



Desenvolvimento de plataforma robótica móvel omnidirecional

Emílio Dolgener Cantú

Orientador: Eduardo Perondi



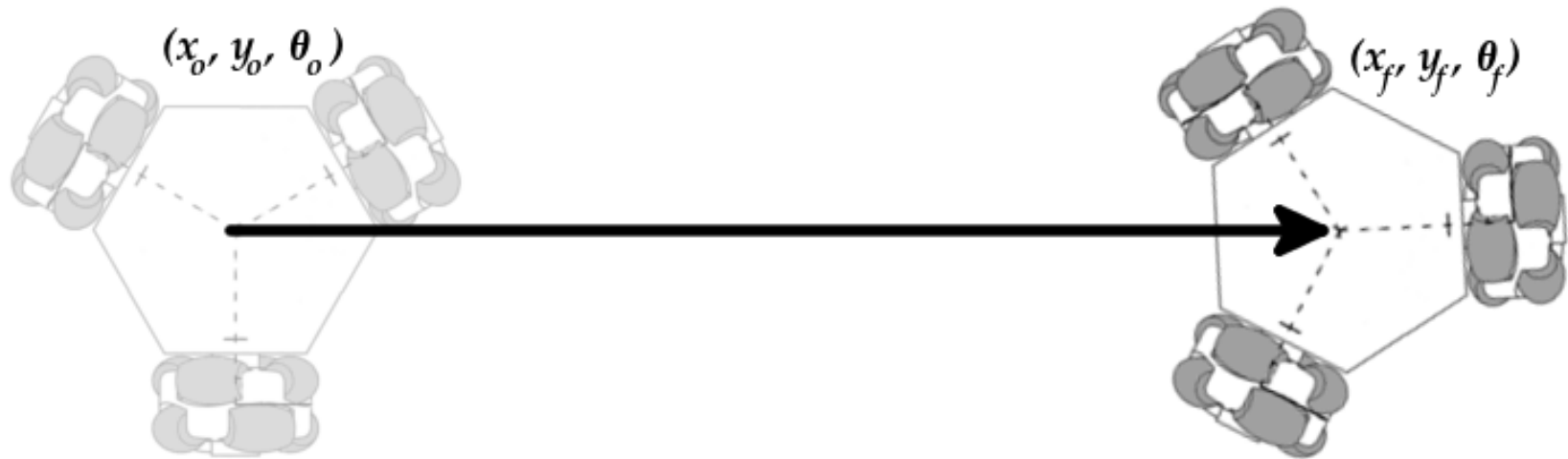


Sumário

- O Robô Omnidirecional
- Motivação
- Objetivos
- Montagem do Protótipo
- Desenvolvimento Teórico
- Implementação
- Resultados
- Conclusão
- Trabalhos Futuros

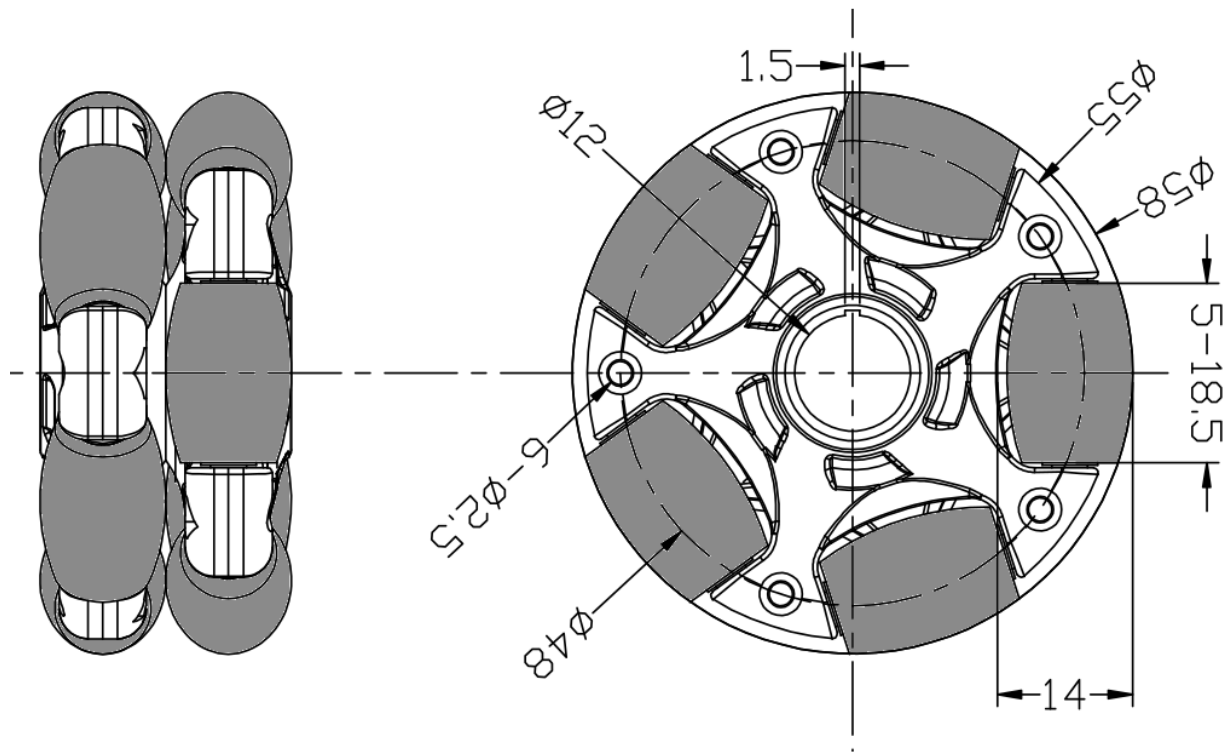
O Robô Omnidirecional

Holonomicidade: capacidade de se mover sem a necessidade de reorientação.



O Robô Omnidirecional

Omn wheel, ou "roda sueca":





Motivações



Motivações

- Multi-disciplinaridade;



Motivações

- Multi-disciplinaridade;
- Robótica móvel é cada vez mais relevante;



Motivações

- Multi-disciplinaridade;
- Robótica móvel é cada vez mais relevante;
- Aplicações de omnidirecionalidade;



Motivações

- Multi-disciplinaridade;
- Robótica móvel é cada vez mais relevante;
- Aplicações de omnidirecionalidade;
- Interesse pessoal.



Objetivos

Principal:

Obter uma plataforma funcional para trabalhos futuros.



Objetivos

Principal:

Obter uma plataforma funcional para trabalhos futuros.

- Modelagem;



Objetivos

Principal:

Obter uma plataforma funcional para trabalhos futuros.

- Modelagem;
- Construção do protótipo;



Objetivos

Principal:

Obter uma plataforma funcional para trabalhos futuros.

- Modelagem;
- Construção do protótipo;
- Algoritmo de controle;



Objetivos

Principal:

Obter uma plataforma funcional para trabalhos futuros.

- Modelagem;
- Construção do protótipo;
- Algoritmo de controle;
- Instrumentação e localização;



Objetivos

Principal:

Obter uma plataforma funcional para trabalhos futuros.

- Modelagem;
- Construção do protótipo;
- Algoritmo de controle;
- Instrumentação e localização;
- Avaliar os resultados.

