

# Contribuições à modelagem e controle de manipuladores paralelos

André Garnier Coutinho

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Novembro de 2019

# Motivação

## Mecanismos paralelos

# Motivação

## Mecanismos paralelos

### Características

### Características

#### Positivas:

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

### Características

#### Positivas:

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

#### Negativas:

- Pequena área de trabalho
- Dinâmica complexa e não linear

# Motivação

Mecanismos paralelos

## Aplicações

- Pick-and-place



# Motivação

## Mecanismos paralelos

### Aplicações

- Simuladores

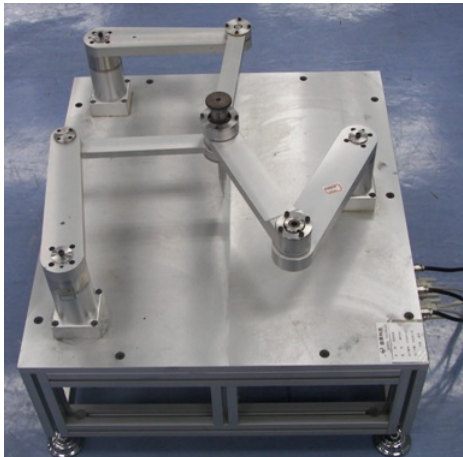


# Motivação

## Mecanismos paralelos

### Aplicações

- Usinagem

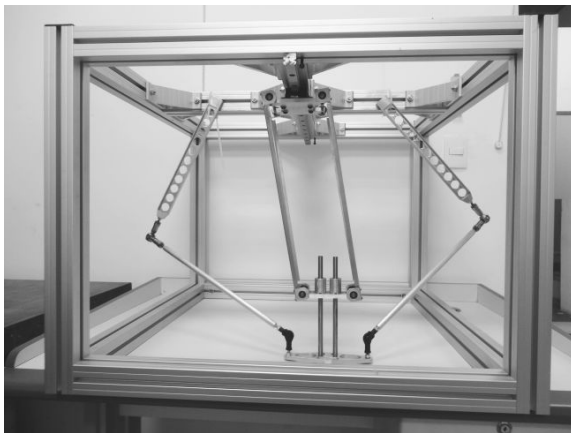






# Motivação

Grupo de pesquisa

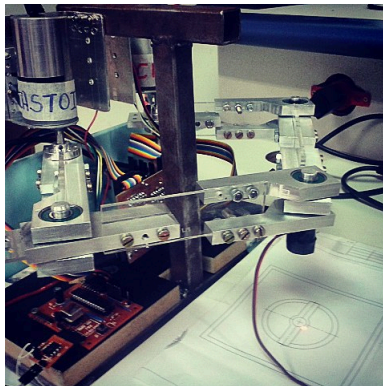


## 2RSU + PPaP

- 2008 – D. Rinaldi: Concepção da arquitetura e projeto mecânico
- 2009 – V. Kumazawa: Otimização do espaço de trabalho
- 2013
  - R. de Almeida: Modelagem dinâmica e simulações de CTC
  - A. Coutinho e G. Dobrianskyj: Modelagem dinâmica e simulações de controle de força
- Atualmente
  - D. Rinaldi: Construção do protótipo e identificação dos parâmetros
  - V. Hartmann: Validação e implementação de técnicas de controle no protótipo

## Pentágono articulado

J. de Oliveira e V. Bartholomeu: Construção do protótipo, modelagem dinâmica e validação experimental de técnicas de controle robusto

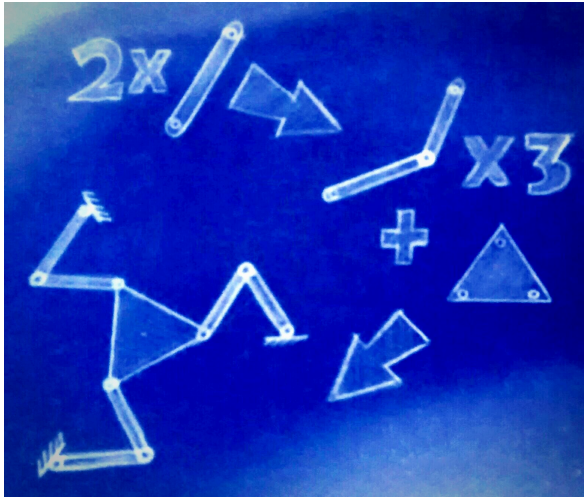


# Motivação

Metodologia modular de modelagem

# Motivação

Metodologia modular de modelagem



(Orsino 2015)

# Motivação

## Controle

### Controle descentralizado



### Controle descentralizado

Projeto de controlador de posição para os atuadores, considerando torques do mecanismo como distúrbio

### Controle descentralizado

Projeto de controlador de posição para os atuadores, considerando torques do mecanismo como distúrbio

### Vantagens

- Modelagem simples
- Lei de controle pouco custosa

### Controle descentralizado

Projeto de controlador de posição para os atuadores, considerando torques do mecanismo como distúrbio

