Aula 2 – Introdução à Robótica Móvel

Mecanismos de Locomoção

Prof. Assoc. Marcelo Becker

SEM - EESC - USP

Laboratório de Robótica Móvel

LabRoM

Prof. Dr. Marcelo Becker _ SEM – EESC _ USP

Sumário da Aula

- **Introdução**
- Atuadores
- Locomoção
- Exercícios Recomendados
- Bibliografia Recomendada

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC – USP

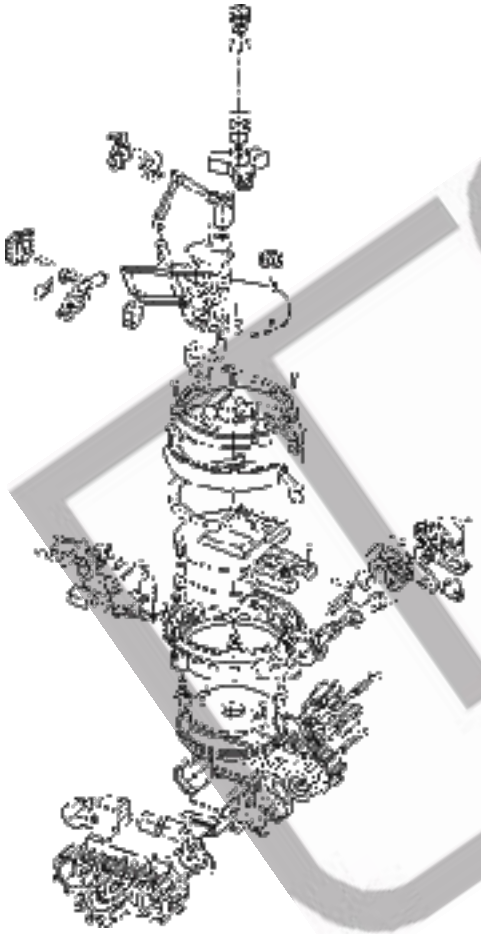
Introdução

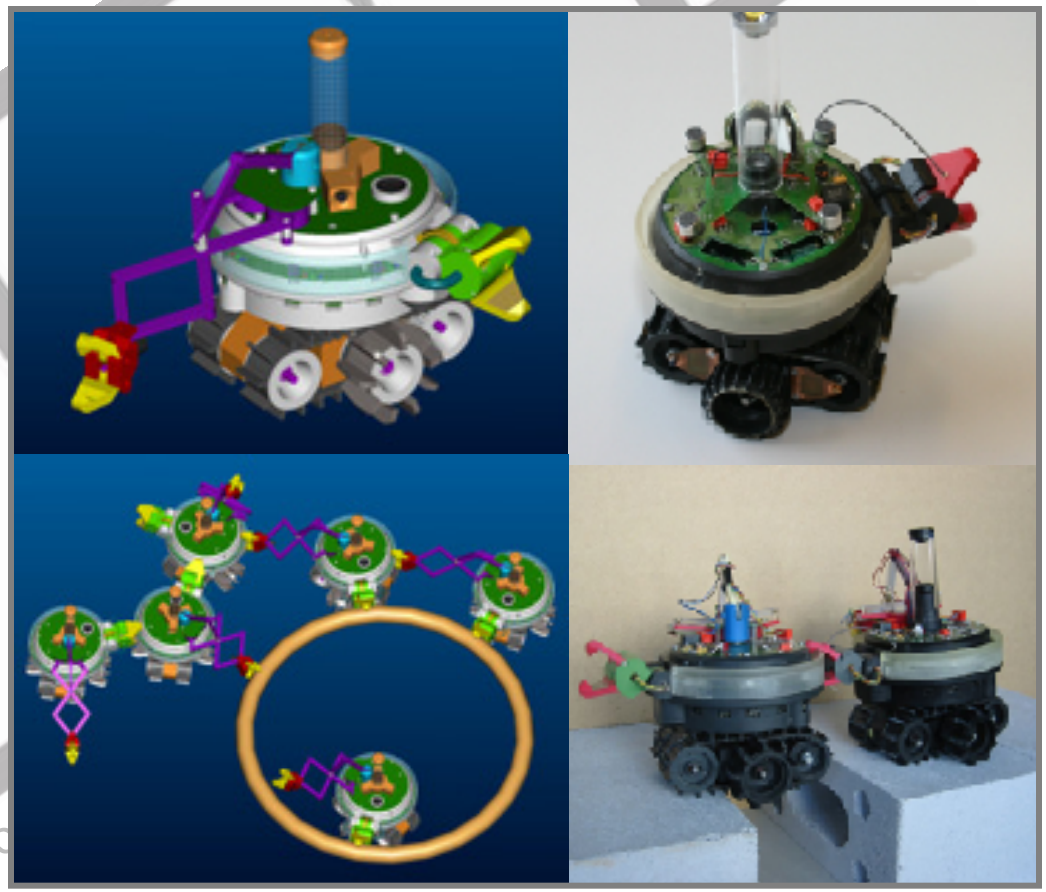
- Robôs Móveis
  - Sistemas que necessitam mover-se de modo eficiente
  - Integração de diferentes elementos
    - Estrutura Mecânica
    - Acionamentos
    - Sensores
    - Baterias / Fontes de Energia
    - Eletrônica Embarcada
    - Etc.

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Introdução

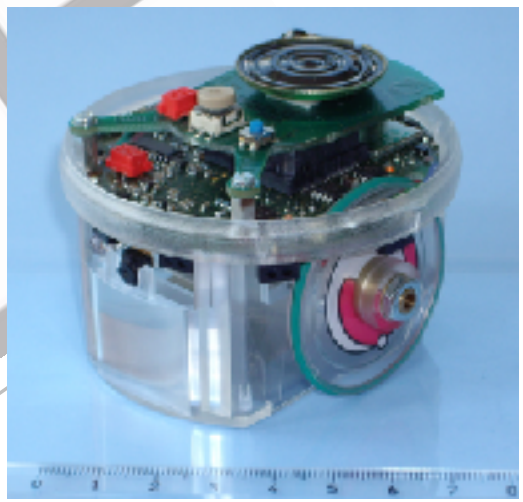
- S-bot, EPFL, Suíça - Ø116mm





Introdução

- Carcaça
  - Funcionalidade:
    - Conter:
      - Placas de Circuitos Eletrônicos
      - Atuadores
      - Sensores
      - Juntas



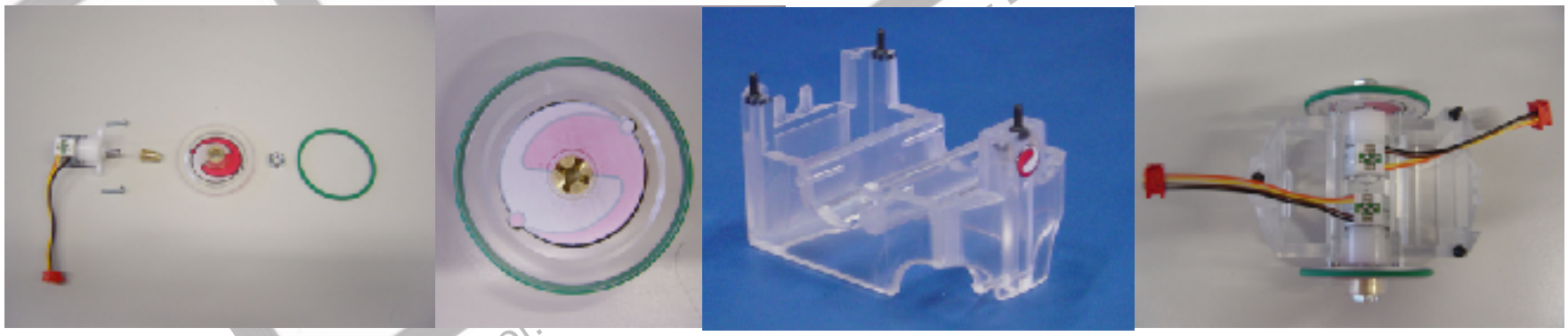
e-Puck

  - Robôs adaptados a partir de veículos existentes
    - Eletrônica e Atuadores embarcados

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Introdução

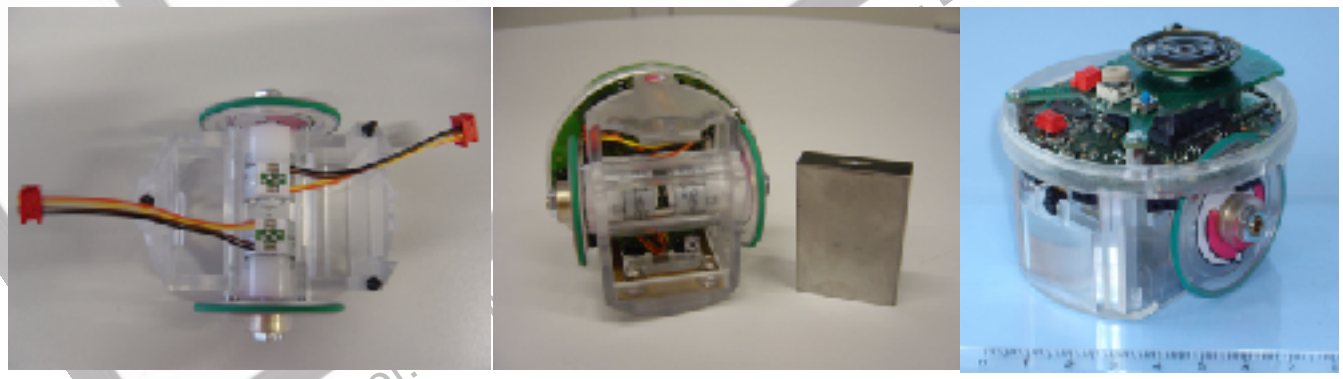
- e-Puck, EPFL, Suíça – Ø70mm
  - Mecânica simples e elegante
    - Rodas: Ø41mm
    - Motor: 20 passos / volta
    - Redução: 50:1
    - Velocidade Máx: 1000 passos/s



EESC – USP

Introdução

- e-Puck, EPFL, Suíça – Ø70mm
  - Mecânica simples e elegante
    - Rodas: Ø41mm
    - Motor: 20 passos / volta
    - Redução: 50:1
    - Velocidade Máx: 1000 passos/s



EESC – USP

Sumário da Aula

- Introdução
- **Atuadores**
- Locomoção
- Exercícios Recomendados
- Bibliografia Recomendada

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC – USP

Atuadores

- Motores de Combustão
  - Alta densidade energética
    - 12kWh/kg – gasolina
    - 200Wh/kg – Bateria de Lítio

    } 60 vezes maior...
  - Baixa eficiência
    - Gasolina: ~30%
    - Motores Elétricos: ~90%
  - Maior peso embarcado
  - Emissão de poluentes (uso *indoor*??)

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Atuadores

- Motores de Combustão
  - Uso *outdoor:*
    - Carros, caminhões, tratores e ônibus autônomos
    - Robôs voadores (helicópteros, aviões, balões, etc.)
    - Robôs andadores...

M – EESC – USP

Atuadores

CASE IH Automono

https://www.youtube.com/watch?v=9LTAEdzc5nw

Prof. Dr. Marcelo

Atuadores

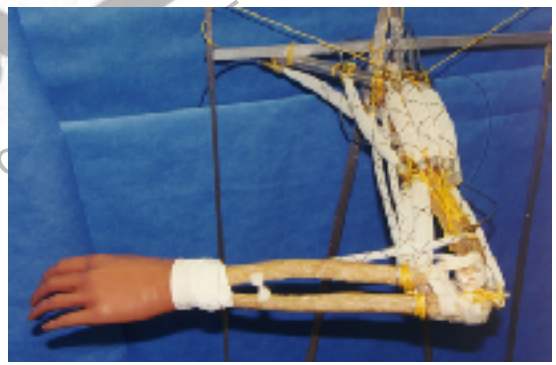
- Pneumáticos e Hidráulicos
  - Acionamento Hidráulico
    - Alta relação torque-peso
    - Empregado para grandes cargas
    - Manutenção das linhas e pressão do óleo
      - Problema...
  - Acionamento Pneumático
    - É altamente não linear
      - Problema...

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC – USP

Atuadores

https://www.youtube.com/watch?v=NDQlOqsr84s

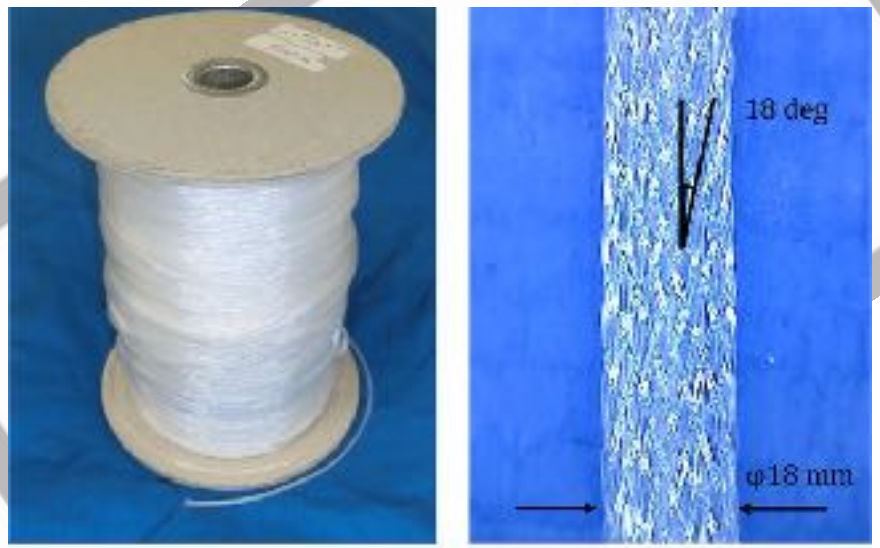
- Músculos Artificiais (pneumáticos/hidráulicos)
  - Exemplo: McKibben Muscles
  - São leves, fáceis de serem fixados, têm alta eficiência e potência para pequenos movimentos
    - Necessitam de um compressor
      - Problema...



Dr. Marc SEM – EESC – USP

Atuadores

Multifilament Muscles

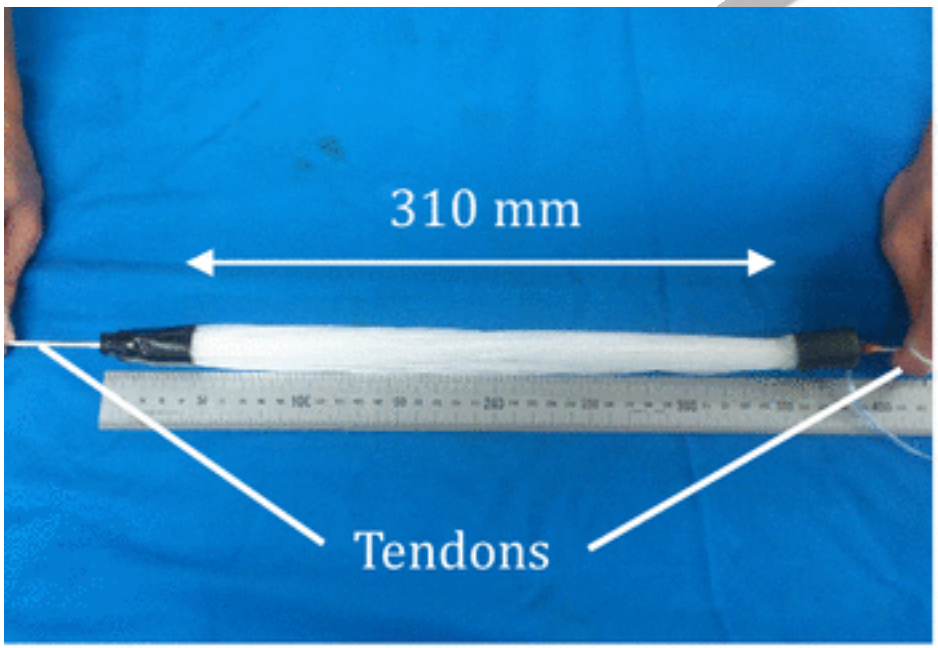


(a) Mass-manufactured thin McKibben muscle (b) Thin McKibben muscle detail

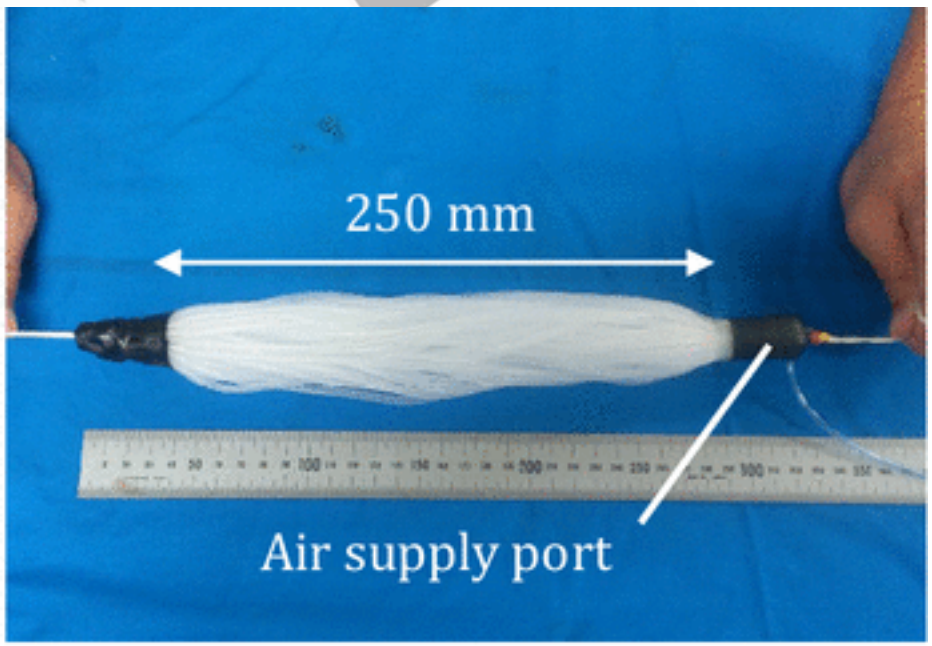
https://robomechjournal.springeropen.com/articles/10.1186/s40648-016-0061-3

