

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

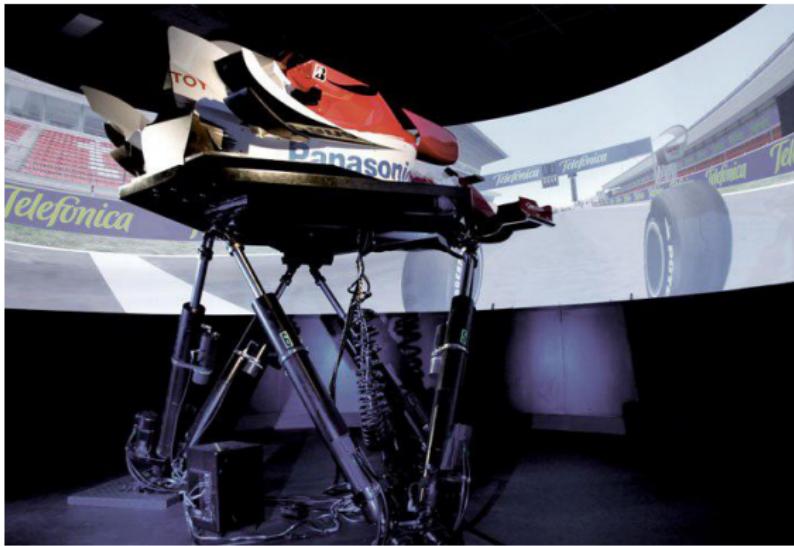


Introdução

Mecanismos paralelos

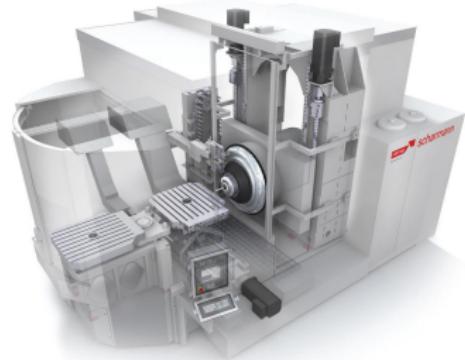
Aplicações

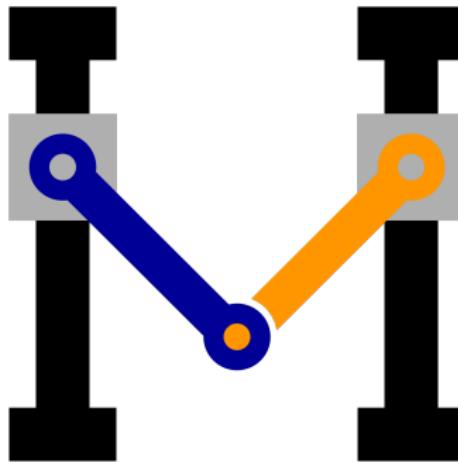
- Simuladores



Aplicações

- Usinagem





Introdução

Grupo de pesquisa

Robôs

Giovanna



Introdução

Grupo de pesquisa

Robôs

Dora

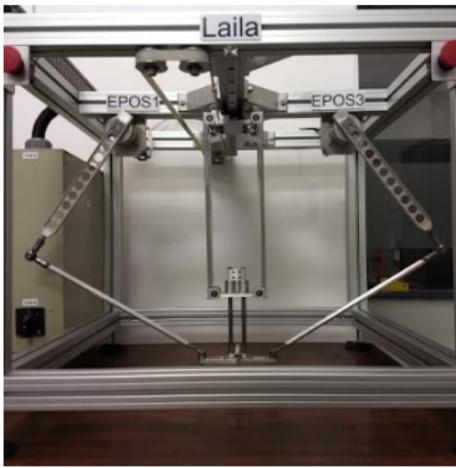


Introdução

Grupo de pesquisa

Robôs

Laila

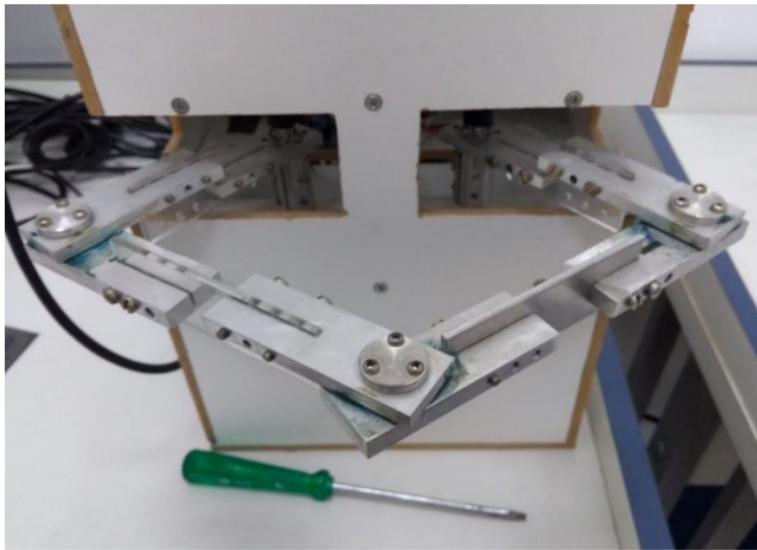


Introdução

Grupo de pesquisa

Robôs

Clara



Objetivos

Geral

Contribuir para o aumento do desempenho de manipuladores paralelos

Como?