### Vantagens

- Modelagem simples
- Lei de controle pouco custosa

### Desvantagens

- Necessita de redutores com altas relações de transmissão
- Desempenho muito limitado

### Controle centralizado

### Controle centralizado

Projeto de controlador de posição considerando a dependência entre as variáveis controladas (baseado no modelo dinâmico)

### Controle centralizado

Projeto de controlador de posição considerando a dependência entre as variáveis controladas (baseado no modelo dinâmico)

### Vantagens

- Maior desempenho: é possível realizar trajetórias em maiores velocidades
- Permite utilizar *direct drive*

### Controle centralizado

Projeto de controlador de posição considerando a dependência entre as variáveis controladas (baseado no modelo dinâmico)

### Vantagens

- Maior desempenho: é possível realizar trajetórias em maiores velocidades
- Permite utilizar *direct drive*

### Desvantagens

- Modelo dinâmico de difícil obtenção
- Lei de controle de alto custo computacional

### Proposta

Tornar possível o projeto e implementação de controladores:

- De alto desempenho
- Adequados ao controle de trajetória de mecanismos paralelos
- Que possam sintetizar leis de controle com menor custo computacional
- Alta robustez



### Proposta

Tornar possível o projeto e implementação de controladores:

- De alto desempenho
- Adequados ao controle de trajetória de mecanismos paralelos
- Que possam sintetizar leis de controle com menor custo computacional
- Alta robustez

### Como?

### Proposta

Tornar possível o projeto e implementação de controladores:

- De alto desempenho
- Adequados ao controle de trajetória de mecanismos paralelos
- Que possam sintetizar leis de controle com menor custo computacional
- Alta robustez

### Como?

- Desenvolvimento e implementação de algoritmo genérico de modelagem e controle de mecanismos paralelos

### Proposta

Tornar possível o projeto e implementação de controladores:

- De alto desempenho
- Adequados ao controle de trajetória de mecanismos paralelos
- Que possam sintetizar leis de controle com menor custo computacional
- Alta robustez

### Como?

- Desenvolvimento e implementação de algoritmo genérico de modelagem e controle de mecanismos paralelos
- Utilização de técnicas de controle robusto

# Motivação

## Controle

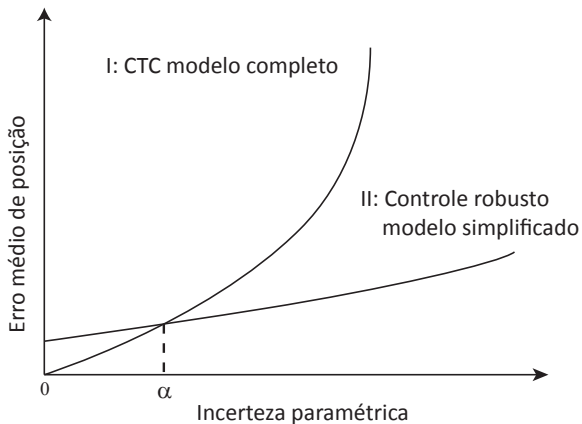
Técnica	Desempenho	Custo	Implement.	Modelagem
PID	Baixo	Baixo	Simples	Simples
CTC <sup>1</sup>	Médio	Médio	Mediana	Mediana
Adaptativo <sup>1</sup>	Médio/Alto	Médio/Alto	Complexa	Complexa
CTC <sup>2</sup>	Alto	Alto	Complexa	Complexa
CMD <sup>2</sup>	Alto	Médio	Complexa	Complexa

1: Modelo simplificado

2: Modelo completo

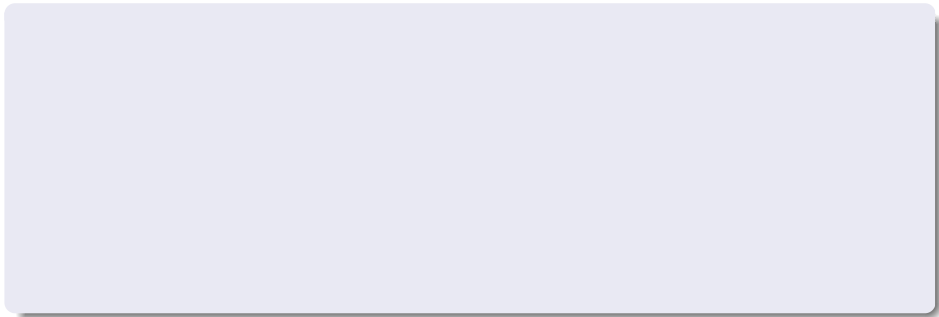
# Motivação

## Controle



(Slotine 1985)

# Objetivos



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

- Desenvolvimento de um algoritmo gerador de modelos dinâmicos completos de mecanismos paralelos, de forma implícita
- Elaboração de uma metodologia de projeto de controlador não linear robusto, de alto desempenho, aplicável a mecanismos paralelos



