

Sistemas Robóticos de Locomoção Quadrúpede e Hexápode

Coordenação de Movimentos e Síntese de Sistemas

1. Padrões de Locomoção

Uma perna é um elemento de locomoção descontínua pois pode ser elevada, movida para um ponto de apoio e colocada no solo, antes de iniciar um novo deslocamento. A sequência das diferentes fases do movimento é descrita pelo padrão de locomoção (*gait*). Assim, um padrão de locomoção descreve o movimento colectivo das pernas, definindo o instante da elevação e o local da colocação de cada pé, coordenando simultaneamente estas acções com o movimento do corpo nos seus graus de liberdade. Consequentemente, os padrões de locomoção descrevem e determinam a velocidade, a direcção do movimento e a mobilidade de um animal ou de uma máquina locomotora.

Muitos dos estudos relativos à análise de padrões de locomoção fornecem dados curiosos sobre a locomoção animal. Por exemplo, torna-se claro que sob certas condições (e.g., para uma dada velocidade) todos os membros de uma espécie adoptam um padrão de locomoção similar (frequentemente, diferentes espécies usam padrões similares). Uma conclusão plausível é que o padrão de locomoção adoptado é óptimo de acordo com as condições do movimento. As razões para esta optimalidade podem estar relacionadas com a estabilidade, a estrutura das pernas, a velocidade ou a mobilidade. Um dos aspectos que tem despertado maior interesse na comunidade científica é a determinação de padrões de locomoção óptimos em diferentes condições. Uma boa com-

preensão deste fenómeno permitirá realizar uma escolha apropriada dos padrões de locomoção a usar por máquinas locomotoras em diferentes condições de terreno.

1.1 Selecção do padrão de locomoção em máquinas locomotoras

A selecção do padrão de locomoção depende de vários factores tais como as condições do terreno, a estabilidade, a facilidade do controlo, a suavidade do movimento do corpo, ou ainda dos requisitos de velocidade, mobilidade e consumo de energia. A tabela 1 apresenta os princípios de selecção de um padrão de locomoção.

Uma vez que a selecção do padrão de locomoção depende fortemente das condições do terreno, é fundamental estudar estas condições e as exigências que colocam.

1.2 Evolução do estudo dos padrões de locomoção

Dada a complexidade dos padrões de locomoção vários aspectos são ainda mal compreendidos. Contudo, diversos investigadores trabalharam nesta área e estabeleceram algumas conclusões interessantes. O trabalho de Muybridge (1899), usando fotografias sucessivas, surge como a primeira referência no estudo dos padrões de locomoção (figura 1). Mais recentemente, devem referir-se Tomovic e Karplus (1961), que foram os primeiros investigadores a usarem métodos matemáticos na análise, da locomoção por pernas.

	Padrão de Locomoção	Estabilidade do Padrão	Tipo de Terreno	Implementação Computacional	Consumo Energético	Suavidade do Movimento do Corpo
PERIÓDICO	Onda	boa	perfeito	fácil	não uniforme	boa
	Fase Constante	boa	perfeito	fácil	uniforme	boa
	Onda Invertida	razoável	perfeito	fácil	não uniforme	boa
	Fase Constante Invertida	razoável	perfeito	fácil	uniforme	boa
	Periódico Destro	boa ou razoável	regular	razoável	uniforme ou não uniforme	boa
	Contínuo Seguidor do Líder	razoável	regular ou irregular	razoável	não uniforme	boa
NÃO PERIÓDICO	Descontínuo Seguidor do Líder	muito boa	irregular	difícil	não uniforme	fraca
	Grandes Obstáculos	razoável	com obstáculos	razoável	não uniforme	fraca
	Contacto Preciso	muito boa	irregular com obstáculos	muito difícil	não uniforme	fraca
	Livre	boa	irregular	difícil	não uniforme	razoável

Tabela 1: Selecção de padrões de locomoção

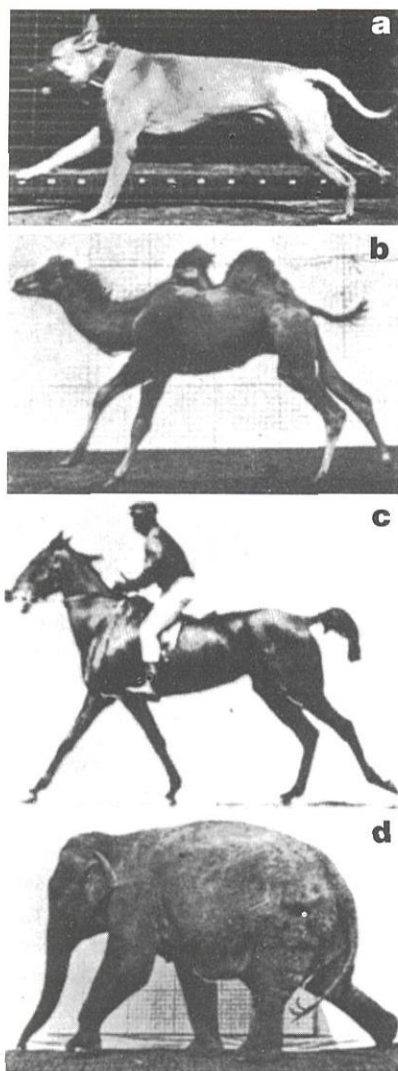


Figura 1 - Simetria na locomoção animal. Fotografias de Muybridge (1957).