Atuadores

Multifilament Muscles



(a) Air pressure 0 MPa

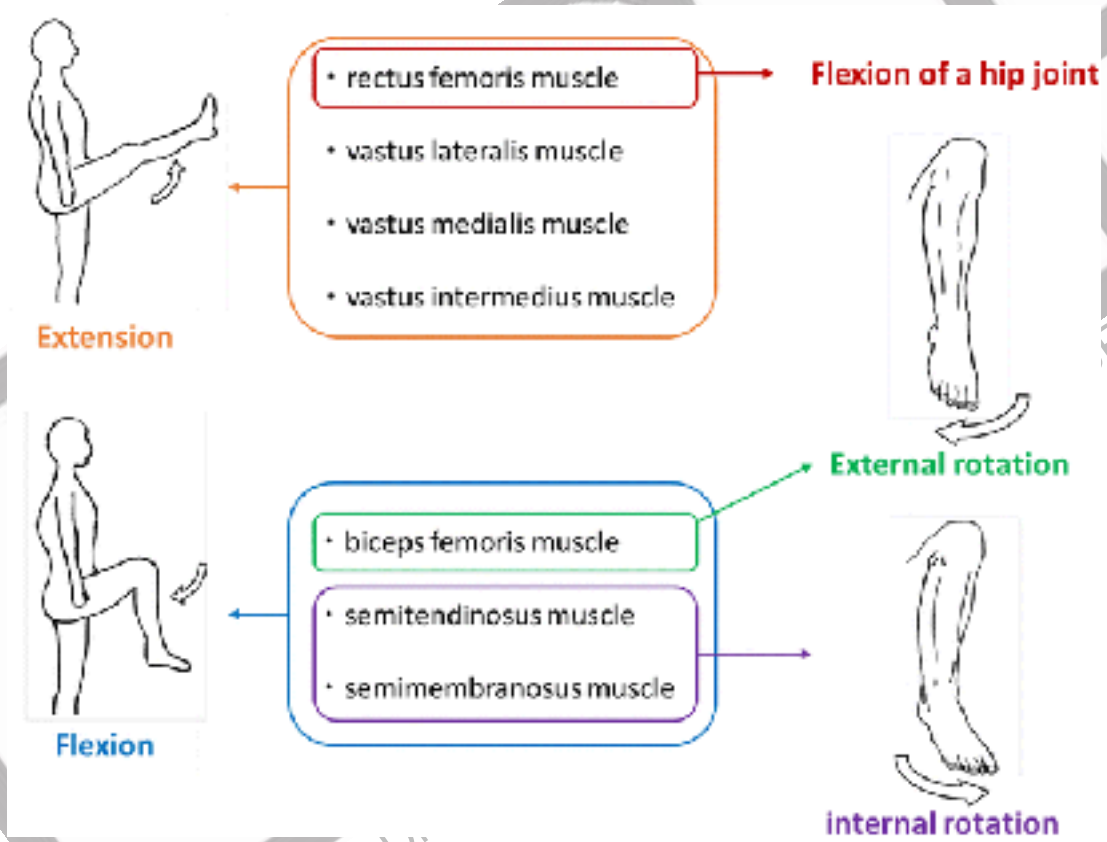


(b) Air pressure 0.25 MPa

https://robomechjournal.springeropen.com/articles/10.1186/s40648-016-0061-3

Atuadores

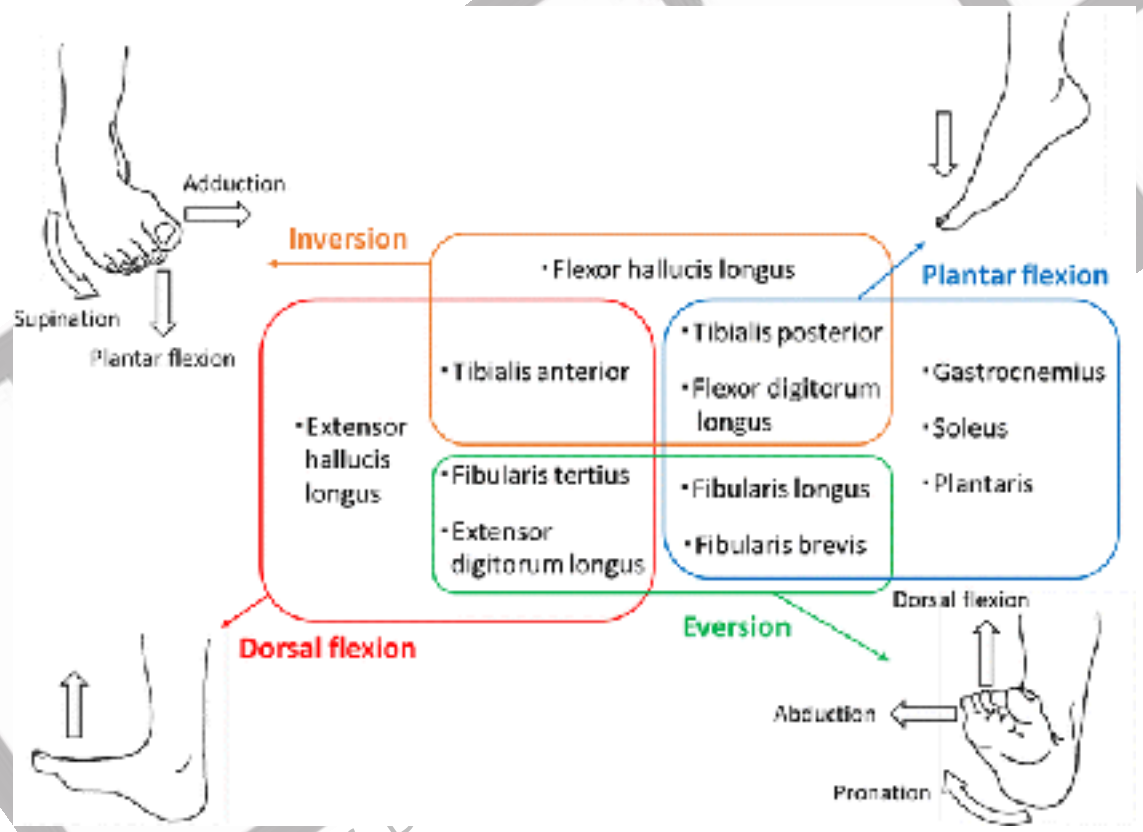
Multifilament Muscles



https://robomechjournal.springeropen.com/articles/10.1186/s40648-016-0061-3

Atuadores

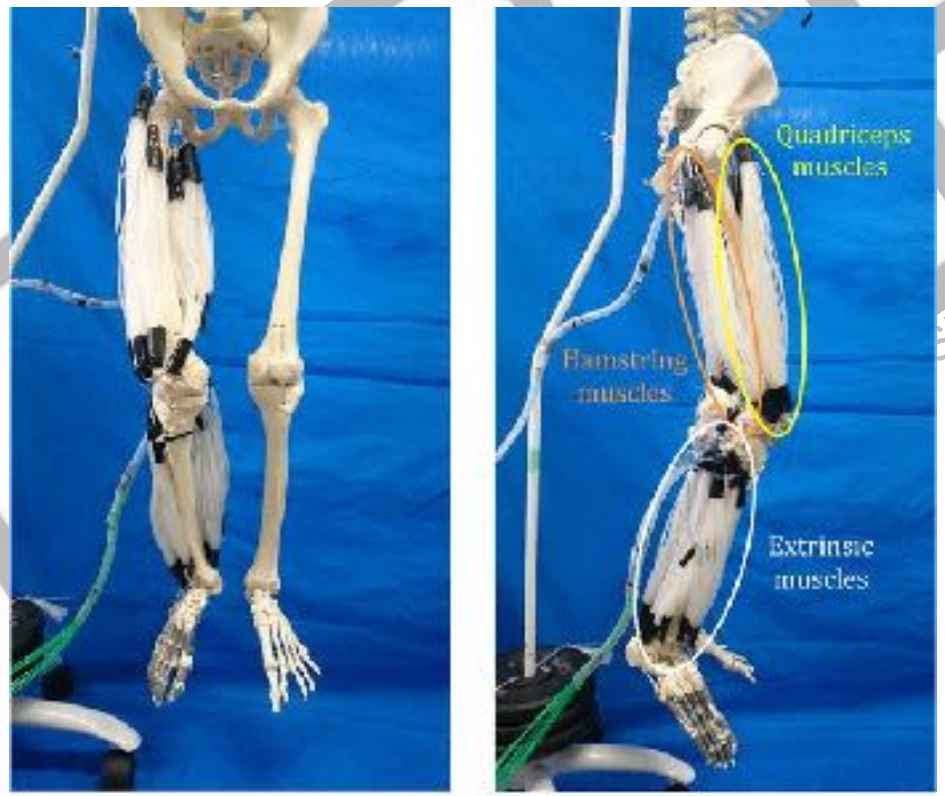
Multifilament Muscles



https://robomechjournal.springeropen.com/articles/10.1186/s40648-016-0061-3

Atuadores

Multifilament Muscles



(a) Front view (b) Side view

https://robomechjournal.springeropen.com/articles/10.1186/s40648-016-0061-3
https://www.youtube.com/watch?v=0ZBD2tcKOU4

Atuadores

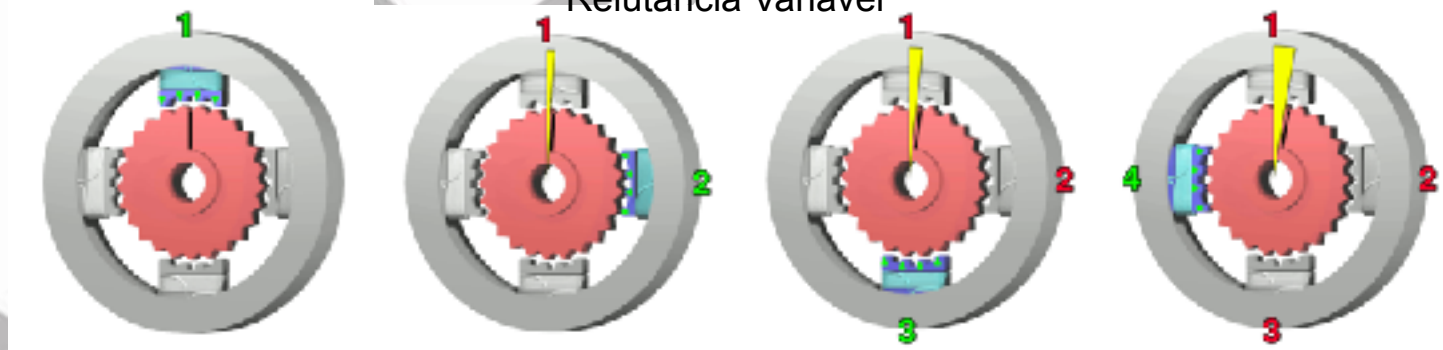
- Motores Elétricos
  - De mW a MW
  - Fáceis de controlar
  - Excelente eficiência (~90%)
  - Não emite poluentes
  - Podem ser integrados com redutores e encoders
  - Servo-motores (controle de posição integrado)

arcelo Becker - SEL – EESC – USP

Atuadores

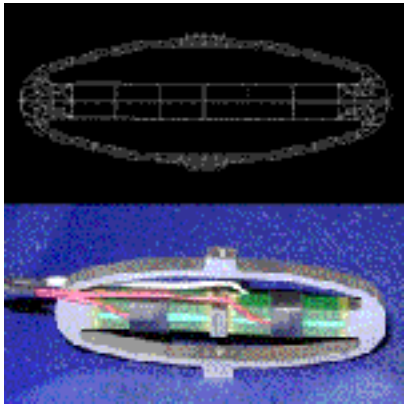
- Motores de Passo
  - sistema eletromecânico que converte pulsos elétricos em movimentos mecânicos discretos (passos)
  - Vantagens:
    - controle compatível com a tecnologia digital
    - Pode ser utilizado em malha aberta com precisão de ±1 passo

SEM – EESC – USP



Atuadores

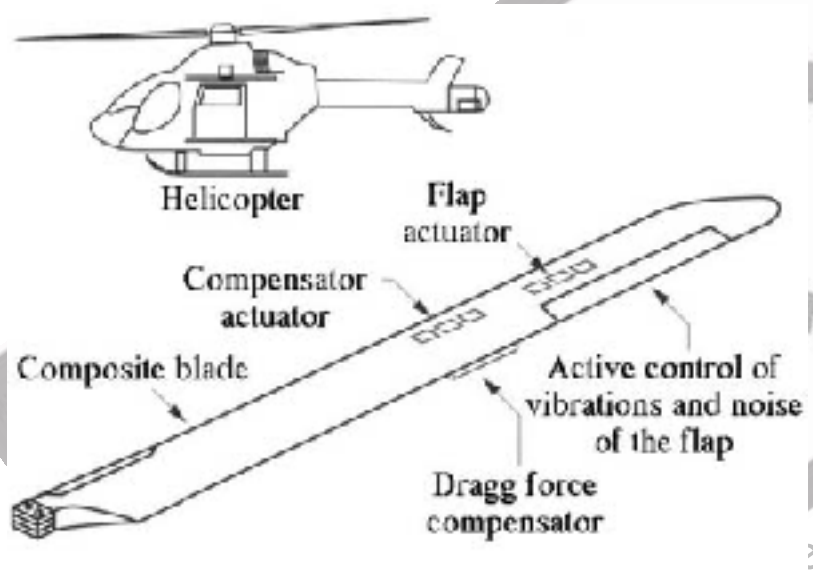
- Atuadores Piezoelétricos
  - Possuem cristais que, quando sujeitos a deformações mecânicas, produzem uma diferença de potencial entre pares de faces opostas e vice-versa
  - Características:
    - Leves
    - Pequenos
    - Resposta Rápida
    - Requerem alta voltagem
    - Produzem pequenos deslocamentos

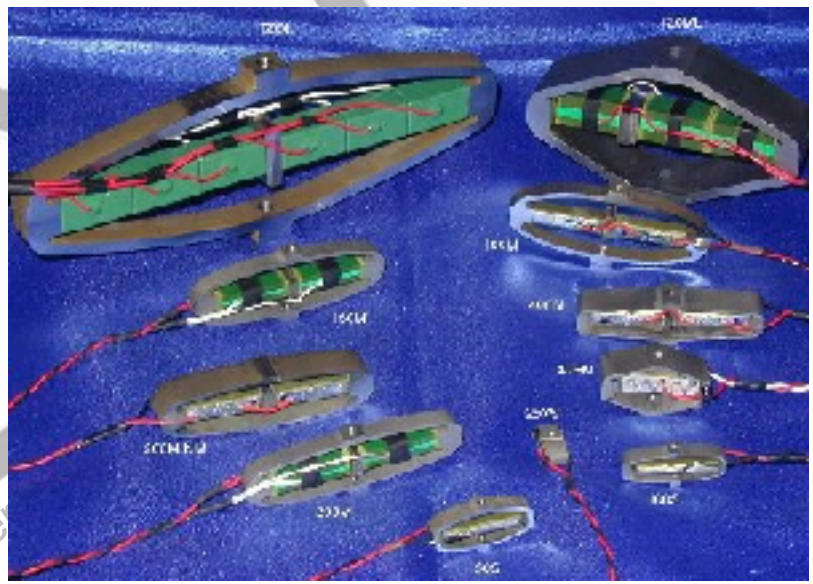


Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Atuadores

- Atuadores Piezoelétricos



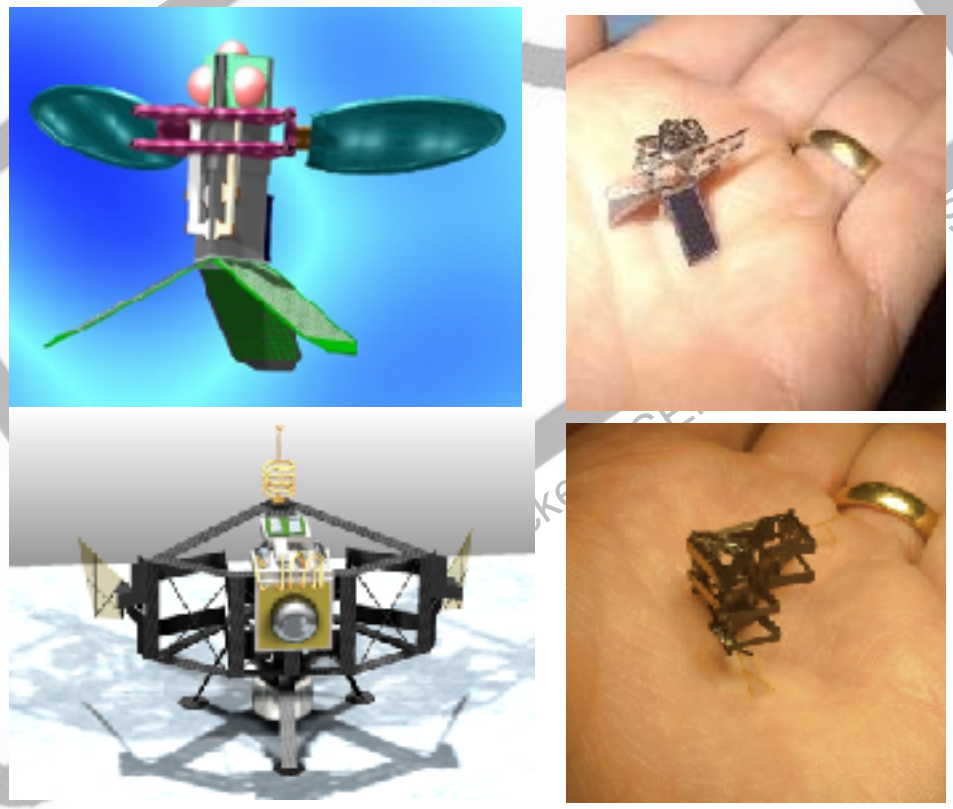


Fonte: Cedrat Technologies

Prof. Dr. Marcelo Becker

Atuadores

- Atuadores Piezoelétricos
  - Robôs Inseto Voador – UC Berkeley



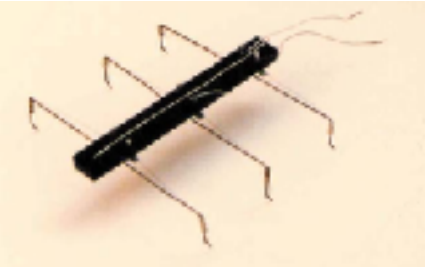
Atuadores

- Liga com Memória (*Shape Memory Alloy*)
  - Possuem habilidade de retornar a um formato previamente definido quando sujeito a uma mudança de temperatura
  - Comercialmente utilizados:
    - Aços liga Ni-Ti (Nitinol)
    - Aços liga CuZnAl e CuAlNi
  - Características:
    - Pequenos e leves
    - Baixa eficiência (~10%)
    - Lentos (0,1-1s)

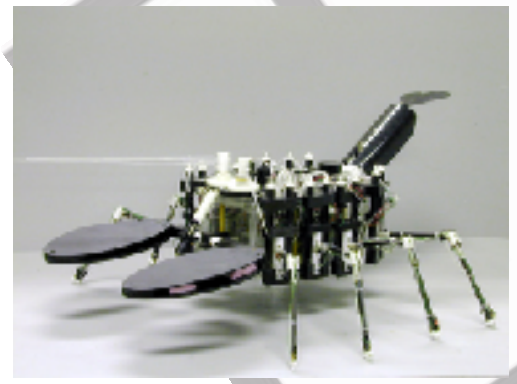
Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

