

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

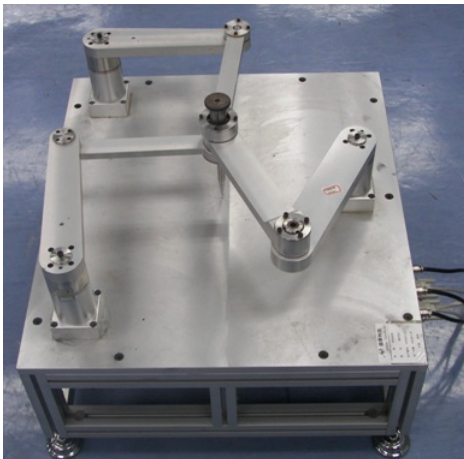


Motivação

Mecanismos paralelos

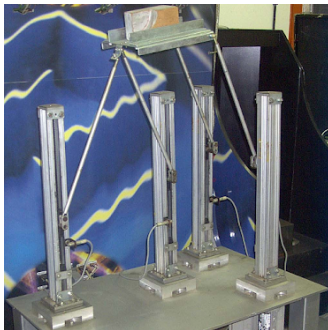
Aplicações

- Usinagem



Robôs

Giovanna



Robôs

Dora

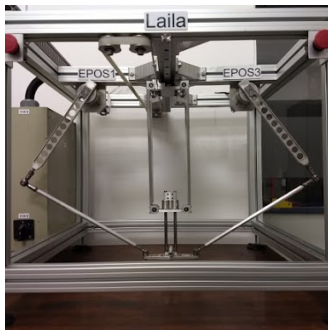


Motivação

Grupo de pesquisa

Robôs

Laila

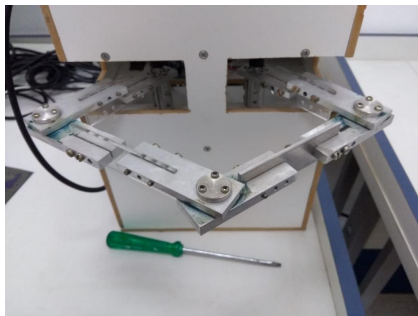


Motivação

Grupo de pesquisa

Robôs

Clara



Clara

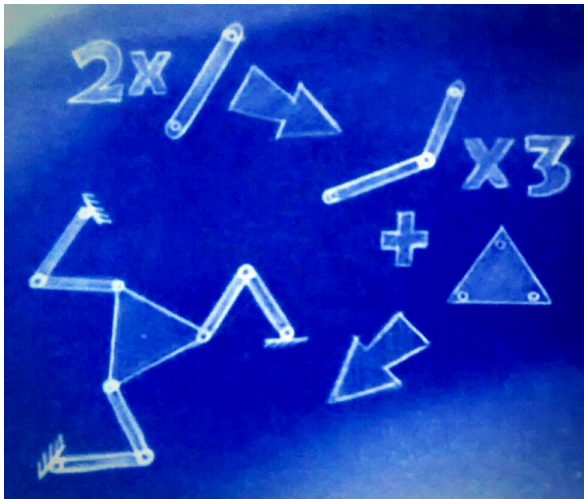
- 2015
 - B. Ohashi: Síntese dimensional
 - V. Bartholomeu: Projeto e construção da estrutura mecânica
- 2016
 - V. Bartholomeu e J. de Oliveira-Fuess: Modelagem e simulações cinemática e dinâmica
- 2017
 - A. Coutinho, V. Bartholomeu e J. de Oliveira-Fuess: Construção do protótipo
- 2019
 - A. Coutinho: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

Motivação

Metodologia modular de modelagem

Motivação

Metodologia modular de modelagem



(Orsino 2015)

Motivação

Controle

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

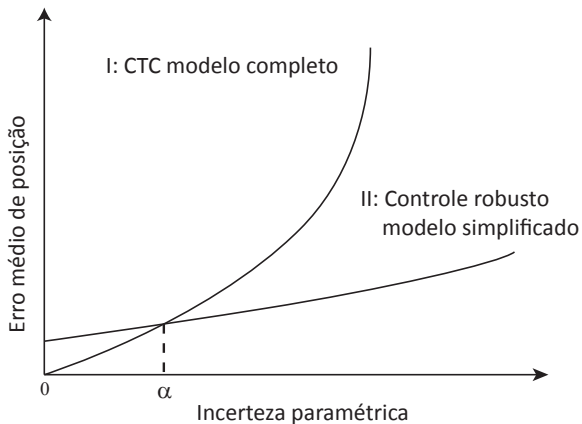
Técnica	Desempenho	Custo	Implement.	Modelagem
PID	Baixo	Baixo	Simples	Simples
CTC ¹	Médio	Médio	Mediana	Mediana
Adaptativo ¹	Médio/Alto	Médio/Alto	Complexa	Complexa
CTC ²	Alto	Alto	Complexa	Complexa
CMD ²	Alto	Médio	Complexa	Complexa

