

---

# SEM5875 - Controle de Sistemas Robóticos

Adriano A. G. Siqueira

Aula 7 - Controle Tolerante a Falhas

- Dixon, W. E.; Walker, I. D.; Dawson, D. M. and Hartranft, J. P.;  
“Fault Detection for Robot Manipulators with Parametric  
Uncertainty: A Prediction-Error-Based Approach” *IEEE  
Transactions on Robotics and Automation*, vol. 16, no. 6. 2000
- Torque filtrado

$$\dot{\tau}_f = -\lambda\tau_f + \eta\tau, \quad \tau_f(0) = 0$$

sendo  $\eta$  e  $\lambda$  constantes positivas do filtro .

- Estimativa do torque filtrado

$$\hat{\tau}_f = Y_f \hat{\theta}$$

- sendo

$$\begin{aligned} Y_f \hat{\theta} = & \dot{f}(t) \star \{\hat{M}(q)\dot{q}\} + f(0)\hat{M}(q)\dot{q} - f(t)\hat{M}(q(0))\dot{q}(0) \\ & + f(t) \star \{-\dot{\hat{M}}(q)\dot{q} + \hat{N}(q, \dot{q})\dot{q}\} \end{aligned}$$

- com

$$f(t) = \eta e^{-\lambda t}$$

- Erro de predição do torque filtrado

$$\epsilon = \tau_f - \hat{\tau}_f$$

- Função residual *dead-zone*

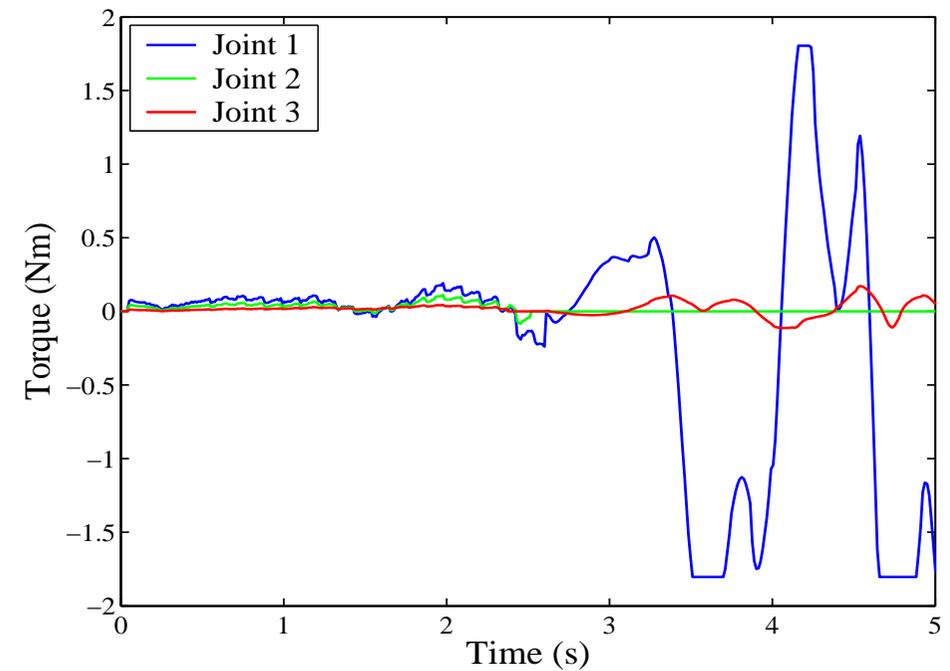
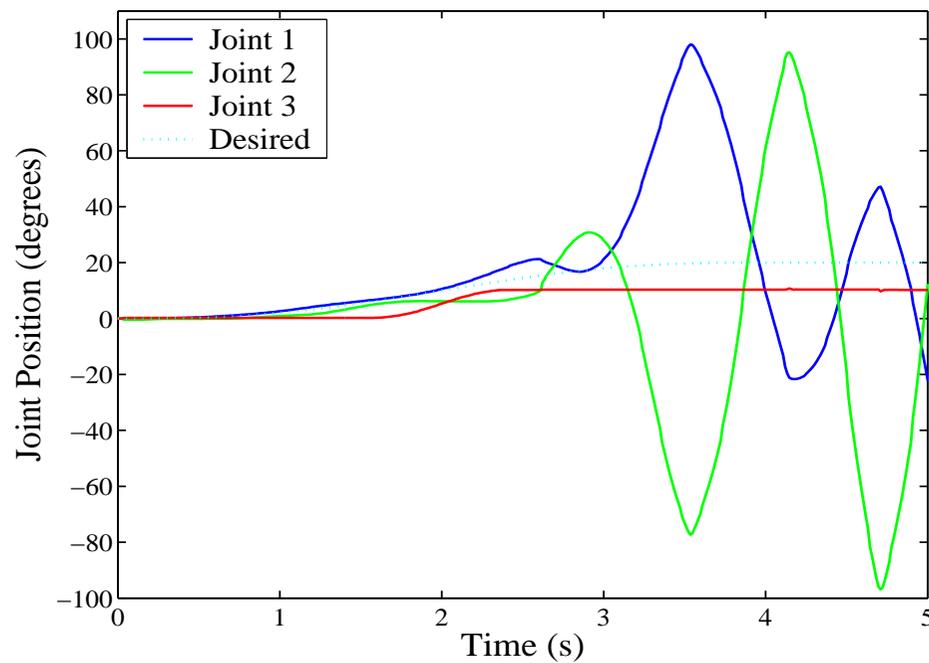
$$D[\epsilon_i] = \begin{cases} |\epsilon_i|, & \text{se } |\epsilon_i| > \rho_i(t) \\ 0, & \text{se } |\epsilon_i| \leq \rho_i(t) \end{cases}$$