- Facilitando o processo de geração de modelos dinâmicos
- Empregando de técnicas de controle robusto baseado em modelo
- Comparando o desempenho das leis de controle mais encontradas na literatura e das leis 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

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

$$\bar{q}(q, t) = 0 \quad (2.2)$$

Sendo

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

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)

Revisão da Literatura

Controle

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

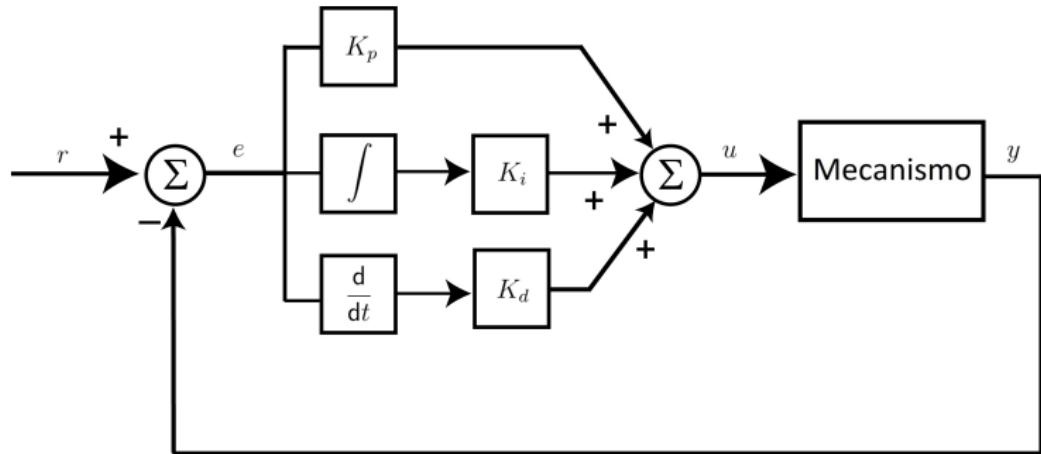
- Controle Proporcional-Integral-Derivativo
- Controle por Torque Computado (Shang e Cong, 2009; Yen e Lai, 2009)
- Controle por Torque Computado com pré-alimentação (Siciliano *et al.*, 2010; Spong *et al.*, 2006)
- Controle por Torque Computado Estendido (Zubizarreta *et al.*, 2013; Zubizarreta *et 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

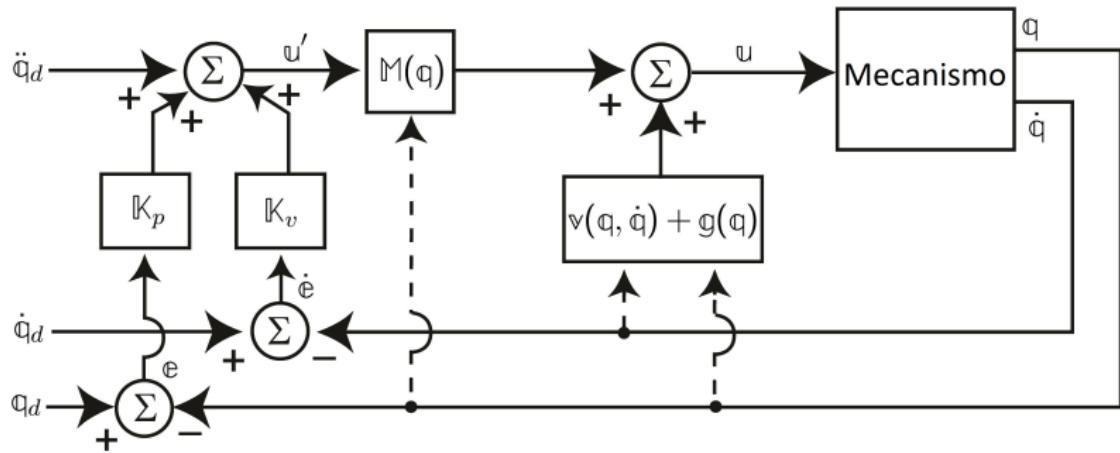


Controle por Torque Computado (CTC)