1: Modelo simplificado

2: Modelo completo

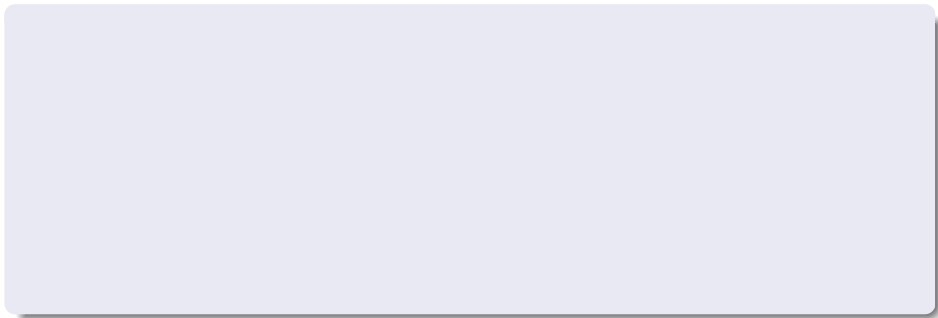
Motivação

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

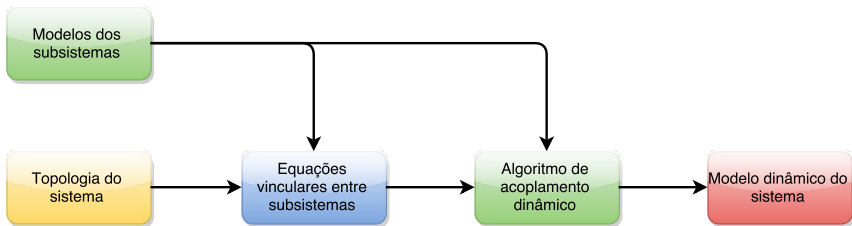
Metódos que permitem formulação implícita

- 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

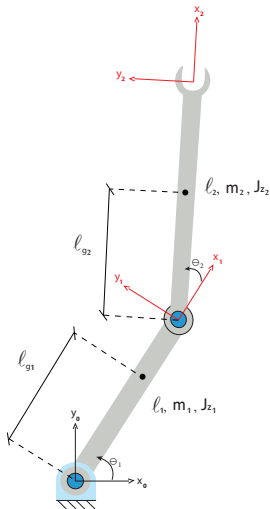
- Parâmetros de Denavit-Hartenberg ($a_i, \alpha_i, \theta_i, d_i$)
- Posição dos centros de massa em relação aos sistemas B_i (x_i, y_i, z_i)
- Massa m_i de cada ligamento
- Tensor de inércia $[I_i]_{B_i | B_i}$ em relação ao centro de massa de cada ligamento
- Vetor aceleração gravitacional escrito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

Algoritmo de modelagem

Seriais: Exemplo

Algoritmo de modelagem

Seriais: Exemplo



Algoritmo de modelagem

Seriais: Exemplo

Ligamento	a_i	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

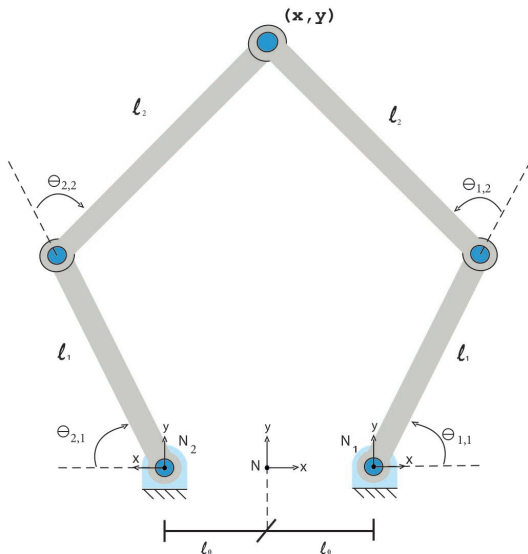
- Modelo da plataforma/efetuador
- Modelo das cadeias seriais
- Matrizes constantes que descrevem a arquitetura do mecanismo (\mathcal{d} , \mathbb{D} , \mathbb{E} , \mathbb{F} , \mathbb{P} , \mathbb{Q} , \mathbb{R})

