

Projeto de Controlo em Espaço de Estados

Grupo 15:

89691, Leonardo Pedroso

90142, Miguel Graça

90200, Tomás Rodrigues

90395, Inês Ferreira

Professores:

Prof. Pedro Batista e Prof. João Miranda Lemos

Instituto Superior Técnico

5 de novembro de 2021

Conteúdo

Caracterização do Sistema

Retroação do Estado

Observador

Não-idealidades

Seguimento de Referência

Conteúdo

Caracterização do Sistema

Retroação do Estado

Observador

Não-idealidades

Seguimento de Referência

Análise de Estabilidade

Tabela 1: Pólos do Sistema em Malha Aberta.

Pólo	Amortecimento	ω (rad/s)	C. Tempo (s)
0.00e+00	-1.00e+00	0.00e+00	$+\infty$
-7.37e+02	1.00e+00	7.37e+02	1.36e-03
-1.94e+01	1.00e+00	1.94e+01	5.16e-02
-5.76e+00	1.00e+00	5.76e+00	1.74e-01
7.00e+00	-1.00e+00	7.00e+00	—

- A existência de um pólo com parte real positiva é indicativo da instabilidade do sistema

Controlabilidade e Observabilidade

$$\mathcal{C} := [B \quad AB \quad \dots \quad A^{n-1}B]$$

$$\mathcal{O} := \begin{bmatrix} C \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}$$

- ▶ Para as matrizes A e B fornecidas, $\text{car}(\mathcal{C}) = 5 \rightarrow$ o sistema é controlável
- ▶ Quando apenas β é medido, $\text{car}(\mathcal{O}) = 4 \rightarrow$ o sistema não é observável
- ▶ Quando α e β são medidos, $\text{car}(\mathcal{O}) = 5 \rightarrow$ o sistema é observável

Diagramas de Bode e Mapa de Pólos e Zeros

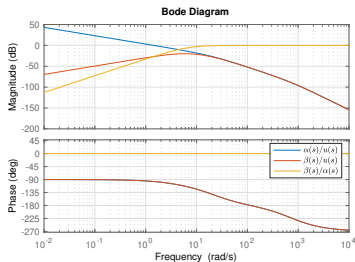


Figura 1: Diagramas de Bode.

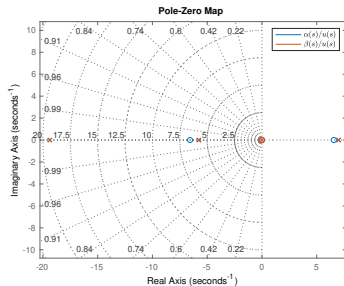


Figura 2: Mapa de Pólos e Zeros.

Conteúdo

Caracterização do Sistema

Retroação do Estado

Observador

Não-idealidades

Seguimento de Referência

Diagrama do Controlador por Retroação de Estado

$$u = -Kx$$

$$J := \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt$$

$$Q = \gamma \operatorname{diag} \left(1 / \left(k \frac{10 \operatorname{deg}}{180 \operatorname{deg}} \pi \right)^2, 0, 1 / \left(\frac{10 \operatorname{deg}}{180 \operatorname{deg}} \pi \right)^2, 0, 0 \right)$$

Respostas no domínio do tempo

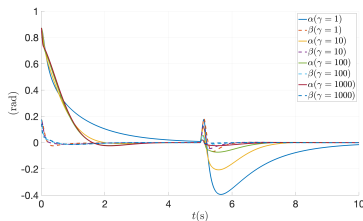
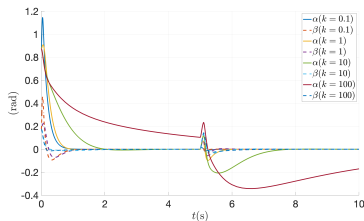


Figura 3: Resposta no tempo de α e β para valores distintos de k , sendo β para diferentes valores de γ , que $\gamma = 10$. **Figura 4:** Resposta no tempo de α e β para valores distintos de γ , assumindo que $k = 10$.

