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

Características Promissoras

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

Inconveniêntes

Motivação

Mecanismos paralelos

Características Promissoras

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

Inconveniêntes

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

Aplicações

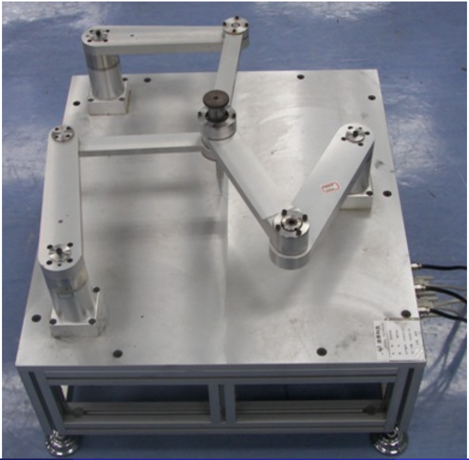
– Pick-and-place

Aplicações

– Simuladores

Aplicações

– Usinagem



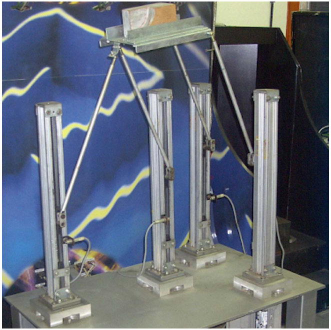
Motivação
Grupo de pesquisa

LaMMaR

Laboratório de Mecanismos, Máquinas e Robôs

Robôs

Giovanna



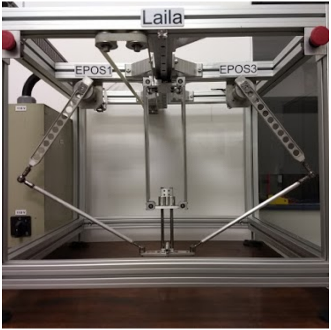
Motivação
Grupo de pesquisa

Robôs

Dora

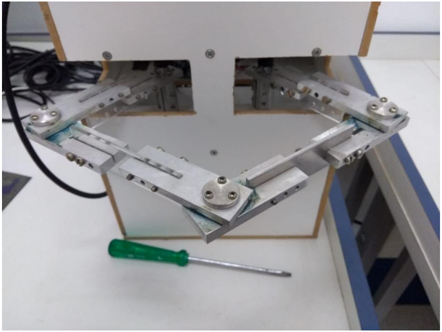
Robôs

Laila



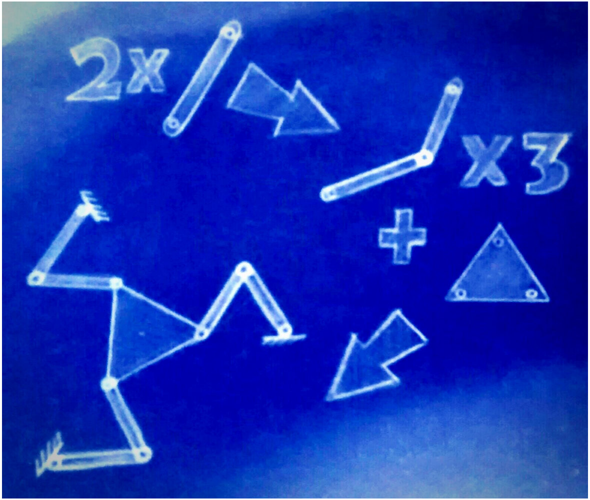
Robôs

Clara



Clara

- 2015
  - B. Ohashi: Síntese dimensional
  - V. Bartholomeu: Projeto e contrução 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



(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

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

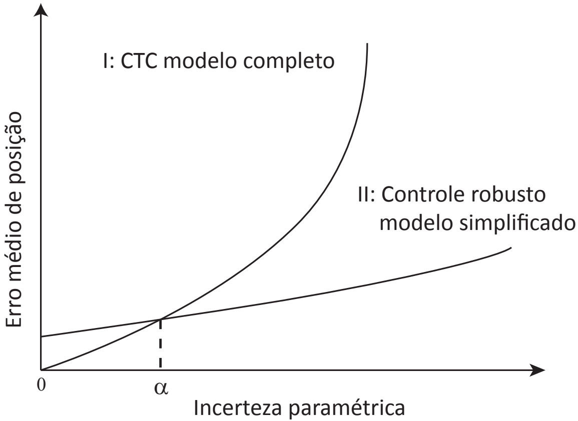
– Controle não linear robusto
– Pode ser baseado no modelo dinâmico do mecanismo