Algoritmo de modelagem

Paralelos: Exemplo

Algoritmo de modelagem

Paralelos: Exemplo



Algoritmo de modelagem

Paralelos: Exemplo

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

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:

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

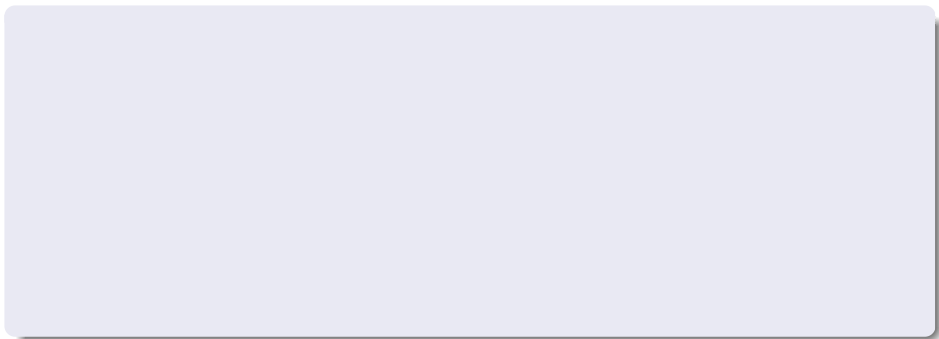
$$\Gamma = (\mathbb{1} - |\Delta|_{\max})^{-1} |\Delta|_{\max}$$

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

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

Controle

Metodologia de projeto



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

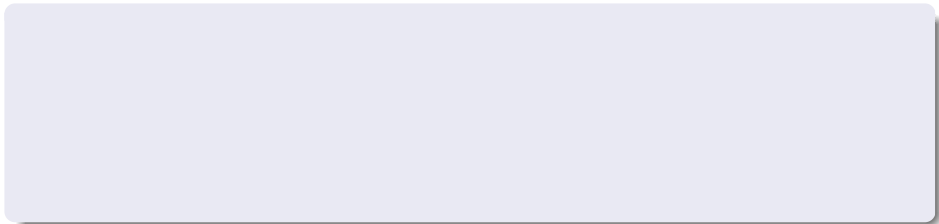
- Discretizar o espaço de trabalho em um número finito de pontos
- Para cada ponto, calcular $|\Delta|$, $|\delta_0|$ e $|\delta_{i,j}|$ para todas as combinações possíveis de parâmetros, com os parâmetros podendo assumir seu valor mínimo e seu valor máximo

- 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

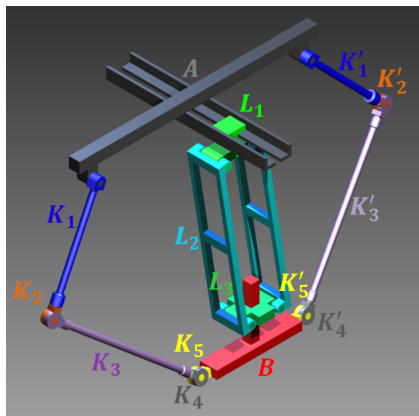
Simulações

Resultados

Simulações

Mecanismo

2RSU + PPaP



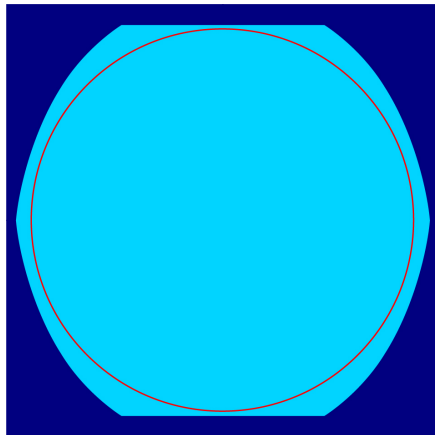
(Orsino 2012)