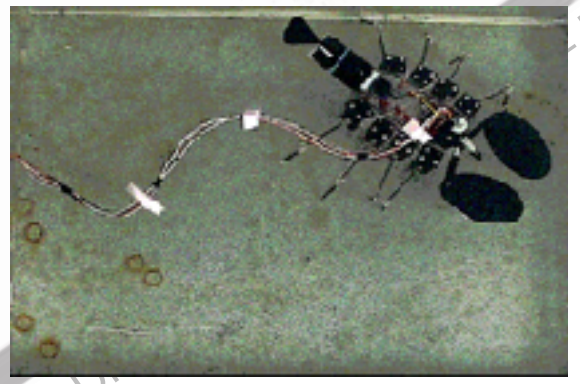
Atuadores

- Liga com Memória (*Shape Memory Alloy*)

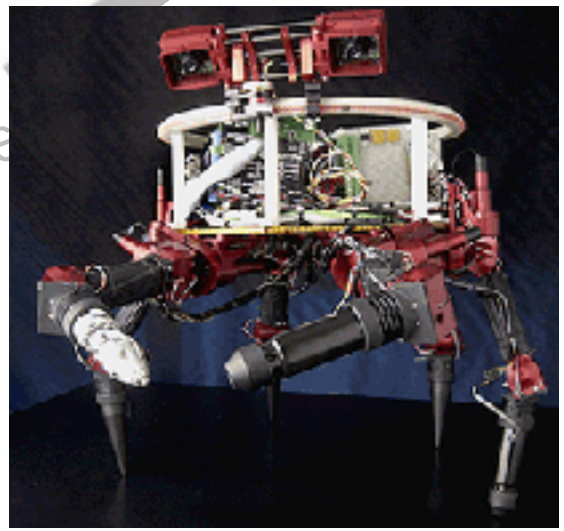


Stiquito





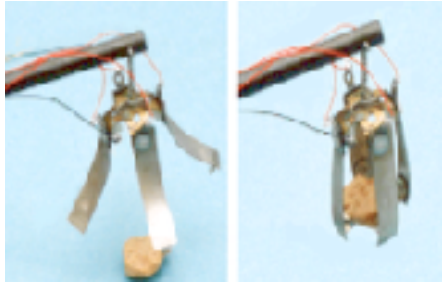
Robot Lobster – Northeastern University - USA



LEMUR - NASA - USA

Atuadores

- Polímero Eletroativo (ElectroActive Polymer)
  - Podem reproduzir o comportamento de músculos
  - Foco de diversas pesquisas
  - Características:
    - Baixa força
    - Densidade de energia maior que a produzida por ligas com memória
    - Aplicações restritas (no momento)



Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Atuadores

- Transformação de Movimentos
  - Rotacional para Translacional
    - Guia com fuso de esferas
    - Pinhão Cremalheira
    - Correia e Polias
    - Came Seguidor

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Atuadores

- Comparação – Armazenamento de Energia

Propriedade	CAP-XX Supercapacitor	Capacitor	Micro-célula de Energia	Baterias
Tempo de carga / descarga	m-s a s	p-s a m-s	10 a 300h	1 a 10h
Temp. de operação [ºC]	[-40;+85]	[-20;+100]	[+25;+90]	[-20;+65]
Voltagem de oper. [V]	2,5	8 a 800	0,6	1,25 a 4,2
Capacitância	100mF a 2F	10pF a 2,2mF	N/A	N/A
Vida útil	> 30.000h	> 100.000c	1.500 a 10.000h	150 a 1500c
Peso	1 a 2g	1g a 10kg	20g a >5kg	1g a >10kg
Dens. de Potência [kW/kg]	10 a 100	0,25 a 10.000	0,001 a 0,1	0,005 a 4
Dens. de Energia [Wh/kg]	1 a 5	0,01 a 0,05	300 a 3.000	200
Pulso de Carga	< 100A	< 1000A	< 150mA/cm²	< 5A

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Atuadores

- Autonomias Operacionais de Robôs

Robô	Consumo [W]	Bateria [Wh]	Autonomia [h]
MC1	1	0,25	0,25
Alice	0,015		8
e-Puck		5	3
S-Bot	10	10	1
Aibo	13		1,5
RoboMower	500		3
P3-AT			3-6
Stanley	200.000	gasolina	6-10

Prof. Dr. Marcelo Becker – SEM – EESC – USP

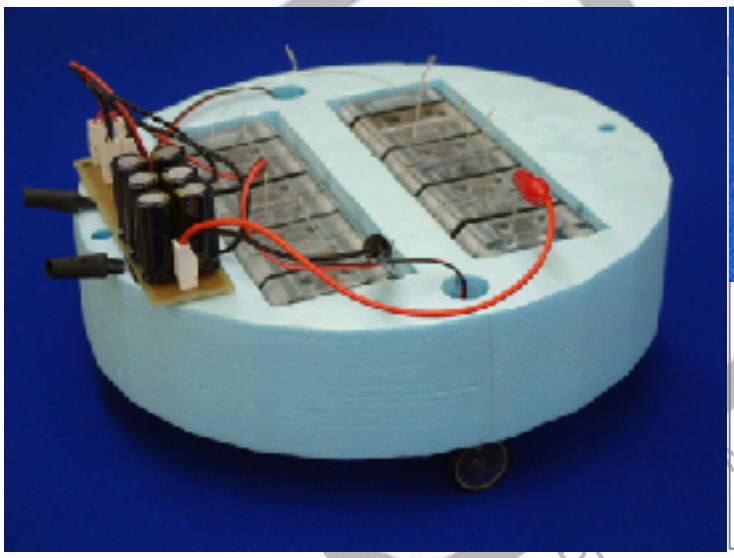
Atuadores

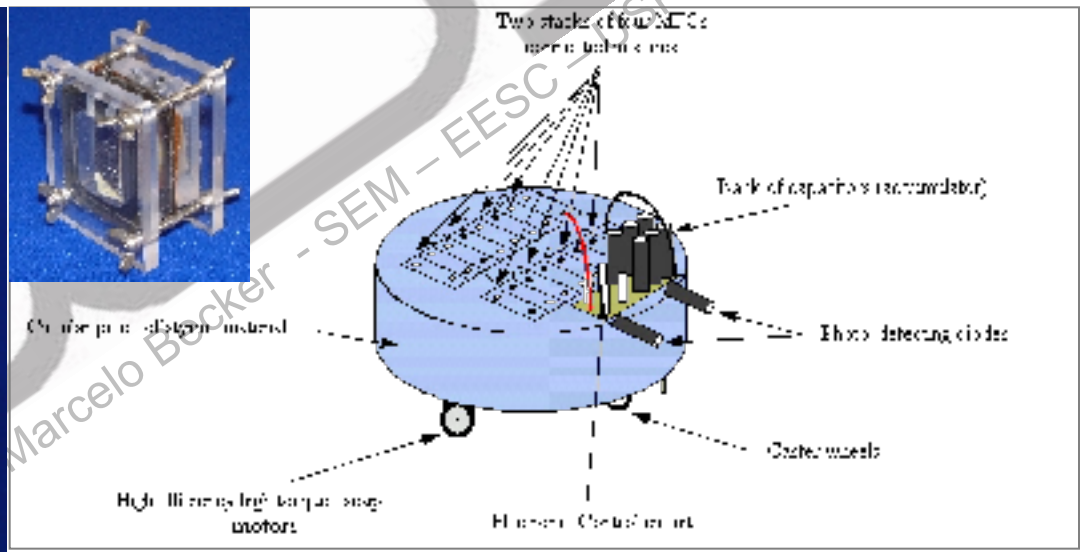
- Robôs energeticamente autônomos
  - Recarga automática
    - Cortadores de grama, aspiradores de pó, etc.
  - Células Fotoelétricas
    - Opportunity e Spirit

celo Becker
ESC – USP

Atuadores

- Robôs energeticamente autônomos
  - Projetos SlugBot e EcoBot (IAS-UK)
    - Produção de energia própria através de células de energia com microorganismos





Prof. Marcelo Becker - SEM – EESC_USP

Sumário da Aula

- Introdução
- Atuadores
- **Locomoção**
- Exercícios Recomendados
- Bibliografia Recomendada

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC

Locomoção

- Locomoção
  - Definição: interação física do robô móvel com o ambiente que o cerca
  - Palavras chave:
    - Forças de interação
    - Mecanismos de interação
    - Atuadores
  - Deve-se observar:
    - Tipo de ambiente
    - Características do contato
    - Estabilidade

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

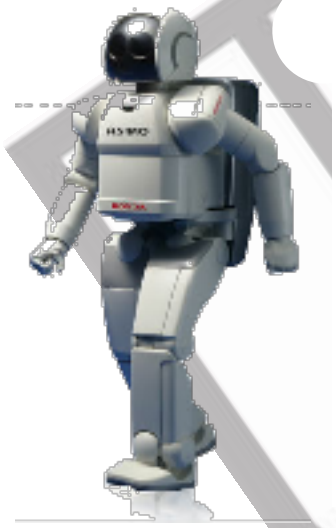
Locomoção

- Tipo de ambiente:
  - Estrutura, geometria, etc. (indoor / outdoor)
  - Meio (água, ar, terreno rugoso, neve, etc.)

Prof. Dr. M... EESC – USP

Locomoção

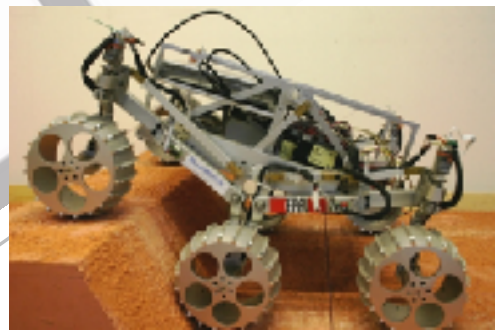
- Características do contato:
  - Contato por ponto ou por área
  - Ângulo de contato
  - Atritos



Asimo

Talon

Dante II

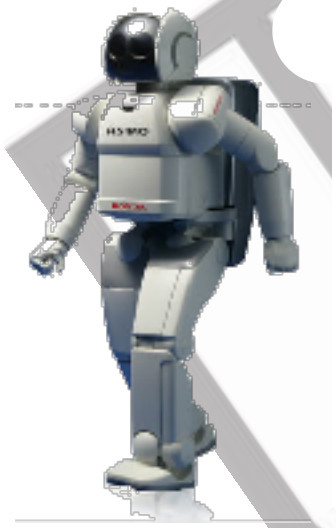


Crab

Tartan

Locomoção

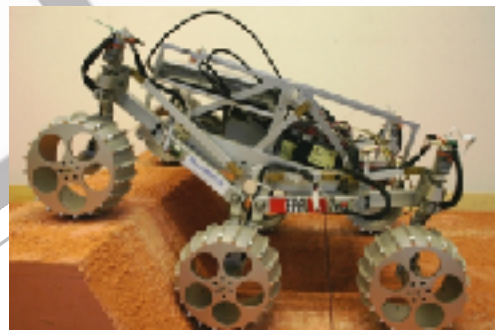
- Estabilidade:
  - Número de pontos de contato
  - Centro de gravidade
  - Equilíbrio estático/dinâmico



Asimo

Talon

Dante II



Crab

Tartan

Locomoção

- Equilíbrio estático:
  - O robô é capaz de ficar parado sem cair
  - Está relacionado ao seu projeto mecânico
- Equilíbrio dinâmico:
  - O robô precisa equilibrar-se ativamente para permanecer estável
  - Está relacionado com o controle do robô
- Andar estaticamente estável:
  - O robô é capaz de andar equilibrado todo o tempo

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

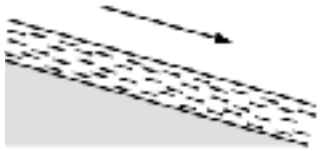
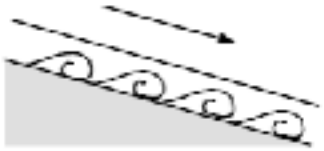
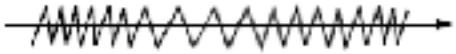
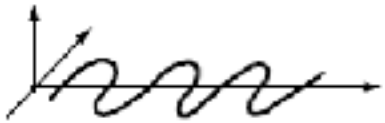
Locomoção

- Conceitos encontrados na Natureza são os melhores
  - Porém imitar a Natureza é difícil...
- Geralmente em robôs rodas e esteiras são empregadas
- Rolar vs. Caminhar
  - A rolagem é mais eficiente, porém não é encontrada facilmente na Natureza
  - O movimento de caminhada em bípedes é semelhante à rolagem...

Prof. Dr. Marcelo Becker – SEM – EESC – USP

Locomoção

- Mecanismos de Locomoção

Tipo de Movimento	Resistência ao Mov.	Cinemática Básica do Movimento
Fluir em um canal 	Forças Hidrodinâmicas	Corrente 
Lagarta	Forças de Atrito	 Vibração Longitudinal
Serpentear	Forças de Atrito	 Vibração Transversal

Adaptado de Siegwart, Nourbakhsh and Scaramuzza (2011)

Locomoção

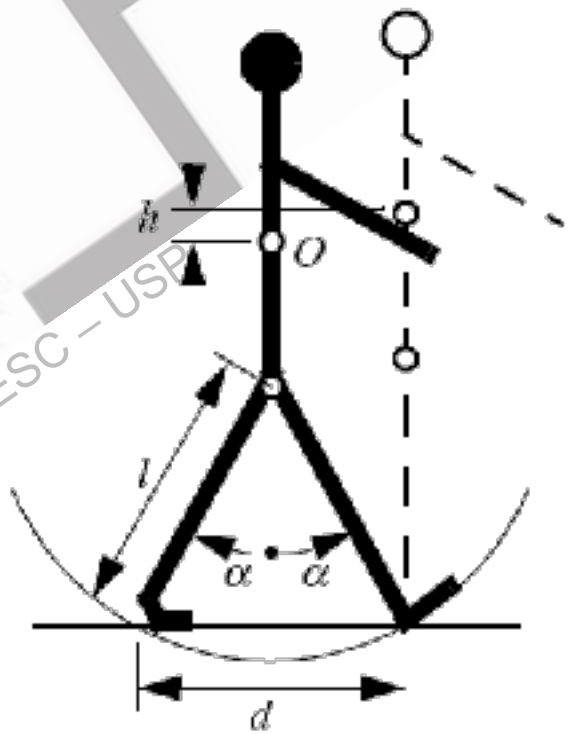
- Mecanismos de Locomoção

Tipo de Movimento	Resistência ao Mov.	Cinemática Básica do Movimento
Correr	Perda de Energia Cinemática	Movimento oscilatório de um pêndulo composto
Pular	Perda de Energia Cinemática	Movimento oscilatório de um pêndulo composto
Andar	Forças Gravitacionais	Rolagem de um Polígono

Adaptado de Siegwart, Nourbakhsh and Scaramuzza (2011)

Locomoção

- Caminhada de Bípedes
  - Mecanismo próximo ao movimento de rolagem
    - Polígono de lado igual ao comprimento da passada
    - Quanto menor a passada, mais o polígono aproxima-se de um círculo
  - Porém, a Natureza não tem uma junta plena rotativa

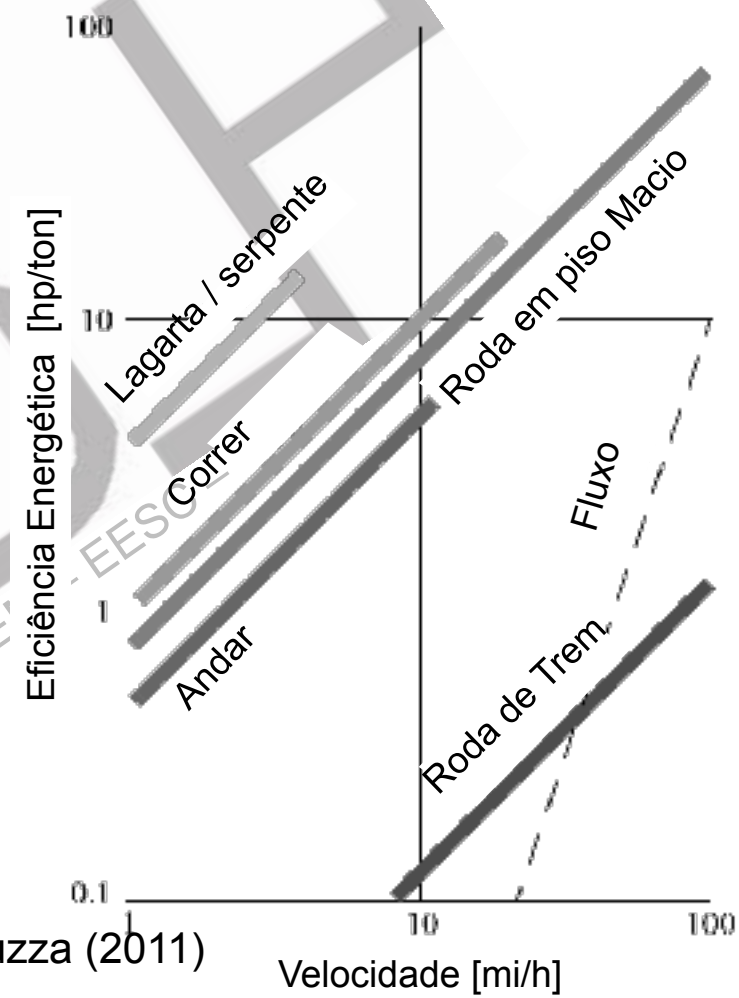


Adaptado de Siegwart, Nourbakhsh and Scaramuzza (2011)

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC – USP

Locomoção

- Caminhar ou Rolar?
  - Número de atuadores
  - Complexidade
    - Estrutural
    - Controle
  - Eficiência Energética
    - Ambiente
  - Movimento das massas
    - Centro de Gravidade

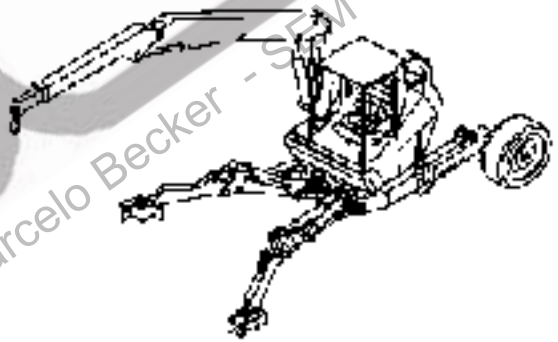


Adaptado de Siegwart, Nourbakhsh and Scaramuzza (2011)

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC-USP

Locomoção

- Rodas ou Patas(Pernas)?
  - Rodas são mecanicamente mais simples e eficientes em superfícies planas e compactas (duras)
  - Patas são mais eficientes em terrenos adversos
  - Às vezes a combinação de ambas pode ser vantajosa...