# Objetivos

- Desenvolvimento de um algoritmo gerador de modelos dinâmicos completos de mecanismos paralelos, de forma implícita
- Elaboração de uma metodologia de projeto de controlador não linear robusto, de alto desempenho, aplicável a mecanismos paralelos
- Comparação da lei de controle proposta com outras leis de controle encontradas na literatura, através de simulações e validações experimentais

# Escopo

## Algoritmo de modelagem

# Escopo

## Algoritmo de modelagem

Considera

# Escopo

## Algoritmo de modelagem

### Considera

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

# Escopo

## Algoritmo de modelagem

### Considera

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

# Escopo

## Algoritmo de modelagem

### Considera

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

### Não considera

# Escopo

## Algoritmo de modelagem

### Considera

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

### Não considera

- Folga nas juntas
- Deformações

# Escopo

Lei de controle proposta



# Escopo

Lei de controle proposta

Variáveis controladas

Posição / orientação do efetuador

# Escopo

Lei de controle proposta

## Variáveis controladas

Posição / orientação do efetuador

## Variáveis monitoradas

Coordenadas dos atuadores

# Escopo

Lei de controle proposta

## Variáveis controladas

Posição / orientação do efetuador

## Variáveis monitoradas

Coordenadas dos atuadores

## Dependência entre variáveis controladas

Controle centralizado baseado em modelo

# Escopo

Lei de controle proposta

## Variáveis controladas

Posição / orientação do efetuador

## Variáveis monitoradas

Coordenadas dos atuadores

## Dependência entre variáveis controladas

Controle centralizado baseado em modelo

## Estratégia de controle

Controle por modos deslizantes

# Escopo

## Lei de controle proposta

### Considera

- Incertezas paramétricas
- Erros na compensação dinâmica
- Dinâmica dos atuadores

# Escopo

## Lei de controle proposta

### Considera

- Incertezas paramétricas
- Erros na compensação dinâmica
- Dinâmica dos atuadores

### Objetivos

- Alta robustez
- Alto desempenho em altas velocidades/acelerações
- Baixo custo computacional

# Algoritmo de modelagem

## Formulação implícita

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



# Algoritmo de modelagem

## Metódos de modelagem dinâmica

# Algoritmo de modelagem

## Metódos de modelagem dinâmica

- Newton-Euler (1760)
- Princípio de D'Alembert (1742)
- Lagrange (1788)
- Hamilton (1833)
- Gibbs-Appel (1879-1900)
- Maggi (1896)
- Boltzmann-Hamel (1901)
- Kane (1965)
- Udwadia-Kalaba (1992)
- Orsino (2015)

# Algoritmo de modelagem

## Metódos de modelagem dinâmica

- Newton-Euler (1760)
- **Princípio de D'Alembert (1742)**
- Lagrange (1788)
- Hamilton (1833)
- Gibbs-Appel (1879-1900)
- Maggi (1896)
- Boltzmann-Hamel (1901)
- Kane (1965)
- Udwadia-Kalaba (1992)
- Orsino (2015)

# Algoritmo de modelagem

## Metódos de modelagem dinâmica

- Newton-Euler (1760)
- Princípio de D'Alembert (1742)
- Lagrange (1788)
- Hamilton (1833)
- Gibbs-Appel (1879-1900)
- Maggi (1896)
- Boltzmann-Hamel (1901)
- Kane (1965)
- Udwadia-Kalaba (1992)
- Orsino (2015)

Metódos que permitem formulação implícita

## Metódos que permitem formulação implícita

- Newton-Euler
- Kane
- Udwadia-Kalaba
- Orsino

# Algoritmo de modelagem

## Metódos que permitem formulação implícita

- Newton-Euler
- Kane
- Udwadia-Kalaba
- Orsino

## Método escolhido

# Algoritmo de modelagem

## Metódos que permitem formulação implícita

- Newton-Euler
- Kane
- Udwadia-Kalaba
- Orsino

## Método escolhido

Método Orsino:



# Algoritmo de modelagem

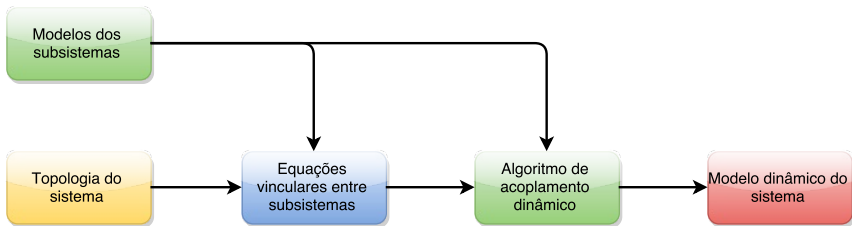
## Metódos que permitem formulação implícita

- Newton-Euler
- Kane
- Udwadia-Kalaba
- Orsino

## Método escolhido

Método Orsino: Permite realizar a modelagem de maneira modular

# Algoritmo de modelagem



(Orsino 2016)

