



ROBÔS MÓVEIS: LOCOMOÇÃO PMR3502

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

Arturo Forner-Cordero [aforner@usp.br]

Thiago de Castro Martins

PROGRAMA DA DISCIPLINA



Introdução;

Tipos de robôs móveis, locomoção;

Cinemática de robôs móveis;

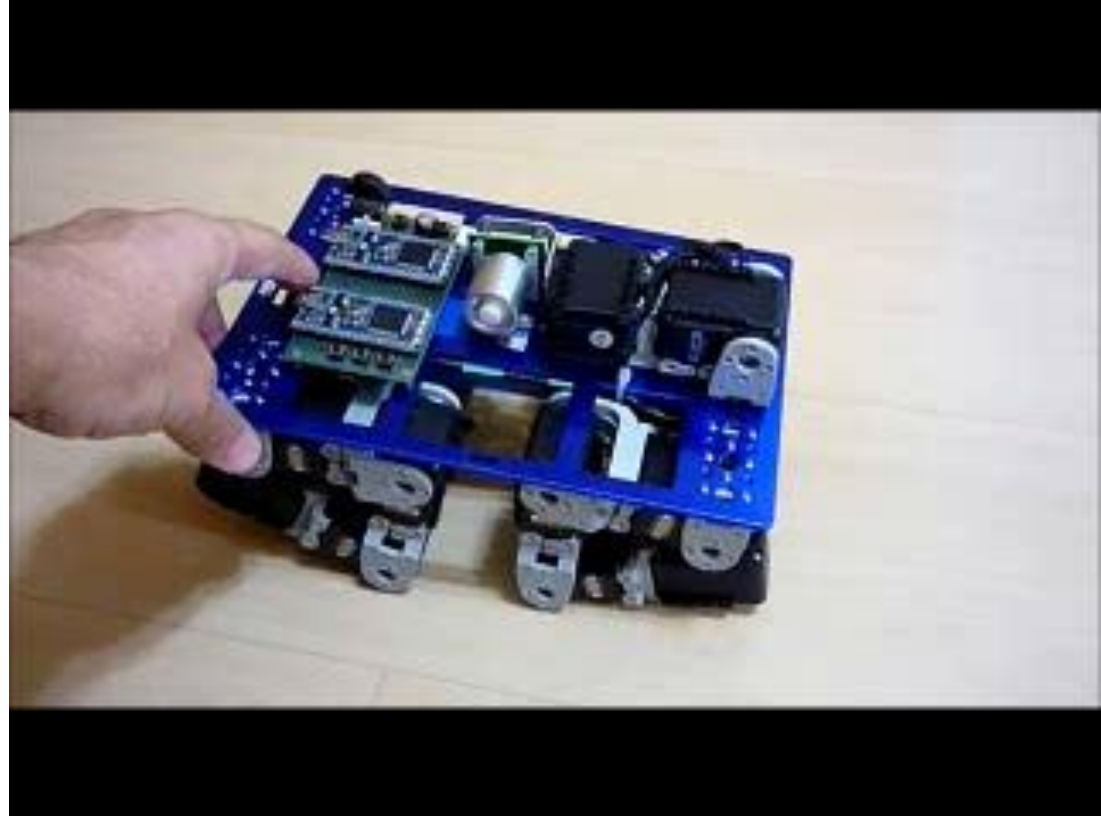
Sensores e atuadores;

Visão computacional;

Navegação:

Arquiteturas de controle:

Estudo de casos.

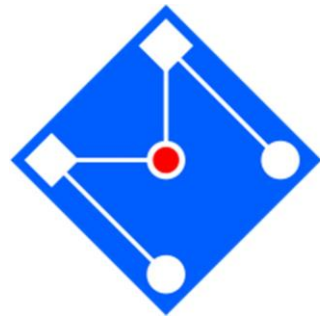


PERGUNTAS



- ~~1) Usaríamos um motor de passo em malha aberta para controlar um robô em ambiente não estruturados? Vantagens e desvantagens.~~
- 2) Temos um robô com patas. Considerando que o robô tem (pelo menos) uma pata no chão. Teria alguma ideia para calcular os possíveis pontos de contato no chão? Descreva.
- 3) Sistemas dinâmicos: Dois motores DC estão controlando as duas rodas de um robô. Qual seria o modelo dinâmico do mesmo? Isto é, tenho que controlar o deslocamento, quais tensões/correntes teria que dar aos motores para ir onde eu quero.
- 4) Tenho um robô bípede antropomórfico (humanoide). Como faço para ele não cair? Posso aplicar algum critério sobre onde deve a projeção no chão do seu centro de massas? Fiquem em pé... Tem que realizar algum tipo de atividade muscular com as pernas para não cair?

OBJETIVOS



Locomoção;

- Conceitos;
- Graus de liberdade;
- Robôs com pernas;
- Robôs com rodas;
- Qual a melhor opção?

Numero de patas:

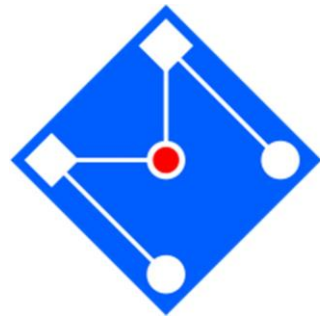
- 1 pata: robô “saltitante” (pogo stick robot)
- 2 patas: humanos, aves
- 3 patas
- 4 patas: mamíferos, reptis
- 6 ou mais patas: insetos

Tipos de rodas

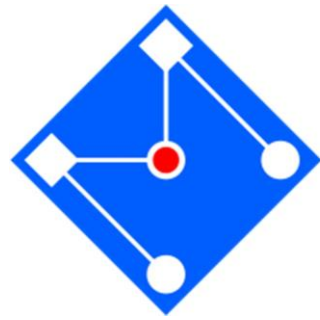
- Configuração do veículo com rodas
- Cinemática dos robôs com rodas

SUMÁRIO

1. Locomoção
2. Locomoção com rodas
3. Tipos de rodas
4. Arranjos das rodas



LOCOMOÇÃO



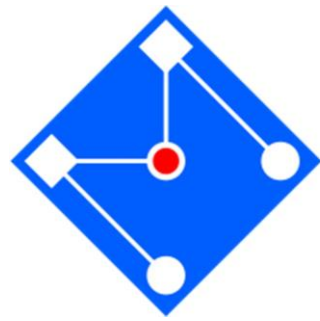
Locomoção é o ato de se mover de um lugar para o outro.

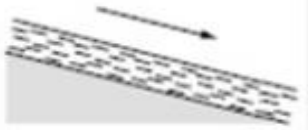


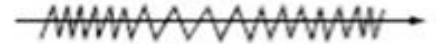


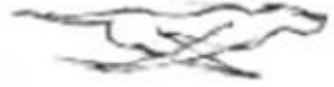




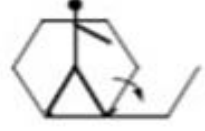
A locomoção exige interação física entre o robô e o ambiente.

Muitas formas de locomoção usadas na robótica são inspiradas na natureza.

A maioria das formas de locomoção naturais são muito difíceis de se imitar tecnicamente.

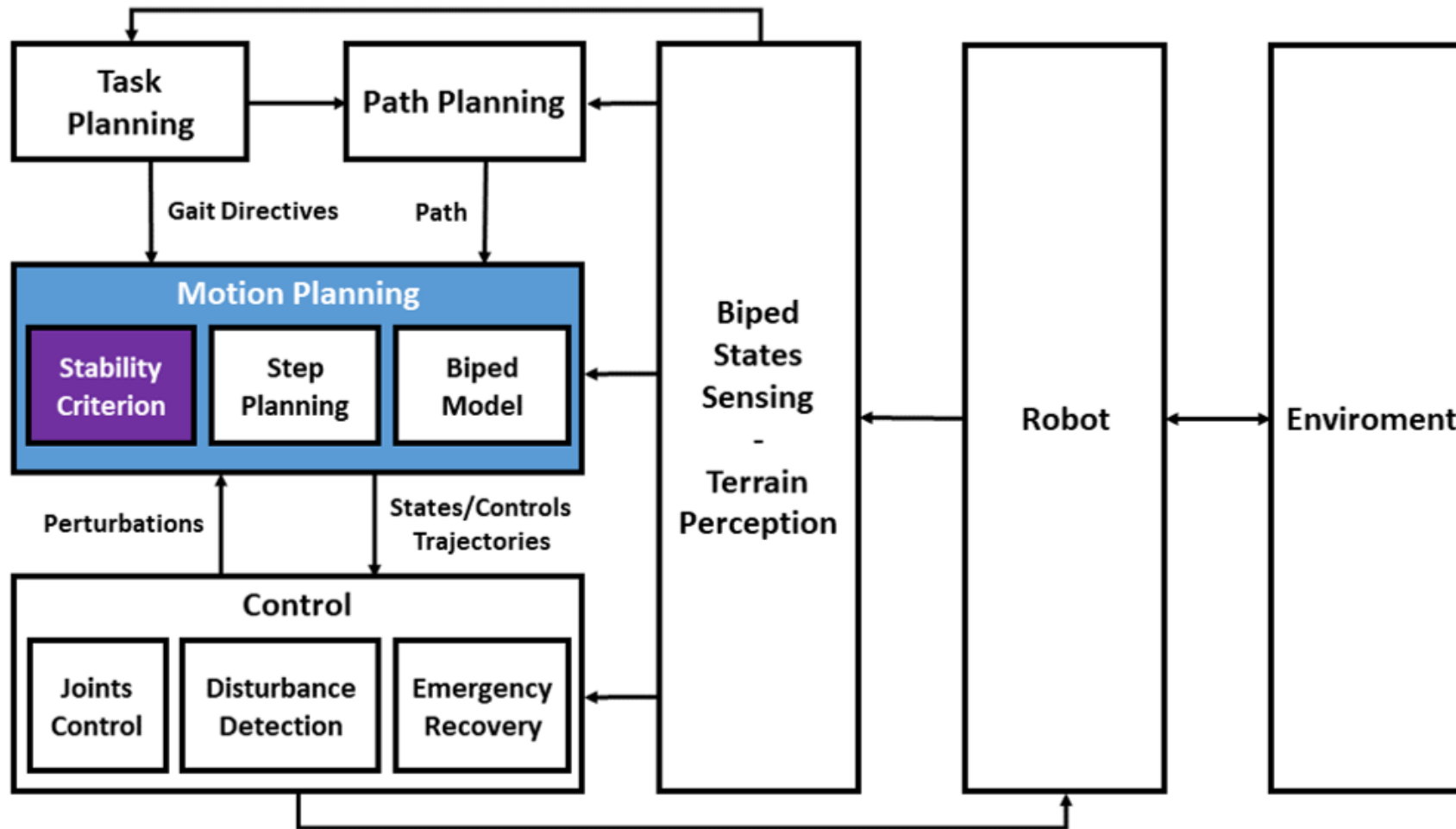
MECANISMOS BIOLÓGICOS DE LOCOMOÇÃO



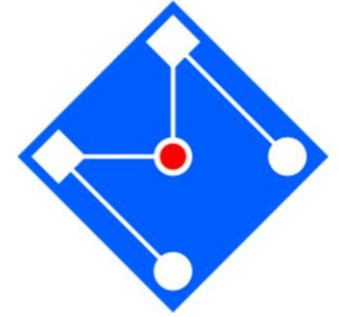
Type of motion	Resistance to motion	Basic kinematics of motion
Flow in a Channel 	Hydrodynamic forces	Eddies 
Crawl 	Friction forces	Longitudinal vibration 
Sliding 	Friction forces	Transverse vibration 
Running 	Loss of kinetic energy	Oscillatory movement of a multi-link pendulum 
Jumping 	Loss of kinetic energy	Oscillatory movement of a multi-link pendulum 
Walking 	Gravitational forces	Rolling of a polygon (see figure 2.2) 

Introduction to Autonomous Mobile Robots. Siegwarts & Nourbarkhsh. MIT Press.