Animais apresentados em configuração simétrica, a meio da fase de apoio para vários padrões.

Em todos os casos, o corpo encontra-se à altura mínima, o centro de suporte está localizado abaixo do centro de massa, a perna mais atrás acabou de ser levantada, e a perna mais à frente está prestes a tocar o solo

- a) galope rotacional;
- b) galope transversal;
- c) galope leve;
- d) furta-passo.

um pé o valor 1 e ao estado de *contacto* o valor 0, é possível construir uma matriz que mostra o estado das pernas em

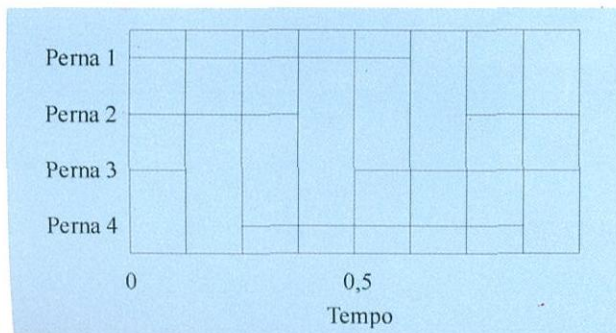


Figura 2 - Diagrama de um padrão de locomoção quadrúpede

Em 1965, Hildebrand desenvolveu o conceito de fórmula de locomoção para descrever padrões simétricos de um modo bastante completo e preciso. Assim, definiu *passo* como a distância percorrida pelo corpo num ciclo de locomoção e introduziu dois conceitos importantes:

- *factor de ocupação* - fracção temporal do ciclo de movimento da perna, no qual esta se encontra na fase de suporte;
- *fase da perna* - fracção do ciclo temporal, correspondente ao atraso entre o contacto da primeira perna e o contacto de outra perna com o solo.

A figura 2 mostra um diagrama de locomoção, introduzido por Hildebrand para descrever os padrões de locomoção dos cavalos.

Em 1968, McGhee generalizou o trabalho de Hildebrand introduzindo uma base matemática na análise de padrões de locomoção. McGhee introduziu as terminologias básicas de *comprimento do passo*, *factor de ocupação* e *fase* e definiu sequência e duração de um movimento através de uma matriz de locomoção. Assim, atribuindo ao estado de *elevação* de

todas as fases de um ciclo de locomoção.

McGhee e Frank estudaram padrões de locomoção estáveis estaticamente e provaram, que existe um único padrão de locomoção que maximiza a margem de estabilidade longitudinal de um quadrúpede. McGhee e Jain conceberam também uma descrição matemática do padrão de locomoção baseada na sequência de eventos conforme ilustrado na figura 3. Os vértices dos trapézios correspondem aos pontos de apoio dos pés, enquanto que os rectângulos a tracejado e os pontos a cheio indicam respectivamente as projecções verticais do corpo da máquina e do centro de gravidade, no início da configuração de suporte.

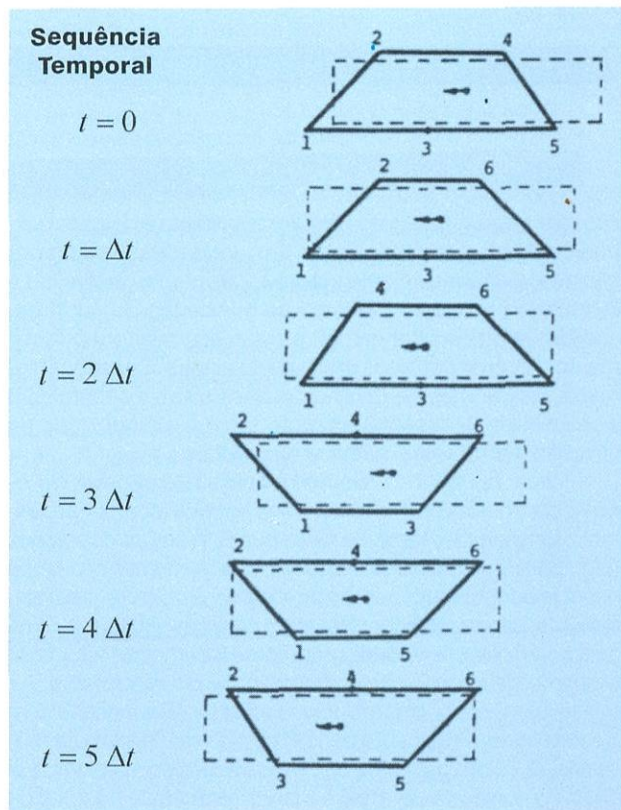


Figura 3 - Padrões de locomoção sucessivos de um hexápode. A seta indica a posição da projecção no final da configuração.

Bessonov e Umnov mostraram, numericamente, que um padrão de locomoção hexápode regular e simétrico maximiza a margem de estabilidade longitudinal de todos os padrões hexápodes periódicos.