Resultados

Simulações

Trajectoria de referência

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



Resultados

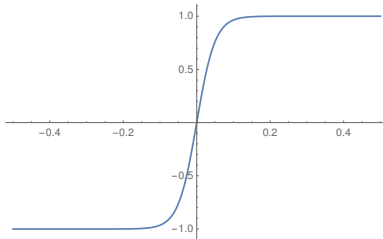
Simulações

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

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

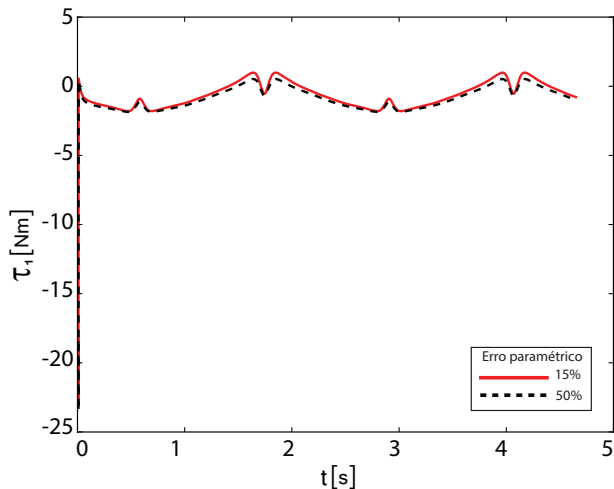


Resultados

Simulações

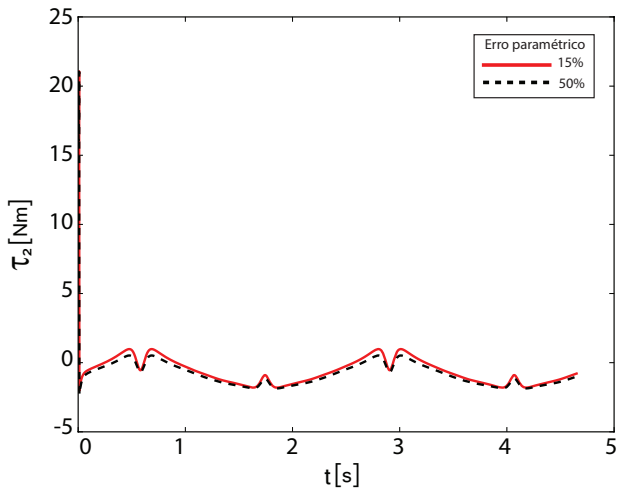
Resultados

Simulações



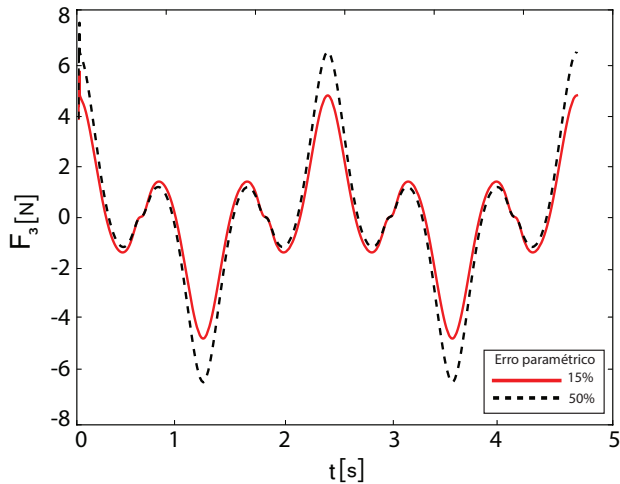
Resultados

Simulações