Vantagem

Desempenho menos dependente da qualidade do modelo

Desvantagem

Pode causar chattering



(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

Mecanismos Paralelos

- Translacionais
- Efetuador rígido

Mecanismos Paralelos

- Translacionais
- Efetuador rígido

Considera

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

Mecanismos Paralelos

- Translacionais
- Efetuador rígido

Considera

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

Não considera

- Folga nas juntas
- Deformações

Variáveis controladas

Posição do efetuador

Variáveis controladas

Posição do efetuador

Variáveis monitoradas

Coordenadas dos atuadores

Variáveis controladas

Posição do efetuador

Variáveis monitoradas

Coordenadas dos atuadores

Variáveis manipuladas

Torque aplicado pelos atuadores

Escopo

Leis de controle

Variáveis controladas

Posição do efetuador

Variáveis monitoradas

Coordenadas dos atuadores

Variáveis manipuladas

Torque aplicado pelos atuadores

Estratégias de controle

- Controle Proporcional Derivativo (PD)
- Controle por Torque Computado (TC)
- Controle Proporcional Derivativo + Modos Deslizantes (PDMD)
- Controle por Torque Computado + Modos Deslizantes (TCMD)

Algoritmo de modelagem

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)

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 que permitem formulação implícita

Algoritmo de modelagem

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

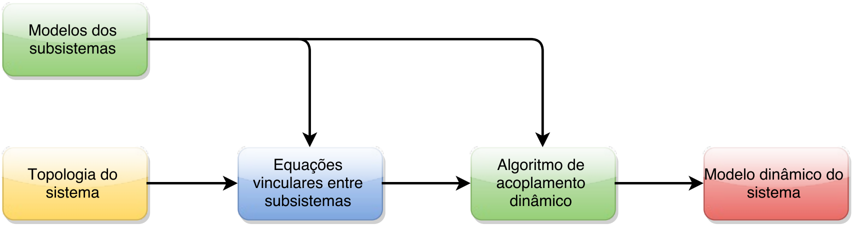
Metódos que permitem formulação implícita

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

Método escolhido

Método Orsino: Permite realizar a modelagem de maneira modular

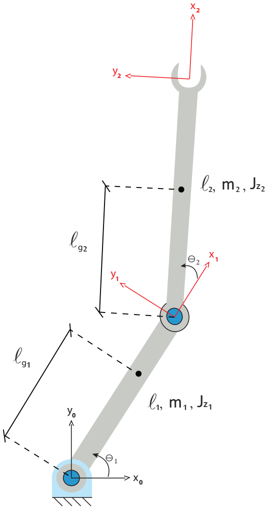
Algoritmo de modelagem



(Orsino 2016)

Dados de entrada

- Parâmetros de Denavit-Hartemberg (a_i, α_i, θ_i, d_i)
- Posição dos centros de massa em relação aos sistemas $\mathtt{B}_i$ (x_i, y_i, z_i)
- Massa m_i de cada ligamento
- Tensor de inércia $[\mathbf{I}_i]_{\mathtt{B}_i \mid \mathtt{B}_i}$ em relação ao centro de massa de cada ligamento
- Vetor aceleração gravitacional escrito no sistema fixo ($[\boldsymbol{g}]_{\mathtt{N}}$)


x_2
y_2
ℓ_2, m_2, J_{z_2}
ℓ_{g2}
θ_2
x_1
y_1
ℓ_{g1}
ℓ_1, m_1, J_{z_1}
y_0
θ_1
x_0

Ligamento	a_i	α_i	d_i	θ_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

$$[\mathbf{I}_1]_{\mathrm{B}_1 \mid \mathrm{B}_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Jz_1 & 0 \\ 0 & 0 & Jz_1 \end{bmatrix}$$