- com  $\rho(t)$  uma função satisfazendo  $|(Y_f \tilde{\theta})_i| \leq \rho_i(t)$ .

- Teste Experimental: Underactuated Arm II (UArm II)
- Posição inicial:  $[0 \ 0 \ 0]^\circ$
- Set-point:  $[20 \ 20 \ 20]^\circ$
- Falha tipo junta livre na junta 2  
em  $t = 2.5s$
- Torque calculado + controle  $\mathcal{H}_\infty$  linear
- Reconfiguração da estratégia de controle: AAA  $\Rightarrow$  APA sem freios



- Resultados



- Objetivo: controladores estáveis para reconfiguração sem freios

Andrei Markov (1856 - 1922, Rússia)



- Controle estocástico: saltos Markovianos
- Controladores lineares  $\mathcal{H}_2$ ,  $\mathcal{H}_\infty$  e misto  $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$
- Linearização em pontos do espaço de trabalho
- Probabilidade de ocorrência de falhas ( $P_f$ )
- Probabilidade das juntas passivas alcançarem o set-point ( $P_s$ )

- Equação dinâmica:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + b(q)$$

- Considere:  $n_a$  juntas ativas e  $n_p$  juntas passivas
  - $q_c \in \mathfrak{R}^{n_a}$  juntas controladas
  - $q_r \in \mathfrak{R}^{n_p}$  juntas restantes

- Partição da equação dinâmica:

$$\begin{bmatrix} \tau_a \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{ac}(q) & M_{ar}(q) \\ M_{uc}(q) & M_{ur}(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_c \\ \ddot{q}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_a(q, \dot{q}) \\ b_u(q, \dot{q}) \end{bmatrix}$$

- Equação dinâmica do manipulador subatuado

$$\tau_a = \overline{M}(q)\ddot{q}_c + \overline{b}(q, \dot{q}),$$

- $\overline{M}(q) = M_{ac}(q) - M_{ar}(q)M_{ur}^{-1}(q)M_{uc}(q)$
- $\overline{b}(q, \dot{q}) = b_a(q, \dot{q}) - M_{ar}(q)M_{ur}^{-1}(q)b_u(q, \dot{q})$

