

Contribuições à modelagem e controle de manipuladores paralelos

André Garnier Coutinho

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Novembro de 2019

Introdução

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
- Pequeno espaço de trabalho
- Dinâmica complexa e não linear

Introdução

Mecanismos paralelos

Aplicações

- Pick-and-place

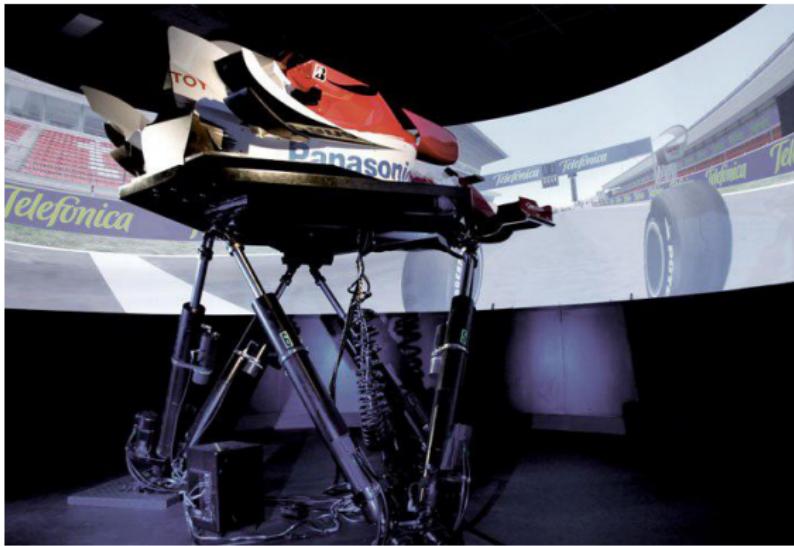


Introdução

Mecanismos paralelos

Aplicações

- Simuladores

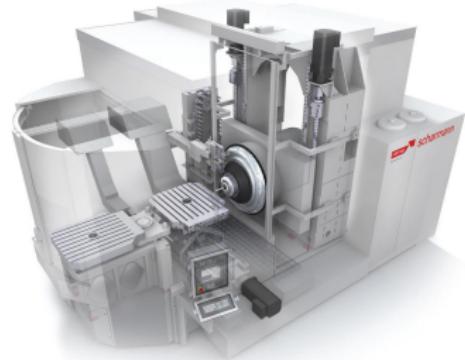


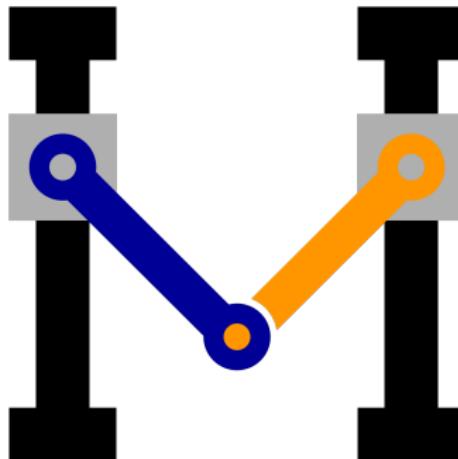
Introdução

Mecanismos paralelos

Aplicações

- Usinagem





Introdução

Grupo de pesquisa

Robôs
Giovanna



Robôs

Dora

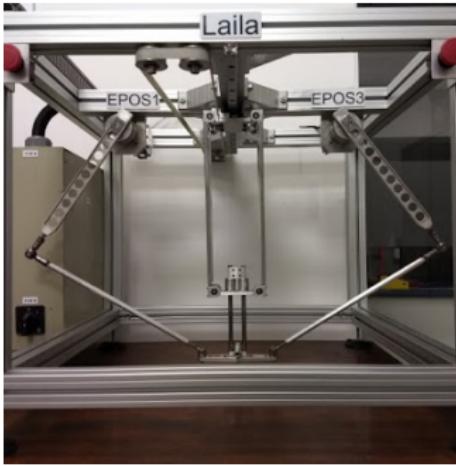


Introdução

Grupo de pesquisa

Robôs

Laila

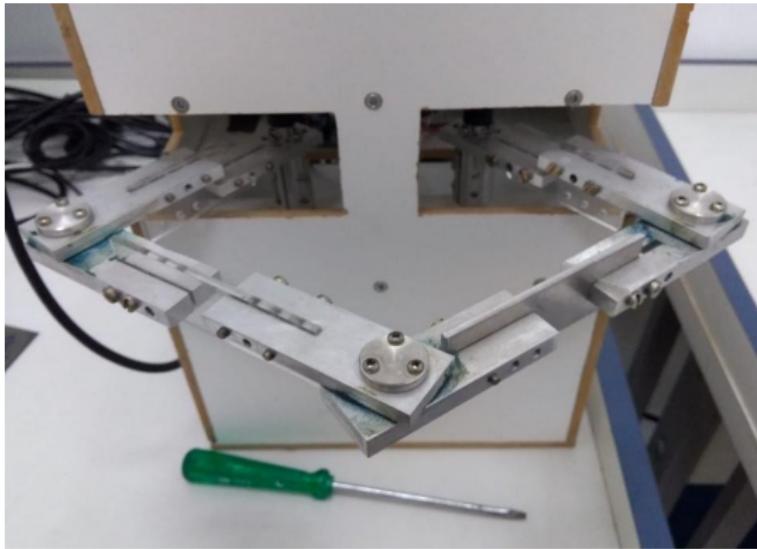


Introdução

Grupo de pesquisa

Robôs

Clara



Objetivos

Geral

Contribuir para o aumento do desempenho de manipuladores paralelos

Como?

- Contribuir no processo de geração de modelos dinâmicos
- Investigar a possibilidade de utilizar/sintetizar leis de controle de maior desempenho do que as propostas na literatura
- Comparar o desempenho diversas estratégias de controle, tanto as mais encontradas na literatura quanto as quanto as estratégias de controle propostas, através de ensaios experimentais

Revisão da Literatura

Modelagem Dinâmica

Influência da topologia do robô

- Seriais
 - Cadeia aberta
 - Juntas ativas de 1 gl
 - N° de coord. gen. = N° atuadores = mobilidade
 - Conjunto mínimo de coord. generalizadas
 - Cinemática direta simples
 - Cinemática inversa complexa
 - Dinâmica direta - Sistema de EDOs
 - Dinâmica inversa - Sistema linear
 - Algoritmos recursivos para mod. dinâmica

Revisão da Literatura

Modelagem Dinâmica

Influência da topologia do robô

- Paralelos
 - Cadeia fechada
 - Juntas de 1, 2 ou 3 gl, ativas ou passivas
 - Grande número de elos
 - Grande quantidade de variáveis cinemáticas
 - Variáveis independentes e dependentes
 - Cinemática direta complexa
 - Cinemática inversa "simples"
 - Dinâmica direta - Sistema de EDAs ou EDOs
 - Dinâmica inversa - Sistema linear
 - Coord. gen. ind.: coord. dos atuadores ou do efetuador

Revisão da Literatura

Modelagem Dinâmica

Dinâmica direta - EDAs

$$\mathbb{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbb{A}^T \boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{\eta} \quad (2.1)$$

$$\bar{\mathbf{q}}(\mathbf{q}, t) = \emptyset \quad (2.2)$$

Sendo

$$\mathbb{A}(\mathbf{q}, t) = \frac{\partial \bar{\mathbf{q}}}{\partial \mathbf{q}} \quad (2.3)$$

Revisão da Literatura

Modelagem Dinâmica

Dinâmica direta - EDOs

$$\underbrace{\begin{bmatrix} M & A^T \\ A & 0 \end{bmatrix}}_{Y} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta \\ -b \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Sendo

$$b = \frac{\partial(A\dot{q})}{\partial q} \dot{q} + 2 \frac{\partial A}{\partial t} \dot{q} + \frac{\partial^2 \bar{q}}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