Em 1979, foi introduzido por McGhee e Iswandhi, um padrão de locomoção não-periódico conhecido por *padrão livre*. Este padrão é adequado à locomoção em terrenos que incluem regiões pouco favoráveis com muitas zonas proibidas. Estas regiões devem ser evitadas pelo sistema de controlo que decide quando e como devem ser colocados os pés do robô. Por este motivo, uma grande parte do esforço actual é dirigido para a implementação de sistemas capazes de adquirir, interpretar e integrar informação sobre o ambiente operacional.

Tsai implementou, com sucesso, o padrão *seguidor do líder* num robô hexápode. No modo *seguidor do líder*, a perna da frente dá um passo na direcção do apoio seleccionado, a perna do meio segue a "pegada" da perna da frente e a perna traseira segue a "pegada" da perna do meio.

A maioria dos padrões de locomoção usados nos protótipos laboratoriais são úteis apenas em ambientes estáticos, pois não têm autonomia para atravessar terrenos varia-

dos gerando automaticamente os padrões necessários. Mais recentemente, novos padrões de locomoção têm sido propostos para ultrapassar as dificuldades existentes em terrenos naturais. Os robôs deverão ter a capacidade de comutar entre padrões de locomoção conhecidos, quando em terrenos familiares, e aprender novos padrões, quando confrontados com outros tipos de terrenos.

2. Síntese de Máquinas Locomotoras

Uma análise retrospectiva da construção de máquinas locomotoras mostra que o processo de síntese conduziu à reprodução de estruturas, funções e princípios da locomoção encontrada nos seres vivos, usando as técnicas possíveis no estado de desenvolvimento de cada época. Esta aproximação, baseada em métodos heurísticos e em analogias, deu lugar a uma larga variedade de soluções originais.

2.1 Actuadores musculares e músculos artificiais

Os músculos humanos são actuadores pouco convencionais, pois são, não somente geradores de força, mas também geradores de movimento. Ainda que o desempenho dos actuadores seja crítico no que concerne aspectos tais como eficiência, velocidade, potência, tempo de resposta e avançamento, a escolha de sistemas de actuação permanece restringido a unidades eléctricas, hidráulicas e pneumáticas. Estes dispositivos têm sido usados desde há vários anos mas, sofrem limitações bem conhecidas o que condiciona a sua aplicação à robótica.

As novas técnicas para converter energia (nas suas diferentes formas) em movimento mecânico são uma área de investigação com desenvolvimentos num vasto número de campos, incluindo:

- mímicas dos músculos (McKibben) para melhorar o controlo de sistemas pneumáticos;
- actuadores piezoeléctricos;
- actuadores com *efeito de forma memorizada (memory shape effect)*;
- líquidos hidráulicos com propriedades *electro-reológicas*.

O primeiro músculo artificial, um polímero de cadeia longa, conhecido por músculo de pH, foi descoberto independentemente por Kuhn e Katchasky em 1940, sendo a dilatação e contracção destes materiais produzida por ionização reversível das cadeias laterais do constituinte poli-iónico estimulada por ácidos-bases.

Desde então o número de polímeros e técnicas de estimulação, tem aumentado, incluindo actualmente a utilização de estímulos por pH, oxidação-redução, estímulos eléctricos e iónicos. Entre os mais bem sucedidos tipos de gel, encontra-se o Álcool Poli-vinílico - Ácido Poli-acrílico, que devidamente tratado, utilizando água para produzir dilatação e acetona para produzir contracção, replica à escala macroscópica do ciclo de conversão de energia química/mecânica do músculo orgânico.

Os testes isométricos permitem obter forças de 30N/cm² em contracção, à taxa máxima de 11%/s. A utilização do tecido muscular em camadas sobrepostas, não produz qualquer redução na taxa de contracção/dilatação, no entanto, a força de contracção tangencial aumenta com a área da secção transversal da fibra muscular. Os testes isotónicos mostram que as taxas de resposta em função da carga são reprodutíveis, desde que não ocorra deformação plástica, o que, para estas fibras musculares, conduz à definição de uma carga limite de segurança de 42N/cm². Estes sistemas

produzem respostas com o perfil força/velocidade semelhante ao dos músculos naturais, embora a taxa de contracção destes seja mais rápida. O máximo coeficiente peso/potência obtido através dos músculos artificiais é de 5,8mW/g, consideravelmente inferior ao dos músculos naturais que varia entre 40mW/g e 200mW/g, dependendo do músculo considerado. Os músculos naturais apresentam também potência bastante superior aos músculos artificiais, embora a energia total disponibilizada pelos dois sistemas seja comparável, nomeadamente 0,6-0,8 J/g para os músculos naturais e 0,4 J/g para os músculos sintéticos.

Os valores relativamente baixos do coeficiente peso/potência, apresentados pelos músculos artificiais, estão relacionados com a espessura das fibras, que limita a taxa de resposta em contracção. O coeficiente pode ser melhorado, aumentando a temperatura até ao máximo de 50°C ou, em alternativa, reduzindo a espessura das fibras, o que poderá conduzir a melhorias apreciáveis no seu desempenho. Existem estudos em curso, por parte da Mitsubishi Rayon Co. Ltd., para produção de fibras contendo 60 filamentos de 20mm de diâmetro, prevendo-se para fibras da ordem das dezenas de mm, um desempenho semelhante ao dos músculos humanos.