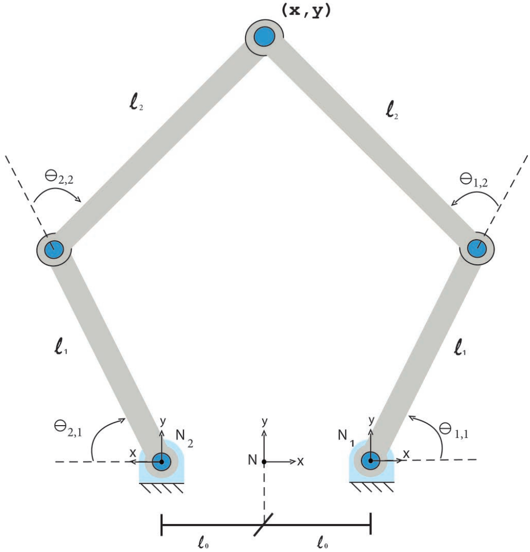
$$[\mathbf{I}_2]_{\mathrm{B}_2 \mid \mathrm{B}_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Jz_2 & 0 \\ 0 & 0 & Jz_2 \end{bmatrix}$$

$$[\boldsymbol{g}]_{\mathrm{N}} = \begin{bmatrix} 0 & -g & 0 \end{bmatrix}^{\mathsf{T}}$$

Dados de entrada

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

Algoritmo de modelagem
Paralelos: Exemplo



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

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

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

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

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

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

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

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

$$\bar{\omega}(\mathbb{q}, \dot{\mathbb{q}}) = [\varnothing]$$

$$\mathbb{d} = \begin{bmatrix} l_0 & 0 & -l_0 & 0 \end{bmatrix}^{\mathsf{T}}$$

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

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

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

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

Modelo dinâmico

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

Sendo:

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

Modelo dinâmico

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

Sendo:

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

Modelo dinâmico estimado

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

Sendo:

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

Medidores do erro de modelagem

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

$$\mathbb{\delta}_0(\mathbb{q}) = \mathbb{H}(\mathbb{q})^{-1}(\hat{\mathbb{b}}(\mathbb{q}) - \mathbb{b}(\mathbb{q}))$$

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

Lei de controle

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

Lei de controle

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

Sendo:

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

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

$$\mathbb{\eta} = (\mathbb{1} - |\mathbb{\Delta}|_{max})^{-1}(|\mathbb{\delta}_0|_{max} + \mathrm{diag}(\eta\mathbb{1}))$$

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

- 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 $|\mathbb{\Delta}|$, $|\mathbb{\delta}_0|$ e $|\mathbb{\delta}_{i,j}|$ 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 $|\mathbb{\Delta}|$, $|\mathbb{\delta}_0|$ e $|\mathbb{\delta}_{i,j}|$ para todas as combinações possíveis de parâmetros, com os parâmetros podendo assumir seu valor mínimo e seu valor máximo
- Obter o valor máximo de $|\mathbb{\Delta}|$, $|\mathbb{\delta}_0|$ e $|\mathbb{\delta}_{i,j}|$ para cada ponto.

- Discretizar o espaço de trabalho em um número finito de pontos
- Para cada ponto, calcular $|\mathbb{\Delta}|$, $|\mathbb{\delta}_0|$ e $|\mathbb{\delta}_{i,j}|$ para todas as combinações possíveis de parâmetros, com os parâmetros podendo assumir seu valor mínimo e seu valor máximo
- Obter o valor máximo de $|\mathbb{\Delta}|$, $|\mathbb{\delta}_0|$ e $|\mathbb{\delta}_{i,j}|$ para cada ponto.
- Obter o valor máximo de $|\mathbb{\Delta}|$, $|\mathbb{\delta}_0|$ e $|\mathbb{\delta}_{i,j}|$ para o espaço de trabalho, a partir do valor máximo em cada ponto.

- Alto desempenho, mesmo em altas velocidades/acelerações

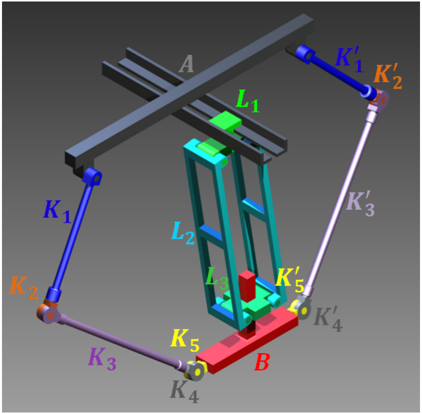
- Alto desempenho, mesmo em altas velocidades/acelerações
- Insensível incertezas paramétricas