Método estabilização de Baumgarte

$$b' = b + 2\hat{\alpha}\dot{\bar{q}} + \hat{\beta}^2\bar{q} \quad (2.6)$$

Revisão da Literatura

Modelagem Dinâmica

Propósito

- Simulação
 - Projeto/Dimensionamento do mecanismo/manipulador
 - Grau de detalhamento do modelo depende da aplicação
 - Não é necessário o processamento em tempo real
- Controle
 - Projeto do controlador
 - Compensação de não linearidades
 - Modelos demasiadamente complexos dificultam o projeto e podem aumentar o custo computacional
 - Modelos muito simplistas podem comprometer o desempenho
 - Muitas vezes é necessário o processamento em tempo real

Revisão da Literatura

Modelagem Dinâmica

Principais formulações

- Formalismo de Newton-Euler (Arian *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2014)
- Formalismo de Lagrange (Singh e Santhakumar, 2015; Yao *et al.*, 2017)
- Princípio dos Trabalhos/Potências Virtuais (Gallardo-Alvarado *et al.*, 2018; Li e Staicu, 2012)
- Formulação Lagrange-D'Alembert (Cheng *et al.*, 2001; Yen e Lai, 2009)
- Método de Kane (Ben-Horina *et al.*, 1998; Shukla e Karki, 2014)
- Formalismo de Boltzmann-Hammel (Abdellatif e Heimann, 2009; Altuzarra *et al.*, 2015)
- Formulação do Complemento Ortogonal Natural (Akbarzadeh *et al.*, 2013; Khan *et al.*, 2005)

Propósito

- Controle ponto a ponto
 - *Pick-and-place*
- Controle de trajetória
 - Usinagem
 - Soldagem
 - Aplicação de adesivos/selantes
 - Simuladores de voo/automobilísticos

Revisão da Literatura

Controle

Principais técnicas

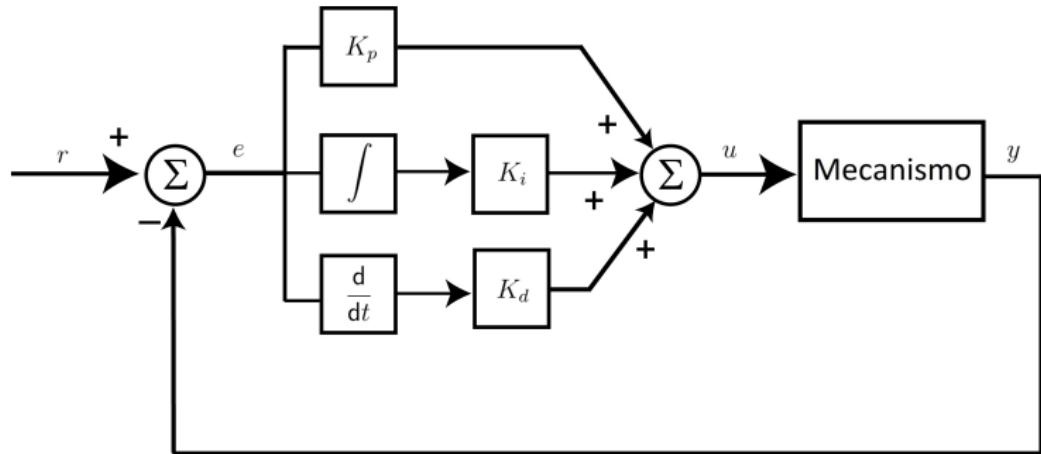
- Controle Proporcional-Integral-Derivativo
- Controle por Torque Computado (Shang e Cong, 2009; Yen e Lai, 2009)
- Controle por Torque Computado com pré-alimentação (Siciliano *et al.*, 2010; Spong *et al.*, 2006)
- Controle por Torque Computado Estendido (Zubizarreta *et al.*, 2013; Zubizarreta *et al.*, 2012)
- Controle Preditivo Baseado em Modelo (Duchaine *et al.*, 2007; Vivas e Poignet, 2005)
- Controle Adaptativo (Chemori *et al.*, 2013; Honegger *et al.*, 2000)
- Controle por Modos Deslizantes (Hu e Woo, 2006; Sadati e Ghadami, 2008)

Controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

- Técnica de controle linear descentralizado
- Não baseado no modelo dinâmico do mecanismo
- Simples implementação
- Baixo custo computacional
- Desempenho bastante limitado

Revisão da Literatura

Controle

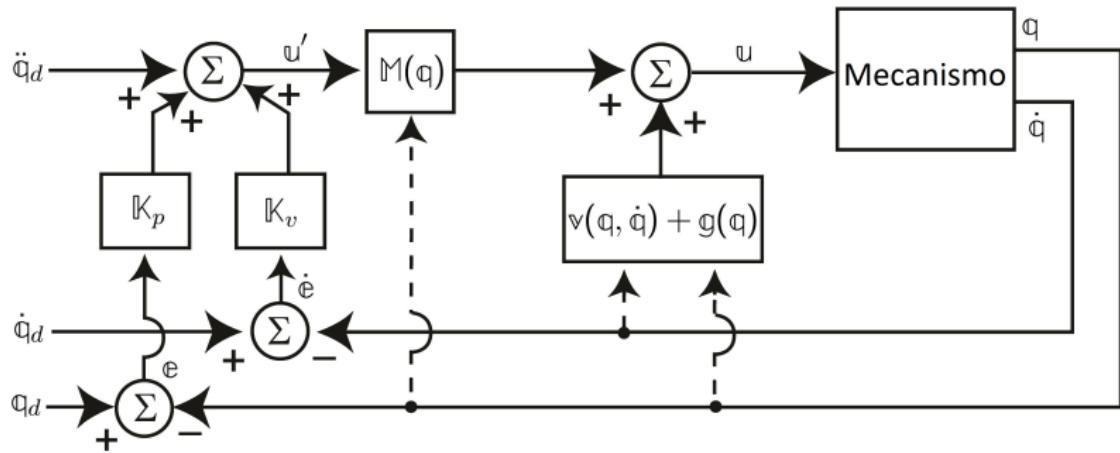


Controle por Torque Computado (CTC)

- Técnica de controle não linear multivariável
- Baseado no modelo dinâmico do mecanismo
- Possui uma malha interna de compensação de não linearidades por realimentação e uma malha externa de PID
- Desempenho superior ao PID simples, porém bastante dependente da qualidade do modelo dinâmico
- Implementação mais complexa
- Maior custo computacional

Revisão da Literatura

Controle

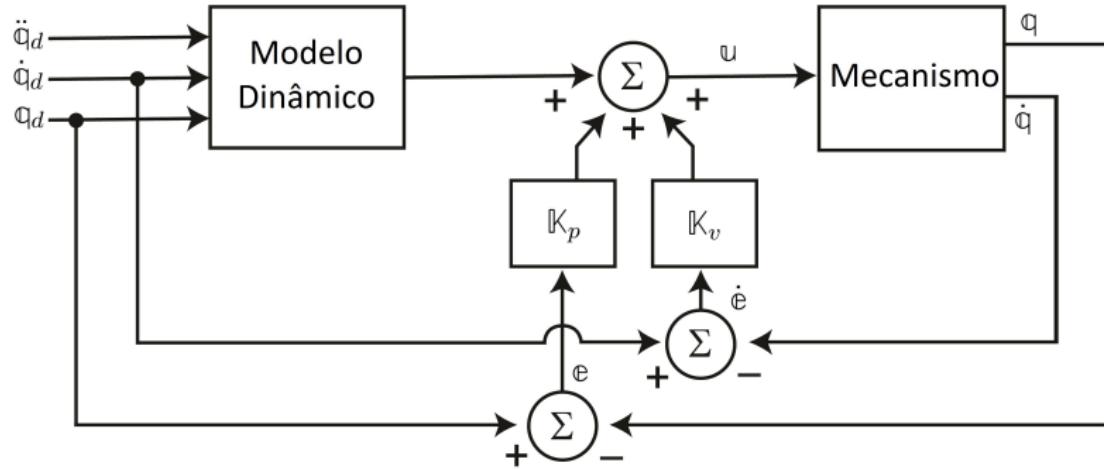


Controle por Torque Computado com pré-alimentação (CTCp)

- Lei de controle similar ao CTC
- Realiza compensação de não linearidades por pré-alimentação
- Menor custo computacional em relação ao CTC
- Implementação mais simples que o CTC
- Menor robustez em relação ao CTC