- Linearização em torno de  $q_0$ , e  $\dot{q}_0$

$$\dot{\tilde{x}} = \bar{A}\tilde{x} + \bar{B}\tau + \bar{B}\bar{\delta}(q, \dot{q}, \ddot{q})$$

$$\bar{A}(q, \dot{q}) = \left[ \begin{array}{cc} 0 & I \\ -\frac{\partial}{\partial q}(\bar{M}^{-1}(q)\bar{b}(q, \dot{q})) & -\bar{M}^{-1}(q)\frac{\partial}{\partial \dot{q}}(\bar{b}(q, \dot{q})) \end{array} \right] \Bigg|_{(q_0, \dot{q}_0)}$$

$$\bar{B}(q) = \left[ \begin{array}{c} 0 \\ \bar{M}^{-1}(q) \end{array} \right] \Bigg|_{(q_0)} \quad x = \left[ \begin{array}{c} q^d - q \\ \dot{q}^d - \dot{q} \end{array} \right],$$

- Controle preliminar PD:

$$\dot{x} = \tilde{A}(q, \dot{q})x + \tilde{B}(q)u$$

$$z = \tilde{C}x + \tilde{D}u,$$

$$\tilde{A}(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\partial}{\partial q} \left( \bar{M}^{-1}(q) \bar{b}(q, \dot{q}) \right) + \bar{M}^{-1}(q) K_P \\ I \\ -\bar{M}^{-1}(q) \left[ \frac{\partial}{\partial \dot{q}} \left( \bar{b}(q, \dot{q}) \right) - K_D \right] \end{bmatrix} \Bigg|_{(q_0, \dot{q}_0)}$$

- Controle preliminar PD:

$$\dot{x} = \tilde{A}(q, \dot{q})x + \tilde{B}(q)u$$

$$z = \tilde{C}x + \tilde{D}u,$$

$$\tilde{B}(q) = \bar{B}(q) \quad \tilde{C} = \begin{bmatrix} \alpha I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ \beta I \end{bmatrix}$$

$$\tau = \begin{bmatrix} K_P & K_D \end{bmatrix} x + u,$$

# Sequência de falhas AAA-APA

- Falha junta livre na junta 2
- Configuração APA: duas fases de controle
  - Fase  $APA_u$ :  $q_c = [q_2 \ q_3]^T$
  - Fase  $APA_l$ :  $q_c = [q_1 \ q_3]^T$
- Matriz de probabilidades de transição

$$P = \begin{bmatrix} P_{AAA} & P_f & P_0 \\ P_0 & P_{APA_u} & P_s \\ P_0 & P_s & P_{APA_l} \end{bmatrix}$$

# Sequência de falhas AAA-APA

Estados Markovianos			Pontos de Linearização					
AAA	APA <sub>u</sub>	APA <sub>l</sub>	$q_{1_0}$	$q_{2_0}$	$q_{3_0}$	$\dot{q}_{1_0}$	$\dot{q}_{2_0}$	$\dot{q}_{3_0}$
1	9	17	5	5	5	0	0	0
2	10	18	15	5	5	0	0	0
3	11	19	5	15	5	0	0	0
4	12	20	15	15	5	0	0	0
5	13	21	5	5	15	0	0	0
6	14	22	15	5	15	0	0	0
7	15	23	5	15	15	0	0	0
8	16	24	15	15	15	0	0	0

