

Minicurso Introdução à Simuladores Robóticos: Robótica Móvel com CoppeliaSim

Mateus Pincho de Oliveira
Breno Henrique Martins

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE
Capítulo Estudantil IEEE RAS UFCG

6 de junho de 2024

Introdução

Duas tarefas são centrais quando estamos tratando de robôs móveis:

Introdução

Duas tarefas são centrais quando estamos tratando de robôs móveis:

Navegação

- ▶ Tarefa com **alto nível de complexidade**
- ▶ Responsável pelo planejamento e tomada de decisões
- ▶ Entender (Perceber) o mundo a sua volta

Introdução

Duas tarefas são centrais quando estamos tratando de robôs móveis:

Navegação

- ▶ Tarefa com **alto nível de complexidade**
- ▶ Responsável pelo planejamento e tomada de decisões
- ▶ Entender (Perceber) o mundo a sua volta

Locomoção

- ▶ Tarefa com **baixo nível de complexidade**
- ▶ Responsável por responder aos comandos
- ▶ Atuar sobre o espaço

Introdução

Um robô móvel irá atuar e perceber o espaço em sua volta a partir de diferentes mecanismos de locomoção.

- Robôs móveis são projetados tendo em visto o tipo de ambiente em que eles irão se locomover



Figura: Diferentes tipos de robôs móveis

Cinemática

Para entender a robótica móvel e saber como controlar robôs móveis, é preciso primeiro entender como eles se movimentam.

Cinemática

Para entender a robótica móvel e saber como controlar robôs móveis, é preciso primeiro entender como eles se movimentam.

Cinemática

- ▶ Ramo responsável por estudar como que os robôs se locomovem
- ▶ Não considera forças e torques (Dinâmica)
- ▶ Considerar o robô como um sistema mecânico

Cinemática

A cinemática de um robô é dividida em duas categorias:

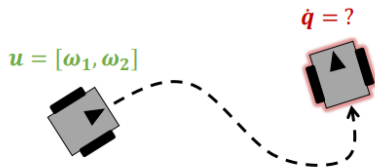
Cinemática

A cinemática de um robô é dividida em duas categorias:

Cinemática Direta

Dado os valores das variáveis de controle, qual é a velocidade final do robô?

- Para o caso de estudo deste minicurso, as variáveis de controle são as velocidades de giro das rodas do robô



Cinemática

A cinemática de um robô é dividida em duas categorias:

Cinemática Inversa

Dada a velocidade final do robô, qual deve ser os valores das variáveis de controle?



Cinemática - Conceitos-chave

Posição

Vetor posição do Robô

$$\mathbf{X} = (x, y)$$

Configuração - Pose

Orientação do Robô no espaço

$$q = (x, y, \theta)$$

Cinemática - Conceitos-Chave

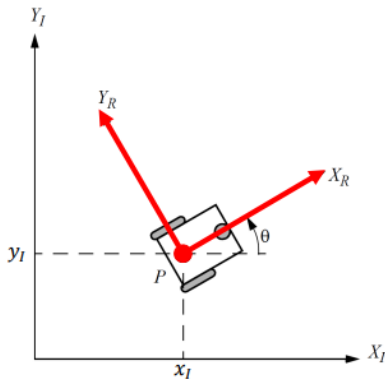


Figura: Posição e Orientação de um robô no espaço

Cinemática

Modelo Cinemático

Como calcular as velocidades do robô em função da velocidade de seus atuadores?

- ▶ Existe um modelo matemático que nos responde esta pergunta!

Robô de tração diferencial

Este é o mecanismo mais simples de movimentação.

- ▶ Duas rodas motrizes paralelas mais uma roda boba para prover equilíbrio.
- ▶ A pose do robô será função das velocidades de giro do motor.

Modelo cinemático

Velocidades angulares de roda

ω_R e ω_L

Velocidades lineares de roda

V_R e V_L

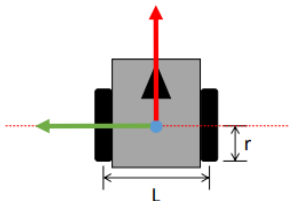
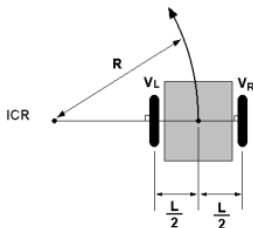


Figura: Modelo simplificado do nosso robô

Modelo cinemático - Como o robô se movimenta?