Revisão da Literatura

Controle



Controle por Torque Computado Estendido (CTCe)

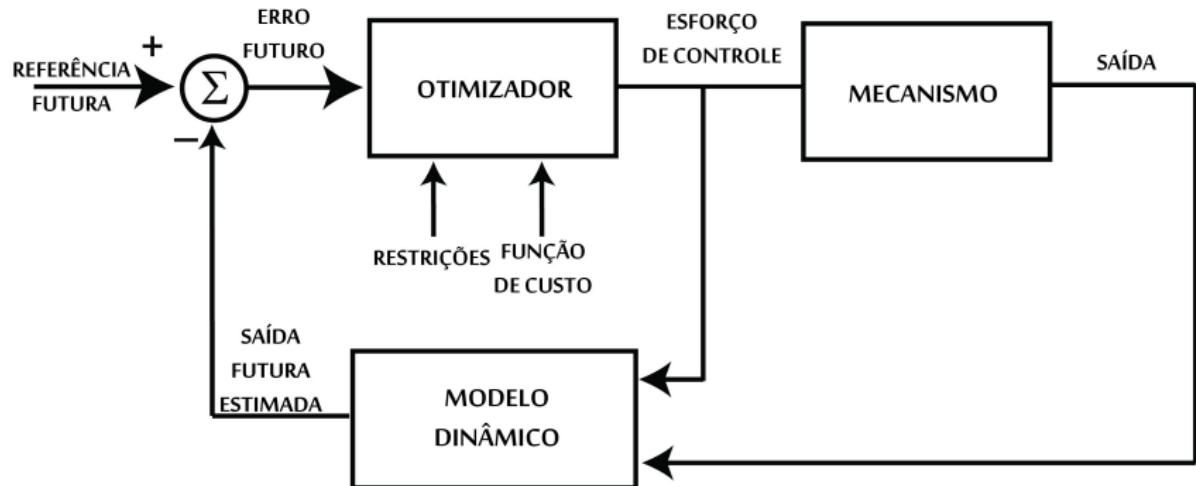
- Lei de controle similar ao CTC
- Realiza compensação de não linearidades por realimentação
- Utiliza informação redundante obtida pelo sensoriamento de juntas passivas na lei de controle
- Maior robustez a incertezas paramétricas

Controle Preditivo Baseado em Modelo (CPM)

- Técnica de controle multi-variável baseado em modelo
- Muito utilizado no controle de processos industriais
- Realiza otimização em tempo real de uma função custo que envolve o erro e o esforço de controle em tempo futuro
- Custo computacional bastante dependente da complexidade do modelo
- Boa robustez a incertezas paramétricas

Revisão da Literatura

Controle

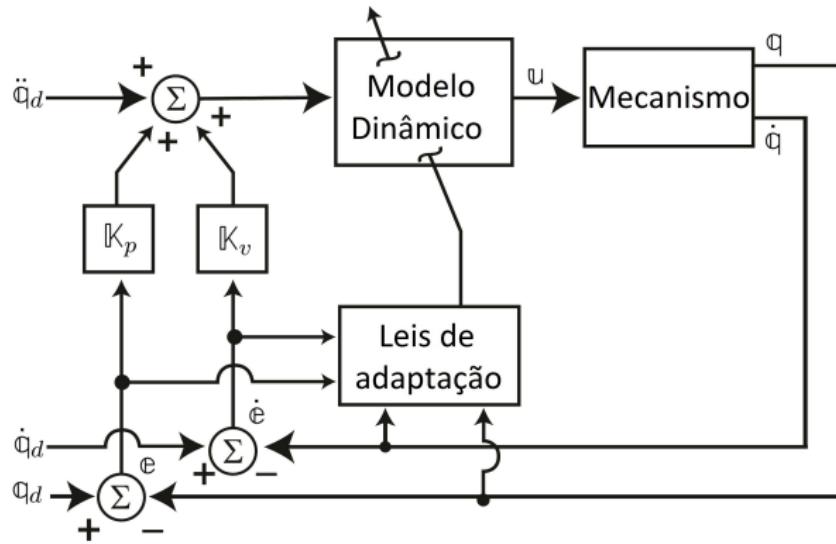


Controle Adaptativo (CA)

- Técnica de controle baseado em modelo
- Estimação em tempo real de parâmetros do sistema
- Baixa sensibilidade a incertezas paramétricas
- Necessita de modelo dinâmico linear em relação aos parâmetros
- Alternativamente pode realizar a estimativa de termos não lineares de compensação dinâmica
- Custo computacional adicional relativo a integração das leis de adaptação
- Maior complexidade de projeto e implementação

Revisão da Literatura

Controle

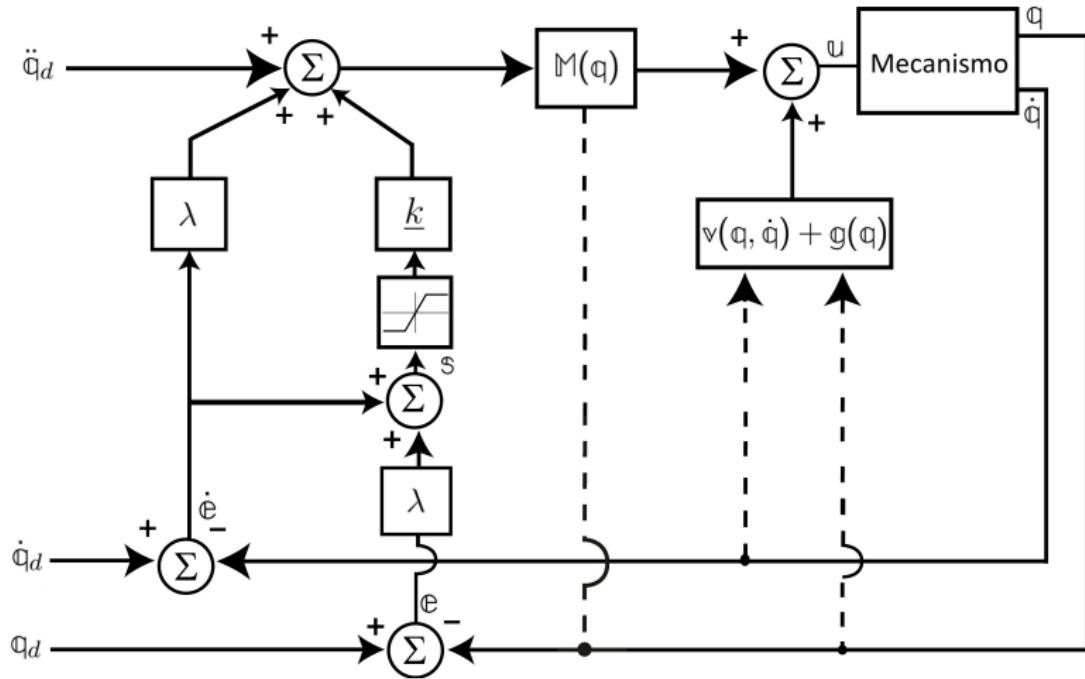


Controle por Modos Deslizantes (CMD)

- Técnica de controle não linear robusto
- Alta robustez em relação a incertezas estruturadas e não estruturadas
- Desempenho menos dependente da qualidade do modelo dinâmico
- Utiliza funções descontínuas na lei de controle, o que pode causar *chattering*
- Bastante utilizado em combinação com lógica *fuzzy* e redes neurais (Begon *et al.*, 1995; Ertugrul e Kaynak, 2000; Hu e Woo, 2006; Sadati e Ghadami, 2008)

Revisão da Literatura

Controle



Técnicas de controle combinadas

- "PD-SMC"(Ouyang, Acob, Pano, 2014)
 - Lei de controle combinada não baseada em modelo
 - Simulação
 - Mecanismo serial prismático (PPP)
- "PD-SMC"(Li, Ghasemi, Xie, Gao, 2018)
 - Lei de controle combinada não baseada em modelo
 - Experimento (movimento lento, trajetória de 150s, controle por câmera)
 - Mecanismo serial de 6 gl
- "Hybrid PD-SMC"(Acob, 2015)
 - Lei de controle combinada não baseada em modelo
 - Simulação
 - Mecanismo serial de 3 gl e mecanismo paralelo de 2 gl