ARQUITETURA DE CONTROLE

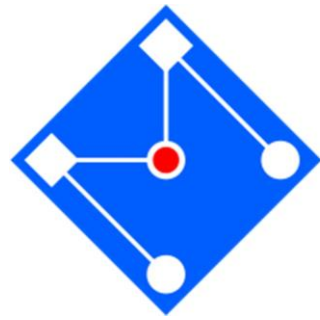


PROBLEMAS ENVOLVIDOS NA LOCOMOÇÃO:



- Caminho do robô
- Características do contato;
- Trajetórias das articulações
- Tipo de ambiente;
 - Tipo de terreno;
 - Estrutura do ambiente;
 - Inclinação do terreno;
 - Meio (água, ar, chão duro ou macio).
- Movimento das rodas
- Estabilidade

LOCOMOÇÃO



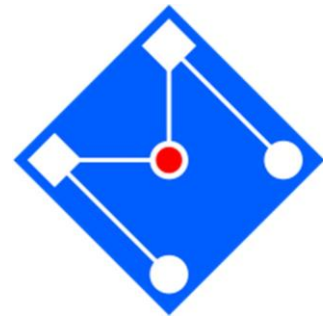
Estabilidade:

- Número de pontos de contato;
- Centro de gravidade;
- Estabilidade estática versus estabilidade dinâmica:
- Estabilidade dinâmica \Rightarrow problema de controle.
- Inclinação do terreno.

Contato:

- Ponto ou área de contato;
- Ângulo de contato;
- Atrito.

LOCOMOÇÃO: PRINCÍPIOS DA NATUREZA



Caminhar:

- 2 pernas \Rightarrow homem e algumas aves;
- 4 pernas \Rightarrow maioria dos mamíferos;
- 6 pernas \Rightarrow insetos.

Rastejar:

- Cobra, vermes.

Voar:

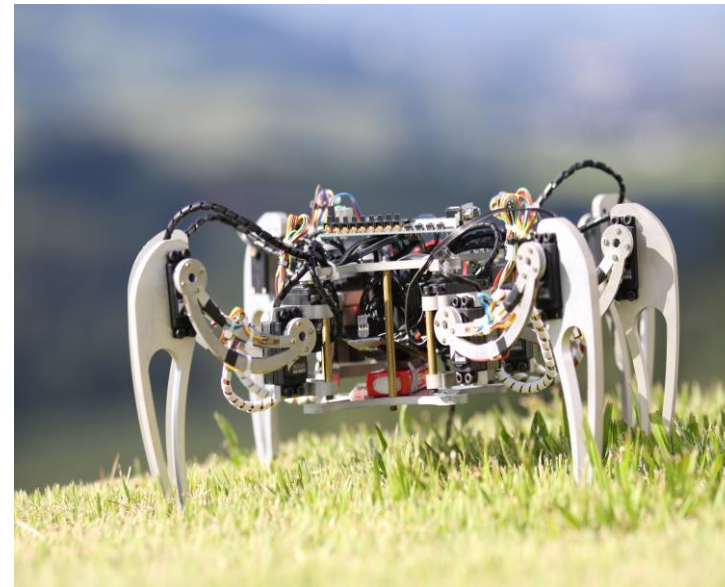
- Pássaros;

Nadar:

- Peixes.

Pular:

- Sapos, rãs, lebre.



Myrmex. R. Bachega.

LOCOMOÇÃO: TIPOS NA ROBÓTICA



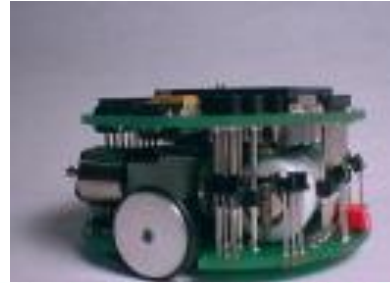
Pernas;

Flutuação livre;

Rastejar;

Rodas;

Esteiras.



RODAS OU PERNAS?

Rodas \Rightarrow menor número de atuadores.

Pernas \Rightarrow maior complexidade estrutural.

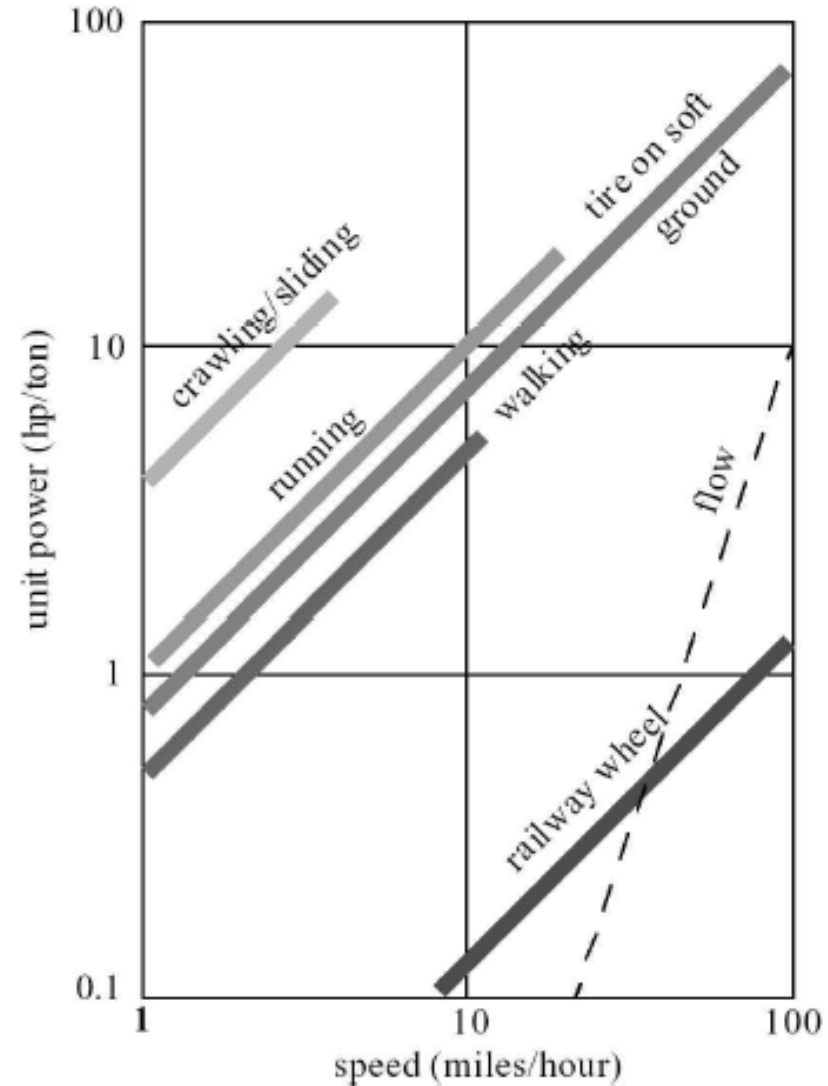
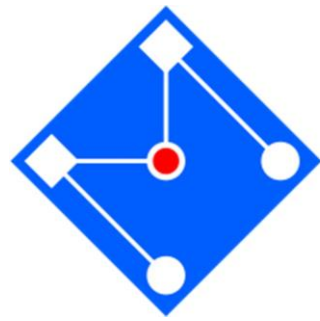
Pernas \Rightarrow maior dificuldade de controle.

Rodas \Rightarrow maior eficiência energética.

Pernas \Rightarrow qualquer terreno (plano, subida etc).

Pernas \Rightarrow movimento das massas envolvidas:

- Andar e correr Inclui movimento do CG subindo e descendo;
- Algumas perdas extras.



LOCOMOÇÃO COM RODAS



Forma mais popular em robôs móveis.

Não existe na natureza.

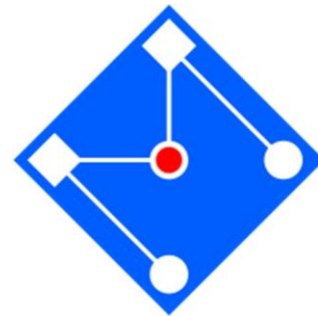
Rodas são em geral a solução mais apropriada para a maioria das aplicações atuais.

Rodas são eficientes em superfícies planas.

Rodas não são muito eficientes em terrenos naturais (irregulares ou brandos).

Implementação mecânica simples.

LOCOMOÇÃO COM RODAS



Principais aspectos e problemas:

- Estabilidade, tração, manobrabilidade e controle.

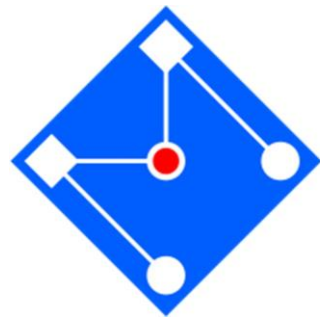
Estabilidade em geral não é problema para locomoção com rodas \Rightarrow 3 rodas são suficientes para garantir estabilidade.

- Centro de gravidade fica dentro do triangulo formado pelos pontos de contato das rodas com o chão.

Estabilidade é melhorada com 4 ou mais rodas:

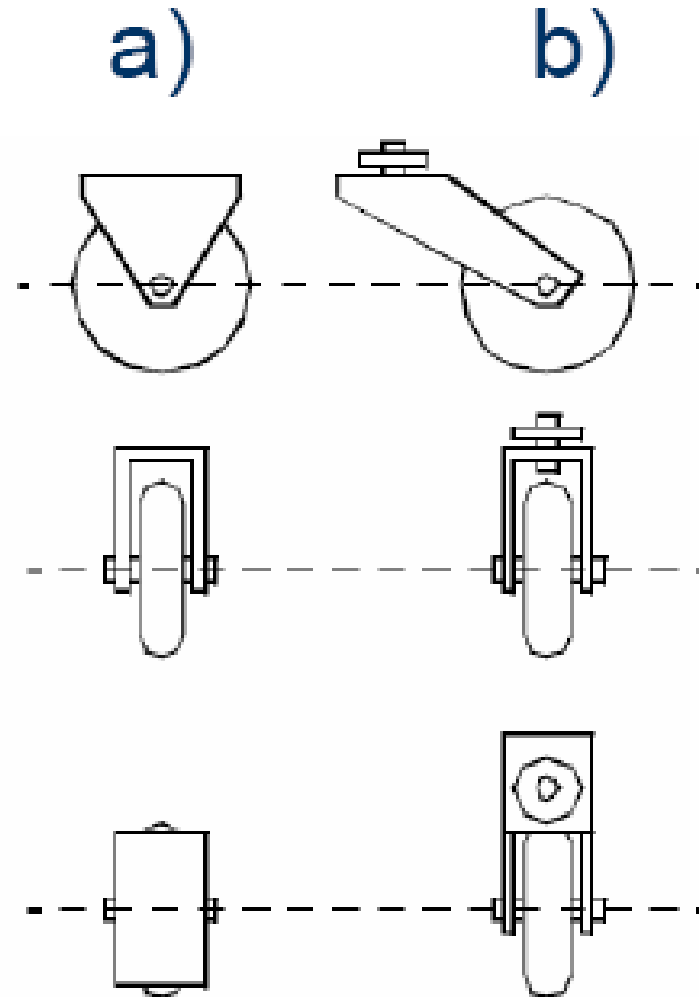
- Robôs com mais do que 3 rodas forma um arranjo hiper-estático \Rightarrow requer suspensão flexível.

TIPOS DE RODAS

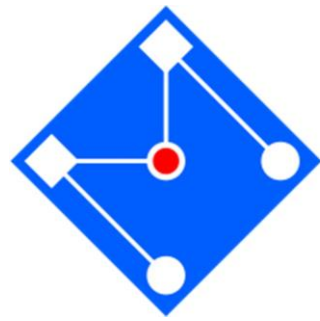


a) Roda padrão:
1 G. de L.

b) Roda castor:
2 G. de L.