Podemos assumir que o nosso robô se movimenta em torno de uma trajetória circular:



- ▶ Para ir para frente: $R = \infty$
- ▶ Para girar em torno do próprio eixo: $R = 0$
- ▶ Para curvas: $V_L \neq V_R$

Modelo cinemático - Como o robô se movimenta?

Lembre-se que $v = \omega \cdot r$. Como as rodas estão sobre o mesmo eixo, o robô possui a mesma velocidade angular. Logo:

$$V_R = \omega \cdot \left(R + \frac{L}{2} \right)$$

$$V_L = \omega \cdot \left(R - \frac{L}{2} \right)$$

Modelo cinemático - Como o robô se movimenta?

Lembre-se que $v = \omega \cdot r$. Como as rodas estão sobre o mesmo eixo, o robô possui a mesma velocidade angular. Logo:

$$V_R = \omega \cdot \left(R + \frac{L}{2} \right)$$

$$V_L = \omega \cdot \left(R - \frac{L}{2} \right)$$

Atenção!!

Este ω não se refere à velocidade de giro das rodas, mas sim do robô como um sistema mecânico completo.

Modelo cinemático - Como o robô se movimenta?

Substituindo e resolvendo para ω :

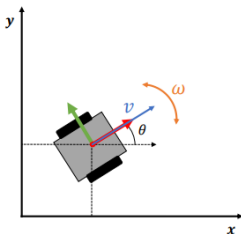
$$\omega = \frac{V_R - V_L}{L} = \frac{r \cdot (\omega_R - \omega_L)}{L}$$

$$v = \frac{V_R + V_L}{2} = \frac{r \cdot (\omega_R + \omega_L)}{2}$$

Finalmente!

Encontramos agora as velocidades do robô em função

Modelo cinemático - Como o robô se movimenta?



$$\begin{aligned}\dot{x} &= v \cos \theta \\ \dot{y} &= v \sin \theta \\ \dot{\theta} &= \omega\end{aligned}$$

Figura: Representação do modelo cinemático no plano 2D

Modelo cinemático - Como o robô se movimenta?

O modelo cinemático completo é dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos \theta / 2 & r \cos \theta / 2 \\ r \sin \theta / 2 & r \sin \theta / 2 \\ r / L & -r / L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix}$$

Conclusões

A partir de dados fornecidos pelo robô, é possível calcular a velocidade de translação e rotação do corpo.

Modelo cinemático - Como o robô se movimenta?

E se fosse ao contrário ?

Modelo cinemático - Como o robô se movimenta?

E se fosse ao contrário?

Cinemática inversa

Qual deveria ser as velocidades necessárias nas rodas para que o robô se movimente com uma determinada velocidade?

Modelo cinemático - Como o robô se movimenta?

E se fosse ao contrário?

Cinemática inversa

Qual deveria ser as velocidades necessárias nas rodas para que o robô se movimente com uma determinada velocidade?

$$\omega_R = \frac{2 \cdot v + \omega \cdot L}{2 \cdot r}$$

$$\omega_L = \frac{2 \cdot v - \omega \cdot L}{2 \cdot r}$$

Modelo cinemático - Restrições do modelo

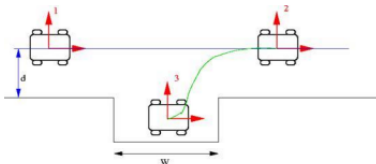
Existe uma restrição imposta ao modelo cinemático de tração diferencial:

Modelo cinemático - Restrições do modelo

Existe uma restrição imposta ao modelo cinemático de tração diferencial:

Restrição não-Holonômica

Impede a velocidade ou aceleração instantânea em certas direções.



Modelo cinemático - Outros modelos cinemáticos

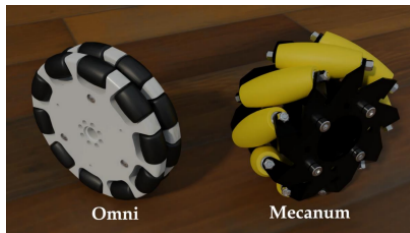


Figura: Rodas holonômicas

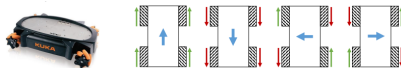


Figura: Modelo de robô holonômico

Controle cinemático

Como é possível aplicarmos as equações do modelo cinemático para controlar o nosso robô?

