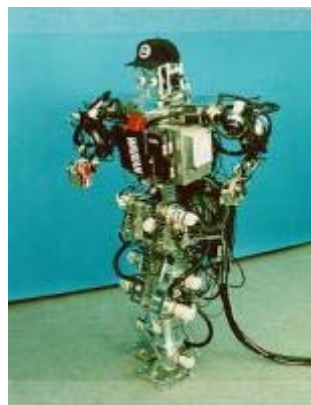


Figura 9: *WABIAN*

Este robô bípede é actuado electricamente, tem 43 graus de liberdade, um peso de 136 Kg e uma altura de 1,97 m. A cabeça apresenta a capacidade de recolher informação visual, através de um sistema de visão artificial estéreo, e áudio. A alimentação eléctrica é fornecida externamente estando, no entanto, todo o sistema de processamento e computação integrado no próprio robô.

4.3 Robôs com Quatro ou mais Pernas

A maioria dos robôs desenvolvidos com locomoção por pernas enquadra-se nesta categoria.

4.3.1 ASV - Adaptive Suspension Vehicle

Este veículo foi desenvolvido na Ohio State University, conjuntamente com a Universidade do Wisconsin e o Environmental Research Institute of Michigan, tendo sido concluído no final de 1985 (Figura 10).



Figura 10: *ASV - Adaptive Suspension Vehicle*

O veículo, com um peso de 2720 Kg e um comprimento de 5,6 m, apresenta um accionamento hidráulico alimentado a partir de um motor de combustão interna. Para a sua operação é necessário um operador humano que efectua as funções de condução e supervisão do estado do veículo. O operador controla a velocidade e a direcção de locomoção do veículo através de um “joystick”, mas o controlo individual de cada perna é assegurado por um computador central. O ASV dispõe também de um radar óptico para estudar o terreno à sua frente e decidir sobre a colocação dos pés da frente, uma vez que implementa um padrão de locomoção seguidor de líder contínuo.

Como principais características, são de referir uma capacidade de carga de 250 Kg, possibilidade de vencer uma inclinação máxima de 60%, ultrapassar valas com uma largura de 1,8 m, subir degraus verticais com um máximo de 1,65 m, ultrapassar paredes isoladas com uma altura de 1,35 m e atingir uma velocidade máxima de 2,3 m/s em terrenos regulares.

4.3.2 DANTE

O Robô DANTE II (Figura 11), desenvolvido pelo CMU Field Robotics Center, tem como aplicação a exploração de vulcões, tendo sido utilizado com relativo sucesso na exploração do vulcão do Monte Spurr (Aleutian Range) no Alaska em Julho de 1994 [3].



Figura 11: *DANTE II*

Este octópode é accionado electricamente, sendo a alimentação fornecida externamente através de um cabo que serve também de estrutura de comunicações e de cabo de resgate. Assim, o DANTE II

é capaz de descer as paredes da cratera de uma forma similar ao “rappel”, a fim de recolher e analisar os gases a altas temperaturas do solo da cratera. Para além de contribuir para o avanço da vulcanologia, um outro objectivo primário deste robô é demonstrar a possibilidade da exploração robótica de ambientes extremos, tais como os encontrados em superfícies planetárias.

4.3.3 Walking Harvester

O Walking Harvester (Figura 12) é um hexápode desenvolvido pela Plustech Oy Ltd para trabalhos nas florestas. Este veículo dispõe de três graus de liberdade em cada perna com accionamento hidráulico, alimentado a partir de um motor Diesel, permitindo-lhe alcançar uma velocidade máxima de 1 m/s. Para a sua condução é necessário um operador humano que controla a máquina através de um “joystick”. Apesar de ainda não se encontrar disponível comercialmente, este protótipo já foi distinguido com vários prémios.



Figura 12: *Walking Harvester*

4.3.4 Walking Chassis for Multipurposes

Tal como o seu nome indica esta máquina (Figura 13) não é mais do que um chassis dispo de oito pernas, para a locomoção ou a realização de trabalhos em terrenos acidentados, estabelecendo uma plataforma para a montagem de um conjunto variado de equipamentos. O veículo apresenta um accionamento hidráulico alimentado por um motor de combustão interna.