# Algoritmo de modelagem

## Seriais

# Algoritmo de modelagem

## Seriais

### Dados de entrada

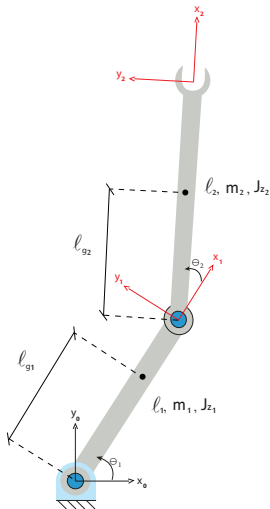
- Parâmetros de Denavit-Hartenberg ( $a_i, \alpha_i, \theta_i, d_i$ )
- Posição dos centros de massa em relação aos sistemas  $B_i$  ( $x_i, y_i, z_i$ )
- Massa  $m_i$  de cada ligamento
- Tensor de inércia  $[I_i]_{B_i | B_i}$  em relação ao centro de massa de cada ligamento
- Vetor aceleração gravitacional 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

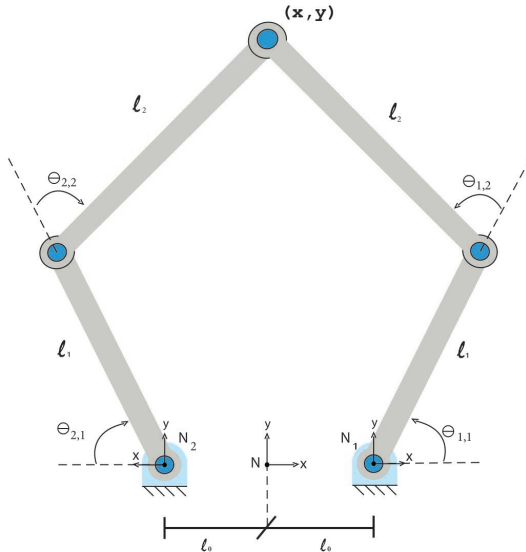
- Modelo da plataforma/efetuador
- Modelo das cadeias seriais
- Matrizes constantes que descrevem a arquitetura do mecanismo ( $\mathcal{D}$ ,  $\mathcal{D}$ ,  $\mathcal{E}$ ,  $\mathcal{F}$ ,  $\mathcal{P}$ ,  $\mathcal{Q}$ ,  $\mathcal{R}$ )

# Algoritmo de modelagem

Paralelos: Exemplo

# Algoritmo de modelagem

## Paralelos: Exemplo



# Algoritmo de modelagem

## Paralelos: Exemplo

$$q^{\#} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot x_1(q_1) + \begin{bmatrix} l_0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$q^{\#} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot x_2(q_2) + \begin{bmatrix} -l_0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

# Algoritmo de modelagem

## Paralelos: Exemplo

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

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

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

# Algoritmo de modelagem

## Paralelos: Exemplo

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

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

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

$$\bar{\omega}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = [\emptyset]$$

# Algoritmo de modelagem

## Paralelos: Exemplo

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

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

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

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

$$\mathbb{P} = \mathbb{Q} = \mathbb{R} = [\emptyset]$$

# Controle

## Lei de controle proposta



### Modelo dinâmico

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

Sendo:

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

### Modelo dinâmico

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

Sendo:

$$\mathbb{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}^\#) = \mathbb{\delta}(\mathbf{q}) + \sum_{i=1}^{\nu^\#} \sum_{j=1}^i \mathbb{\delta}_{i,j}(\mathbf{q}) \dot{q}_i^\# \dot{q}_j^\#$$

### Modelo dinâmico estimado

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

Sendo:

$$\hat{\mathbb{h}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}^\#) = \hat{\mathbb{\delta}}(\mathbf{q}) + \sum_{i=1}^{\nu^\#} \sum_{j=1}^i \hat{\mathbb{\delta}}_{i,j}(\mathbf{q}) \dot{q}_i^\# \dot{q}_j^\#$$

### Medidores do erro de modelagem

$$\Delta(q) = H(q)^{-1} \hat{H}(q) - \mathbb{1}$$

$$\delta_0(q) = H(q)^{-1} (\hat{\delta}(q) - \delta(q))$$

$$\delta_{i,j}(q) = H(q)^{-1} (\hat{\delta}_{i,j}(q) - \delta_{i,j}(q))$$

### Lei de controle

$$u = \hat{h} + \hat{H}(\ddot{q}_d^{\#} + \underline{\lambda}\dot{e} + \underline{k}\text{sign}(\dot{e} + \underline{\lambda}e))$$

### Lei de controle

$$u = \hat{h} + \hat{H}(\ddot{q}_d^{\#} + \underline{\lambda}\dot{e} + \underline{k}\text{sign}(\dot{e} + \underline{\lambda}e))$$