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

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

Mecanismo

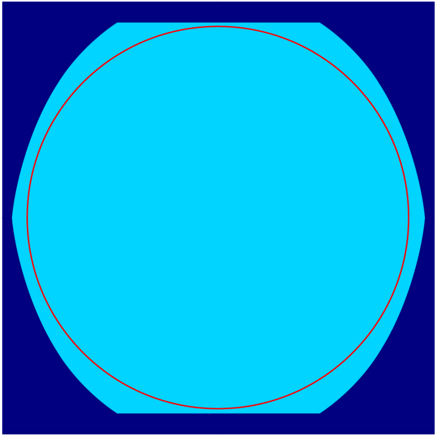
2RSU + PPaP



(Orsino 2012)

Trajetória de referência

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

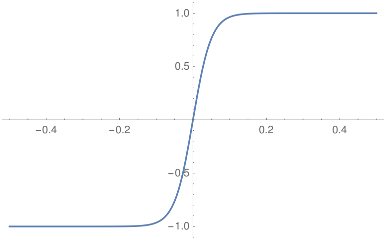


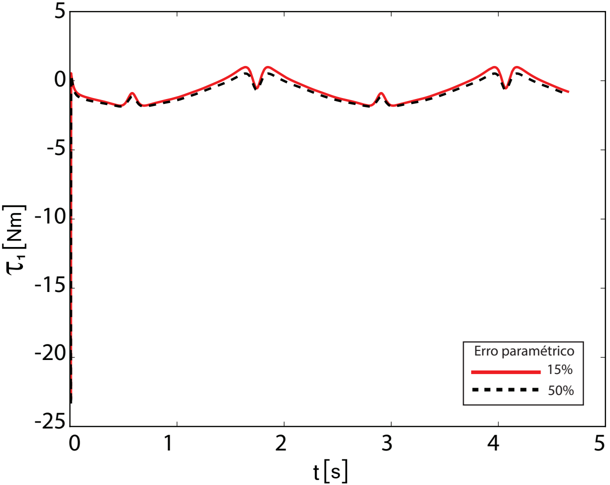
Parâmetros do controlador

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

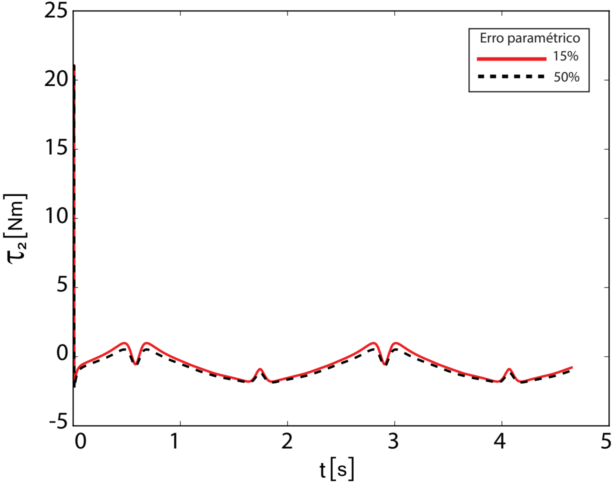