RoboTrac – IfR-ETHZ, Suíça

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Locomoção

- Patas / Pernas
  - Vantagens:
    - Adaptação e capacidade de manobra em terrenos não-planos
    - Superar obstáculos como buracos, pedras, etc. desde que o comprimento de suas patas seja grande o suficiente
    - Potencial para manipular objetos do ambiente utilizando as patas.

Prof. Dr. Marcelo Becker – SEM – EESC – USP

Locomoção

- Patas / Pernas
  - Desvantagens:
    - Potência necessária para sustentar parte do peso total do robô, e para levantá-lo e abaixá-lo.
    - Grande complexidade para permitir os graus de liberdade necessários para gerar manobras difíceis

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC - USP

Locomoção

- Patas / Pernas
  - Quantas empregar?
    - Observar sistemas similares na Natureza...
      - Mamíferos Bípedes
      - Mamíferos Quadrúpedes
      - Répteis
      - Insetos, Crustáceos, etc.
      - Aranhas
      - Centopéias

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Locomoção

- Patas / Pernas
  - Quantas empregar?
    - 2 patas: excepcional capacidade de manobra tem como custo um sistema de controle motor ativo muito complexo para manter o equilíbrio.
    - 3 patas: garantem o equilíbrio estático (centro de gravidade permanece interno ao tripé de contato com o solo).
    - 6 patas: garantem o galope com número estável de tripés no solo a todo instante

Prof. Dr. Marcelo Becker – SEM – EESC – USP

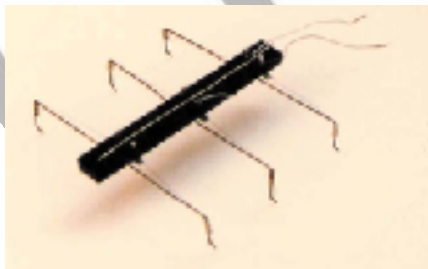
Locomoção

- Patas / Pernas
  - Quantas empregar?
    - Insetos e aranhas: andam desde o nascimento. O equilíbrio é simples.
    - Mamíferos quadrúpedes: não atingem o equilíbrio durante a locomoção mas, são capazes de se manter facilmente sob 4 patas.
      - Alguns em poucos minutos aprendem a andar sem cair após o nascimento...
    - Seres humanos: bebês precisam de meses para aprenderem a andar e mais de um ano para correr e ficar em uma perna só sem caírem.

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC - USP

Locomoção

- Patas / Pernas
  - Quantos Graus de Liberdade empregar?
    - Poucos DoFs: cada pata da lagarta de borboleta possui apenas 1 DoF, o seu giro.
    - Muitos DoFs: pernas humanas têm mais de 7 DoFs caso sejam considerados os movimentos dos dedos dos pés.



Stiquito

Robô Nitinol

Prof. D... SEM - EESC - USP

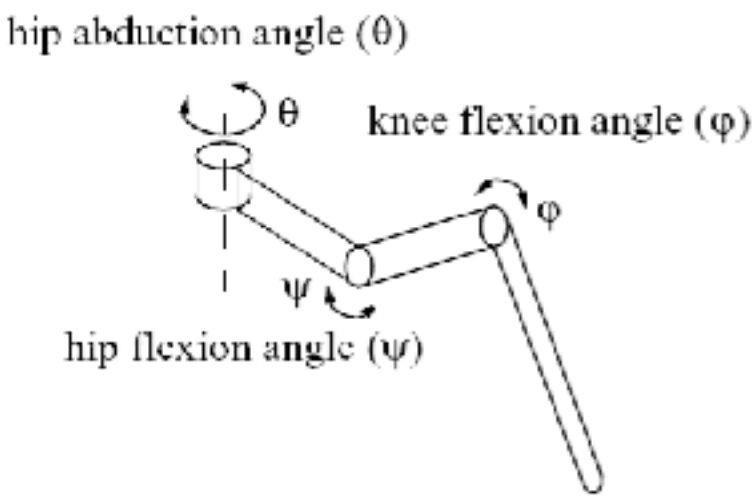
Locomoção

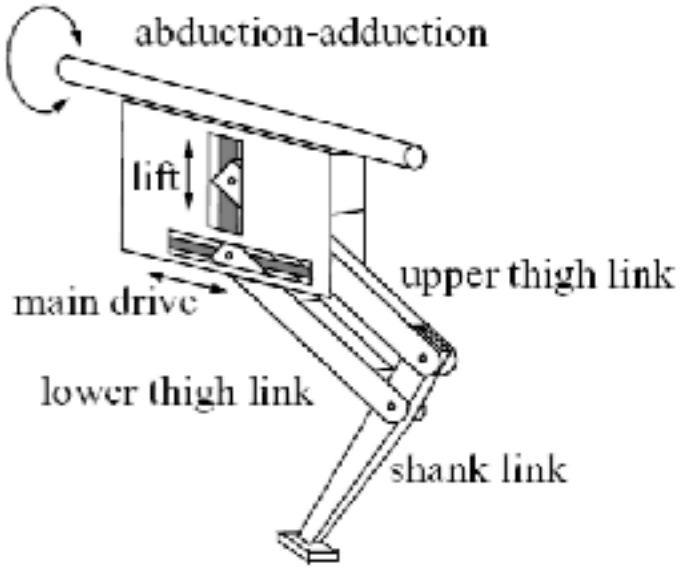
- Patas / Pernas
  - Quantos Graus de Liberdade empregar?
    - No mínimo 2 DoFs são necessários para mover uma perna para frente, elevando-a.
    - Um 3º DoF permite manobras mais complexas.
    - Um 4º DoF no tornozelo permite atuar na pose da sola do pé, melhorando o contato com o solo.

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC – USP

Locomoção

- Patas / Pernas
  - Quantos Graus de Liberdade empregar?





Adaptado de Siegwart e Nourbakhsh (2004)

Prof. Dr.

Locomoção

- Patas / Pernas
  - Quantos Graus de Liberdade empregar?
    - Adição de DoFs:
      - Aumenta a capacidade de manobra do robô;
      - Amplia a gama de tipos de terrenos que podem ser superados;
      - Estende a quantidade de modos de caminhar do robô;
      - Consome mais energia;
      - Torna o robô mais pesado;
      - Aumenta a complexidade de controle do robô.

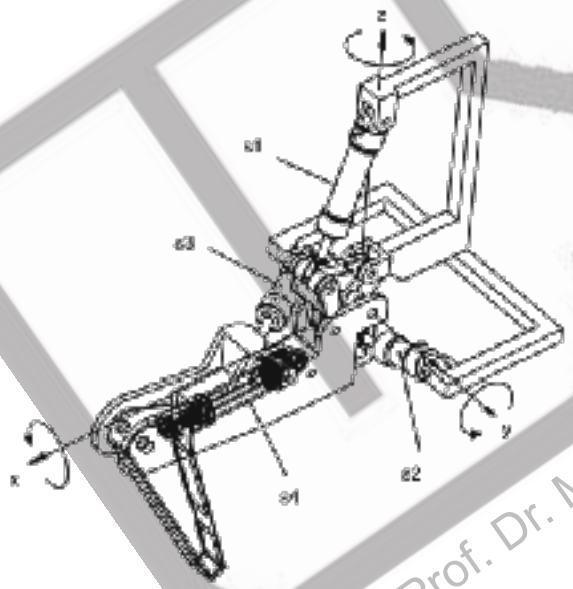
Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

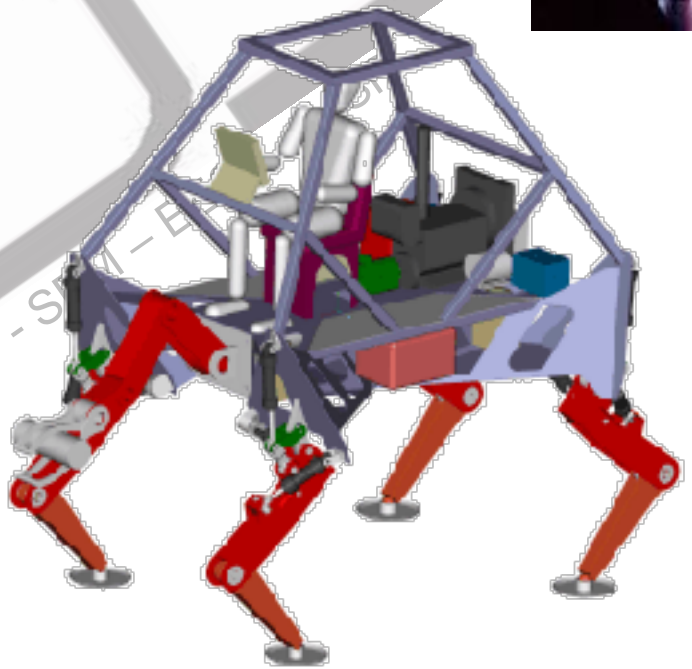
Locomoção

Institut für Mechatronik und Systemdynamik

Prof. Dr.-Ing. Manfred Hiller

- Robôs Andadores
- ALDURO (***A**nthropomorphically **L**egged and Wheeled **DU**isburg **RO**bot*)





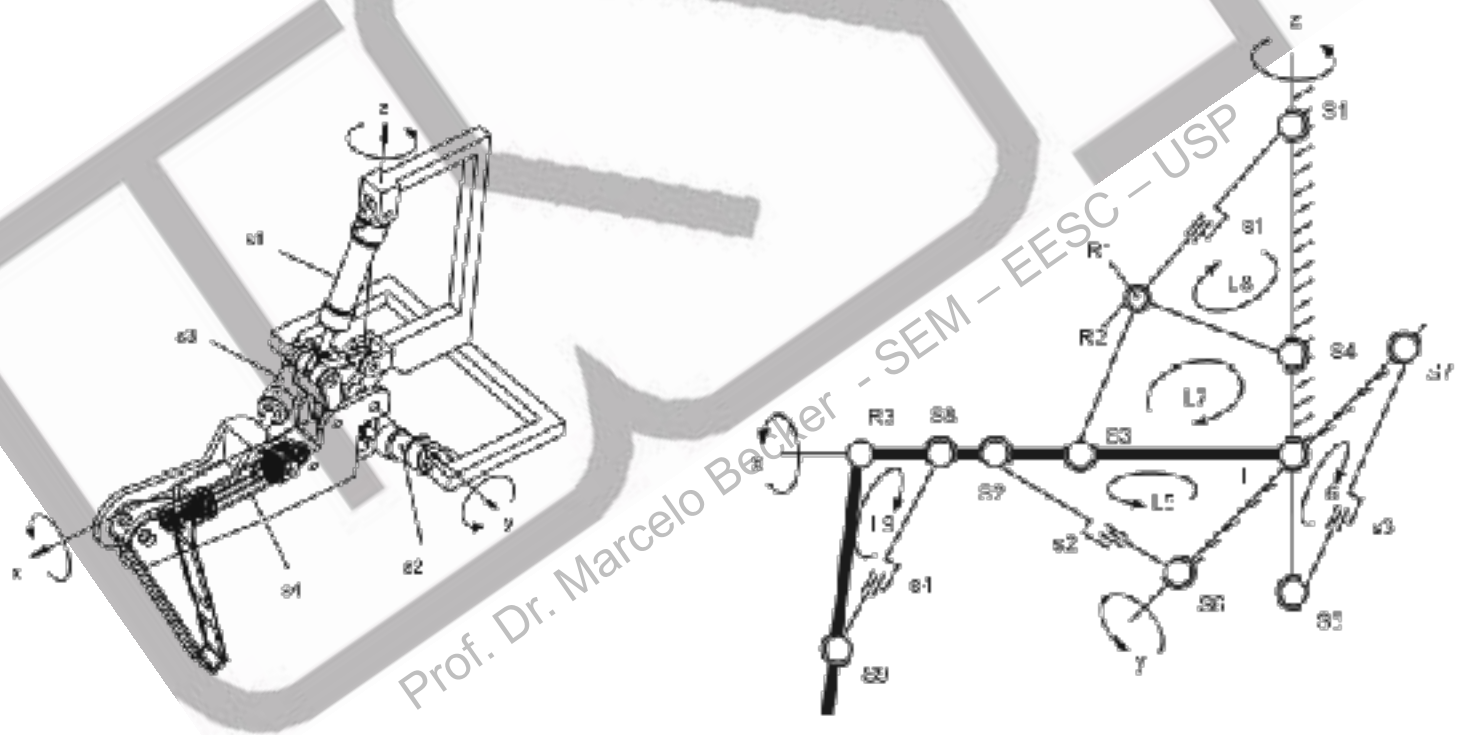
Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC - USP

Locomoção

Institut für Mechatronik und Systemdynamik

Prof. Dr.-Ing. Manfred Hiller

- Robôs Andadores
- ALDURO (***A****nthropomorphically* ***L****egged and Wheeled* ***DU****isburg* ***RO****bot*)



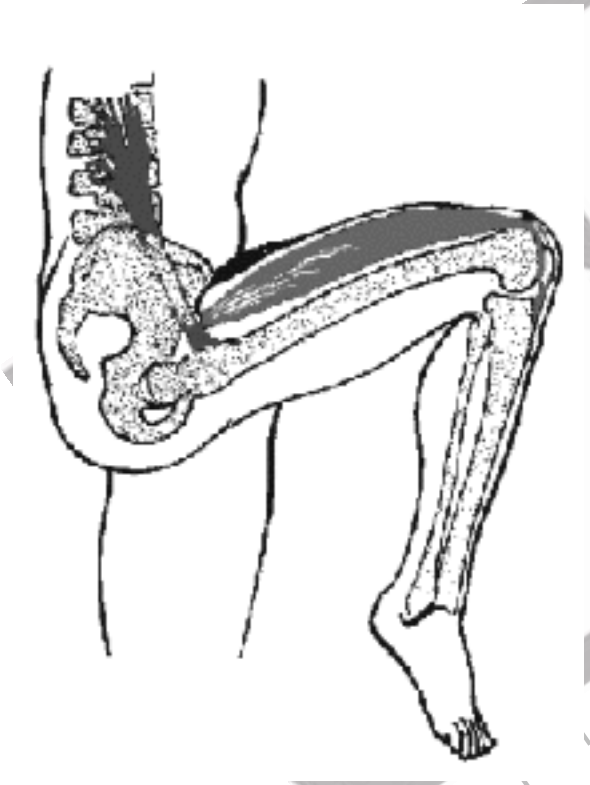
Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

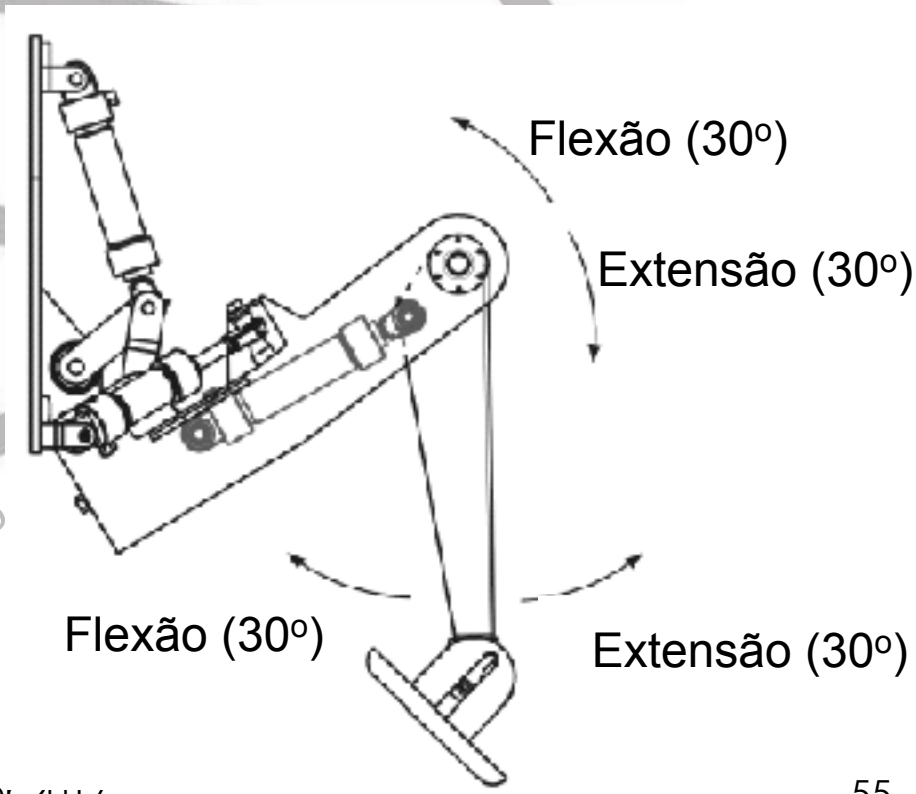
Locomoção

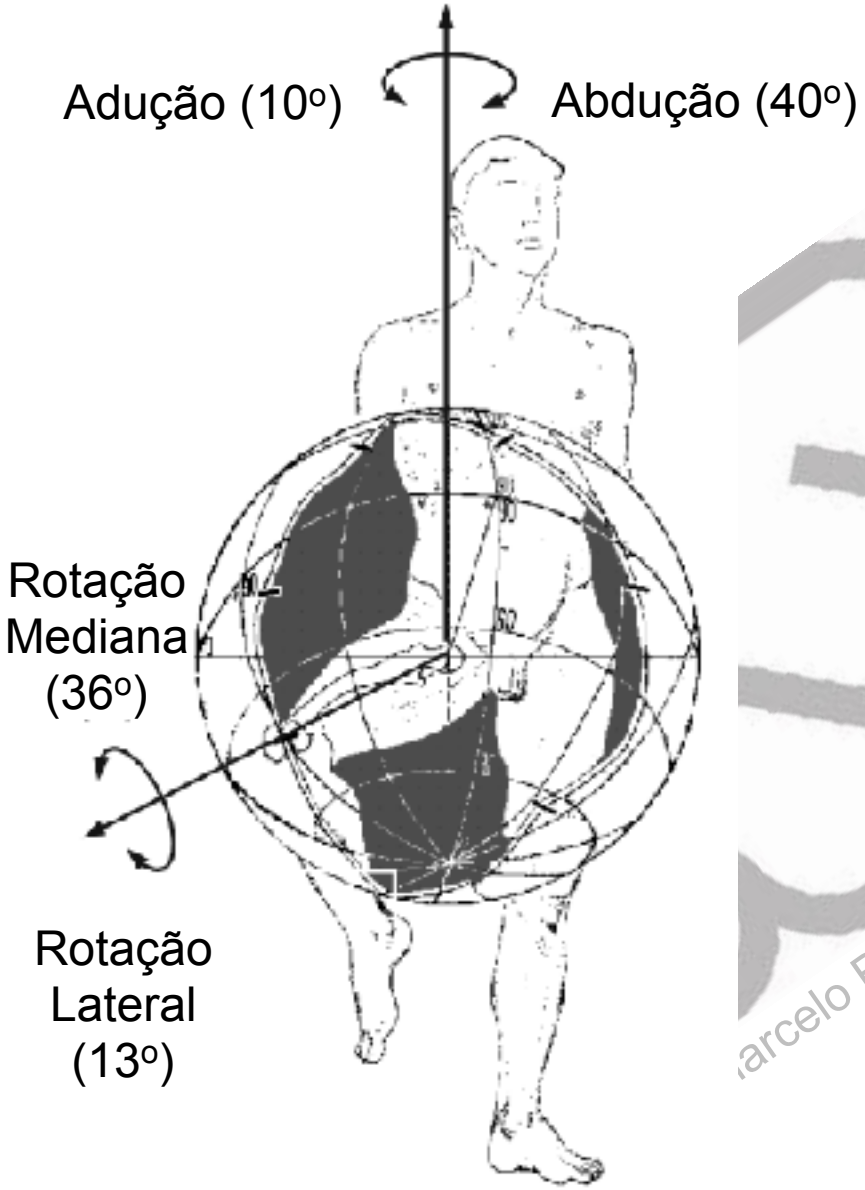
Institut für Mechatronik und Systemdynamik