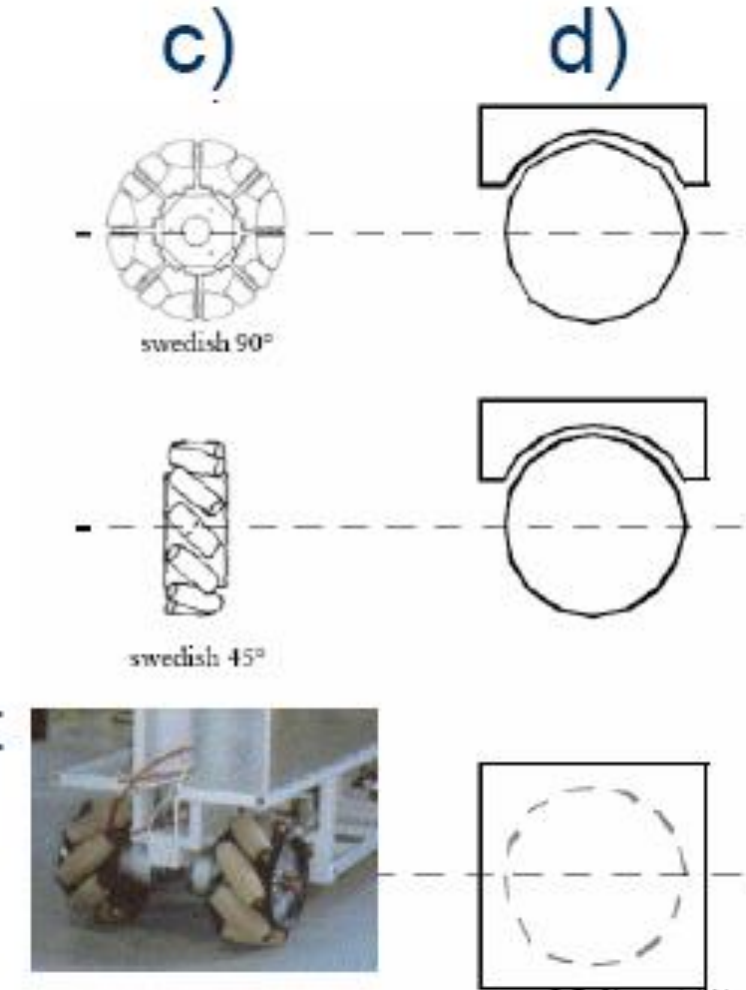


TIPOS DE RODAS



c) Roda suíça
(omnidirecional):
2 G. de L.

d) Roda esférica:
2 G. de L.
⇒ Apresenta
dificuldades técnicas



RODA OMNIDIRECIONAL

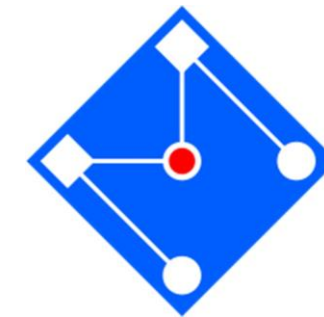
Permite o movimento em qualquer direção sem necessidade de direcionar as rodas.

Constituídas de roletes colocados na periferia da roda.

Com 3 ou mais rodas omnidirecionais motorizadas \Rightarrow robô se move em qualquer direção sem fazer curvas (robô holomônico).

Mais sobre rodas omnidirecionais:

<http://www.omniwheel.com>



URANUS. (CC by 3.0)

MOVIMENTO NO PLANO



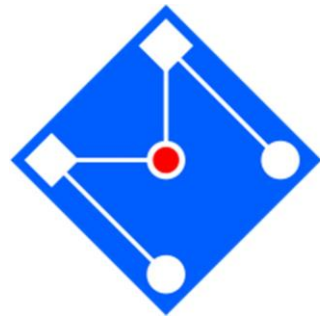
Um objeto no plano tem 3 graus de liberdade:

- 2 de translação;
- 1 de rotação.

Com 3 motores adequadamente posicionados o robô pode se mover instantaneamente em qualquer direção do seu espaço de configuração.

Robô holonômico \Rightarrow se move instantaneamente em qualquer direção sem necessidade de fazer curvas.

ARRANJO DAS RODAS



Existem muitas opções para combinar os diversos tipos de rodas em diferentes configurações.

Tipo e arranjo de rodas determina a cinemática do movimento.

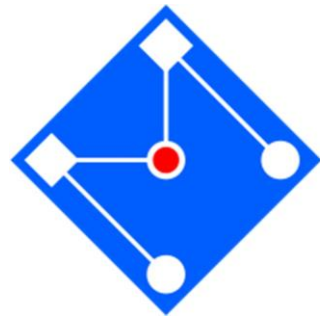
A seleção e o arranjo das rodas depende da aplicação.

Rodas grandes permitem passar obstáculos maiores \Rightarrow porém exigem torques maiores.

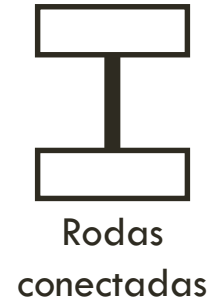
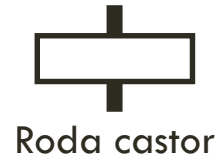
A maioria dos arranjos são não holonômicos \Rightarrow exigem controle mais complexo.

Combinar motorização e direção em uma roda aumenta a complexidade e causa erros de posicionamento.

ARRANJO DAS RODAS



Legenda:

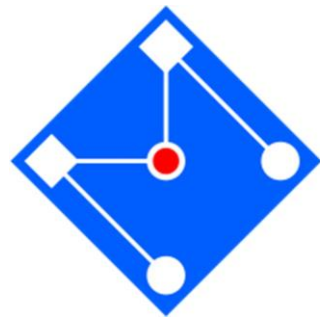


Arranjos de 2 rodas:

- Uma roda de direção e uma de tração;
- Rodas com movimento diferencial.

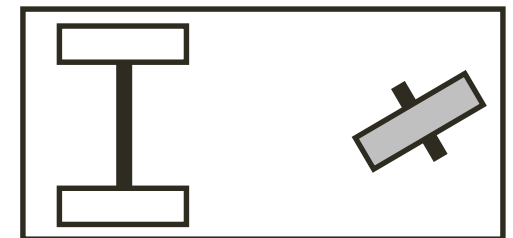
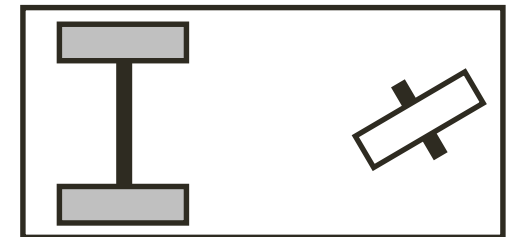
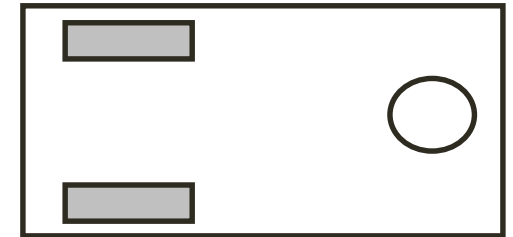
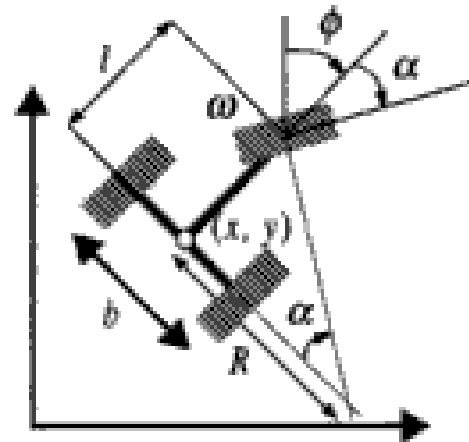
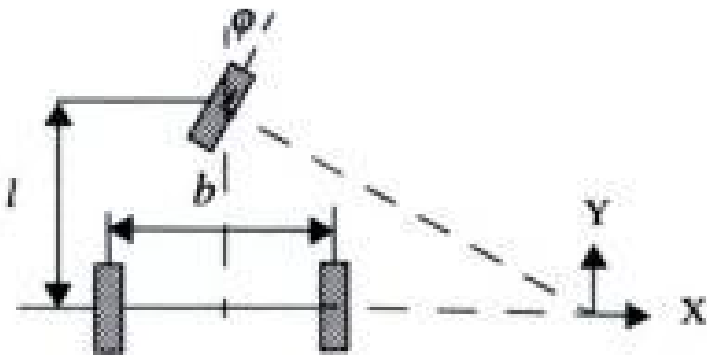


ARRANJO DAS RODAS

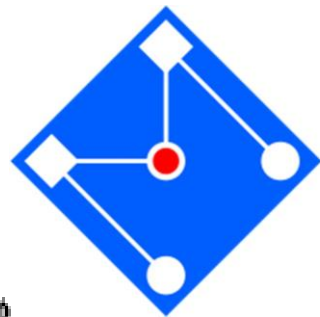
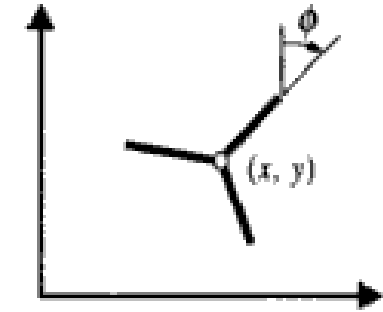
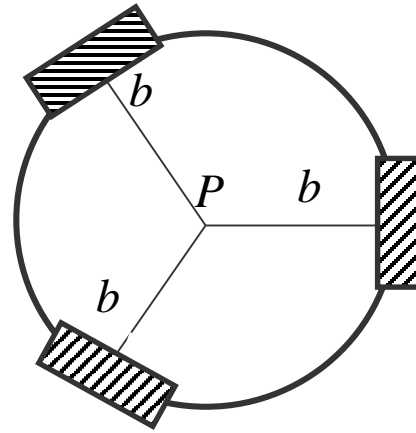


Arranjos de 3 rodas (Triciclo):

- Rodas diferenciais com um terceiro ponto de contato;
- Duas rodas motorizadas conectados por um eixo e uma roda de direção;
- Duas rodas livres e uma roda de direção motorizada.

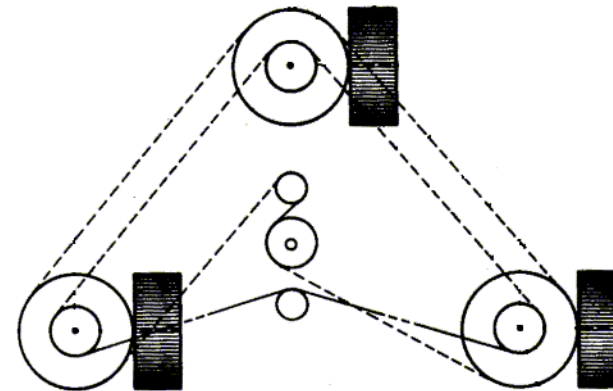


ARRANJO DAS RODAS

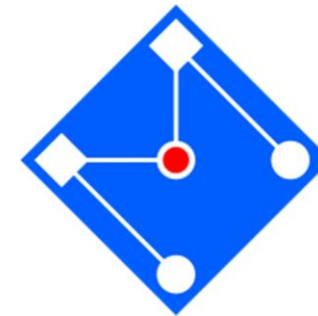


Arranjos de 3 rodas:

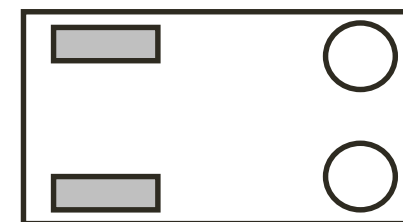
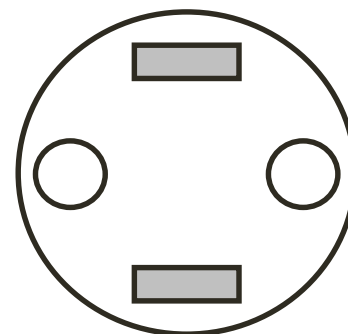
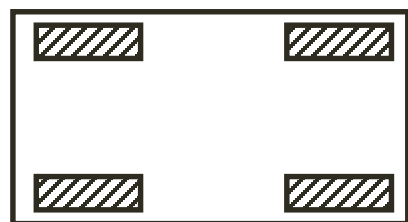
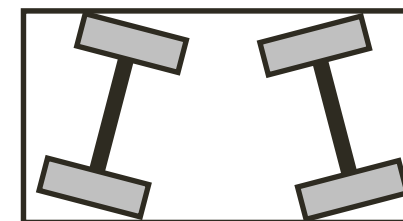
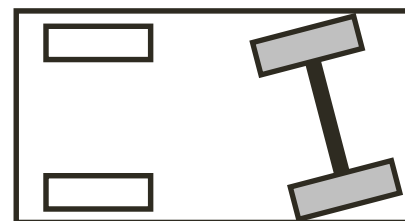
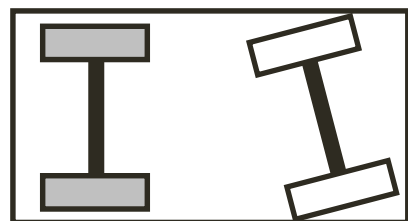
- Três rodas omnidirecionais (motorizadas) \Rightarrow robô holomônico;
- Três rodas sincronizadas com motorização e direção \Rightarrow dificulta o controle de orientação.