- 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

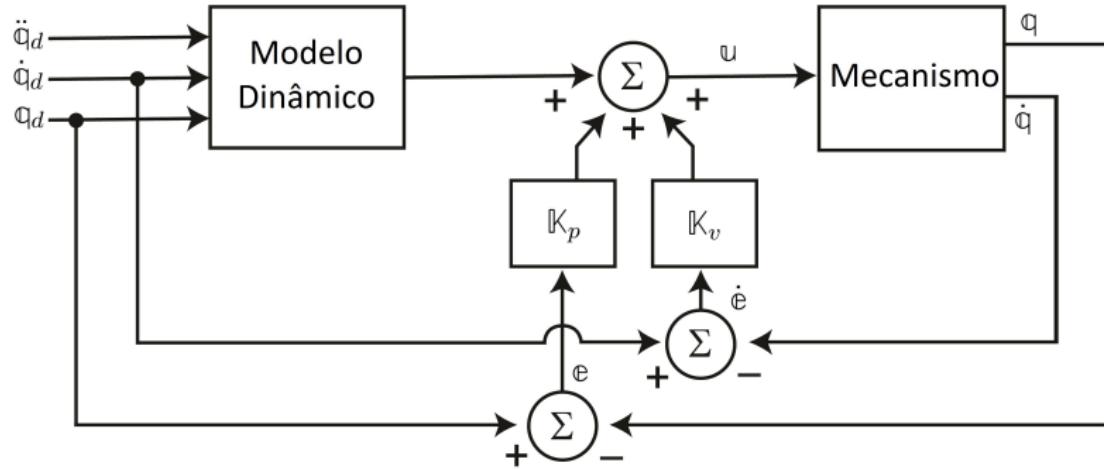


Controle por Torque Computado com pré-alimentação (CTCp)

- 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)

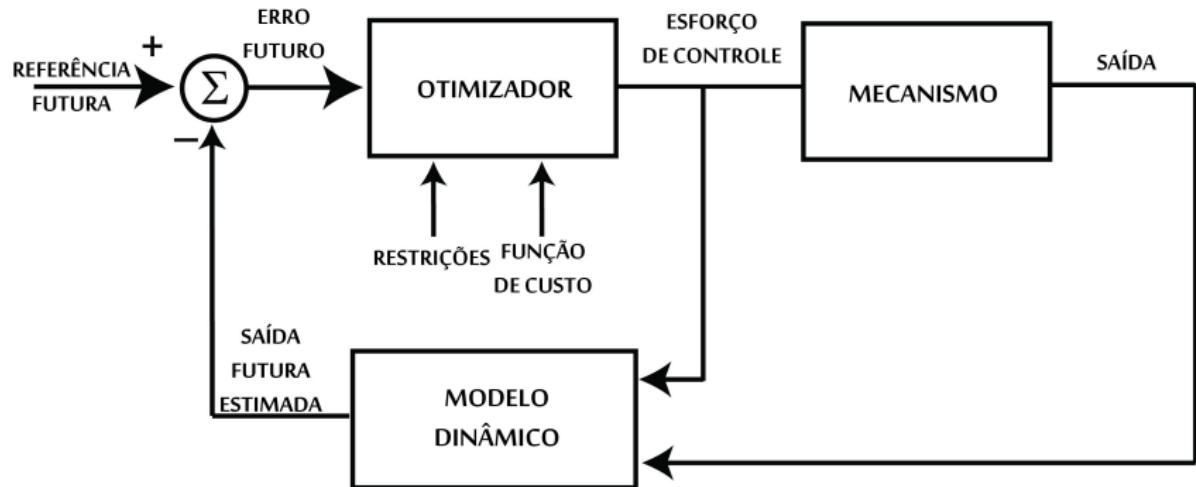
- Lei de controle similar ao CTC
- Realiza compensação de não linearidades por realimentação
- Utiliza informação redundante obtida pelo sensoriamento de juntas passivas na lei de controle
- Maior robustez a incertezas paramétricas

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

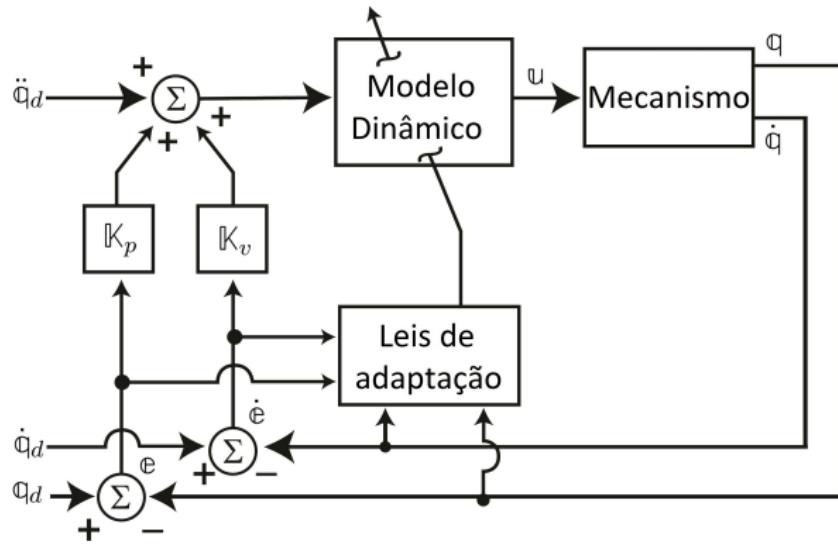


Controle Adaptativo (CA)

- 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 estimação 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