Montagem - Especificação dos Componentes



- *Omniwheels;*
- Motores DC, 6V, 210 RPM;
- Drivers 4A;
- Reguladores de tensão;
- Bateria NiCd, 2000 mAh;
- Raspberry Pi 3 B+;

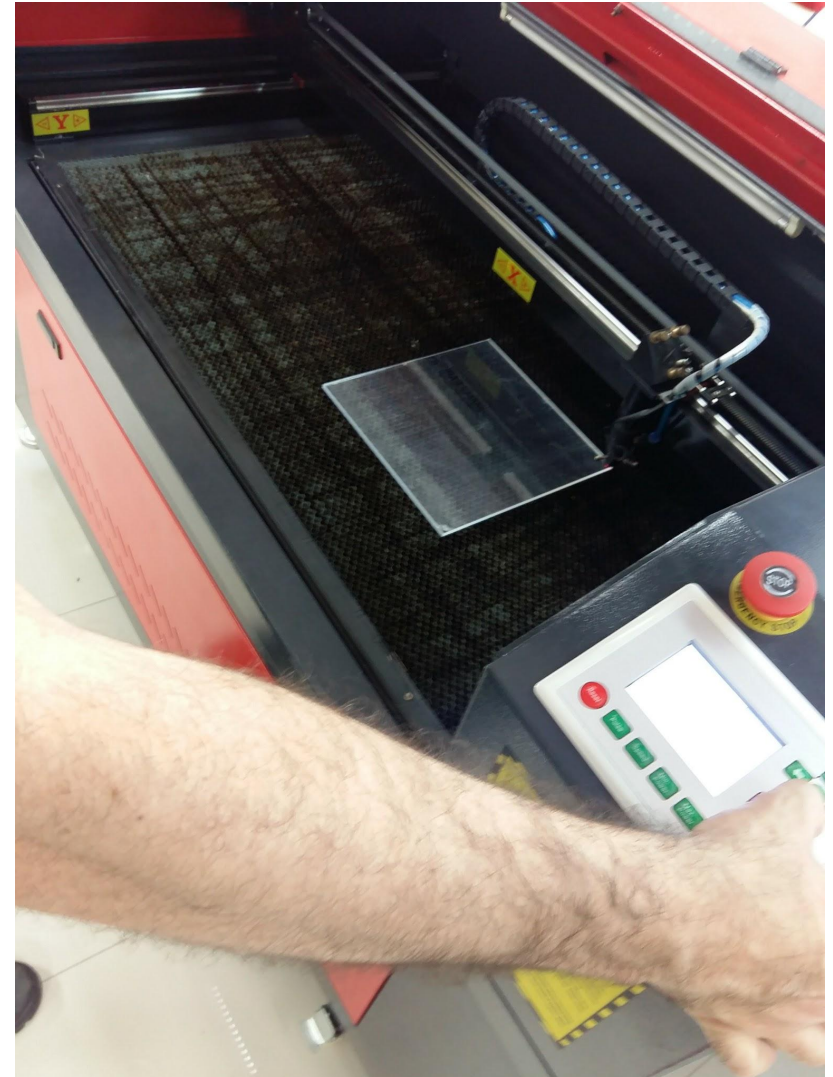
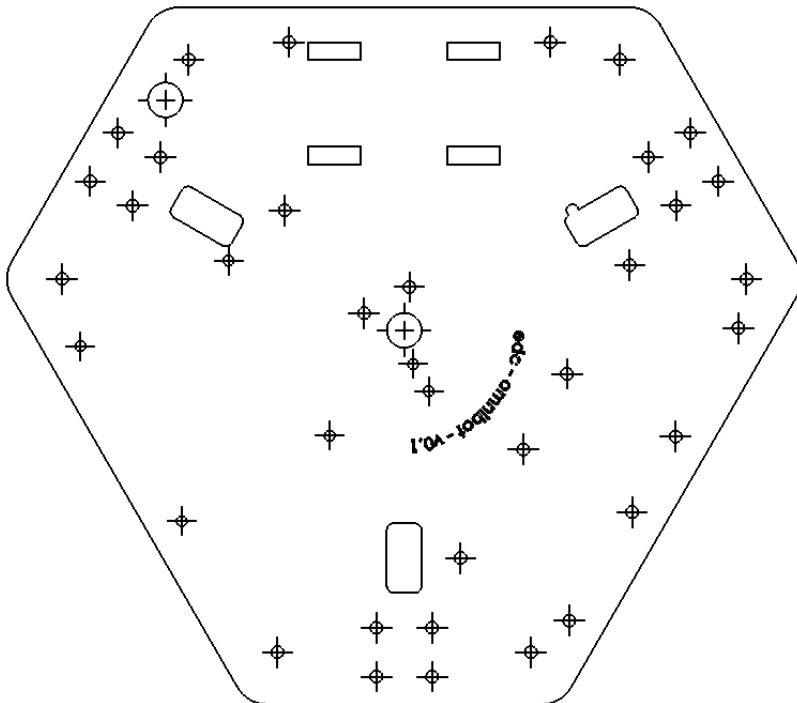
Montagem - Especificação dos Componentes



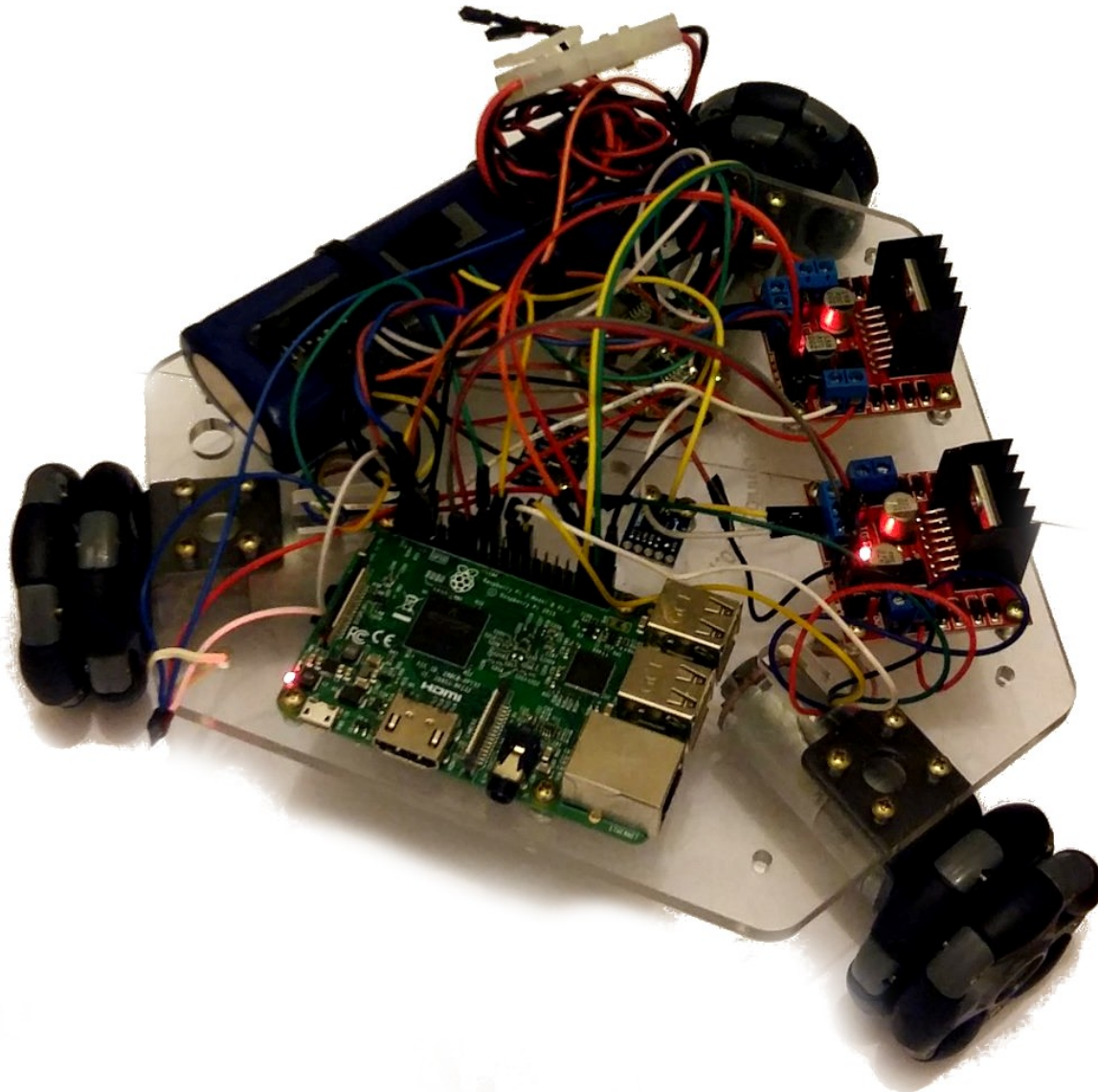
- *Omniwheels*;
- Motores DC, 6V, 210 RPM;
- Drivers 4A;
- Reguladores de tensão;
- Bateria NiCd, 2000 mAh;
- Raspberry Pi 3 B+;
- IMU;
- Bússola.

