



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  

---

Escola Politécnica

## TÍTULO DA TESE

Luís Gustavo Oliveira Silva

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação, da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientadores: Fernando Cesar Lizarralde  
Nome do Segundo Orientador  
Sobrenome

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2011

## TÍTULO DA TESE

Luís Gustavo Oliveira Silva

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO.

Examinado por:

---

Prof. Nome do Primeiro Examinador Sobrenome, D.Sc.

---

Prof. Nome do Segundo Examinador Sobrenome, Ph.D.

---

Prof. Nome do Terceiro Examinador Sobrenome, D.Sc.

---

Prof. Nome do Quarto Examinador Sobrenome, Ph.D.

---

Prof. Nome do Quinto Examinador Sobrenome, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
FEVEREIRO DE 2011

Oliveira Silva, Luís Gustavo

Título da Tese/Luís Gustavo Oliveira Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2011.

XI, 13 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Fernando Cesar Lizarralde

Nome do Segundo Orientador

Sobrenome

Projeto de graduação – UFRJ/Escola Politécnica/Curso de Engenharia de Controle e Automação, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 12 – 12.

1. Primeira palavra-chave. 2. Segunda palavra-chave. 3. Terceira palavra-chave. I. , Fernando Cesar Lizarralde *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

*A alguém cujo valor é digno  
desta dedicatória.*

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à POLI/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

## TÍTULO DA TESE

Luís Gustavo Oliveira Silva

Fevereiro/2011

Orientadores: Fernando Cesar Lizarralde

Nome do Segundo Orientador Sobrenome

Curso: Engenharia de Controle e Automação

Apresenta-se, nesta tese, ...

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Control and Automation Engineer.

THESIS TITLE

Luís Gustavo Oliveira Silva

February/2011

Advisors: Fernando Cesar Lizarralde

Nome do Segundo Orientador Sobrenome

Course: Control and Automation Engineering

In this work, we present ...

# Sumário

|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| <b>Lista de Figuras</b>              | <b>x</b>  |
| <b>Lista de Tabelas</b>              | <b>xi</b> |
| <b>1 Introdução</b>                  | <b>1</b>  |
| 1.1 Doris...                         | 1         |
| 1.2 Tetis..                          | 1         |
| <b>2 Revisão Bibliográfica</b>       | <b>2</b>  |
| 2.1 Cinemática Direta                | 2         |
| 2.1.1 Convenção Denavit-Hartenberg   | 3         |
| 2.2 Cinemática Diferencial           | 4         |
| 2.2.1 Jacobiano Geométrico           | 4         |
| 2.2.2 Jacobiano Analítico            | 4         |
| 2.3 Controle Cinemático              | 4         |
| 2.4 Servo Visão                      | 6         |
| 2.4.1 Servo Visão Baseada em Posição | 6         |
| <b>3 Tetis</b>                       | <b>7</b>  |
| 3.1 Parâmetros Denavit–Hartenberg    | 7         |
| <b>4 Implementação</b>               | <b>8</b>  |
| 4.1 Motivação                        | 8         |
| 4.2 Ferramentas                      | 8         |
| 4.3 ROS                              | 8         |
| 4.4 Conceitos                        | 8         |
| <b>5 Resultados e Discussões</b>     | <b>10</b> |
| 5.1 Respostas das Juntas             | 10        |
| <b>6 Conclusões</b>                  | <b>11</b> |
| <b>Referências Bibliográficas</b>    | <b>12</b> |





# Lista de Figuras

|     |                               |    |
|-----|-------------------------------|----|
| 2.1 | Diagrama . . . . .            | 5  |
| 2.2 | Diagrama . . . . .            | 5  |
| 5.1 | Resposta das juntas . . . . . | 10 |

# Lista de Tabelas

|     |   |   |
|-----|---|---|
| 3.1 | Parametros Denavit–Hartenberg . . . . . | 7 |
|-----|---|---|

# Capítulo 1

## Introdução

Robos...

**1.1** Doris...

**1.2** Tetis..

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão abordados os conceitos necessários para modelagem e controle de manipuladores robóticos.