Sendo:

$$\text{diag}(\underline{k}) = \eta + \Gamma|\ddot{q}_d^{\#} + \underline{\lambda}\dot{e}| + \sum_{i=1}^{\nu^{\#}} \sum_{j=1}^i \eta_{i,j} |\dot{q}_i^{\#}| |\dot{q}_j^{\#}|$$

$$\Gamma = (\mathbb{1} - |\Delta|_{\max})^{-1} |\Delta|_{\max}$$

$$\eta = (\mathbb{1} - |\Delta|_{\max})^{-1} (|\delta_0|_{\max} + \text{diag}(\eta\mathbb{1}))$$

$$\eta_{i,j} = (\mathbb{1} - |\Delta|_{\max})^{-1} |\delta_{i,j}|_{\max}$$

# Controle

## Metodologia de projeto



- Discretizar o espaço de trabalho em um número finito de pontos

- Discretizar o espaço de trabalho em um número finito de pontos
- Para cada ponto, calcular  $|\Delta|$ ,  $|\delta_0|$  e  $|\delta_{i,j}|$  para todas as combinações possíveis de parâmetros, com os parâmetros podendo assumir seu valor mínimo e seu valor máximo

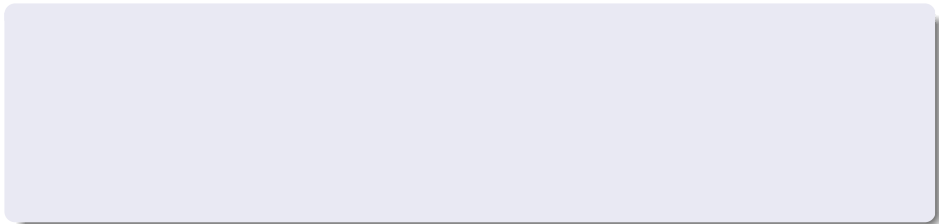


- Discretizar o espaço de trabalho em um número finito de pontos
- Para cada ponto, calcular  $|\Delta|$ ,  $|\delta_0|$  e  $|\delta_{i,j}|$  para todas as combinações possíveis de parâmetros, com os parâmetros podendo assumir seu valor mínimo e seu valor máximo
- Obter o valor máximo de  $|\Delta|$ ,  $|\delta_0|$  e  $|\delta_{i,j}|$  para cada ponto.

- Discretizar o espaço de trabalho em um número finito de pontos
- Para cada ponto, calcular  $|\Delta|$ ,  $|\delta_0|$  e  $|\delta_{i,j}|$  para todas as combinações possíveis de parâmetros, com os parâmetros podendo assumir seu valor mínimo e seu valor máximo
- Obter o valor máximo de  $|\Delta|$ ,  $|\delta_0|$  e  $|\delta_{i,j}|$  para cada ponto.
- Obter o valor máximo de  $|\Delta|$ ,  $|\delta_0|$  e  $|\delta_{i,j}|$  para o espaço de trabalho, a partir do valor máximo em cada ponto.

# Controle

## Vantagens da lei proposta



- Alto desempenho, mesmo em altas velocidades/acelerações

- Alto desempenho, mesmo em altas velocidades/acelerações
- Insensível incertezas paramétricas

- Alto desempenho, mesmo em altas velocidades/acelerações
- Insensível incertezas paramétricas
- Baixo custo computacional, visto que é possível tabular  $\hat{H}$ ,  $\hat{\theta}$  e  $\hat{\theta}_{i,j}$

- Alto desempenho, mesmo em altas velocidades/acelerações
- Insensível incertezas paramétricas
- Baixo custo computacional, visto que é possível tabular  $\hat{H}$ ,  $\hat{\theta}$  e  $\hat{\theta}_{i,j}$
- Alta robustez

# Resultados

## Simulações

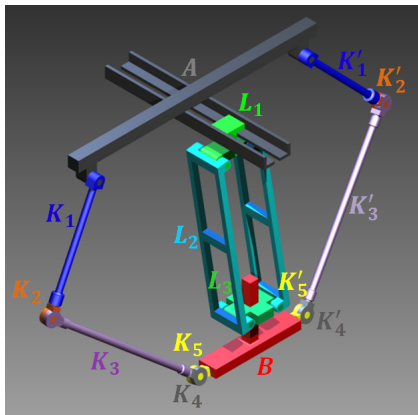


# Resultados

## Simulações

### Mecanismo

2RSU + PPaP



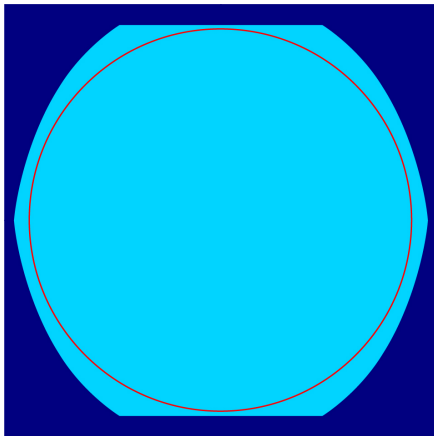
(Orsino 2012)

