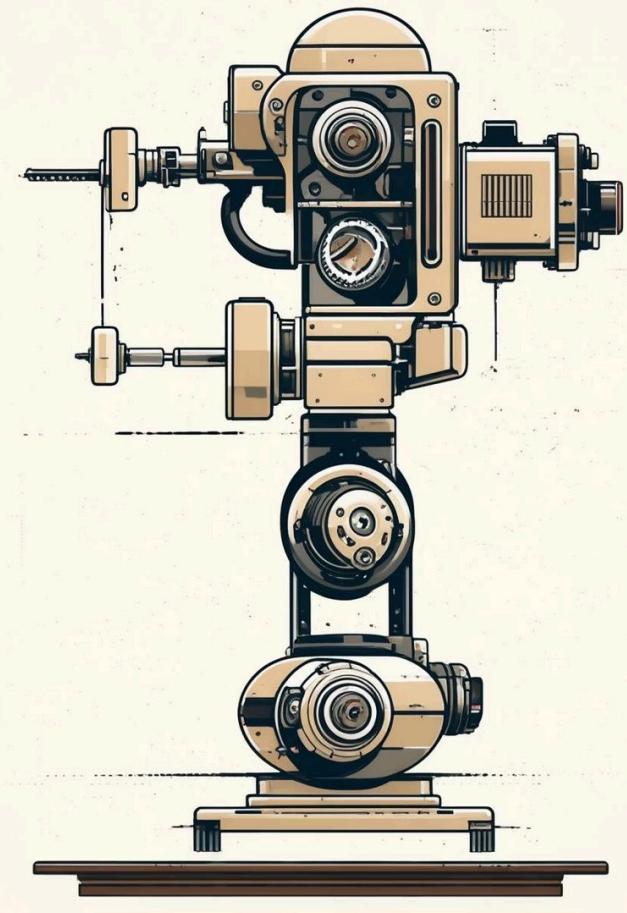


Controle de Pose em Robôs Diferenciais usando Controlador PID

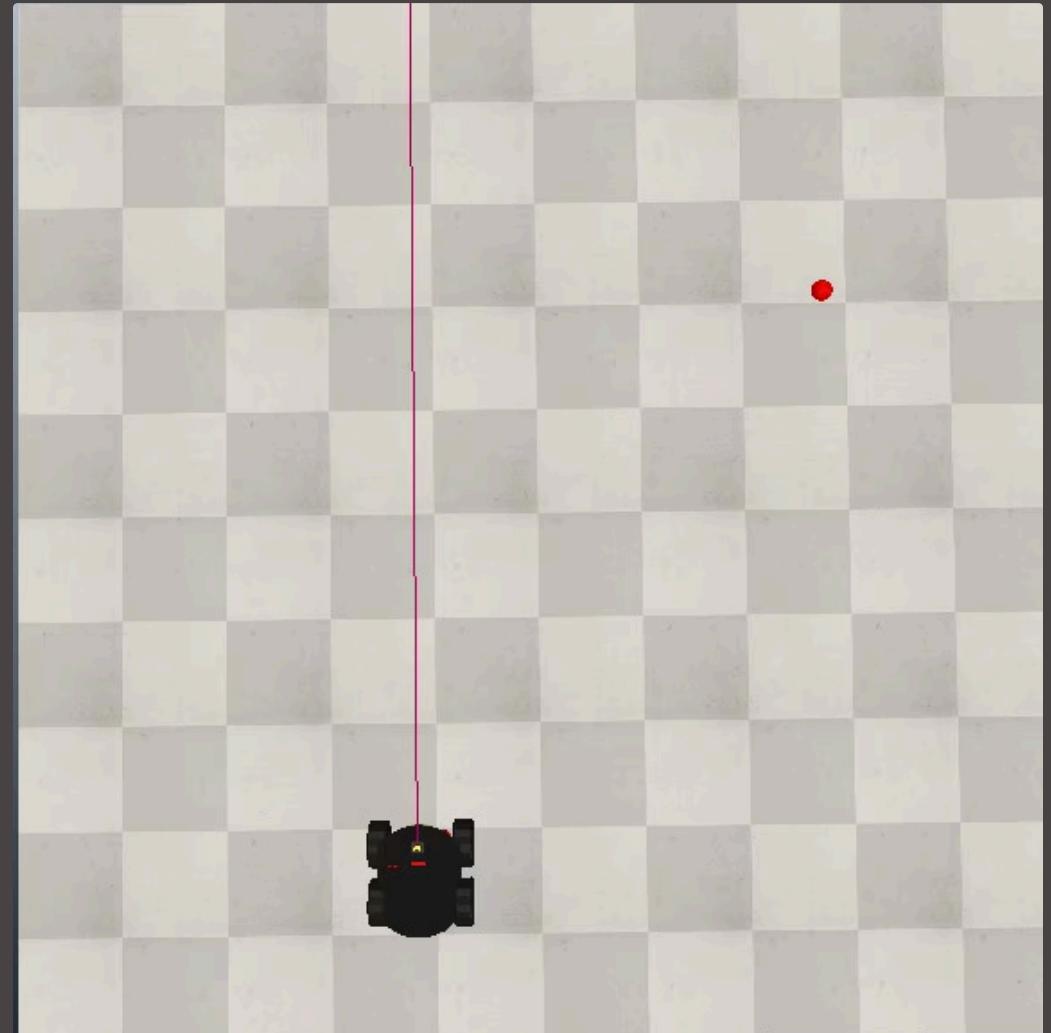
Implementação prática baseada em robôs VSSS e Pioneer