### 2.1 Cinemática Direta

Um manipulador robótico é composto de uma série de corpos rígidos denominados *elos* conectados através de *juntas*. Juntas podem ser:

- Revolução
- Prismática

Essa estrutura é chamada de cadeia cinemática. Um extremo da cadeia é fixado a base e o outro ao efetuador. Nesse texto serão abordadas apenas cadeias cinemáticas abertas, ou seja, aquelas em que existe apenas uma sequência de elos conectando os dois extremos da cadeia. Cada junta acrescenta um grau de liberdade (DOF), ao qual está associado a uma variável de junta. No caso de uma junta de revolução um ângulo e no caso de uma junta prismática um deslocamento. O objetivo da cinemática direta é calcular a posição e orientação do efetuador em função das variáveis das juntas.

Uma cadeia cinemática aberta é constituída por  $n + 1$  elos numerados de 0 a  $n$ , onde o Elo 0 é fixado a base por convenção. O método utilizado consiste em definir um sistema de coordenadas associado a cada elo e calcular a transformação homogênea entre elos consecutivos. Em seguida a transformação do  $n$ -ésimo sistema de coordenadas pode ser obtida de forma recursiva como

$$\mathbf{T}_{0n}(\mathbf{q}) = \mathbf{T}_{01}(q_1)\mathbf{T}_{12}(q_2) \dots \mathbf{T}_{n-1,n}(q_n) \quad (2.1)$$

onde  $\mathbf{T}_{i-1,i}(q_i)$  denota a transformação homogênea do sistema de coordenadas sólídário ao elo  $i - 1$  àquele sólídário ao elo  $i$ .

Logo a transformação homogênea que da efetuador final com respeito a base é dada por

$$\mathbf{T}_{be}(\mathbf{q}) = \mathbf{T}_{b0}\mathbf{T}_{0n}(\mathbf{q})\mathbf{T}_{ne} \quad (2.2)$$

### 2.1.1 Convenção Denavit-Hartenberg

Para calcular a cinemática direta para um manipulador de cadeia cinemática aberta de acordo com a equação (2.1) um método sistemático foi definido para obter a relação entre a posição e orientação de dois elos consecutivos. A convenção Denavit-Hartenberg especifica um conjunto de regras sobre como definir os sistemas de coordenadas de cada elo.

Seja o Eixo  $i$  o eixo da junta que conecta o elo  $i - 1$ , ao elo  $i$ , então:

- Escolher o eixo  $z_i$  ao longo do eixo da junta  $i + 1$ .
- Colocar a origem  $O_i$  na interseção do eixo  $z_i$  com a normal comum entre os eixos  $z_{i-1}$  e  $z_i$
- Escolher  $x_i$  ao longo da normal comum aos eixos  $z_{i-1}$  e  $z_i$ , com direção da junta  $i$  para a junta  $i + 1$ .
- O eixo  $y_i = z_i \times x_i$  é escolhido de forma a completar o sistema de coordenadas.

Essa convenção resulta em uma definição não única do sistema de coordenadas nos seguintes casos:

- Para o sistema de coordenadas 0, somente a direção do eixo  $z_0$  é especificada, portanto a escolha de  $O_0$  e  $x_0$  é arbitrária.
- Para o sistema de coordenadas  $n$ , como não existe junta  $n + 1$ ,  $z_n$  não está definido, mas  $x_n$  deve ser normal ao eixo  $z_{n-1}$ . Tipicamente escolhe-se  $z_n$  alinhado com  $z_{n-1}$ .
- Quando dois eixos consecutivos são paralelos, a normal comum entre eles não é definida de forma única. Tipicamente escolhe-se  $O_i$  na junta  $i + 1$
- Quando dois eixos consecutivos se interceptam, direção de  $x_i$  é normal e o sentido é arbitrário. Escolhe-se  $O_i$  na inteseccção.
- Quando a junta  $i$  é prismática a direção de  $z_{i-1}$  é arbitrária.