# Resultados

## Simulações

### Trajetoória de referência

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



# Resultados

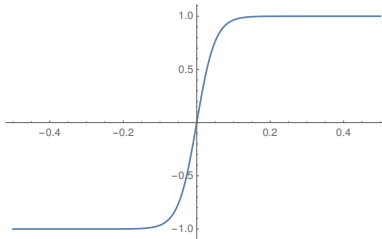
## Simulações

### 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

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

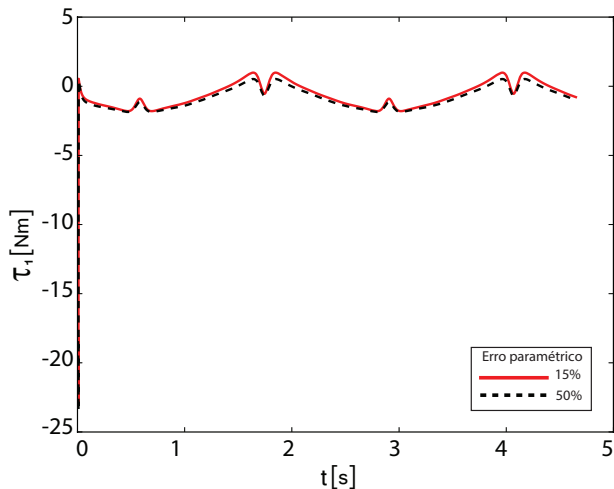


# Resultados

## Simulações

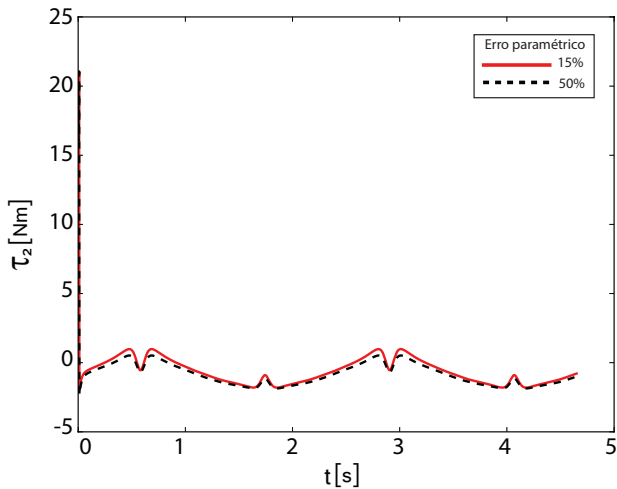
# Resultados

## Simulações



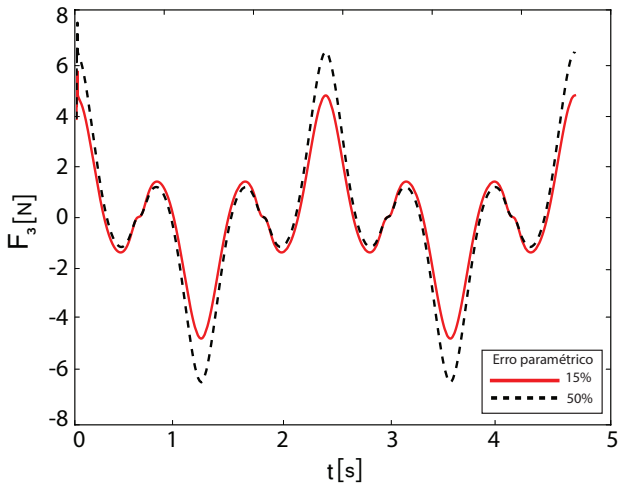
# Resultados

## Simulações



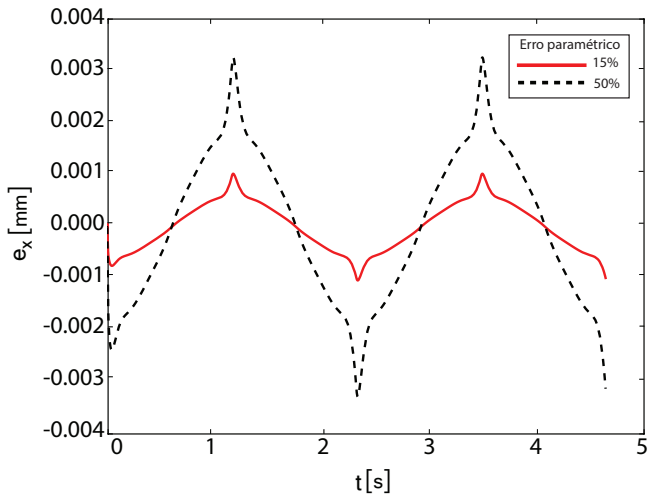
# Resultados

## Simulações



# Resultados

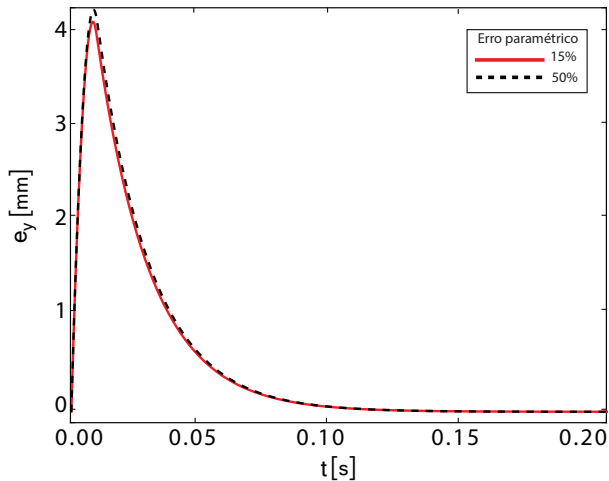
## Simulações





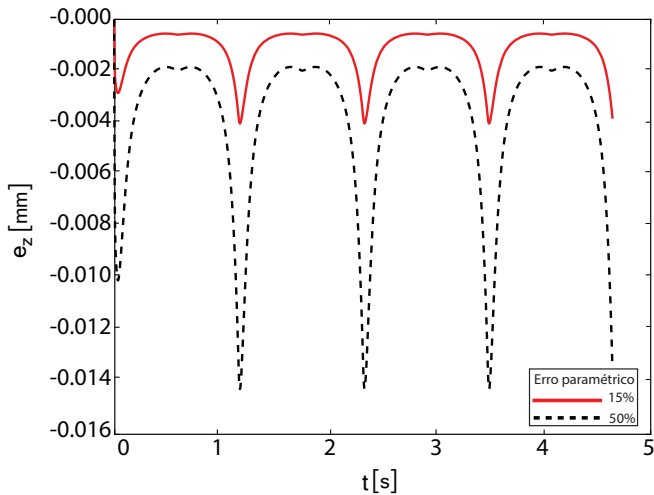
# Resultados

## Simulações



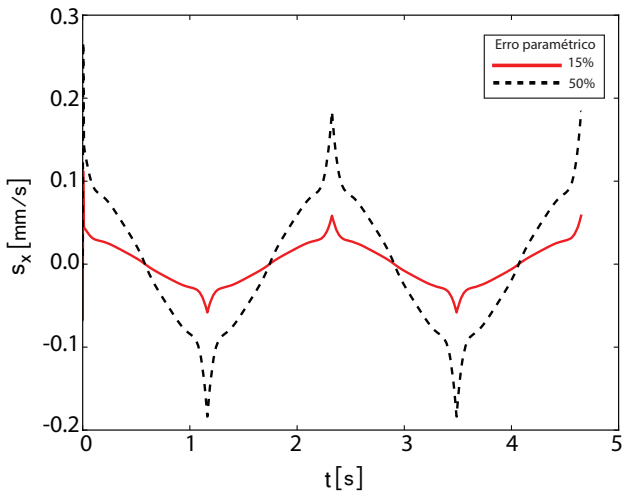
# Resultados

## Simulações



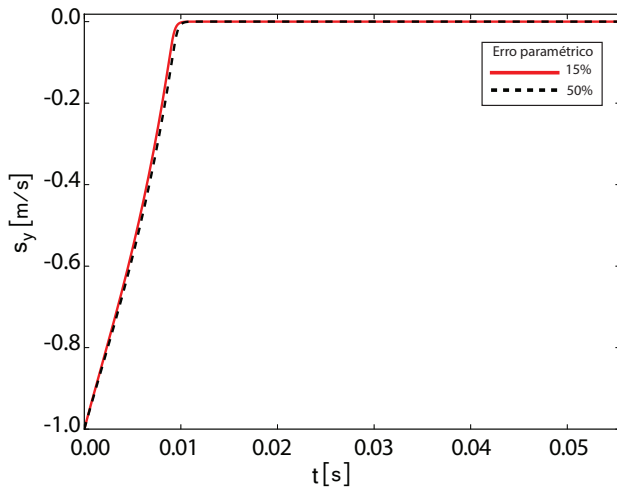
# Resultados

## Simulações



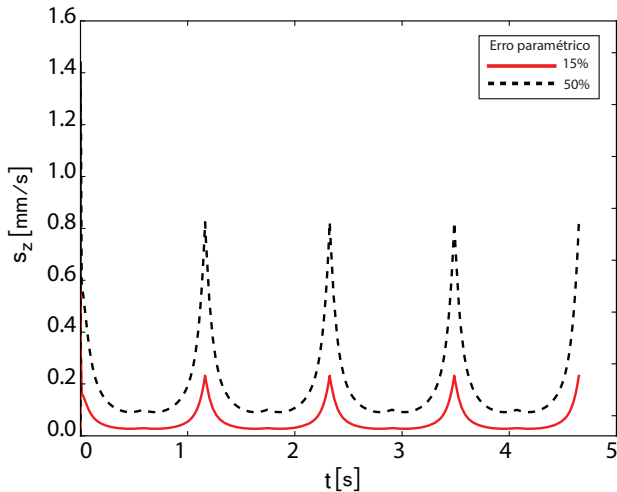
# Resultados

## Simulações

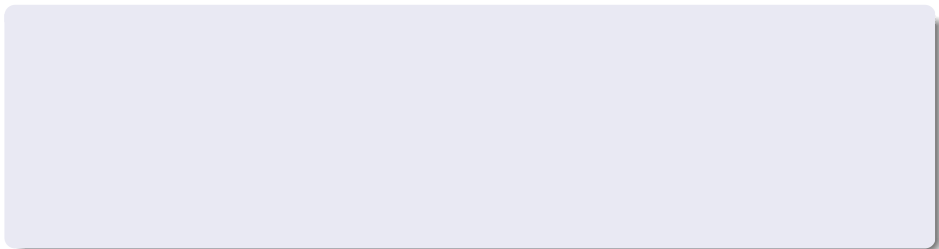


# Resultados

## Simulações



# Conclusões parciais



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

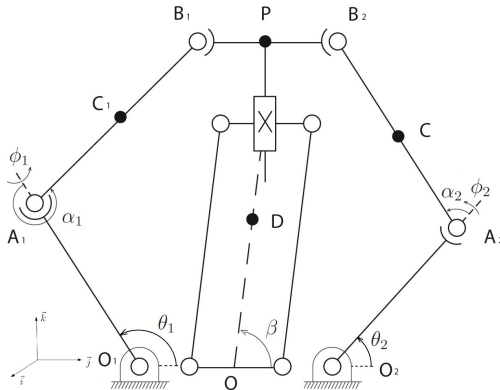
