

# Contribuições à modelagem e controle de manipuladores paralelos

André Garnier Coutinho

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Novembro de 2019

# Motivação

## Mecanismos paralelos

### Características Promissoras

### Características Promissoras

- Grande capacidade de carga
- Alta rigidez estrutural
- Alta precisão de posicionamento
- Baixa inércia
- Altas velocidades e acelerações

# Motivação

## Mecanismos paralelos

### Características Promissoras

- Grande capacidade de carga
- Alta rigidez estrutural
- Alta precisão de posicionamento
- Baixa inércia
- Altas velocidades e acelerações

### Inconvenientes

# Motivação

## Mecanismos paralelos

### Características Promissoras

- Grande capacidade de carga
- Alta rigidez estrutural
- Alta precisão de posicionamento
- Baixa inércia
- Altas velocidades e acelerações

### Inconvenientes

- Grande número de componentes mecânicos
- Pequena área de trabalho
- Dinâmica complexa e não linear

# Motivação

Mecanismos paralelos

## Aplicações

- Pick-and-place



# Motivação

## Mecanismos paralelos

### Aplicações

- Simuladores



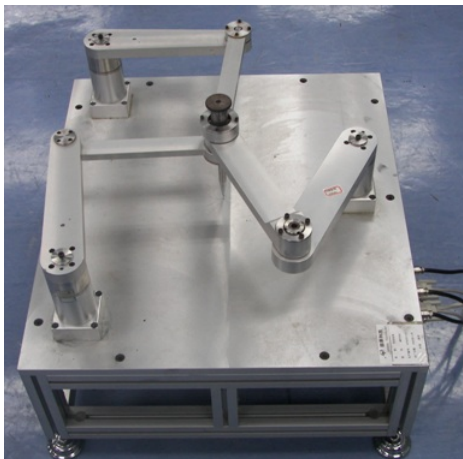


# Motivação

## Mecanismos paralelos

### Aplicações

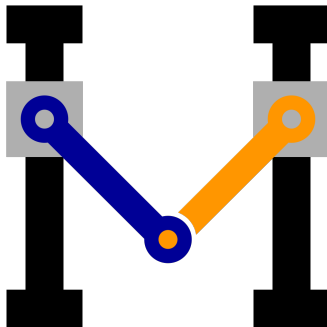
- Usinagem





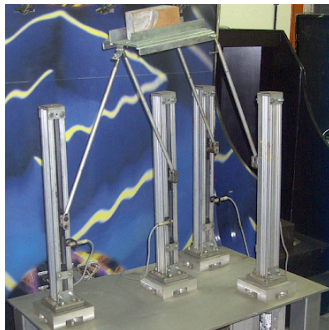
## LaMMaR

Laboratório de Mecanismos, Máquinas e Robôs



Robôs

Giovanna



Robôs

Dora

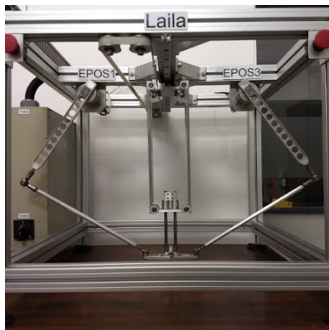


# Motivação

Grupo de pesquisa

Robôs

Laila

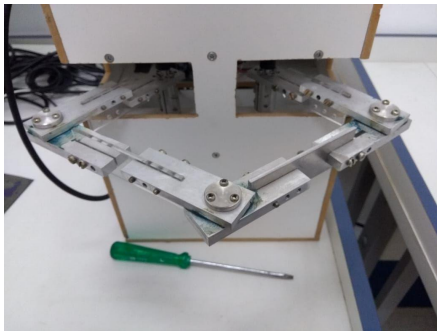


# Motivação

Grupo de pesquisa

Robôs

Clara



## Clara

- 2015
  - B. Ohashi: Síntese dimensional
  - V. Bartholomeu: Projeto e construção da estrutura mecânica
- 2016
  - V. Bartholomeu e J. de Oliveira-Fuess: Modelagem e simulações cinemática e dinâmica
- 2017
  - A. Coutinho, V. Bartholomeu e J. de Oliveira-Fuess: Construção do protótipo
- 2019
  - A. Coutinho: Implementação de técnicas de controle e ensaios experimentais

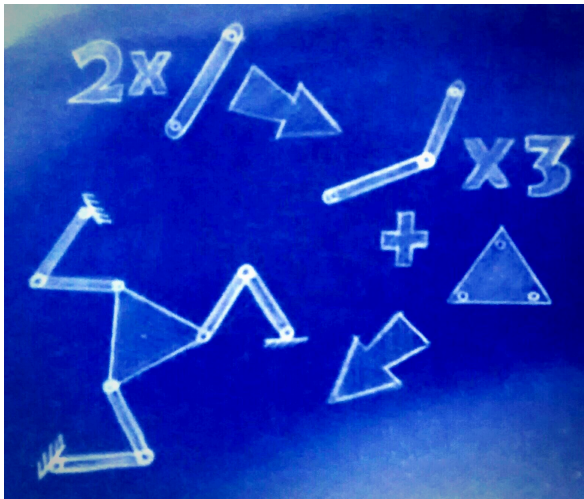


# Motivação

Metodologia modular de modelagem

# Motivação

Metodologia modular de modelagem



(Orsino 2015)

