

U F M G  
UNIVERSIDADE FEDERAL  
DE MINEIROS

## Introdução à Robótica

### Controle

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

**DCC**  
**VERlab**  
Vídeo e Robótica

1

## 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 à Robótica - Controle

2

## Introdução

### Controle

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

**DCC**  
**M**

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**  
**M**

Introdução à Robótica - Controle

4

## Introdução

### Controle

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

**DCC**  
**M**

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**  
**M**

Introdução à Robótica - Controle

6

## Controle

### Conceitos básicos

- Sistema dinâmico

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, u) && \xleftarrow{\text{Sistema}} \\ y &= h(x, u) && \xleftarrow{\text{Observação}}\end{aligned}$$

- Formas gerais de controle

- Malha aberta
- Malha fechada

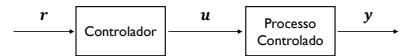


## Controle

### 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

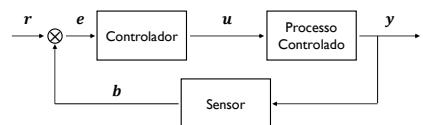


## Controle

### Malha fechada

- Closed-loop, Feedback

- O resultado das ações de controle é considerado (realimentado) no sistema

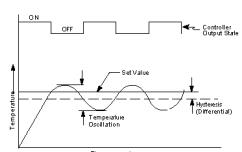


## Controle

### 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

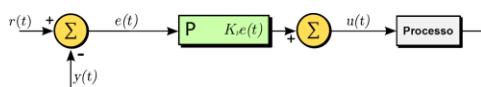
Malha fechada – Proporcional (P)

- 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



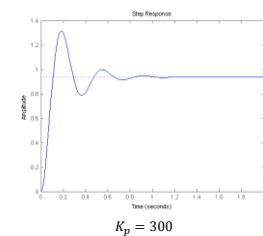
## Controle

Malha fechada – Proporcional (P)



## Controle

Malha fechada – Proporcional (P)



## Controle

Malha fechada – Proporcional (P)

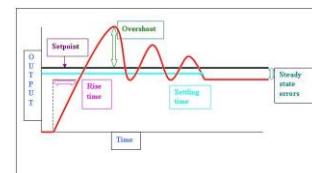
- Maneiras de determinar o ganho
- Análitica: Exige um grande entendimento do sistema e caracterização matemática
- Empírica: Demanda que o sistema passe por uma extensiva bateria de experimentos
- Automática: Ajustado durante a própria execução do sistema



## Controle

Malha fechada – Proporcional (P)

- Principais problemas
- Ganho baixo: Steady State Error

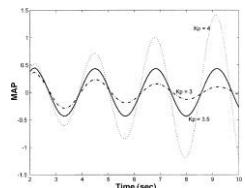


## Controle

### 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

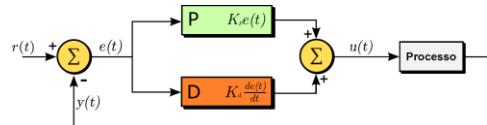
### Malha fechada – Proporcional-Derivativo (PD)

- 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

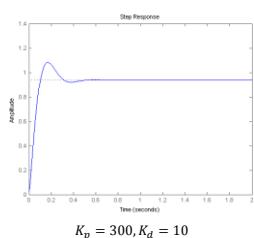
## Controle

### Malha fechada – Proporcional-Derivativo (PD)



## Controle

### Malha fechada – Proporcional-Derivativo (PD)



## 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)

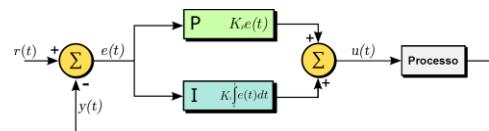
- Possui um termo proporcional e um termo integral que reduz o erro acumulado
- A entrada de controle é dada por  

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



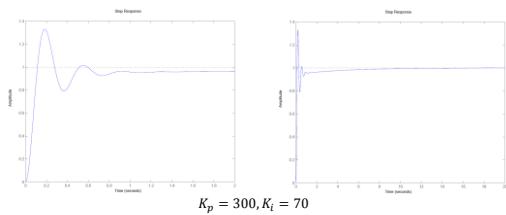
## Controle

Malha fechada – Proporcional-Integral (PI)



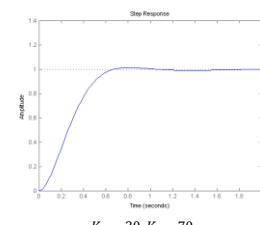
## Controle

Malha fechada – Proporcional-Integral (PI)



## Controle

Malha fechada – Proporcional-Integral (PI)



## Controle

Malha fechada – Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

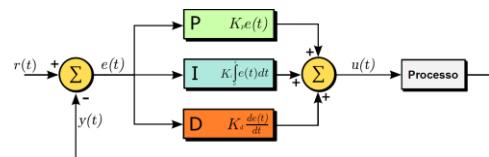
- Combinação dos três termos
- A entrada de controle é dada por  

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



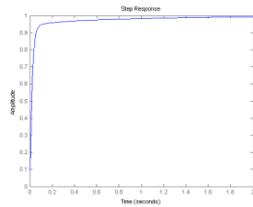
## Controle

Malha fechada – Proporcional-Integral-Derivativo (PID)



## Controle

Malha fechada – Proporcional-Integral-Derivativo (PID)



## Controle

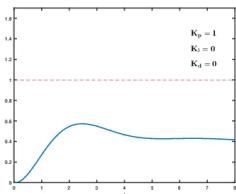
Malha fechada – Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

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

Controller	$\frac{M_p}{\eta_0 R_p}$	$\frac{T_p}{T}$	$\frac{\tau_{0p}}{\eta_0 R_p}$	$K_{C, \text{ref}}$	$\frac{T_{Dp}}{K_p T}$	$\frac{T_{Dp}}{T}$
PID	0.20	19	—	2.75	0.28	0.67
P	0.22	31	—	2.75	1.28	0.32
PD	0.22	31	-0.17	4.74	—	—
P	0.45	22	-0.27	2.68	—	—
I	0.76	40	—	—	0.88 $K_p$	—



## 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 tendency to get out of hand; i.e. temperature and concentration measurements on a reactor to avoid runaway.