Conteúdo

Caracterização do Sistema

Retroação do Estado

Observador

Não-idealidades

Seguimento de Referência

Equações do observador

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + w \\ y = Cx + v \end{cases} \rightarrow \begin{cases} w \sim \mathcal{N}(0, Q_e) \\ v \sim \mathcal{N}(0, R_e) \end{cases}$$

$$R_e = \left(\frac{1 \text{ deg}}{180 \text{ deg}} \pi \right)^2 I$$

$$Q_e = \phi \text{diag} \left(\left(\frac{1 \text{ deg}}{180 \text{ deg}} \pi \right)^2, \left(\omega_d^* \frac{1 \text{ deg}}{180 \text{ deg}} \pi \right)^2, \left(\frac{1 \text{ deg}}{180 \text{ deg}} \pi \right)^2, \left(\omega_d^* \frac{1 \text{ deg}}{180 \text{ deg}} \pi \right)^2, (0.025 \text{ A})^2 \right)$$

ϕ	T_c/T_o
10	2.28
100	6.05
1000	9.87

Poles
-7.37e+02
-1.06e+01 + 5.76e+00i
-1.06e+01 - 5.76e+00i
-1.02e+01
-1.99e+01

Resposta no Tempo

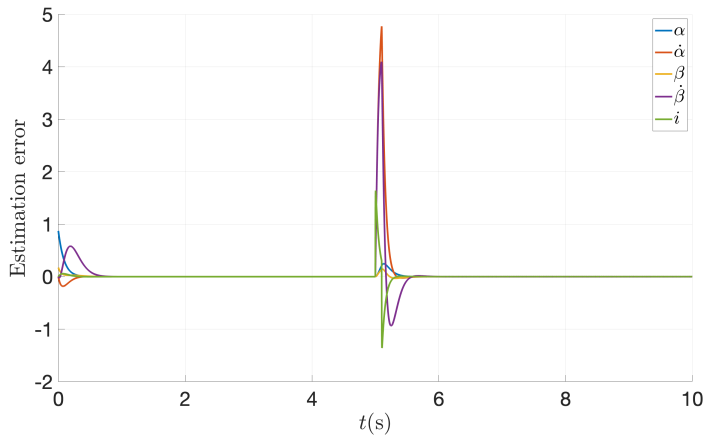


Figura 5: Resposta no tempo do erro de estimação das variáveis de estado, com $\phi = 100$.

Conteúdo

Caracterização do Sistema

Retroação do Estado

Observador

Não-idealidades

Seguimento de Referência

Não-idealidades

- ▶ Dinâmica e cinemática não linear
- ▶ Saturação na atuação
- ▶ *Dead zone* na atuação
- ▶ Ruído de processo e nos sensores

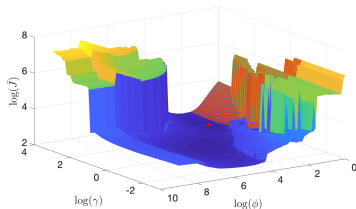


Figura 6: Regulation cost function for various controllers and observers.

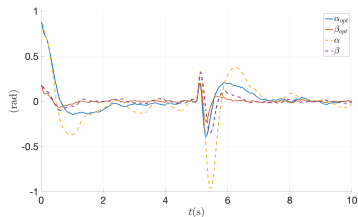


Figura 7: Time response of α and β of the optimal solution.

Não-idealidades

- ▶ Perturbações impulsivas
- ▶ Incerteza no modelo
- ▶ Perturbações na saída
- ▶ Perturbações na entrada (*bias* no amplificador do motor)
 - ▶ Estado integral $\dot{x}_I = \alpha$
 - ▶ Anti-windup

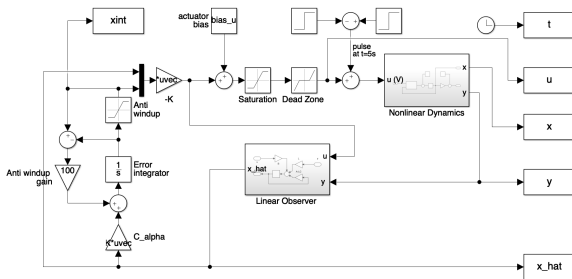


Figura 8: Block diagram of the controller with integral action.

Conteúdo

Caracterização do Sistema

Retroação do Estado

Observador

Não-idealidades

Seguimento de Referência

Seguimento de referência

- ▶ Acção de controlo: $u = -Kx - K_I x_I + N\alpha_{ref}$
- ▶ Feed-forward: $G_0 = -C_\alpha(A - BK)^{-1}BN = 1$
- ▶ Estado integral: $\dot{x}_I = \alpha - \alpha_{ref}$
 - ▶ Anti-windup

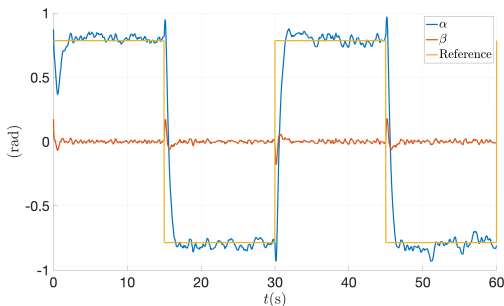


Figura 9: Time response of α and β with process and sensor noise.