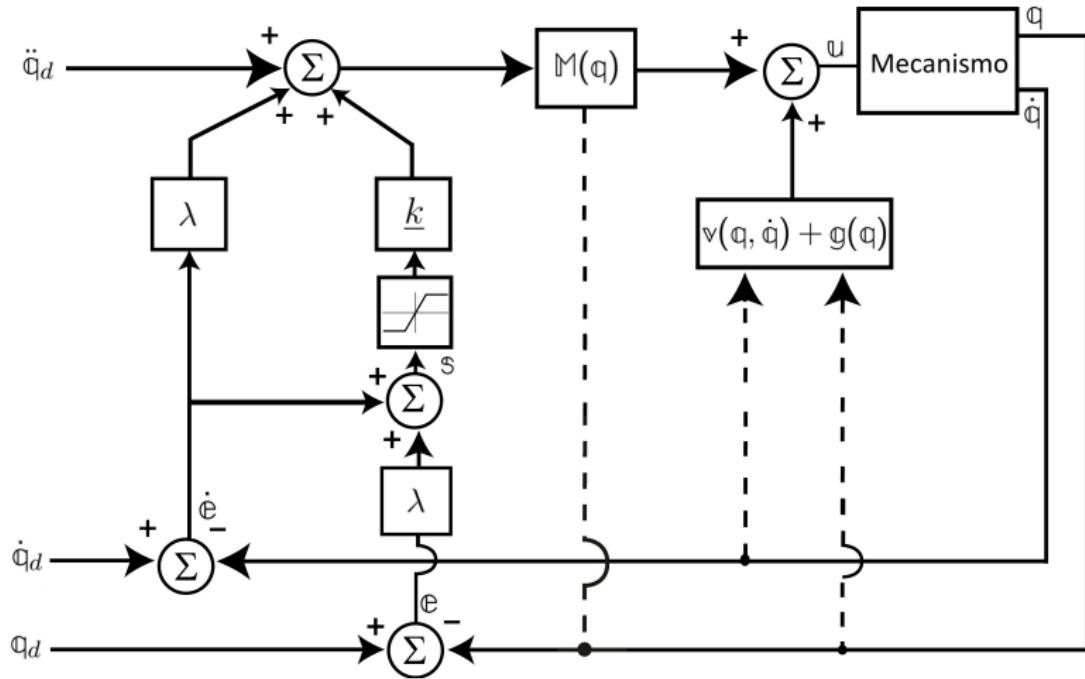


Controle por Modos Deslizantes (CMD)

- 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

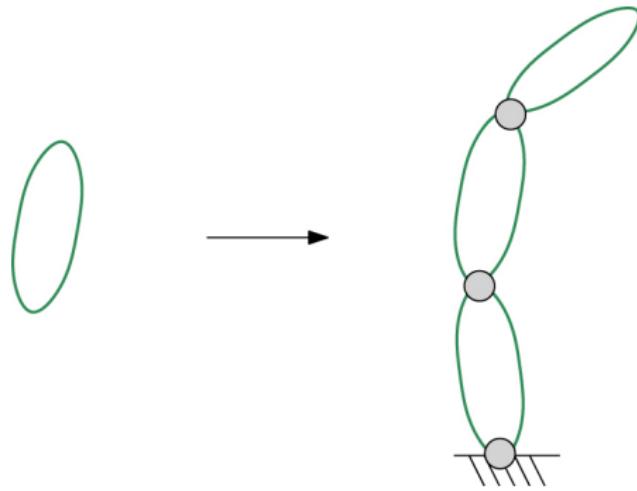
Experimento

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

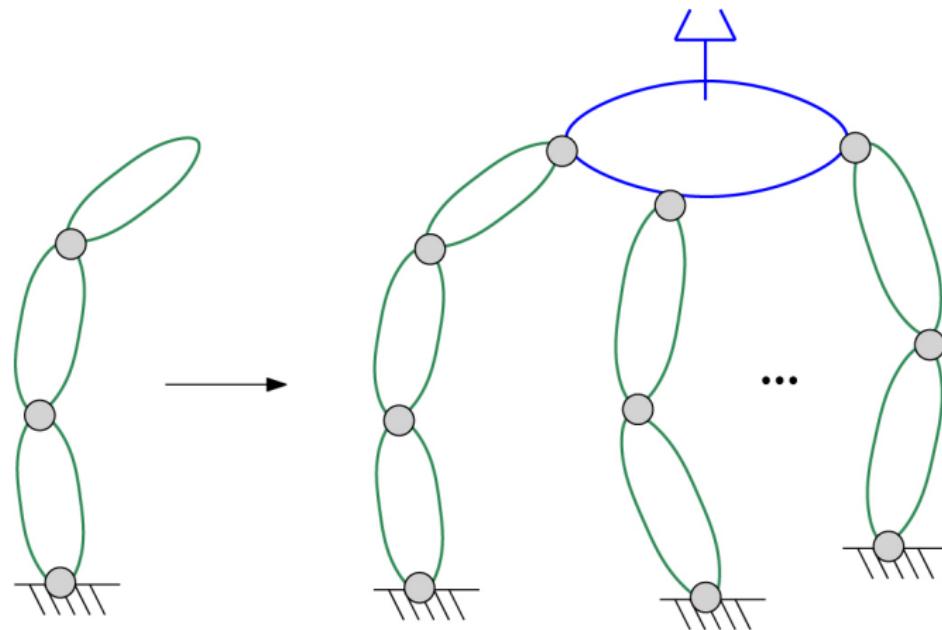
- Parâmetros de Denavit-Hartenberg
- Coordenadas dos centros de massa dos elos nos sistemas móveis