Revisão da Literatura

Controle

Técnicas de controle combinadas

- "PD-SMC-GA"(Mahmoodabadi, Taherkhorsandi, Talebipour, Castilho-Villar, 2015)
 - Lei de controle combinada baseada em modelo
 - Simulação
 - Pêndulo invertido
- "NN-SMC"(Truong, Tran, Ahn, 2019)
 - Lei de controle baseada em modelo
 - Experimento (movimento lento, ciclo de 10s)
 - Mecanismo serial hidráulico de 3 gl
 - Rede neural realiza a sintonização em tempo real dos ganho do controlador

Metodologia da Pesquisa

Modelagem

Desenvolvimento e implementação de algoritmo genérico para modelagem dinâmica de mecanismos paralelos translacionais

Controle

Estudo, síntese, e simulação de leis de controle não linear robusto de alto desempenho para mecanismos paralelos

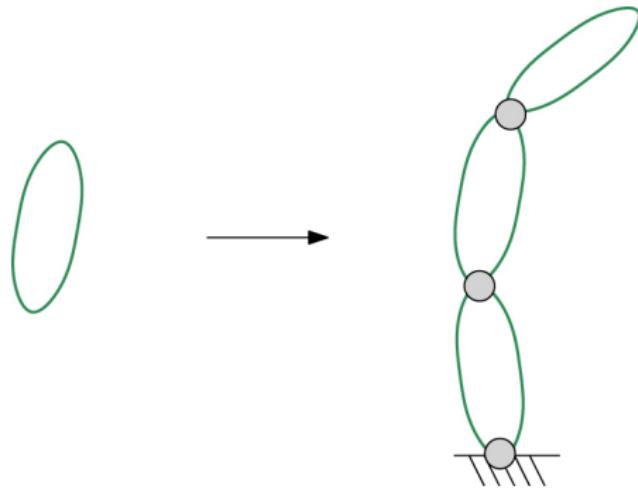
Experimento

Construção de um protótipo de manipulador paralelo translacional e realização de ensaios experimentais com o intuito de:

- Validar a eficácia da utilização do modelo gerado pelo algoritmo em leis de controle baseadas em modelo
- Comparar o desempenho das leis de controle propostas com leis de controle já consagradas pela literatura

Algoritmo de Modelagem

Cadeias seriais



Algoritmo de Modelagem

Cadeias seriais

Elementos

- Elos
- Juntas
- Atuadores

Descrição Topológica

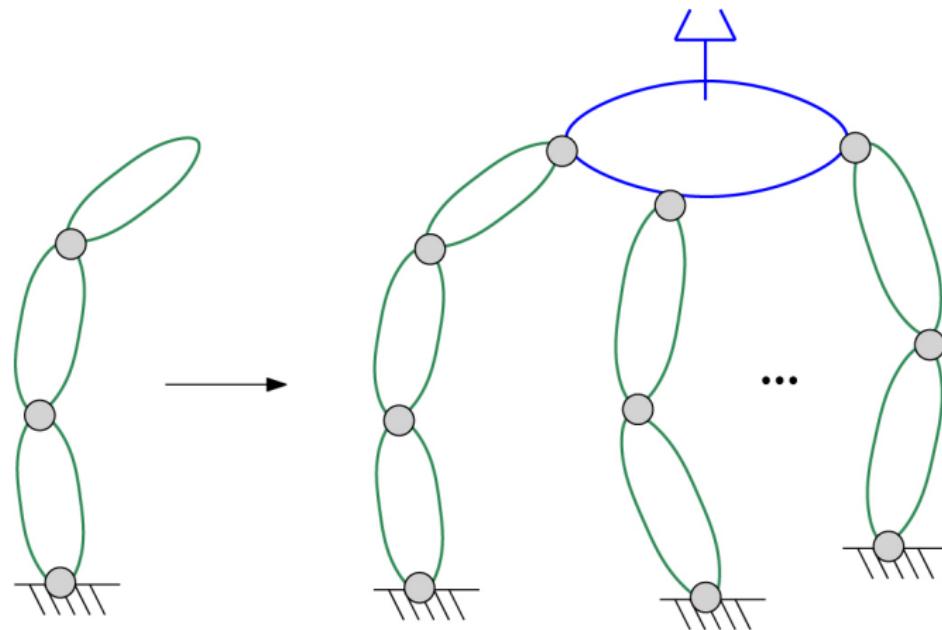
- Parâmetros de Denavit-Hartenberg
- Coordenadas dos centros de massa dos elos nos sistemas móveis

Efeitos considerados

- Ação da gravidade
- Inércia distribuída
- Atritos
- Esforço e dinâmica dos atuadores

Algoritmo de Modelagem

Manipulador paralelo



Algoritmo de Modelagem

Manipulador paralelo

Efetuador

- Subsistema \mathcal{B}_0
- Sistema de coordenadas móvel B
- Sistema de coordenadas fixo N_0

Cadeias seriais

- Subsistemas $\mathcal{B}_1, \mathcal{B}_2, \dots, \mathcal{B}_n$
- Sistemas de coordenadas fixos N_1, N_2, \dots, N_n

Coordenadas generalizadas

- q^* ou q_0 : Coordenadas x, y, z do CM do efetuador \mathcal{B}_0 no sistema N_0
- q_i : Deslocamentos relativos das juntas da cadeia \mathcal{B}_i , $i = 1, \dots, n$
- q^\diamond : Concatenação de todos q_i , $i = 1, \dots, n$
- q : Concatenação de q^* com q^\diamond

Algoritmo de Modelagem

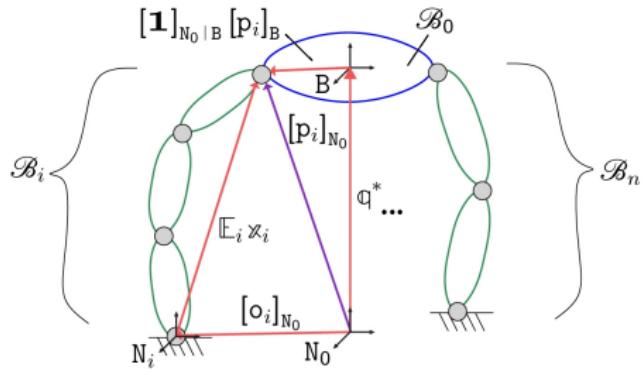
Manipulador paralelo

Vínculos de posição

Vinculando o efetuador de cada cadeia \mathcal{B}_i ao efetuador \mathcal{B}_0 :

$$\mathbf{q}^* = \mathbf{d}_i + \mathbb{E}_i \mathbf{x}_i(\mathbf{q}_i), \quad i = 1, \dots, n \quad (5.13)$$

$$\mathbf{d}_i = [\mathbf{o}_i]_{N_0} - [\mathbf{1}]_{N_0 \mid B} [\mathbf{p}_i]_B$$



Algoritmo de Modelagem

Manipulador paralelo

Vínculos de posição

Definindo vínculos afins adicionais (se necessário):

$$\mathbb{D}_{\oplus} \cdot q^* = d_{\oplus} + \mathbb{F}_{\oplus} \cdot q^{\diamond} \quad (5.15)$$

Juntando todas as equações vinculares obtidas:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \\ \mathbb{D}_{\oplus} \end{bmatrix} \cdot q^* = \begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_n \\ d_{\oplus} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbb{E}_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \mathbb{E}_n \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(q_1) \\ \vdots \\ x_n(q_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \mathbb{F}_{\oplus} \end{bmatrix} \cdot q^{\diamond} \quad (5.16)$$

Assim, temos:

$$\therefore \bar{q}(q) = \mathbb{D} \cdot q^* - d - \mathbb{E} \cdot x(q) - \mathbb{F} \cdot q^{\diamond} = 0 \quad (5.17)$$