Função de saturação

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

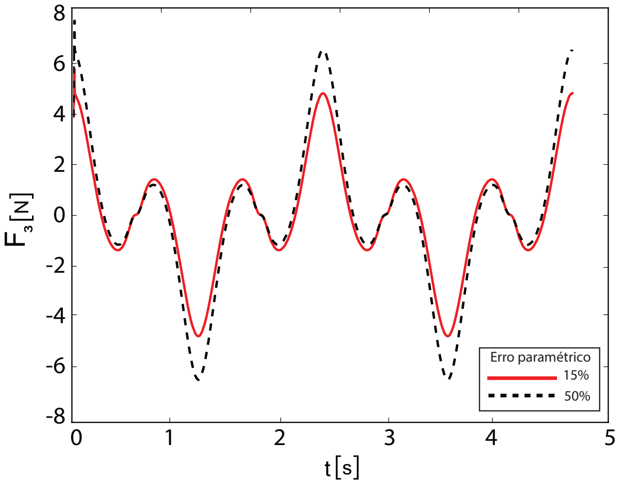


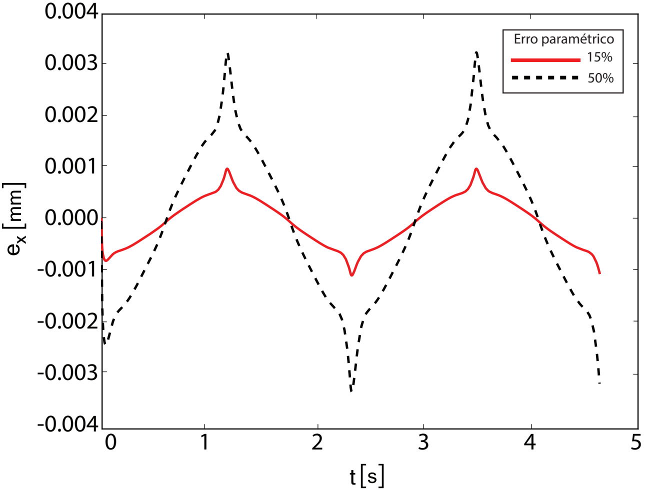


5
0
-5
-10
-15
-20
-25
0
1
2
3
4
5
τ_1 [Nm]
t [s]
Erro paramétrico
15%
50%

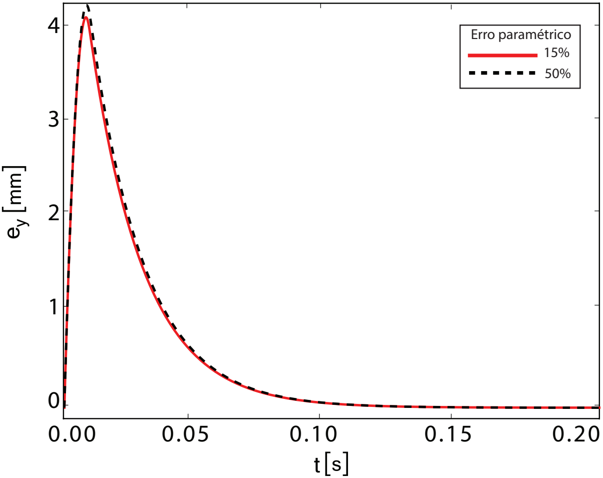


Erro paramétrico
15%
50%
25
20
15
10
5
0
-5
0
1
2
3
4
5
τ_2 [Nm]
t [s]

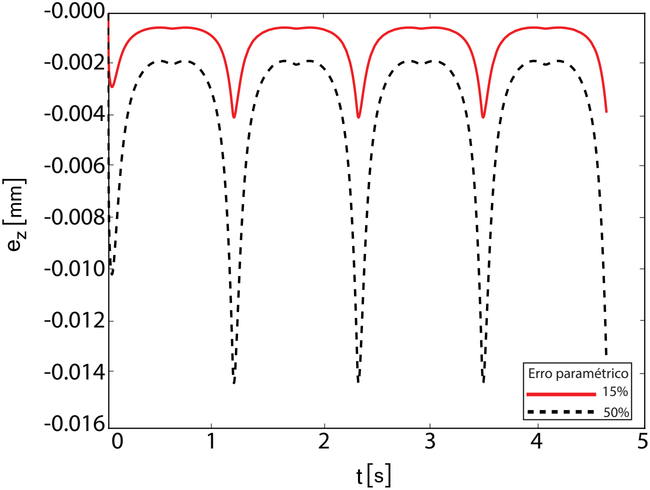

8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
F3 [N]
0
1
2
3
4
5
t [s]
Erro paramétrico
15%
50%