Introdução ao Controle de Pose

O controle de pose refere-se à capacidade de um robô móvel de alcançar e manter uma posição e orientação específicas no espaço. Essa pose é definida por meio de três variáveis críticas:

- **x, y:** coordenadas cartesianas que definem a posição do robô no plano
- **θ (theta):** ângulo de orientação em relação a um sistema de referência fixo



Na robótica móvel, o controle preciso de pose é fundamental para tarefas como navegação autônoma, seguimento de trajetórias, posicionamento em estações de trabalho e coordenação multi-robô. Sem um controle eficaz, o robô não consegue executar movimentos planejados nem interagir de forma confiável com seu ambiente.

Modelo Cinemático do Robô Diferencial

Configuração básica

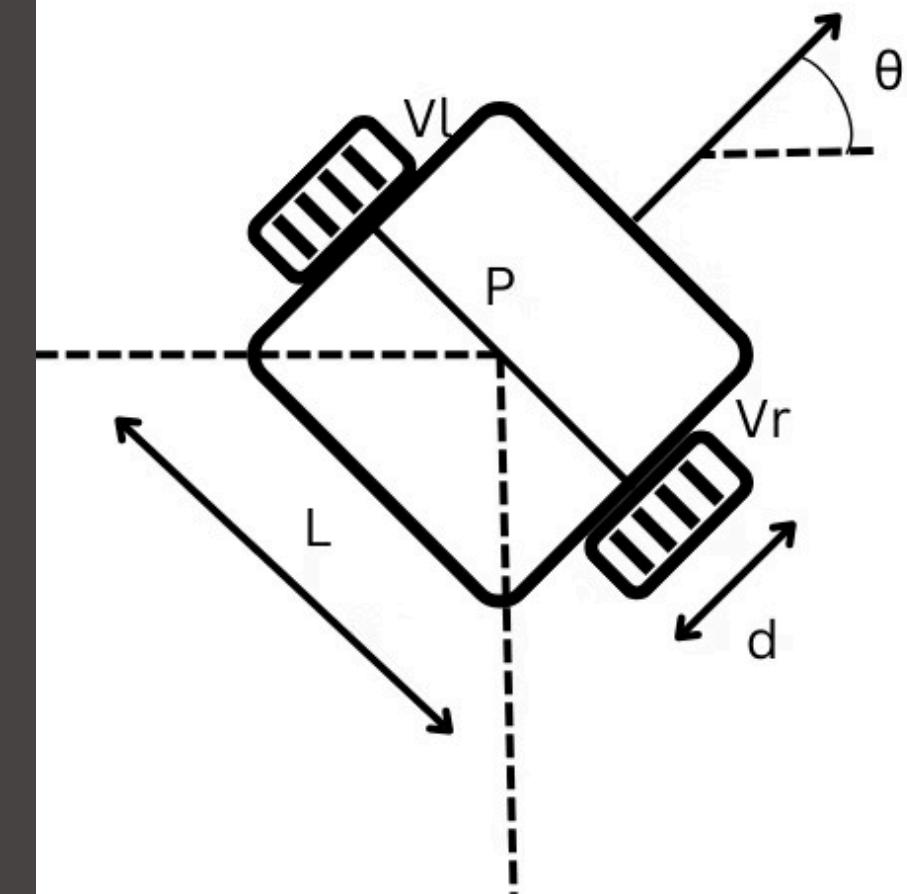
Um robô diferencial possui duas rodas independentes montadas sobre um eixo comum, cada uma controlada por seu próprio motor. Essa configuração permite o movimento através da variação das velocidades entre as rodas.