Algoritmo de Modelagem

Manipulador paralelo

Vínculos de quasi-velocidades

$$\bar{p}(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} \dot{\bar{q}}(q, \dot{q}) \\ \bar{\omega}(q, \dot{q}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbb{D} \cdot \dot{q}^* - \mathbb{E} \cdot J_v(q^\diamond) \cdot \dot{q}^\diamond - \mathbb{F} \cdot \dot{q}^\diamond \\ -\mathbb{Q} \cdot J_w(q^\diamond) \cdot \dot{q}^\diamond \end{bmatrix} = 0 \quad (5.32)$$

$$\therefore \bar{p}(q, \dot{q}) = A(q)\dot{q} = 0 \quad (5.34)$$

Sendo

$$A(q) = \begin{bmatrix} \mathbb{D} & -(\mathbb{E} \cdot J_v(q^\diamond) + \mathbb{F}) \\ 0 & -\mathbb{Q} \cdot J_w(q^\diamond) \end{bmatrix} \quad (5.35)$$

Algoritmo de Modelagem

Manipulador paralelo

Vínculos de quasi-acelerações

$$\begin{aligned}\dot{\bar{p}}(q, \dot{q}, \ddot{q}) &= \begin{bmatrix} \ddot{q}(q, \dot{q}, \ddot{q}) \\ \dot{\bar{\omega}}(q, \dot{q}, \ddot{q}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D \cdot \ddot{q}^* - E \cdot (J_v(q^\diamond) \cdot \ddot{q}^\diamond + \underline{\omega}(q, \dot{q})) - F \cdot \ddot{q}^\diamond \\ -Q \cdot (J_w(q^\diamond) \cdot \ddot{q}^\diamond + \dot{\underline{\omega}}(q, \dot{q})) \end{bmatrix} \\ &= 0\end{aligned}\quad (5.36)$$

$$\therefore \dot{\bar{p}}(q, \dot{q}, \ddot{q}) = A(q)\ddot{q} + b(q, \dot{q}) = 0 \quad (5.39)$$

Sendo

$$b(q, \dot{q}) = - \begin{bmatrix} E \cdot \underline{\omega}(q, \dot{q}) \\ Q \cdot \dot{\underline{\omega}}(q, \dot{q}) \end{bmatrix} \quad (5.40)$$

Algoritmo de Modelagem

Manipulador paralelo

Modelos dinâmicos desacoplados

$$\bar{F}_{\mathcal{B}_i}(u_i, q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i) = u_{\mathcal{B}_i} - \left(M_{\mathcal{B}_i}(q_i)\ddot{q}_i + v_{\mathcal{B}_i}(q_i, \dot{q}_i) + g_{\mathcal{B}_i}(q_i) \right) = 0, \quad i = 0, \dots, n \quad (5.1)$$

Princípio de D'Alembert

$$\sum_{i=0}^n \delta W_i = \sum_{i=0}^n \delta q_i^T \cdot \bar{F}_{\mathcal{B}_i} = 0 \quad (5.48)$$

Ou seja:

$$\delta q^T \cdot F = 0 \quad (5.49)$$

Algoritmo de Modelagem

Manipulador paralelo

Vínculos em forma diferencial

$$\mathbb{A}(q)\delta q = 0 \quad (5.50)$$

$$\delta q = Q^\# \delta q^\# + Q^\circ \delta q^\circ \quad (5.52)$$

$$\therefore \delta q = C(q) \cdot \delta q^\# \quad (5.54)$$

Sendo:

$$C(q) = Q^\# - Q^\circ (\mathbb{A}Q^\circ)^{-1} \mathbb{A}Q^\# \quad (5.55)$$

Equações dinâmicas

$$\delta q^{\#T} C^T f = 0 \Leftrightarrow C^T f = 0 \quad (5.57/5.58)$$

Algoritmo de Modelagem

Manipulador paralelo

Dinâmica Direta

Sistema de Equações Diferenciais Algébricas

$$\begin{cases} \mathbb{C}(q)^T(M'(q)\ddot{q} + v'(q, \dot{q}) + g'(q)) = \mathbb{C}(q)^T u' \\ \bar{q}(q) = 0 \end{cases}$$

Sistema de Equações Diferenciais

$$\begin{cases} \mathbb{C}(q)^T(M'(q)\ddot{q} + v'(q, \dot{q}) + g'(q)) = \mathbb{C}(q)^T u' \\ A(q)\ddot{q} + b(q, \dot{q}) = 0 \end{cases} \quad (5.60)$$

Utilizando o método de estabilização de Baumgarte

$$\begin{bmatrix} \mathbb{C}(q)^T M'(q) \\ A(q) \end{bmatrix} \cdot \ddot{q} = \begin{bmatrix} \mathbb{C}(q)^T(u' - v'(q, \dot{q}) - g'(q)) \\ -b(q, \dot{q}) - 2\lambda A(q) \cdot \dot{q} - \lambda^2 \bar{q}(q) \end{bmatrix} \quad (5.65)$$

Algoritmo de Modelagem

Manipulador paralelo

Dinâmica Inversa

$$\mathbb{M}_{\mathcal{M}}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}^{\#} + \nu_{\mathcal{M}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}_{\mathcal{M}}(\mathbf{q}) = \mathbb{Z}(\mathbf{q})^T \mathbf{u}^* \quad (5.73)$$

Sendo:

$$\mathbb{M}_{\mathcal{M}} = \mathbb{C}^T \mathbb{M}' \mathbb{C} \quad (5.74)$$

$$\nu_{\mathcal{M}} = \mathbb{C}^T (\mathbb{M}' \mathbf{c} + \mathbf{v}') \quad (5.75)$$

$$\mathbf{g}_{\mathcal{M}} = \mathbb{C}^T \mathbf{g}' \quad (5.76)$$

$$\mathbf{c} = -(\mathbb{A} \mathbb{Q}^\circ)^{-1} \mathbf{b} \quad (5.68)$$

$$\mathbb{Z} = \mathbb{U}^T \mathbb{C} \quad (5.71^*)$$

$$\mathbf{u}' = \mathbb{U} \cdot \mathbf{u}^* \quad (5.69)$$

Modelo

$$\mathbb{H}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}}^\# + \mathbb{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{u} \quad (6.4)$$

Sendo

$$\mathbb{H}(\mathbf{q}) = \mathbb{M}_{\mathcal{M}}(\mathbf{q}) \quad (6.1)$$

$$\mathbb{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbb{v}_{\mathcal{M}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbb{g}_{\mathcal{M}}(\mathbf{q}) \quad (6.2)$$

$$\mathbf{u} = \mathbb{Z}(\mathbf{q})^T \mathbf{u}^* \quad (6.3)$$

Controle

Modos deslizantes

Superfície de escorregamento

$$\sigma : \underline{s} = \underline{s}(x, r) = 0$$

$$s = 0 \Rightarrow e \rightarrow 0$$

Condição de escorregamento

$$V(s) = \frac{1}{2} s^T W s \quad (6.17)$$

$$\frac{d}{dt} V(s) \leq -s^T \underline{\eta} \operatorname{sign}(s) \quad (6.18)$$

Escolha convencional

$$s = \dot{e} + \underline{\lambda} e \quad (6.14)$$

Para $W = 1$:

$$u = \hat{H}(\ddot{q}_d^\# + \underline{\lambda} \dot{e} + \underline{k} \operatorname{sign}(s)) + \hat{h} \quad (6.28^*)$$

$$(1 - |\mathbb{H}^{-1}\tilde{\mathbb{H}}|_{max}) \cdot \operatorname{diag}(\underline{k}) \geq \operatorname{diag}(\underline{\eta}) + |\mathbb{H}^{-1}\tilde{\mathbb{H}}|_{max}|\ddot{q}_d^\# + \underline{\lambda} \dot{e}| + |\mathbb{H}^{-1}\tilde{\mathbb{h}}|_{max} \quad (6.32)$$

Escolha convencional

$$s = \dot{e} + \underline{\lambda} e \quad (6.14)$$

Para $W = H$:

$$v = \hat{H}(\ddot{q}_d^\# + \underline{\lambda} \dot{e}) + \frac{1}{2} \dot{\hat{H}} s + \hat{h} + \underline{k} \operatorname{sign}(s) \quad (6.35^*)$$

$$\operatorname{diag}(\underline{k}) \geq \operatorname{diag}(\underline{\eta}) + \frac{1}{2} |\dot{\tilde{H}}|_{max} |s| + |\tilde{H}|_{max} |\ddot{q}_d^\# + \underline{\lambda} \dot{e}| + |\tilde{h}|_{max} \quad (6.39)$$

