

Locomoção de robô móvel

Robótica Móvel e Inteligente

José Luís Azevedo, Bernardo Cunha, Pedro
Fonseca, Nuno Lau e Artur Pereira
IRIS/IEETA - DETI, Universidade de Aveiro

- Introdução
 - Locomoção com lagartas, locomoção com pernas, locomoção com rodas
- Robôs móveis com rodas
 - Tipos de rodas e configurações de rodas
 - Transmissão diferencial, direcção Ackerman, Tricycle drive, Synchro drive, Omnidirectional drive
- Modelos cinemáticos de algumas configurações populares de rodas
 - Transmissão diferencial
 - Condução de triciclos
 - Transmissão omnidireccional

- Uma combinação de várias unidades físicas e computacionais (hardware e software)
- Organizado num conjunto de sub-sistemas:
 - **Sensoriamento**: mede as propriedades do ambiente do robô
 - **Raciocínio**: mapeia medições em comandos de acção de alto nível
 - **Controlo**: transforma os comandos de acção de alto nível em acções de baixo nível
 - **Actuação**: transforma os comandos de acção de baixo nível em acções físicas
 - **Locomotion**: mapeia acções físicas em movimento, por exemplo, define como o robô se move no seu ambiente
 - **Comunicação**: proporciona comunicação com outros robôs, ou com um sistema externo

- O processo físico que permite ao robô mover-se no seu ambiente
- Várias soluções disponíveis:
 - Locomoção por rastos
 - Locomoção com pernas
 - Locomoção com rodas

Locomoção por rastros



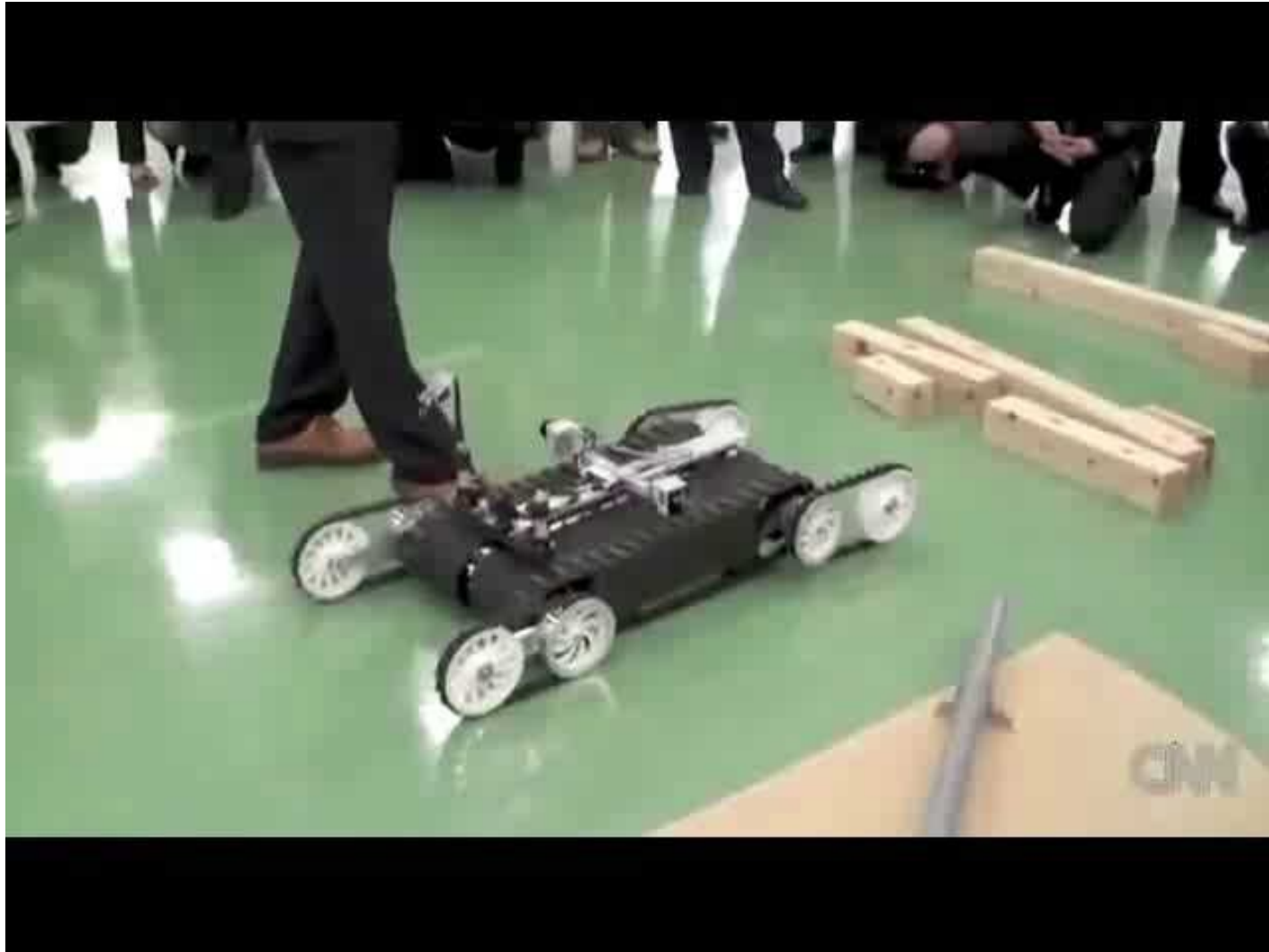
- **Grande potência de tracção** - a área de contacto da via com o solo é maior do que a proporcionada por uma roda
- Sistema de localização bem adaptado para **robôs que evoluem em terrenos muito acidentados** (por exemplo, em situações de catástrofe natural)
- **A mudança de direcção é conseguida deslizando as pistas**, o que torna muito **difícil a utilização da odometria** como método de localização
- Requer uma grande quantidade de energia para girar
- Os robôs que utilizam este

Locomoção por rastros



tipo de movimento são
tipicamente teleoperados

Locomoção por rastros

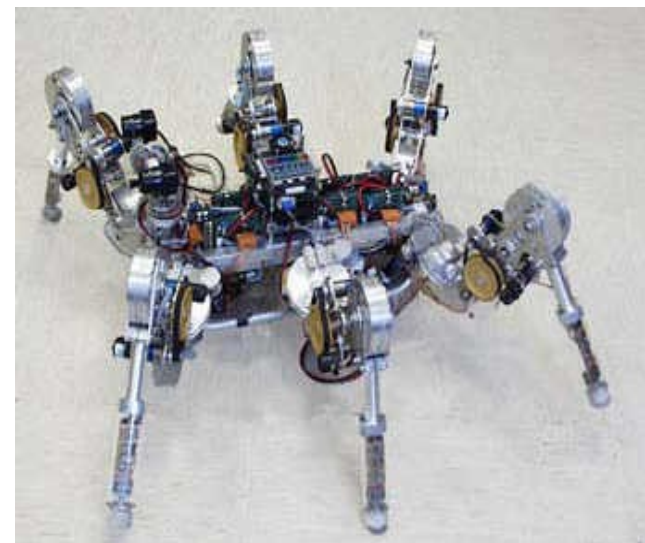
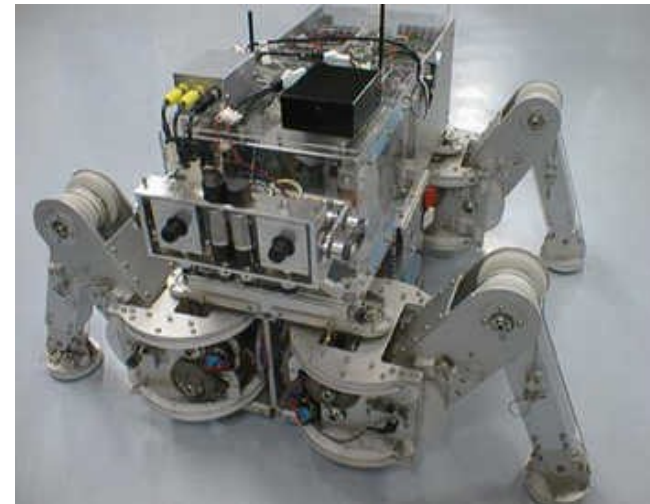


Locomoção com pernas

- A locomoção com pernas é muitas vezes **baseada em seres vivos** (como aqueles que se movem em ambientes difíceis)
- A implementação deste tipo de sistema de locomoção em robôs é **complexa**:
 - Complexidade mecânica
 - Estabilidade
 - Consumo de energia



Locomoção com pernas



Locomoção com pernas (AlphaDog - Boston Dynamics)



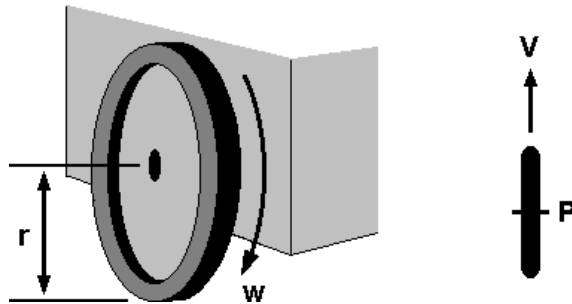
Locomoção com rodas



- A solução de locomoção com rodas é a **mais adequada para aplicações comuns**
 - rolagem é muito eficiente!
- A **configuração e o tipo de roda** a utilizar é **dependendo do pedido**
- Limitação principal: **terreno plano** (ou ligeiramente irregular)
- Rodas maiores permitem que o robô ultrapasse obstáculos maiores. No entanto:
 - Motores com maior binário são necessários (ou caixas de velocidades com maiores relações de redução, ou seja, menor velocidade de saída para o mesmo motor)

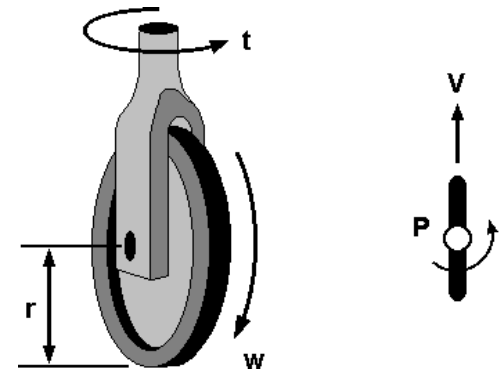
Tipos de rodas

Roda direccional

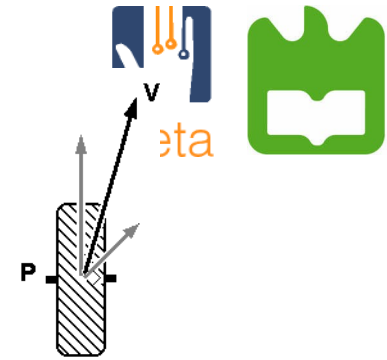
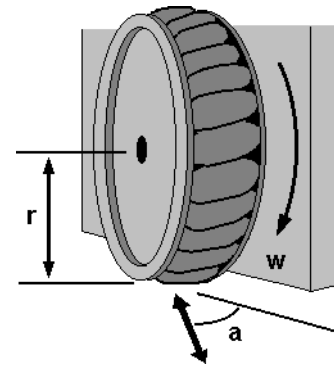
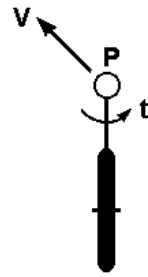
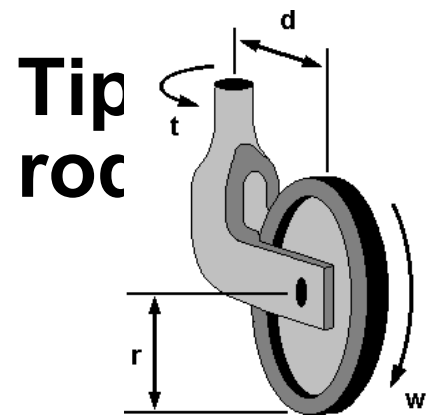