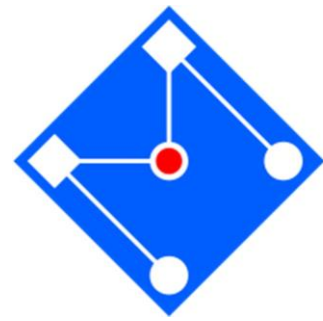
ARRANJO DAS RODAS



Arranjos de 4 rodas:

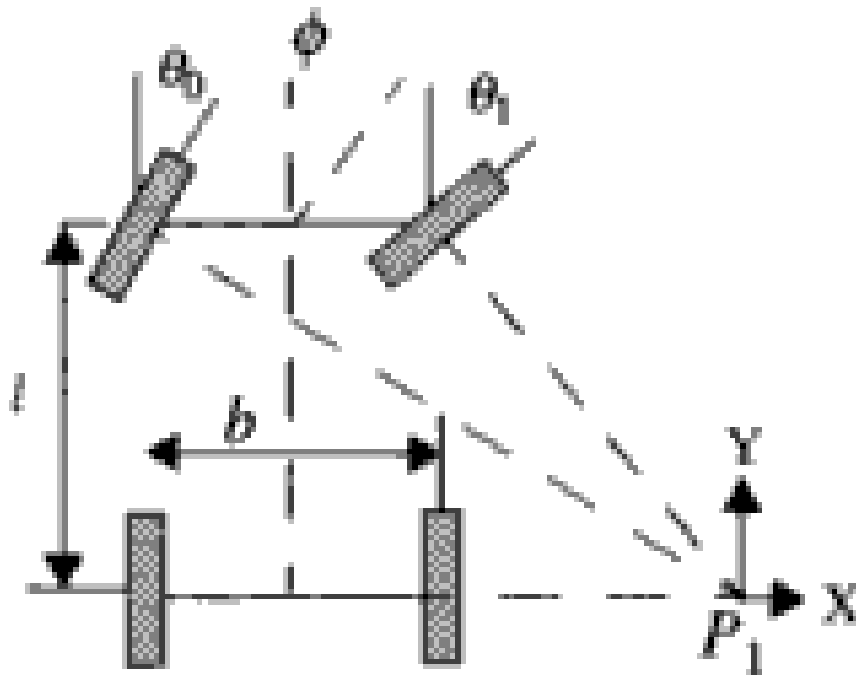


SISTEMA ACKERMAN



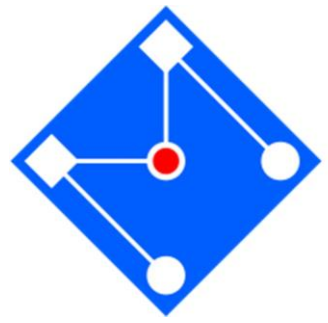
Veículos 4 rodas convencionais

$$\theta_1 > \theta_0$$



Fonte: Ollero A. Robótica. 2005.

RODAS DIFERENCIAIS

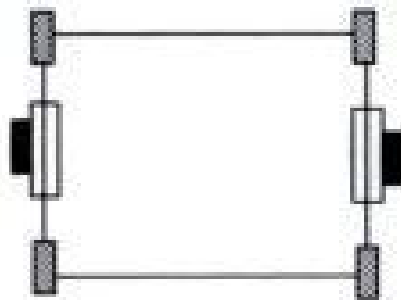


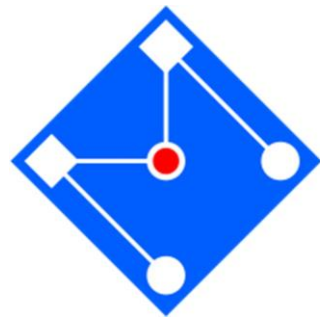
As rodas podem ser controladas independentemente e de formas diferentes:

- Motorização diferencial \Rightarrow duas ou mais rodas podem ser controladas de forma independente;
- Direção diferencial \Rightarrow duas ou mais rodas podem ser direcionadas de forma independente.

Porque rodas diferenciais é útil?

- Direcionar as rodas em qualquer direção \Rightarrow permitindo, por ex., girar parado;
- Permite seguir trajetórias arbitrárias.

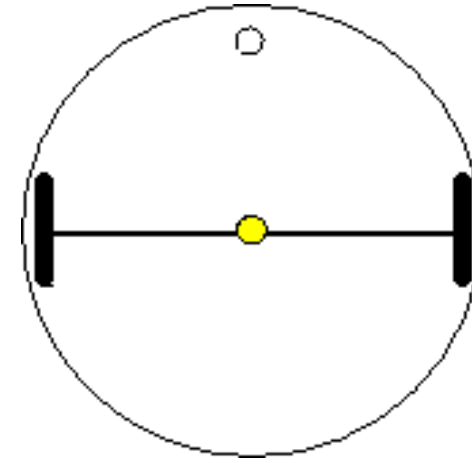
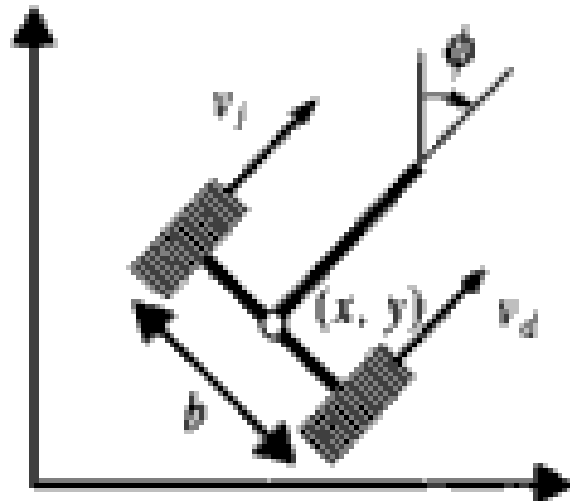




DUAS RODAS DIFERENCIAIS

Uma forma:

- Duas rodas motorizadas e uma roda castor passiva;
- b é a distância entre as rodas motorizadas.



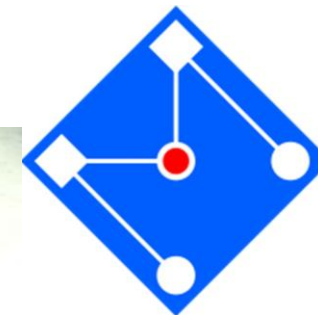
$$\Delta U_i = (\Delta U_R + \Delta U_L)/2.$$

$$\Delta \theta_i = (\Delta U_R - \Delta U_L)/b$$

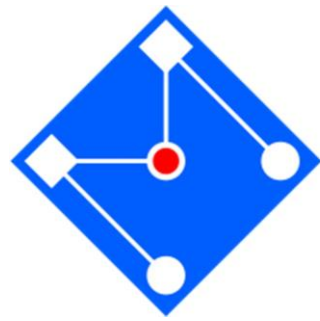
DUAS RODAS DIFERENCIAIS

Robô Pioneer P3DX:

- Robô de uso geral;
- Muito utilizado em pesquisa e ensino na área de robótica;
- Mais informações:
<http://robots.mobilerobots.com/>



DUAS RODAS DIFERENCIAIS

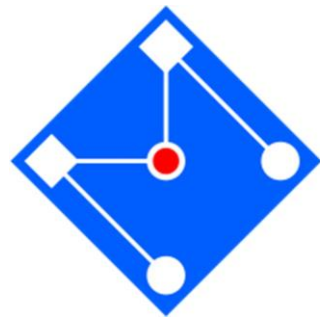


Robô Cyé:

- Robô doméstico que pode aspirar pó e fazer entregas dentro de casa;
- Fabricado pela Probotics, Inc;
- Mais informações:
<http://www.personalrobots.com>



TRÊS RODAS SINCRONIZADAS



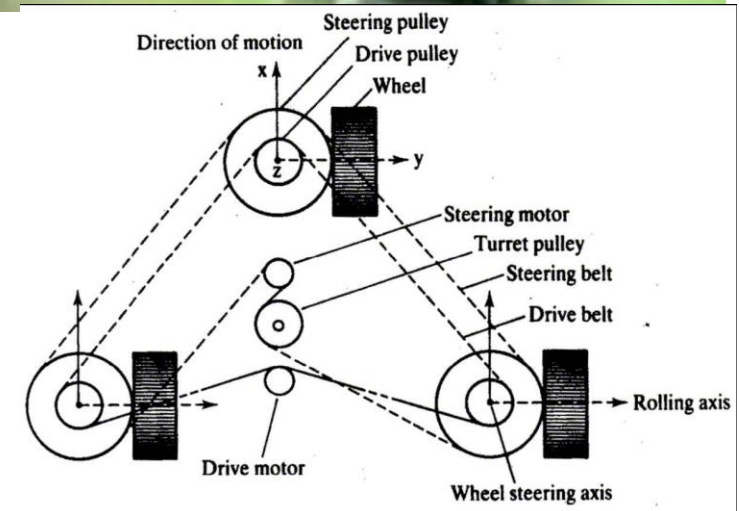
Todas as rodas são atuadas em conjunto por um único motor que define a velocidade do robô.

Todas as rodas são direcionadas em conjunto por um segundo motor que define a direção do robô.

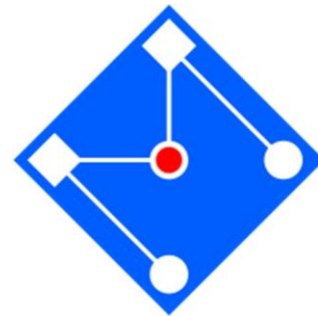
A orientação do robô no espaço permanece sempre a mesma \Rightarrow não é possível alterar a orientação do robô.

Robô *sincro-drive* de [Borenstein](http://www-personal.umich.edu/~johannb/):

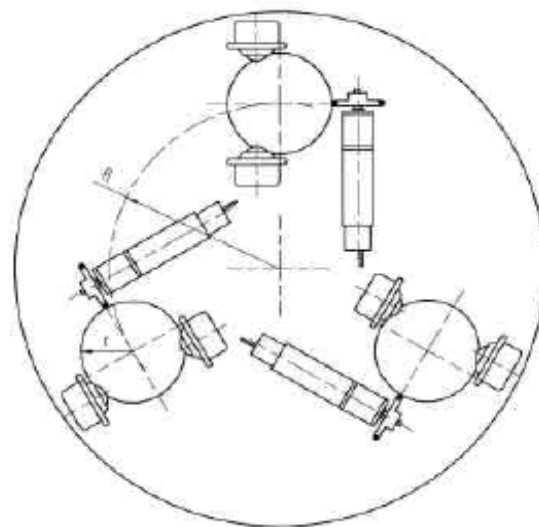
<http://www-personal.umich.edu/~johannb/>



TRÊS RODAS ESFÉRICAS



Robô holomônico Tribolo.



<http://www.innowebtive.com/kteam/boards/kameleon/tribolo.html>

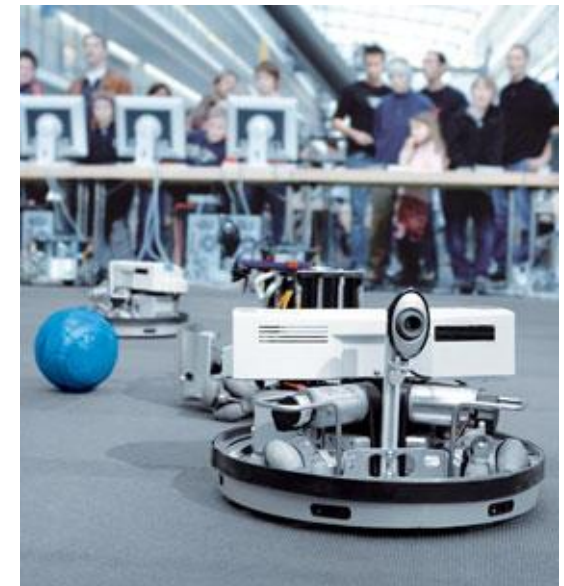
ROBÔ HOLOMÔNICO COM 3 RODAS



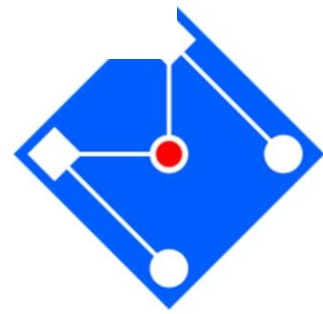
Robotino da Festo.

