

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 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

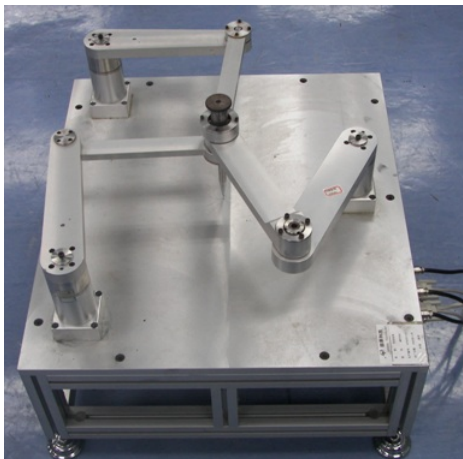


Motivação

Mecanismos paralelos

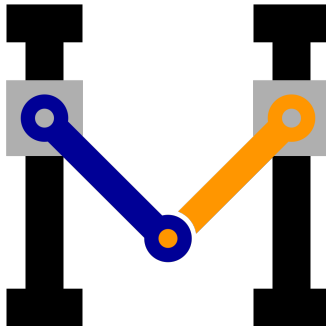
Aplicações

- Usinagem



LaMMaR

Laboratório de Mecanismos, Máquinas e Robôs

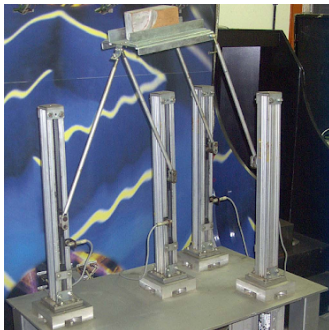


Motivação

Grupo de pesquisa

Robôs

Giovanna



Robôs

Dora

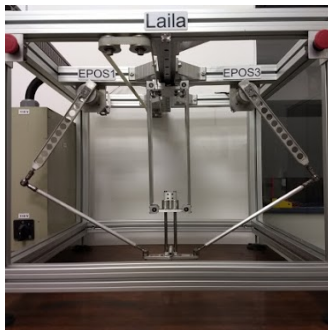


Motivação

Grupo de pesquisa

Robôs

Laila

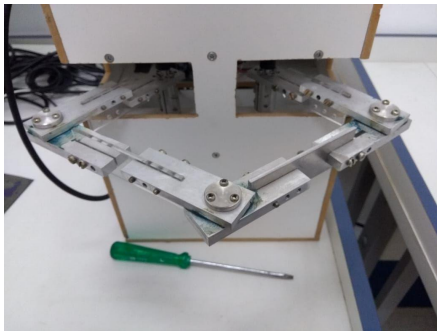


Motivação

Grupo de pesquisa

Robôs

Clara



Clara

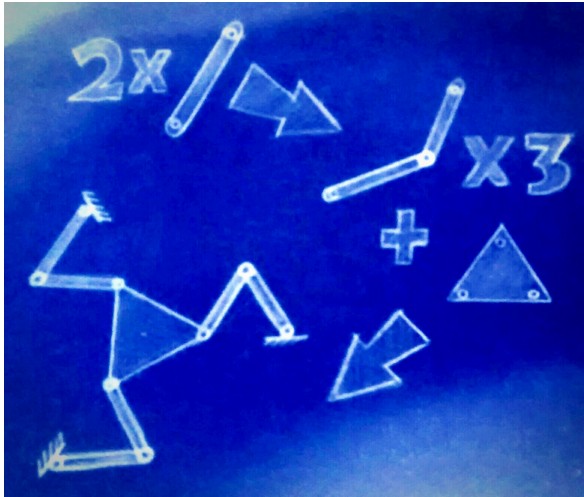
- 2015
 - B. Ohashi: Síntese dimensional
 - V. Bartholomeu: Projeto e construção da estrutura mecânica
- 2016
 - V. Bartholomeu e J. de Oliveira-Fuess: Modelagem e simulações cinemática e dinâmica
- 2017
 - A. Coutinho, V. Bartholomeu e J. de Oliveira-Fuess: Construção do protótipo
- 2019
 - A. Coutinho: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