2.2 Síntese estrutural

A estrutura de uma máquina locomotora envolve o número de pernas, o modo como estão posicionadas em relação ao corpo, os graus de mobilidade local do corpo, o número de eixos das pernas e as suas posições relativas. O problema da escolha do número de pernas é discutido sob diferentes pontos de vista tais como:

- **Manutenção de uma postura estável quando o veículo está parado** – uma das funções do veículo consiste em permanecer estacionário num determinado lugar, qualquer que seja a topografia, enquanto mantém uma postura estável. Um modo de o conseguir é usar veículos com três ou mais pernas. Um robô tripode é estruturalmente simples e parece ter um alto grau de controlabilidade na locomoção dinâmica.
- **Praticabilidade da locomoção estática** – para conseguir um deslocamento estável estaticamente, o corpo do veículo deve ser suportado, em qualquer instante, pelo menos por três pernas. Deste modo, a máquina locomotora deve ter quatro ou mais pernas. Se se medir a praticabilidade do modo de locomoção verifica-se que esta melhora à medida que o número de pernas aumenta, até atingir um número de sete pernas. A partir deste ponto mantém-se aproximadamente constante.
- **Melhoria da velocidade da locomoção estática** – a velocidade máxima da máquina é determinada pela velocidade máxima estrutural de balanço da perna. Quando o número de pernas é inferior a seis é necessário adoptar um andamento dinâmico para obter a velocidade máxima.
- **Praticabilidade e estabilidade da locomoção dinâmica** – quando uma máquina tem três ou mais pernas a praticabilidade da locomoção dinâmica é melhorada.
- **Redução do número de graus de liberdade** – o peso dos actuadores deve ser minimizado.

Em termos de morfologia deve-se responder a questões tais como:

- Deve-se adoptar pernas do tipo insecto (figura 4) ou do tipo mamífero?
- É preferível usar actuadores rotacionais ou lineares?
- É mais eficiente usar uma estrutura mecânica série ou uma estrutura do tipo paralela?

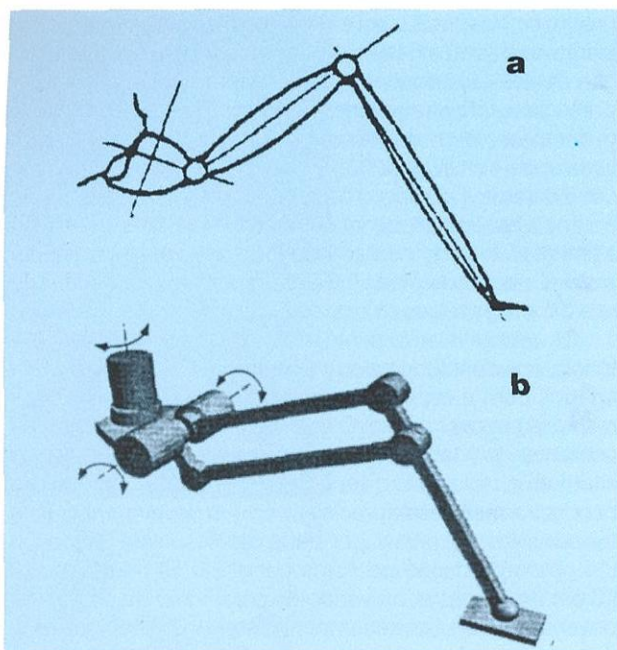


Figura 4 - a) Constituição da perna de um insecto; b) Mecanismo equivalente da perna.

A maioria dos robôs com pernas apresenta um mecanismo de juntas do tipo série devido à simplicidade do algoritmo para o controlo das juntas e ao espaço de trabalho que permitem. Contudo, os mecanismos série apresentam, frequentemente, folgas causadas pelas engrenagens e por uma rigidez insuficiente. Por outro lado, o posicionamento das pernas em relação ao corpo pode assumir várias formas: lateral, abdominal e radial (figura 5). O posicionamento lateral e radial garante um maior polígono de suporte face ao abdominal, enquanto que o posicionamento radial melhora a mobilidade do veículo e fornece as melhores possibilidades na cobertura do volume de trabalho de cada perna individualmente.

Autores como Umnov, Nakano, Orin, Kumar, Waldron e Mita, consideram que um bom funcionamento do robô requer, pelo menos, três graus de liberdade em cada perna. Assim, assegura-se o posicionamento do pé em qualquer ponto do volume de trabalho que pode ser atingido através de cadeias cinemáticas.

2.3 Eficiência energética

A eficiência energética das máquinas locomotoras é um factor decisivo para o uso, no futuro, destes sistemas de transporte. Consequentemente, a minimização da energia consumida por unidade de distância é essencial para um veículo que se pretende autónomo e que deverá transportar a sua própria fonte de energia.

Estudos experimentais dos aspectos energéticos da locomoção e simulações computacionais permitem conceber modelos de avaliação quer para a locomoção humana e de animais quer para o movimento de robôs bípedes e quadrúpedes/hexápodes estáveis estaticamente.

Para avaliar e comparar o desempenho energético das máquinas locomotoras, foi definida uma medida que inclui não só o custo de locomoção em termos de potência consumida mas também a massa deslocada e a velocidade atingida. Gabrielli e von Kármán (1950) definiram *resistência específica* como a razão entre a potência consumida e o produto da velocidade máxima pelo peso da máquina, permitindo comparar o desempenho energético dos veículos terrestres, aquáticos e aéreos, bem como dos sistemas biológicos, independentemente do seu tamanho, velocidade e configuração.