Roda orientada para a oferta (roda de rícino)

standard Roda standard

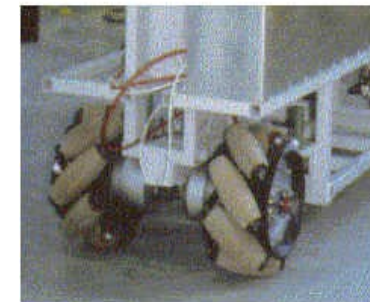
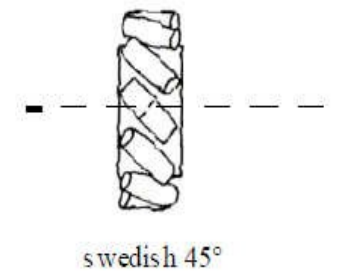
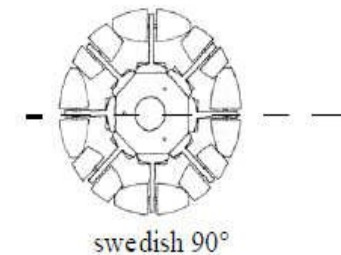


Roda sueca (omnidireccional)



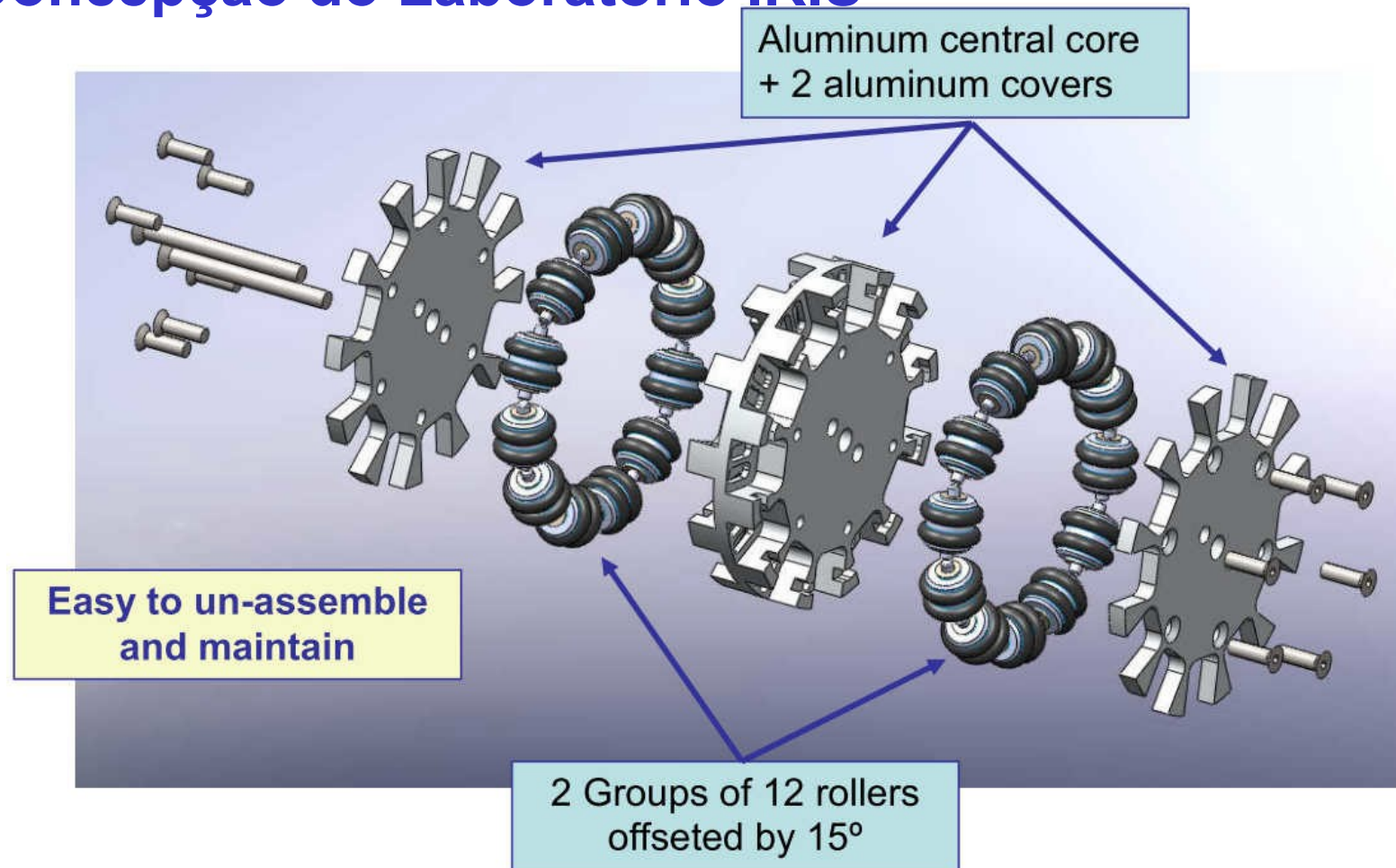
Tipos de rodas - roda sueca

- Rolos pequenos à volta da circunferência da roda, com eixos antiparalelos ao eixo principal
- A roda pode ser conduzida com toda a força, mas também desliza lateralmente com muito baixo atrito
- Propriedade omnidireccional
- Três graus de liberdade:
 - Rotação em torno do eixo da roda (motorizado)
 - Em torno dos rolos
 - Em torno do ponto de contacto com o solo



Tipos de rodas - roda sueca

- **Concepção do Laboratório IRIS**



Locomoção com rodas - estabilidade estática

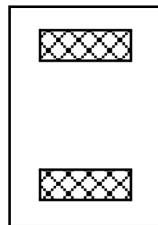
- **Duas rodas**
 - Número mínimo de rodas para alcançar a estabilidade
 - **O centro de massa deve estar abaixo do eixo** que liga as rodas
- **Três rodas**
 - Configuração estável
 - **O centro de massa deve estar dentro do triângulo formado pelos pontos de contacto das rodas com o solo**
- **Quatro rodas**
 - Configuração estável
 - **Requer um sistema de suspensão** para compensar as irregularidades no ambiente onde o robô tem de se deslocar
- **Mais de quatro rodas**
 - Configuração dependente

Configurações das rodas¹

- 2 rodas



Um volante à frente e um volante de tracção atrás

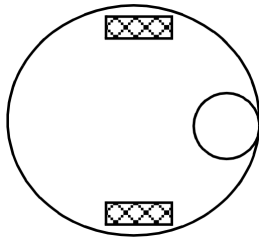


Transmissão diferencial de duas rodas com o centro de massa abaixo do eixo

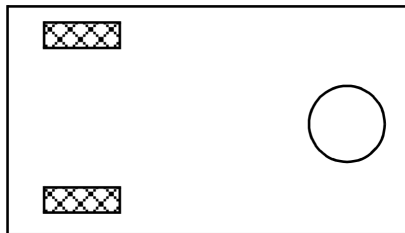
1) De: R. Siegwart, I. Nourbakhsh

Configurações das rodas

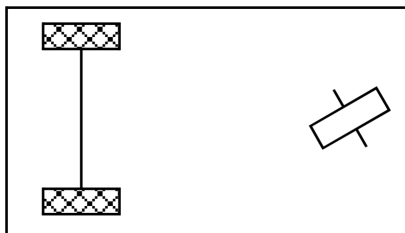
- 3 rodas



Transmissão diferencial centrada em duas rodas com um terceiro ponto de contacto



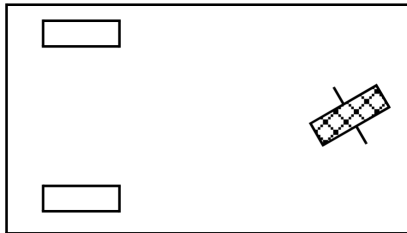
Duas rodas de condução independente na traseira/frente, uma roda livre de direcção (sem motor) na frente/traseira



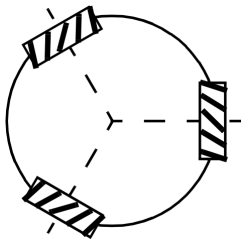
Duas rodas de tracção ligadas (engrenagem diferencial) na traseira, uma roda livre de direcção na frente

Configurações das rodas

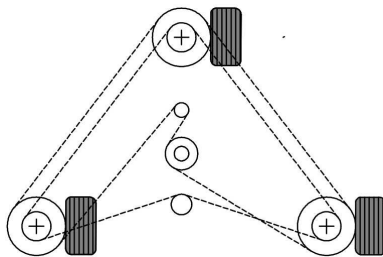
- 3 rodas



Duas rodas livres na traseira, uma roda de tracção direcciona na frente



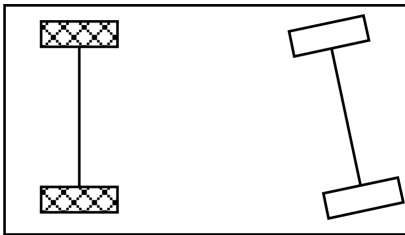
Três rodas motorizadas suecas ou esféricas dispostas num triângulo; é possível um movimento omnidireccional



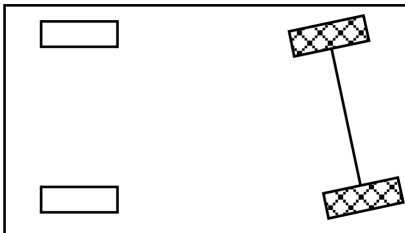
Três rodas motorizadas e direccionais sincronizadas; a orientação do chassis não é controlável

Configurações das rodas

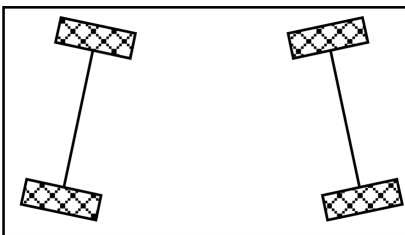
- 4 rodas



Duas rodas motorizadas na traseira, duas rodas direccionais na frente; a direcção tem de ser diferente para as duas rodas para evitar o deslizamento/deslizamento.



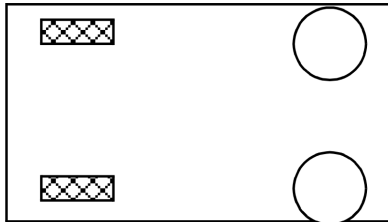
Duas rodas motorizadas e direccionais na frente, duas rodas livres na traseira; a direcção tem de ser diferente para as duas rodas para evitar o deslizamento/deslizamento.



