

UFMG
UNIVERSIDADE FEDERAL
DE MINAS GERAIS

Introdução à Robótica

Controle

Prof. Douglas G. Macharet
douglas.macharet@dcc.ufmg.br

DCC
VER. 1.0
DEPARTAMENTO DE
CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Introdução

- Controle de robôs móveis
 - Assunto para um semestre inteiro
- Teoria de controle
 - Assunto para vários semestres
 - Engenharia de Controle e Automação
- Serão abordados os principais tópicos

DCC UFMG

Introdução à Robótica - Controle 2

Introdução

- Tarefas definidas por metas (goals)
 - Conceito de completude
 - Ir até uma determinada posição
 - Conceito de manutenção
 - Mover-se a 0,5 m/s

DCC UFMG

Introdução à Robótica - Controle 3

Introdução

Controle

- Geralmente para tarefas de baixo-nível
 - Principalmente em metas de manutenção
- Noções gerais

output = Controller(input)

 - Output: sinal de controle (tensão do motor)
 - Input: estado desejado / erro (velocidade)

DCC UFMG

Introdução à Robótica - Controle 4

Introdução

Controle

- Baixo nível
 - Qual tensão deve ser aplicada ao motor de forma a obter uma velocidade angular ω ?
- Alto nível
 - Controle cinemático
 - Qual o conjunto de entradas (velocidades) que levam o robô de uma posição inicial a uma final?

DCC UFMG

Introdução à Robótica - Controle 5

Controle

Conceitos básicos

- Considere um sistema dinâmico dado por

$$\dot{x} = f(x, u)$$

$$y = h(x, u)$$
 - x : representa o estado do sistema
 - u : representa as entradas do sistema
 - y : representa as saídas do sistema

DCC UFMG

Introdução à Robótica - Controle 6

Controle

Conceitos básicos

- Sistema dinâmico

$$\dot{x} = f(x, u) \quad \leftarrow \text{Sistema}$$

$$y = h(x, u) \quad \leftarrow \text{Observação}$$

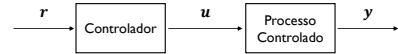
- Formas gerais de controle

- Malha aberta
- Malha fechada

Controle

Malha aberta

- Open-loop, Feedforward
- O resultado das ações de controle não é considerado (realimentado) no sistema



- Não se adapta a mudanças no sistema

Controle

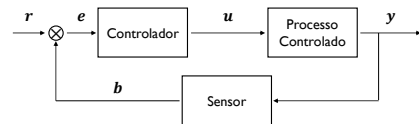
Malha aberta

- Movimentar o robô um metro para frente
 - Aplicar uma velocidade de 0,25 m/s durante 4s
- E a incertezas relacionadas?
 - Atuadores
 - Ambiente

Controle

Malha fechada

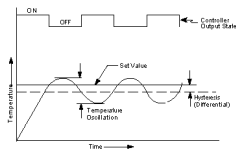
- Closed-loop, Feedback
- O resultado das ações de controle é considerado (realimentado) no sistema



Controle

Malha fechada – On/Off

- Sistemas simples e eficazes
 - Liga/Desliga de acordo com a medição
 - Mudanças bruscas/Oscilações



Controle

Malha fechada – Cálculo do erro

- Objetivo é a minimização do erro
 - Possível apenas com a utilização de sensores
 - Diferença entre o valor atual e o valor desejado
 - Valor atual → Valor medido pelo sensor
 - $e = r - b$
 - Tipos de informação
 - Zero/Não-zero, Magnitude, Direção, ...

Controle

Malha fechada – Tipos clássicos de controle

- Proporcional (P)
- Proporcional-Derivativo (PD)
- Proporcional-Integral (PI)
- Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

Controle

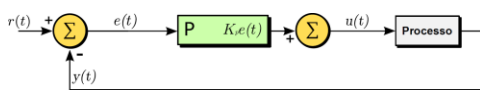
Malha fechada – Proporcional (P)

- Atua de forma proporcional ao erro
 - Quanto maior a distância para o estado alvo, mais forte será a resposta do controlador
- A entrada de controle é dada por

$$u = K_p \cdot e$$
 - K_p é o ganho proporcional
 - O ganho possui grande impacto no desempenho

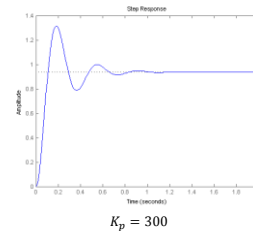
Controle

Malha fechada – Proporcional (P)



Controle

Malha fechada – Proporcional (P)



Controle

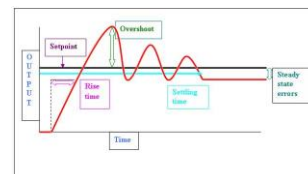
Malha fechada – Proporcional (P)

- Maneiras de determinar o ganho
 - Analítica: Exige um grande entendimento do sistema e caracterização matemática
 - Empírica: Demanda que o sistema passe por uma extensiva bateria de experimentos
 - Automática: Ajustado durante a própria execução do sistema

Controle

Malha fechada – Proporcional (P)

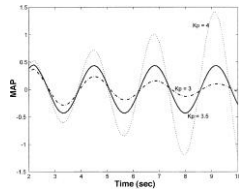
- Principais problemas
 - Ganho baixo: Steady State Error



Controle

Malha fechada – Proporcional (P)