No caso da locomoção humana, foram estudados, vários critérios computacionais de optimização energética, concordantes com estudos experimentais. Verificou-se que a actividade muscular de diferentes indivíduos, com estrutura similar, apresenta diferenças consideráveis mesmo para o caso de movimentos semelhantes.

Relativamente às máquinas locomotoras, a geometria das pernas constitui o aspecto mais importante do seu desenho, afectando de modo crucial a eficiência do veículo. As pernas devem ter uma estrutura simples, por motivos de fiabilidade mecânica, produzindo um movimento rectilíneo horizontal, do pé relativamente ao corpo, utilizando um único actuador para optimizar a eficiência energética.

No caso das máquinas locomotoras estáveis estaticamente, foram elaborados modelos, em concordância com os resultados experimentais, considerando um movimento rectilíneo uniforme. Considerou-se que a energia é consumida para suportar o peso da máquina, fornecer tracção útil e obter movimento oscilatório das pernas relativamente ao corpo, desprezando a energia dissipada na deformação do solo, o atrito nas juntas e transmissão. Durante o ciclo de locomoção os actuadores das pernas realizam trabalho positivo, libertando energia durante a aceleração, e trabalho negativo, recuperando energia na desaceleração. A energia recuperada durante uma fase do ciclo de locomoção pode ser armazenada (por exemplo sob a forma elástica), podendo ser utilizada posteriormente, noutra fase do ciclo de locomoção, reduzindo assim a energia total necessária à locomoção.

A figura 6 apresenta a *energia específica consumida* e em função da velocidade V para diferentes meios de transporte e animais, bem como os resultados das simulações computacionais para máquinas de locomoção pesadas e os hexápodes com pernas telescópicas ShMTE e ShM75. As estimativas obtidas a partir dos modelos são concordantes com os resultados experimentais demonstrando a possibilidade de construir máquinas locomotoras com energias es-

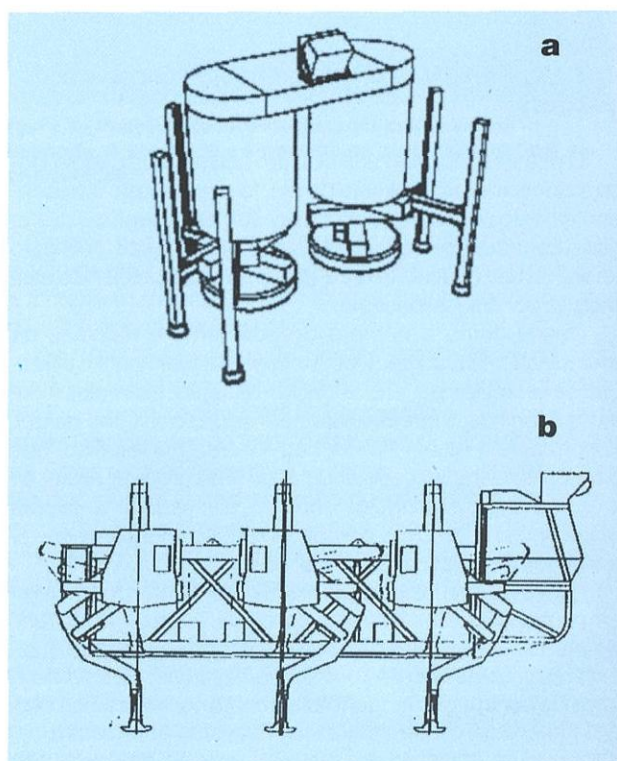


Figura 5 - Configurações de máquinas locomotoras. a) AMBLER: posicionamento radial das pernas; b) ASV: posicionamento lateral das pernas;.

pecíficas consumidas iguais às dos veículos com lagartas, embora com velocidades máximas de locomoção inferiores.

Para velocidades típicas de locomoção, a energia consumida pelos animais é bastante inferior à das máquinas locomotoras ou dos modelos estimativos. A maior parte da energia consumida para velocidades elevadas destina-se ao movimento oscilatório das pernas. Os animais reduzem este consumo passando ao modo de locomoção dinâmica e deste ao modo de corrida, o que lhes permite aumentar a duração relativa da fase de transporte, com a consequente redução do *factor de ocupação*. No modo de corrida, verifica-se um consumo energético adicional devido à aceleração e travagem do centro de massa da máquina, relacionado com a fase de voo. Os animais utilizam ainda as propriedades elásticas dos tendões, músculos e ossos para a recuperação de energia.

2.4 Modelos matemáticos

As propriedades dinâmicas de sistemas multi-pernas podem influenciar significativamente a resposta face às solicitações. Estes sistemas são caracterizados por fenómenos dinâmicos complexos pelo que a maioria dos trabalhos de simulação tem sido puramente a nível cinemático ou então tem considerado apenas os efeitos dinâmicos do corpo. Esta simplificação é aplicável aos sistemas que exibem movimentos lentos ou naqueles em que a razão entre os pesos do corpo e das pernas é muito elevada. Os efeitos dinâmicos podem também ser minimizados pela escolha apropriada dos padrões de locomoção (e.g. o veículo ASV - *Adaptive Suspension Vehicle*, de seis pernas).