Montagem - Projeto e Fabricação

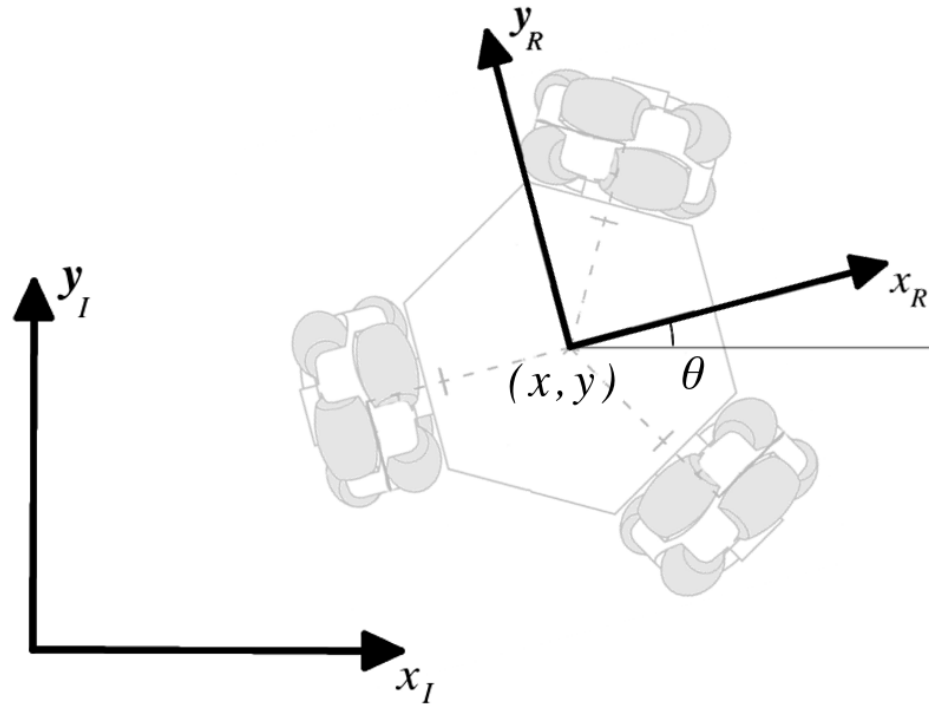
- CAD;
- Corte a *laser*;
- Chapa de acrílico.



Montagem Final

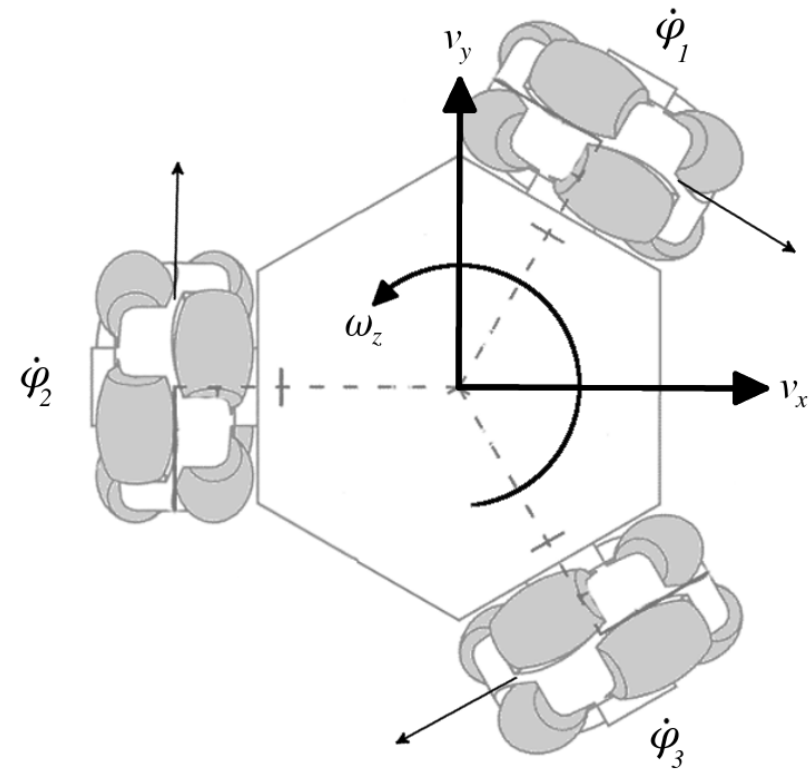


Modelagem - Coordenadas do Robô vs. Globais



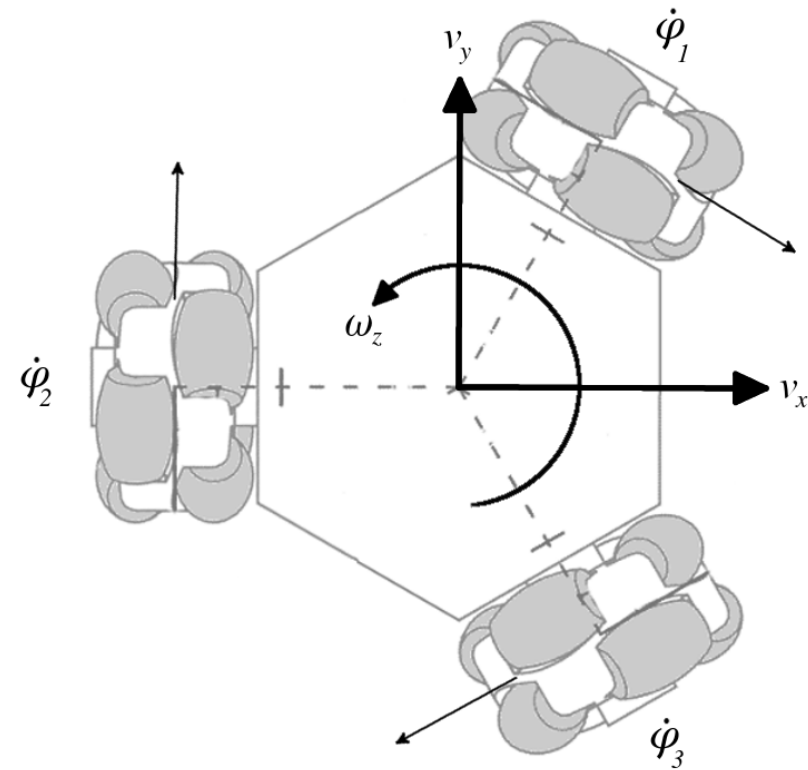
$$\begin{pmatrix} x_I \\ y_I \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_R \\ y_R \\ \theta \end{pmatrix}$$

Modelagem Cinemática



Siegwart et. al (2011).