Controle

Modos deslizantes

Nova escolha proposta

$$\dot{s} = \ddot{e} + \underline{k}_v \dot{e} + \underline{k}_p e \quad (6.15)$$

Para $\mathbb{W} = \mathbb{1}$:

$$v = \hat{\mathbb{H}} \left(\ddot{q}_d^\# + \underline{k}_v \dot{e} + \underline{k}_p e + \int_0^t \underline{k} \operatorname{sign}(s) d\tau \right) + \hat{h} \quad (6.52^*)$$

$$\begin{aligned} (\mathbb{1} - |\mathbb{H}^{-1} \tilde{\mathbb{H}}|_{max}) \cdot \operatorname{diag}(\underline{k}) &\geq \operatorname{diag}(\underline{\eta}) + |\mathbb{H}^{-1}(\dot{\mathbb{H}} \mathbb{H}^{-1} \tilde{\mathbb{H}} - \dot{\tilde{\mathbb{H}}})|_{max} |v'' - \sigma| + \\ &|\mathbb{H}^{-1} \tilde{\mathbb{H}}|_{max} |\dot{\sigma}| + |\mathbb{H}^{-1} \dot{\mathbb{H}} \mathbb{H}^{-1} \tilde{\mathbb{H}}|_{max} + |\mathbb{H}^{-1} \dot{\tilde{\mathbb{H}}}|_{max} \end{aligned} \quad (6.56)$$

Controle

Modos deslizantes

Nova escolha proposta

$$s = \ddot{e} + \underline{k}_v \dot{e} + \underline{k}_p e \quad (6.15)$$

Para $\mathbb{W} = \mathbb{H}$:

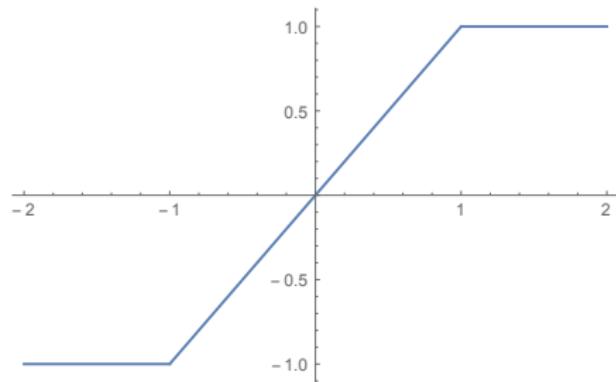
$$u = \hat{\mathbb{H}} \left(\ddot{q}_d^\# + \underline{k}_v \dot{e} + \underline{k}_p e + \int_0^t \hat{\mathbb{H}}^{-1} \left(\underline{k} \text{sign}(s) + \frac{1}{2} \dot{\hat{\mathbb{H}}} s \right) d\tau \right) + \hat{h} \quad (6.59^*)$$

$$\begin{aligned} \text{diag}(\underline{k}) &\geq \text{diag}(\underline{\eta}) + \frac{1}{2} |\dot{\tilde{\mathbb{H}}}|_{max} |s| + |(\dot{\mathbb{H}} \mathbb{H}^{-1} \tilde{\mathbb{H}} - \dot{\tilde{\mathbb{H}}})|_{max} |u'' - \sigma| + \\ &|\tilde{\mathbb{H}}|_{max} |\dot{\sigma}| + |\dot{\mathbb{H}} \mathbb{H}^{-1} \tilde{\mathbb{H}}|_{max} + |\dot{\tilde{\mathbb{H}}}|_{max} \end{aligned} \quad (6.63)$$

Camada limite

$$\text{sign}(s) \rightarrow \text{sat}(s/\phi)$$

$$-\phi < s_i < \phi \Rightarrow e_{max} = \phi/k_p$$

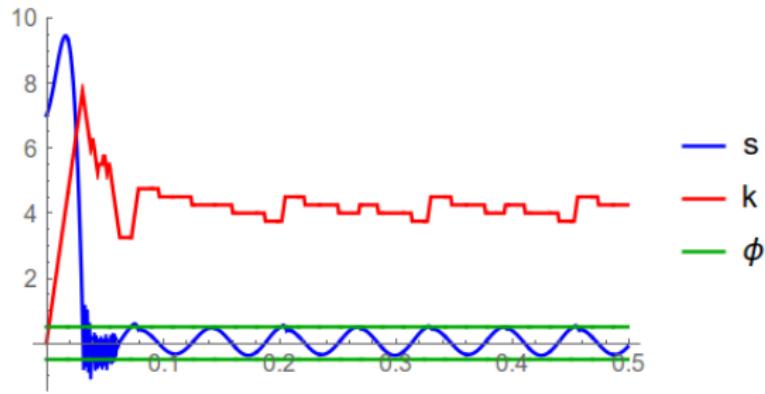


Controle

Modos deslizantes

Lei de Adaptação (Monsees, Discrete-Time Sliding Mode Control, 2002)

- $\underline{k}_i[k + 1] = \underline{k}_i[k] + \gamma_i$: Se estiver fora da camada limite e s_i não trocou de sinal
- $\underline{k}_i[k + 1] = \underline{k}_i[k] - \gamma_i$: Se s_i trocou de sinal e $\underline{k}_i[k] \geq \gamma_i$:
- $\underline{k}_i[k + 1] = \underline{k}_i[k]$: Caso contrário



Controle

Modos deslizantes

Lei de controle escolhida

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

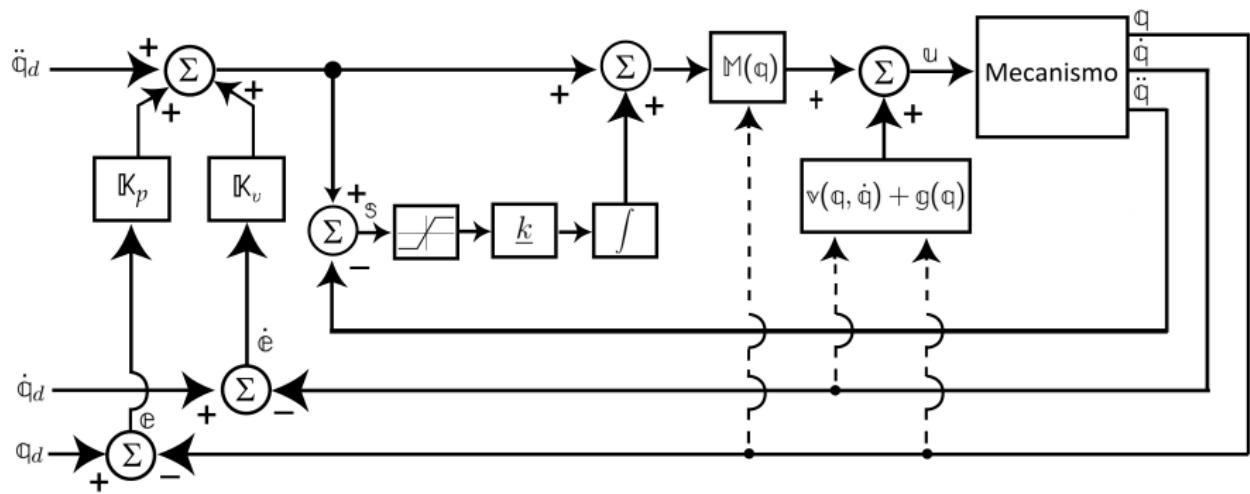
Sendo:

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

Propriedades

- Robustez característica do CMD
- Grande redução de *chattering* devido à integral
- Similar à lei de CTC (adição de 1 termo)
- Custo computacional muito similar ao do CTC