Mais informações: <http://www.festo-didactic.com/int-en/learning-systems/new-robotino/>

Cinemática de um robô holonômico com 3 rodas omnidirecionais?



ROBÔ HOLOMÔNICO COM 4 RODAS

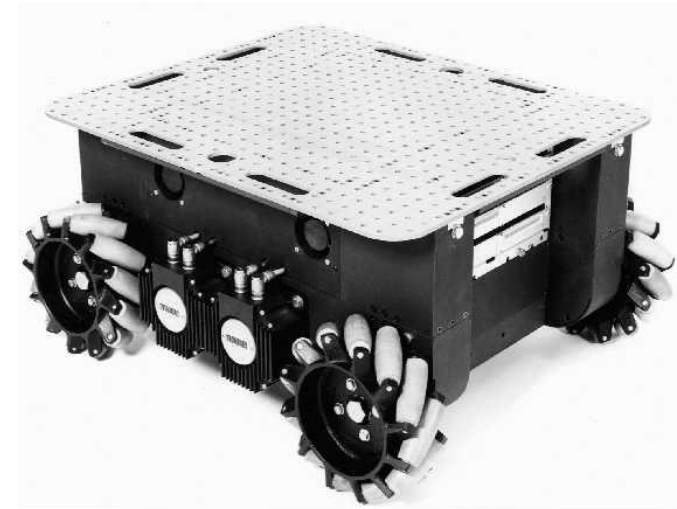


Movimento no plano tem 3 graus de liberdade:

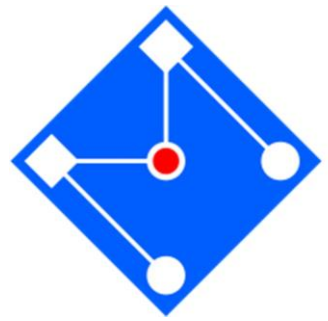
- Portanto somente 3 rodas podem ser controladas de forma independente;
- Seria melhor usar 3 rodas omnidirecionais em uma arranjo de triângulo.
- 4 rodas tem vantagens de estabilidade e capacidade de carga

Empilhadeira da [Airtrax](http://www.airtrax.ca):

<http://www.airtrax.ca/sidewinder.htm>



RODAS PARA VENCER OBSTÁCULOS



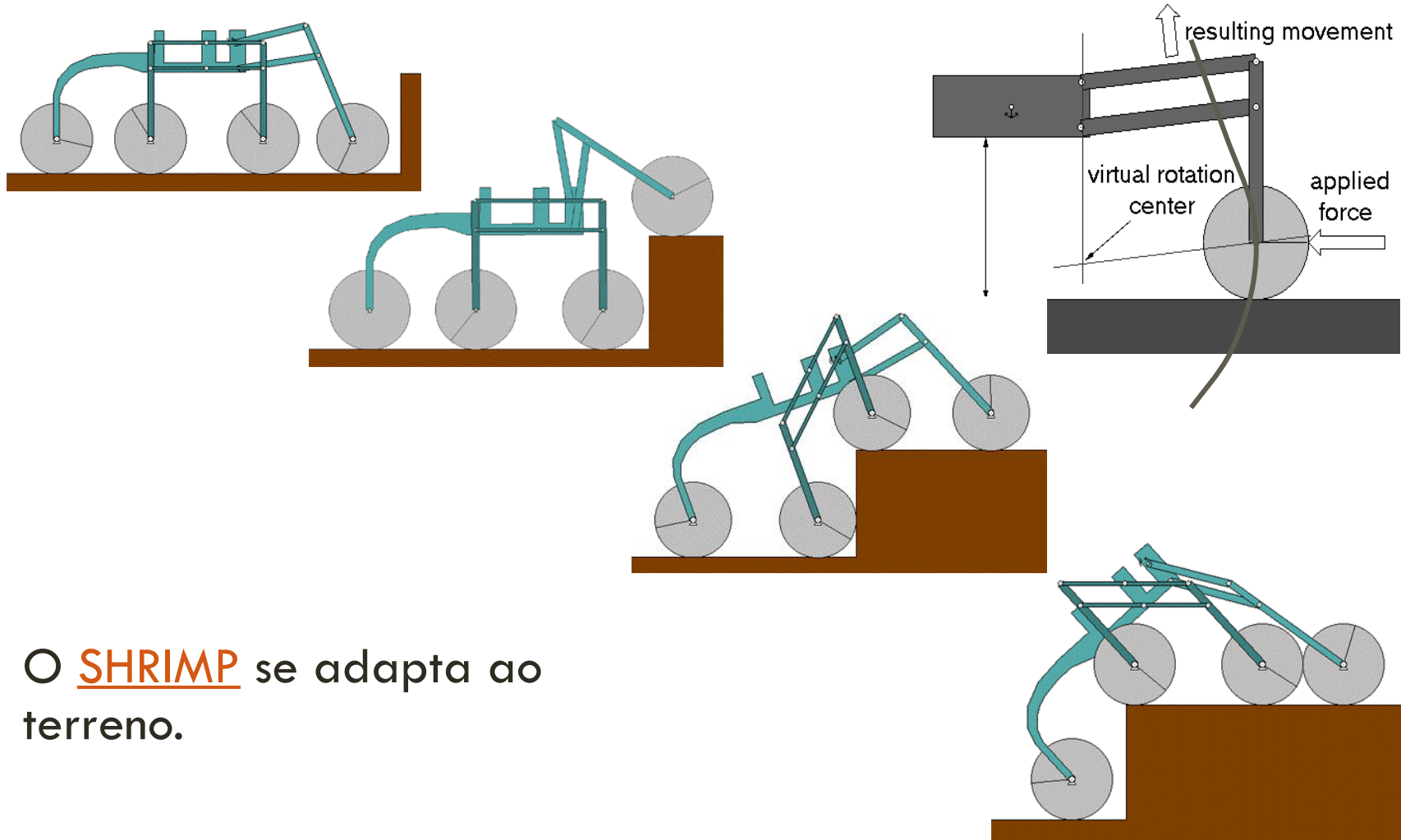
SHRIMP \Rightarrow robô móvel com capacidade vencer obstáculos:

- Possui 6 rodas:
 - 1 roda fixa na traseira;
 - 2 conjuntos de 2 rodas conectadas em cada lado;
 - 1 roda na frente com suspensão com molas.
- Tamanho: cerca de 60cm de comprimento por 20cm de altura.
- Bastante estável em terrenos acidentados.
- Ultrapassa obstáculos de até 2 vezes o diâmetros das suas rodas.



Mais informações: <http://www.bluebotics.com/solutions/Shrimp>

RODAS PARA VENCER OBSTÁCULOS



○ SHRIMP se adapta ao terreno.

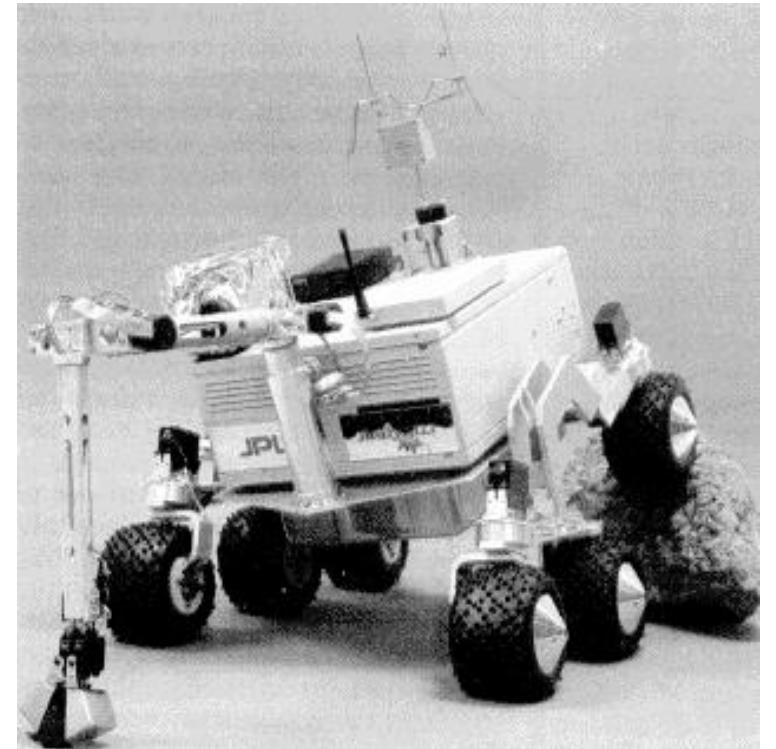
RODAS PARA VENCER OBSTÁCULOS



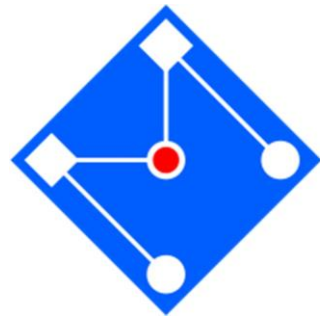
O SHRIMP é somente um exemplo de robôs com múltiplas rodas e com suspensão complexa capazes de vencer obstáculos.

Outros robôs tipos “rovers”:

- Pernosal rover;
- K9 rover;
- Mars rover.



LOCOMOÇÃO COM ESTEIRAS



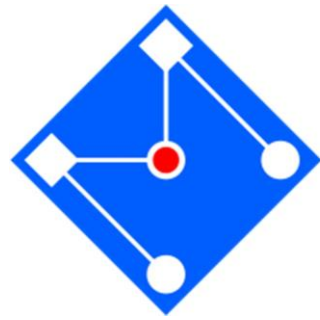
Esteiras representam outra solução atrativa para robôs móveis. Porque?

Exemplos:

- [Wayfare robot.](#)
- [Neomover.](#)



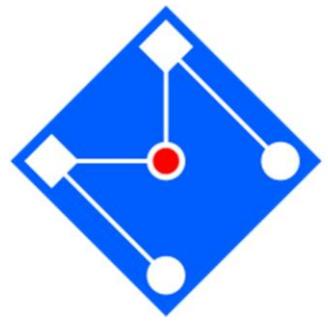
LOCOMOÇÃO COM PERNAS



Características:

- Adaptabilidade e manobrabilidade em terreno acidentado.
- Mecanicamente complexo.
- Pouco eficiente em termos de energia.
- Controle complexo.
- Comum na natureza.
- Estabilidade é um problema.

LOCOMOÇÃO COM PERNAS



Robôs precisam ser estáveis para realizarem as suas tarefas.

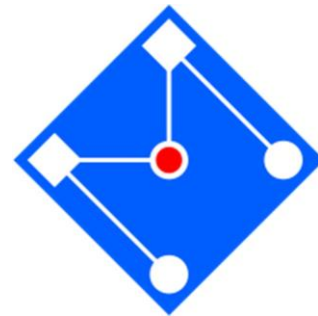
Estabilidade pode ser:

- Estática: o robô pode ficar em pé sem cair;
- Dinâmica: o robô deve balançar ou se mover para ficar estável.

Estabilidade estática é obtida por meio do projeto mecânico do robô.

Estabilidade dinâmica é alcançada por meio de controle com realimentação.