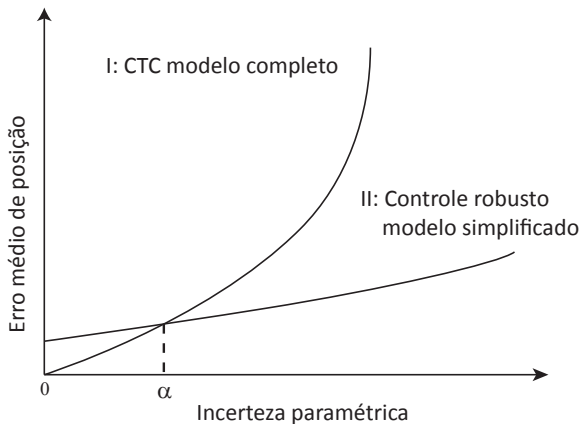
Desempenho menos dependente da qualidade do modelo

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

Modelagem

Revisão da Literatura

Principais formulações

- Formalismo de Newton-Euler
- Formalismo de Lagrange
- Princípio dos Trabalhos/Potências Virtuais
- Formulação Lagrange-D'Alembert
- Método de Kane
- Formalismo de Boltzmann-Hammel
- Formulação do Complemento Ortogonal Natural
- Método Orsino

Formalismo de Newton-Euler

- Muito popular em mecanismos seriais (alg. recursivo)
- Trabalha com esforços reativos
- Encontrado em Arian et al. [4], Dasgupta et al. [28], Li et al. [54], Shiau et al. [76] e Zhang et al. [109]

Formalismo de Newton-Euler

- Muito popular em mecanismos seriais (alg. recursivo)
- Trabalha com esforços reativos
- Encontrado em Arian et al. [4], Dasgupta et al. [28], Li et al. [54], Shiau et al. [76] e Zhang et al. [109]

Formalismo de Lagrange

- Não necessita de esforços reativos
- Frequentemente necessita de multiplicadores
- Encontrado em Li et al. [57], Singh et al. [79–81] e Yao et al. [105]

Princípio dos Trabalhos/Potências Virtuais

...

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

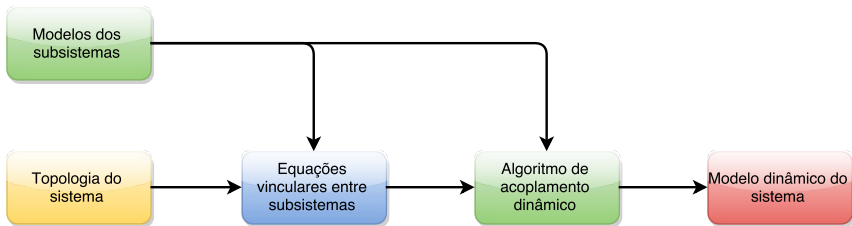
- Folga nas juntas
- Deformações

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

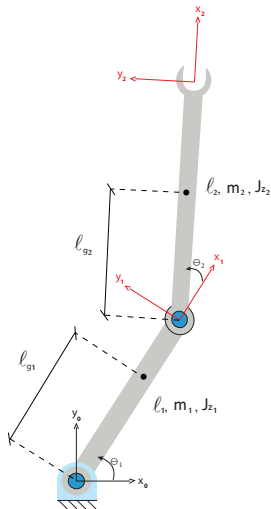
- Parâmetros de Denavit-Hartenberg ($a_i, \alpha_i, \theta_i, d_i$)
- Posição dos centros de massa em relação aos sistemas B_i (x_i, y_i, z_i)
- Massa m_i de cada ligamento
- Tensor de inércia $[I_i]_{B_i | B_i}$ em relação ao centro de massa de cada ligamento
- Vetor aceleração gravitacional escrito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