Figura 13: *Walking chassis for multipurposes*

4.3.5 Robôs para Inspeção de Tubagens

Uma área de aplicação de robôs com locomoção por pernas é a inspecção de tubagens. Já existem alguns robôs para a realização destas tarefas, que apresentam locomoção por rodas, por lagartas ou que flutuam no meio onde estão inseridos. No entanto, estes sistemas sofrem de problemas relacionados com a falta de tracção e com a dificuldade em ultrapassar obstáculos ou vencer inclinações pronunciadas nas tubagens [18].

Nesta perspectiva tem vindo a ser desenvolvido na Universidade Técnica de Munique o “Pipe Crawling Robot” [19]. Este robô apresenta oito pernas (quatro em cada extremo do corpo), dispo de três graus de liberdade, um passivo e dois accionados através de motores DC.

Este robô desloca-se empurrando duas pernas opostas contra a superfície interna dos tubos, de forma a ficar preso, e deslocando depois o corpo no sentido do movimento. Alcança uma velocidade máxima de 0,1 m/s dispondo de uma capacidade de carga de 15 Kg.

Um outro exemplo deste tipo de robôs é o “Pipe Climbing Robot” (Figura 14), sendo também vocacionado para tarefas de inspeção de tubagens e canalizações. Desenvolvido pela SIEMENS A.G. em 1995, apresenta um accionamento eléctrico, dispondo de 8 pernas, cada uma delas com dois graus de liberdade. O princípio utilizado para a locomoção é idêntico ao do Pipe Crawling Robot. Apesar de apresentar uma velocidade máxima de 0,3 m/s só dispõe de uma capacidade de carga de 700 g.

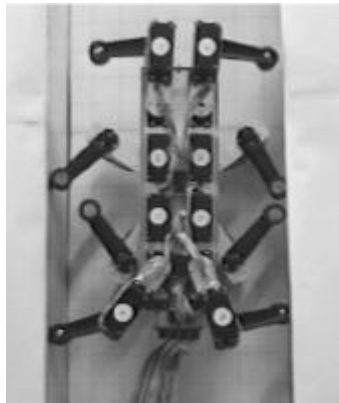


Figura 14: *Pipe Climbing Robot*

4.3.6 Robôs Trepadores

Uma outra categoria de robôs com locomoção por pernas é a dos robôs “trepadores”. Estes robôs podem ser utilizados em tarefas de inspeção técnica e diagnóstico de falhas ou avarias em reservatórios, construções em centrais nucleares, indústrias químicas, petrolíferas e de gás, na reparação e manutenção na construção civil, em acções de prevenção e combate a incêndios ou para operações de limpeza e transporte de cargas em edifícios.

Um exemplo consiste no Robug II, que tem vindo a ser desenvolvido pelo Mobile Robotics Lab da Universidade de Portsmouth e pela Nuclear Electric Plc., apresentando quatro pernas com três graus de liberdade e accionamento pneumático (Figura 15).



Figura 15: *Robug II, Wall Climbing Robot e Nynjia*

Outros exemplos são o “Wall Climbing Robot” e o “Nynjia” (Figura 15). O primeiro apresenta duas pernas com três graus de liberdade e accionamento eléctrico sendo a sucção nos “pés” garantida por

uma bomba de vácuo. Por sua vez, o “Nynjia” é um robô bípede com um método de accionamento semelhante ao caso anterior [20].

4.4 Aproximações Biológicas

Constata-se facilmente que mesmo os robôs mais avançados são francamente inferiores aos homólogos biológicos. A locomoção de um animal é muito mais versátil, mais eficiente e mais elegante. Por estes motivos é útil considerar os sistemas biológicos de controlo de forma a aplicar estes mecanismos no controlo das pernas de robôs mecânicos. Assim, tem-se vindo a investir no desenvolvimento de robôs que sejam mímicas, o mais aproximadas possível de sistemas biológicos. Entre os animais que têm vindo a ser “copiados” destacam-se os insectos, nomeadamente o insecto-pau e a barata. Em particular, a barata tem sido escolhida uma vez que apresenta capacidades notáveis de corrida (a barata *Americana periplenita* é considerada um dos animais terrestres mais rápidos, recorrendo à relação da velocidade/comprimento do corpo) e de transposição de obstáculos, a que se junta o facto de existir um razoável conhecimento sobre a sua biomecânica e o seu controlo.