Parâmetros geométricos

L: distância entre os centros das rodas (largura do eixo). **R:** raio de cada roda. Esses parâmetros são críticos para converter velocidades de translação e rotação em comandos de motor.

Princípio de operação

Quando ambas as rodas giram à mesma velocidade, o robô avança em linha reta. Uma diferença de velocidades gera rotação em torno do centro geométrico do robô.

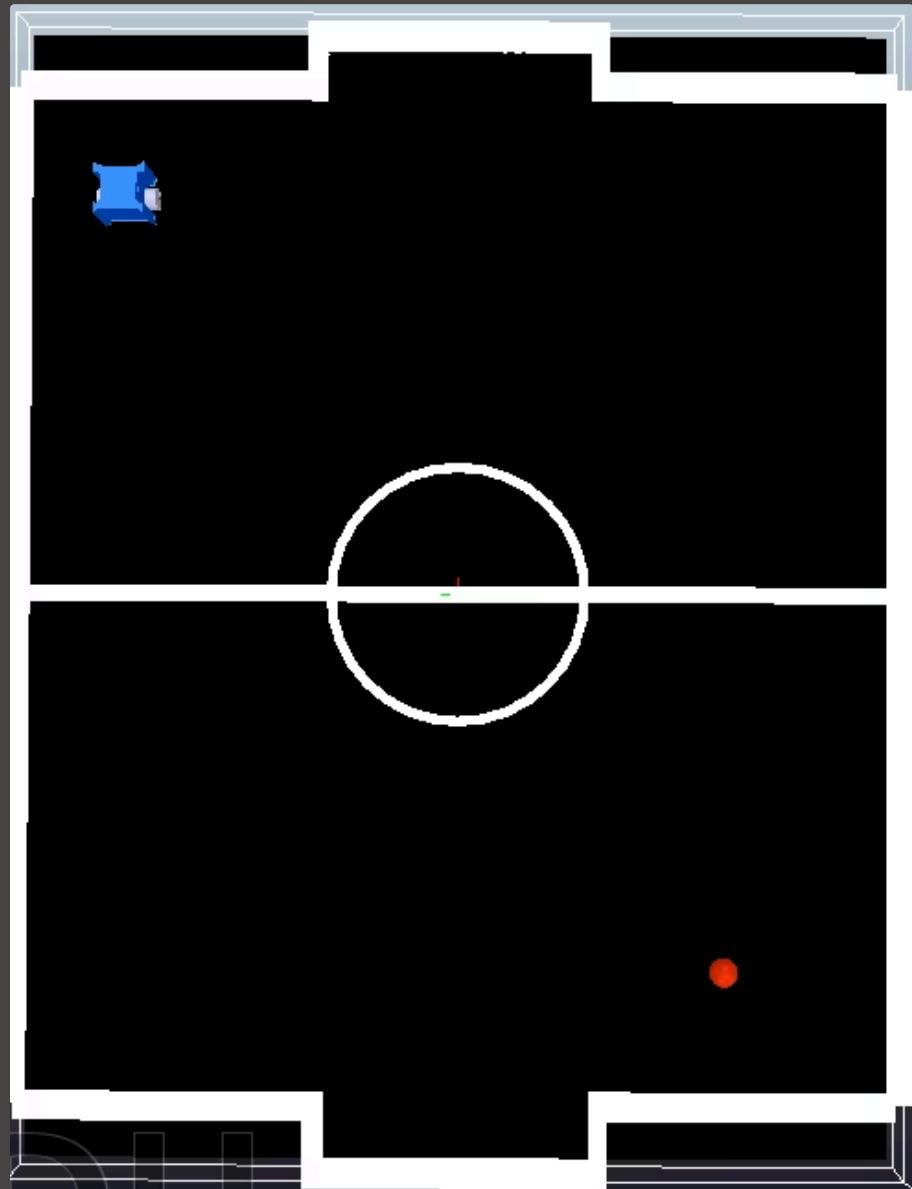


Controle PID para Erro de Pose

Erros a corrigir

O sistema de controle deve minimizar continuamente três tipos de erro:

- **Erro linear:** distância euclidiana entre a pose atual e a pose alvo
- **Erro angular:** diferença entre a orientação atual do robô e a direção para o alvo
- **Erro de orientação final:** diferença entre θ atual e θ desejado ao atingir o alvo



O controlador PID é ideal para esta aplicação porque combina resposta rápida (proporcional), eliminação de erro residual (integral) e suavidade no movimento (derivativo). Esta combinação permite que o robô converja de forma estável para a pose desejada, compensando perturbações e dinâmicas não modeladas.