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

Cinemática das cadeias seriais

- $\mathbf{x}_i(q_i)$: Coordenadas x, y, z do efetuador de \mathcal{B}_i no sistema N_i
- $\mathbf{v}_i(q_i, \dot{q}_i)$: Velocidade linear do efetuador de \mathcal{B}_i no sistema N_i
- $\mathbf{a}_i(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i)$: Aceleração linear do efetuador de \mathcal{B}_i no sistema N_i
- $\boldsymbol{\omega}_i(q_i, \dot{q}_i)$: Velocidade angular do efetuador de \mathcal{B}_i no sistema N_i
- $\boldsymbol{\dot{\omega}}_i(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i)$: Aceleração angular do efetuador de \mathcal{B}_i no sistema N_i

$$\mathbf{v}(q^\diamond, \dot{q}^\diamond) = \mathbb{J}_v(q^\diamond) \cdot \dot{q}^\diamond$$

$$\mathbf{a}(q^\diamond, \dot{q}^\diamond, \ddot{q}^\diamond) = \mathbb{J}_v(q^\diamond) \cdot \ddot{q}^\diamond + \mathbf{g}(q^\diamond, \dot{q}^\diamond)$$

$$\boldsymbol{\omega}(q^\diamond, \dot{q}^\diamond) = \mathbb{J}_w(q^\diamond) \cdot \dot{q}^\diamond$$

$$\boldsymbol{\dot{\omega}}(q^\diamond, \dot{q}^\diamond, \ddot{q}^\diamond) = \mathbb{J}_w(q^\diamond) \cdot \ddot{q}^\diamond + \boldsymbol{\ddot{\omega}}(q^\diamond, \dot{q}^\diamond)$$

Algoritmo de Modelagem

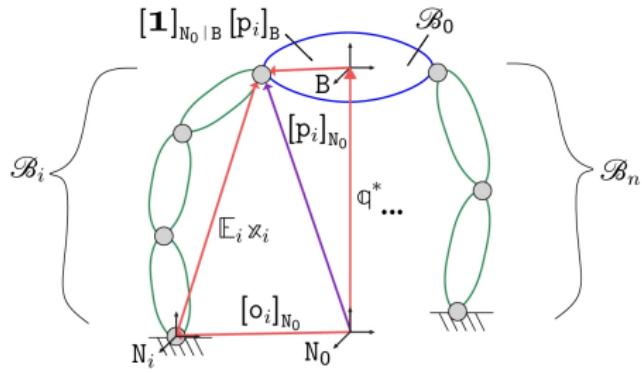
Manipulador paralelo

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

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

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

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

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

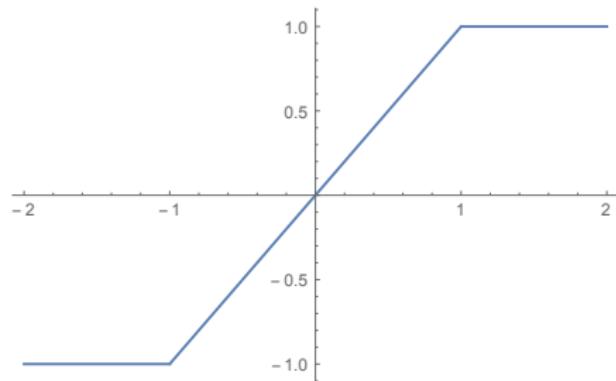
$$u = \hat{\mathbb{H}} \left(\ddot{q}_d^\# + \underline{k}_v \dot{e} + \underline{k}_p e + \int_0^t \hat{\mathbb{H}}^{-1} \left(\underline{k} \text{sign}(s) + \frac{1}{2} \dot{\hat{\mathbb{H}}} s \right) d\tau \right) + \hat{h} \quad (6.59^*)$$