Para qualquer movimento, um robô multi-pernas pode ser considerado, como uma combinação complexa de cadeias abertas e fechadas. As pernas que contactam o solo formam malhas fechadas envolvendo o corpo e o solo enquanto que as pernas em suspensão representam cadeias individuais abertas. Existem algoritmos eficientes para cadeias abertas (métodos de Walker e Orin (1982), Featherstone (1983) e Brandt et al. (1986)) ao passo que os algoritmos para a simulação de cadeias fechadas (Rodríguez e Kreuz (1988), Lilly e Orin (1989)) estão ainda pouco desenvolvidos. Uma aproximação, que inclui o efeito de acomodação (*compliance*) ao solo e que evita o cálculo de cadeias fechadas, consiste no *Modelo Acomodativo das Juntas*, desenvolvido por Shih (1986) et al. Neste caso, o sistema de cadeias fechadas é completamente desacoplado através da modelização das juntas e dos contactos com o solo por molas e amortecedores. As forças obtidas por estes sistemas dependem somente do estado do sistema, permitindo a solução pelo método de Newton-Euler para o movimento de cada corpo.

Freeman e Orin (1991) desenvolveram a aproximação "estrutura em árvore desacoplada" para a simulação de um quadrúpede. Este método desacopla o sistema de cadeia fechada através da introdução de sistemas mola/amortecedor no solo. O restante sistema consiste numa cadeia aberta que pode ser analisada por um algoritmo apropriado.

2.5 Distribuição de força

Para além do controlo de posição e de velocidade, é muitas vezes desejável controlar as forças exercidas pelo sistema. Por exemplo, quando os veículos são usados para suportar manipuladores é necessário saber se as forças exigidas pelos braços podem ser suportadas pelo veículo, nomeadamente através do seu sistema de suspensão, sem ocorrer deslizamento. Por outro lado, a experiência mostrou que os esquemas de controlo baseados em força são mais apropriados para o controlo de veículos de pernas com estruturas volumosas (Pugh et al., 1990).

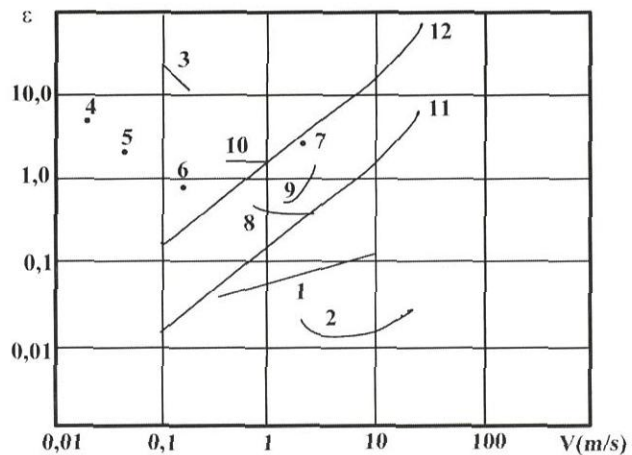


Figura 6 - Resistência específica e em função da velocidade de movimento V , para diferentes meios de transporte: 1- humanos, 2- cavalos, 3- máquina locomotora electromecânica da Universidade Estatal de Ohio (USA), 4- máquina locomotora electromecânica do Instituto de Mecânica da Universidade Estatal de Moscovo, 5- modelo à escala de uma máquina locomotora electromecânica NMSHa, 6- NMSHa com caixa de duas velocidades nas juntas das pernas, 7- máquina locomotora hidráulica da General Electric (USA), 8- máquina de locomoção hidráulica ASV da Universidade Estatal de Ohio (USA), 9- máquina locomotora electromecânica ShM75, 10- máquina locomotora hidráulica do Instituto de Mecânica da Universidade Estatal de Moscovo, 11, 12- estimativas energéticas do modelo ShMTE com actuadores de diferentes eficiências.

Um outro problema importante consiste em estabelecer uma distribuição apropriada de forças nos pés para obter uma determinada força e binário no corpo. Por um lado, é necessário assegurar que as forças e os binários exercidos não excedam a capacidade das pernas e, além disso, que os pés não deslizem. Por outro lado, existe um número infinito de forças/binários de actuação que conduzem a uma mesma força resultante. Como a procura da distribuição óptima de forças deve ser feita em tempo real, é essencial que o algoritmo seja capaz de identificar rapidamente os casos em que um comando de força não é realizável e, nesse caso, formular um novo plano. Trabalhos em problemas deste tipo incluem o uso de programação linear para calcular os binários nos actuadores quando diferentes forças se exercem em várias direcções. No passado esta formulação deu origem a algoritmos muito lentos que não seriam adoptáveis numa computação em tempo-real. Klein e Kittivatcharapong adoptam matrizes pseudoinversas para simplificar a formulação da programação linear. Parte da teoria correspondente foi derivada de trabalhos sobre manipuladores cinematicamente redundantes e permitir uma decomposição do problema original numa forma mais tratável para optimização. Outros estudos trataram a solução da matriz pseudoinversa para a componente vertical de força, ou ainda, a utilização de soluções do núcleo da matriz. Em ambos os casos, as forças de reacção do pé são limitadas ao interior de uma pirâmide que está inscrita no cone de atrito descrito pelo coeficiente local de fricção.