Modelagem Cinemática

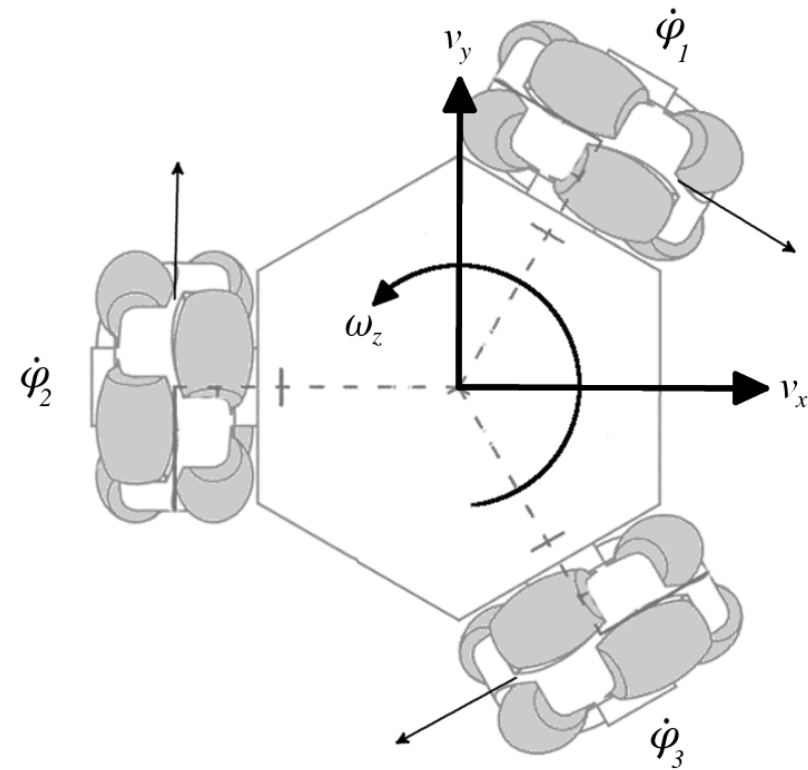


Cinemática direta:

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \frac{r}{3R} \begin{pmatrix} -\frac{3R}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{3R}{\sqrt{3}} \\ R & -2R & R \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \end{pmatrix}$$

Siegwart et. al (2011).

Modelagem Cinemática



Siegwart et. al (2011).

Cinemática direta:

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \frac{r}{3R} \begin{pmatrix} -\frac{3R}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{3R}{\sqrt{3}} \\ R & -2R & R \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \end{pmatrix}$$

Cinemática inversa:

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{r} \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & R \\ 0 & -1 & R \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix}$$



Odometria

Estimação da posição atual
baseada na integração dos dados
lidos pelos sensores.



Odometria

Estimação da posição atual
baseada na integração dos dados
lidos pelos sensores.

- *Self-localization;*



Odometria

Estimação da posição atual baseada na integração dos dados lidos pelos sensores.

- *Self-localization*;
- Necessária para controle de posição;



Odometria

Estimação da posição atual baseada na integração dos dados lidos pelos sensores.

- *Self-localization*;
- Necessária para controle de posição;
- Baseado em encoders: erros cumulativos.



- Velocidade constante;
- Período unitário;

$$\Delta x = v_x \Delta t$$

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \frac{r}{3R} \begin{pmatrix} -\frac{3R}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{3R}{\sqrt{3}} \\ R & -2R & R \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \\ \Delta\phi_3 \end{pmatrix}$$

$$\Delta q_R = \begin{pmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\Delta q_R = \begin{pmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (v_x \sin(\omega_z)) + v_y (\cos(\omega_z) - 1) / \omega_z \\ (v_y \sin(\omega_z)) + v_x (1 - \cos(\omega_z)) / \omega_z \\ \omega_z \end{pmatrix}$$

$$q_{I(k+1)} = q_{I(k)} + \Delta q_I = q_{I(k)} + R(\theta_k) \Delta q_I$$



- Velocidade constante;
- Período unitário;

$$\Delta x = v_x \cancel{\Delta t}$$

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \frac{r}{3R} \begin{pmatrix} -\frac{3R}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{3R}{\sqrt{3}} \\ R & -2R & R \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \\ \Delta\phi_3 \end{pmatrix}$$

$$\Delta q_R = \begin{pmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\Delta q_R = \begin{pmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (v_x \sin(\omega_z)) + v_y (\cos(\omega_z) - 1) / \omega_z \\ (v_y \sin(\omega_z)) + v_x (1 - \cos(\omega_z)) / \omega_z \\ \omega_z \end{pmatrix}$$

$$q_{I(k+1)} = q_{I(k)} + \Delta q_I = q_{I(k)} + R(\theta_k) \Delta q_I$$



- Velocidade constante;
 - Período unitário;
- 1) Posição de cada roda;
 - 2) Cinemática direta;
 - 3) Deslocamento em relação ao robô:
 - a) sem rotação;
 - b) com rotação;
 - 4) Transpor às coord. globais;
 - 5) Atualizar.

$$\Delta x = v_x \cancel{\Delta t}$$

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \frac{r}{3R} \begin{pmatrix} -\frac{3R}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{3R}{\sqrt{3}} \\ R & -2R & R \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \\ \Delta\phi_3 \end{pmatrix}$$

$$\Delta q_R = \begin{pmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\Delta q_R = \begin{pmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (v_x \sin(\omega_z)) + v_y (\cos(\omega_z) - 1) / \omega_z \\ (v_y \sin(\omega_z)) + v_x (1 - \cos(\omega_z)) / \omega_z \\ \omega_z \end{pmatrix}$$

$$q_{I(k+1)} = q_{I(k)} + \Delta q_I = q_{I(k)} + R(\theta_k) \Delta q_I$$



- Velocidade constante;
 - Período unitário;
- 1) Posição de cada roda;
 - 2) Cinemática direta;
 - 3) Deslocamento em relação ao robô:
 - a) sem rotação;
 - b) com rotação;
 - 4) Transpor às coord. globais;
 - 5) Atualizar.

$$\Delta x = v_x \cancel{\Delta t}$$

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \frac{r}{3R} \begin{pmatrix} -\frac{3R}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{3R}{\sqrt{3}} \\ R & -2R & R \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \\ \Delta\phi_3 \end{pmatrix} \quad \text{1}$$

$$\Delta q_R = \begin{pmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\Delta q_R = \begin{pmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (v_x \sin(\omega_z)) + v_y (\cos(\omega_z) - 1) / \omega_z \\ (v_y \sin(\omega_z)) + v_x (1 - \cos(\omega_z)) / \omega_z \\ \omega_z \end{pmatrix}$$

$$q_{I(k+1)} = q_{I(k)} + \Delta q_I = q_{I(k)} + R(\theta_k) \Delta q_I$$



- Velocidade constante;
 - Período unitário;
- 1) Posição de cada roda;
 - 2) Cinemática direta;
 - 3) Deslocamento em relação ao robô:
 - a) sem rotação;
 - b) com rotação;
 - 4) Transpor às coord. globais;
 - 5) Atualizar.

$$\Delta x = v_x \cancel{\Delta t}$$

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \frac{r}{3R} \begin{pmatrix} -\frac{3R}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{3R}{\sqrt{3}} \\ R & -2R & R \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \\ \Delta\phi_3 \end{pmatrix}$$

$$\Delta q_R = \begin{pmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\Delta q_R = \begin{pmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (v_x \sin(\omega_z)) + v_y (\cos(\omega_z) - 1) / \omega_z \\ (v_y \sin(\omega_z)) + v_x (1 - \cos(\omega_z)) / \omega_z \\ \omega_z \end{pmatrix}$$

$$q_{I(k+1)} = q_{I(k)} + \Delta q_I = q_{I(k)} + R(\theta_k) \Delta q_I$$



- Velocidade constante;
 - Período unitário;
- 1) Posição de cada roda;
 - 2) Cinemática direta;
 - 3) Deslocamento em relação ao robô:
 - a) sem rotação;
 - b) com rotação;
 - 4) Transpor às coord. globais;
 - 5) Atualizar.