# Sequência de falhas: AAA-PAA-PAP

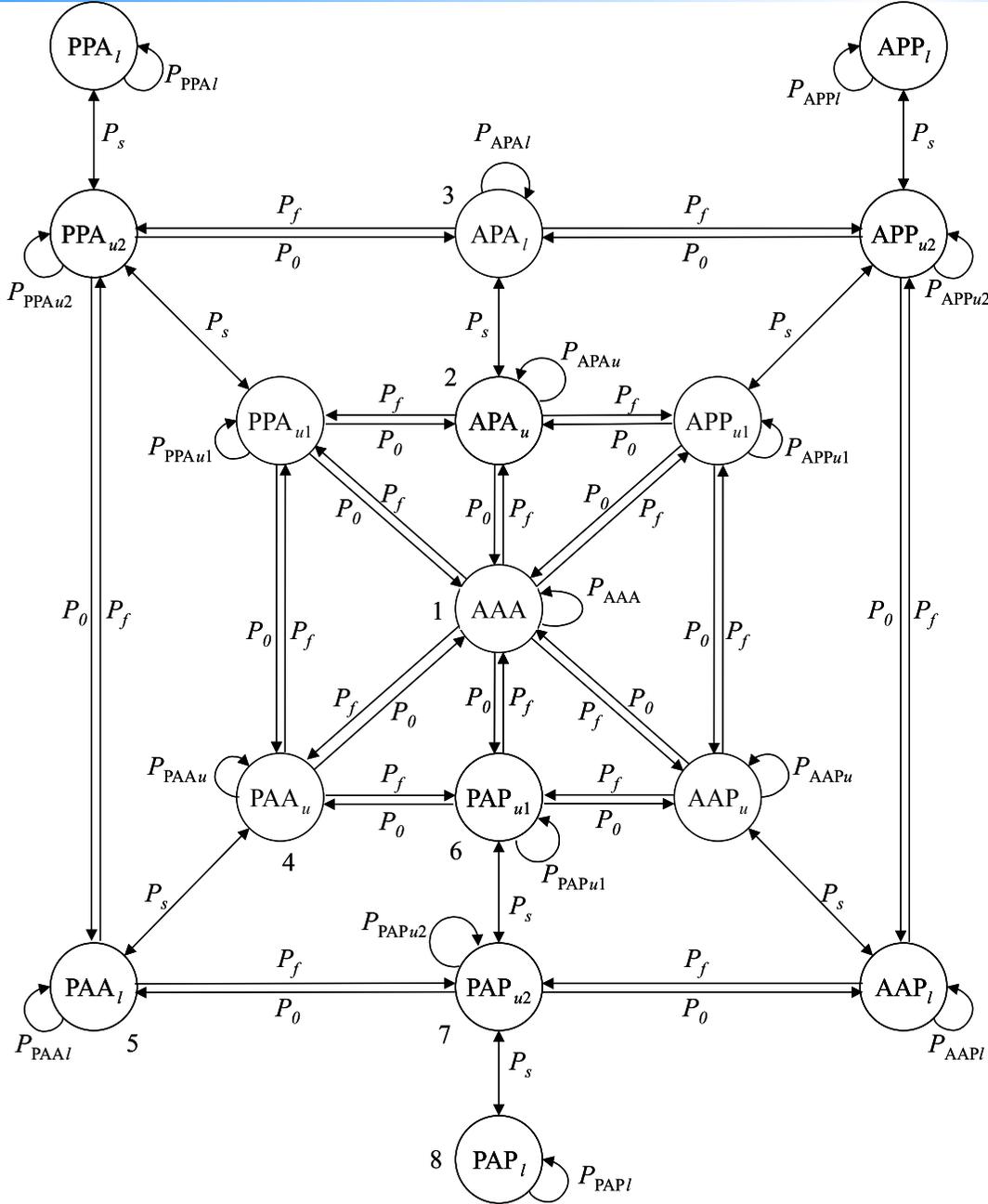
---

- Falha junta livre na junta 1, seguida por uma falha na junta 3
- Configuração PAA: duas fases de controle
  - Fase  $PAA_u$ :  $q_c = [q_1 \ q_3]^T$
  - Fase  $PAA_l$ :  $q_c = [q_2 \ q_3]^T$
- Configuração PAP: três fases de controle
  - phase  $PAP_{u_1}$ :  $q_c = q_1$
  - phase  $PAP_{u_2}$ :  $q_c = q_3$
  - phase  $PAP_l$ :  $q_c = q_2$