Uma das instituições que tem estado mais activa neste campo é a Case Western Reserve University (CWRU) que já desenvolveu vários protótipos de robôs que pretendem ser cópias mecânicas de insectos. O CWRU Robot II é um desses protótipos e representa uma mímica do insecto-pau. Trata-se de um hexápode com três graus de liberdade activos rotacionais (accionados através de motores DC) e um grau de liberdade passivo translacional (através de uma mola pré-tensionada) em cada perna. Este robô é capaz de implementar uma variedade de padrões de locomoção, baseados nos dos insectos, e pode atravessar terrenos irregulares utilizando um controlador distribuído baseado nos mecanismos que se pensam ser os responsáveis pela coordenação das pernas no insecto-pau.

Por outro lado, o CWRU Robot III [21], pretende ser uma mímica (escala 17:1) da barata *Blaberus Discoidalis* (Figura 16). Este robô apresenta um accionamento através de cilindros pneumáticos de duplo efeito, montados de forma a garantirem forças opostas em cada junta. Ao contrário do CWRU Robot II, cujas pernas são todas iguais, o projecto do CWRU Robot III reflecte o facto de as pernas da barata terem funções e estruturas diferentes. Assim, as pernas dianteiras apresentam cinco graus de liberdade, as do meio quatro e as traseiras três graus de liberdade.

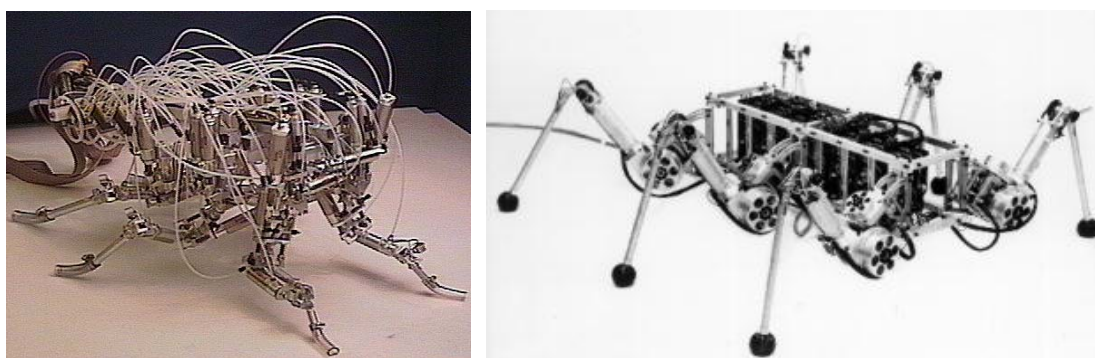


Figura 16: Robôs hexápodes CWRU II e TUM

A CWRU encontra-se agora a desenvolver um novo protótipo (CWRU Robot IV), também baseado na barata *Blaberus Discoidalis* e com uma configuração semelhante ao modelo anterior, mas com uma actuação pneumática baseada em “actuadores musculares” (actuadores de McKibben ou músculos artificiais de McKibben) [22].

O Massachusetts Institute of Technology tem também desenvolvido robôs baseados em modelos biológicos. O BOADICEA foi um dos robôs construídos e apresenta também alguns aspectos baseados na barata *Blaberus Discoidalis* [23]. Este hexápode apresenta três graus de liberdade nas

pernas traseiras e do meio e dois graus de liberdade nas pernas da frente. Todas as pernas apresentam um mecanismo pantográfico e os actuadores consistem em cilindros pneumáticos de duplo efeito.

Por último, convém referir o robô TUM desenvolvido na Universidade Técnica de Munique (Figura 16). Este robô hexápode apresenta a geometria e cinemática das pernas, os padrões de locomoção e o sistema de controlo baseado nas pernas do insecto-pau *Carausius Morosus* [24]. Cada perna deste robô executa o planeamento da sua trajectória de uma forma quase autónoma recorrendo a uma estrutura de controlo hierárquica baseada em três níveis. A coordenação entre as pernas é conseguida através da troca de informação sobre o estado de cada uma delas.

4.5 Robôs com Locomoção Híbrida

Têm também vindo a ser efectuados alguns estudos na área da locomoção mista, isto é, envolvendo robôs com pernas e cujos pés dispõem de rodas. Quando atravessa superfícies lisas o robô utiliza as rodas como forma de locomoção. Quando necessita de percorrer terrenos irregulares, ou ultrapassar obstáculos, o robô trava as rodas (passando estas a funcionar como as “solas” dos pés) e usa as pernas como forma de locomoção.