$$\Delta x = v_x \cancel{\Delta t}$$

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \frac{r}{3R} \begin{pmatrix} -\frac{3R}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{3R}{\sqrt{3}} \\ R & -2R & R \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \\ \Delta\phi_3 \end{pmatrix} \quad \text{1}$$

$$\Delta q_R = \begin{pmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{3.a}$$

$$\Delta q_R = \begin{pmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (v_x \sin(\omega_z)) + v_y (\cos(\omega_z) - 1) / \omega_z \\ (v_y \sin(\omega_z)) + v_x (1 - \cos(\omega_z)) / \omega_z \\ \omega_z \end{pmatrix}$$

$$q_{I(k+1)} = q_{I(k)} + \Delta q_I = q_{I(k)} + R(\theta_k) \Delta q_I$$



- Velocidade constante;
- Período unitário;

- 1) Posição de cada roda;
- 2) Cinemática direta;
- 3) Deslocamento em relação ao robô:
 - a) sem rotação;
 - b) com rotação;
- 4) Transpor às coord. globais;
- 5) Atualizar.

$$\Delta x = v_x \cancel{\Delta t}$$

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \frac{r}{3R} \begin{pmatrix} -\frac{3R}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{3R}{\sqrt{3}} \\ R & -2R & R \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \\ \Delta\phi_3 \end{pmatrix} \quad \text{1}$$

$$\Delta q_R = \begin{pmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{3.a}$$

$$\Delta q_R = \begin{pmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (v_x \sin(\omega_z)) + v_y (\cos(\omega_z) - 1) / \omega_z \\ (v_y \sin(\omega_z)) + v_x (1 - \cos(\omega_z)) / \omega_z \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad \text{3.b}$$

$$q_{I(k+1)} = q_{I(k)} + \Delta q_I = q_{I(k)} + R(\theta_k) \Delta q_I$$



- Velocidade constante;
- Período unitário;

- 1) Posição de cada roda;
- 2) Cinemática direta;
- 3) Deslocamento em relação ao robô:
 - a) sem rotação;
 - b) com rotação;
- 4) Transpor às coord. globais;
- 5) Atualizar.

$$\Delta x = v_x \cancel{\Delta t}$$

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \frac{r}{3R} \begin{pmatrix} -\frac{3R}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{3R}{\sqrt{3}} \\ R & -2R & R \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \\ \Delta\phi_3 \end{pmatrix} \quad \text{1}$$

$$\Delta q_R = \begin{pmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{3.a}$$

$$\Delta q_R = \begin{pmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (v_x \sin(\omega_z)) + v_y (\cos(\omega_z) - 1) / \omega_z \\ (v_y \sin(\omega_z)) + v_x (1 - \cos(\omega_z)) / \omega_z \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad \text{3.b}$$

$$q_{I(k+1)} = q_{I(k)} + \Delta q_I = q_{I(k)} + R(\theta_k) \Delta q_I \quad \text{4}$$



- Velocidade constante;
- Período unitário;

- 1) Posição de cada roda;
- 2) Cinemática direta;
- 3) Deslocamento em relação ao robô:
 - a) sem rotação;
 - b) com rotação;
- 4) Transpor às coord. globais;
- 5) Atualizar.

$$\Delta x = v_x \cancel{\Delta t}$$

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \frac{r}{3R} \begin{pmatrix} -\frac{3R}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{3R}{\sqrt{3}} \\ R & -2R & R \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \\ \Delta\phi_3 \end{pmatrix} \quad \text{1}$$

$$\Delta q_R = \begin{pmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{3.a}$$

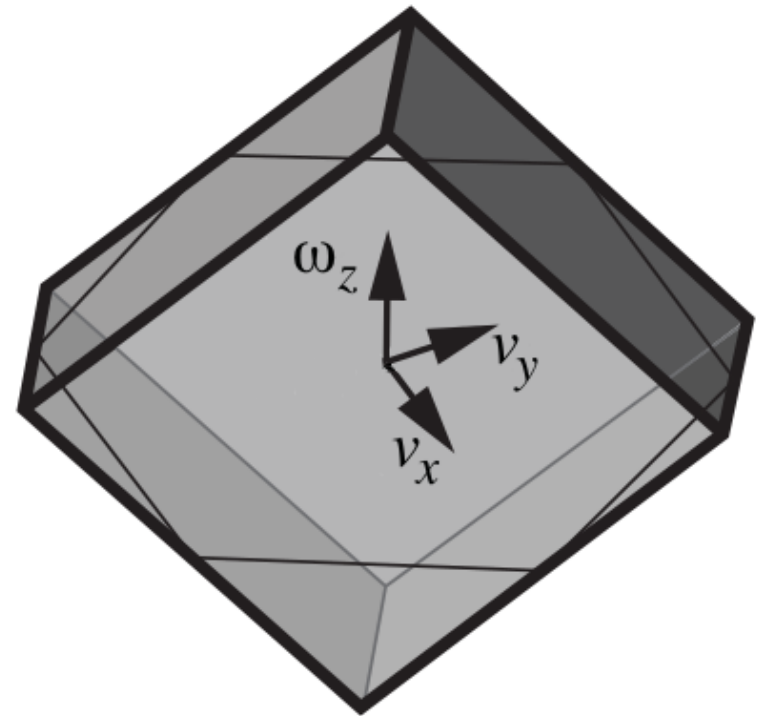
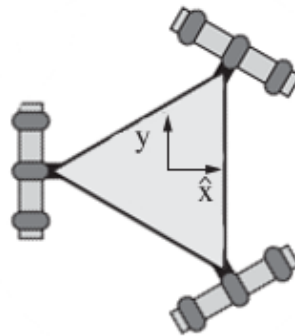
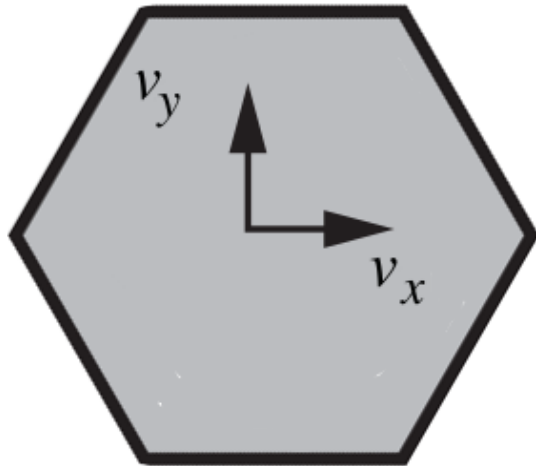
$$\Delta q_R = \begin{pmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (v_x \sin(\omega_z)) + v_y (\cos(\omega_z) - 1) / \omega_z \\ (v_y \sin(\omega_z)) + v_x (1 - \cos(\omega_z)) / \omega_z \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad \text{3.b}$$

$$q_{I(k+1)} = q_{I(k)} + \Delta q_I = q_{I(k)} + R(\theta_k) \Delta q_I \quad \text{4}$$