LOCOMOÇÃO COM PERNAS



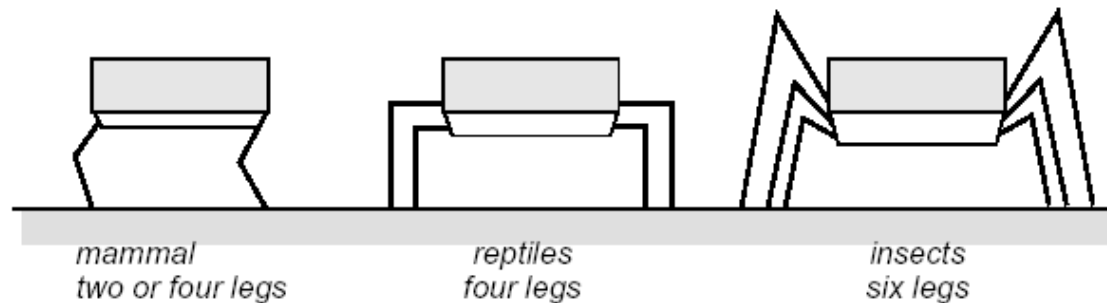
Quanto menor o número de pernas mais complicada se torna a locomoção:

- Pelo menos 3 pernas são necessárias para estabilidade estática em repouso.

Durante a caminhada as pernas são levantadas:

- Perde-se estabilidade?

Para caminhada com equilíbrio estático pelo menos 4 pernas são necessárias.



LOCOMOÇÃO COM PERNAS



Como é a estabilidade dos seres humanos?

- Seres humanos não são estaticamente estáveis;
- Controle ativo do cérebro é necessário para manter estabilidade, embora isso seja inconsciente.

Estabilidade se torna mais fácil com mais pernas.

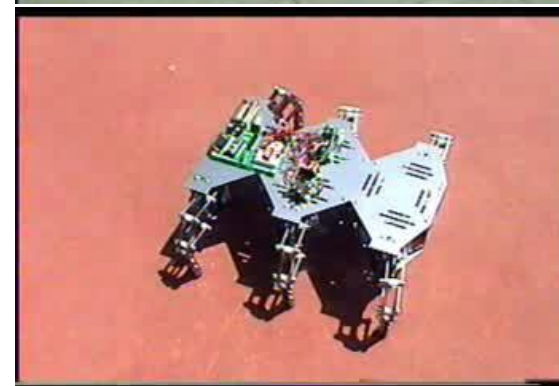
Para estabilidade \Rightarrow o centro de gravidade (CG) do robô deve estar dentro do polígono de suporte (área coberta pelas pernas em contato com o chão).

LOCOMOÇÃO COM PERNAS

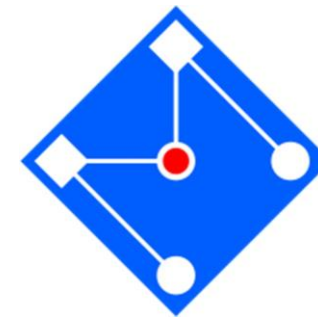


Devem existir pernas suficientes para manter o robô estável durante a caminhada. Qual será o mínimo n° de pernas para manter estabilidade durante a caminhada?

- Robô de 4 pernas só pode levantar uma perna de cada vez para ser estaticamente estável \Rightarrow caminhada lenta e de baixa eficiência;
- Robô de 6 pernas são muito comuns (tanto na natureza como na robótica) \Rightarrow permite caminhada estável.



LOCOMOÇÃO COM PERNAS



Graus de liberdade por perna:

- Compromisso entre complexidade e estabilidade.

Um mínimo de dois graus de liberdade (GL) é necessário para mover uma perna:

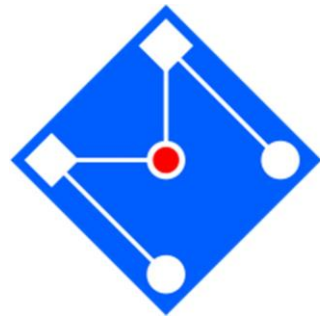
- Um movimento de levantar e outro de girar.

2 a 3 GL para cada perna na maioria dos casos.

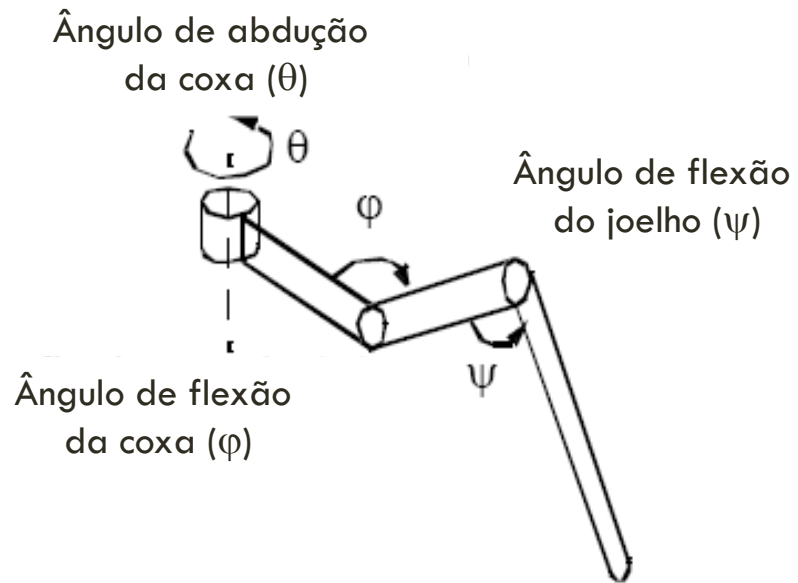
4 GL para o movimento do tornozelo:

- Melhora a eficiência do movimento de andar;
- Um GL adicional aumenta a complexidade do projeto e principalmente do controle.

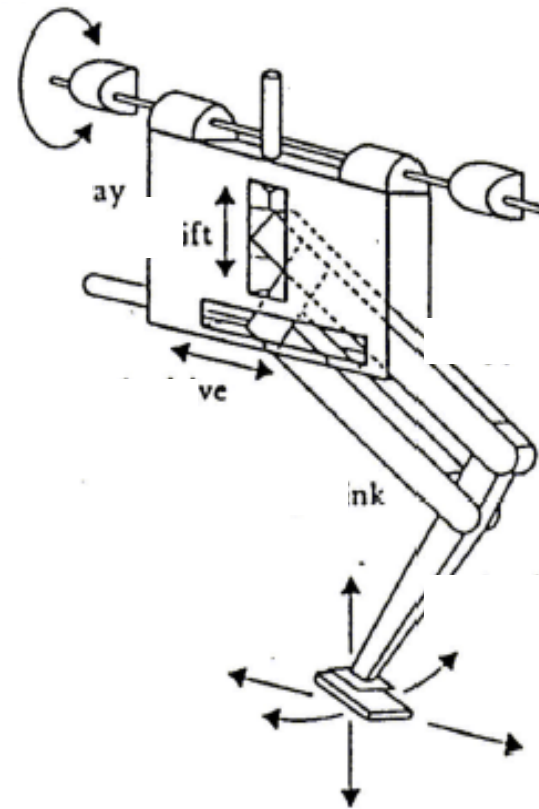
LOCOMOÇÃO COM PERNAS



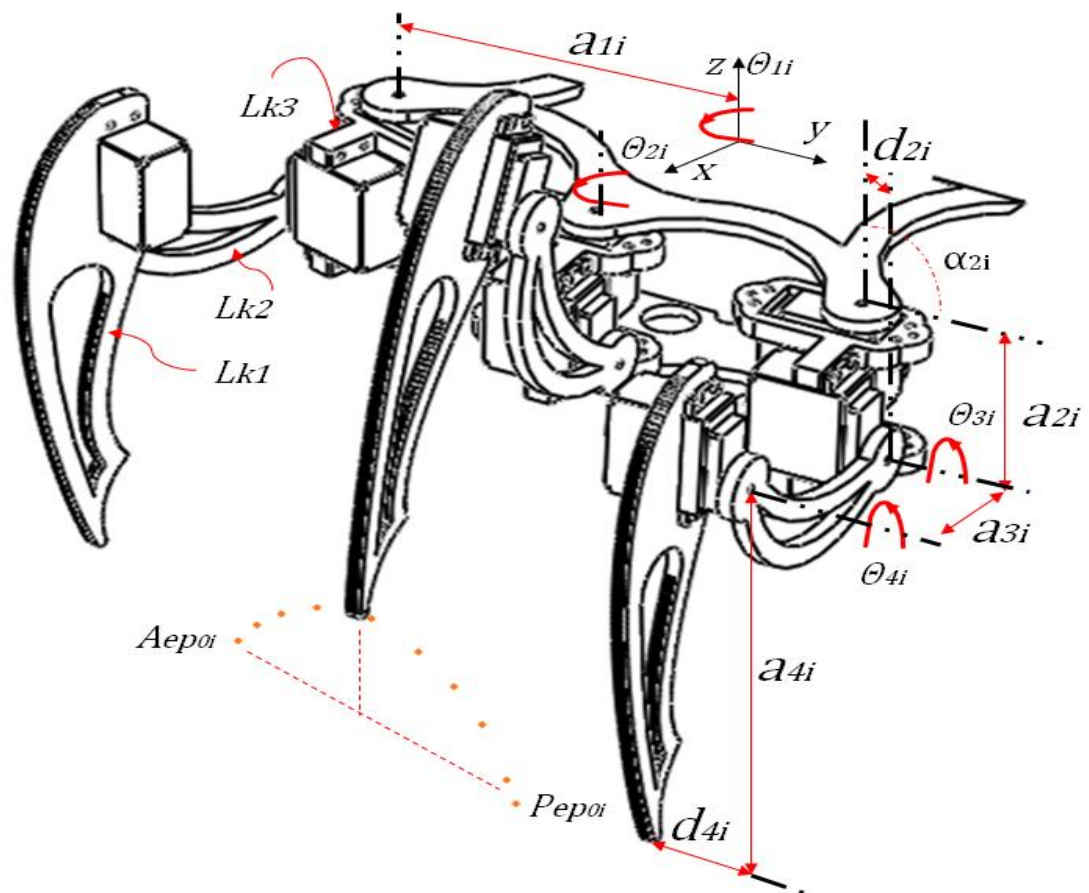
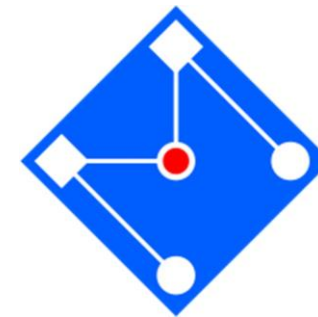
- Exemplos de pernas com 3 GL.



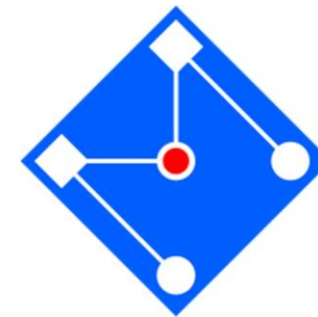
Abdução-adução



MYRMEX



LOCOMOÇÃO COM PERNAS



Graus de liberdade no sistema:

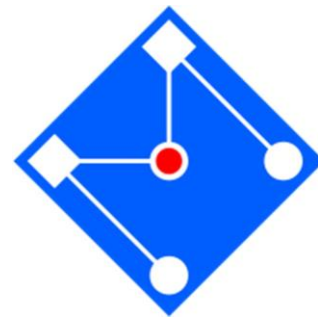
- Se forem muitos é necessário “gait motion”.

“Gait motion”:

- “Gait” é uma seqüência (ordem) repetitiva de movimentos que permitem a locomoção;
- “Gait” é caracterizado por uma seqüência de eventos de levantar e descer cada perna do robô;
- Permite movimentos sincronizados de: trote, caminhada, galope.

Número de eventos possíveis depende do número de pernas do robô.