O Biped type leg-wheeled robot, é um robô que adopta este princípio de locomoção [25]. Este robô apresenta duas pernas com rodas nas extremidades accionadas electricamente. Durante a locomoção em superfícies planas desloca-se, mantendo a estabilidade estática, recorrendo às rodas. Quando encontra obstáculos trava as rodas e passa a deslocar-se recorrendo às pernas, adoptando uma estratégia de estabilidade dinâmica.

4.6 Robôs Aplicados à Área do Entretenimento

Uma das áreas em que os robôs com pernas têm vindo a conhecer bastante divulgação é na área do entretenimento. Um dos exemplares com maior sucesso é o AIBO da SONY (Figura 17). Apesar de se tratar de um robô dedicado ao entretenimento é consideravelmente complexo pois dispõe de um total de 20 graus de liberdade e de uma grande variedade de sensores.

Em Novembro de 2000 a SONY apresentou um novo robô com pernas para a área do entretenimento, sendo desta vez uma estrutura bípede (Figura 17) denominada SONY Humanoid Robot.



Figura 17: AIBO e SONY Humanoid Robot

5 Perspectivas de Desenvolvimento Futuro e Conclusões

Os sistemas de locomoção da nova geração são caracterizados pela otimização dos sistemas existentes: melhores sistemas de actuação, sistemas sensoriais mais complexos e computadores mais poderosos. No entanto, existe ainda um longo caminho a percorrer até que estes sistemas sejam comparáveis com os sistemas biológicos em termos de capacidades.

Os sistemas existentes apresentam algumas limitações importantes entre as quais são de destacar a sua reduzida autonomia energética, a falta de capacidade computacional que permita, em tempo real, implementar sistemas de controlo complexos e a comunicação com o robô sempre que os sistemas de comando e controlo não se encontram no próprio robô a controlar.

Adicionalmente a estas dificuldades de implementação que se têm vindo a sentir, existem ainda algumas questões que permanecem sem resposta, e cuja compreensão poderá contribuir para o aperfeiçoamento destes sistemas. Entre estas são de realçar:

- Como é que os animais mantêm a estabilidade?
- Que mecanismos de controlo é que os animais utilizam?
- Como obter os sinais de controlo para os actuadores das pernas que permitam ao robô manter uma postura fixa, andar ou correr arbitrariamente?
- Qual o princípio da coordenação dos movimentos durante a locomoção?

Entre as áreas em que se prevê que venha a ser efectuado uma grande trabalho de investigação num futuro próximo contam-se as seguintes:

- Aprofundamento do estudo dos sistemas biológicos e desenvolvimento de sistemas mecânicos artificiais baseados nos ensinamentos recolhidos;
- Desenvolvimento de estruturas mecânicas mais evoluídas para as pernas ;
- Concepção de sistemas de controlo mais poderosos, que permitam manter a estabilidade dinâmica dos veículos durante a locomoção, baseados em modelos matemáticos mais evoluídos.
- Construção de sensores e actuadores mais eficientes
- Refinamento dos padrões de locomoção com base nos revelados pelos seres vivos e na sua adaptação a vários tipos de terreno e de velocidade.

Em conclusão, neste trabalho apresentou-se uma perspectiva histórica e o estado da arte na área dos robôs com locomoção por pernas. Abordaram-se os aspectos principais que estão envolvidos neste campo de trabalho e foram referidos alguns dos exemplos mais significativos dos sistemas que têm vindo a ser desenvolvidos.

6 Referências Bibliográficas

- [1] Bekker, M. G.; “Introduction to Terrain Vehicle Systems”; Univ. of Michigan Press; 1969.
- [2] Hirose, S.; “Biologically Inspired Robots – Snake-Like Locomotors and Manipulators”; Oxford University Press; 1993.
- [3] Wettergreen, D.; Thorpe, C.; Whittaker, R.; “Exploring Mount Erebus by Walking Robot”; Robotics and Autonomous Systems; 1993.
- [4] Kemurdjian, A. L.; Potiemkin, E. K.; Mishkiniuk, V. K.; “Planet Rovers Today”; In Proc. of the Seventh Int. Conf. on Advanced Robotics; Spain; pp. 293-299; 1995.