- ▶ Mostramos apenas o robô se movimentando
- ▶ Como podemos unir o modelo que vimos ontem com uma aplicação prática?

Controle cinemático

Hoje nós iremos estudar sobre o controle cinemático! O que é isso ?

- ▶ Para que seja possível que levemos nosso robô a um estado desejado, precisamos **controlar** o seu estado atual e o levar para o estado desejado
- ▶ Controle de manutenção vs. Controle de completude

Controle cinemático

Podemos ver o controle da seguinte forma:

$$\text{Output} = \mathbf{Controller} (\text{Input})$$

Ou de uma forma mais matemática:

$$y = h(x, u)$$

Sendo:

- ▶ y a saída do meu sistema
- ▶ x o estado atual do meu sistema
- ▶ u a entrada do meu sistema

Controle cinemático - Malha Aberta vs. Malha Fechada

Existem dois tipos de controle:



Figura: Controle de malha aberta

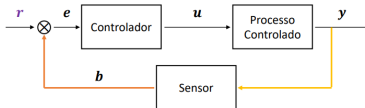


Figura: Controle de malha fechada

Controle cinemático - Controlador On & Off

Sua estratégia de controle é baseada em ligar e desligar de acordo com as medições feitas pelo sistema.

- ▶ Sensor que mede diretamente a variável de estado desejada
- ▶ Atuador que pode aumentar ou diminuir a variável de estado
- ▶ Ação constante contrária ao problema

Controle cinemático - Controlador On & Off

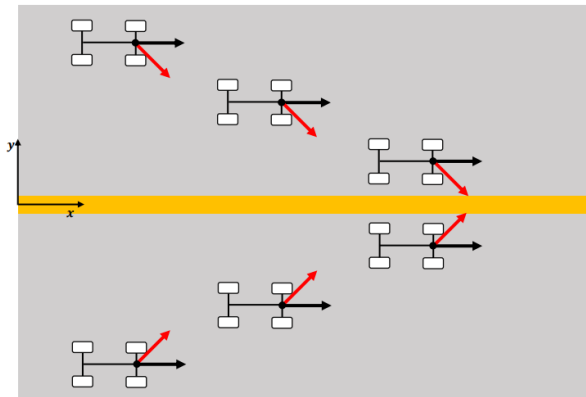


Figura: Representação da ação do controlador na cena do Coppelia

Controle cinemático

Percebe-se que este tipo de controle é muito ineficiente e não atinge a estabilidade

- Como melhorar?

Controle cinemático - Controle Proporcional

É preciso que o meu controlador atue de forma proporcional ao que o meu sensor está medindo!

Erro

Diferença entre o estado atual e o estado desejado

$$e = r - b$$

Controle cinemático - Controle Proporcional

O objetivo do nosso controlador proporcional será de minimizar este erro!

- ▶ Quanto mais o nosso erro, mais o nosso controlador deve atuar (e vice-versa!)

A entrada de controle u é dada por:

$$u = K_p \cdot e$$

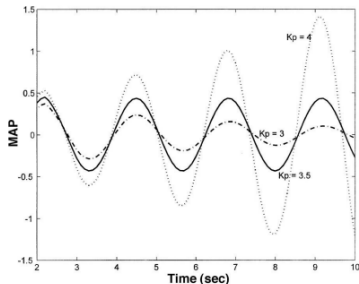
K_p é a nossa constante de proporcionalidade

Controle Cinemático - Controlador Proporcional

Surgem mais alguns problemas...

Oscilações

Pode não ser possível controlar totalmente as oscilações apenas ajustando-se o ganho proporcional.



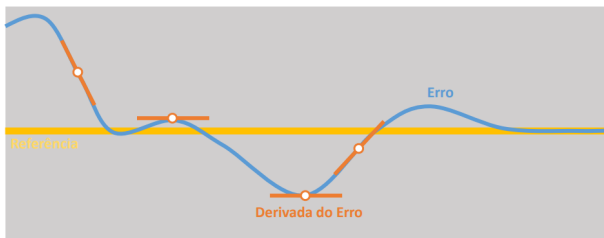
Vamos então adicionar mais um termo!