# Motivação

## Controle robusto

## Técnicas mais utilizadas

## Técnicas mais utilizadas

- PID

## Técnicas mais utilizadas

- PID
  - Controle linear
  - Simples implementação
  - Não baseado no modelo dinâmico do mecanismo
  - Desempenho bastante limitado

## Técnicas mais utilizadas

- PID
  - Controle linear
  - Simples implementação
  - Não baseado no modelo dinâmico do mecanismo
  - Desempenho bastante limitado
- CTC

## Técnicas mais utilizadas

- PID
  - Controle linear
  - Simples implementação
  - Não baseado no modelo dinâmico do mecanismo
  - Desempenho bastante limitado
- CTC
  - Controle não linear
  - Baseado no modelo dinâmico do mecanismo
  - Desempenho limitado pela qualidade do modelo
  - Implementação mais complexa



# Motivação

## Controle robusto

## Controle por Modos Deslizantes

## Controle por Modos Deslizantes

- Controle não linear robusto
- Pode ser baseado no modelo dinâmico do mecanismo

## Controle por Modos Deslizantes

- Controle não linear robusto
- Pode ser baseado no modelo dinâmico do mecanismo

## Vantagem

Desempenho menos dependente da qualidade do modelo

## Controle por Modos Deslizantes

- Controle não linear robusto
- Pode ser baseado no modelo dinâmico do mecanismo

## Vantagem

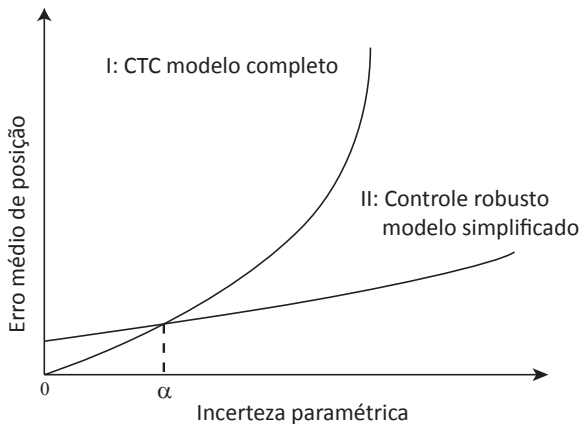
Desempenho menos dependente da qualidade do modelo

## Desvantagem

Pode causar *chattering*

# Motivação

## Controle robusto



(Slotine 1985)

# Objetivos

# Objetivos

## Geral

Contribuir para o aumento do desempenho de manipuladores paralelos



# Objetivos

## Geral

Contribuir para o aumento do desempenho de manipuladores paralelos

## Como?

# Objetivos

## Geral

Contribuir para o aumento do desempenho de manipuladores paralelos

## Como?

- Desenvolvimento de um algoritmo gerador de modelos dinâmicos completos de mecanismos paralelos, de forma implícita

# Objetivos

## Geral

Contribuir para o aumento do desempenho de manipuladores paralelos

## Como?

- Desenvolvimento de um algoritmo gerador de modelos dinâmicos completos de mecanismos paralelos, de forma implícita
- Síntese de leis de controle não linear robusto, de alto desempenho, aplicável a mecanismos paralelos

# Objetivos

## Geral

Contribuir para o aumento do desempenho de manipuladores paralelos

## Como?

- Desenvolvimento de um algoritmo gerador de modelos dinâmicos completos de mecanismos paralelos, de forma implícita
- Síntese de leis de controle não linear robusto, de alto desempenho, aplicável a mecanismos paralelos
- Comparação de desempenho das leis de controle propostas com as leis de controle mais encontradas na literatura, através de ensaios experimentais

# Algoritmo de modelagem

## Mecanismos Paralelos

- Translacionais
- Efetuador rígido

# Algoritmo de modelagem

## Mecanismos Paralelos

- Translacionais
- Efetuador rígido

## Considera

- Inércia distribuída
- Ação da gravidade
- Atritos nas juntas
- Dinâmica dos atuadores

# Algoritmo de modelagem

## Mecanismos Paralelos

- Translacionais
- Efetuador rígido

## Considera

- Inércia distribuída
- Ação da gravidade
- Atritos nas juntas
- Dinâmica dos atuadores