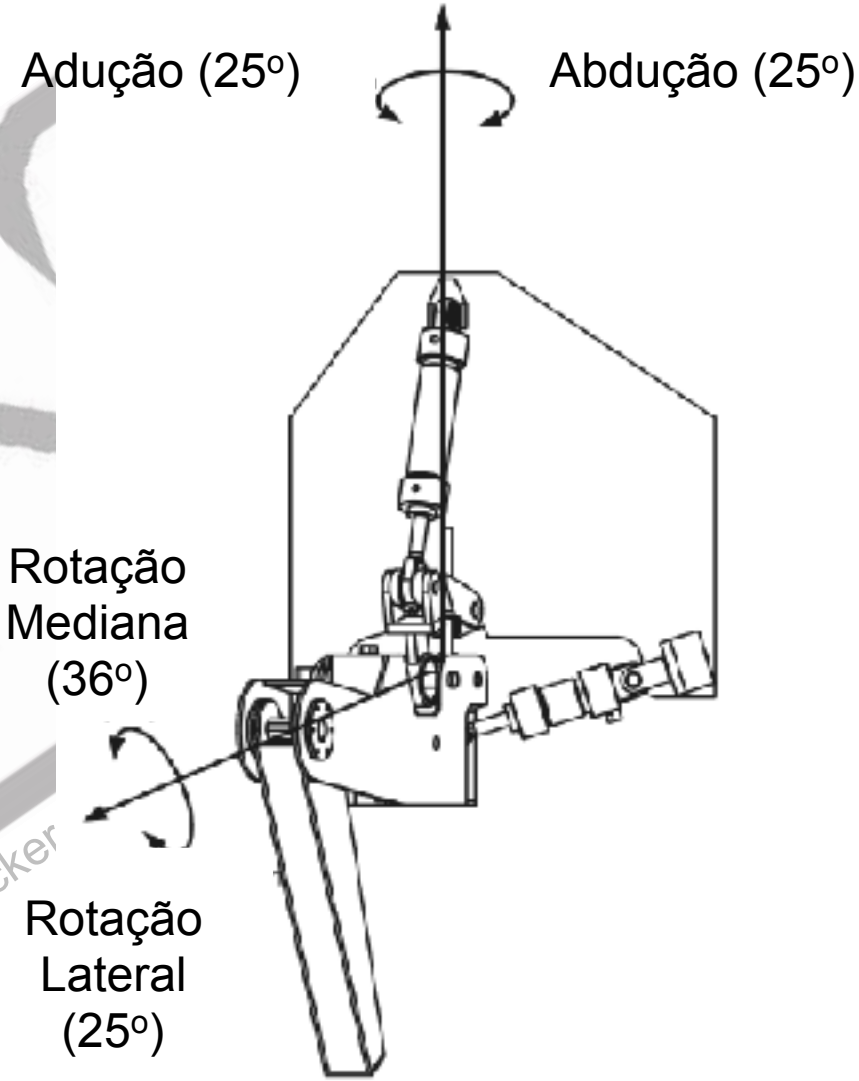
Prof. Dr.-Ing. Manfred Hiller

- Robôs Andadores
- ALDURO





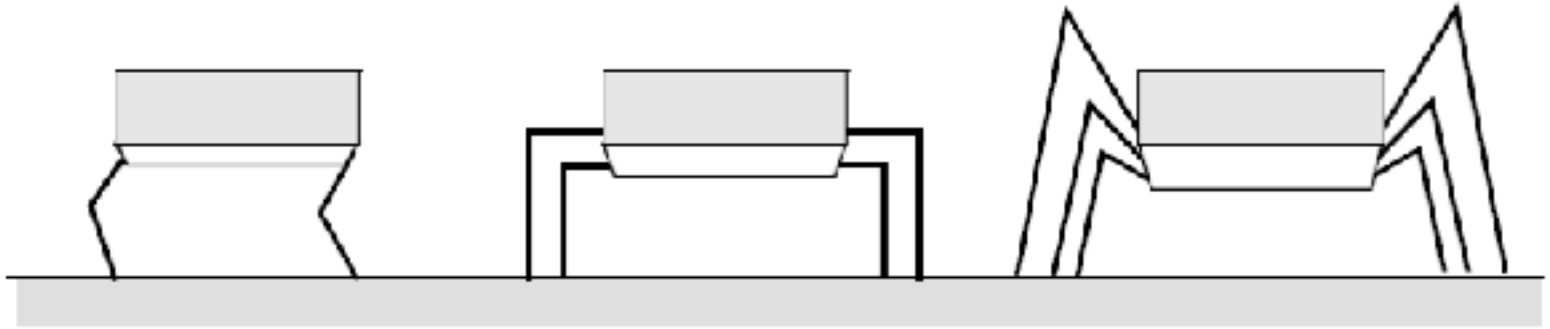




arcelo Becker

Locomoção

- Robôs Móveis com Patas (andadores)
  - Quanto menor o número de patas, mais difícil torna-se a locomoção
    - Estabilidade estática: 3 patas no mínimo

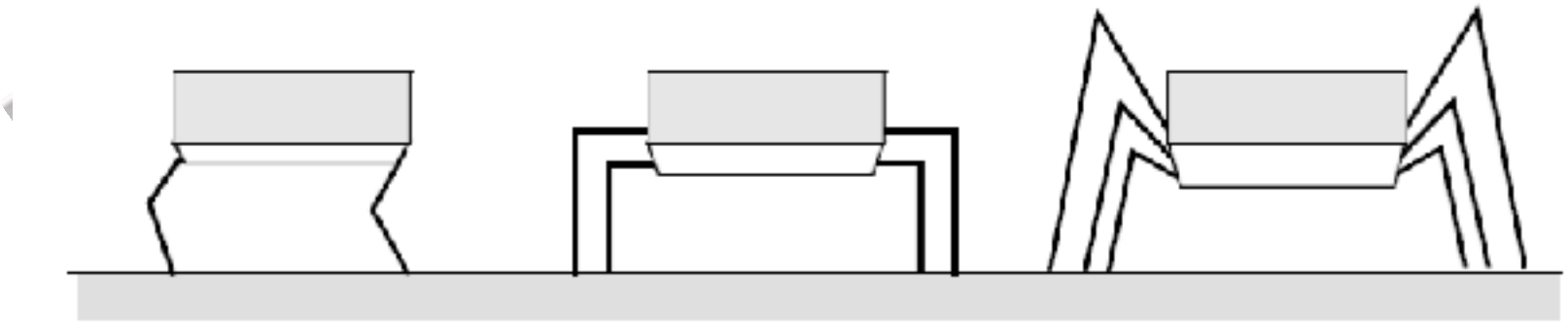


Mamíferos (2 ou 4 patas) **Répteis (4 patas)** **Insetos e Crustáceos (6 Patas)**

Adaptado de Siegwart, Nourbakhsh and Scaramuzza (2011)

Locomoção

- Robôs Móveis com Patas (andadores)
  - Durante a caminhada, algumas patas são levantadas → perda de estabilidade
    - Estabilidade estática durante a caminhada: 6 patas no mínimo

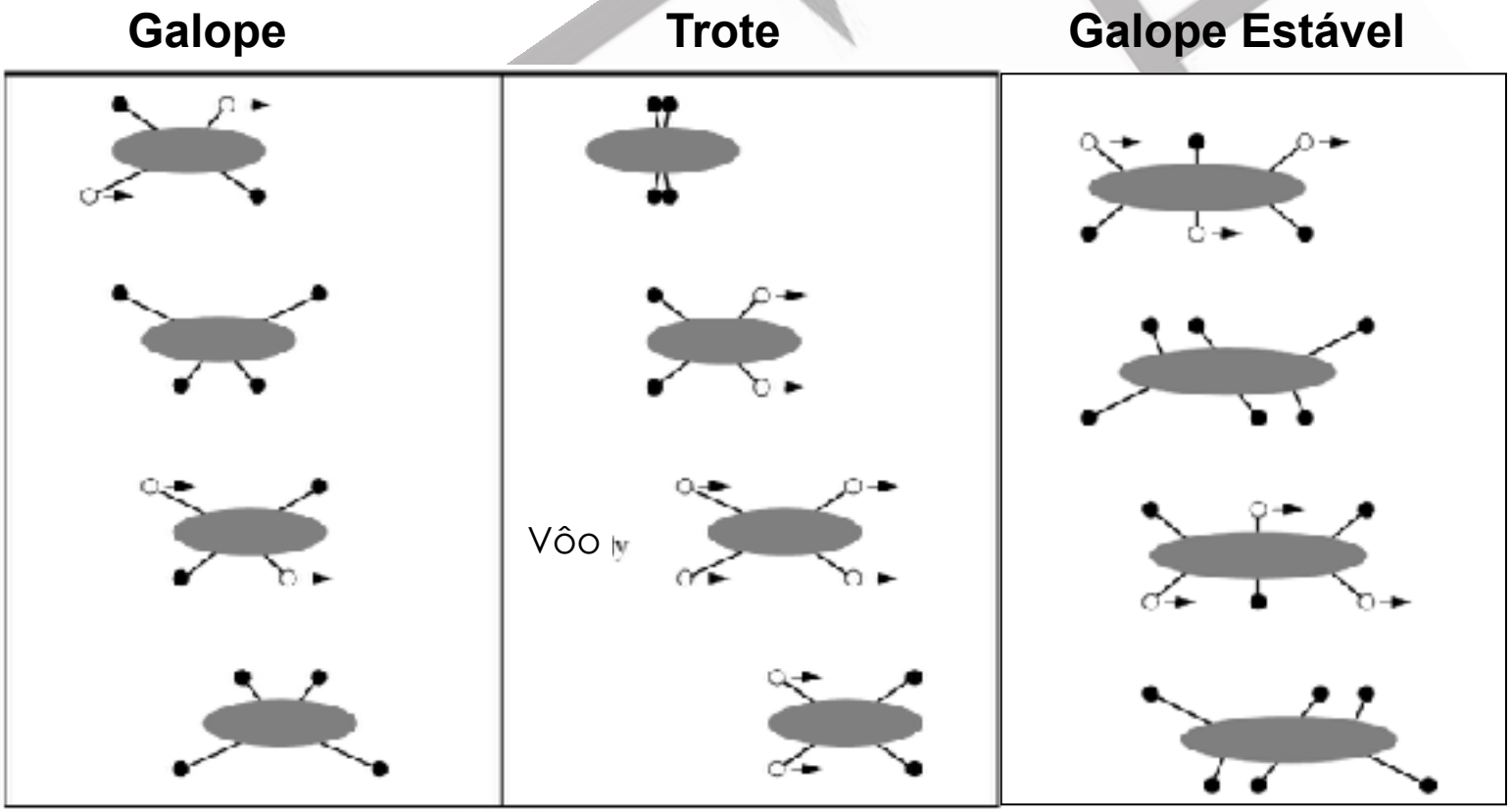


Mamíferos (2 ou 4 patas) **Répteis (4 patas)** **Insetos e Crustáceos (6 Patas)**

Adaptado de Siegwart, Nourbakhsh and Scaramuzza (2011)

Locomoção

- Exemplo de marchas com 4 e 6 patas



Adaptado de Siegwart, Nourbakhsh and Scaramuzza (2011)

Locomoção

- Como coordenar os movimentos?
  - Número de modos de andar:
    - Seqüência de eventos (movimentos)
      - Depende do número de pernas
      - Para k pernas (k>1): $N = (2.k-1)!$
      - $k = 2$: $N = 3! = 6$
      - $K = 6$: $N = 11! = 39.916.800$

1. Erguer a perna esquerda
2. Erguer a perna direita
3. Abaixar a perna direita
4. Abaixar a perna esquerda
5. Erguer as duas pernas
6. Abaixar as duas pernas

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Locomoção

- Robôs com apenas uma pata
  - Minimiza-se o peso na locomoção.
  - Não é necessário coordenar as patas
  - Um único ponto de contato.
  - O equilíbrio estático é impossível, mas o dinâmico não é...
  - Maior desafio: o robô deve atingir o equilíbrio ativamente, ou seja, através do movimento de seu centro de gravidade ou aplicando forças corretivas.

Prof. Dr. Marcelo Becker – SEM – EESC – USP

Locomoção

- Robôs com apenas uma pata
  - Exemplo: Saltador de Haibert – MIT, 1983
    - 1 pata que muda de comprimento
    - 1 corpo que carrega sensores e eletrônica embarcada
    - 1 quadril que atua em dois eixos
    - Altura: 1,1m Peso: 17,3kg
    - Energia para salto: bomba hidráulica externa
    - Controle simples composto por 3 partes:
      - Velocidade de locomoção para frente (ângulo da perna em relação ao corpo)
      - Atitude do corpo
      - Altura do salto
    - Velocidade máxima atingida: 2,2m/s

Prof. Dr. Marcelo Becker – SEM – EESC – USP

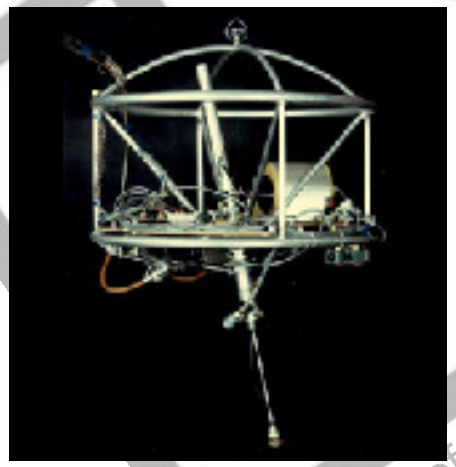
Locomoção

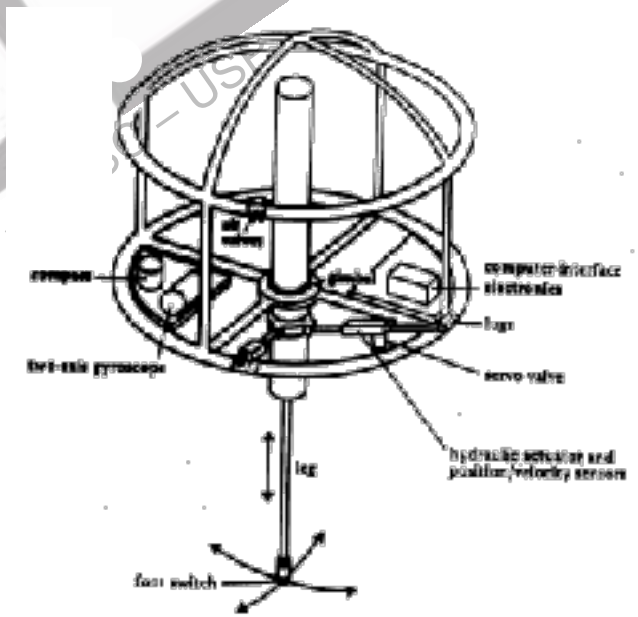
- Robôs Bípedes (Humanóides)
  - Obtiveram sucesso a partir de 1990
  - Apresentam equilíbrio estático dentro de certos limites (necessitam de correção constante do equilíbrio)
  - Principais fabricantes: Honda e Sony
    - Andam
    - Correm
    - Sobem escadas
    - Resistem a "empurrões"
    - Etc.