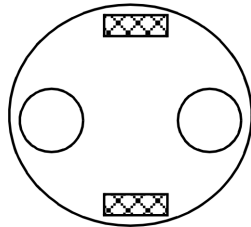
Quatro rodas direccionais e motorizadas

Configurações das rodas

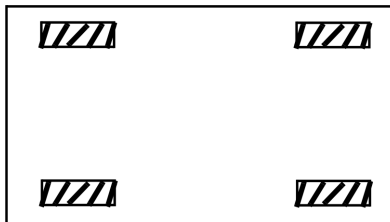
- 4 rodas



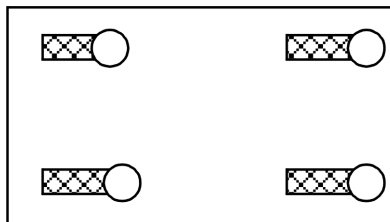
Duas rodas de tracção (diferencial) na traseira/frente, duas rodas omnidireccionais na dianteira/traseira



Tracção diferencial de duas rodas com dois pontos de contacto adicionais



Quatro rodas omnidireccionais



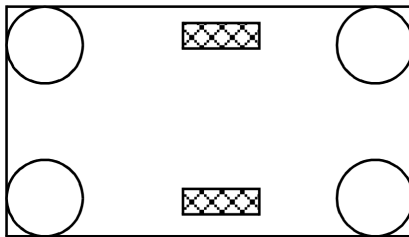
Quatro rodas de rícinho motorizadas e direccionais

Configurações das rodas

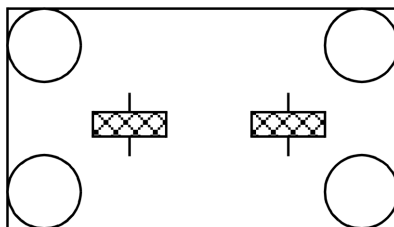


Configurações das rodas

- 6 rodas



**Duas rodas de tracção (diferencial)
no centro, uma roda
omnidireccional em cada canto**



**Duas rodas motorizadas e
direccionais alinhadas no centro,
uma roda omnidireccional em cada
canto**

Configurações não-padronizadas

SHRIMP (EPFL)



- **Locomotion**

- O processo que provoca o movimento do robô
- A fim de produzir um movimento, devem ser aplicadas forças ao robô

- **Dinâmica**

- O estudo do movimento, no qual as forças são modeladas

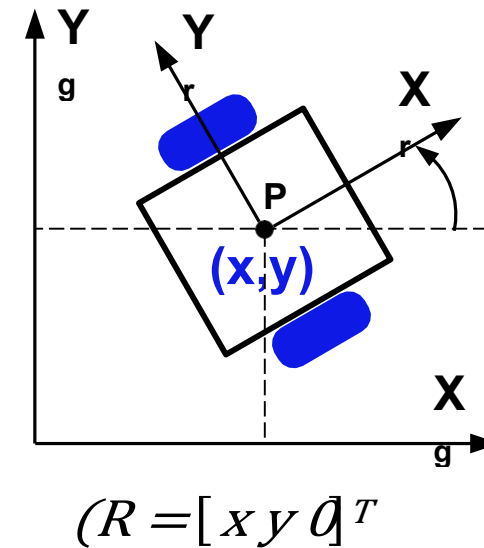
- **Cinemática**

- Modelar o movimento sem considerar as forças que provocam o movimento do objecto

Quadros de referência locais e globais

- quadro de referência **global**: $\{X_g, Y_g\}$
- quadro de referência **local** (robô): $\{X_r, Y_r\}$
- Matriz de rotação ortogonal:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \text{peca} & 0 \\ - & \text{do } \theta & 0 \\ \text{peca} & \cos \theta & 0 \\ \text{o } \theta & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



- Mapeamento de velocidades **desde o quadro de referência global** até ao quadro de referência do robô:

$$\begin{aligned} \dot{R} &= R(\theta) \dot{G} = R(\theta) \cdot \begin{bmatrix} \dot{x} & \dot{y} & \dot{\theta} \end{bmatrix}^T \\ \dot{R} &= \begin{bmatrix} \cos \theta & \text{peca} & 0 \\ -\text{peca} & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Quádros de referência locais e globais

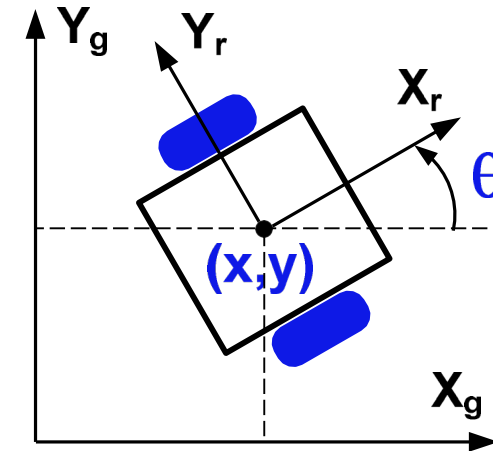
(\dot{x} velocidade linear ao longo de X \dot{y} velocidade linear ao longo de Y $\dot{\theta}$ velocidade angular)



Quadros de referência locais e globais

- Inversa da matriz de rotação ortogonal:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{pecado } \theta & 0 \\ 0 & \text{pecado } \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



- Mapeamento de velocidades desde o quadro de referência do robô até ao quadro de referência global:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}^T \quad \Rightarrow \quad \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{pecado } \theta & 0 \\ 0 & \text{pecado } \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}^T$$

Quadros de referência locais e globais

(V_x - velocidade linear ao longo de X_r , V_y - velocidade linear ao longo de Y_r .

- velocidade angular)

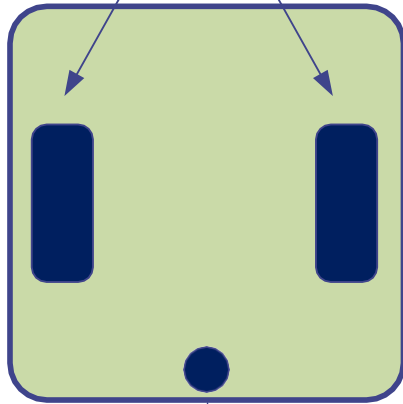


Transmissão diferencial

- **Configuração comum:**
 - 2 rodas motrizes independentes activas
 - 1 ou 2 rodas de rodas passivas
- O robô segue uma **trajectória** que é **definido pela velocidade de cada roda**
- **A** trajectória é **sensível às diferenças na velocidade relativa das duas rodas**
 - causadas por assimetrias nos motores e/ou rodas
 - um pequeno erro resulta num caminho diferente do pretendido
- **Fácil implementação o mecânica**

Transmissão diferencial

Rodas motrizes



Roda de rodas

Transmissão diferencial - cinemática

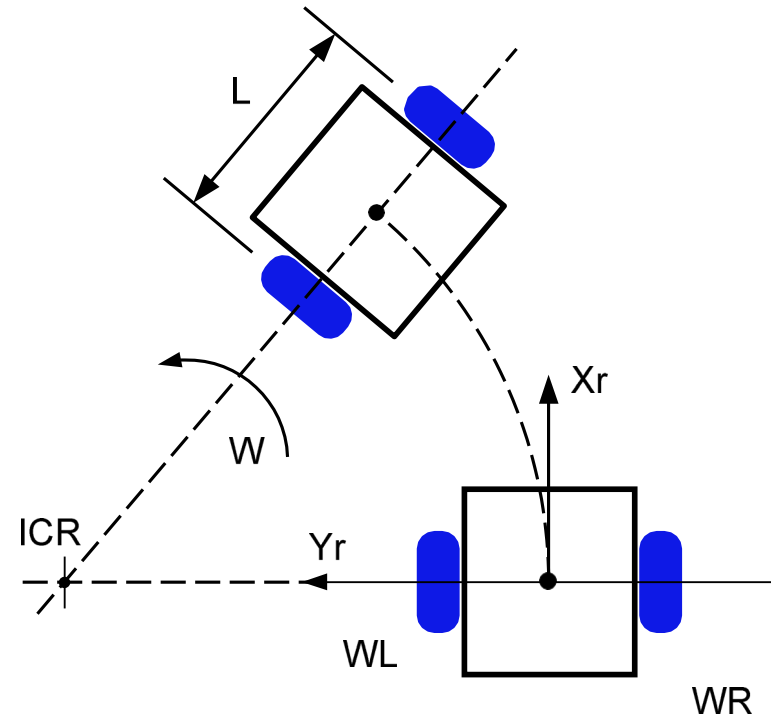
WR - velocidade angular,
roda direita

WL - velocidade angular,
roda esquerda

VR - velocidade linear, roda
direita **VL** - velocidade linear,
roda esquerda **W** - velocidade
angular do
robô sobre o ICR

r- raio da roda

L -distância entre rodas

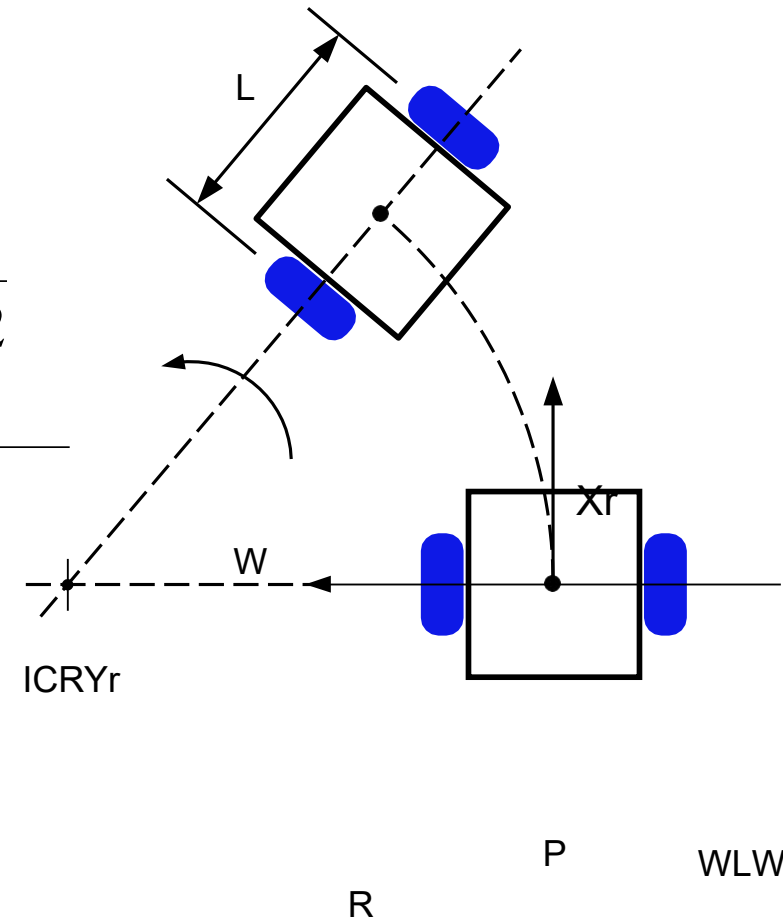


Transmissão diferencial - cinemática

$$\begin{aligned}
 &VR(t) \quad WR(t) \quad r \\
 &) \quad WL(t) \quad r \\
 &VL(t) \\
 &) \\
 &VX(t) = \frac{VR(t)}{2} + \frac{VL(t)}{2} \quad WR(t) \quad \frac{r}{2} \quad WL(t) \quad \frac{r}{2} \\
 &VY(t) = 0 \\
 &W(t) = \frac{VR(t)}{L} - \frac{VL(t)}{L} \quad WR(t) \quad \frac{r}{L} \quad WL(t) \quad \frac{r}{L}
 \end{aligned}$$