- [5] Krotkov, E.; "Active Perception for Legged Locomotion: Every Step is an Experiment"; Fifth Int. Conf. on Intelligent Control; USA; 1990.
- [6] Cox, W.; "Big Muskie"; News in Engineering; Ohio State University; pp. 25-27; 1970.
- [7] Tsukagoshi, B. H.; Hirose, S.; Yoneda, K.; "The Quadruped Walking Robot on a Steep Construction Site Supported by Wires"; Workshop II: New Approaches on Dynamic Walking and Climbing Machines; Eight IEEE Int. Conf. on Advanced Robotics; USA; 1997.
- [8] Rosheim, M. E.; "In the Footsteps of Leonardo"; IEEE Robotics & Automation Magazine; Vol. 4; No. 2; pp. 12-14; 1997.
- [9] Shigley, J. E.; "The Mechanics of Walking Vehicles"; Land Locomotion Laboratory Report No. LL-71; U.S. Army Tank-Automotive Command; Warren, Michigan; 1960.
- [10] Morrison, R. A.; "Iron Mule Train"; Off-Road Mobility Research Symposium; Int. Society for Terrain Vehicle Systems; USA; pp. 381-400; 1968.
- [11] Mosher, R. S.; "Test and Evaluation of a Versatile Walking Truck"; Off-Road Mobility Research Symposium; Int. Society for Terrain Vehicle Systems; USA; pp. 359-379; 1968.
- [12] McGhee, R. B.; "Finite State Control of Quadruped Locomotion"; Second Int. Symposium on External Control of Extremities; Yugoslavia; 1966.
- [13] Song, S.-M.; Waldron, K. J.; "Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle"; The MIT Press; 1989.
- [14] Matsuoka, K.; "A Model of Repetitive Hopping Movements in Man"; Fifth World Congress on Theory of Machines and Mechanisms; Int. Fed. for Information Processing; 1979.
- [15] Raibert, M. H.; "Legged Robots that Balance"; The MIT Press; 1986.
- [16] Wallace, H. W.; "Jumping Tank Vehicle"; Patent Number 2,371,368; 1942.
- [17] Seifert, H. S.; "The lunar pogo stick"; J. of Spacecraft and Rockets, Vol. 4; N. 7; 1967.
- [18] Hertzberg, J.; Christaller, T.; Kirchner, F.; Licht, U.; Rome, E.; "Sewer Robotics"; In Proc. of the 5th Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behaviour; UK; pp. 427-436; 1998.
- [19] Rossmann, T.; Pfeiffer, F.; "Eight-Legged Robot for Pipe Inspection"; Workshop II: New Approaches on Dynamic Walking and Climbing Machines; IEEE Int. Conf. on Advanced Robotics; USA; July 7-9, 1997.
- [20] Hirose, S.; Nagakubo, A.; Toyama, R.; "Machine That Can Walk and Climb on Floors, Walls and Ceilings"; IEEE Int. Conf. on Advanced Robotics; pp. 753-758; 1991.
- [21] Nelson, G. M.; Quinn, R. D.; Bachmann, R. J.; Flannigan, W. C.; Ritzmann, R. E.; Watson, J. T.; "Design and Simulation of a Cockroach-like Hexapod Robot"; In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation; USA; pp. 1106-1111; 1997.
- [22] Colbrunn, R. W.; "Design and Control of a Robotic Leg with Braided Pneumatic Actuators"; M. Sc. Thesis; Case Western Reserve University – Dept. of Mech. and Aerospace Eng.; 2000.
- [23] Binnard, M. B.; "Design of a Small Pneumatic Walking Robot"; M. Sc. Thesis; Massachusetts Institute of Technology – Dept. of Mech. Eng.; 1995.
- [24] Pfeiffer, F.; Weidemann, H.; Eltze, J.; "The Tum-Walking Machine"; Intelligent Automation and Soft Computing; Vol. 1; N.º 3; pp. 307-323; 1995.
- [25] Matsumoto, O.; Kajita, S.; Saigo, M.; Tani, K.; "Biped-Type Leg-Wheeled Robot"; Advanced Robotics; Vol. 13; N.º 3; pp. 235-241; 1999.