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC - USP

Locomoção

- Robôs com apenas uma pata
  - Exemplo: Saltador de Haibert – MIT, 1983
    - 1 pata que muda de comprimento
    - 1 corpo que carrega sensores e eletrônica embarcada
    - 1 quadril que atua em dois eixos





MIT – 3D One Leg Hopper - 1983

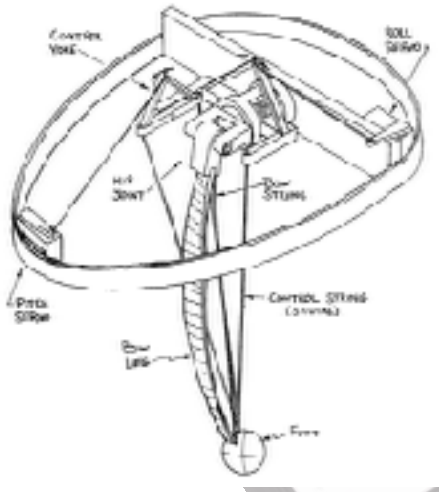
Locomoção

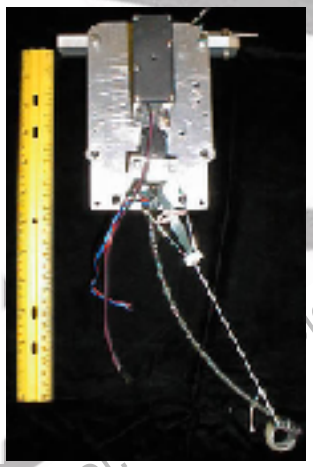
- Robôs com apenas uma pata
  - Exemplo: Saltador de Perna Torta – CMU, 1998
    - 1 pata que muda de comprimento
    - 1 corpo que carrega sensores e eletrônica embarcada
    - 1 quadril que atua em dois eixos
    - Energia para salto: arco elástico que armazena a energia cinética do robô
      - Retorna 85% da energia
    - Controle de Velocidade: ângulo da perna com relação ao corpo
    - Capaz de saltar por 20min. com um único conjunto de baterias embarcado

Prof. Dr. Marcelo Becker – SEM – EESC – USP

Locomoção

- Robôs com apenas uma pata
  - Exemplo: Saltador de Perna Torta – CMU, 1998
    - 1 pata que muda de comprimento
    - 1 corpo que carrega sensores e eletrônica embarcada
    - 1 quadril que atua em dois eixos



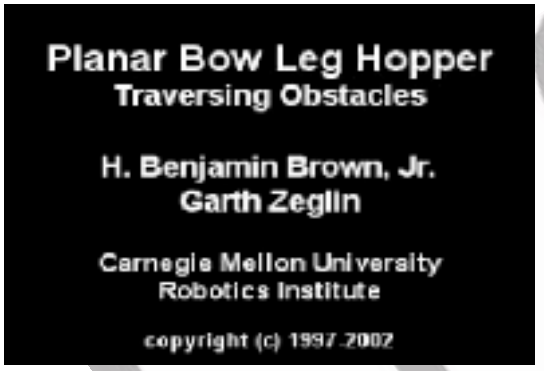


CMU - BowLeg Hopping Robot - 1998

Locomoção

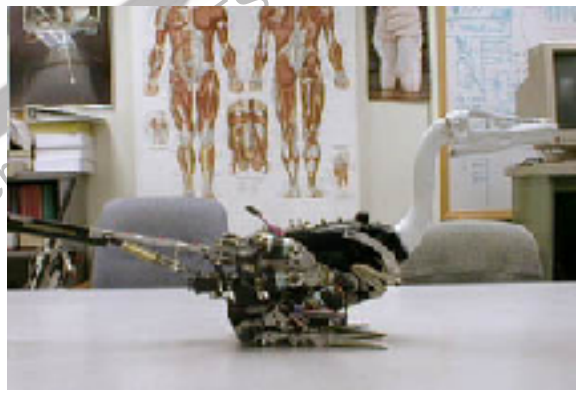
- Robôs com apenas uma pata

CMU - BowLeg Hopping Robot - 1998



Locomoção

- Robôs Bípedes (Não-Humanóides)
  - Troody – "Dinossauro do Futuro"
    - Baseado no *Troodon Formosus* (Dinossauro carnívoro do Cretáceo)
    - Anda, fica em pé e adapta-se a ambientes pouco irregulares

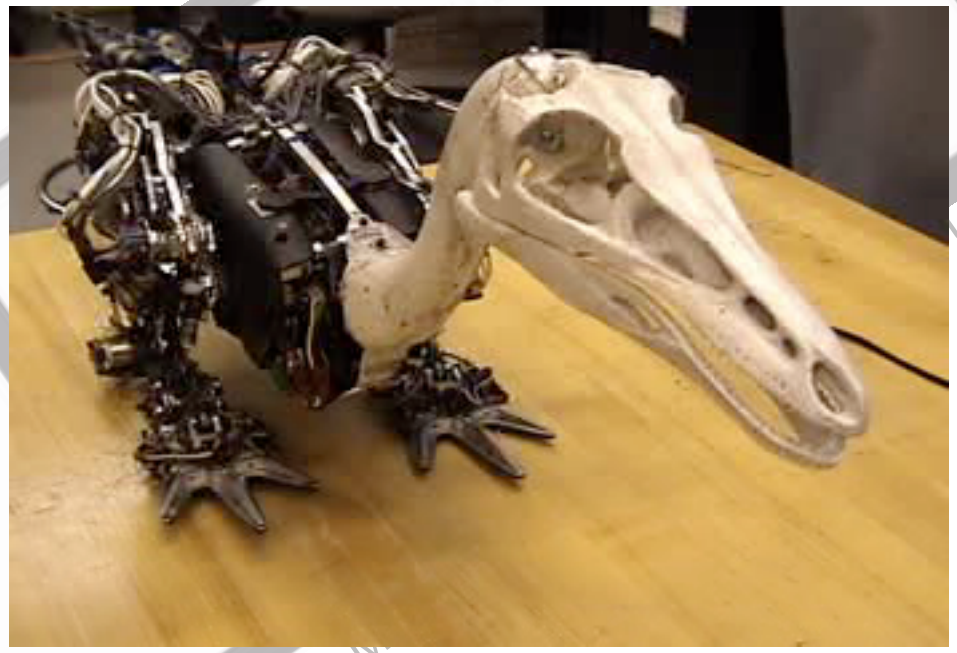


MIT - Troody

Prof. Marcelo Becker EESC – USP

Locomoção

- Robôs Bípedes (Não-Humanóides)
  - Troody – "Dinossauro do Futuro"

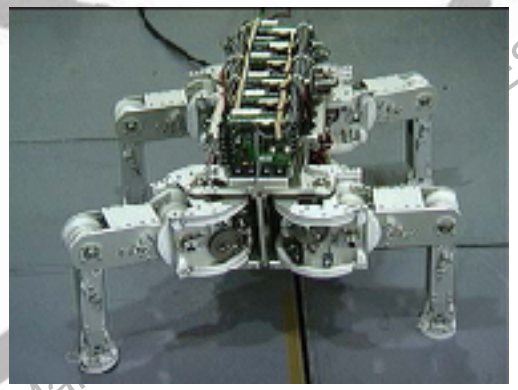


MIT - Troody

Locomoção

- Robôs Quadrúpedes
  - Ficar em pé com 4 patas é estaticamente estável, mas andar com 4 patas pode não ser...
  - O CG do robô deve ser ativamente deslocado durante a movimentação do robô

Aibo - Sony



Titan – Tokyo Institute of Technology

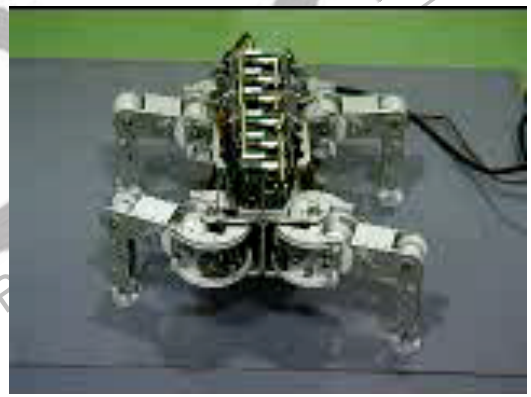
Peso: 19kg
Altura: 0,25m
DoFs: 12 / 3 por pata
Velocidade: 0,9m/s

Prof. Dr. Mar... EESC-USP

Locomoção

- Robôs Quadrúpedes
  - Ficar em pé com 4 patas é estaticamente estável, mas andar com 4 patas pode não ser...
  - O CG do robô deve ser ativamente deslocado durante a movimentação do robô

Aibo - Sony



Titan – Tokyo Institute of Technology

Prof. Dr. Marcelo Becker - EESC-USP

Locomoção

- Robôs Quadrúpedes
  - Exemplos da BostonDynamics

BigDog – BostonDynamics

LittleDog - BostonDynamics

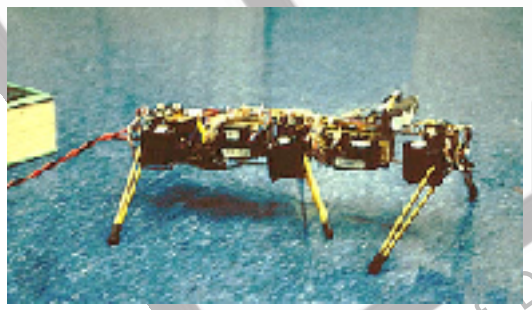
Motor a gasolina / acionamento hidráulico
Velocidade Máxima: 3mi/h
Carga Máxima: 120lb

http://www.bostondynamics.com/index.html

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC – USP

Locomoção

- Robôs Hexápodes
  - Configuração muito popular devido a sua estabilidade estática durante a movimentação
    - Reduz a complexidade do controle
  - Em geral, cada pata tem 3 DoFs:
    - 2 no quadril
    - 1 de flexão no joelho



Genghis – 2DoF/pata

RiSE - BostonDynamics

Sobe paredes, Árvores, grades, etc.

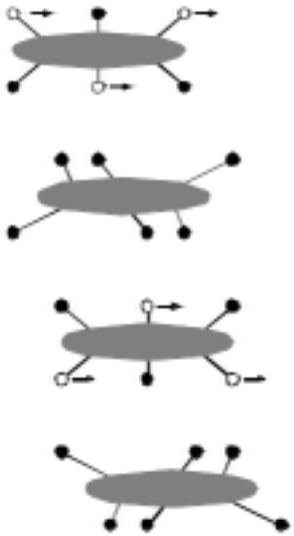
Prof. Dr. – SEM – EESC – USP

Locomoção

https://www.youtube.com/watch?v=2pJwDZXasKU

- Robôs Hexápodes
  - *Forester Robot* – Finlândia
    - Movimento das patas é autônomo
    - Direcionamento e velocidade do robô, através do operador...

Plustech - Harvester



Prof. Dr. - SEM – EESC – USP

Locomoção

- Rodas
  - Mecanismo de locomoção mais popular em robôs e veículos
  - Pesquisas tendem a focar:
    - Tração
    - Estabilidade
    - Manobrabilidade
    - Controle

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Locomoção

- Rodas
  - Características de Robôs com rodas:
    - Estabilidade garantida com 3 rodas
      - CG do robô posicionado dentro do triângulo formado pelos pontos de contato
    - Com 4 ou mais rodas a estabilidade é melhorada
      - Necessita de um sistema flexível de suspensão
    - Rodas de grande diâmetro permitem superar obstáculos "altos"
      - Mas, exigem um torque maior / redutores
  - Sistema Holonômico ou Não-Holonômico?

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC - USP

Locomoção

- Rodas
  - Sistema Holonômico ou Não-Holonômico?
    - **Sistema Holonômico**: Todos os DoFs do robô no ambiente são controláveis, ou seja nº de DoFs é igual ao nº de DoFs controláveis.
    - **Sistema Não-Holonômico**: O nº de DoFs do robô no ambiente é superior ao nº de DoFs controláveis.
    - **Sistema Redundante**: o nº de DoFs controláveis é maior que o nº de DoFs do robô no ambiente.

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC - USP

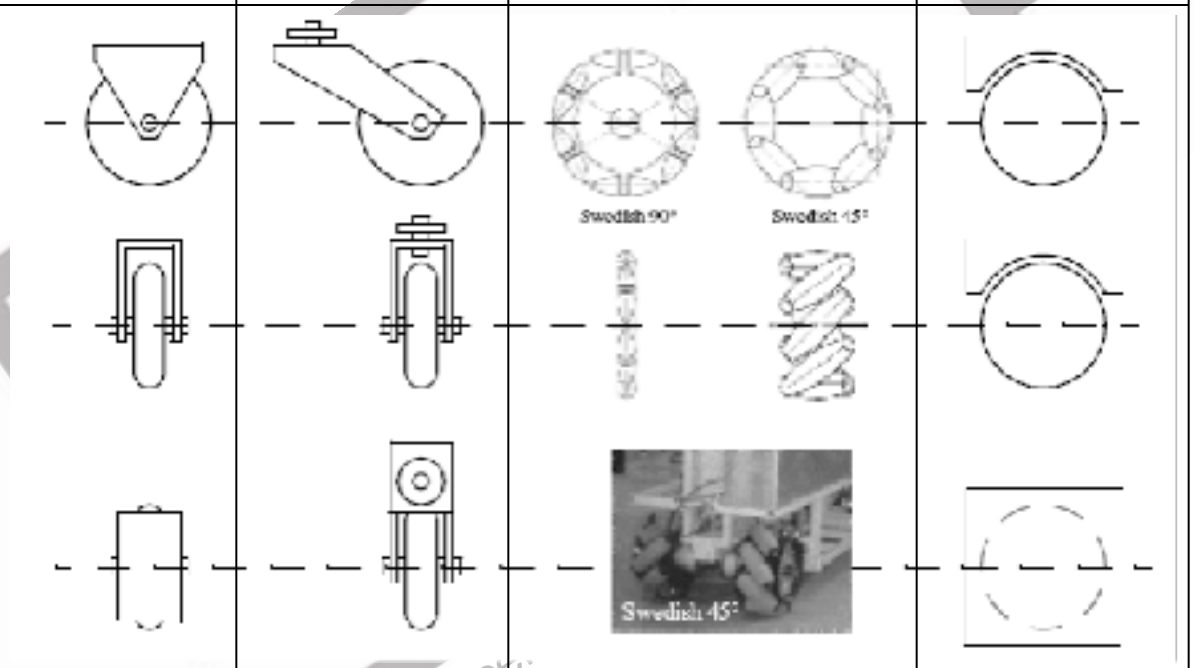
Locomoção

- Rodas
  - Sistema Holonômico ou Não-Holonômico?
    - **Sistema Holonômico**:
      - Ex: um mecanismo 4 barras, biela-manivela, etc.
    - **Sistema Não-Holonômico**:
      - Ex: um carro tem 3DoFs (x, y, θ), mas o motorista atua apenas no ângulo de esterçamento e na velocidade de movimentação (para frente/ré; rápida/lenta).
    - **Sistema Redundante**:
      - Ex: Braço humano tem 7 DoFs, mas no espaço apenas 6DoFs são necessários.

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC - USP

Locomoção

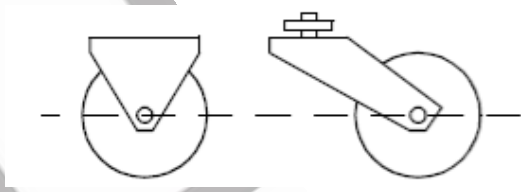
- Rodas

Padrão	Pivotadas	Suecas	Esféricas
			
2DoF	3DoF	3DoF	3DoF

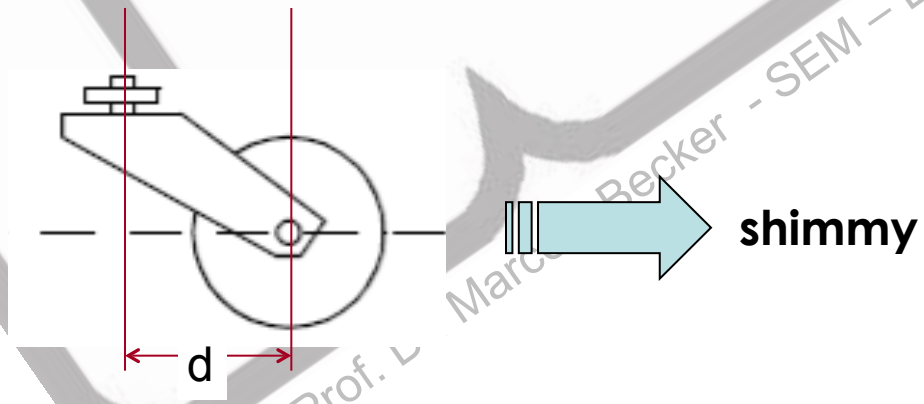
Adaptado de Siegwart e Nourbakhsh (2004)

Prof. Dr. Marcel

Locomoção



- Rodas
  - Padrão e Pivotada (*Castor Wheel*)
    - Têm um eixo primário de rotação
      - Direcionais
    - Para alterar a direção de movimento é necessário alterar a direção do eixo



Prof. Dr. Marcos Becker - SEM – EESC – USP

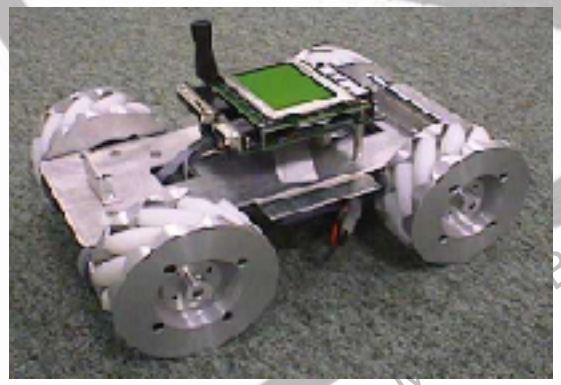
Locomoção

- Rodas
  - Suecas (Omni-direcionais)
    - Também chamadas de Mecanum-Wheel ou Omni-Wheel
    - É acionada como uma roda normal, mas tem pouca resistência ao movimento em outras direções
    - Pequenos roletes passivos são posicionados ao longo da circunferência da roda
    - Apenas o eixo principal da roda atua como uma junta ativa (motora)

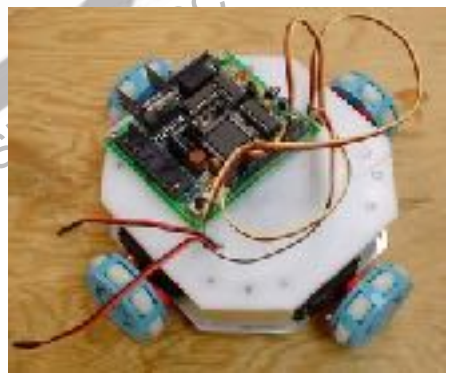
Prof. Dr. Marcelo Becker – SEM – EESC – USP

Locomoção

- Rodas
  - Suecas (Omni-direcionais)
    - A rotação da roda é realizada sobre o eixo principal, mas a roda pode mover-se com pouco atrito em diversas direções



45º



90º

Prof. Dr. M. Becker - S... – USP

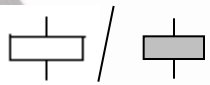
Locomoção

- Rodas
  - Esféricas
    - Menos orientadas a direcionalidade que a roda tradicional
    - Realmente omni-direcional
      - Pode gerar potência ativa em qualquer direção
    - Exemplos:
      - Mouse (não-ativa)
      - Robô Ballbot – 2006, CMU (ativa)

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC - USP

Locomoção

- Rodas
  - Símbolos de rodas

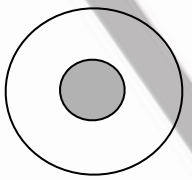
	Roda omni-direcional (esférica, pivotada, sueca, etc.) movida / motora
	Roda sueca motora
	Roda padrão movida
	Roda padrão motora
	Roda pivotada motora e esterçável
	Roda padrão esterçável movida / motora
	Roda padrão conectadas movida / motora

Adaptado de Siegwart, Nourbakhsh and Scaramuzza (2011)

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Locomoção

- Rodas
  - Diferentes arranjos de rodas (1, 2, 3, 4, 6,...)

	Arranjo	Descrição	Exemplos
1 Roda		1 única roda esférica motora	Robô Ballbot

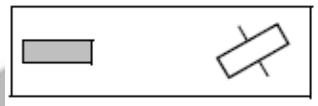
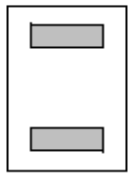
Adaptado de Siegwart, Nourbakhsh and Scaramuzza (2011)

Acionamento Omni-direcional

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Locomoção

- Rodas
  - Diferentes arranjos de rodas (1, 2, 3, 4, 6,...)