Limitações de Velocidade



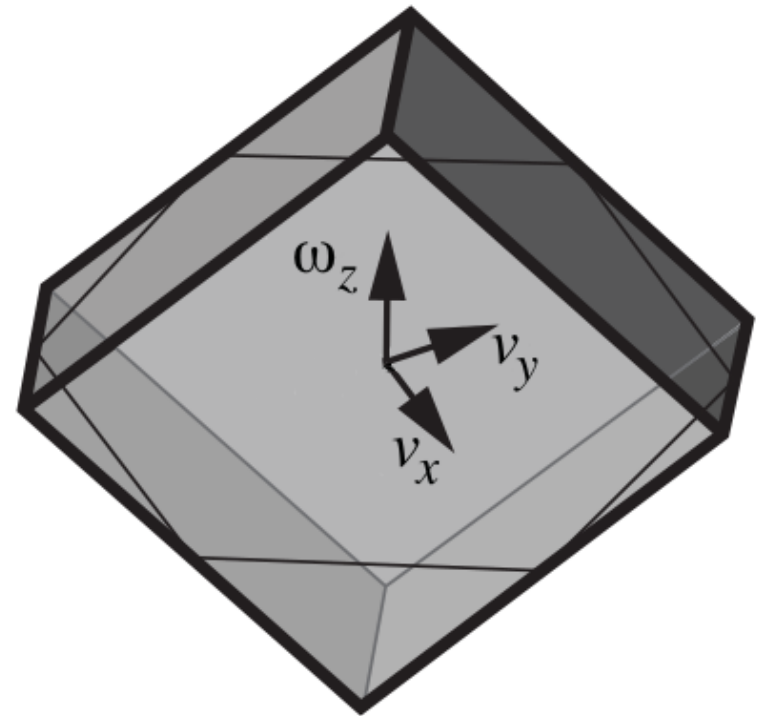
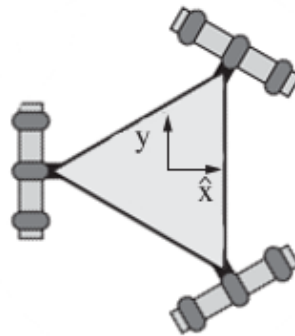
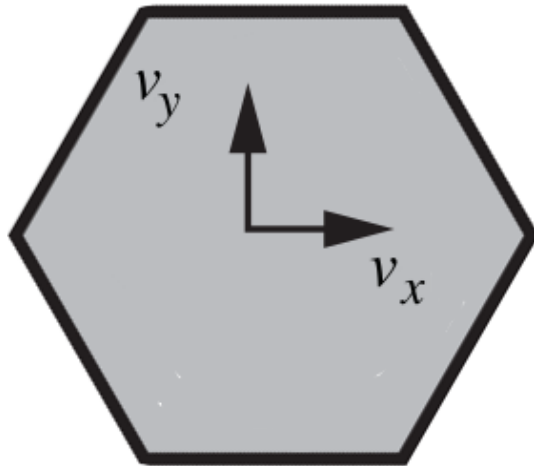
Saturação de um motor → Trajetória errada.



Limitações de Velocidade

Saturação de um motor → Trajetória errada.

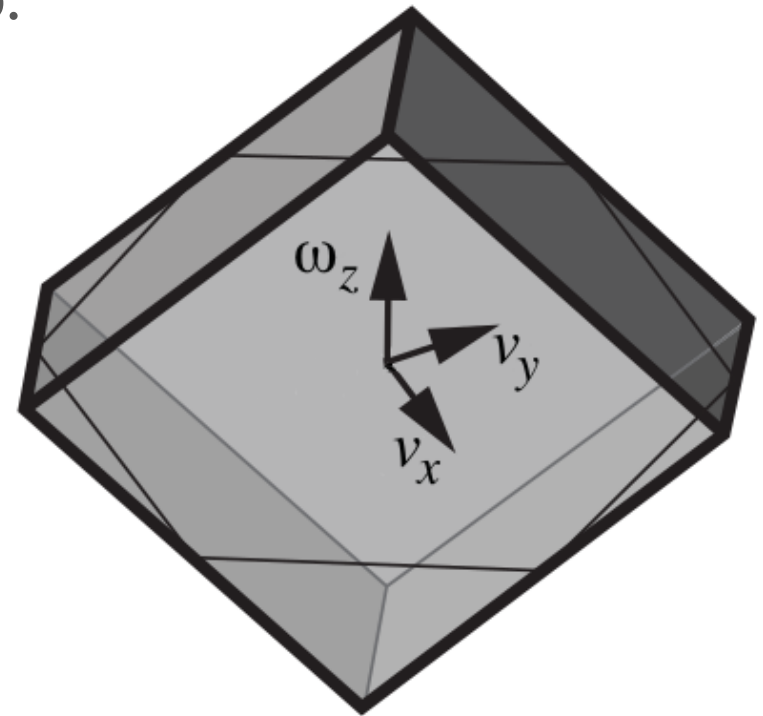
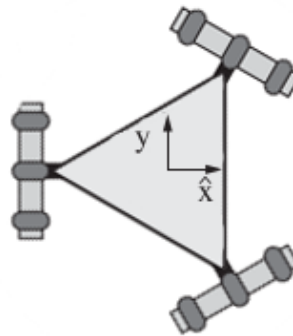
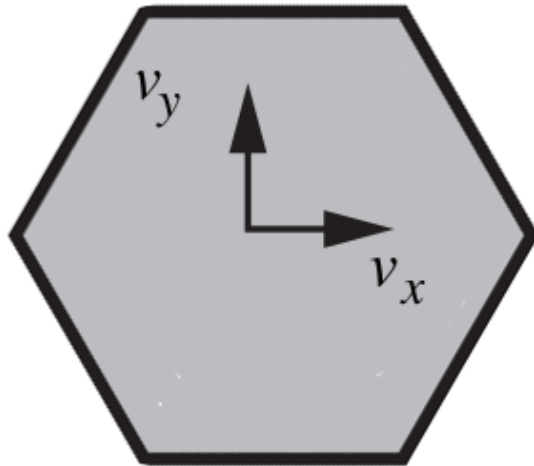
Exemplo: Translação em velocidade máxima



Limitações de Velocidade

Saturação de um motor → Trajetória errada.

Exemplo: Translação em velocidade máxima
+ rotação.





PID digital (Dorf e Bishop, 2008):

$$u[k] = (K_P + K_I T + \frac{K_D}{T}) x[k] - K_D T x[k - 1] + K_I u[k - 1]$$

Controle de Velocidade



PID digital (Dorf e Bishop, 2008):

$$u[k] = \underbrace{\left(K_P + K_I T + \frac{K_D}{T}\right)}_{\text{ajustado (15)}} x[k] - \cancel{K_D T x[k-1]} + \underbrace{K_I u[k-1]}_{\text{erro nulo em regime}}$$

Controle de Velocidade



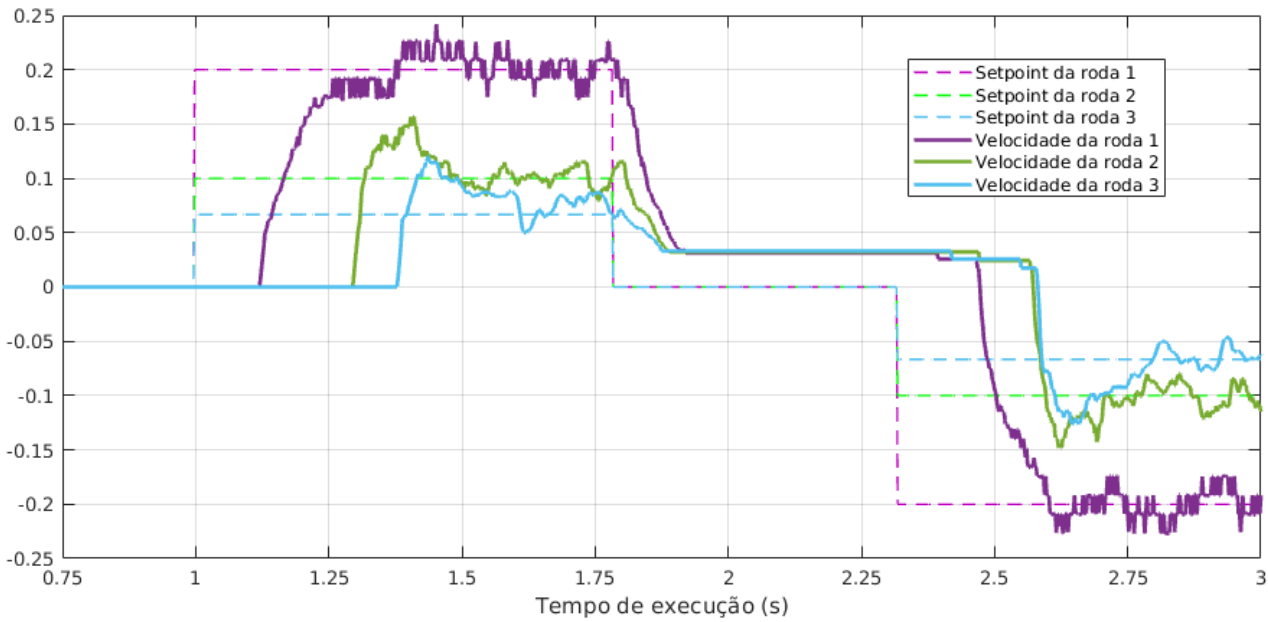
PID digital (Dorf e Bishop, 2008):

$$u[k] = \underbrace{\left(K_P + K_I T + \frac{K_D}{T}\right)}_{\text{ajustado (15)}} x[k] - \cancel{K_D T x[k-1]} + \underbrace{K_I u[k-1]}_{\text{erro nulo em regime}}$$

