

Introdução à Robótica

Controle (1/2)

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

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

Introdução

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



Introdução

Controle

- Geralmente para tarefas de baixo-nível
 - Principalmente em metas de manutenção
- Noções gerais
$$\text{output} = \text{Controller}(\text{input})$$
 - Output: sinal de controle (tensão do motor)
 - Input: estado desejado / erro (velocidade)



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?



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



Controle

Conceitos básicos

- Sistema dinâmico

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

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

- Formas gerais de controle

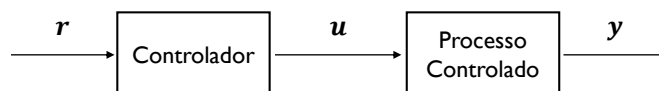
- Malha aberta
- Malha fechada



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

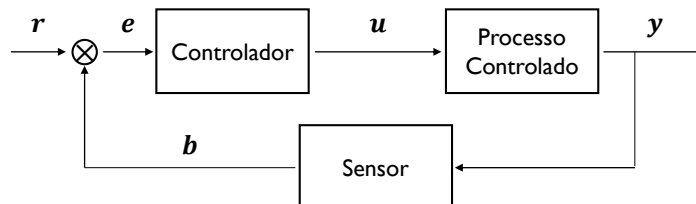
- Movimentar o robô um metro para frente
 - Aplicar uma velocidade de 0,25 m/s durante 4s
- E a incertezas relacionadas?
 - Atuadores
 - Ambiente



Controle

Malha fechada

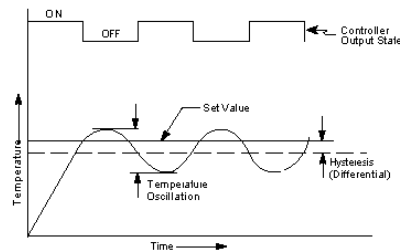
- Closed-loop, Feedback
- O resultado das ações de controle é considerado (realimentado) no sistema



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

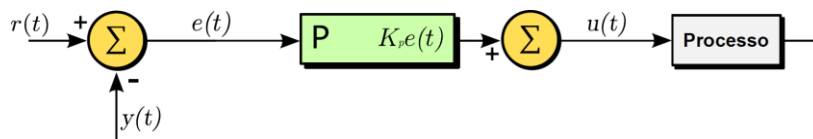
Malha fechada – Proporcional (P)

- 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



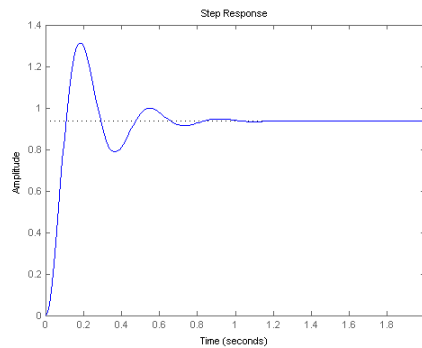
Controle

Malha fechada – Proporcional (P)



Controle

Malha fechada – Proporcional (P)



$$K_p = 300$$



Controle

Malha fechada – Proporcional (P)

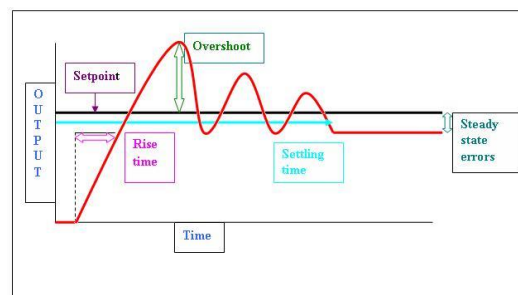
- Maneiras de determinar o ganho
 - Analítica: Exige um grande entendimento do sistema e caracterização matemática
 - Empírica: Demanda que o sistema passe por uma extensiva bateria de experimentos
 - Automática: Ajustado durante a própria execução do sistema



Controle

Malha fechada – Proporcional (P)

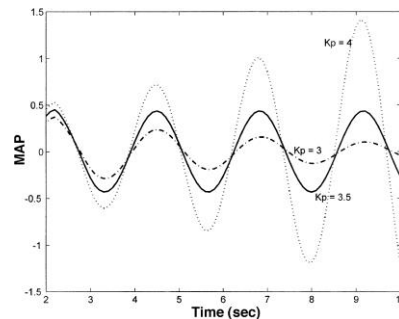
- Principais problemas
 - Ganho baixo: Steady State Error



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)

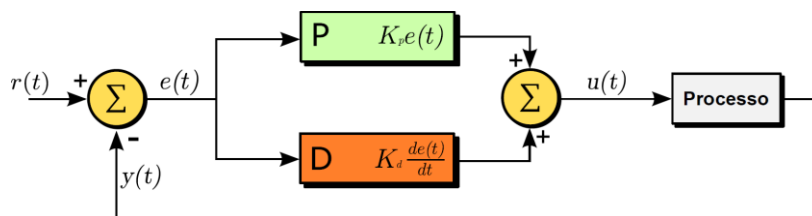
- Possui um termo proporcional e um termo derivativo que irá prover o amortecimento
- A entrada de controle é dada por