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

Camada limite

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

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

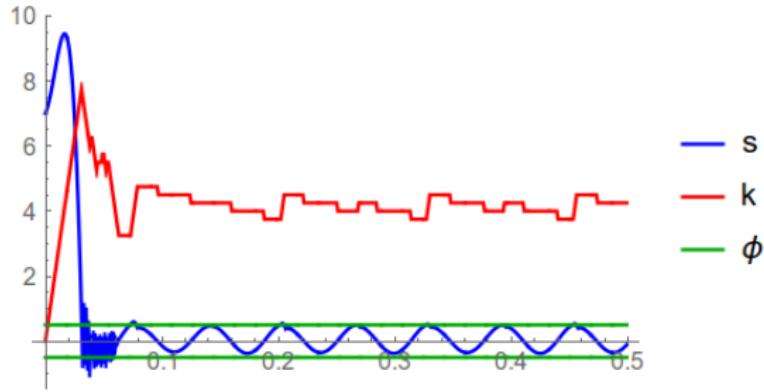


Controle

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

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

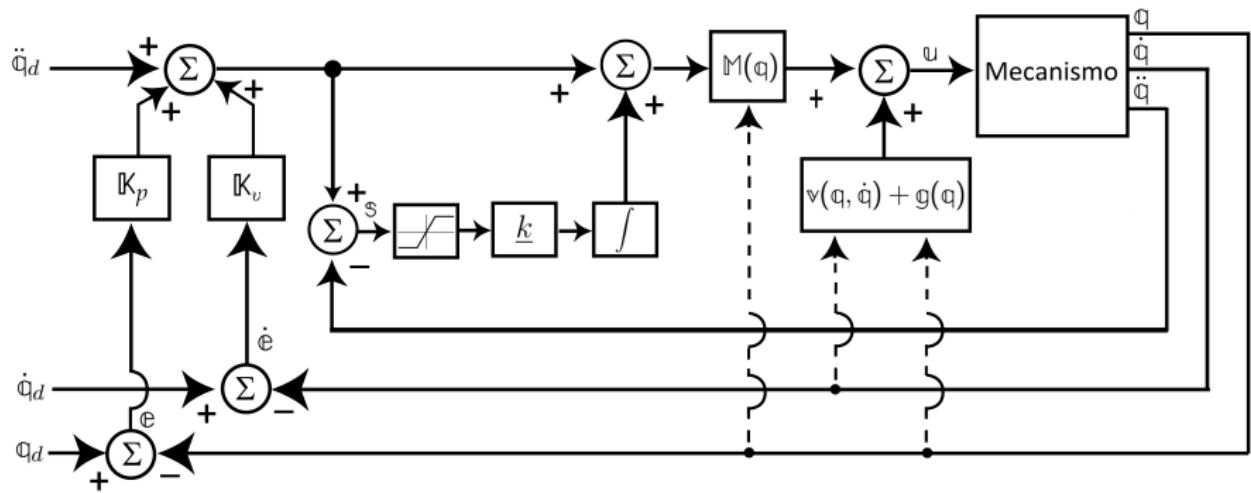
Sendo:

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

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

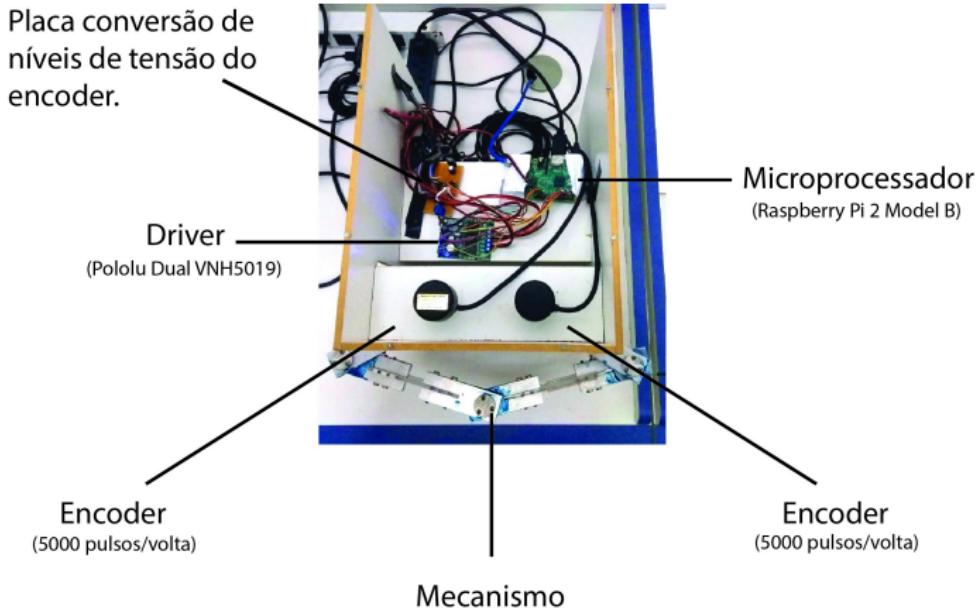
$$v = \hat{H}(q) \left(\ddot{q}_d^\# + k_v \dot{e} + k_p e \right) + \hat{h}(q, \dot{q})$$