## Não considera

- Folga nas juntas
- Deformações

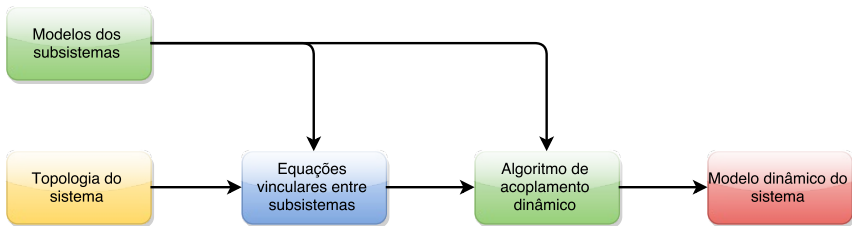


# Algoritmo de modelagem

## Formulação implícita

Torna possível a implementação em linguagens de programação de alta eficiência computacional, como C++

# Algoritmo de modelagem



(Orsino 2016)

# Algoritmo de modelagem

## Seriais

# Algoritmo de modelagem

Seriais

## Dados de entrada

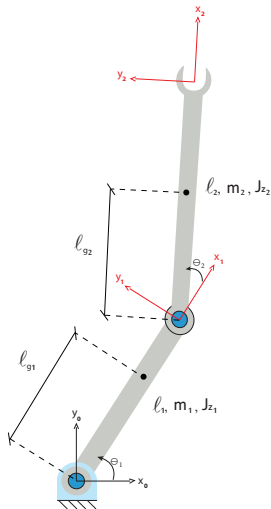
- Parâmetros de Denavit-Hartenberg ( $a_i, \alpha_i, \theta_i, d_i$ )
- Posição dos centros de massa em relação aos sistemas  $B_i$  ( $x_i, y_i, z_i$ )
- Massa  $m_i$  de cada ligamento
- Tensor de inércia  $[I_i]_{B_i | B_i}$  em relação ao centro de massa de cada ligamento
- Vetor aceleração gravitacional escrito no sistema fixo ( $[g]_N$ )

# Algoritmo de modelagem

Seriais: Exemplo

# Algoritmo de modelagem

Seriais: Exemplo



# Algoritmo de modelagem

Seriais: Exemplo

Ligamento	$a_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$	$x_i$	$y_i$	$z_i$	$m_i$
(1)	$l_1$	0	0	$q_1(t)$	$l_{g1} - l_1$	0	0	$m_1$
(2)	$l_2$	0	0	$q_2(t)$	$l_{g2} - l_2$	0	0	$m_2$

$$[\mathbf{I}_1]_{B_1 | B_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Jz_1 & 0 \\ 0 & 0 & Jz_1 \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{I}_2]_{B_2 | B_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Jz_2 & 0 \\ 0 & 0 & Jz_2 \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{g}]_N = [0 \quad -g \quad 0]^T$$



# Algoritmo de modelagem

## Paralelos

# Algoritmo de modelagem

## Paralelos

### Dados de entrada

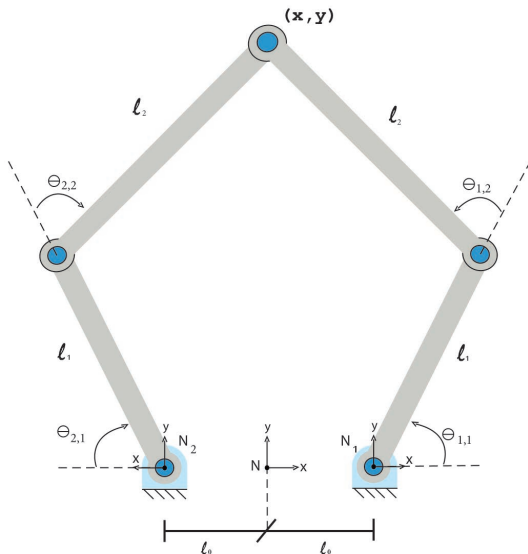
- Modelo da plataforma/efetuador
- Modelo das cadeias seriais
- Matrizes constantes que descrevem a arquitetura do mecanismo ( $\mathcal{d}$ ,  $\mathbb{D}$ ,  $\mathbb{E}$ ,  $\mathbb{F}$ ,  $\mathbb{P}$ ,  $\mathbb{Q}$ ,  $\mathbb{R}$ )

# Algoritmo de modelagem

Paralelos: Exemplo

# Algoritmo de modelagem

## Paralelos: Exemplo



# Algoritmo de modelagem

## Paralelos: Exemplo

$$\mathbf{q}^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x}_1(\mathbf{q}_1) + \begin{bmatrix} l_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{q}^* = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x}_2(\mathbf{q}_2) + \begin{bmatrix} -l_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

# Algoritmo de modelagem

## Paralelos: Exemplo

$$\mathbf{q}^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x}_1(\mathbf{q}_1) + \begin{bmatrix} l_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{q}^* = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x}_2(\mathbf{q}_2) + \begin{bmatrix} -l_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{q}}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{q}^* - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x}(\mathbf{q}^\diamond) - \begin{bmatrix} l_0 \\ 0 \\ 0 \\ -l_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{0}$$