Controle Cinemático - Controlador Proporcional

Termo derivativo

Adicionaremos um novo termo na nossa entrada de controle que será responsável por dissipar esta energia acumulada do sistema.

$$u = K_p \cdot e + K_d \cdot \frac{de}{dt}$$



Controle Cinemático - Controlador Proporcional

Surge novos problemas...

Perceba que o sistema ainda não é estável

Como podemos fazer o erro convergir para zero?

Solução

Acumular (somar) o erro ao longo do tempo e então compensá-lo quando se tornar significativamente grande.

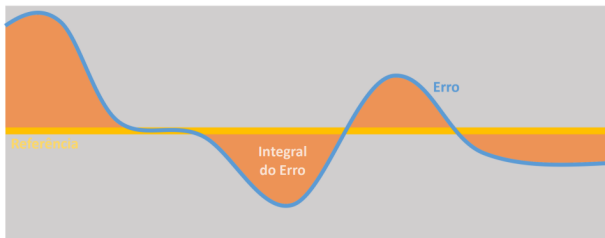
Controle Cinemático - Controlador Proporcional

Adicionar um termo que acumula o erro durante o tempo e o corrige!

► Termo integrativo

Juntando todos os termos, nossa entrada de controle é:

$$u = K_p \cdot e + K_i \cdot \int e \cdot dt + K_d \cdot \frac{de}{dt}$$



IEEE Student Branch

Controle Cinemático - Visão geral

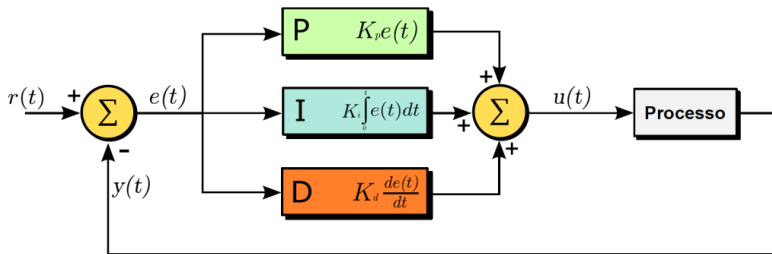


Figura: Visão geral do controlador PID

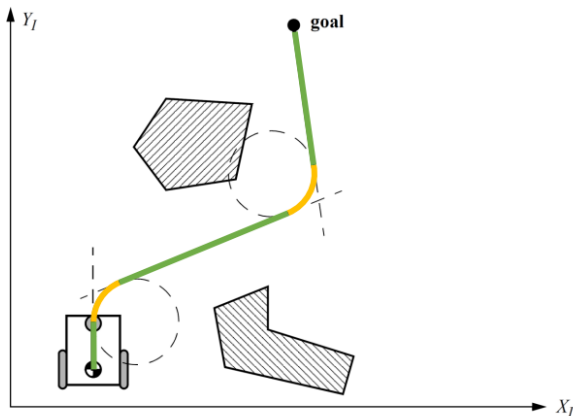
Controlador Cinemático - Controlando a pose

Como programar um controlador para levar o nosso robô de um ponto à outro ?

- Considerando um certo robô e seu modelo cinemático, o objetivo é determinar um conjunto de entradas (velocidades) apropriadas para levar ele de uma posição/configuração inicial até uma final?

Controlador Cinemático - Controlando a pose

Resolvendo este problema em malha aberta



Controlador Cinemático - Controlando a pose

Mas...