Algoritmo de modelagem

Seriais: Exemplo

Algoritmo de modelagem

Seriais: Exemplo



Algoritmo de modelagem

Seriais: Exemplo

Ligamento	a_i	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

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

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

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

Algoritmo de modelagem

Paralelos

Algoritmo de modelagem

Paralelos

Dados de entrada

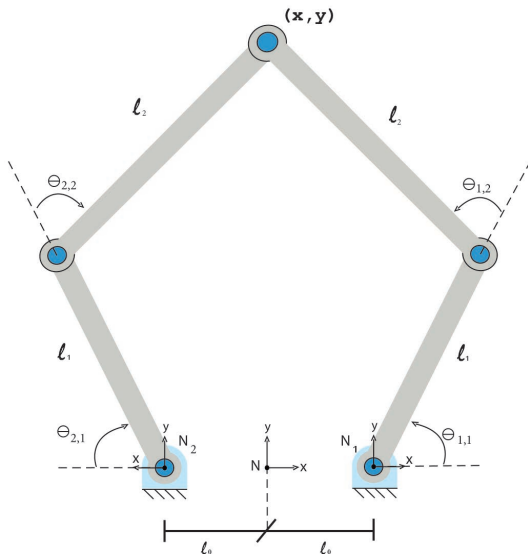
- Modelo da plataforma/efetuador
- Modelo das cadeias seriais
- Matrizes constantes que descrevem a arquitetura do mecanismo (\mathcal{D} , \mathcal{E} , \mathcal{F} , \mathcal{P} , \mathcal{Q} , \mathcal{R})