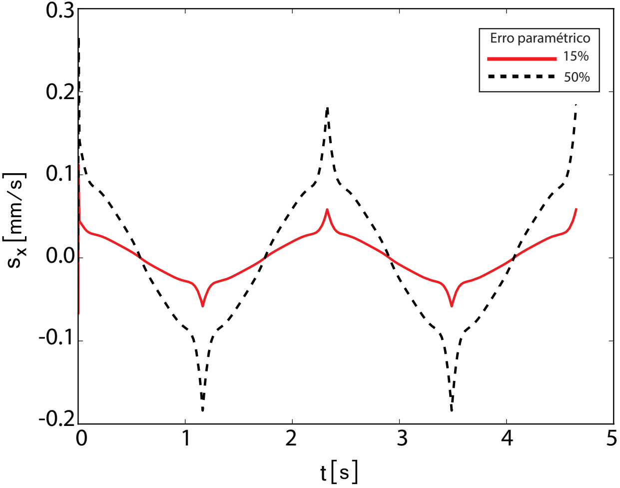


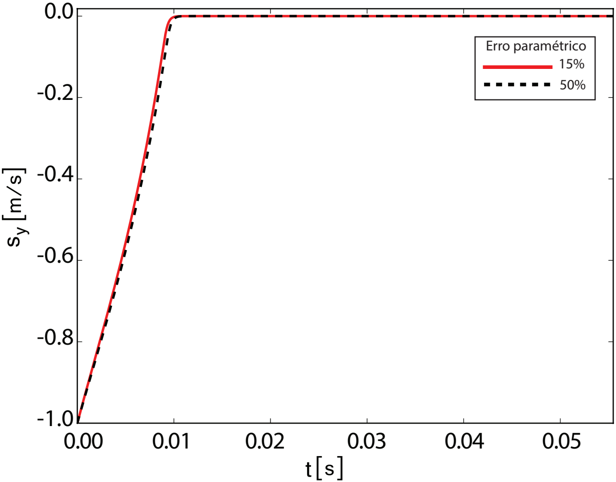
Erro paramétrico
15%
50%
0.004
0.003
0.002
0.001
0.000
-0.001
-0.002
-0.003
-0.004
e_x [mm]
0
1
2
3
4
5
t [s]


Erro paramétrico
15%
50%
4
3
2
1
0
e_y [mm]
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
t [s]

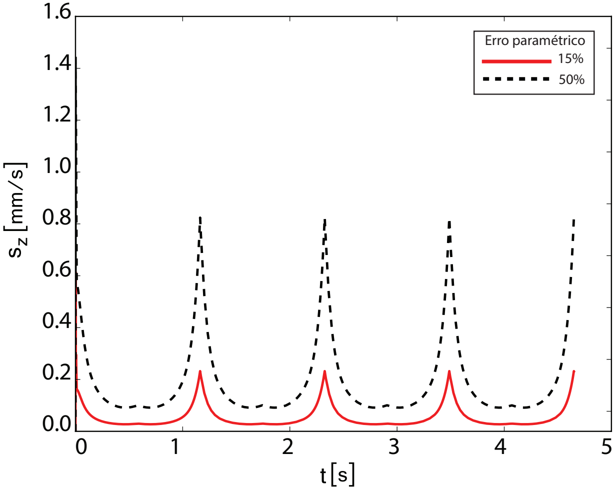
Resultados
Simulações




Erro paramétrico
15%
50%
0.3
0.2
0.1
0.0
-0.1
-0.2
0
1
2
3
4
5
s_x [mm/s]
t [s]



Erro paramétrico
15%
50%
0.0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1.0
$s_y\,[m/s]$
0.00
0.01
0.02
0.03
0.04
0.05
$t\,[s]$



Erro paramétrico
15%
50%
1.6
1.4
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
s_z [mm/s]
0
1
2
3
4
5
t [s]

Conclusões parciais

Conclusões parciais

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

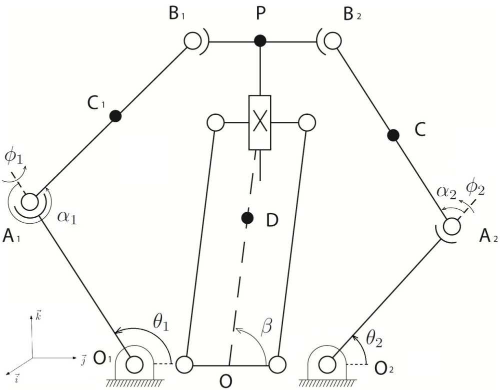
Conclusões parciais

- 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

Publicações

BioRob 2014

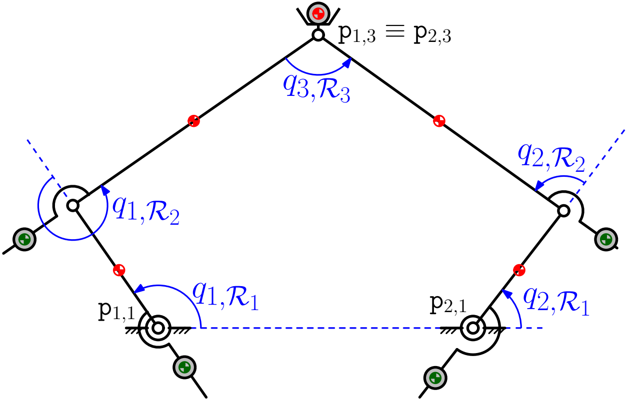
"Development of a Controller of a 3-Dof Robotic Platform for User Interaction in Rehabilitation Therapies"



Publicações

Capítulo de livro

"Dynamic Modelling and Control of balanced parallel mechanisms"



Publicações

International Journal of Mechanisms and Robotic Systems

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