**Modelo cinemático em
moldura local**

$$\begin{aligned}
 &VX(t) \quad \frac{r}{2} \quad \frac{r}{2} \\
 &VY(t) \quad 0 \quad 0 \quad WL(t)
 \end{aligned}$$



Transmissão diferencial - cinemática



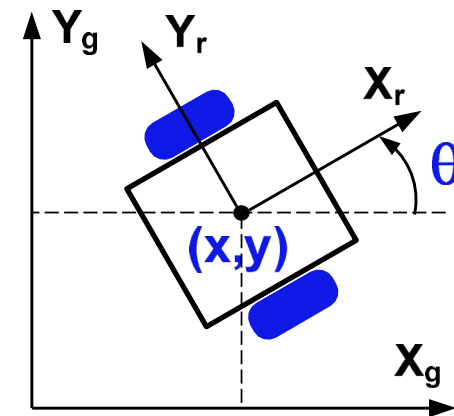
Transmissão diferencial - cinemática

Modelo cinemático no quadro mundial

$$\begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v(t) \\ w(t) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ w(t) \end{pmatrix}$$

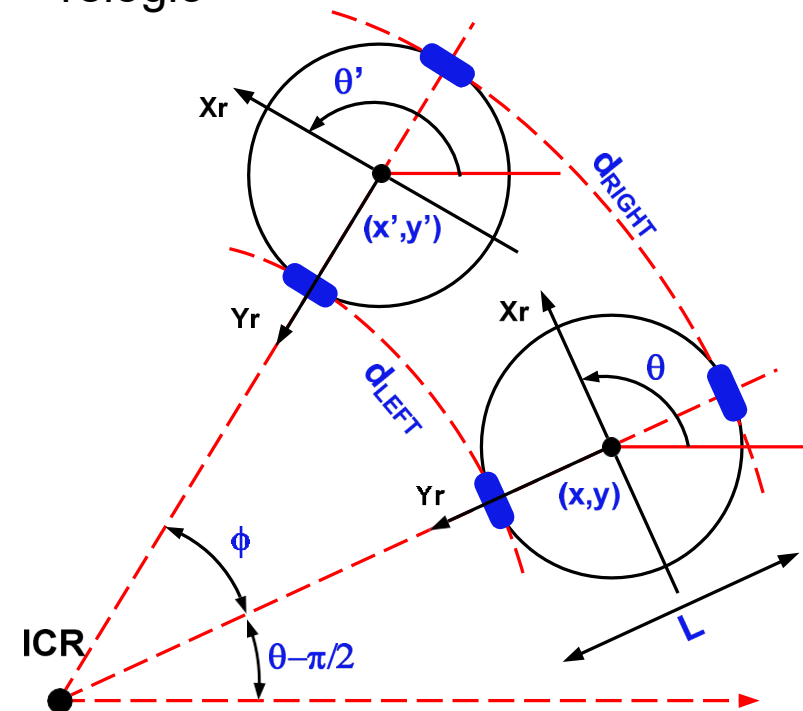
$$\begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ w(t) \end{pmatrix}$$



Diferencial - estimativa de posição

- $(x, y,)$ - pose (posição e orientação) do robô no **quadro mundial**
- Supondo que a pose do robô é $(x, y,)$, a **estimativa da posição** consiste em encontrar $(x', y', ')$ dada:
 - **dRIGHT** - distância percorrida pela roda direita
 - **dLEFT** - distância percorrida pela roda esquerda
- **dRIGHT** e **dLEFT** medidos por codificadores de roda

O robô move-se no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio



L - distância entre as rodas dos robôs

Diferencial - estimativa de posição

- Durante um pequeno período de tempo, o movimento do robô pode ser aproximado por um arco

$$dCENTER = \frac{dRIGHT + dLEFT}{2}$$

$$= \frac{d}{R}$$

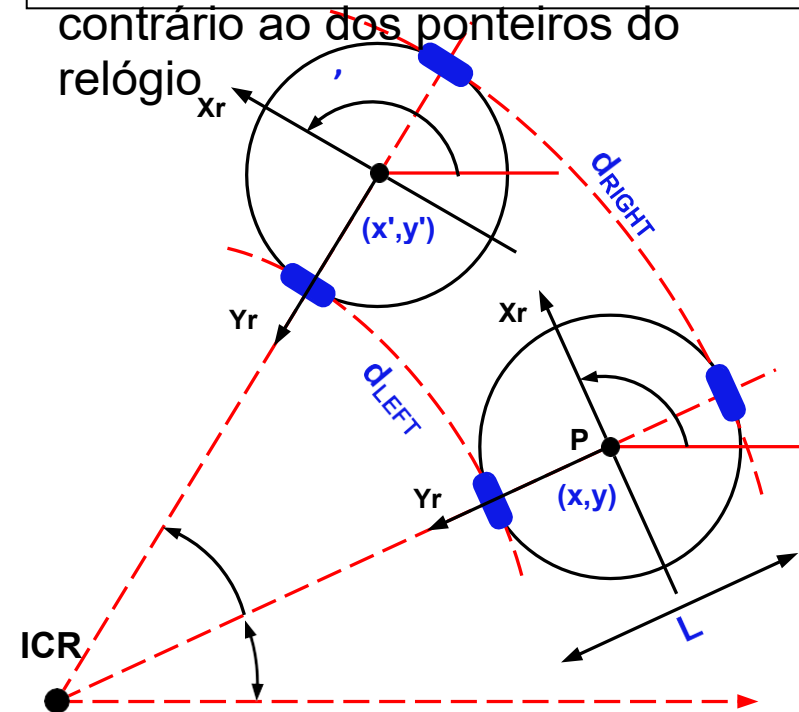
$$\times DIREITO = d \text{ DIREITO}$$

$$\times RLEFT = dLEFT$$

$$= \frac{dRIGHT - dLEFT}{L}$$

$$(DIREITA-ESQUERDA = L)$$

O robô move-se no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio



ICR: Centro de Rotação Instantâneo

Diferencial - estimativa de posição

$$dCENT_{ER} = \frac{dRIGHT + dLEFT}{2}$$

$$= \frac{dRIGHT - dLEFT}{L}$$

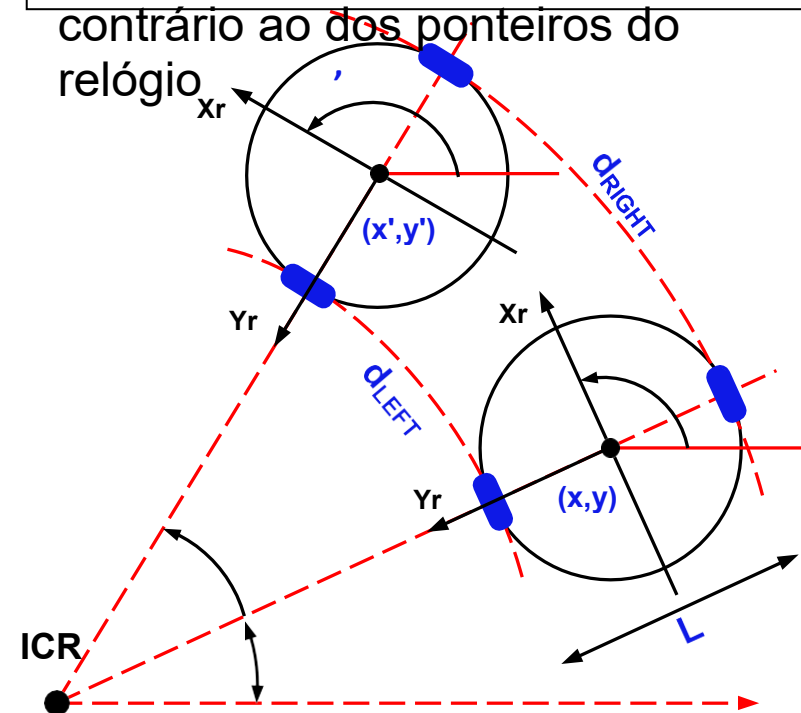
- Para pequenos deslocamentos, tais que o $\sin(\theta) \approx \theta$ e $\cos(\theta) \approx 1$:

$$x' = x + dCENTER \times \cos(\theta)$$

$$y' = y + dCENTER \times \sin(\theta)$$

$$\theta' = \theta + \frac{dLEFT - dRIGHT}{L}$$

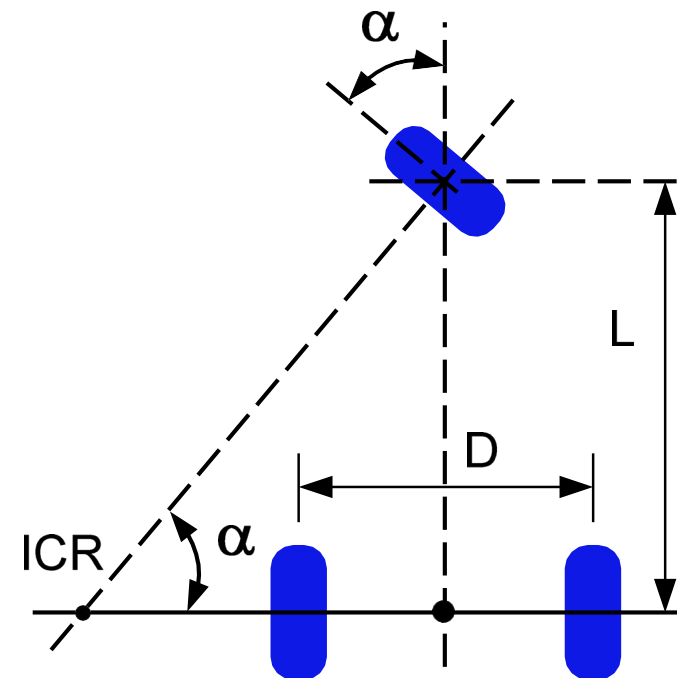
O robô move-se no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio



ICR: Centro de Rotação Instantâneo

Condução de triciclos

- **Três rodas**: duas rodas traseiras e uma roda (de direcção) dianteira
- Duas configurações possíveis de tracção:
 - A **roda dianteira é passiva** - as duas rodas traseiras são rodas motrizes (devem utilizar engrenagem diferencial)
 - **Roda motriz na frente** (as rodas traseiras são passivas) - mais fácil de implementar
- **Principais problemas** da configuração da tracção da roda dianteira:
 - Ao subir o monte, a roda motriz pode **perder a tracção** devido ao deslocamento do centro de massa



