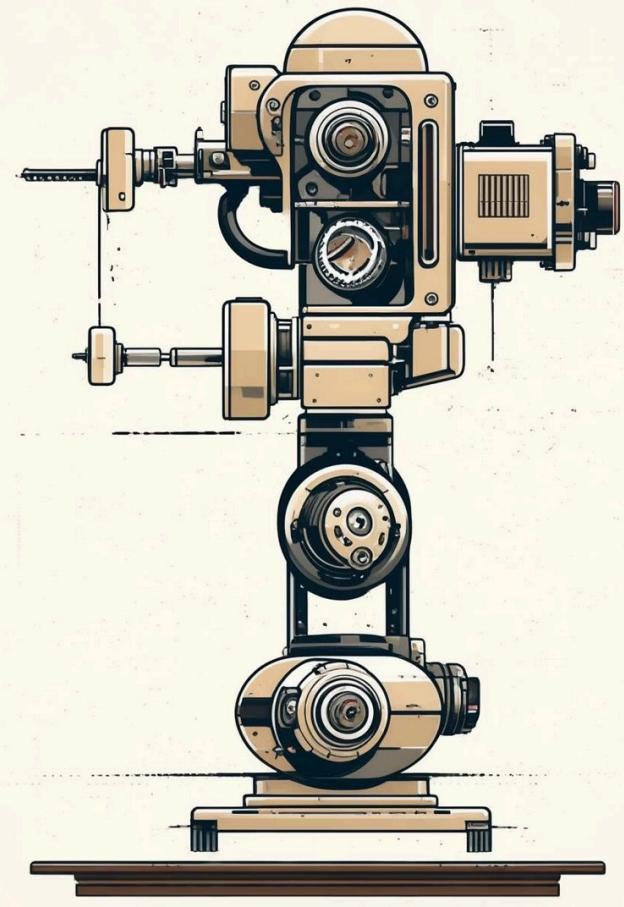


Control de Pose en Robots Diferenciales usando Controlador PID

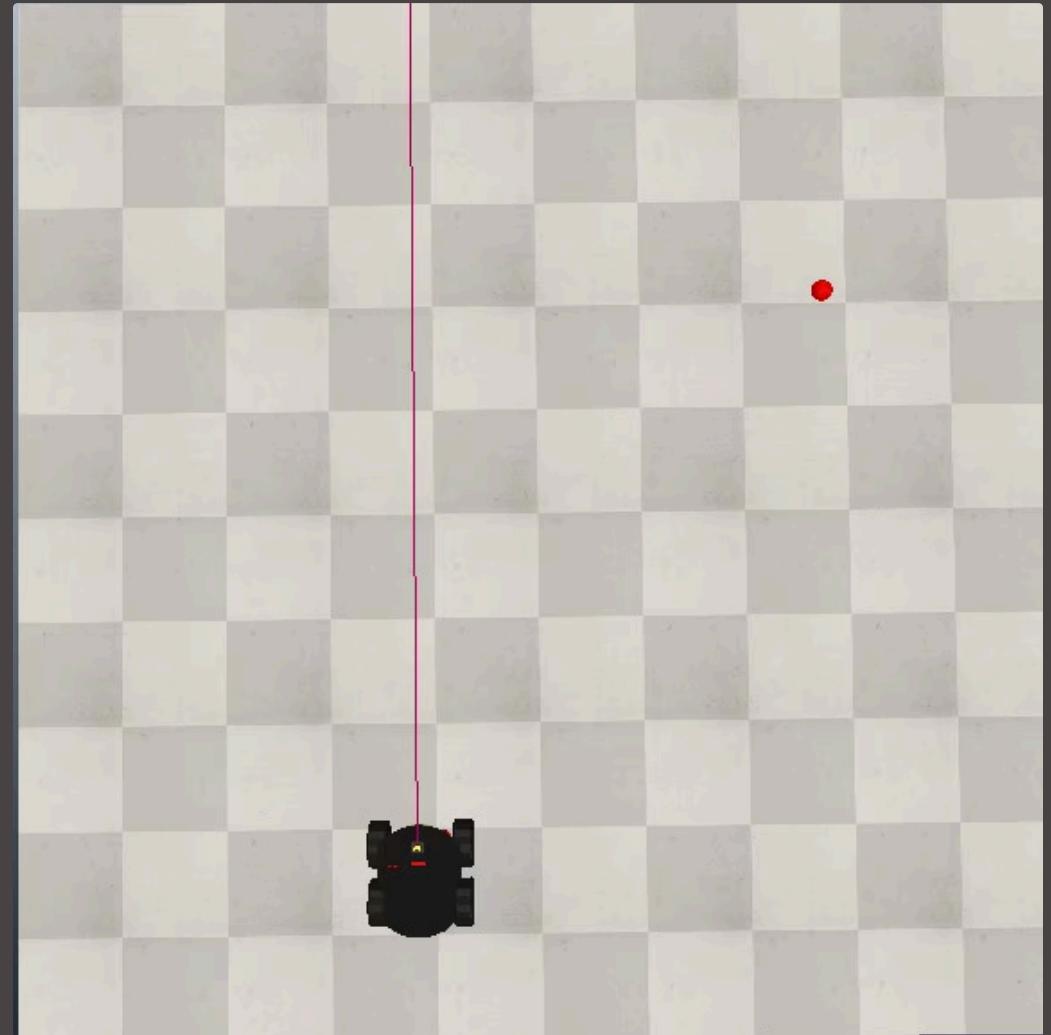
Implementación práctica basada en robots VSSS y Pioneer