Certos autores consideram a decomposição do problema da distribuição de forças em dois subproblemas (Kumar, 1987; Waldron, 1986). Com esta estratégia, a distribuição de força é solucionada eliminando as forças de interacção entre os pés. As forças de interacção entre dois pés é definida como a diferença entre as duas componentes de força ao longo da linha de conexão entre elas. Esta restrição conduz a uma solução computacionalmente atractiva, incorporando na

solução as restrições de atrito. Contudo, existem condições do terreno nas quais as forças de interação são necessárias para um desempenho apropriado tornando, assim, esta aproximação pouco viável.

Outras aproximações, mais gerais, foram sugeridas por Nakamura, Kiyoshi e Yoshikawa (1989). Estes investigadores sugerem uma base de trabalho onde a dinâmica do sistema e a distribuição de força são tratadas simultaneamente. Contudo, não é claro se a aproximação conduz a esquemas de computação realizáveis em tempo real. É também de referir, Luh e Zheng (1985) que desenvolveram o trabalho no campo de robôs com cadeias cinemáticas fechadas e manipuladores cooperantes. Mais recentemente Gardner (1991) descreve técnicas de optimização não linear para resolver a distribuição de forças de modo a minimizar a razão entre a força tangencial e a força normal, nos pontos de contacto do pé. São definidas duas tarefas representativas e é especificado um exemplo com base num *Veículo de Suspensão Adaptativa*.

3. Discussão e Conclusões

O interesse da robótica móvel é inquestionável devido às numerosas aplicações que representa. Nesta área, têm particular interesse as "máquinas locomotoras" devido à sua grande mobilidade em terrenos naturais, pois não requerem uma superfície de suporte contínua e conduzem a uma separação entre o movimento do corpo e o movimento dos pés. No entanto, existe a necessidade de desenvolver sistemas de controlo e de sensores que permitam evitar os choques e as acelerações inerentes à locomoção por pernas.

De acordo com a estrutura e o modo de funcionamento dos sistemas robóticos com pernas, a estabilidade pode ser abordada sob os pontos de vista estático e dinâmico. A estabilidade estática apresenta limitações de velocidade e de capacidade de manobra, enquanto que a estabilidade dinâmica possibilita maiores velocidades de locomoção exigindo, no entanto, um sistema de controlo mais complexo.

Uma das ferramentas mais importantes no estudo do movimento colectivo das pernas consiste na análise dos padrões de locomoção. Nesta perspectiva, foram estudados vários padrões com diferentes desempenhos em termos de estabilidade, adequação ao tipo de terreno, implementação computacional, consumo energético e suavidade do movimento do corpo.

A introdução de uma base matemática na análise dos padrões de locomoção, bem como a definição de um conjunto de conceitos fundamentais e de critérios de estabilidade, contribui para a compreensão dos padrões de locomoção dos seres vivos que revelam propriedades importantes.

A escolha do padrão de locomoção mais adequado a terrenos irregulares, exige o desenvolvimento de sistemas de reconhecimento do tipo de terreno, de algoritmos de decisão, e a capacidade de aprendizagem de outros padrões, quando confrontados com novos terrenos.

A adopção, por parte dos seres vivos, de padrões de locomoção iguais em condições de movimento semelhantes conduz à hipótese de optimalidade dos mesmos nessas condições. Nesta perspectiva, um dos componentes críticos para o desempenho dos sistemas de locomoção são os actuadores pois os dispositivos utilizados (eléctricos, hidráulicos ou pneumáticos) revelam várias limitações, encontrando-se em desenvolvimento novas técnicas para converter energia em movimento mecânico.

A definição da estrutura de uma máquina locomotora tem sido efectuada sob diferentes pontos de vista, de acordo com os objectivos pretendidos, nomeadamente a manutenção de uma postura estável com o veículo parado, a praticabilidade e a melhoria da velocidade com um modo de locomoção estático, a praticabilidade e a estabilidade com um modo de locomoção dinâmico e a redução do peso dos actuadores. A adopção de pernas do tipo insecto ou do tipo mamífero, de actuadores rotacionais ou lineares e de estruturas mecânicas, série ou paralela, são algumas das questões levantadas.

Por último, a eficiência energética é também um dos parâmetros cruciais na avaliação do desempenho das máquinas locomotoras, uma vez que a minimização da energia despendida por unidade de distância percorrida é vital para um veículo que se pretende autónomo.

O caminho a seguir no estudo da locomoção por pernas aponta claramente, no sentido da combinação entre o estudo dos animais e a construção de máquinas. Os sistemas biológicos, constituem um grande factor de motivação, enquanto provas vivas das suas potencialidades, em virtude do seu excelente desempenho, fornecendo a partir dos seus detalhes de funcionamento, orientações preciosas. Entre as dificuldades no estudo dos sistemas biológicos encontram-se a medição precisa de numerosas variáveis, preparação das experiências. Pelo contrário, as máquinas locomotoras construídas em laboratório constituem uma fonte de experimentação controlada que possibilitam medições cuidadas e que, podem ser redesenhadas para testar novos modelos. No entanto, não apresentam desempenhos ao nível dos revelados pelos sistemas biológicos.