Estrutura dos Controladores PID



P para velocidade linear

Gera comandos de velocidade de translação com base no erro de distância ao objetivo. Reduz a velocidade conforme o robô se aproxima para evitar ultrapassagem.

PID para velocidade angular

Controla a velocidade de rotação com base nos erros angulares. Permite ao robô orientar-se para o objetivo e alcançar a orientação final desejada.

Termo Proporcional (P)

Produz uma resposta diretamente proporcional ao erro atual. Maior erro gera maior ação corretiva.

Termo Integral (I)

Acumula o erro ao longo do tempo, eliminando desvios persistentes e erros de estado estacionário.

Termo Derivativo (D)

Prevê a tendência do erro, amortecendo oscilações e proporcionando estabilidade ao sistema.

Equações de Controle de Velocidade para Rodas

Os controladores PID geram velocidades de referência no espaço do robô (`linear_speed` e `angular_speed`). Estas devem ser convertidas em velocidades específicas para cada roda através das seguintes equações fundamentais:

Velocidade da roda direita (vr)

$$v_r = \frac{(2 \cdot \text{linear_speed}) + \text{angular_speed} \cdot L}{2 \cdot R}$$

A roda direita aumenta sua velocidade quando o robô gira para a esquerda (`angular_speed` positivo) e a diminui ao girar para a direita.

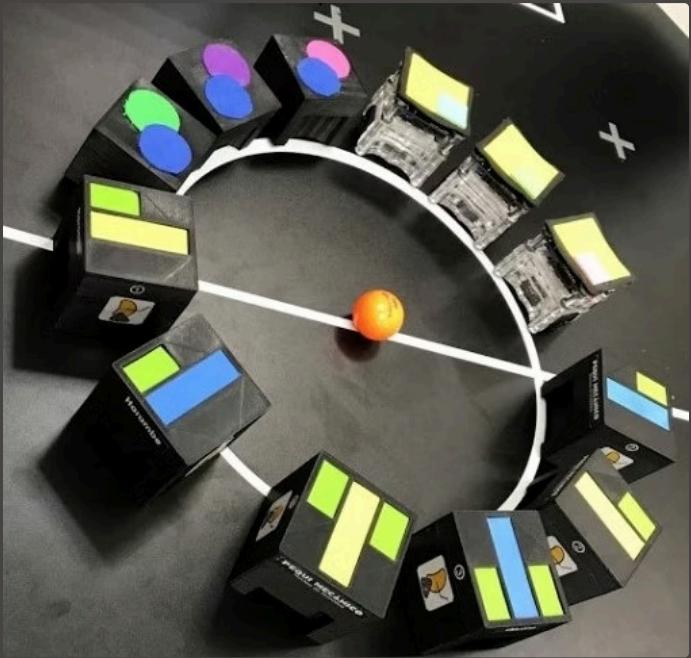
Velocidade da roda esquerda (vl)

$$v_l = \frac{(2 \cdot \text{linear_speed}) - \text{angular_speed} \cdot L}{2 \cdot R}$$

A roda esquerda diminui sua velocidade quando o robô gira para a esquerda e a aumenta ao girar para a direita, criando o torque diferencial.

- **Parâmetros chave:** L representa a distância entre os centros das rodas (largura do eixo), enquanto R é o raio de cada roda. Estes valores geométricos são específicos de cada plataforma robótica e devem ser calibrados com precisão para garantir um controle exato.