LOCOMOÇÃO COM PERNAS



Número de eventos possíveis, N , para um robô de k pernas:

$$N = (2k - 1)!$$

Para um robô bípede ($k = 2$) o número de eventos possíveis:

$$N = (2k - 1)! = 3! = 6$$

- Os 6 eventos diferentes são: levantar perna direita / levantar perna esquerda / abaixar perna direita / abaixar perna esquerda / levantar as duas pernas juntas / abaixar as duas pernas juntas

Para um robô de 6 pernas (hexapod) o número de eventos possíveis:

$$N = (2 \cdot 6 - 1)! = 11! \Rightarrow 39.916.800 \text{ eventos possíveis.}$$

LOCOMOÇÃO COM UMA PERNA

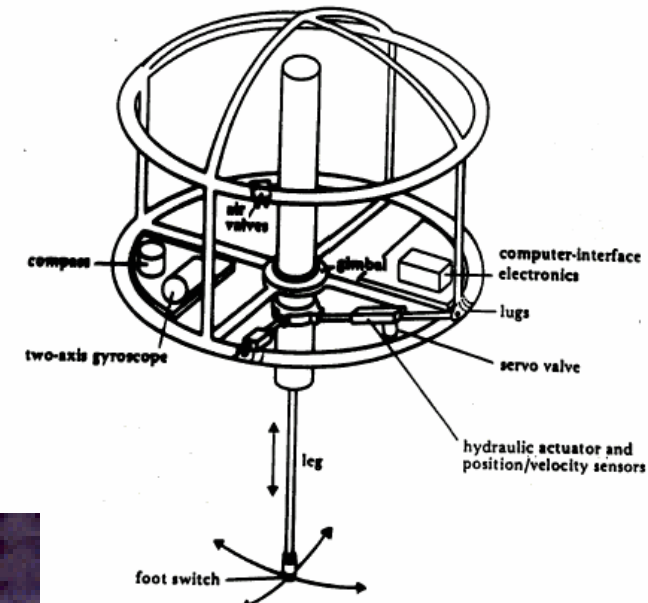
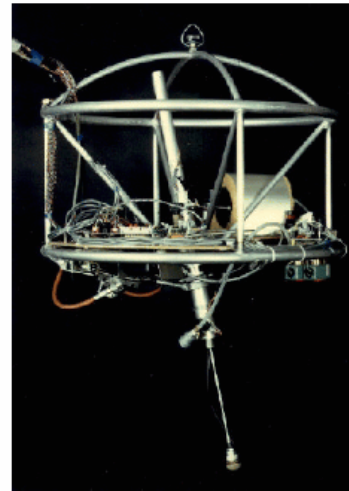


Equilíbrio totalmente dinâmico.

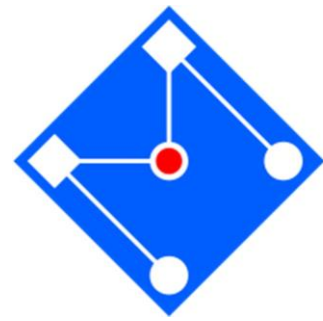
Tem que fazer ajustes contínuos na inclinação da perna para controlar o equilíbrio do corpo e a velocidade.

Sem aplicação industrial até o momento.

Robôs de 1 perna: [Hopper3D](#), [Ringrose](#).

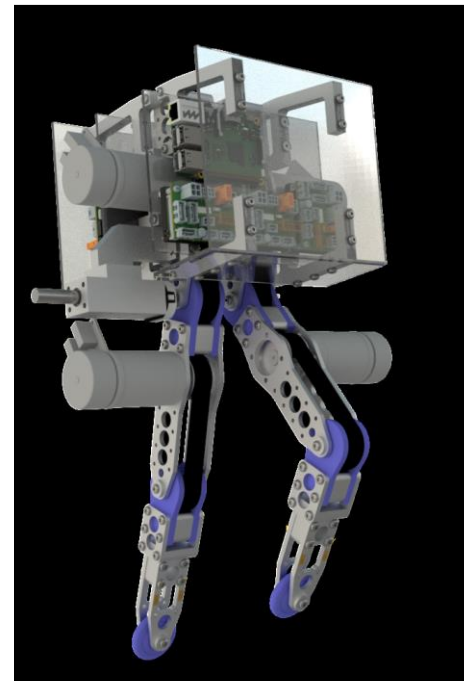


LOCOMOÇÃO BÍPEDE

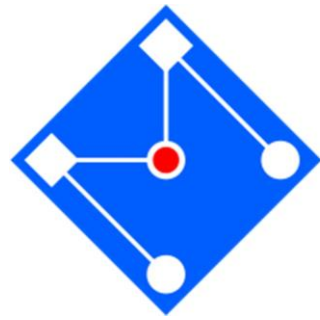


Está se tornando cada vez mais popular \Rightarrow robôs humanóides.

Estabilidade dinâmica é necessária para movimentar.



LOCOMOÇÃO BÍPEDE



Robô Asimo da Honda:

- 36 GL \Rightarrow 3 no pescoço, 6 em cada perna, 7 em cada braço, 1 no torso, 2 em cada mão, 2 para os 5 dedos em cada mão;
- Peso 54kg, altura 1,30m, velocidade máxima correndo 3km/h;
- Giroscópio e acelerômetros no torso para manter equilíbrio;
- Sensor de força de 6 eixos nos pés para caminhar.

Robô Qrio da Sony:

- 33 GL \Rightarrow 4 no pescoço, 2 no corpo, 5 em cada braço, 6 em cada perna, 2 para os 5 dedos em cada mão;
- Peso 6.5Kg, altura 0,58m, velocidade andando 20m/min.
- Sensores de distância, acelerômetros, 4 sensores de força em cada pé, sensores de tato na cabeça, mãos e ombros.

Os dois possuem:

- Câmera \Rightarrow detecção de objetos, reconhecimento de faces e gestos humanos;
- Reconhecimento de voz e som \Rightarrow reconhece o próprio nome e outras palavras, identifica direção do som.

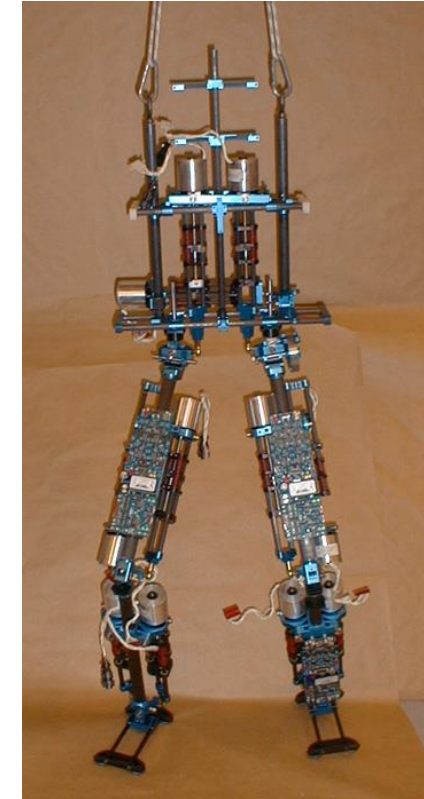
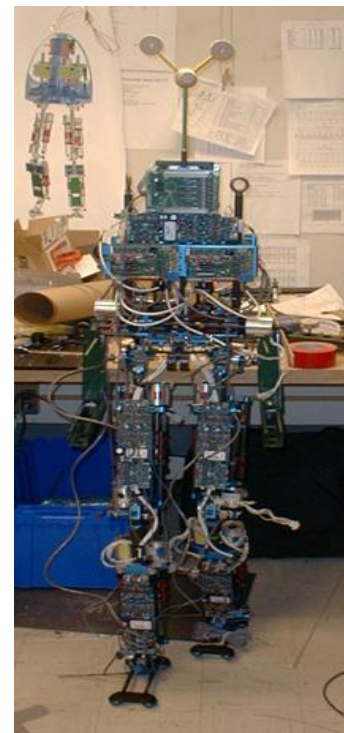
LOCOMOÇÃO BÍPEDE

Troody:

- 10 GL, 0,5m de altura, 1,5m de comprimento, peso 5 kg.

Robô M2:

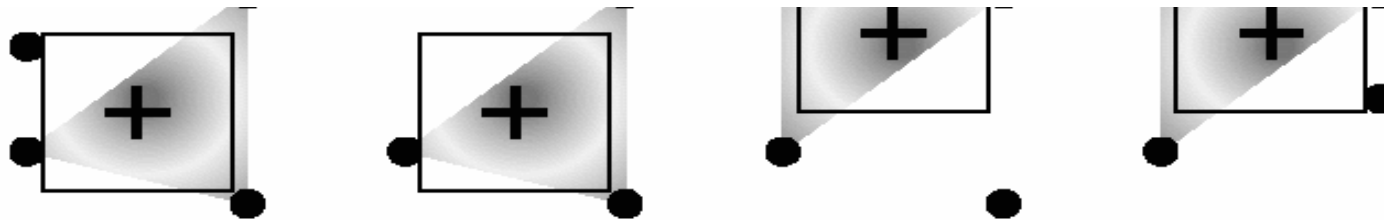
- 12 GL \Rightarrow 3 em cada coxa-bacia, 1 em cada joelho, 2 em cada tornozelo.
- Capaz de andar a 1m/s.



LOCOMOÇÃO QUADRÚPEDE

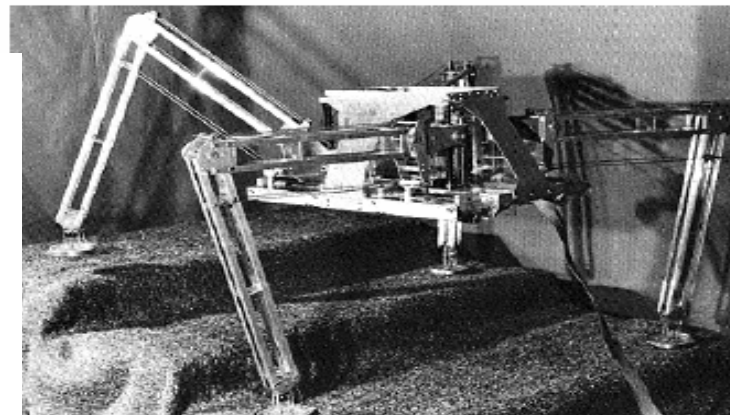


- Manter estabilidade durante movimento é difícil.
- Estabilidade estática é possível para um quadrúpede mesmo em movimento.
- Para manter estabilidade estática durante movimento \Rightarrow precisa manter o CG dentro da área coberta pelas pernas em contato com o chão.

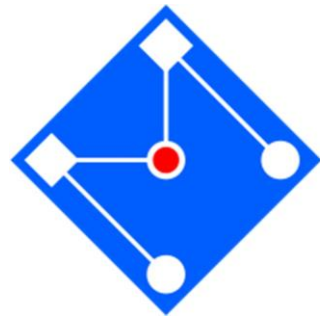


Necessary to shift center

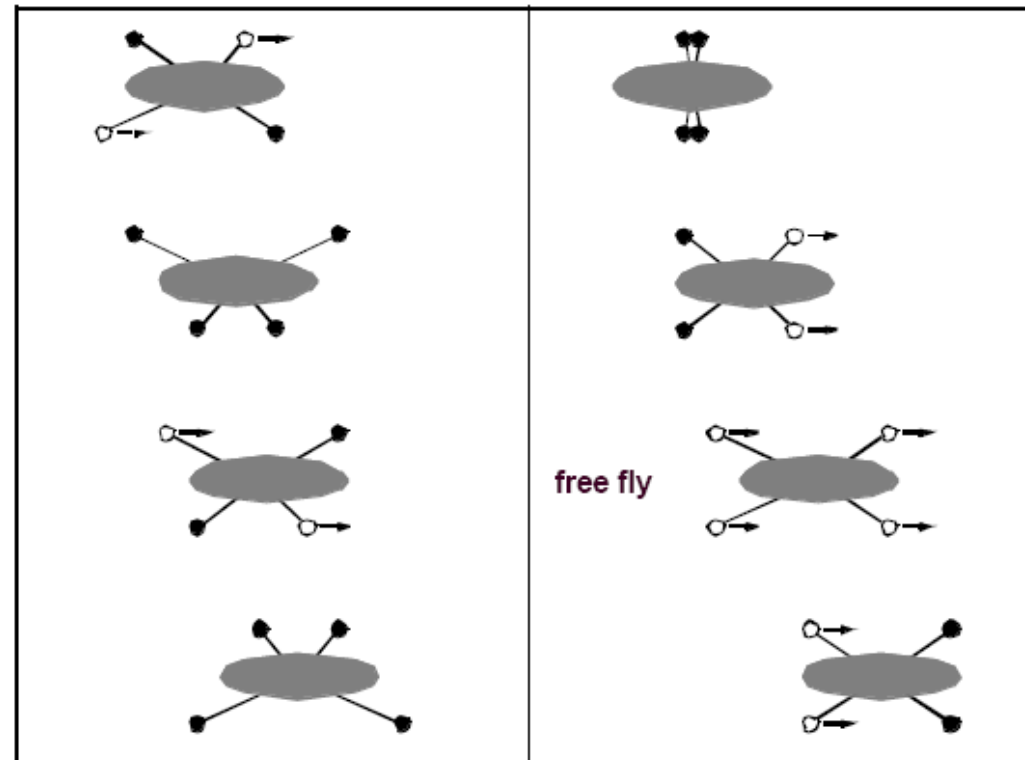
- Necessário deslocar CG enquanto todos os 4 pés estão apoiados no chão.
- Robôs que usam essa tecnologia se movimentam lentamente.