# Algoritmo de modelagem

## Paralelos: Exemplo

$$\mathbb{d} = [l_0 \quad 0 \quad 0 \quad -l_0 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$\mathbb{D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbb{E} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbb{F} = \mathbb{0}$$

# Algoritmo de modelagem

## Paralelos: Exemplo

$$\mathbf{q}^{\#} = \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{q}^{\circ} = \begin{bmatrix} z & \theta_{1,1} & \theta_{1,2} & \theta_{2,1} & \theta_{2,2} \end{bmatrix}^T$$



# Algoritmo de modelagem

## Paralelos: Exemplo

$$\mathbf{q}^{\#} = [x \quad y]^T$$

$$\mathbf{q}^{\circ} = [z \quad \theta_{1,1} \quad \theta_{1,2} \quad \theta_{2,1} \quad \theta_{2,2}]^T$$

$$\mathbf{Q}^{\#} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{Q}^{\circ} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

# Algoritmo de modelagem

## Paralelos: Exemplo

$$\mathbf{q}^{\#} = [\theta_{1,1} \quad \theta_{2,1}]^T$$

$$\mathbf{q}^{\circ} = [x \quad y \quad z \quad \theta_{1,2} \quad \theta_{2,2}]^T$$

# Algoritmo de modelagem

## Paralelos: Exemplo

$$\mathbf{q}^{\#} = [\theta_{1,1} \quad \theta_{2,1}]^T$$

$$\mathbf{q}^{\circ} = [x \quad y \quad z \quad \theta_{1,2} \quad \theta_{2,2}]^T$$

$$\mathbf{Q}^{\#} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{Q}^{\circ} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Variáveis controladas

Posição do efetuador

# Controle

## Variáveis controladas

Posição do efetuador

## Variáveis monitoradas

Coordenadas dos atuadores

# Controle

## Variáveis controladas

Posição do efetuador

## Variáveis monitoradas

Coordenadas dos atuadores

## Variáveis manipuladas

Torque aplicado pelos atuadores

# Controle

## Variáveis controladas

Posição do efetuador

## Variáveis monitoradas

Coordenadas dos atuadores

## Variáveis manipuladas

Torque aplicado pelos atuadores

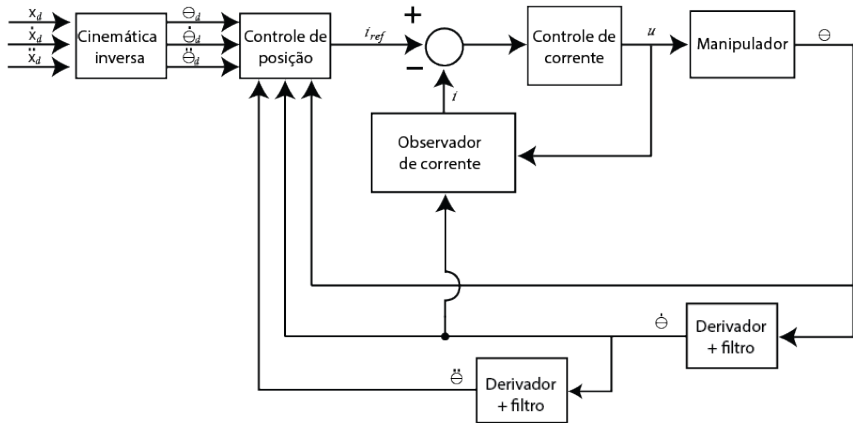
## Estruturas de controle

- Espaço das juntas
- Espaço da tarefa



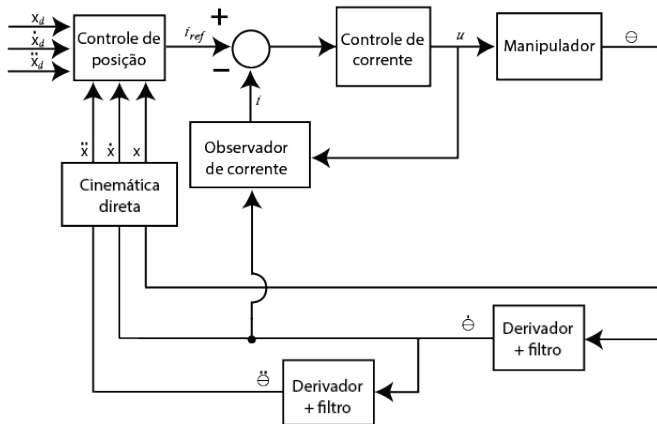
# Controle

## Espaço das juntas



# Controle

## Espaço das tarefa



# Controle

Lei de controle proposta

# Controle

## Lei de controle proposta

### Lei de controle

$$u = \hat{H}(q) \left( \ddot{q}_d^{\#} + \underline{k}_v \dot{e} + \underline{k}_p e + \int_0^t \underline{k} \operatorname{sat}(s/\phi) d\tau \right) + \hat{h}(q, \dot{q})$$