Robôs Utilizados na Implementação

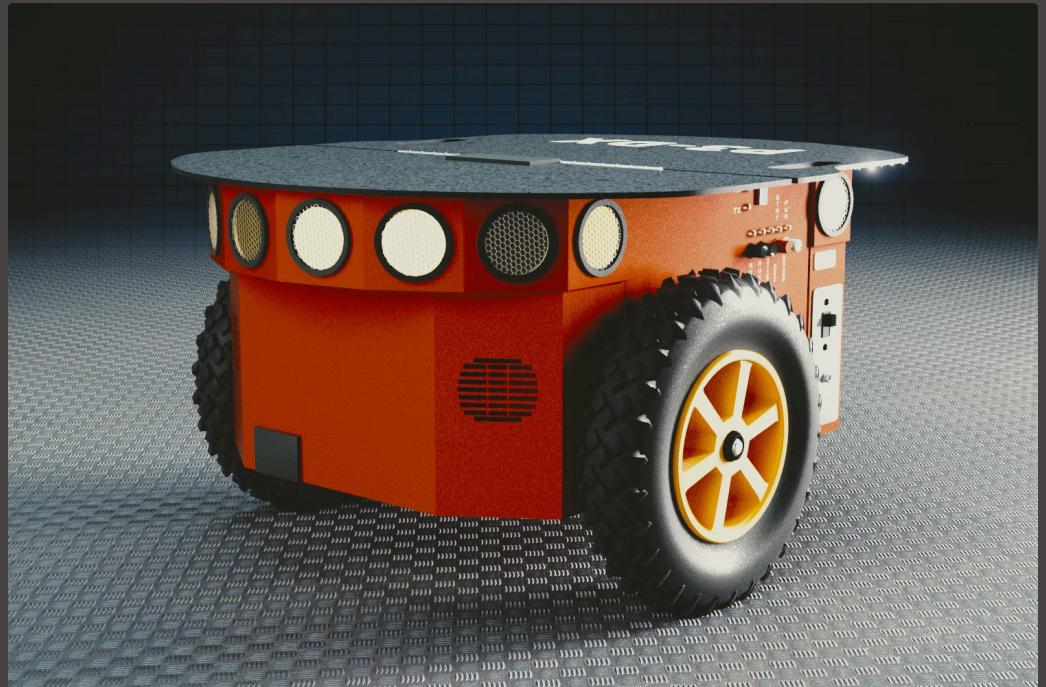


Robôs VSSS

Os robôs da categoria Very Small Size Soccer são plataformas compactas projetadas para competições de futebol robótico. Principais características:

- Dimensões reduzidas (≈ 8 cm de diâmetro)
- Configuração diferencial de 2 rodas
- Alta manobrabilidade e velocidade
- Ideais para validar algoritmos de controle em tempo real

Ambas as plataformas permitem demonstrar a versatilidade do controlador PID, adaptando-se a diferentes escalas e dinâmicas mediante ajuste de parâmetros.



Robô Pioneer

O Pioneer é uma plataforma móvel de pesquisa amplamente utilizada em laboratórios acadêmicos. Características:

- Configuração de 2 ou 4 rodas com tração diferencial
- Maior estabilidade e capacidade de carga
- Sensores integrados e arquitetura modular
- Excelente para testes de algoritmos robustos

Integração do PID com o Modelo Diferencial

01

Cálculo de erros

O sistema calcula continuamente os erros de posição, orientação e distância entre a pose atual e a pose objetivo desejada.

02

Processamento PID

Cada controlador PID (linear e angular) processa seu respectivo erro aplicando os ganhos proporcional, integral e derivativo calibrados.

03

Geração de velocidades

Os PIDs produzem os sinais de controle: **linear_speed** (velocidade de translação) e **angular_speed** (velocidade de rotação).

04

Conversão cinemática

As velocidades são convertidas em comandos específicos para cada roda (vr e vl) usando as equações diferenciais que consideram os parâmetros L e R .

05

Execução de comandos

Os motores de cada roda recebem suas consignas de velocidade, executando o movimento coordenado que aproxima o robô da pose objetivo.

Resultados e Comportamento do Sistema



Rastreamento de trajetória

O robô converge suavemente para a pose objetivo, demonstrando a característica redução progressiva do erro típica do controle PID bem ajustado.



Convergência ao objetivo

Os gráficos de erro vs. tempo mostram uma diminuição exponencial sem oscilações excessivas, indicando parâmetros PID adequadamente ajustados.