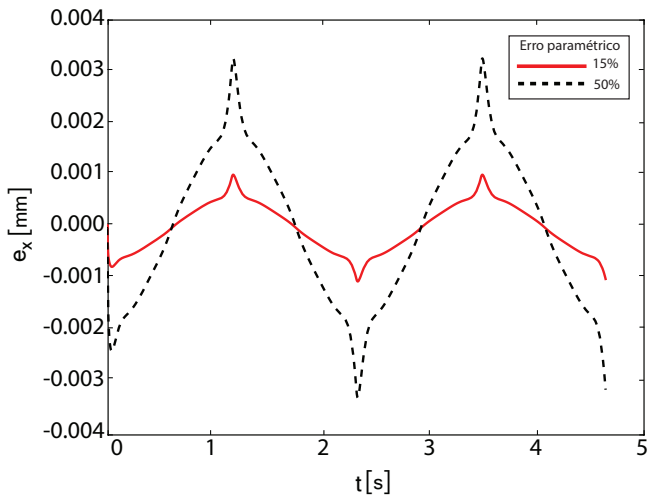
Resultados

Simulações



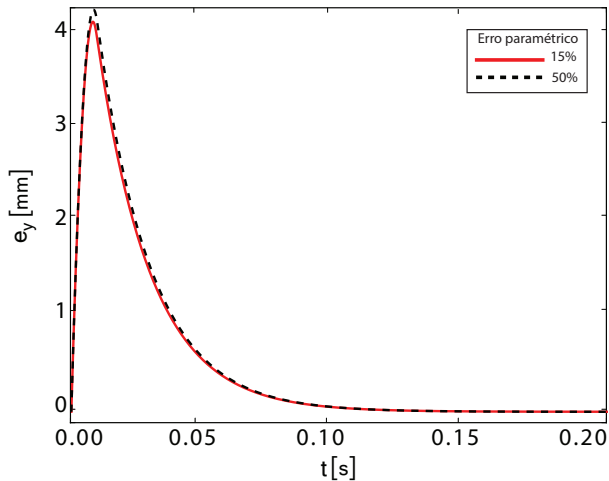
Resultados

Simulações



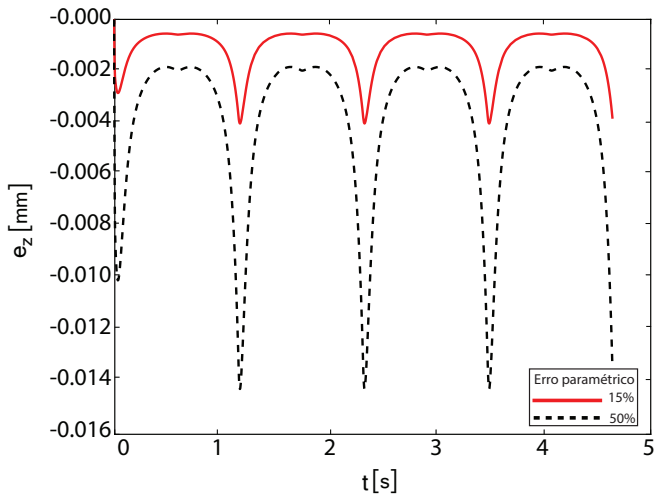
Resultados

Simulações



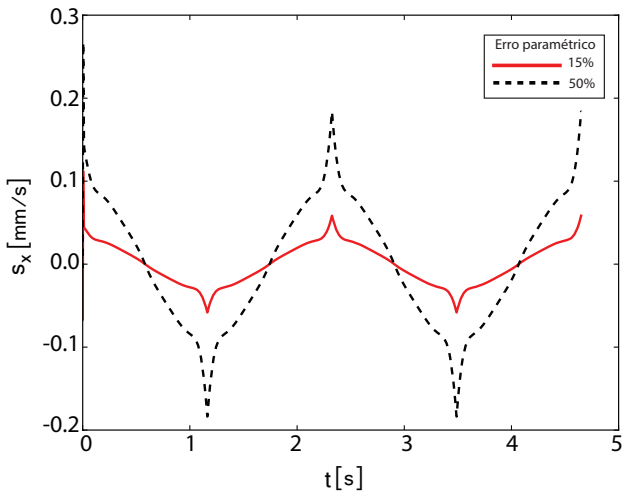
Resultados

Simulações



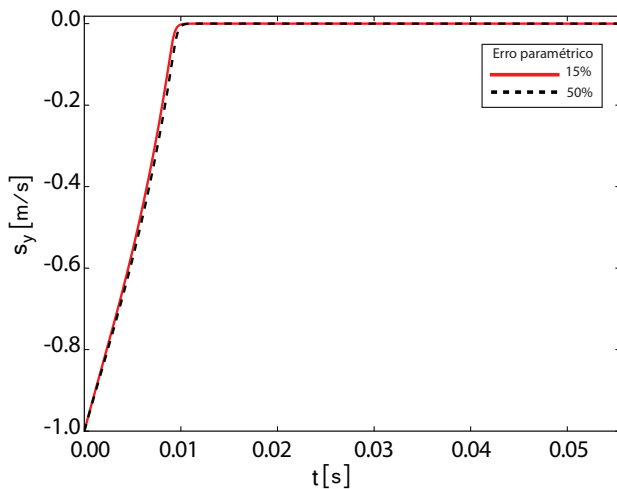
Resultados

Simulações



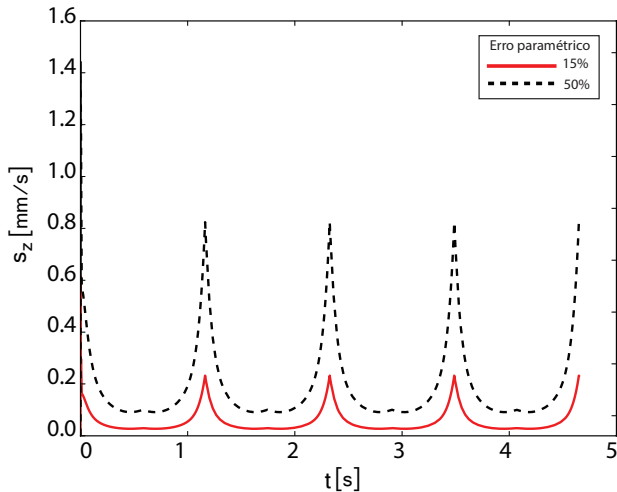
Resultados

Simulações

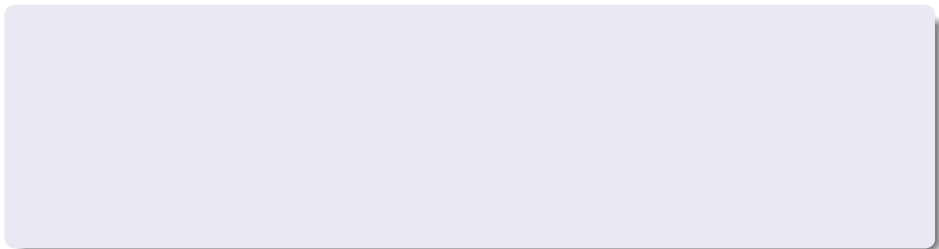


Resultados

Simulações



Conclusões parciais