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



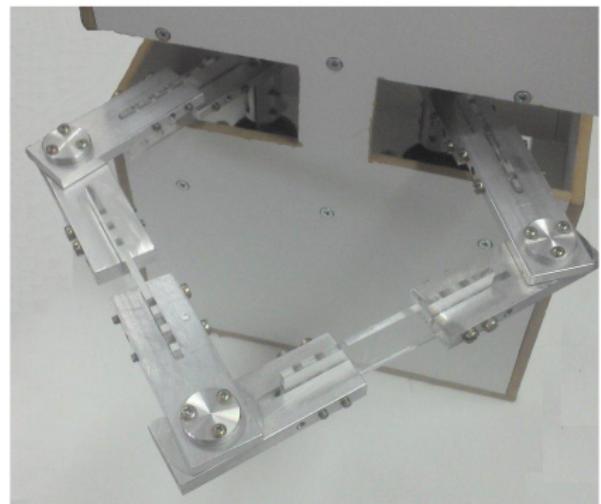
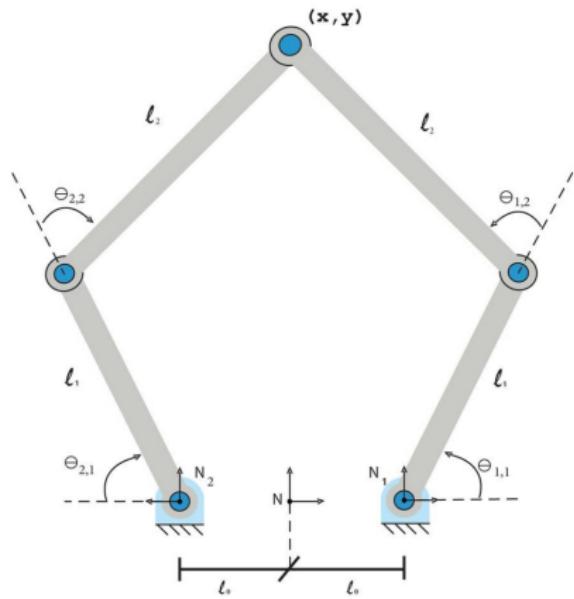
Motor DC
(Ametek PM70 250W)



Fonte chaveada
(390W)

Experimento

Bancada Experimental



Experimento

Bancada Experimental

Tabela 2: Parâmetros da cadeia serial 1

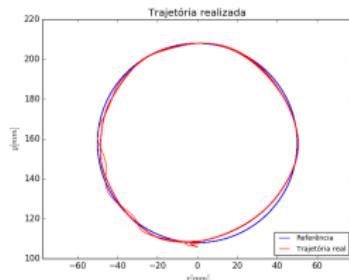
Parâmetros	Valores	Unidades
l_0	0.050	m
l_1	0.120	m
l_2	0.160	m
l_{g1}	0.060	m
l_{g2}	0.078	m
m_1	0.062	kg
m_2	0.124	kg
J_{z1}	$1.073 \cdot 10^{-4}$	$kg.m^2$
J_{z2}	$4.380 \cdot 10^{-4}$	$kg.m^2$

Tabela 3: Parâmetros da cadeia 2

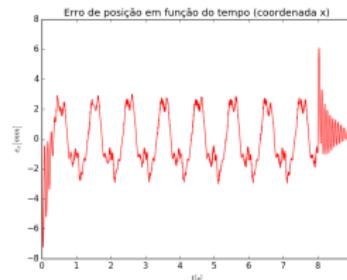
Parâmetros	Valores	Unidades
l_0	0.050	m
l_1	0.120	m
l_2	0.160	m
l_{g1}	0.060	m
l_{g2}	0.058	m
m_1	0.062	kg
m_2	0.097	kg
J_{z1}	$2.960 \cdot 10^{-4}$	$kg.m^2$
J_{z2}	$9.800 \cdot 10^{-4}$	$kg.m^2$