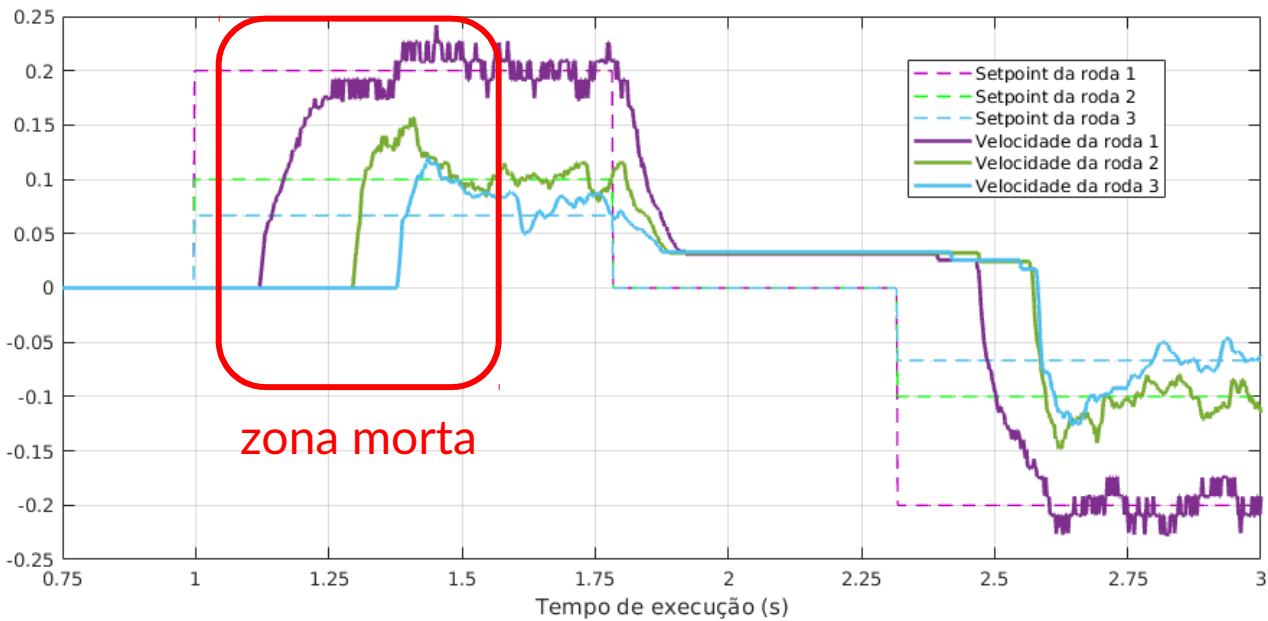
Implementação:

```
control = 15*spd_error + control_old;
```

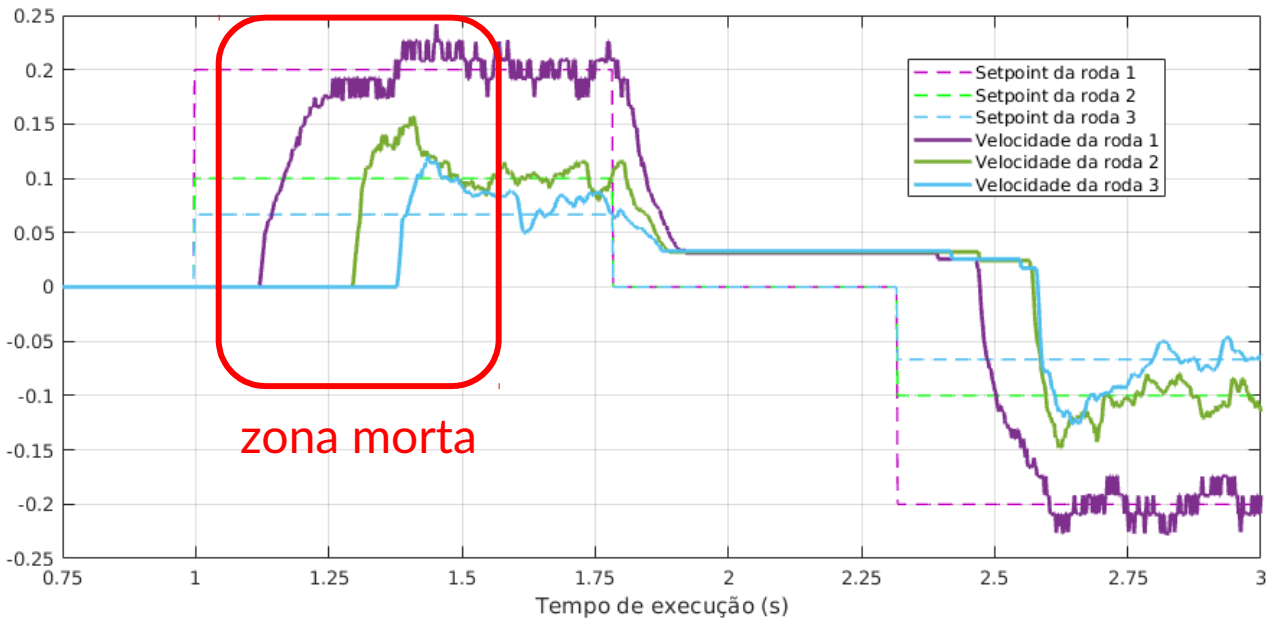
Controle de Velocidade - Zona Morta



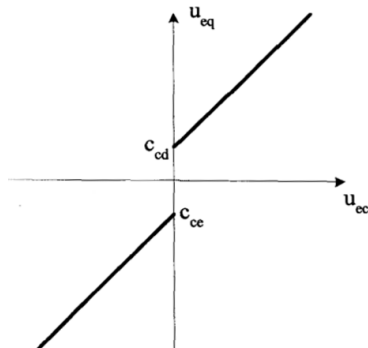
Controle de Velocidade - Zona Morta



Controle de Velocidade - Zona Morta



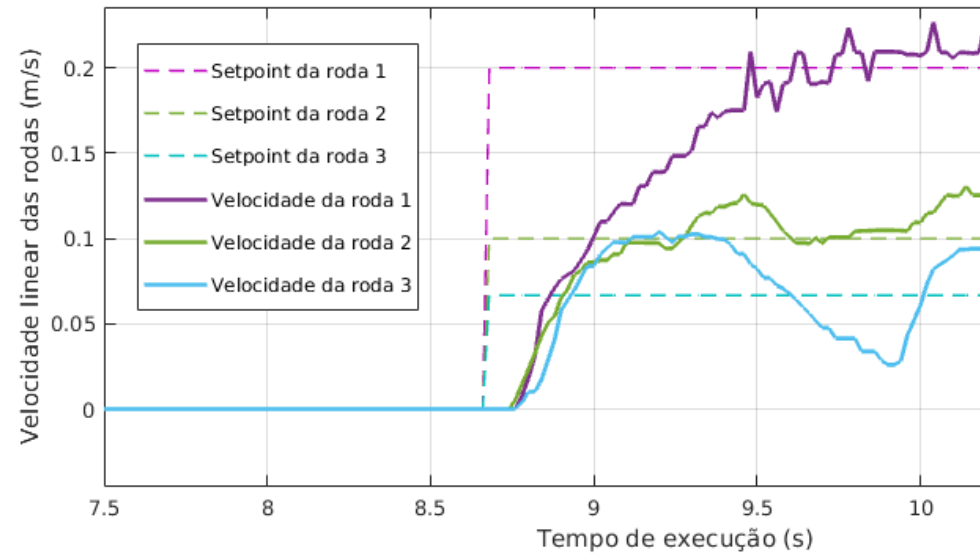
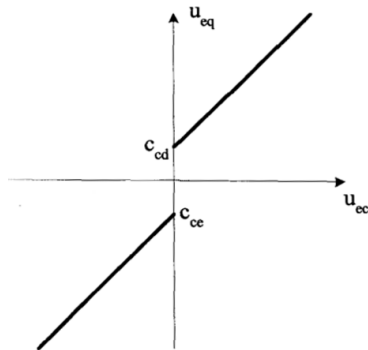
Compensação:



Controle de Velocidade - Zona Morta



Compensação:



Resultados da Odometria



Resultados da Odometria



- Trajetória de giro: ok, após compensação;

Resultados da Odometria



- Trajetória de giro: ok, após compensação;
- Trajetória retilínea: acúmulo de erro na direção transversal ao movimento.

Resultados da Odometria



- Trajetória de giro: ok, após compensação;
- Trajetória retilínea: acúmulo de erro na direção transversal ao movimento.

Inconclusivo → controle de posição descartado.

Resultados da Odometria



- Trajetória de giro: ok, após compensação;
- Trajetória retilínea: acúmulo de erro na direção transversal ao movimento.

Inconclusivo → controle de posição descartado.

"A incerteza em Y cresce muito mais rápido do que na direção do movimento. Isso resulta da integração da incerteza a respeito da orientação do robô." - **Siegwart et. al (2011)**.

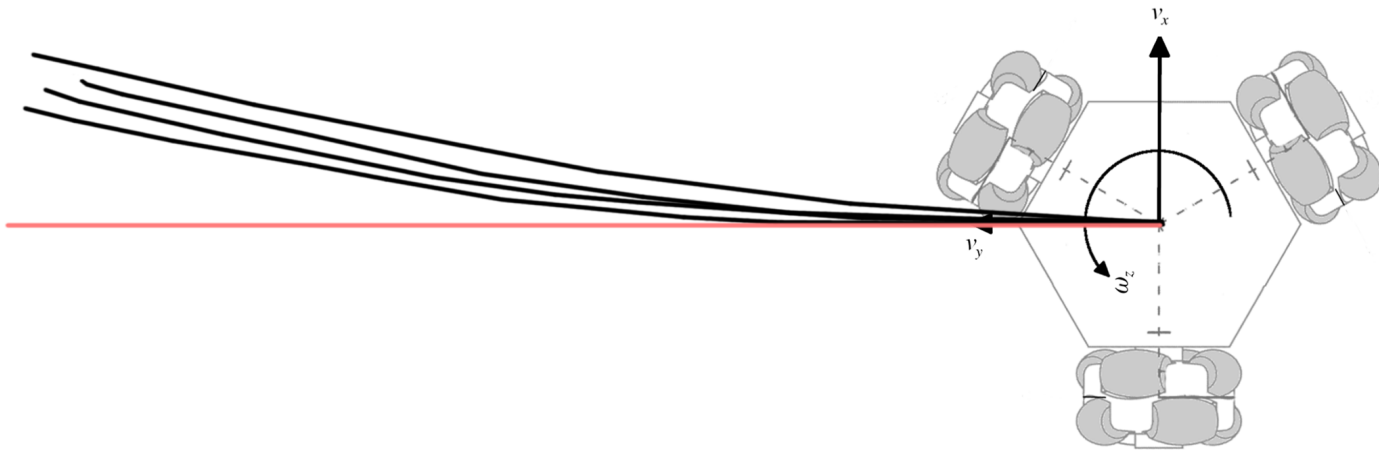
Resultados das Trajetórias



- Trajetória de giro: concêntrica;
- Trajetória retilínea: alguns desvios;

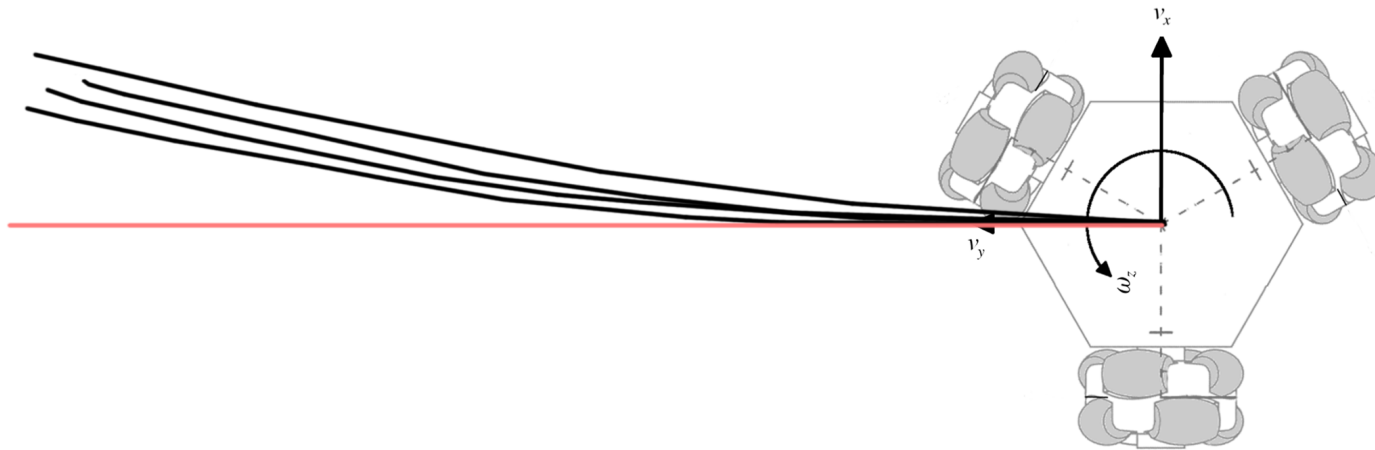
Resultados das Trajetórias

- Trajetória de giro: concêntrica;
- Trajetória retilínea: alguns desvios;



Resultados das Trajetórias

- Trajetória de giro: concêntrica;
- Trajetória retilínea: alguns desvios;



- Trajetória híbrida: não testada.



Conclusões

Plataforma adequada
para utilização futura.



Conclusões

Plataforma adequada
para utilização futura.

OK:

- Estrutura e hardware;
- Modelagem cinemática;
- Limitação de velocidade;
- Acionamento dos atuadores;
- Leitura dos sensores;



Conclusões

Plataforma adequada
para utilização futura.

OK:

- Estrutura e hardware;
- Modelagem cinemática;
- Limitação de velocidade;
- Acionamento dos atuadores;
- Leitura dos sensores;

Funcional:

- Controle de velocidade pode ser melhorado;



Conclusões

Plataforma adequada
para utilização futura.

OK:

- Estrutura e hardware;
- Modelagem cinemática;
- Limitação de velocidade;
- Acionamento dos atuadores;
- Leitura dos sensores;

Funcional:

- Controle de velocidade pode ser melhorado;

Pendente:

- Odometria deve ser reavaliada;
- Controle de posição não implementado.



Trabalhos Futuros

- Odometria;
- Controle de Posição;
- Interface.



Trabalhos Futuros

- Odometria;
 - Controle de Posição;
 - Interface.
- Modelagem dinâmica;
 - Aprimorar controladores;
 - Implementação dos sensores inerciais e da bússola;
 - Estudos sobre o desempenho do computador utilizado;
 - Quantificar o consumo de energia do robô, e implementar trajetórias mais eficientes;
 - Desenvolver aplicações;
 -



Muito obrigado!

Sessão aberta a perguntas.