Sendo:

$$s = \ddot{e} + \underline{k}_v \dot{e} + \underline{k}_p e$$

# Controle

## Lei de controle proposta

### Lei de controle

$$u = \hat{H}(q) \left( \ddot{q}_d^{\#} + \underline{k}_v \dot{e} + \underline{k}_p e + \int_0^t \underline{k} \operatorname{sat}(s/\phi) d\tau \right) + \hat{h}(q, \dot{q})$$

Sendo:

$$s = \ddot{e} + \underline{k}_v \dot{e} + \underline{k}_p e$$

### Modelo dinâmico

$$H(q)\ddot{q}^{\#} + h(q, \dot{q}) = u$$

Sendo:

$$h(q, \dot{q}) = g(q) + \sum_{i=1}^{\nu^{\#}} \sum_{j=i}^{\nu^{\#}} h_{ij}(q) \dot{q}_i^{\#} \dot{q}_j^{\#}$$

# Controle

Lei de controle proposta

# Controle

## Lei de controle proposta

PD

$$u = m^* \left( \ddot{q}_d^{\#} + \underline{k}_v \dot{e} + \underline{k}_p e \right)$$

# Controle

## Lei de controle proposta

### PD

$$u = m^* \left( \ddot{q}_d^{\#} + \underline{k}_v \dot{e} + \underline{k}_p e \right)$$

### PDMD

$$u = m^* \left( \ddot{q}_d^{\#} + \underline{k}_v \dot{e} + \underline{k}_p e + \int_0^t \underline{k} \operatorname{sat}(s/\phi) d\tau \right)$$



# Controle

## Lei de controle proposta

PD

$$u = m^* \left( \ddot{q}_d^{\#} + \underline{k}_v \dot{e} + \underline{k}_p e \right)$$

PDMD

$$u = m^* \left( \ddot{q}_d^{\#} + \underline{k}_v \dot{e} + \underline{k}_p e + \int_0^t \underline{k} \operatorname{sat}(s/\phi) d\tau \right)$$

TC

$$u = \hat{H}(q) \left( \ddot{q}_d^{\#} + \underline{k}_v \dot{e} + \underline{k}_p e \right) + \hat{h}(q, \dot{q})$$

# Controle

## Lei de controle proposta

### PD

$$u = m^* \left( \ddot{q}_d^{\#} + \underline{k}_v \dot{e} + \underline{k}_p e \right)$$

### PDMD

$$u = m^* \left( \ddot{q}_d^{\#} + \underline{k}_v \dot{e} + \underline{k}_p e + \int_0^t \underline{k} \operatorname{sat}(s/\phi) d\tau \right)$$

### TC

$$u = \hat{H}(q) \left( \ddot{q}_d^{\#} + \underline{k}_v \dot{e} + \underline{k}_p e \right) + \hat{h}(q, \dot{q})$$

### TCMD

$$u = \hat{H}(q) \left( \ddot{q}_d^{\#} + \underline{k}_v \dot{e} + \underline{k}_p e + \int_0^t \underline{k} \operatorname{sat}(s/\phi) d\tau \right) + \hat{h}(q, \dot{q})$$

# Controle

## Parâmetros do controlador

# Controle

## Parâmetros do controlador

$\underline{k}_p$  e  $\underline{k}_v$

- Fazem a alocação dos pólos do sistema em malha fechada
- Comumente é utilizado amortecimento crítico

$$\underline{k}_p = \lambda^2 \mathbf{1}; \quad \underline{k}_v = 2\lambda \mathbf{1}$$

# Controle

## Parâmetros do controlador

$\underline{k}_p$  e  $\underline{k}_v$

- Fazem a alocação dos pólos do sistema em malha fechada
- Comumente é utilizado amortecimento crítico

$$\underline{k}_p = \lambda^2 \mathbf{1}; \quad \underline{k}_v = 2\lambda \mathbf{1}$$

$m^*$

- Parâmetro de pré-alimentação de aceleração
- Em um sistema linear SISO, o valor ótimo seria a inércia do sistema

$\phi$

- Comprimento da camada limite
- Parâmetro utilizado para aliviar o *chattering*
- Relacionado com o erro máximo em regime permanente

$$\phi = e_{max}/\lambda^2$$

# Controle

## Parâmetros do controlador

$\phi$

- Comprimento da camada limite
- Parâmetro utilizado para aliviar o *chattering*
- Relacionado com o erro máximo em regime permanente

$$\phi = e_{max}/\lambda^2$$

$k$

- Parâmetro de supressão de erros de modelagem
- Valores muito altos podem gerar *chattering*
- Pode ser obtido através da lei de adaptação proposta ou experimentalmente