Condução de triciclos

A **área de contacto de** tracção com o solo é metade da configuração de tracção das rodas traseiras

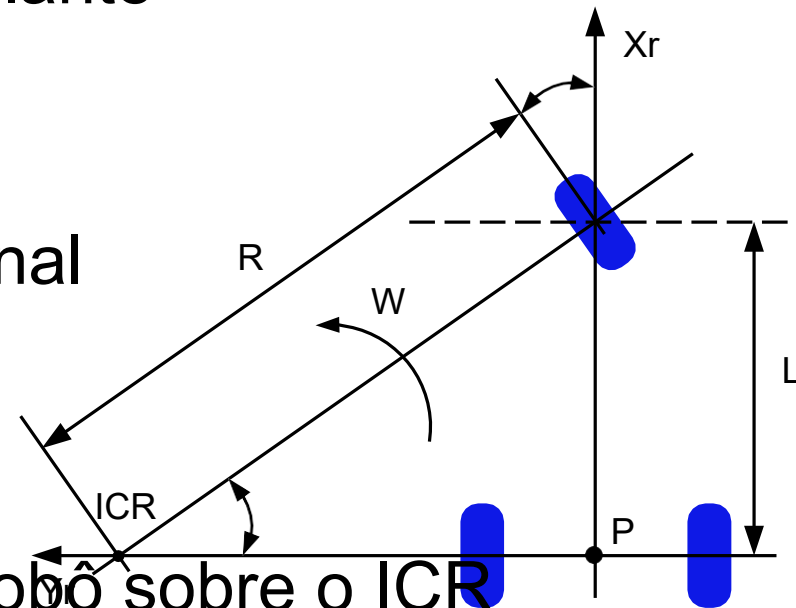


Condução de triciclos - cinemática

VS - velocidade linear do volante

WS - velocidade angular
do volante

r - raio da roda direccional



W - velocidade angular do robô sobre o ICR

- ângulo de direcção

Condução de triciclos - cinemática

$$V = L \times r \quad (\text{velocidade linear do volante})$$

$$W = \frac{V}{r} \quad (\text{velocidade angular do volante})$$

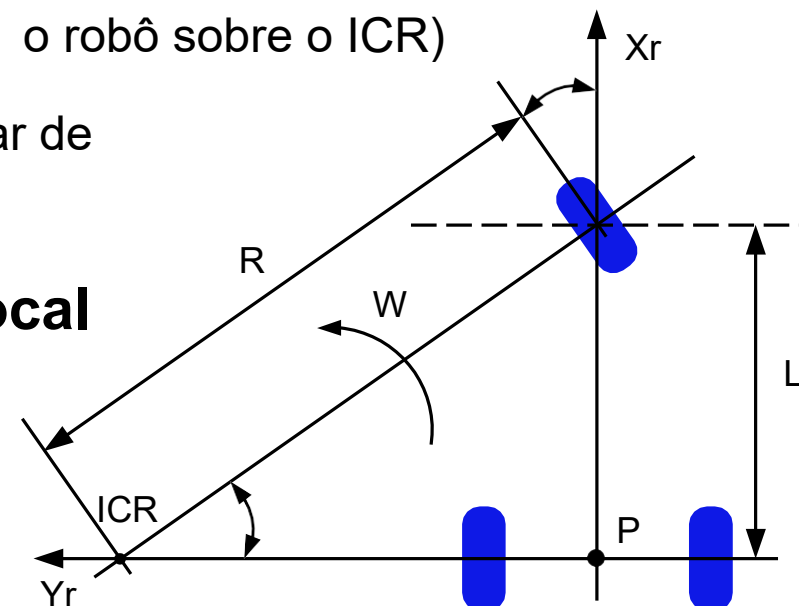
$$R = \frac{L}{\text{pecado } a} \quad V \times \text{pecado } a$$

$$W = \frac{V}{R} = \frac{V}{L} \quad (\text{velocidade angular de$$

Modelo cinemático em moldura local

$$VX() = VS() \times \cos a ()$$

$$VY() = 0$$

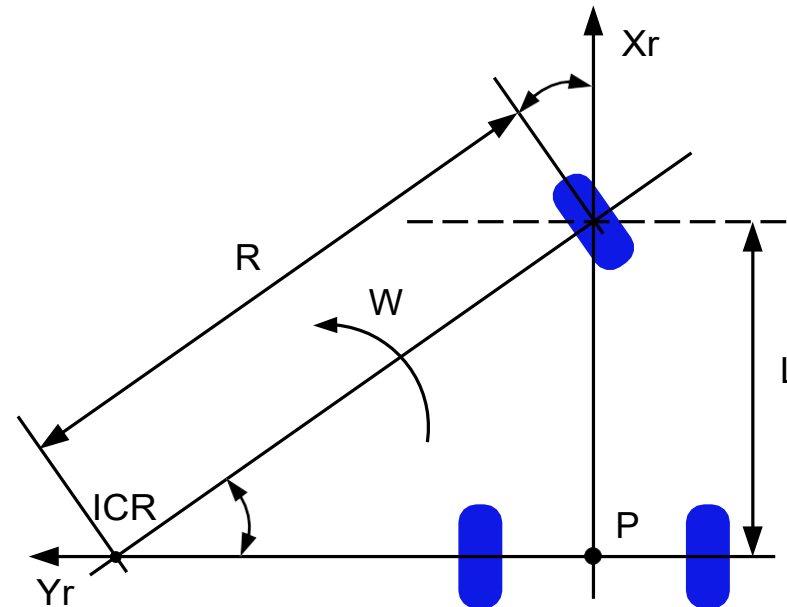


Condução de triciclos - cinemática



Condução de triciclos - cinemática

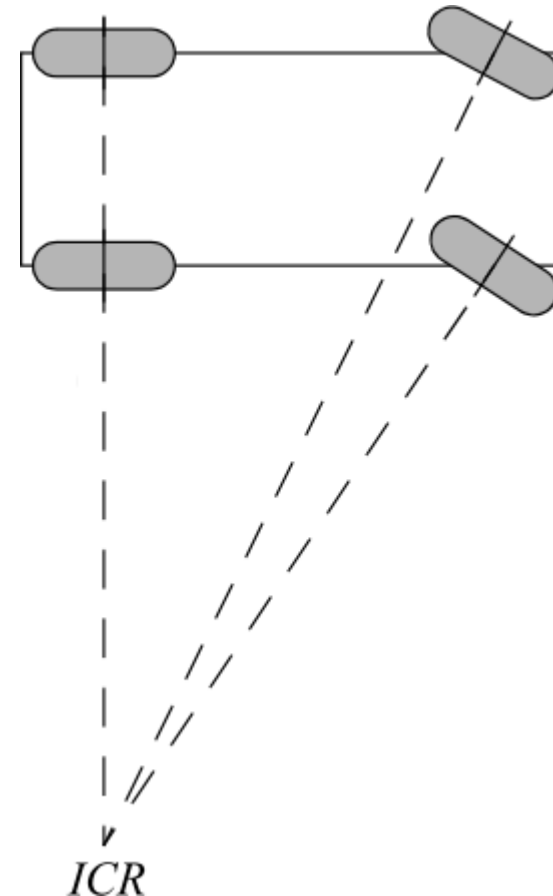
Modelo cinemático no quadro mundial



$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= V(t) \cos(\theta(t)) \\ \dot{y}(t) &= V(t) \sin(\theta(t)) \\ \dot{\theta}(t) &= \omega(t) \end{aligned}$$

Direcção Ackerman

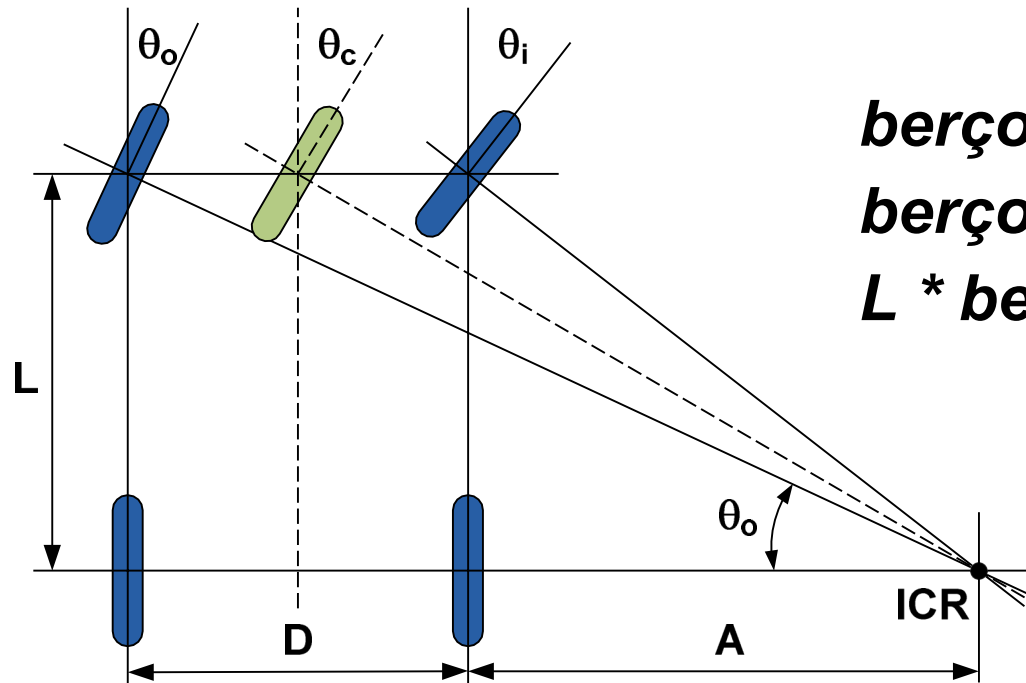
- Geralmente o **método de escolha para robôs autónomos de exterior**
- A **roda dianteira interior é rodada ligeiramente mais do que a roda exterior** (reduz o deslizamento dos pneus)
- A extensão do eixo das quatro rodas intersecta um ponto comum de ICR
- Sistema de 4 ou 3 rodas de apoio à tracção traseira e/ou dianteira
- **Deve ser utilizada** uma