# Conclusões parciais

- 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



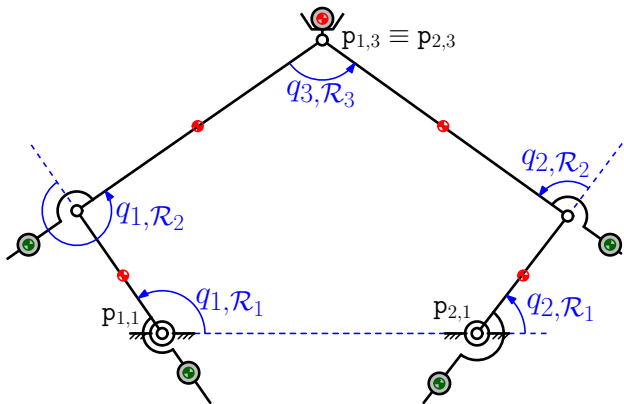
# BioRob 2014

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



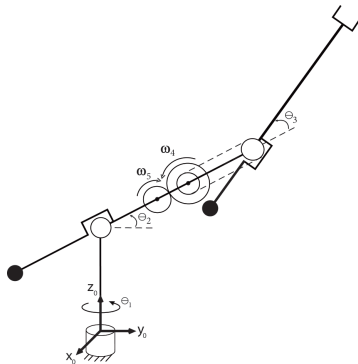
## Capítulo de livro

“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”



# Cronograma

- (1) Inclusão de atritos nas juntas e da dinâmica eletro-mecânica dos atuadores no algoritmo de modelagem

- (1) Inclusão de atritos nas juntas e da dinâmica eletro-mecânica dos atuadores no algoritmo de modelagem
- (2) Projeto e simulação de controlador por tensão para os mecanismos 5R e 2RSU+PPaP

- (1) Inclusão de atritos nas juntas e da dinâmica eletro-mecânica dos atuadores no algoritmo de modelagem
- (2) Projeto e simulação de controlador por tensão para os mecanismos 5R e 2RSU+PPaP
- (3) Validação experimental dos controladores projetados, utilizando os protótipos

- (1) Inclusão de atritos nas juntas e da dinâmica eletro-mecânica dos atuadores no algoritmo de modelagem
- (2) Projeto e simulação de controlador por tensão para os mecanismos 5R e 2RSU+PPaP