Algoritmo de modelagem

Paralelos: Exemplo

Algoritmo de modelagem

Paralelos: Exemplo



Algoritmo de modelagem

Paralelos: Exemplo

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

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

Algoritmo de modelagem

Paralelos: Exemplo

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

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

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

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

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

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

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

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

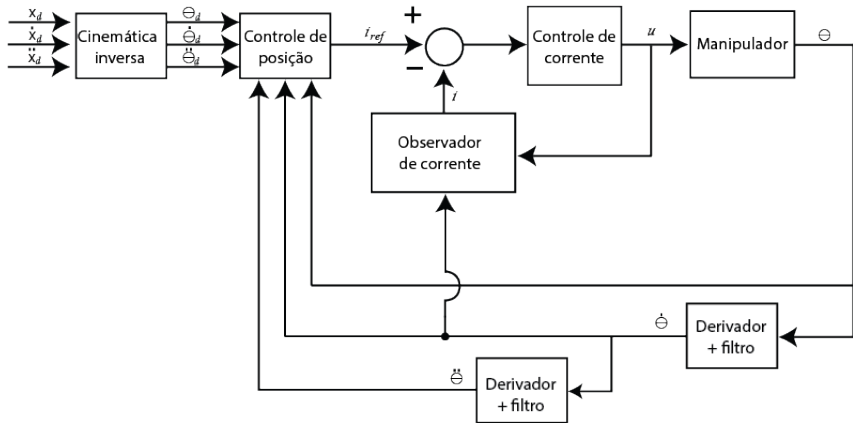
Torque aplicado pelos atuadores

Estruturas de controle

- Espaço das juntas
- Espaço da tarefa

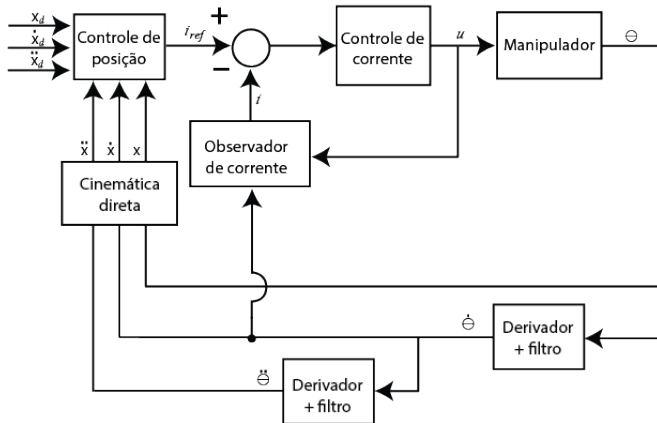
Controle

Espaço das juntas



Controle

Espaço da 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

ϕ

- 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

ϕ

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

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

k

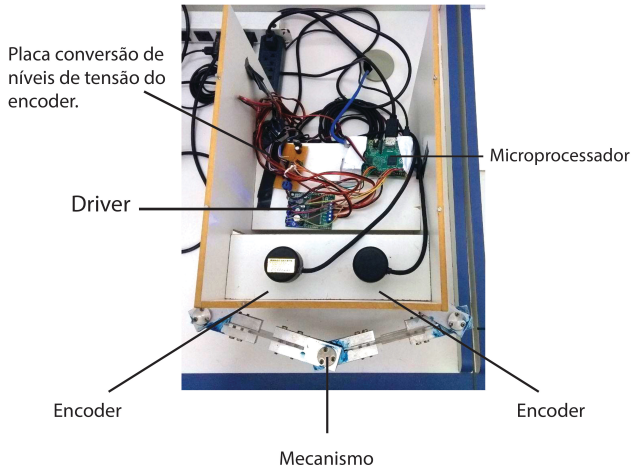
- Parâmetro de supressão de erros de modelagem
- Valores muito altos podem gerar *chattering*
- Pode ser obtido através da lei de adaptação proposta ou experimentalmente

Bancada experimental

Componentes

- 2 Motores DC 250W/24V/0.5Nm
- 2 Encoders 5000pulsos/volta
- 1 Driver c/ 2 canais 24V/12A
- 1 Processador Raspberry Pi 2
- 1 Fonte chaveada 24V/16A
- 1 Placa de conversão de níveis de tensão

Bancada experimental



Resultados

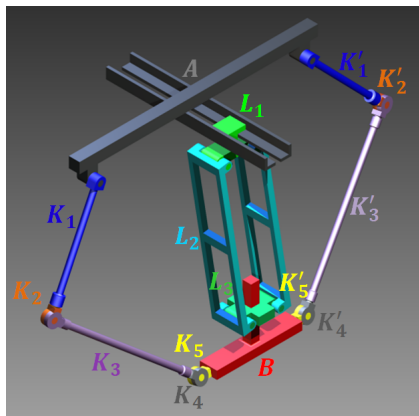
Simulações

Resultados

Simulações

Mecanismo

2RSU + PPaP



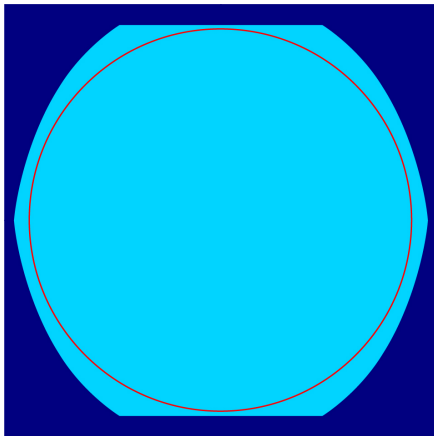
(Orsino 2012)