# Resultados

## Simulações

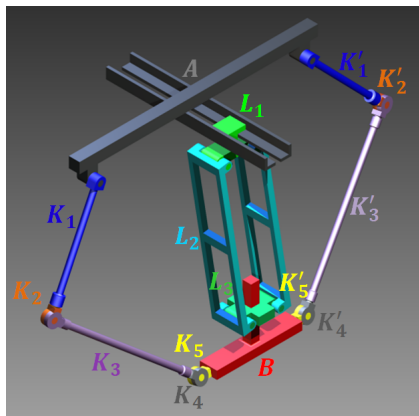


# Resultados

## Simulações

### Mecanismo

2RSU + PPaP



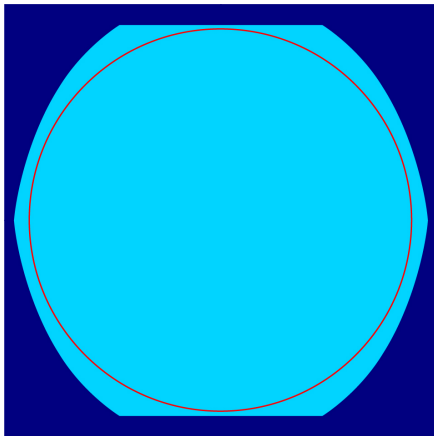
(Orsino 2012)

# Resultados

## Simulações

### Trajetoória de referência

Círculo com 740mm de diâmetro, velocidade tangencial de 1.0m/s.



# Resultados

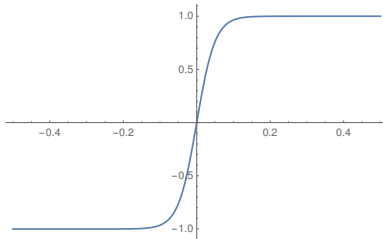
## Simulações

### Parâmetros do controlador

- $\lambda = 50.0 \Rightarrow$  Tempo de assentamento de  $0.08s$
- $\eta = 20.0 \Rightarrow$  Tempo de chegada a  $s = 0$  menor que  $0.05s$