- (3) Validação experimental dos controladores projetados, utilizando os protótipos
- (4) Escrever artigos sobre modelagem e controle de mecanismos paralelos



- (1) Inclusão de atritos nas juntas e da dinâmica eletro-mecânica dos atuadores no algoritmo de modelagem
- (2) Projeto e simulação de controlador por tensão para os mecanismos 5R e 2RSU+PPaP
- (3) Validação experimental dos controladores projetados, utilizando os protótipos
- (4) Escrever artigos sobre modelagem e controle de mecanismos paralelos
- (5) Avaliação geral dos resultados

- (1) Inclusão de atritos nas juntas e da dinâmica eletro-mecânica dos atuadores no algoritmo de modelagem
- (2) Projeto e simulação de controlador por tensão para os mecanismos 5R e 2RSU+PPaP
- (3) Validação experimental dos controladores projetados, utilizando os protótipos
- (4) Escrever artigos sobre modelagem e controle de mecanismos paralelos
- (5) Avaliação geral dos resultados
- (6) Preparo da tese

# Cronograma

Ativ./Quad.	3º/16	1º/17	2º/17	3º/17
(1)	██████			
(2)	██████	██████		
(3)		██████	██████	
(4)		██████	██████	██████
(5)				██████
(6)		██████	██████	██████