A análise dos sistemas vivos, por um lado, é a simulação e a síntese laboratorial de máquinas locomotoras, por outro, permitem investigação complementar, cada qual com as suas fraquezas e virtudes. Em conjunto, conduzem a princípios que clarificam ambos os domínios, independentemente dos detalhes de implementação. Face a tarefas semelhantes, ambos os sistemas estão sujeitos às mesmas leis físicas e limitações ambientais, pelo que as soluções adoptadas poderão reger-se por princípios comuns.

4. Referências

- [1] M. H. Raibert, *Legged Robots That Balance*, MIT Press, 1986.
- [2] S.-M. Song e K.J. Waldron, *Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle*, Boston: MIT Press, 1989.
- [3] D.J. Manko, *A General Model of Legged Locomotion on Natural Terrain*, Kluwer, Hestingham Electric Coop., 1992.
- [4] R. McN. Alexander, "The Gaits of Bipedal and Quadrupedal Animals", *Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 3, Nº. 2, pg. 49-59, summer 1984.
- [5] K. Arikawa e S. Hirose, "Development of Quadruped Walking Robot TITAN-VIII", *Proc. IROS'96*, pg. 208-214, 1996.
- [6] K. Berns, St. Cordes e W. Ilg, "Adaptive, Neural Control Architecture for the Walking Machine LAURON", *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS'94*, pg. 1172-1177, Munique, 1994.
- [7] H. Cruse, J. Dean, U. Müller e J. Schmitz, "The Stick Insect as a Walking Robot", *Proc. of the Fifth International Conference on Advanced Robotics, ICAR'91*, pg. 936-940, Pisa, Itália, 1991.
- [8] T. Emura e A. Arakawa, "Attitude Control of a Quadruped Robot during Two Legs Supporting", *Proc. of the Fifth*

- International Conference on Advanced Robotics, ICAR'91, pg. 711-716, 1991.
- [9] P.S. Freeman e D.E. Orin, "Efficient Dynamic Simulation of a Quadruped Using a Decoupled Tree-Structure Approach", Int. Journal of Robotics Research, Vol. 10, Nº. 6, pg. 619-627, Dec. 1991.
- [10] J.F. Gardner, "Characteristics and Approximations of Optimal Force Distribution in Walking Machines on Rough Terrain", Proc. of the Fifth International Conference on Advanced Robotics, ICAR'91, pg. 613-618, 1991.
- [11] D.M. Gorinevsky e A.Yu. Shneider, "Force Control in Locomotion of Legged Vehicle over Rigid and Soft Surfaces", Proc. of the Fifth International Conference on Advanced Robotics, ICAR'91, pg. 609-612, 1991.
- [12] S. Hirose, M. Nose, H. Kikuchi e Y. Umetani, "Adaptive Gait Control of a Quadruped Walking Vehicle", Robotics Research: The First International Symposium, pg. 253-277, MIT Press, 1984.
- [13] S. Hirose, T. Masui, H. Kikuchi, Y. Fukuda e Y. Umetani, "TITAN III: A Quadruped Vehicle - Its Structure and Basic Characteristics", Robotics Research: The Second International Symposium, ISRR'85, pg. 325-331, MIT Press, 1985.
- [14] S. Hirose, K. Yoneda, K. Arai e T. Ibe "Design of Prismatic Quadruped Walking Vehicle TITAN VI", Proc. of the Fifth International Conference on Advanced Robotics, ICAR'91, pg. 723-728, 1991.
- [15] A. Pedotti, V.V. Krishnan, e L. Stark "Optimization of Muscle-Force Sequencing in Human Locomotion", Mathematical Biosciences 38, pg. 57-76, 1978.
- [16] S.M. Song, V.J. Vohnout, K.J. Waldron, e G.L. Kinzel "Computer-Aided Design of a Leg for an Energy Efficient Walking Machine", Mechanism and Machine Theory Vol.19, No. 1, pg. 17-24, 1984.
- [17] D.G. Caldwell "Polymeric Gels: Pseudo Muscular Actuators and Variable Compliance Tendons", Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS'92, pg. 950-957, Raleigh, 1992.
- [18] V. V. Lapshin "Energy Consumption of a Walking Machine: Model Estimations and Optimization", ICAR, pg. 420-425, 1995.

*Faculdade Engenharia Universidade do Porto

** Universidade Moderna - Porto
Bolsheiro da Fundação para Ciência e Tecnologia
(Praxis XXI/BD/9541/96)







**A NOVA DIMENSÃO
EM CONTROLO E
VARIACÃO
ELECTRÓNICA**

Conversores de Frequência **MOVITRAC**®
Controladores **MOVIDRIVE**®
Servo-controladores **MOVIDYN**®
em conjugação com moto-redutores **SEW**


**UMA GERAÇÃO
DE AVANÇO**

UM SÓ FORNECEDOR

A SOLUÇÃO COMPLETA



SEW
EURODRIVE





**SERVICÓ DE
EMERGÊNCIA
24/24 Horas**
Telef.: (031) 23732

SEW-EURODRIVE PORTUGAL

N.º 234 (Mealhada-Luso)
 Telef. (031) 23684 - Fax (031) 23685
 Apartado 15 - 3050 MEALHADA