LOCOMOÇÃO QUADRÚPEDE



“Gaits” mais comuns com 4 pernas.

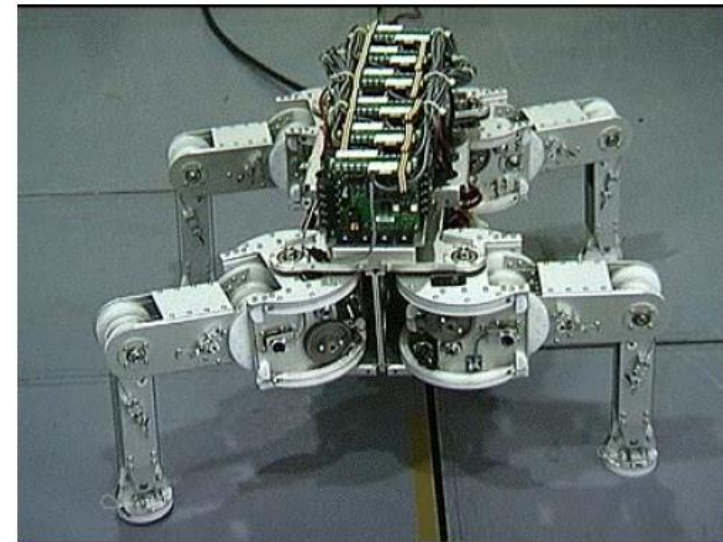
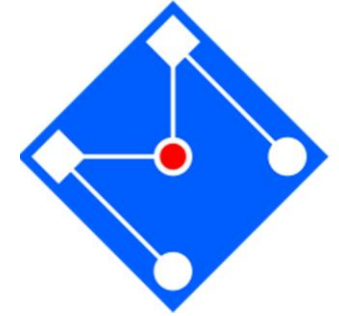


Trote

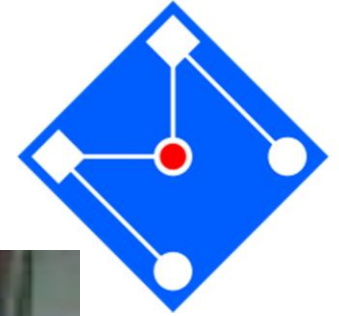
Galope

Locomoção quadrúpede

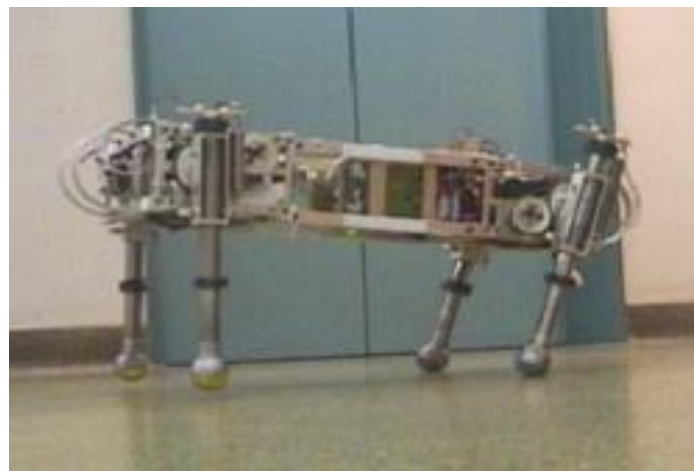
- Robô Aibo:
 - 18 GL \Rightarrow 3 em cada perna, 1 na boca, 2 na cabeça, 3 na cauda;
 - Peso 1,5kg, altura 0,27m, comprimento 0,27m;
 - Sensores de tato, câmera colorida, sensores de distância, sensor de som, acelerômetros, velocidade angular.
- Robô TITAN:
 - 4*3 GL;
 - Peso 19kg, altura 0,25m.



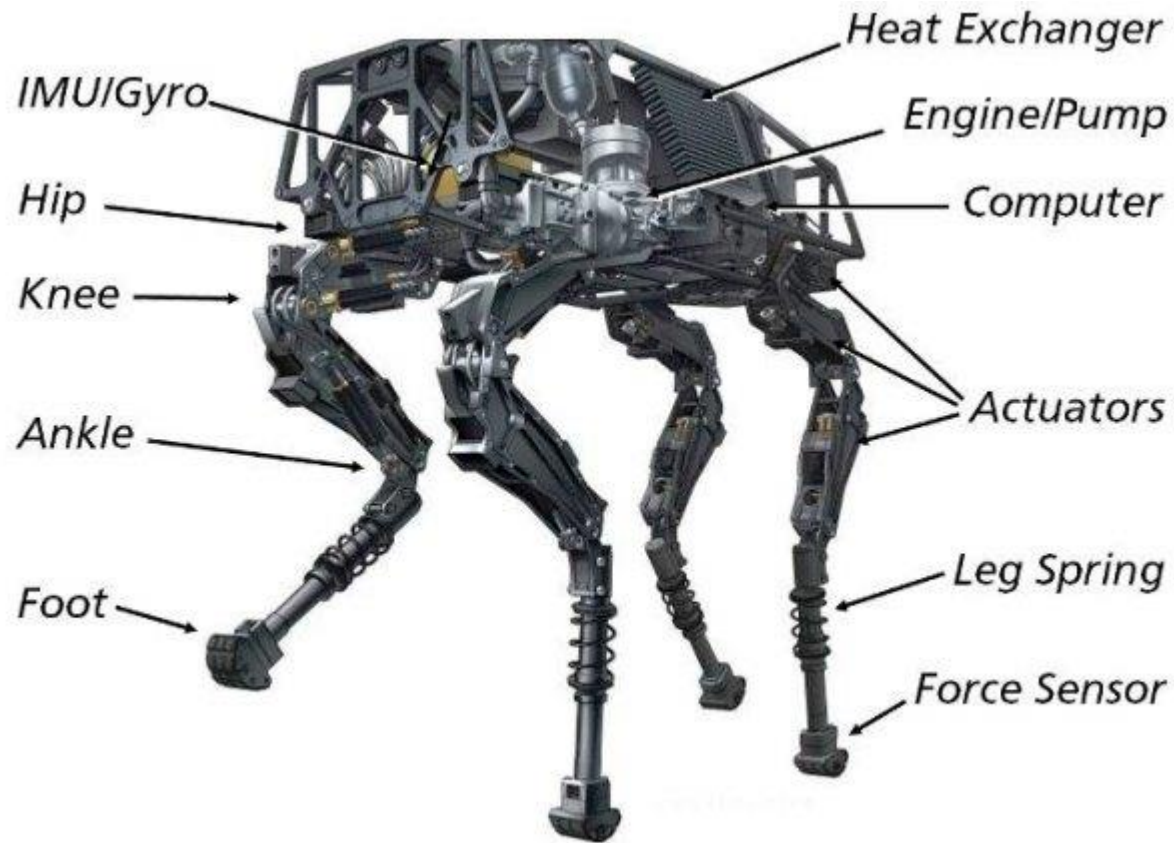
Locomoção quadrúpede



- Robô Quadrupod.
- Robô Beast.
- Robô Scout.
- Robô Silo4.

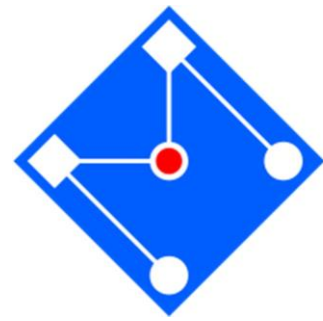


BIG DOG BOSTON DYNAMICS

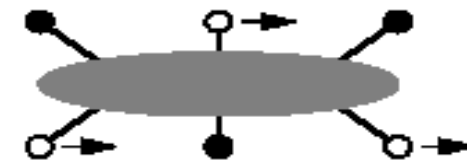


The Evolution Of Boston Dynamics' Robot Dogs

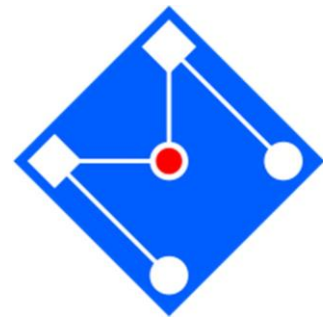
LOCOMOÇÃO HEXAPODE (SEIS PERNAS)



- Estabilidade pode ser sempre garantida durante o movimento.
- 3 pernas sempre no chão.
- “Gait” mais comum com 6 pernas (movimento estático).



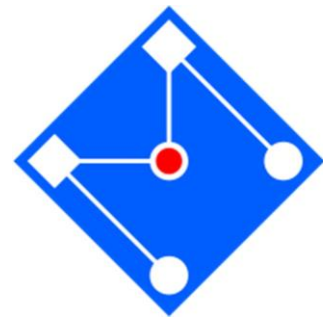
LOCOMOÇÃO HEXAPODE (SEIS PERNAS)



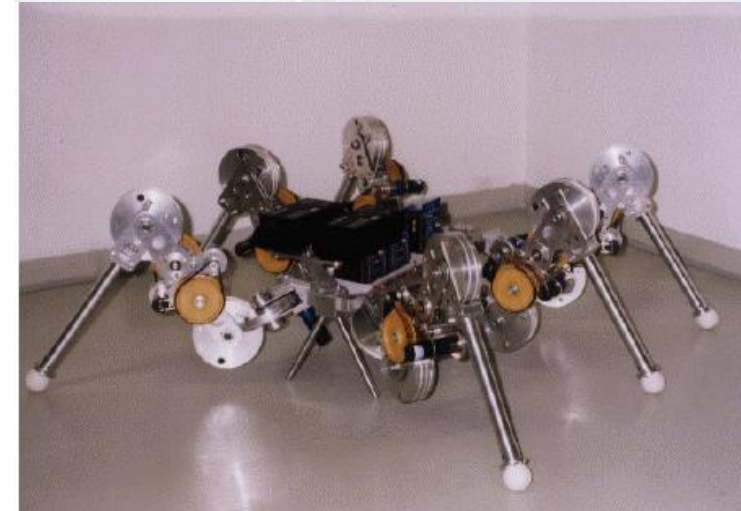
- Projeto mecânico das pernas pode:
 - Diminuir forças de atrito com o chão;
 - Simplificar movimento;
 - Simplificar cálculo do movimento.
- Robô heaxapod auto-guiado da Universidade do Estado de Ohio, EUA:
 - Velocidade máxima: 2,3m/s;
 - Altura 3m, comprimento 5,2m;
 - Peso 4,3 ton;
 - GL: 3 por perna.
- Robô EH2:
 - GL: 2 por perna.



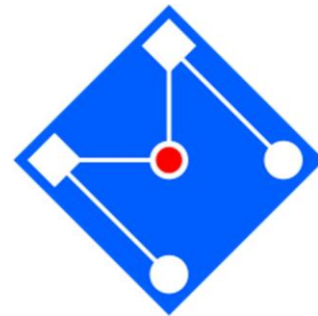
LOCOMOÇÃO HEXAPODE (SEIS PERNAS)



- Robô Hexcrawler:
 - Dimensões: 49,7cm X 40,0cm;
 - Altura 15.2cm, peso 1,8kg;
 - GL: 2 por perna.
- Robô Lauron2:
 - Velocidade máxima: 0,5m/s;
 - Peso 6kg;
 - Altura 0,3m, comprimento 0,7m;
 - GL: 3 por perna.



LOCOMOÇÃO - SUMÁRIO



Existem muitas formas possíveis de locomoção para os robôs.

Para os robôs com pernas o principal problema é estabilidade.

Para robôs com rodas, deve-se considerar:

- Estabilidade;
- Manobrabilidade;
- Controlabilidade.

As condições de operação e de uso do robô definem o tipo de locomoção que deve ser adotada.

Muitos exemplos de vídeos de robôs móveis: <http://www.plyojump.com>

<http://robot.vsb.cz/english/cojerobot/galerieSR/2003x1.htm>

FIM