Controle



Controle

Leis utilizadas

PD

$$v = m^* \left(\ddot{q}_d^\# + k_v \dot{e} + k_p e \right)$$

PDMD

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

TC

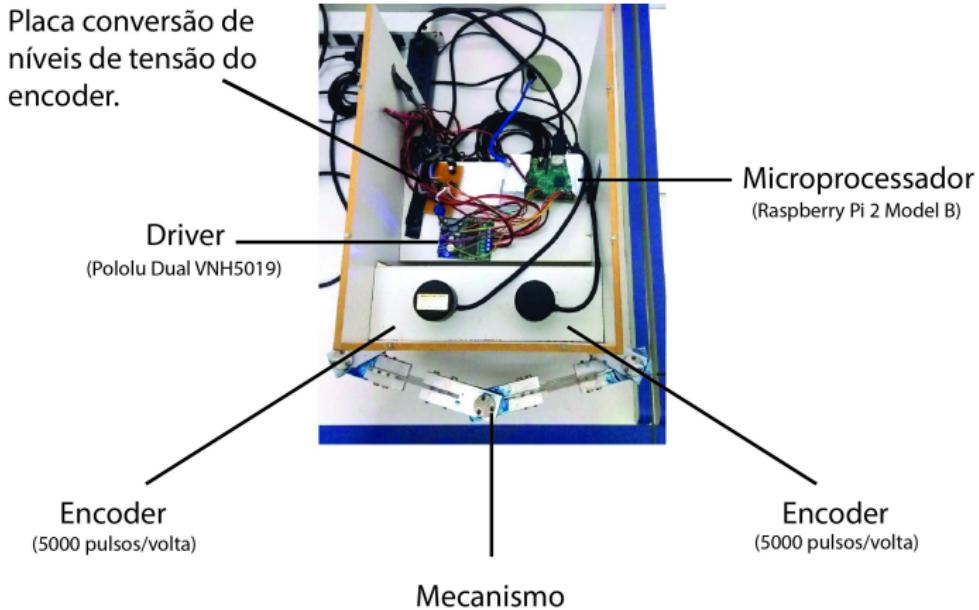
$$v = \hat{H}(q) \left(\ddot{q}_d^\# + k_v \dot{e} + k_p e \right) + \hat{h}(q, \dot{q})$$

TCMD

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

Experimento

Bancada Experimental



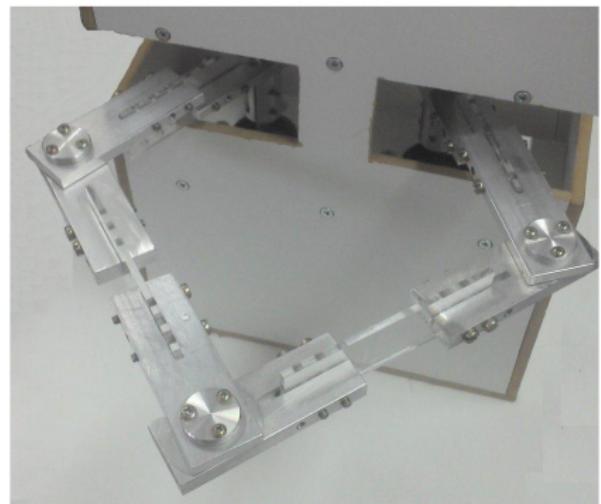
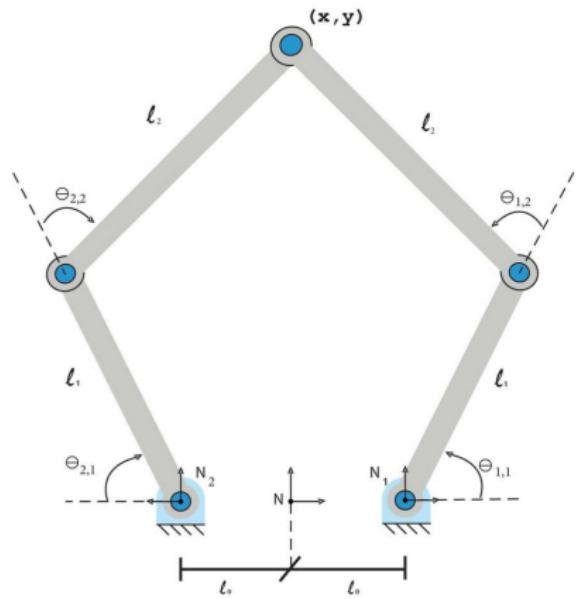
Motor DC
(Ametek PM70 250W)



Fonte chaveada
(390W)

Experimento

Bancada Experimental



Experimento

Bancada Experimental

Tabela 2: Parâmetros da cadeia serial 1

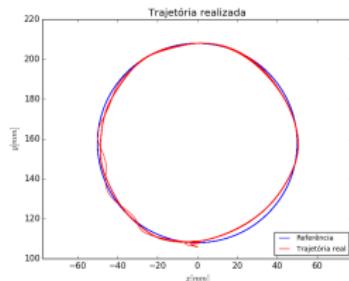
Parâmetros	Valores	Unidades
l_0	0.050	m
l_1	0.120	m
l_2	0.160	m
l_{g1}	0.060	m
l_{g2}	0.078	m
m_1	0.062	kg
m_2	0.124	kg
J_{z1}	$1.073 \cdot 10^{-4}$	$kg.m^2$
J_{z2}	$4.380 \cdot 10^{-4}$	$kg.m^2$

Tabela 3: Parâmetros da cadeia 2

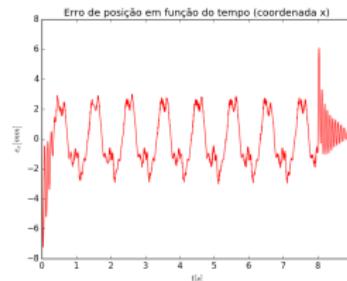
Parâmetros	Valores	Unidades
l_0	0.050	m
l_1	0.120	m
l_2	0.160	m
l_{g1}	0.060	m
l_{g2}	0.058	m
m_1	0.062	kg
m_2	0.097	kg
J_{z1}	$2.960 \cdot 10^{-4}$	$kg.m^2$
J_{z2}	$9.800 \cdot 10^{-4}$	$kg.m^2$