### Função de saturação

$$f_{sat}(x) = \tanh(20x)$$

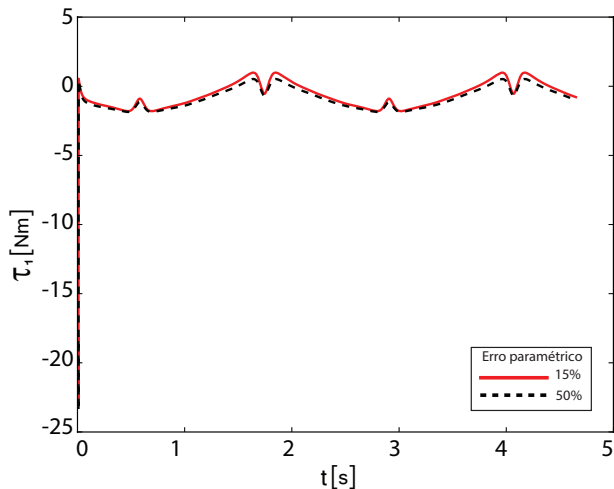


# Resultados

## Simulações

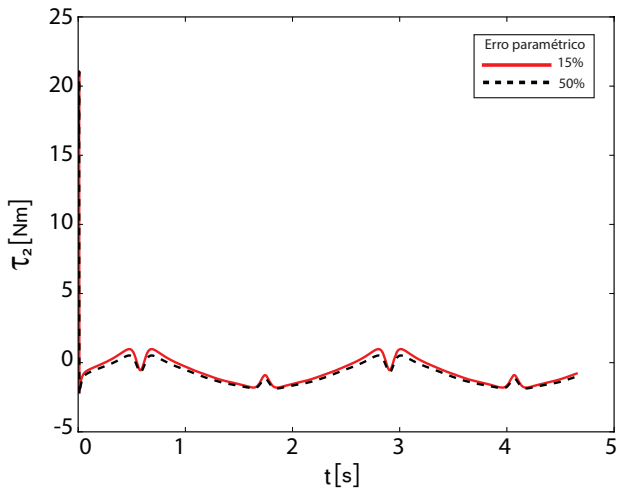
# Resultados

## Simulações



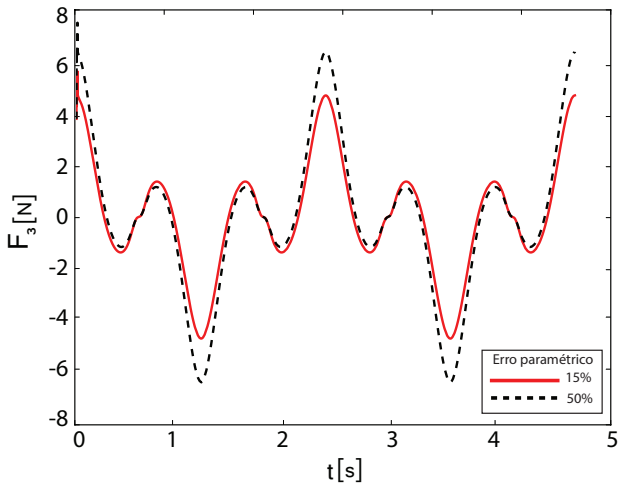
# Resultados

## Simulações



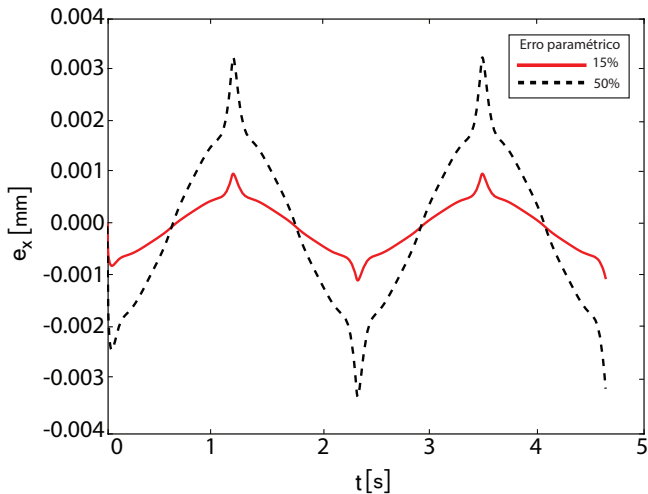
# Resultados

## Simulações



# Resultados

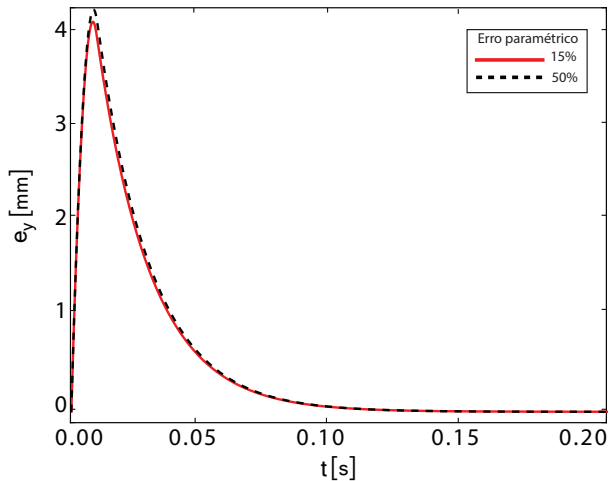
## Simulações





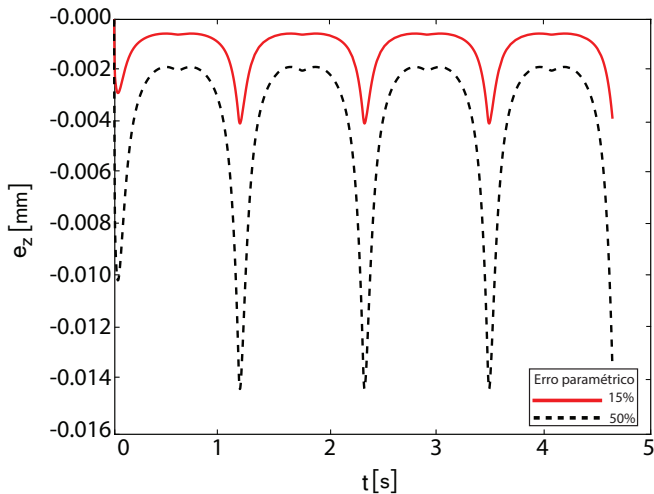
# Resultados

## Simulações



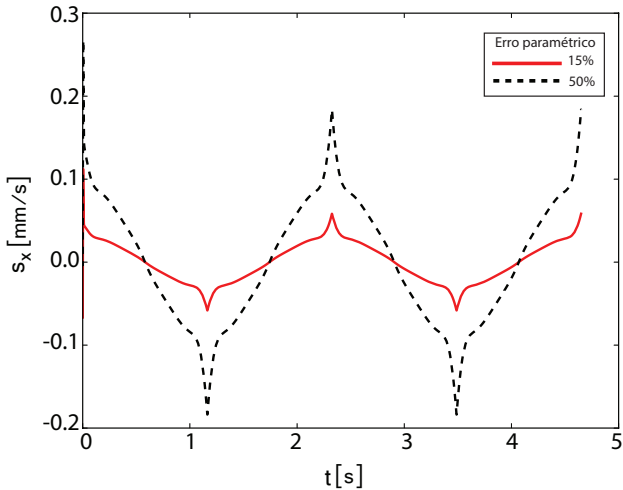
# Resultados

## Simulações



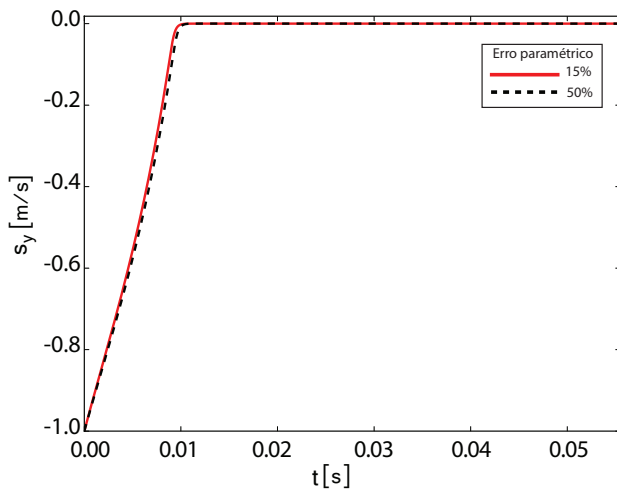
# Resultados

## Simulações



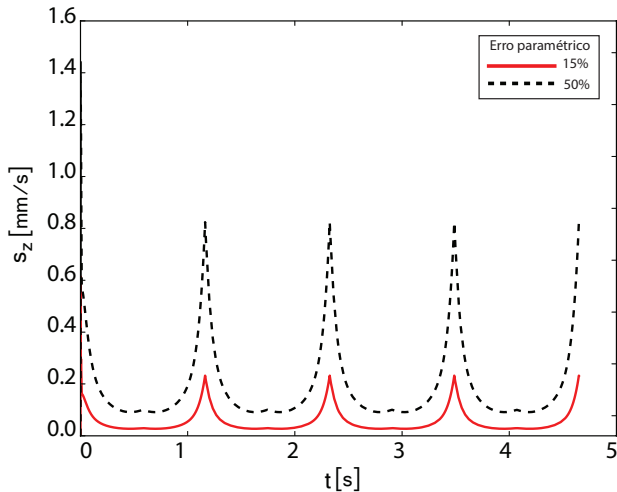
# Resultados

## Simulações

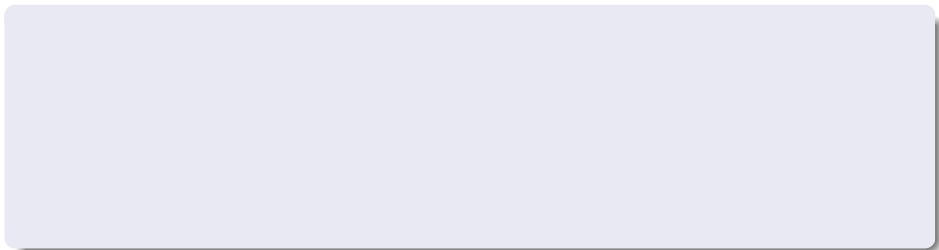


# Resultados

## Simulações



# Conclusões parciais



- É fundamental a utilização linguagens de alta eficiência computacional para realizar simulações dinâmicas de modelos completos de mecanismos complexos