Introducción al Control de Pose

El control de pose se refiere a la capacidad de un robot móvil para alcanzar y mantener una posición y orientación específica en el espacio. Esta pose se define mediante tres variables críticas:

- **x, y:** coordenadas cartesianas que definen la posición del robot en el plano
- **θ (theta):** ángulo de orientación respecto a un sistema de referencia fijo



En robótica móvil, el control preciso de pose es fundamental para tareas como navegación autónoma, seguimiento de trayectorias, posicionamiento en estaciones de trabajo y coordinación multi-robot. Sin un control efectivo, el robot no puede ejecutar movimientos planificados ni interactuar de manera confiable con su entorno.

Modelo Cinemático del Robot Diferencial

Configuración básica

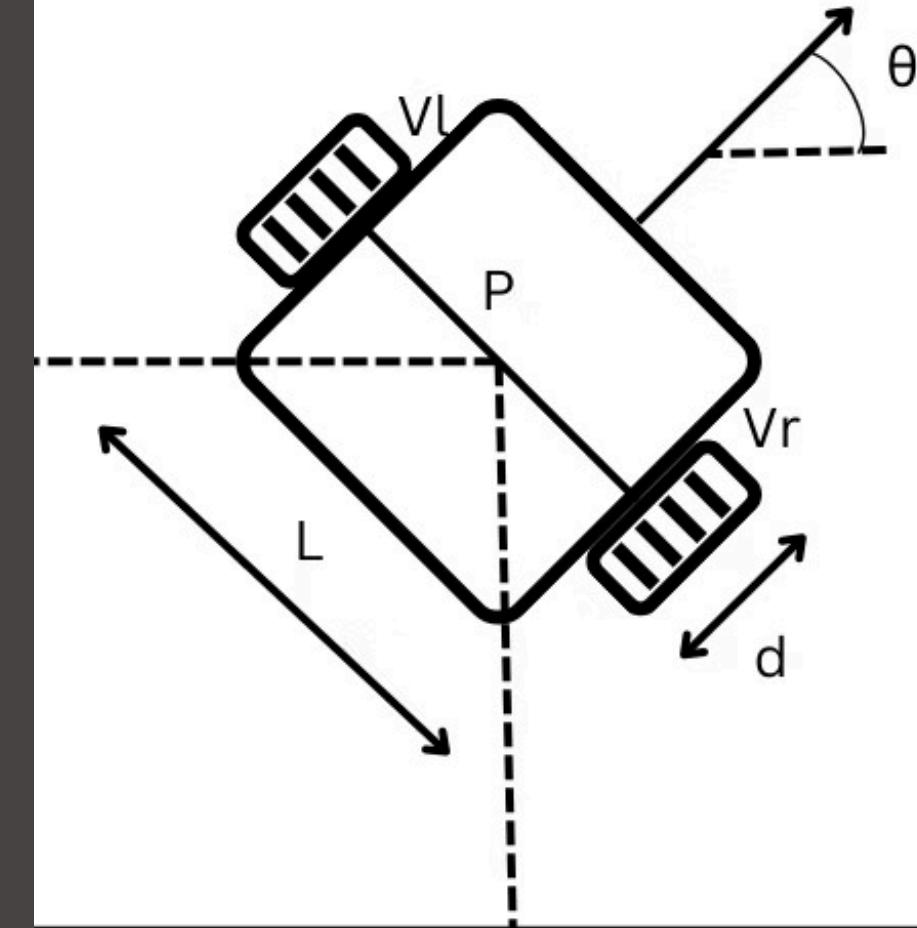
Un robot diferencial posee dos ruedas independientes montadas sobre un eje común, cada una controlada por su propio motor. Esta configuración permite movimiento mediante la variación de velocidades entre ruedas.

