

# Contribuições à modelagem e controle de manipuladores paralelos

André Garnier Coutinho

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Novembro de 2019

# Revisão da Literatura

## Modelagem Dinâmica

### Influência da topologia do robô

### Influência da topologia do robô

- Seriais

### Influência da topologia do robô

- Seriais
  - Cadeia aberta
  - Juntas ativas de 1 gl
  - $N^{\circ}$  de coord. gen. =  $N^{\circ}$  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

### Influência da topologia do robô

- Paralelos

### 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 não linear
  - Coord. gen. ind.: coord. dos atuadores ou do efetuador

### Dinâmica direta - EDAs

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

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

Sendo

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



### 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

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

### 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

### Propósito

- Simulação

### Propósito

- Simulação
  - Projeto/Dimensionamento do mecanismo/manipulador
  - Grau de detalhamento do modelo depende da aplicação
  - Não necessita rodar em tempo real

### Propósito

- Simulação
  - Projeto/Dimensionamento do mecanismo/manipulador
  - Grau de detalhamento do modelo depende da aplicação
  - Não necessita rodar em tempo real
- Controle

### Propósito

- Simulação
  - Projeto/Dimensionamento do mecanismo/manipulador
  - Grau de detalhamento do modelo depende da aplicação
  - Não necessita rodar 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 precisa rodar em tempo real

### 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

### 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

### Controle por Torque Computado (CTC)

- Técnica de controle não linear centralizado
- Baseado no modelo dinâmico do mecanismo
- Realiza compensação de não linearidades por realimentação
- Desempenho superior ao PID, porém bastante dependente da qualidade do modelo dinâmico
- Implementação mais complexa
- Maior custo computacional

### 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

### Controle por Torque Computado Estendido (CTCe)

- Lei de controle similar ao CTC
- Realiza compensação de não linearidades por realimentação
- Utiliza informação redundante obtida pelo sensoramento de juntas passivas na lei de controle p/ aumentar robustez
- Robusto a incertezas nos parâmetros cinemáticos

### 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 custo que envolve o erro e o esforço de controle em tempo futuro
- Custo computacional bastante dependente da complexidade do modelo
- Maior robustez a incertezas paramétricas

### 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 termos não lineares de compensação dinâmica
- Custo computacional adicional relativo a integração das leis de adaptação
- Maior complexidade de projeto e implementação



### 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*