- ▶ E se o caminho fosse mais complexo?
- ▶ Não é possível calcular com precisão todos estes caminhos que o robô deverá fazer
- ▶ Desconsidera desvios e derrapagens

Controlador Cinemático - Controlando a pose

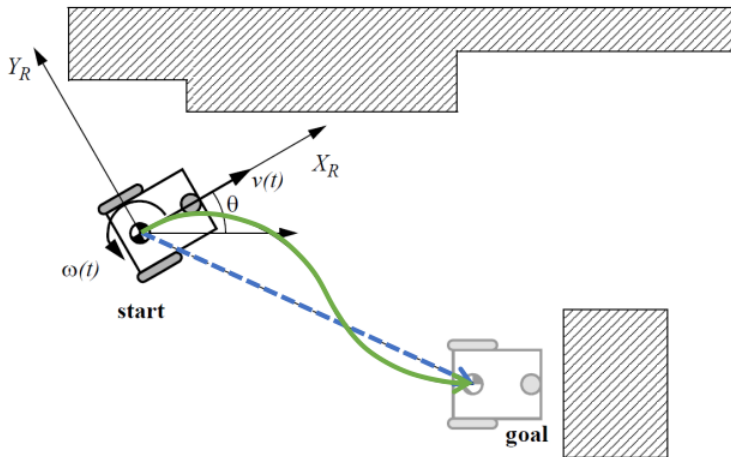


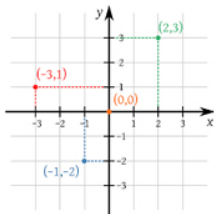
Figura: Visão Geral do nosso Problema

Controlador Cinemático - Controlando a pose

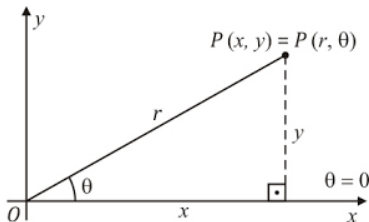
Transformação

Iremos transformar o nosso problema de coordenadas cartesianas para coordenadas polares

Coordenadas Cartesianas



Coordenadas Polares



Controlador Cinemático - Controlando a pose

Quais informações nosso controlador precisa saber?

Posição

Para decidir a velocidade do veículo

Direção

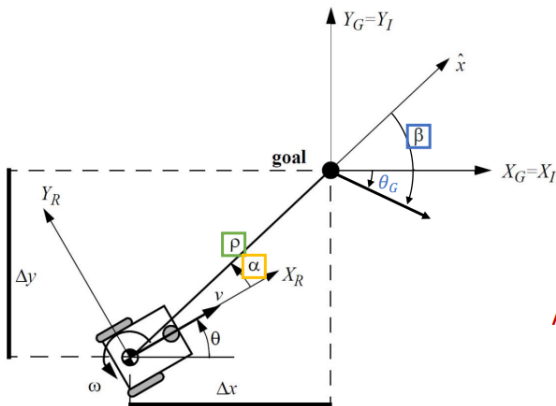
Para alinhar o veículo com a posição alvo

Orientação

Para ajustar ao ângulo final desejado

Controlador Cinemático - Controlando a pose

Seja α o ângulo entre o eixo X_R e o vetor \hat{x} que liga a origem do referencial do robô (centro do eixo) até a posição alvo.



Controlador Cinemático - Controlando a pose

Se α pertence ao intervalo de $-\frac{\pi}{2}$ até $\frac{\pi}{2}$, o erro da posição do robô no plano polar será:

$$\rho = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

$$\alpha = -\theta + \text{atan2}(\Delta x, \Delta y)$$

$$\beta = \theta_G - \text{atan2}(\Delta x, \Delta y)$$

Controlador Cinemático - Controlando a pose

Temos então a seguinte lei de controle:

$$v = K_{\rho} \cdot \rho$$

$$\omega = K_{\alpha} \cdot \alpha + K_{\beta} \cdot \beta$$

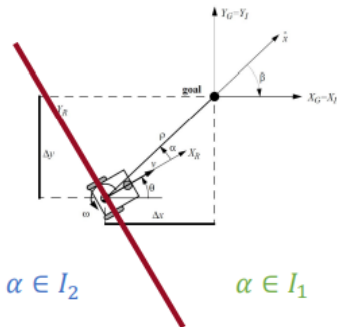
Mas lembre-se que:

$$\omega_R = \frac{2 \cdot v + \omega \cdot L}{2 \cdot r}$$

$$\omega_L = \frac{2 \cdot v - \omega \cdot L}{2 \cdot r}$$

Controlador Cinemático - Controlando a pose

E se o goal estiver átras do robô?



Redefinimos a nossa frente! $v = -v$

Obrigado!

Mateus Pincho de Oliveira
Breno Henrique Martins

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE
Capítulo Estudantil IEEE RAS UFCG

6 de junho de 2024