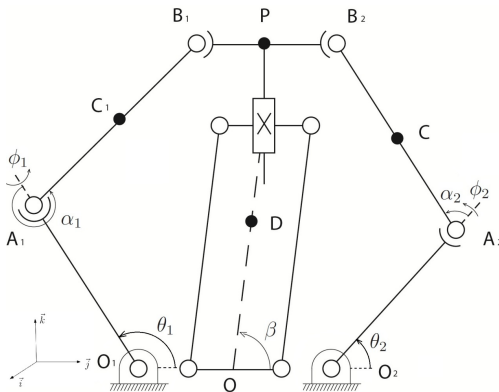


- É fundamental a utilização linguagens de alta eficiência computacional para realizar simulações dinâmicas de modelos completos de mecanismos complexos

- 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

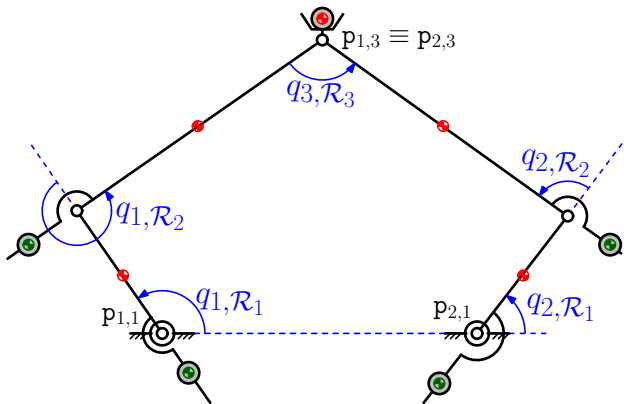
BioRob 2014

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



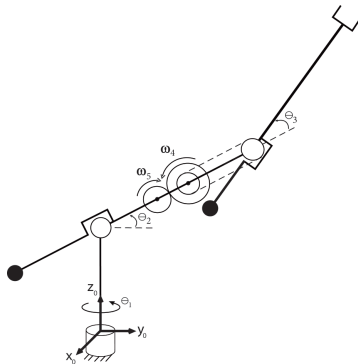
Capítulo de livro

“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)		██████	██████	██████