Direcção Ackerman

**engrenagem diferencial no eixo
de tracção** (a menos que seja
utilizada uma única roda motorizada
nesse eixo)

Direcção Ackerman



$$berço = iA / L$$

$$berço = o(A + D) / L$$

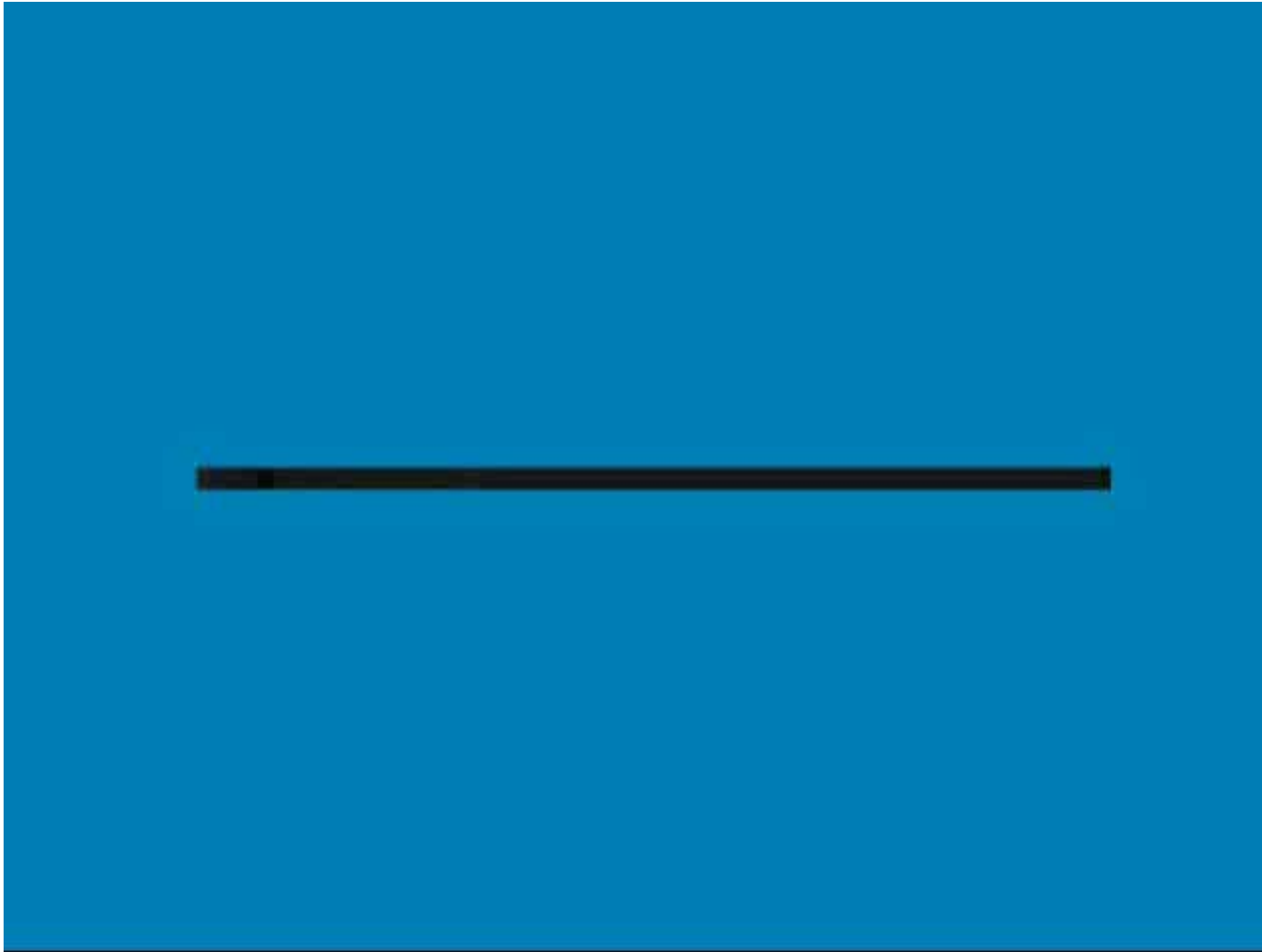
$$L * berço = oL * berço + iD$$

$$berço = cberço - oD / (2 * L)$$

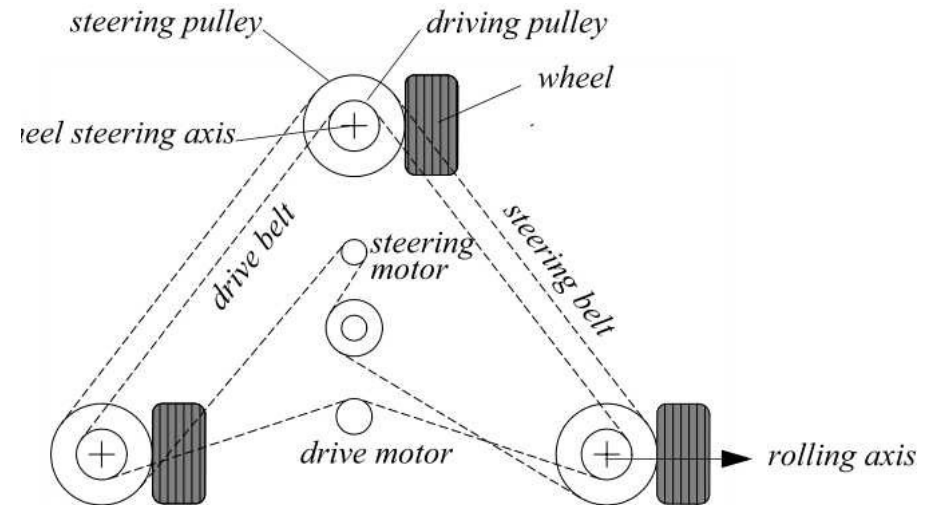
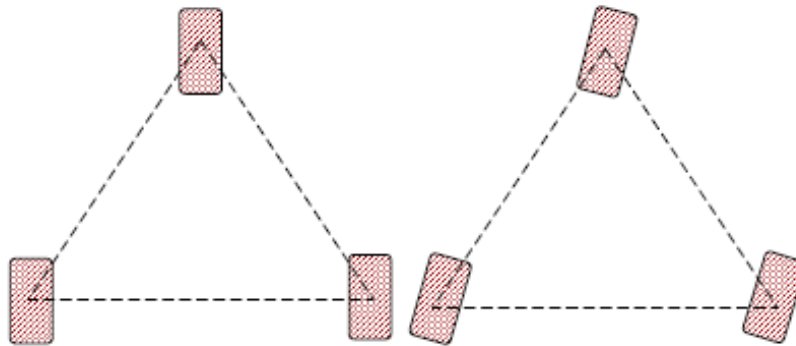
$$berço - oberço = iD / L$$

- Eixo de todas as rodas intercepta um ponto comum ICR
- Modelo cinemático: condução de triciclos

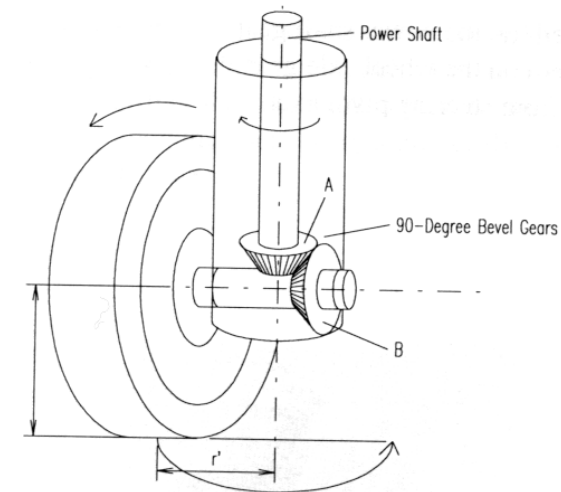
Direcção Ackerman (robô ROTA)

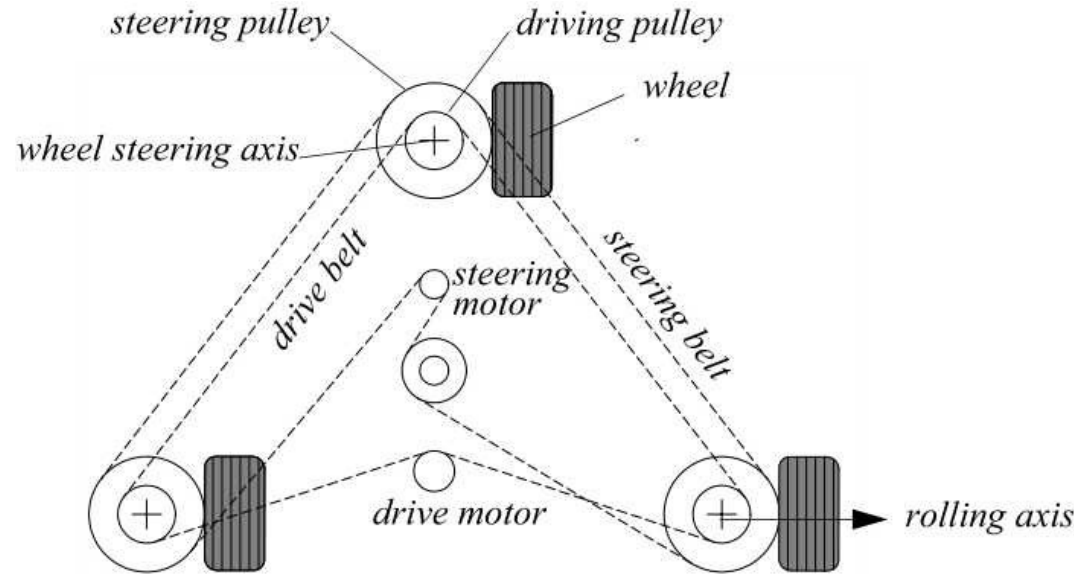


Unidade sincro



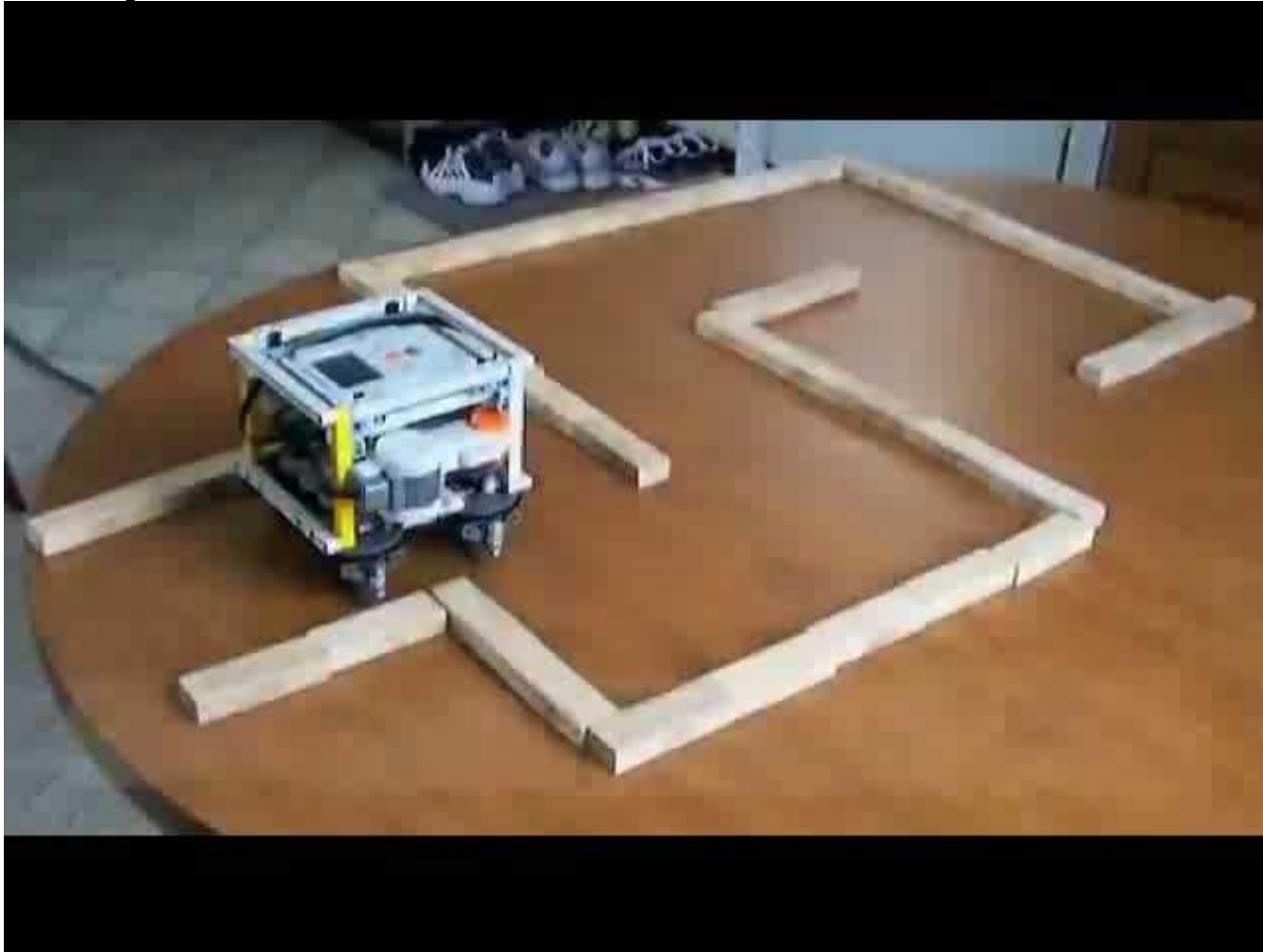
- Três (ou mais) rodas
- Dois motores:
 - O motor de translação fixa a velocidade das três rodas em conjunto
 - O motor de direcção gira todas as rodas juntas sobre cada um dos seus eixos de direcção verticais individuais