	Arranjo	Descrição	Exemplos
2 Rodas		Roda esterçante na frente e roda motora atrás, ou vice-versa	Bicicleta, motocicleta, etc.
		2 rodas motoras lado-a-lado com o CG sob o eixo delas. Também chamado de acionamento diferencial	Robô Cye

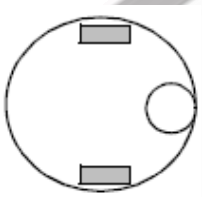
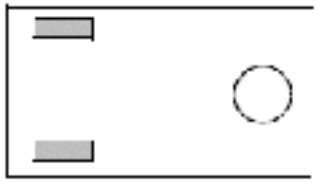
Adaptado de Siegwart, Nourbakhsh and Scaramuzza (2011)

Acionamento Diferencial

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Locomoção

- Rodas
  - Diferentes arranjos de rodas (1, 2, 3, 4, 6,...)

	Arranjo	Descrição	Exemplos
3 Rodas		2 rodas motoras centradas em acionamento diferencial e um terceiro ponto de apoio	Nomad Scout
		2 rodas motoras na traseira em acionamento diferencial e um terceiro ponto de apoio	Pygmalion

Acionamento Diferencial

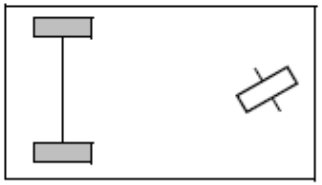
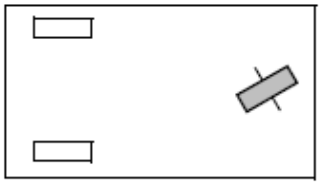
Acionamento Diferencial

Adaptado de Siegwart, Nourbakhsh and Scaramuzza (2011)

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Locomoção

- Rodas
  - Diferentes arranjos de rodas (1, 2, 3, 4, 6,...)

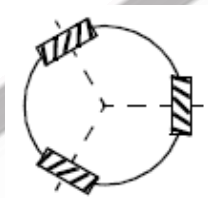
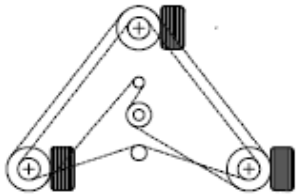
	Arranjo	Descrição	Exemplos
3 Rodas		Roda esterçante na frente e 2 rodas motoras conectadas atrás, ou vice-versa	Piaggio mini-truck
		Roda esterçante motora na frente e 2 rodas livres atrás, ou vice-versa	Neptune

Adaptado de Siegwart, Nourbakhsh and Scaramuzza (2011)

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Locomoção

- Rodas
  - Diferentes arranjos de rodas (1, 2, 3, 4, 6,...)

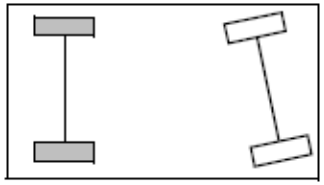
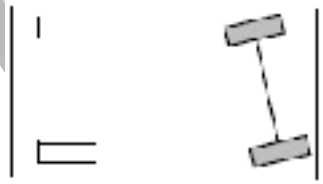
	Arranjo	Descrição	Exemplos
3 Rodas		3 rodas suecas ou esféricas motoras arranjadas em forma triangular. Acionamento omni-direcional	Acionamento Omni-direcional
		3 rodas motorizadas e esterçáveis síncronas	Nomad 200 Acionamento Síncrono

Adaptado de Siegwart, Nourbakhsh and Scaramuzza (2011)

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Locomoção

- Rodas
  - Diferentes arranjos de rodas (1, 2, 3, 4, 6,...)

	Arranjo	Descrição	Exemplos
4 Rodas		2 rodas motoras traseiras e 2 rodas esterçáveis dianteiras (ângulo de esterçamento diferente)	Carro de tração traseira
		2 rodas motoras e esterçáveis dianteiras e rodas livres traseiras	Navlab II

Geometria de Ackermann

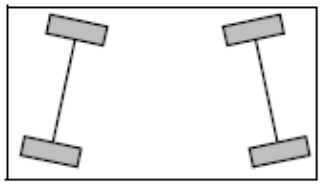
Geometria de Ackermann

Adaptado de Siegwart, Nourbakhsh and Scaramuzza (2011)

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Locomoção

- Rodas
  - Diferentes arranjos de rodas (1, 2, 3, 4, 6,...)

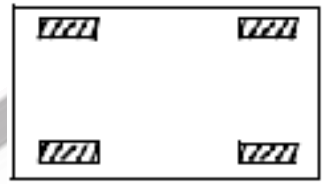
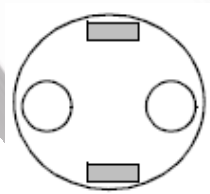
	Arranjo	Descrição	Exemplos
4 Rodas		4 rodas motoras e esterçantes	Hyperion
		2 rodas motoras com acionamento diferencial na traseira / frente e 2 rodas omni-direcionais na frente / traseira	Charlie

Adaptado de Siegwart, Nourbakhsh and Scaramuzza (2011)

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Locomoção

- Rodas
  - Diferentes arranjos de rodas (1, 2, 3, 4, 6,...)

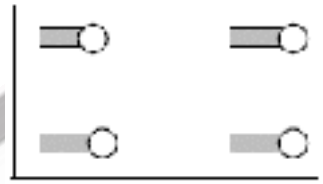
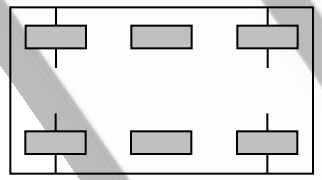
	Arranjo	Descrição	Exemplos
4 Rodas		4 Rodas omni-direcionais	Uranus Acionamento Omni-direcional
		2 rodas com acionamento diferencial e 2 rodas de apoio	Khepera Acionamento Diferencial

Adaptado de Siegwart, Nourbakhsh and Scaramuzza (2011)

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Locomoção

- Rodas
  - Diferentes arranjos de rodas (1, 2, 3, 4, 6,...)

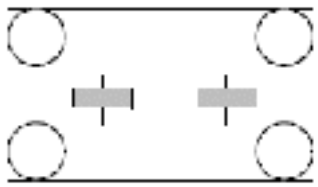
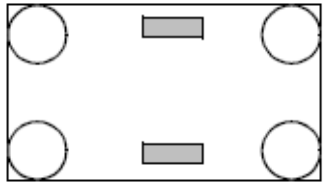
	Arranjo	Descrição	Exemplos
4 Rodas		4 rodas pivotadas motoras e esterçáveis	Nomadic XR4000
6 Rodas		6 rodas motoras sendo 1 em cada canto esterçável	Sojourner

Adaptado de Siegwart, Nourbakhsh and Scaramuzza (2011)

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Locomoção

- Rodas
  - Diferentes arranjos de rodas (1, 2, 3, 4, 6,...)

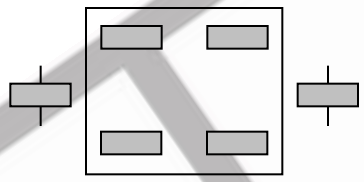
	Arranjo	Descrição	Exemplos
6 Rodas		2 rodas motoras e esterçáveis na linha de centro e 1 roda omni-direcinal em cada canto	First
		2 rodas motoras com acionamento Diferencial na posição central e 1 roda omni-direcinal em cada canto	Terregator

Adaptado de Siegwart, Nourbakhsh and Scaramuzza (2011)

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Locomoção

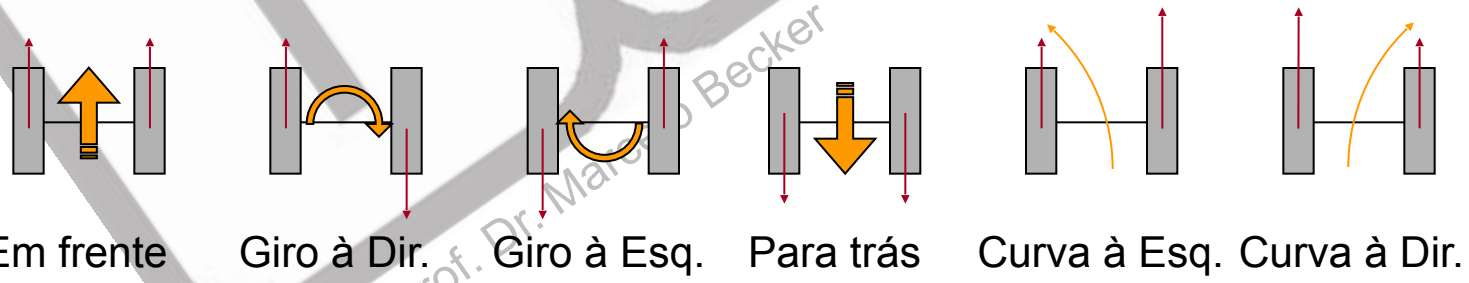
- Rodas
  - Diferentes arranjos de rodas (1, 2, 3, 4, 6,...)

	Arranjo	Descrição	Exemplos
6 Rodas		6 rodas motoras e 2 esterçáveis na linha de centro na frente e atrás	Solero

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Locomoção

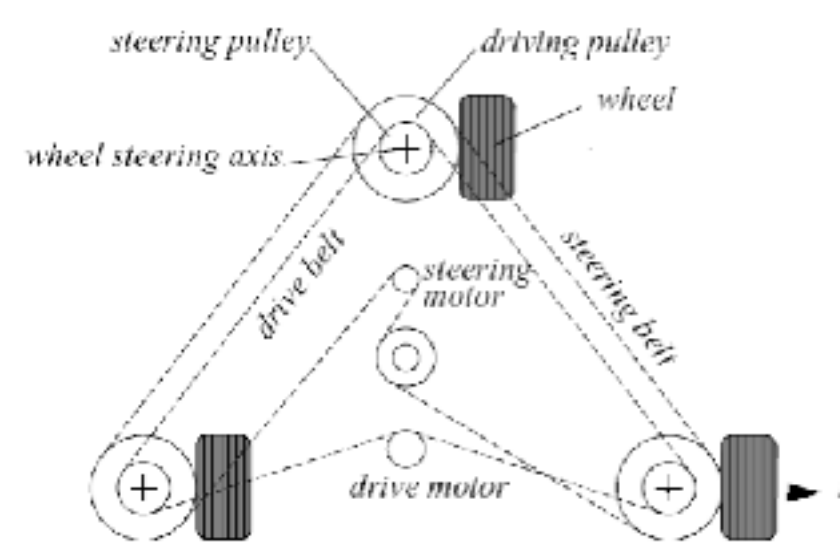
- Acionamentos
  - Acionamento Diferencial
    - 2 rodas posicionadas em um eixo de rotação comum
    - Cada roda é controlada independentemente
    - O valor das velocidades de cada roda define o movimento do robô (velocidade e direção)



Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC - USP

Locomoção

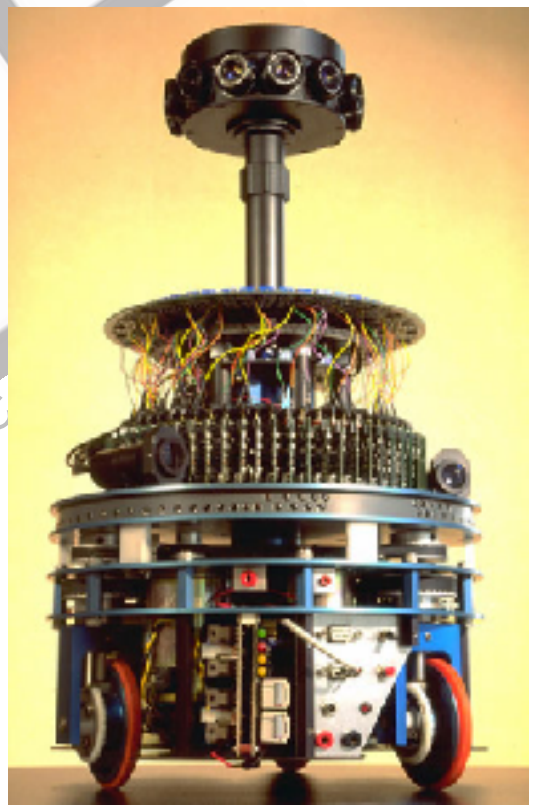
- Acionamentos
  - Acionamento Síncrono
    - Todas as rodas são acionadas de modo síncrono por um motor
      - Define a velocidade do robô
    - Todas as rodas são esterçadas de modo síncrono por outro motor
      - Define a orientação do robô



Prof. Dr. Marcelo Becker

Locomoção

- Acionamentos
  - Acionamento Síncrono
    - A orientação no espaço do sistema de referência do robô permanece sempre a mesma
      - Não é possível controlar a orientação do sistema de referência do robô...
    - Configuração usual: triângulo eqüilátero



Robot-Mouche (Franceschini)
1986 - 1991

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC

Locomoção

- Acionamentos
  - Acionamento Omni-Direcional
    - BallBot – CMU, 2006
      - Utiliza uma única roda esférica.
      - Foge ao padrão dos robôs com rodas, pois não busca o equilíbrio estático.
      - Projetado para ser facilmente adaptável em ambientes urbanos.

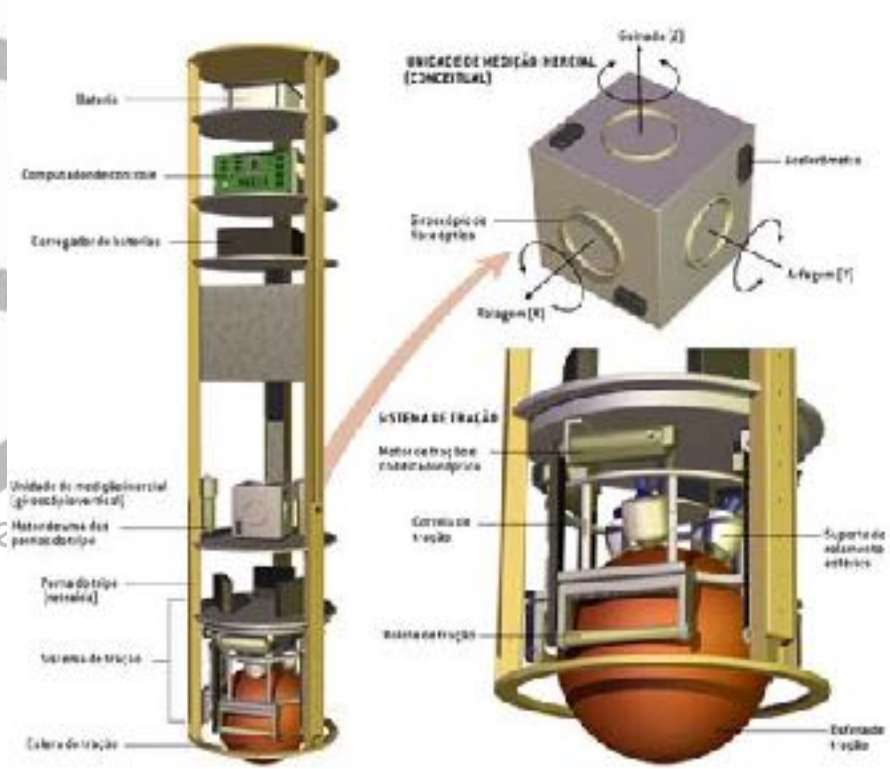
https://www.youtube.com/watch?v=NKTbtpg4vkg

https://www.youtube.com/watch?v=5le0tQBrGJU

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC - USP

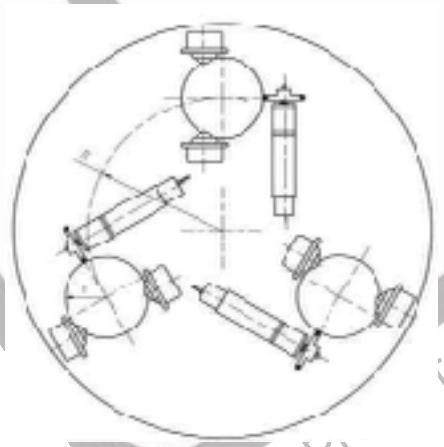
Locomoção

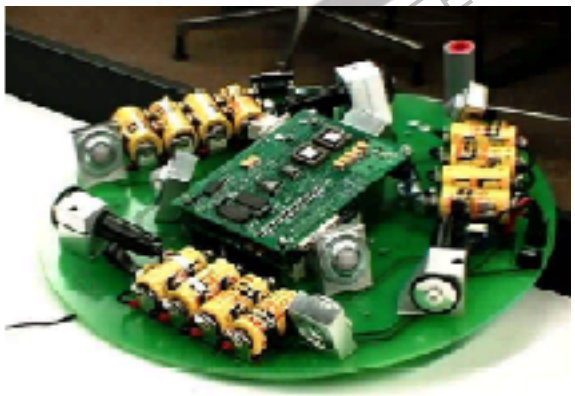
- Acionamentos
  - Acionamento Omni-Direcional
    - BallBot – CMU, 2006



Locomoção

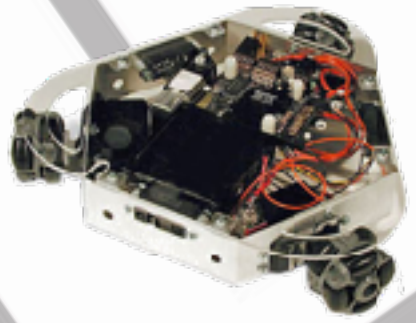
- Acionamentos
  - Acionamento Omni-Direcional
    - Tribolo – ISR-DMT-EPFL
      - 3 rodas esféricas em formação de triângulo eqüilátero
      - Robô holonômico





Locomoção

- Acionamentos
  - Acionamento Omni-Direcional
    - No plano tem-se 3DoFs
    - Logo apenas 3 rodas podem ser acionadas de modo independente...