Experimento

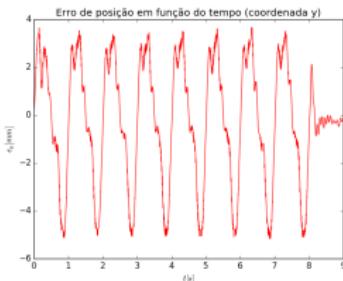
PDq - Trajetória circular



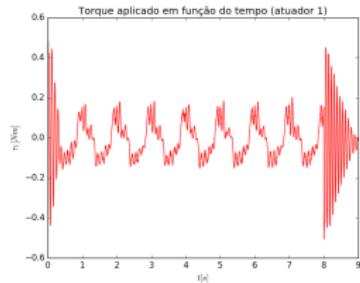
(a) Trajetória



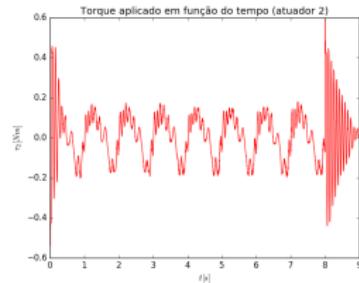
(b) e_x



(c) e_y



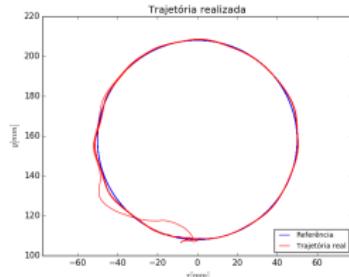
(d) τ_1



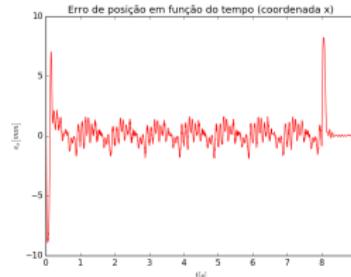
(e) τ_2

Experimento

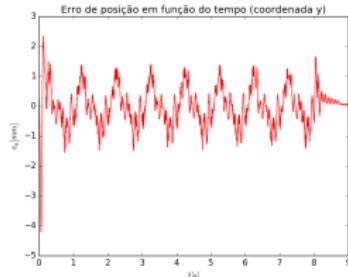
TCMDx - Trajetória circular



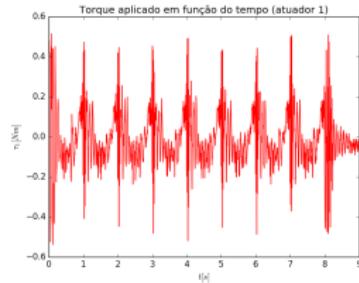
(a) Trajetória



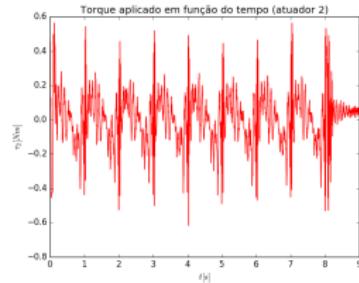
(b) e_x



(c) e_y



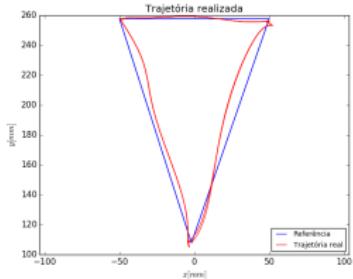
(d) τ_1



(e) τ_2

Experimento

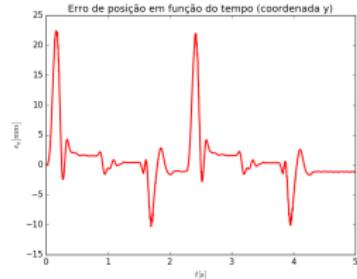
PDq - Trajetória triangular



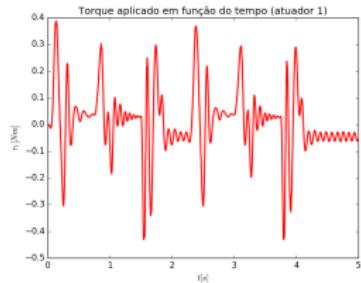
(a) Trajetória



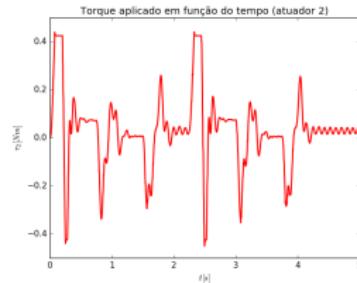
(b) e_x



(c) e_y



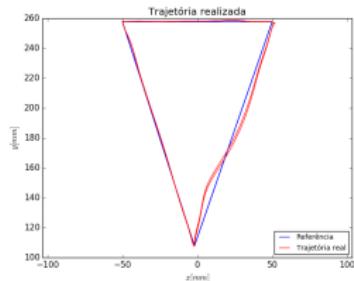
(d) τ_1



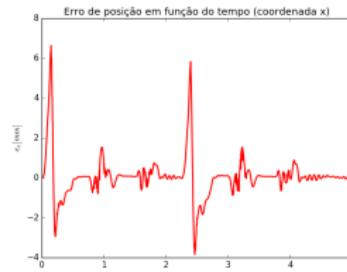
(e) τ_2

Experimento

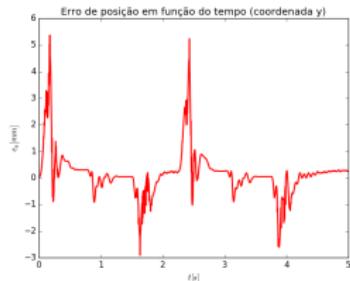
TCMDx - Trajetória triangular



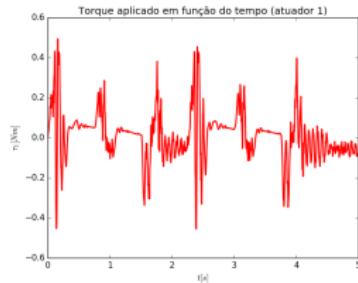
(a) Trajetória



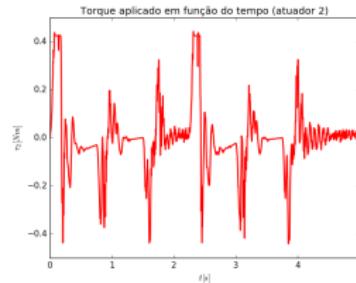
(b) e_x



(c) e_y



(d) τ_1



(e) τ_2

Discussão

Tabela 7: Trajetória circular

Estratégia	$e_{ef}[mm]$	$\tau_{ef}[N.m]$
PDq	3.15	0.132
PDMDq	2.37	0.141
TCq	1.14	0.143
TCMDq	0.77	0.168
PDx	0.91	0.155
PDMDx	0.65	0.169
TCx	1.16	0.150
TCMDx	0.90	0.185

Discussão

Tabela 8: Trajetória triangular

Estratégia	$e_{ef}[mm]$	$\tau_{ef}[N.m]$
PDq	5.39	0.197
PDMDq	5.16	0.212
TCq	1.85	0.181
TCMDq	1.63	0.191
PDx	1.98	0.191
PDMDx	1.79	0.188
TCx	1.83	0.188
TCMDx	1.36	0.186

Discussão

Combinação com MD

- Diminuição do e_{ef} em todos os casos
- Diminuição considerável do erro estacionário de posição
- Aumento perceptível do τ_{ef} na trajetória circular
- Aumento sutil do τ_{ef} na trajetória triangular
- Diminuição nos valores de pico do erro na trajetória triangular
- Aumento do conteúdo harmônico do esforço de controle

Espaço das juntas vs Espaço da tarefa

- Desempenho superior do PD e PDMD no espaço da tarefa
- Desempenho equivalente do TC e TCMD em ambos espaços

Discussão

Trajetória triangular

- Para as leis baseadas em modelos, o erro é maior no trecho I
- PDq e PDMDq apresentam maior erro nos trechos I e III
- PDx e PDMDx apresentam maior erro nos trecho II
- Combinação com MD diminui os valores de pico do erro (efeito *undershoot*)

Trajetória circular: partida e parada

- PDx e PDMDx apresentam os menores picos de erro
- Combinação com MD aumenta os valores de pico do erro

Discussão

Consumo energético

- Valores de τ_{ef} muito próximos na trajetória triangular
- PDq, PDMDq e TCq apresentam os menores valores de τ_{ef} na trajetória circular
- TCMDq, PDMDx e TCMDx apresentam os maiores valores de τ_{ef} na trajetória circular

Erro de controle

- PDq e PDMDq apresentam os maiores valores de e_{ef} em ambas as trajetórias
- TCMDx e PDMDx apresentam os menores valores de e_{ef} na trajetória circular
- TCMDx e TCMDq apresentam os menores valores de e_{ef} na trajetória triangular

Conclusões

- Algoritmo de modelagem proposto: se mostrou bastante adequado ao seu propósito, facilitando muito o processo de modelagem e implementação do modelo para controle
- Leis de controle propostas (PDMD e TCMD): também se mostraram bastante adequadas para o controle de mecanismo paralelo, aumentanto o desempenho em relação às leis de controle puras (PD e TC) ao custo de um pequeno aumento no custo computacional e no custo energético
- A escolha entre espaço das juntas e espaço da tarefa: pode ter grande influência no desempenho do sistema, dependendo da lei de controle escolhida

Principais contribuições

- Desenvolvimento do algoritmo genérico para modelagem dinâmica de manipuladores paralelos translacionais
- Síntese de uma nova lei de controle não linear robusto para manipuladores robóticos, com desempenho comprovado experimentalmente
- Avaliação e comparação de desempenho entre 8 diferentes estratégias de controle para manipuladores paralelos através de ensaios experimentais

Trabalhos futuros

- Extensão do algoritmo de modelagem para mecanismos paralelos de até 6 gl no efetuador
- Obtenção de resultados experimentais das leis de controle propostas em um mecanismo paralelo de atuação redundante (Super-Clara)

Agradecimentos

- CNPq – Código de financiamento 162502/2015-0
- Membros da banca
- Victor Bartholomeu e Juliana de Oliveira-Fuess
- Décio Rinaldi
- Prof. Dr. Tarcisio Antonio Hess Coelho
- Prof. Dr. Renato Maia Matarazzo Orsino