Resultados

Simulações

Trajetoória de referência

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



Resultados

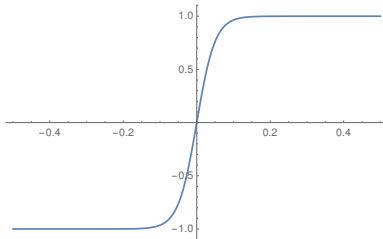
Simulações

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

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

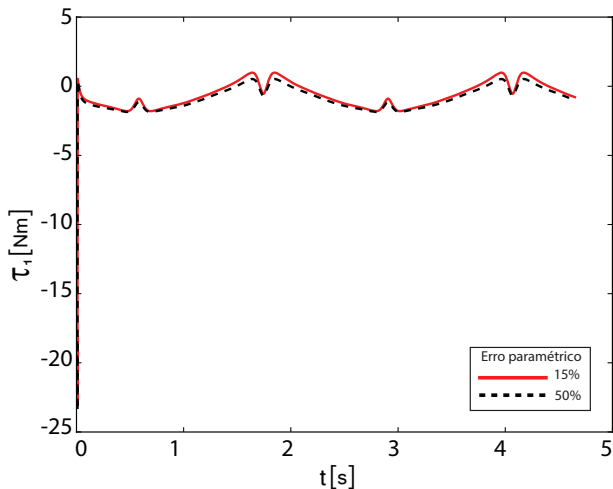


Resultados

Simulações

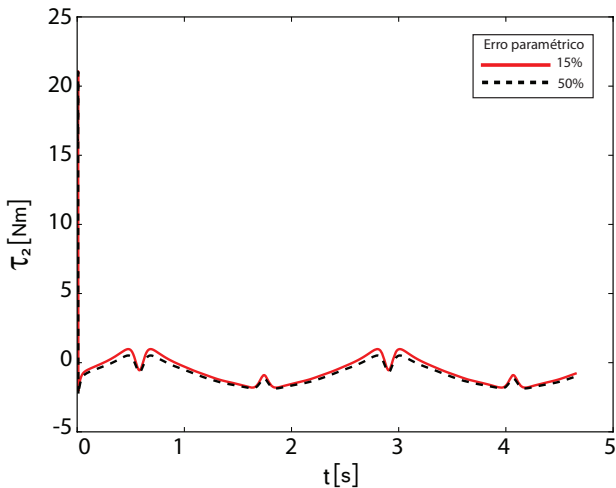
Resultados

Simulações



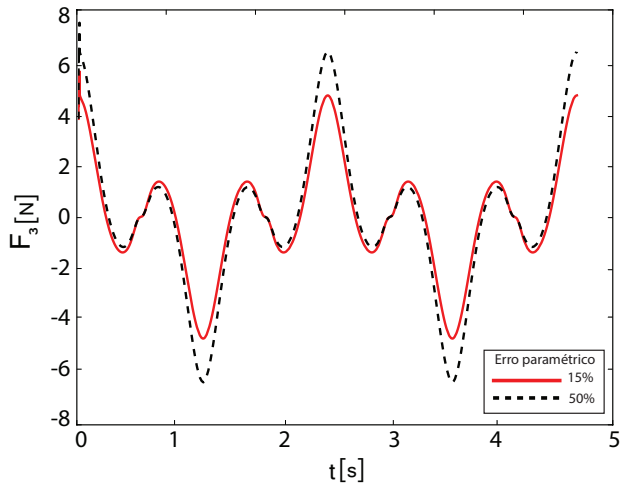