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



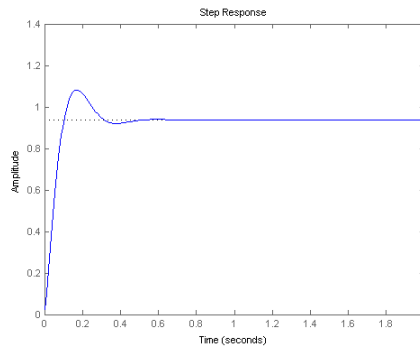
Controle

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

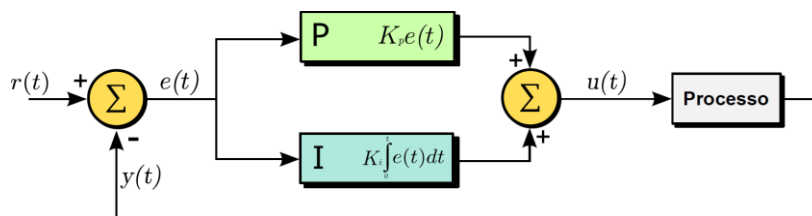
$$u = K_p \cdot e + K_i \cdot \int e \, dt$$

- K_i é o ganho integral
- Os ganhos devem ser escolhidos juntos



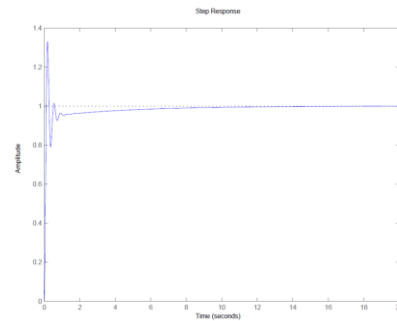
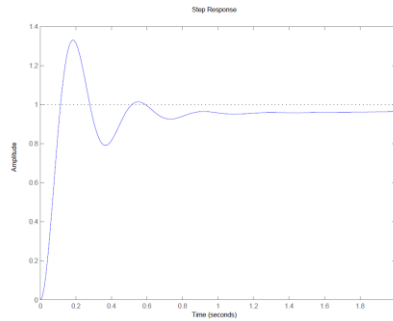
Controle

Malha fechada – Proporcional-Integral (PI)



Controle

Malha fechada – Proporcional-Integral (PI)

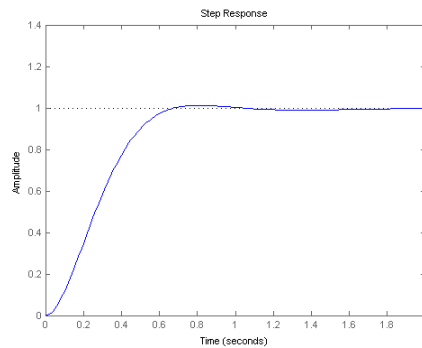


$$K_p = 300, K_i = 70$$



Controle

Malha fechada – Proporcional-Integral (PI)



$$K_p = 30, K_i = 70$$



Controle

Malha fechada – Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

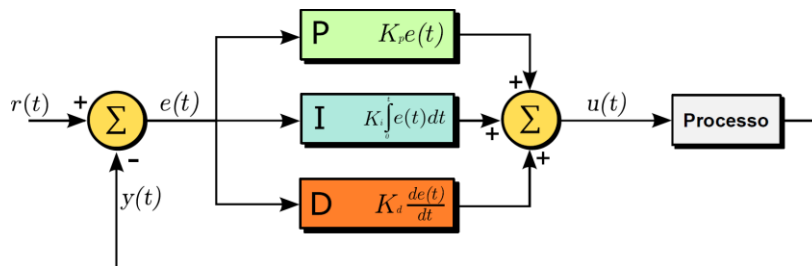
- Combinação dos três termos
- A entrada de controle é dada por

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



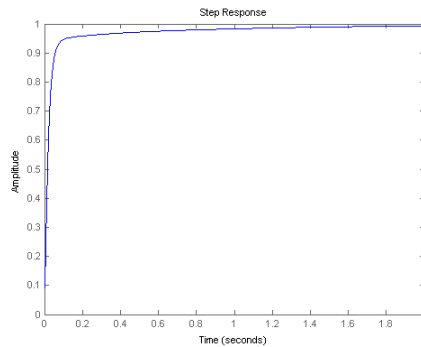
Controle

Malha fechada – Proporcional-Integral-Derivativo (PID)



Controle

Malha fechada – Proporcional-Integral-Derivativo (PID)



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



Controle

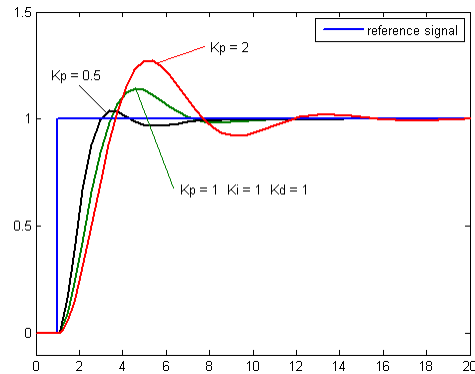
Malha fechada – Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

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)

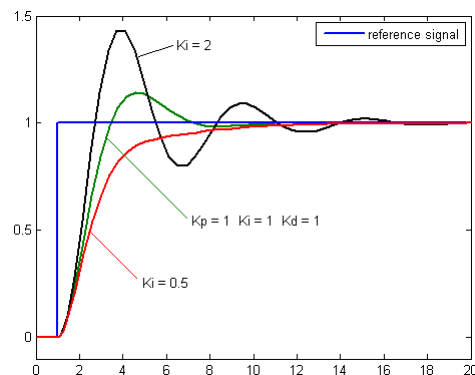


Introdução à Robótica - Controle (1/2)

33

Controle

Malha fechada – Proporcional-Integral-Derivativo (PID)



Introdução à Robótica - Controle (1/2)

34

Controle

Malha fechada – Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