# Sequência de falhas AAA-PAA-PAP

<b>Estados Markovianos</b>					
AAA	PAA <sub>u</sub>	PAA <sub>l</sub>	PAP <sub>u1</sub>	PAP <sub>u2</sub>	PAP <sub>l</sub>
1	9	17	25	33	41
2	10	18	26	34	42
3	11	19	27	35	43
4	12	20	28	36	44
5	13	21	29	37	45
6	14	22	30	38	46
7	15	23	31	39	47
8	16	24	32	40	48

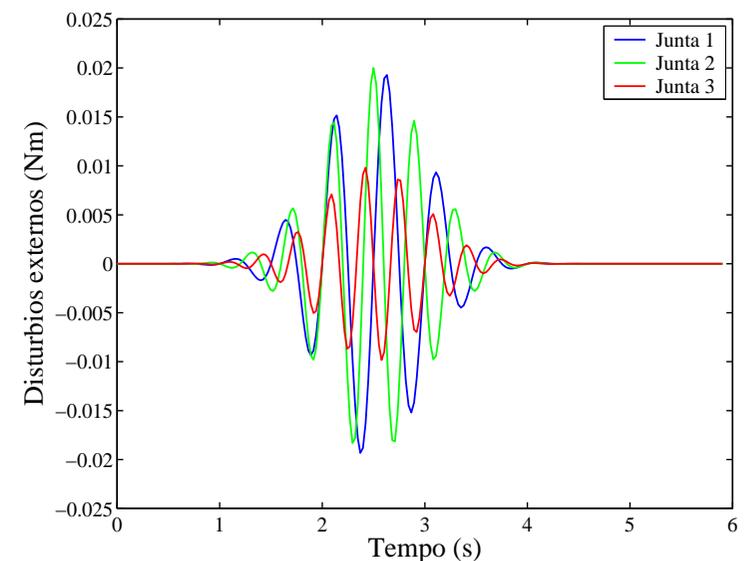
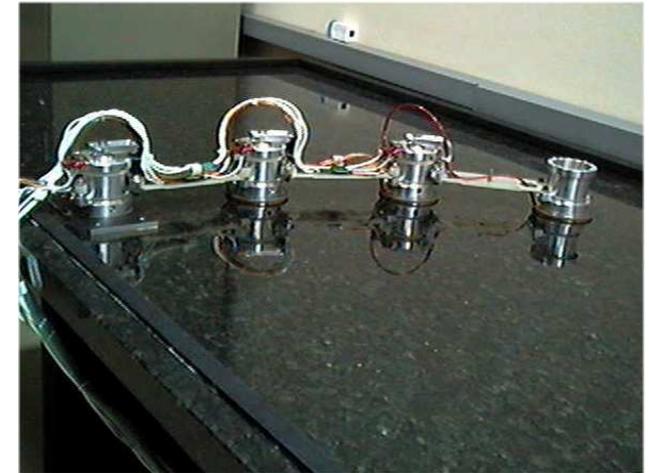
# Modelo Markoviano



# Resultados experimentais

- Posição inicial:  $[0 \ 0 \ 0]^\circ$
- Posição final:  $[20 \ 20 \ 20]^\circ$
- Tempos desejados:  $t_f = [4.0 \ 4.0 \ 4.0] \text{ s}$
- Sequência de falhas AAA-APA: falha em 2.5 s
- Tempo médio entre a falha e a detecção: 0.25s
- Distúrbio:

$$\tau_d = \begin{bmatrix} 0.3e^{-2(t-2.8)^2} \sin(4\pi t) \\ 0.015e^{-2(t-2.8)^2} \sin(5\pi t) \\ 0.009e^{-2(t-2.8)^2} \sin(6\pi t) \end{bmatrix}$$



# Controle $\mathcal{H}_\infty$ , real. do estado