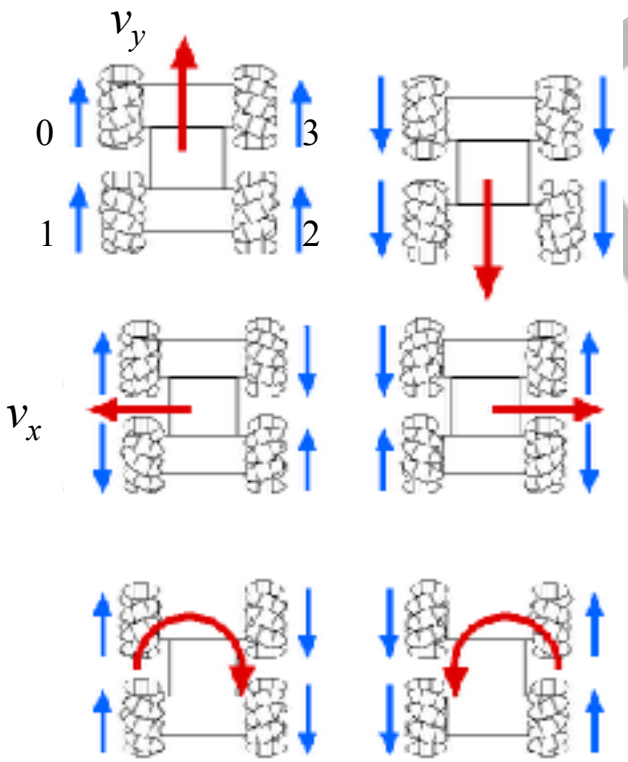
R141 - PolyWheels

R277 - PolyWheels

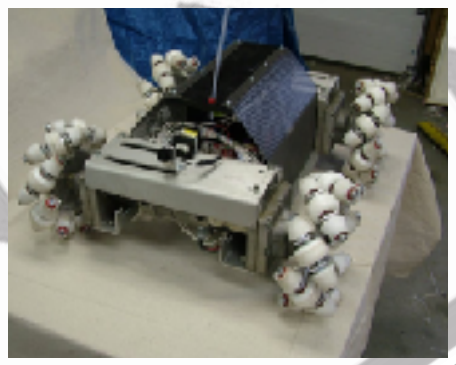
Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Locomoção

- Acionamentos
  - Acionamento Omni-Direcional



Modos de Operação



$$v_y = (v_0 + v_1 + v_2 + v_3)/4$$

$$v_x = (v_0 - v_1 + v_2 - v_3)/4$$

$$v_\theta = (v_0 + v_1 - v_2 - v_3)/4$$

https://www.youtube.com/watch?v=Z_w_Wyxo1NI

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Locomoção

- Acionamentos
  - Acionamento Omni-Direcional

AirTrax Company

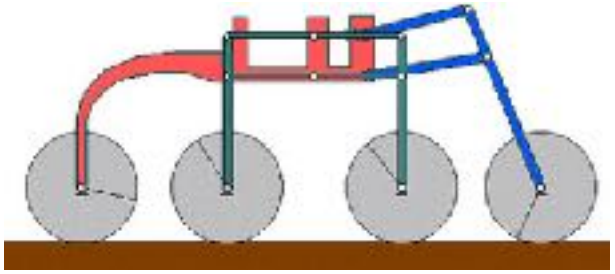
https://www.youtube.com/watch?v=8LqrjlqKhoQ

https://www.youtube.com/watch?v=vAiwLRGsNrE

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC

Locomoção

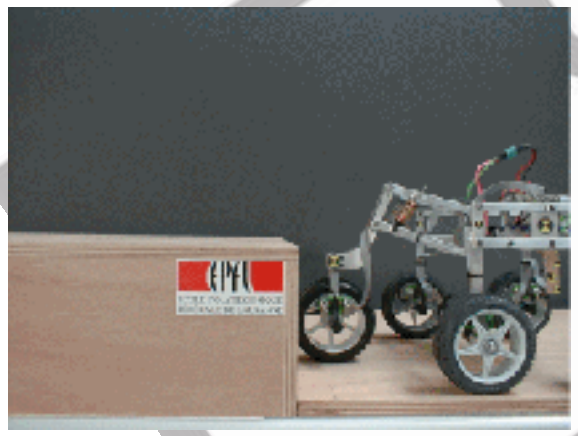
- Acionamentos
  - Acionamento para qualquer tipo de terreno (*All-Terrain Wheeled Robots*)
    - SHRIMP – EPFL
      - Adaptação passiva às irregularidades do terreno
      - 6 rodas: 1 à frente do robô com uma suspensão, 4 nas laterais e 1 fixa na traseira
      - Dimensões: 0,6 x 0,6 x 0,2m
      - Configuração estável em terreno irregular
      - Supera obstáculos 2x $Ø_{roda}$

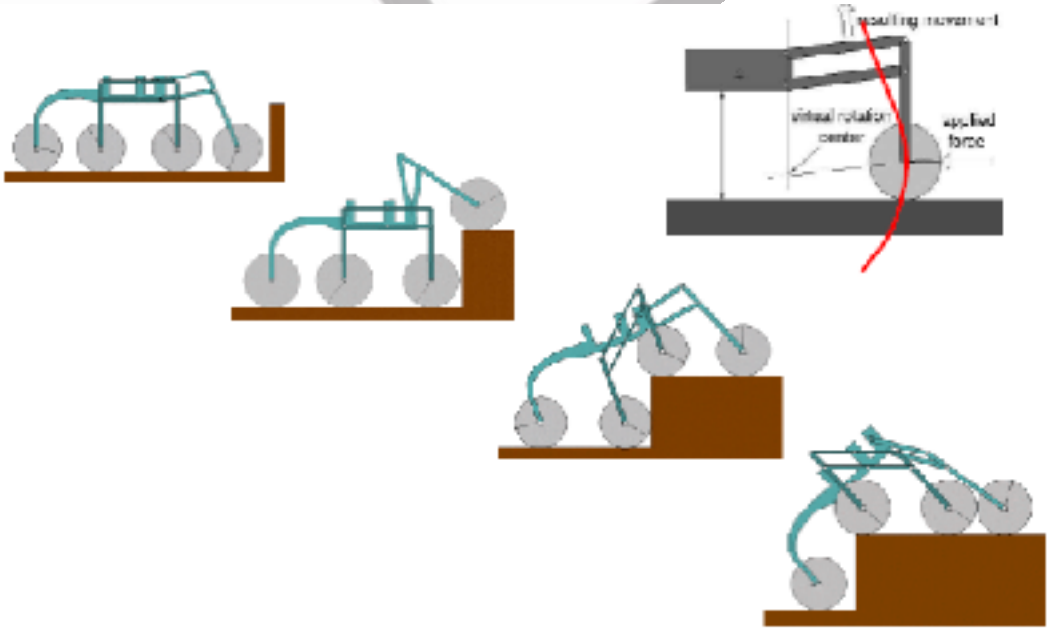


Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Locomoção

- Acionamentos
  - Acionamento para qualquer tipo de terreno (*All-Terrain Wheeled Robots*)
    - SHRIMP – EPFL





Locomoção

- Acionamentos
  - Acionamento para qualquer tipo de terreno (*All-Terrain Wheeled Robots*)
    - SHRIMP – EPFL

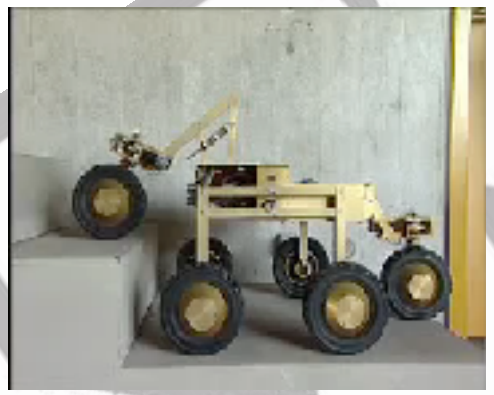
Prof. Dr. ... EESC – USP

Locomoção

- Acionamentos
  - Acionamento para qualquer tipo de terreno (*All-Terrain Wheeled Robots*)
    - Solero – EPFL

Locomoção

- Solero – EPFL

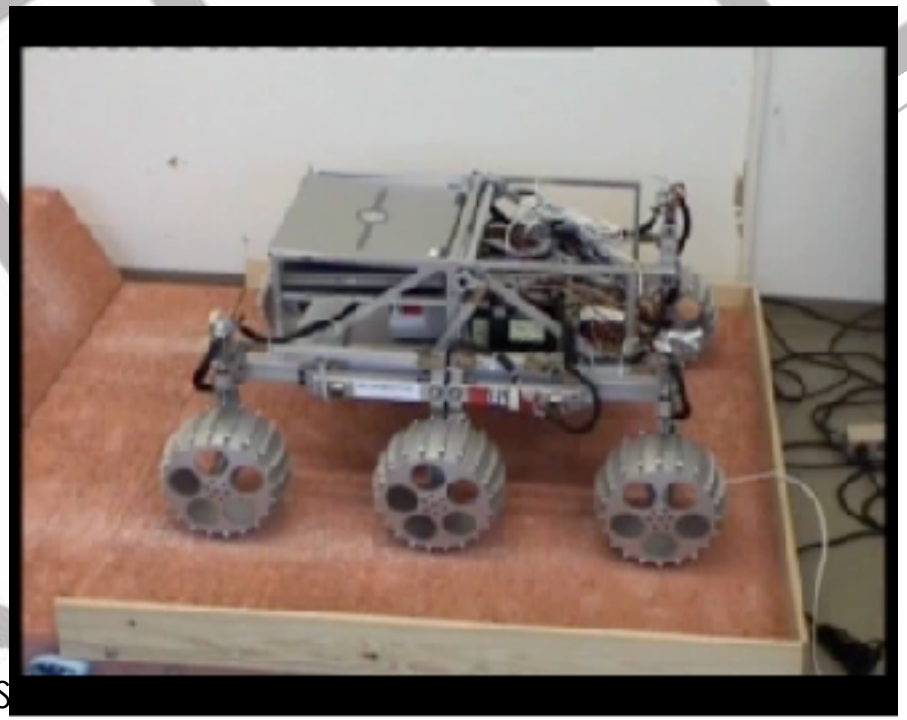


Locomoção

- Acionamentos
  - Acionamento para qualquer tipo de terreno (*All-Terrain Wheeled Robots*)
    - CRAB – EPFL/ETHZ

Locomoção

- Acionamentos
  - Acionamento para qualquer tipo de terreno (*All-Terrain Wheeled Robots*)
    - CRAB – EPFL/ETHZ



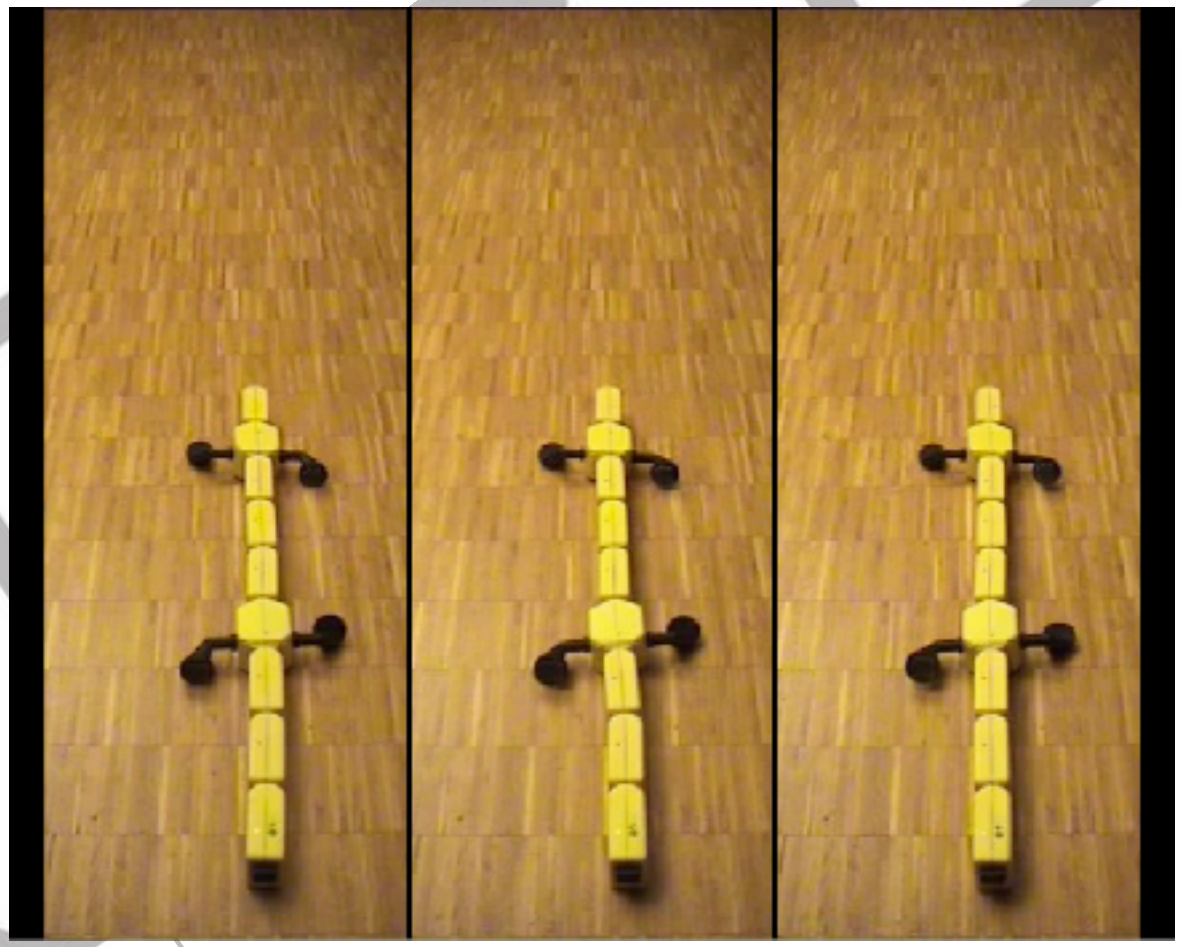
Locomoção

- Acionamentos Alternativos no solo
  - Robôs cobra / salamandra
  - Robôs escaladores
  - Robôs saltadores
  - Robôs Mistos...

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

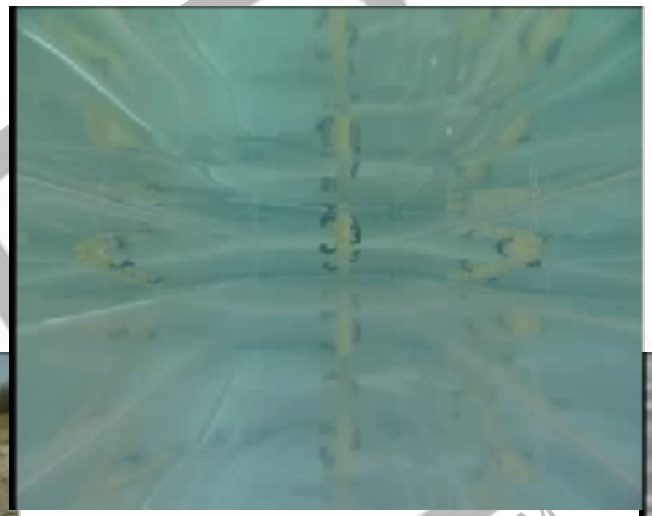
Locomoção

– Robôs cobra / salamandra



Locomoção

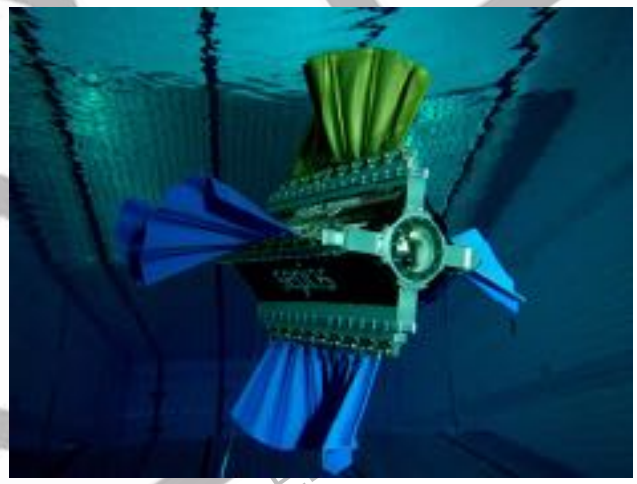
– Robôs cobra / salamandra



Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC - USP

Locomoção

- Acionamentos Alternativos fora do solo
  - Espaço
  - Aquáticos
    - Hélices
    - Jatos
    - Fins



http://sepios.org/

  - Aéreos
    - Asa rotativa
    - Asa fixa
    - Jato
    - Balões

Prof. Dr. Marcelo Becker SEM-EESC-USP

Sumário da Aula

- Introdução
- Atuadores
- Locomoção
- **Exercícios Recomendados**
- Bibliografia Recomendada

Prof. Dr. Marcelo Becker - EESC – USP

Exercícios Recomendados

- Discussão com o grupo...

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Sumário da Aula

- Introdução
- Atuadores
- Locomoção
- Exercícios Recomendados
- **Bibliografia Recomendada**

Prof. Dr. Marc... - SEM - EESC – USP

Bibliografia Recomendada

LIVROS

- SIEGWART, R. ,NOURBAKHSH, I. and SCARAMUZZA, D. ***Introduction to Autonomous Mobile Robots***. MIT Press, 2011.
- MURPHY, R. R. ***Introduction to AI robotics***. MIT Press, 2000.
- EVERRET, H. R. ***Sensors for mobile robots: theory and application***. A. K. Peters Ltd: Natick, Massachusetts, USA, 1995.
- BEKEY, G. A. ***Autonomous Robots: From biological inspiration to implementation and control***. MIT Press: Cambridge, Massachusetts, USA, 2005.

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC - USP

Bibliografia Recomendada

LIVROS

- WILLIAMS, K. ***Insectronics: build your own walking robot***. McGrawHill: New York, 2003.
- BREAZEAL, C. L. ***Desinging socialible robots***. MIT Press: Cambridge, Massachusets, 2002.
- KACHROO, P. and MELLODGE, P. ***Mobile robotic car design***. McGrawHill: New York, 2005.
- DORIGO, M. and COLOMBETTI, M. ***Robot shaping***. MIT Press: Cambridge, Massachusets, 1998.

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM – EESC – USP

Bibliografia Recomendada

SITES

- http://www.e-puck.org/
- http://www.swarm-bots.org
- http://brl.ee.washington.edu/Research_Past/Biologically_Based/Biologically_Based_Index.html
- http://www.esa.int/home-ind/ESA-Article-fullArticle_par-17_1054042928063.html
- http://www.neurotechnology.neu.edu/latmaneuvering.html
- http://eap.jpl.nasa.gov
- http://www.ias.uwe.ac.uk/energy-autonomy.htm

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC - USP

Bibliografia Recomendada

SITES

- http://web.mit.edu/spotlight/archives/troody.html
- http://omconsults.net/Bot/Mecanum.htm
- http://www.airtrax.com/vehicles/sidewinder.html
- http://www.msl.ri.cmu.edu/projects/ballbot
- http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/robots/3D_hopper/3D_hopper.html
- http://www.airtrax.com/vehicles/sidewinder.html

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC – USP

Bibliografia Recomendada

NOTAS DE AULA

- **Siegwart, R.** (ETHZ - Suíça):
http://www.mobilerobots.org

- **Simões, A. S.** (UNESP - Brasil):
http://www.sorocaba.unesp.br/professor/assimoes/rm/index.html

- **Zufferey, J-C.** (EPFL - Suíça):
http://moodle.epfl.ch/course/view.php?id=261

Prof. Dr. Marcelo Becker - SEM - EESC – USP