- O robô **pode mover-se em qualquer direcção**
- O robô pode sempre reorientar as suas rodas e **mover-se ao longo de uma nova trajectória sem alterar a sua pegada**
- No entanto, a **orientação do chassis não é controlável** (uma vez que as rodas estão a ser direccionadas em relação ao chassis do robot)

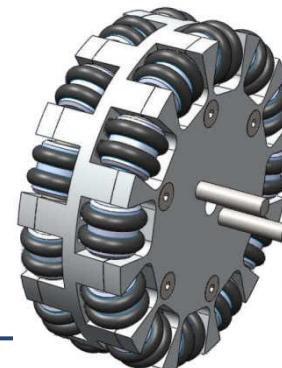
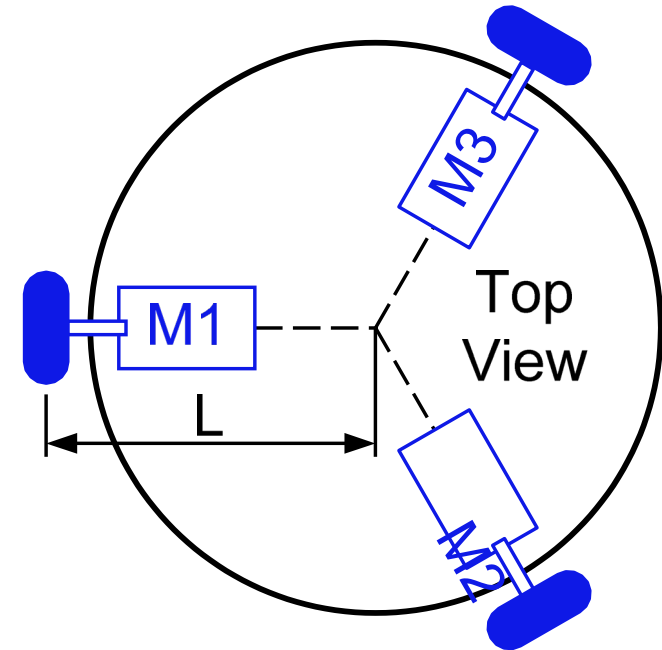
Unidade síncrona (LEGO)



<http://y2u.be/MFxjlthqXVs>

Transmissão omnidireccional

- Utiliza **rodas suecas**
- **Cada roda tem um motor de tracção independente**
- Permite **o movimento em qualquer direcção**, definindo velocidades adequadas em cada um dos três motores
- Permite movimentos complexos (por exemplo, tradução combinada com rotação)
 - Configuração de três



Transmissão omnidireccional

rodas:

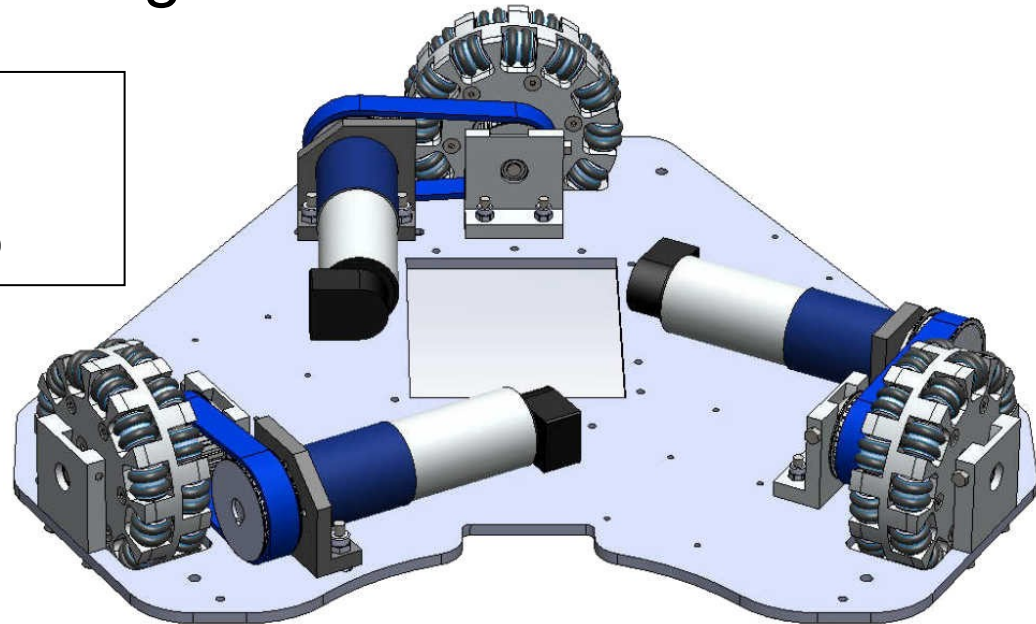
- as rodas estão espaçadas a 120°



Transmissão omnidireccional

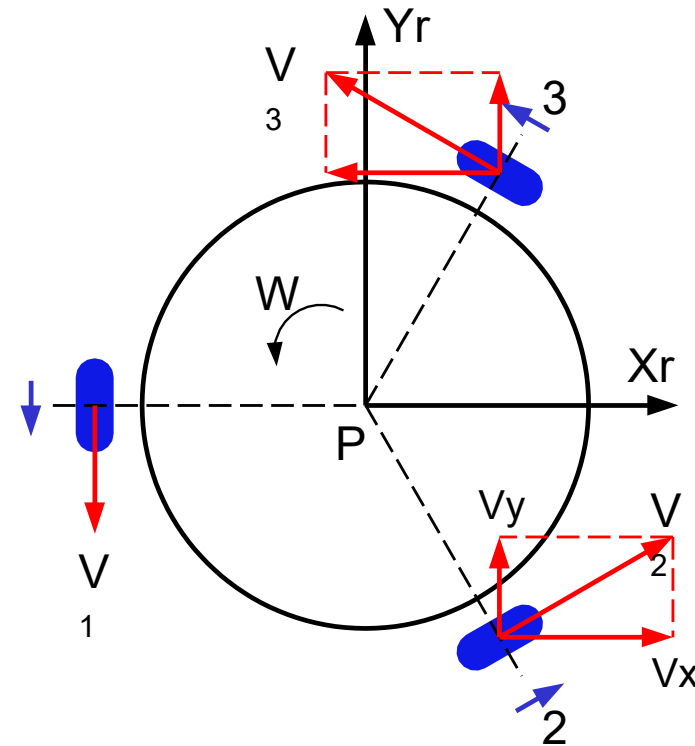
- Permite a geração de movimentos complexos, tais como ir a direito mudando, ao mesmo tempo, a orientação do robô
- **Excelente maneabilidade**
- Configuração com 4 rodas: maior tracção mas mais sensível a pisos irregulares

CAMBADA (Laboratório IRIS) robô de futebol - estrutura de accionamento omnidireccional



Transmissão omnidireccional - cinemática

- As velocidades de translação das rodas, V_1 , V_2 e V_3 , determinam a velocidade global do robô sobre o ambiente
- A velocidade de tradução de o cubo de roda "i" (V_i) can1 ser dividido em duas partes:
 - tradução pura do robô
 - rotação pura do robô



$$v_i V_{transl}, V_{rot}$$

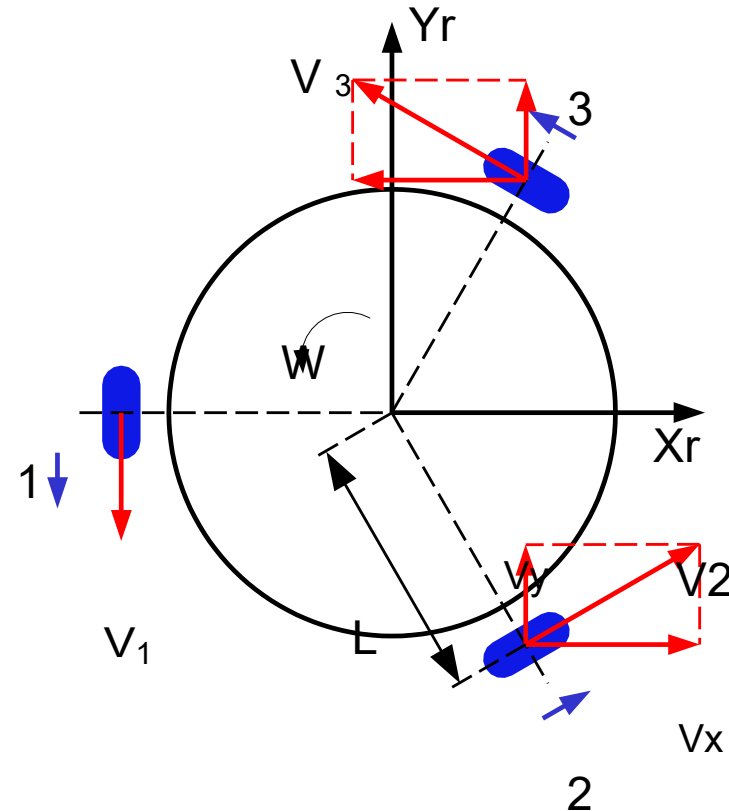
Transmissão omnidireccional - cinemática