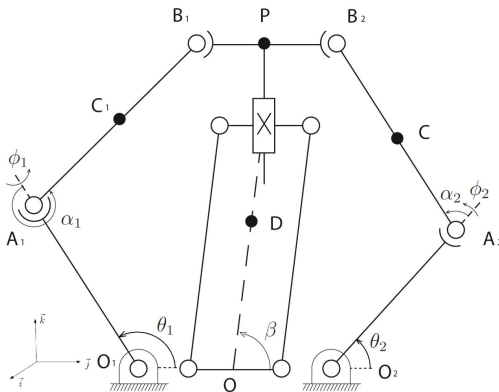
# Conclusões parciais

- É fundamental a utilização linguagens de alta eficiência computacional para realizar simulações dinâmicas de modelos completos de mecanismos complexos
- É possível obter alto desempenho no controle mecanismos paralelos em altas velocidades/acelerações utilizando técnicas de controle não linear robusto, mesmo com altos níveis de incertezas paramétricas



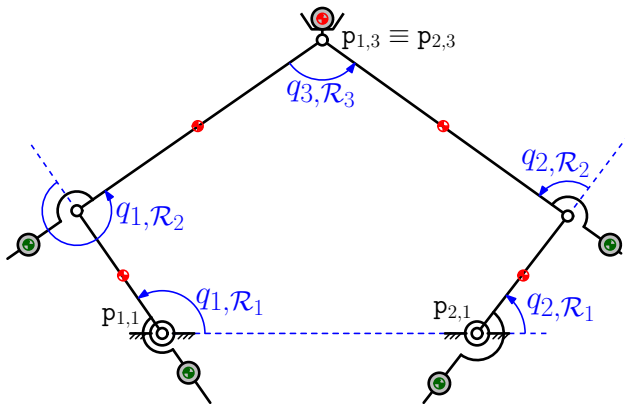
BioRob 2014

“Development of a Controller of a 3-Dof Robotic Platform for User Interaction in Rehabilitation Therapies”



## Capítulo de livro

“Dynamic Modelling and Control of balanced parallel mechanisms”



## International Journal of Mechanisms and Robotic Systems

“A new approach for obtaining the dynamic balancing conditions in serial mechanisms”