- Principais problemas
 - Ganho alto: Oscilações



Controle

Malha fechada – Proporcional (P)

- Como resolver esses problemas?
 - Pode não ser possível controlar a oscilação apenas variando-se o ganho proporcional
 - Adicionar um novo termo, responsável por “dissipar a energia”, fazendo o sistema convergir
- Amortecimento (damping)
 - Proporcional à derivada do erro

Controle

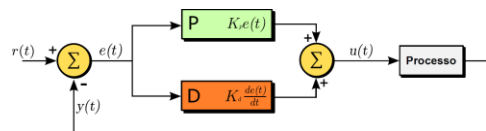
Malha fechada – Proporcional-Derivativo (PD)

- Possui um termo proporcional e um termo derivativo que irá prover o amortecimento
- A entrada de controle é dada por

$$u = K_p \cdot e + K_d \cdot de/dt$$
 - K_d é o ganho derivativo
- Os ganhos devem ser escolhidos juntos

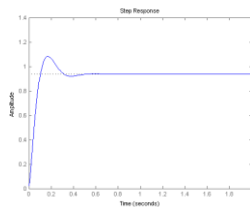
Controle

Malha fechada – Proporcional-Derivativo (PD)



Controle

Malha fechada – Proporcional-Derivativo (PD)



$$K_p = 300, K_d = 10$$

Controle

Malha fechada – Proporcional-Derivativo (PD)

- E o Steady State Error?
 - O erro acumulado persiste
- Solução
 - Somar os erros e então compensá-los quando esses se tornarem significativamente grande
 - Integral do erro

Controle

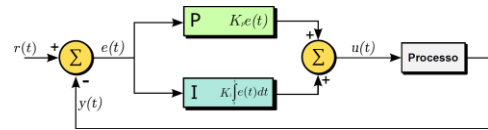
Malha fechada – Proporcional-Integral (PI)

- Possui um termo proporcional e um termo integral que reduz o erro acumulado
- A entrada de controle é dada por

$$u = K_p \cdot e + K_i \cdot \int e \, dt$$
 - K_i é o ganho integral
- Os ganhos devem ser escolhidos juntos

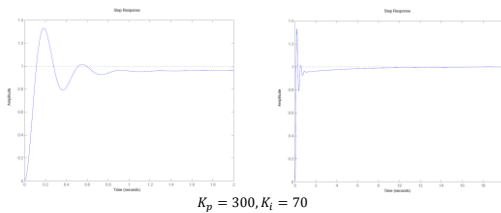
Controle

Malha fechada – Proporcional-Integral (PI)



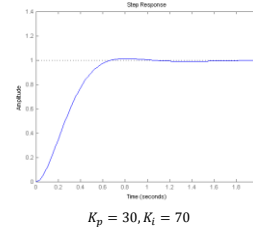
Controle

Malha fechada – Proporcional-Integral (PI)


 $K_p = 300, K_i = 70$

Controle

Malha fechada – Proporcional-Integral (PI)


 $K_p = 30, K_i = 70$

Controle

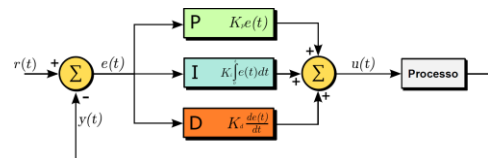
Malha fechada – Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

- Combinação dos três termos
- A entrada de controle é dada por

$$u = K_p \cdot e + K_i \cdot \int e \, dt + K_d \cdot de/dt$$
- Os ganhos devem ser escolhidos juntos
 - Tarefa bem mais complicada!

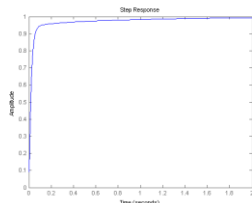
Controle

Malha fechada – Proporcional-Integral-Derivativo (PID)



Controle

Malha fechada – Proporcional-Integral-Derivativo (PID)



$$K_p = 350, K_i = 300, K_d = 50$$

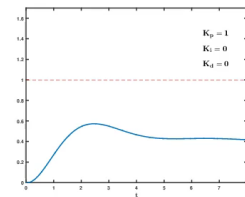
Controle

Malha fechada – Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

Parâmetro	Rise Time	Overshoot	Settling Time	Steady State
K_p	Diminui	Aumenta	Imperceptível	Diminui
K_i	Diminui	Aumenta	Aumenta	Elimina
K_d	Imperceptível	Diminui	Diminui	Nenhuma

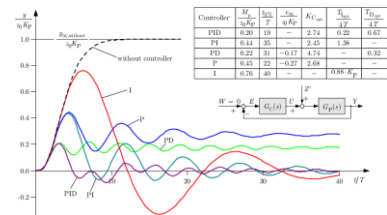
Controle

Malha fechada – Proporcional-Integral-Derivativo (PID)



Controle

Comparação



Controle

Utilização

Controller	Estimates	When to use	Examples
P	Present	Systems with slow response, systems tolerant to offset.	Float valves, thermostats, humidistat
I	Back	Not often used alone, as it is too slow	used for very noisy systems
D	Forward	Not used alone because it is too sensitive to noise and does not have set point	None
PI	Present & back	Often used	Thermostats, flow control, pressure control
PID	All time	Often used, most robust, but can be noise sensitive	Cases where the system has inertia that could get out of hand: i.e. temperature and concentration measurements on a reactor to avoid runaway.