Parámetros geométricos

L: distancia entre centros de las ruedas (ancho del eje). **R:** radio de cada rueda. Estos parámetros son críticos para convertir velocidades de traslación y rotación en comandos de motor.

Principio de operación

Cuando ambas ruedas giran a la misma velocidad, el robot avanza en línea recta. Una diferencia de velocidades genera rotación alrededor del centro geométrico del robot.

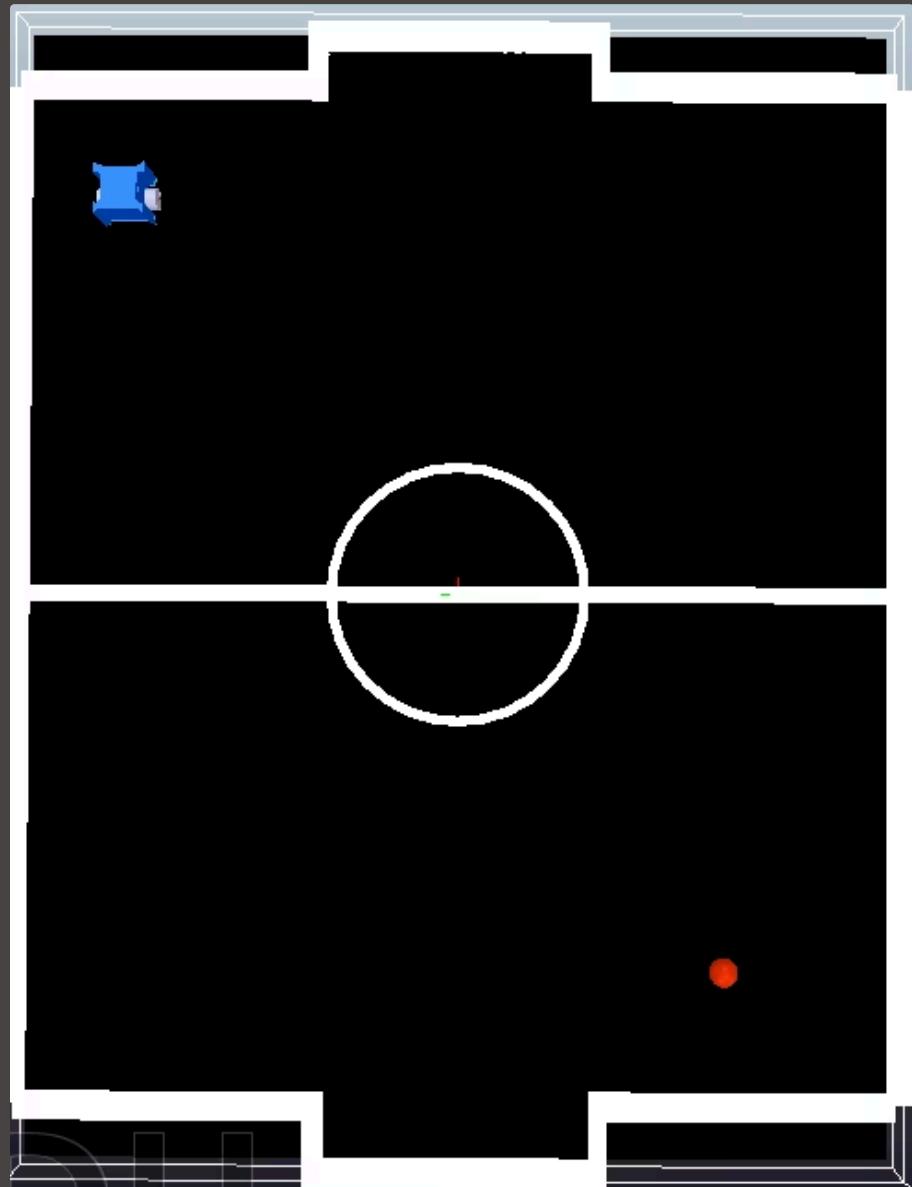


Control PID para Error en Pose

Errores a corregir

El sistema de control debe minimizar continuamente tres tipos de error:

- **Error lineal:** distancia euclídea entre la pose actual y la pose objetivo
- **Error angular:** diferencia entre la orientación actual del robot y la dirección hacia el objetivo
- **Error de orientación final:** diferencia entre θ actual y θ deseado al alcanzar el objetivo



El controlador PID es ideal para esta aplicación porque combina respuesta rápida (proporcional), eliminación de error residual (integral) y suavidad en el movimiento (derivativo). Esta combinación permite al robot converger de manera estable hacia la pose deseada, compensando perturbaciones y dinámicas no modeladas.

Estructura de los Controladores PID

P para velocidad lineal

Genera comandos de velocidad de traslación basándose en el error de distancia al objetivo. Reduce la velocidad conforme el robot se aproxima para evitar sobrepaso.

PID para velocidad angular

Controla la velocidad de rotación basándose en los errores angulares. Permite al robot orientarse hacia el objetivo y alcanzar la orientación final deseada.

Término Proporcional (P)

Produce una respuesta directamente proporcional al error actual. Mayor error genera mayor acción correctiva.

Término Integral (I)

Acumula el error a lo largo del tiempo, eliminando desviaciones persistentes y errores de estado estacionario.

Término Derivativo (D)

Predice la tendencia del error, amortiguando oscilaciones y proporcionando estabilidad al sistema.

Ecuaciones de Control de Velocidad para Ruedas

Los controladores PID generan velocidades de referencia en el espacio del robot (`linear_speed` y `angular_speed`). Estas deben convertirse en velocidades específicas para cada rueda mediante las siguientes ecuaciones fundamentales:

Velocidad rueda derecha (vr)

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

La rueda derecha aumenta su velocidad cuando el robot gira hacia la izquierda (`angular_speed` positivo), y la disminuye al girar hacia la derecha.

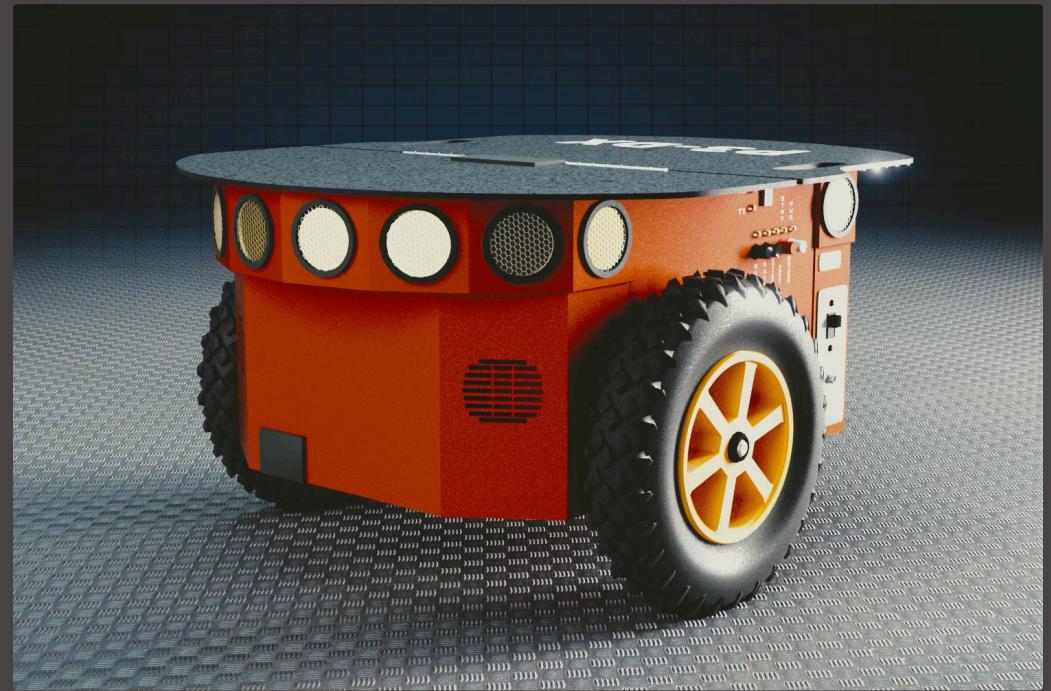
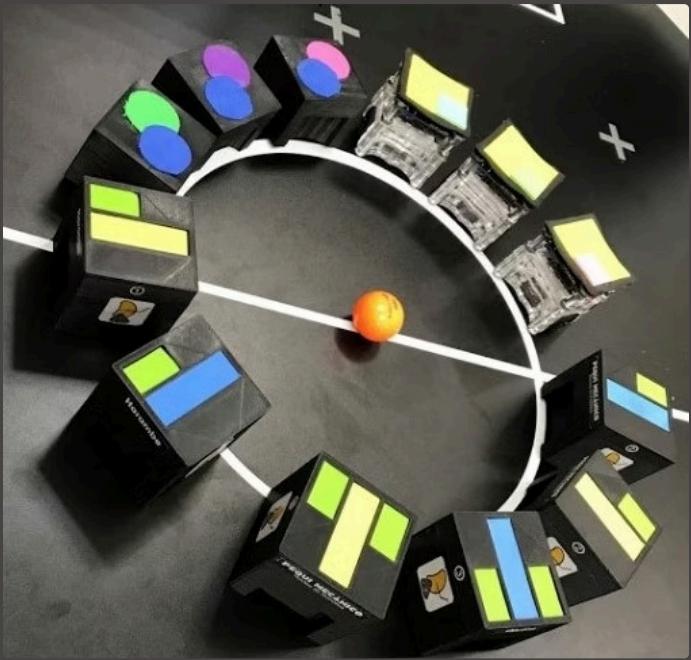
Velocidad rueda izquierda (vl)