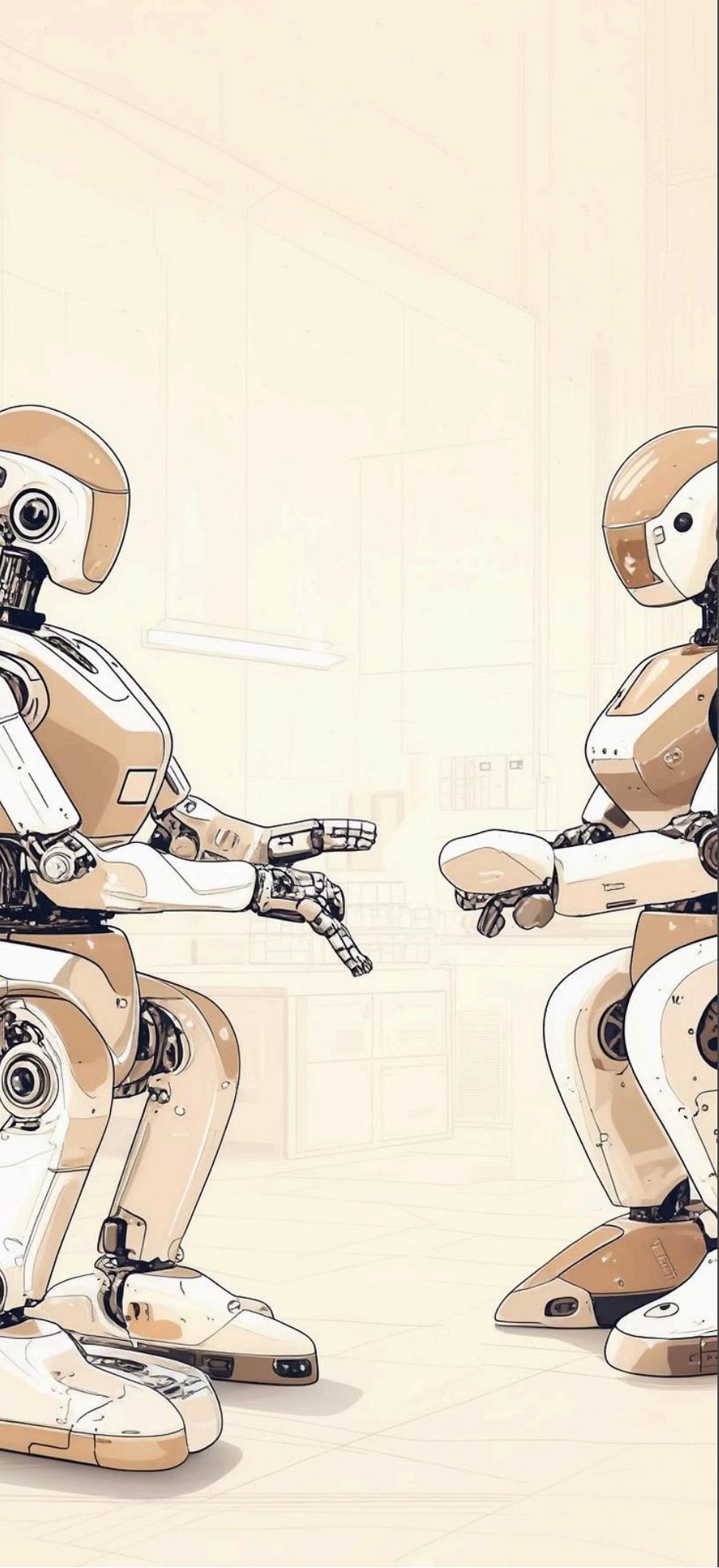
Vantagens observadas

- Movimentos suaves sem mudanças bruscas de direção
- Capacidade de compensar perturbações externas
- Precisão no posicionamento final
- Tempo de estabelecimento previsível

Desafios de ajuste

- Requer calibração específica para cada robô
- Equilíbrio entre velocidade de resposta e estabilidade
- Sensibilidade a variações na superfície de rolagem

Conclusões e Referências



Eficácia comprovada

O controle PID demonstra ser uma solução robusta e prática para o controle de pose em robôs diferenciais, aplicável a diversas escalas e configurações.



Implementação acessível

A simplicidade conceitual do PID e sua integração direta com o modelo cinemático diferencial facilitam a implementação em sistemas embarcados com recursos limitados.



Versatilidade demonstrada

Validado com sucesso em plataformas VSSS e Pioneer, a abordagem é adaptável mediante ajuste de parâmetros a diferentes dinâmicas e requisitos de desempenho.

Fundamentação acadêmica: Todo o conteúdo apresentado é baseado no curso do Georgia Tech sobre controle de robôs móveis, disponível na seguinte lista de reprodução:

Control of Mobile Robots - Georgia Tech