Resultados

Simulações



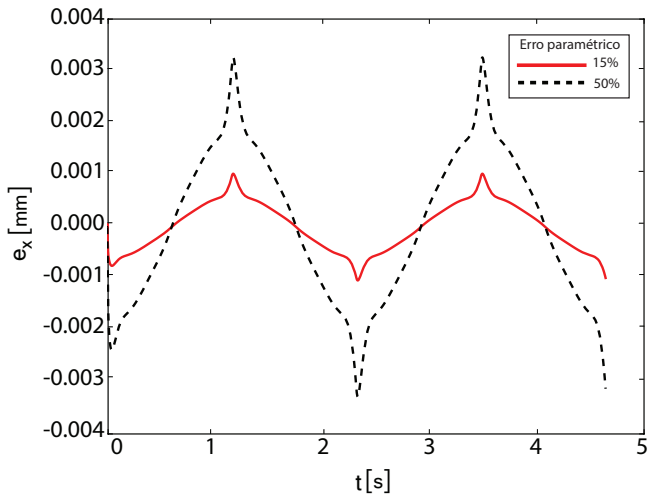
Resultados

Simulações



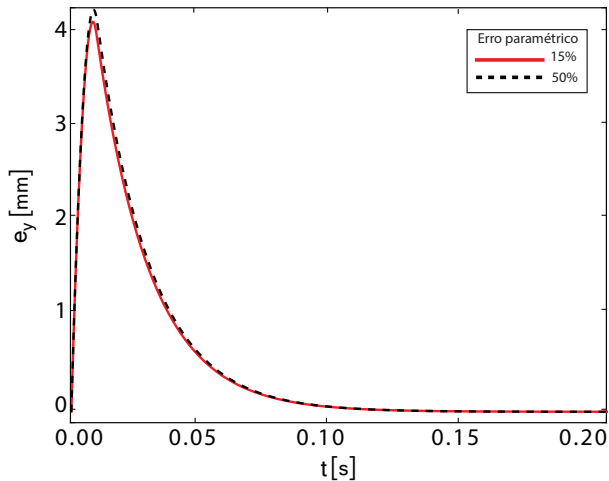
Resultados

Simulações



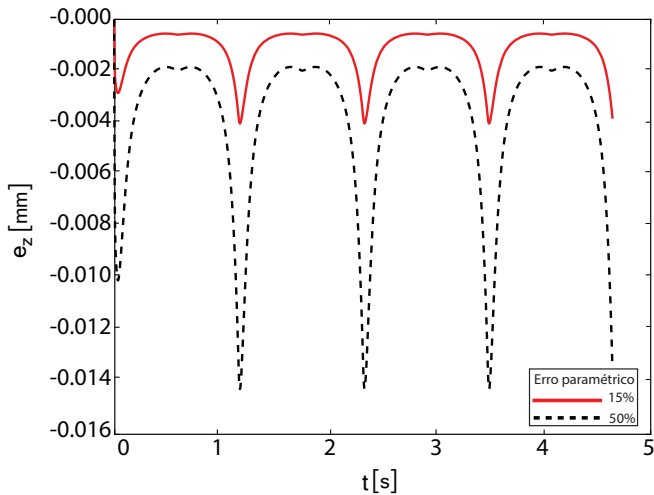
Resultados

Simulações



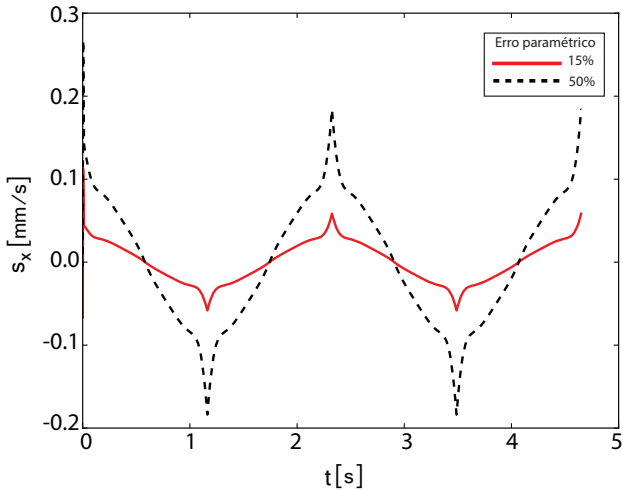
Resultados

Simulações



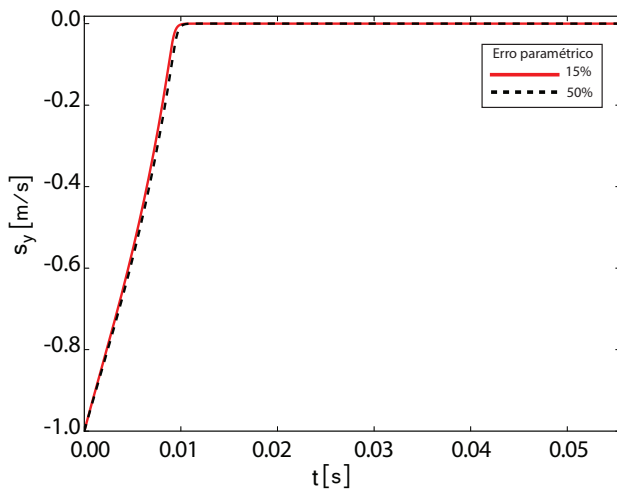
Resultados

Simulações



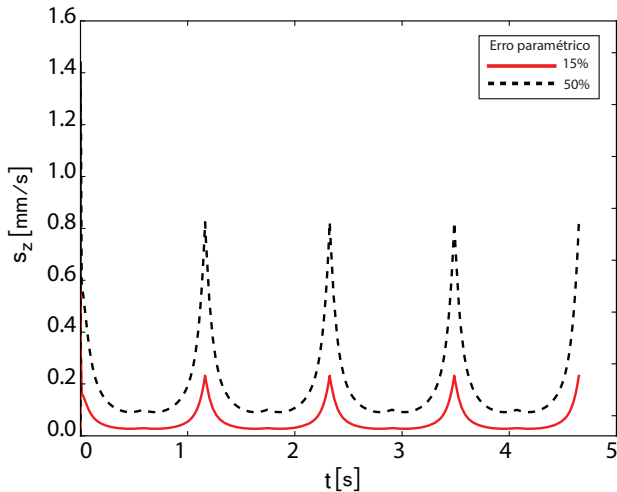
Resultados

Simulações