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

La rueda izquierda disminuye su velocidad cuando el robot gira hacia la izquierda, y la aumenta al girar hacia la derecha, creando el par diferencial.

- **Parámetros clave:** L representa la distancia entre los centros de las ruedas (ancho del eje), mientras que R es el radio de cada rueda. Estos valores geométricos son específicos de cada plataforma robótica y deben calibrarse con precisión para garantizar un control exacto.

Robots Utilizados en la Implementación



Robots VSSS

Los robots de la categoría Very Small Size Soccer son plataformas compactas diseñadas para competencias de fútbol robótico. Características principales:

- Dimensiones reducidas (≈ 8 cm de diámetro)
- Configuración diferencial de 2 ruedas
- Alta maniobrabilidad y velocidad
- Ideales para validar algoritmos de control en tiempo real

Ambas plataformas permiten demostrar la versatilidad del controlador PID, adaptándose a diferentes escalas y dinámicas mediante ajuste de parámetros.

Robot Pioneer

El Pioneer es una plataforma móvil de investigación ampliamente utilizada en laboratorios académicos.

Características:

- Configuración de 2 o 4 ruedas con tracción diferencial
- Mayor estabilidad y capacidad de carga
- Sensores integrados y arquitectura modular
- Excelente para pruebas de algoritmos robustos

Integración del PID con el Modelo Diferencial

01

Cálculo de errores

El sistema calcula continuamente los errores de posición, orientación y distancia entre la pose actual y la pose objetivo deseada.

02

Procesamiento PID

Cada controlador PID (lineal y angular) procesa su error respectivo aplicando las ganancias proporcional, integral y derivativa calibradas.

03

Generación de velocidades

Los PIDs producen las señales de control: **linear_speed** (velocidad de traslación) y **angular_speed** (velocidad de rotación).

04

Conversión cinemática

Las velocidades se convierten en comandos específicos para cada rueda (vr y vl) usando las ecuaciones diferenciales que consideran los parámetros L y R .

05

Ejecución de comandos

Los motores de cada rueda reciben sus consignas de velocidad, ejecutando el movimiento coordinado que aproxima al robot a la pose objetivo.

Resultados y Comportamiento del Sistema



Seguimiento de trayectoria

El robot converge suavemente hacia la pose objetivo, mostrando la característica reducción progresiva del error típica del control PID bien sintonizado.



Convergencia al objetivo

Los gráficos de error vs. tiempo muestran disminución exponencial sin oscilaciones excesivas, indicando parámetros PID adecuadamente ajustados.