Experimento

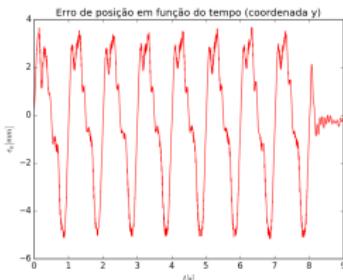
PDq - Trajetória circular



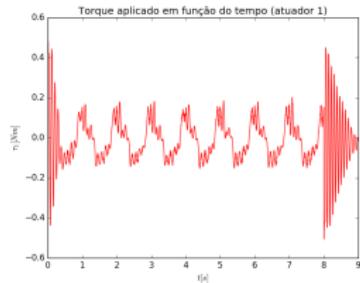
(a) Trajetória



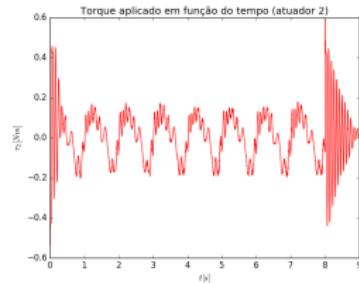
(b) e_x



(c) e_y



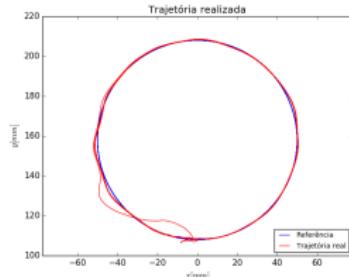
(d) τ_1



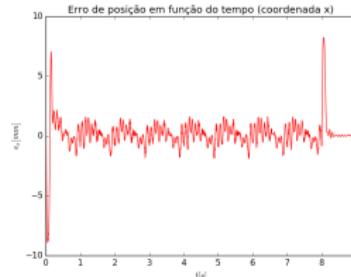
(e) τ_2

Experimento

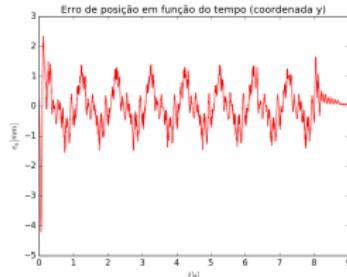
TCMDx - Trajetória circular



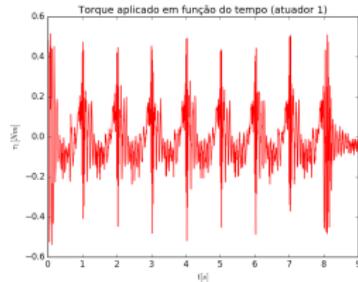
(a) Trajetória



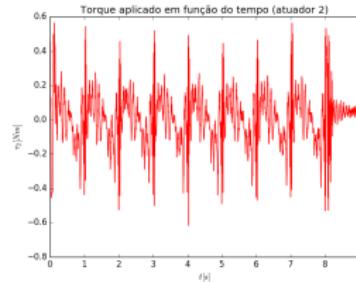
(b) e_x



(c) e_y



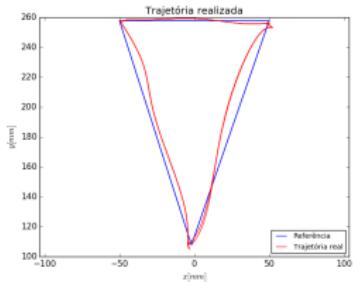
(d) τ_1



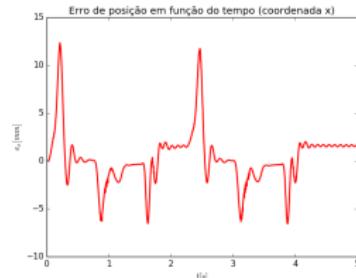
(e) τ_2

Experimento

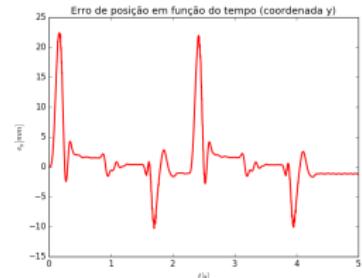
PDq - Trajetória triangular



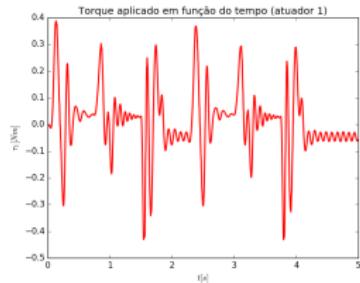
(a) Trajetória



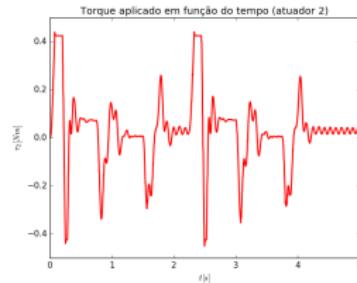
(b) e_x



(c) e_y



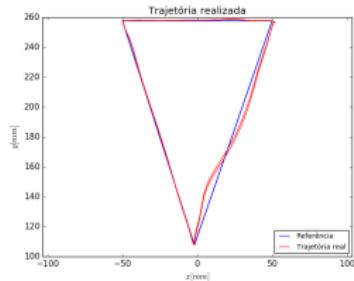
(d) τ_1



(e) τ_2

Experimento

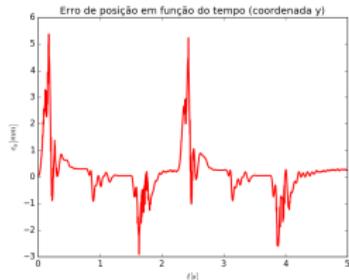
TCMDx - Trajetória triangular



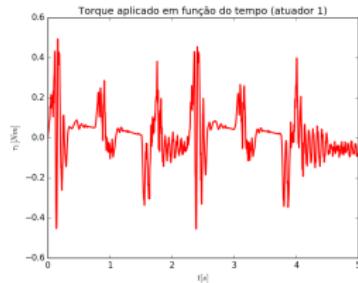
(a) Trajetória



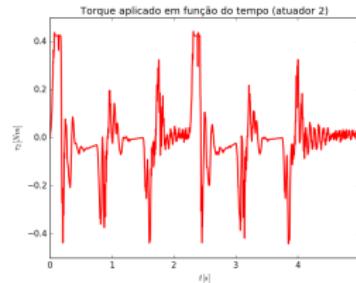
(b) e_x



(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