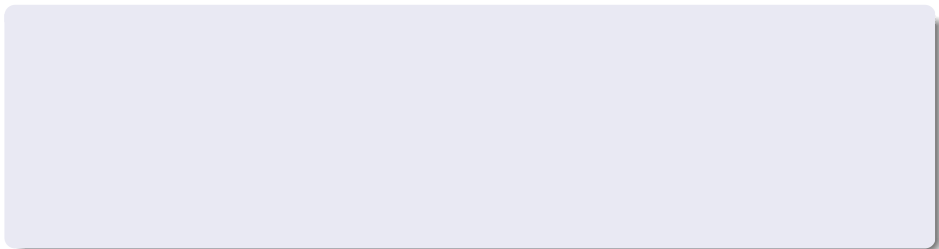


Resultados

Simulações



Conclusões parciais



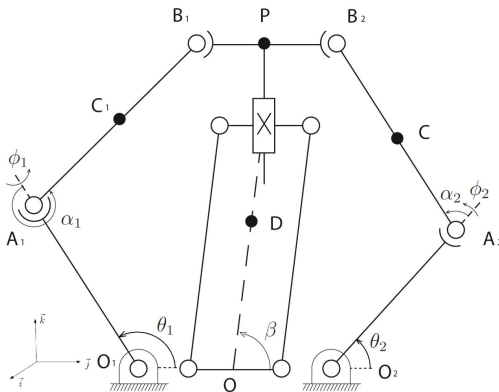
- É fundamental a utilização linguagens de alta eficiência computacional para realizar simulações dinâmicas de modelos completos de mecanismos complexos

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

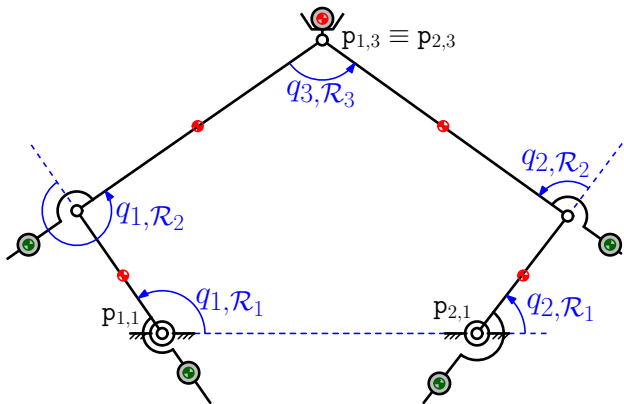
BioRob 2014

“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”