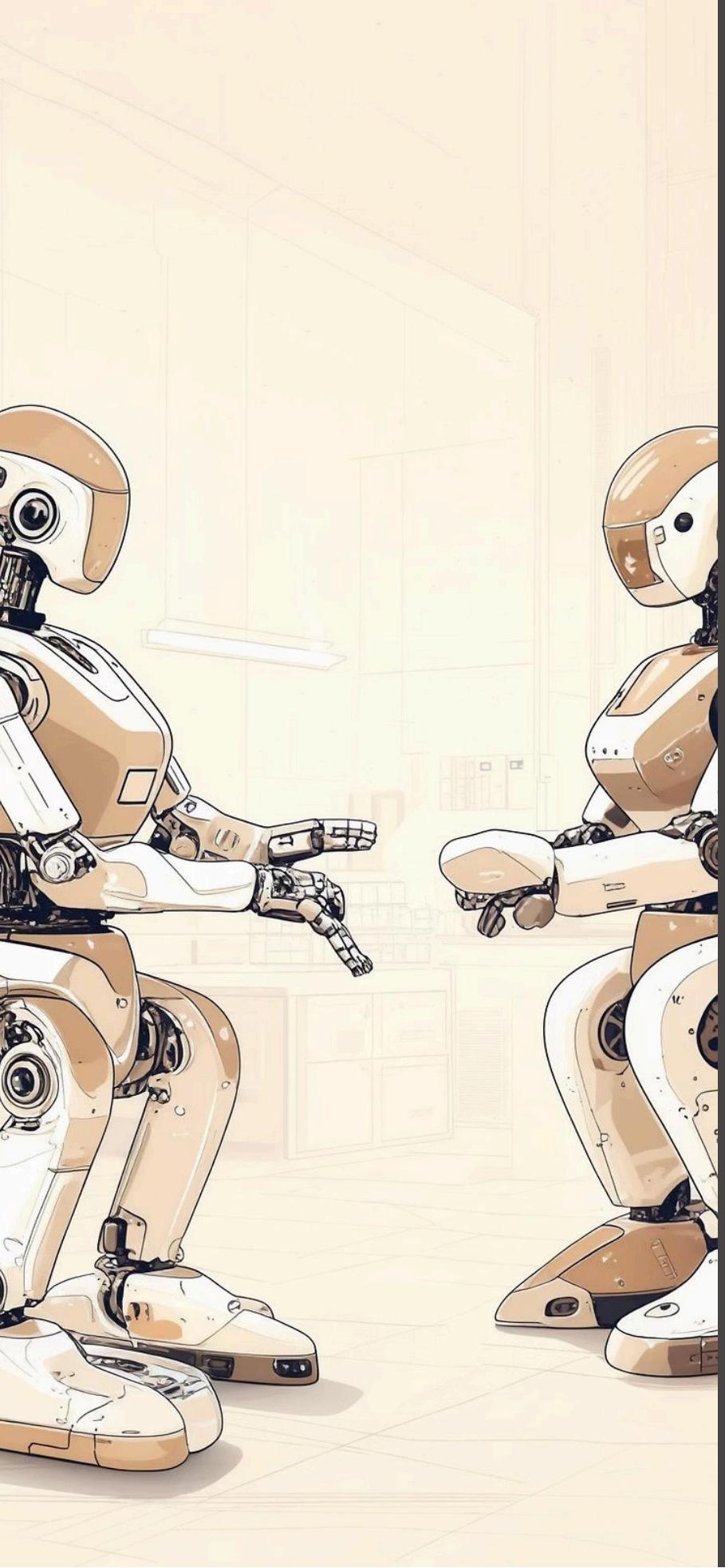
Ventajas observadas

- Movimientos suaves sin cambios bruscos de dirección
- Capacidad de compensar perturbaciones externas
- Precisión en el posicionamiento final
- Tiempo de establecimiento predecible

Desafíos del ajuste

- Requiere calibración específica para cada robot
- Balance entre velocidad de respuesta y estabilidad
- Sensibilidad a variaciones en superficie de rodadura

Conclusiones y Referencias



Efectividad comprobada

El control PID demuestra ser una solución robusta y práctica para el control de pose en robots diferenciales, aplicable a diversas escalas y configuraciones.



Implementación accesible

La simplicidad conceptual del PID y su integración directa con el modelo cinemático diferencial facilitan la implementación en sistemas embebidos con recursos limitados.



Versatilidad demostrada

Validado exitosamente en plataformas VSSS y Pioneer, el enfoque es adaptable mediante ajuste de parámetros a diferentes dinámicas y requisitos de desempeño.

Fundamentación académica: Todo el contenido presentado está basado en el curso de Georgia Tech sobre control de robots móviles, disponible en la siguiente lista de reproducción:

Control of Mobile Robots - Georgia Tech