- Quando o robô executa uma rotação pura, a velocidade do cubo "i" torna-se

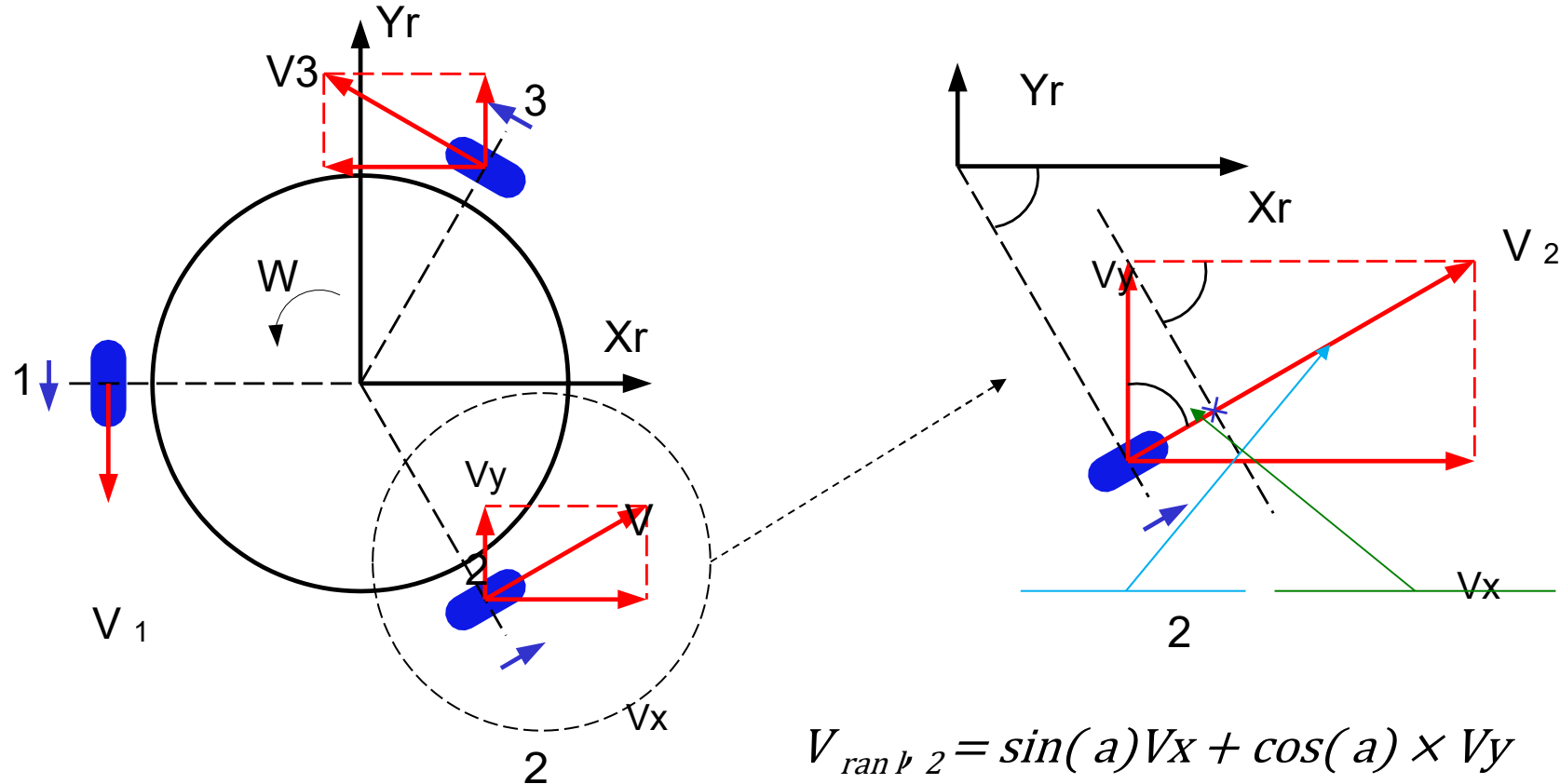
$$v_i L W$$

onde:

- L: é a distância a partir do centro geométrico do robô para a roda
- T: velocidade angular do robô



Transmissão omnidireccional - cinemática



$V_{rank\ 1} = \sin(\theta)V_X - \cos(\theta)V_Y = -V_Y$

Transmissão omnidireccional - cinemática



Transmissão omnidireccional - cinemática

- Tomando como referência o eixo 1, os ângulos do eixo são:

$$a1 = 0^\circ, a2 = 120^\circ, a3 = 240^\circ$$

- A velocidade de tradução pura ao volante o "i" do cubo pode então ser generalizado como:

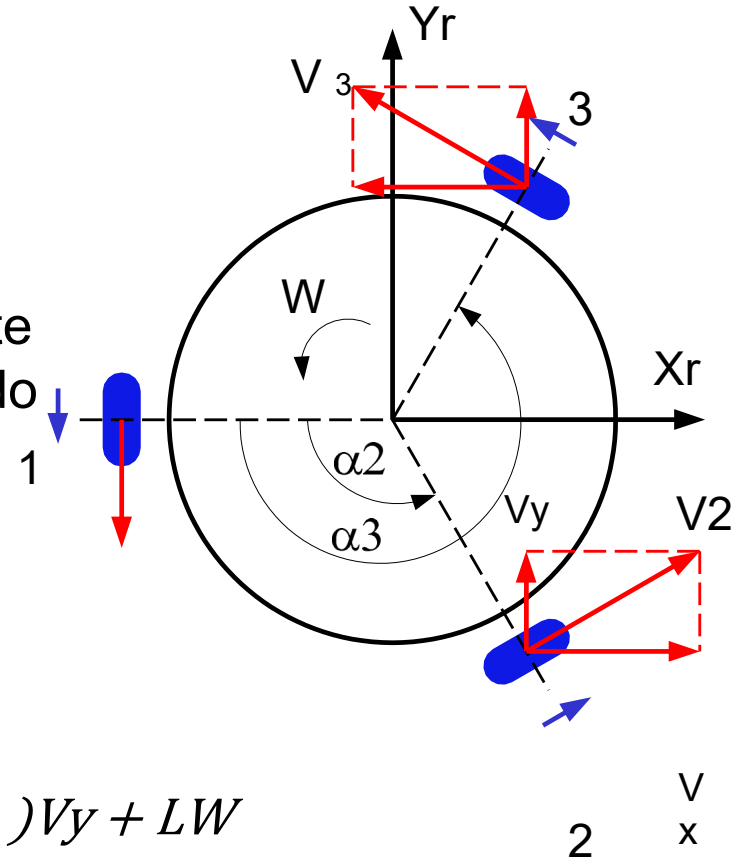
$$V_{transl,i} = \sin(a) V_x - \cos(a) V_y$$

- E V_i torna-se:

$$V = V_{transl,i} + V_{rot} = \sin(a) V_x - \cos(a) V_y + LW$$

- Mas, $v_i = r \cdot w_i$, (r é o raio da roda e w_i a velocidade angular da roda)

$$rW = \sin(a) V_x - \cos(a) V_y + LW$$



$W = (\sin(a) V_x - \cos(a) V_y + LW) / r$

Transmissão omnidireccional - cinemática



Transmissão omnidireccional - cinemática

- Podemos então escrever:

$$W_1 = \frac{1}{r} (V_y L W)$$

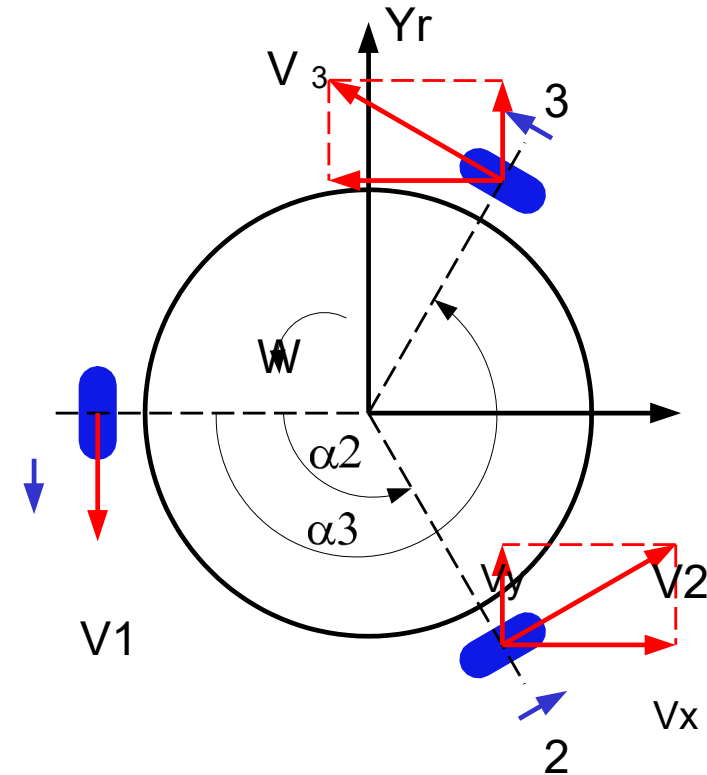
$$W_2 = \frac{1}{r} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} V_x - 0.5 V_y L W \right)$$

$$W_3 = \frac{1}{r} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} V_x - 0.5 V_y L W \right)$$

- Resolvendo para V_x , V_y e W :

$$V_x = 0 - \frac{1}{\sqrt{3}} r W_1$$

$$V_y = 21 - \frac{r}{3} W_2$$



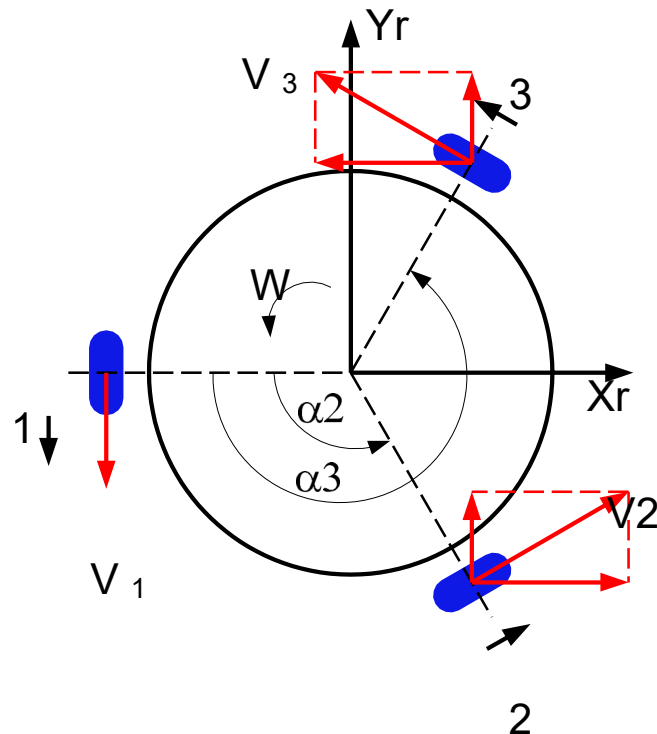
**Modelo cinemático
em moldura local**

Transmissão omnidireccional - cinemática



Transmissão omnidireccional - cinemática

Modelo cinemático no quadro global



$$\begin{matrix} X & \cos & -\text{pec} & 0V_x \\ & & \text{ado} & \\ y & \text{pecado} & \cos & 0V_y \\ & & & \\ & 0 & 0 & 1W \end{matrix}$$

Unidade omnidireccional (CAMBADA)



<http://y2u.be/PXq89EONEz0>