## 2.2 Cinemática Diferencial

### 2.2.1 Jacobiano Geométrico

### 2.2.2 Jacobiano Analítico

Quando a posição e orientação do efetuador são dadas em função de um número mínimos de parametros no espaço operacional é possível computar o Jacobiano pela diferenciação das equações da cinemática direta em função das variáveis das juntas. Para isso utiliza-se a técnica analítica.

Seja  $\mathbf{p}_e$  a posição do sistema de coordenadas do efetuador representada no sistema de coordenadas da base. O vetor  $\dot{\mathbf{p}}_e$  é portanto a velocidade de translação, ou linear.

$$\dot{\mathbf{p}}_e = \frac{\partial \mathbf{p}_e}{\partial \mathbf{q}} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_P(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (2.3)$$

Para a velocidade angular, pode ser considerada uma representação mínima da orientação em função de três variáveis  $\phi_e$ . A derivada no tempo  $\dot{\phi}_e$  não é igual a velocidade angular, no entanto, conhecida a função  $\phi_e(\mathbf{q})$ :

$$\dot{\phi}_e = \frac{\partial \phi_e}{\partial \mathbf{q}} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_\phi(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (2.4)$$

Sob essas premissas a cinemática diferencial pode ser obtida como:

$$\dot{\mathbf{x}}_e = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}}_e \\ \dot{\phi}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_P(\mathbf{q}) \\ \mathbf{J}_\phi(\mathbf{q}) \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_A(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (2.5)$$

## 2.3 Controle Cinemático

A estratégia de controle cinemático pode ser aplicada quando considera-se que a dinâmica do manipulador pode ser desprezada. Essa hipótese se sustenta quando as seguintes premissas são válidas:

- Elevados fatores de redução nas juntas
- Baixas velocidades na realização das tarefas
- Existe uma malha de controle de velocidade de alto desempenho em cada junta

A maioria dos manipuladores possui uma malha de controle de velocidade em nível de juntas como na figura 2.1. Logo, para um controle de alto ganho temos que:

$$u \approx \dot{\theta}$$

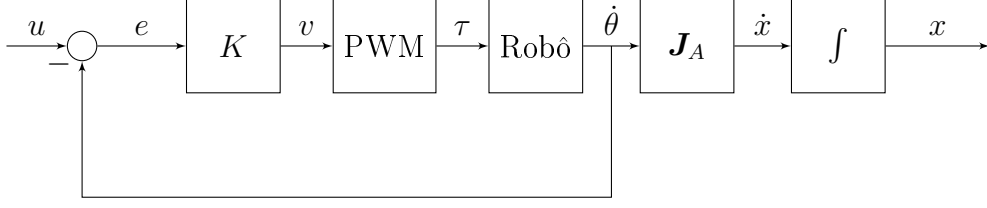


Figura 2.1: Diagrama

Portanto é possível implementar o controle cinemático segundo o diagrama 2.2

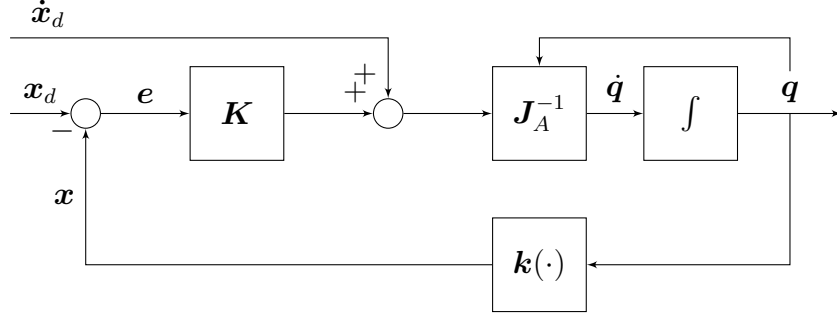


Figura 2.2: Diagrama

Se  $x$  é uma representação da posição e orientação e  $x_d$  o valor desejado nessa representação, seja o erro no espaço operacional:

$$e = x_d - x \quad (2.6)$$

Derivando em relação ao tempo

$$\dot{e} = \dot{x}_d - \dot{x} \quad (2.7)$$

podemos escrever a partir da equação 2.5:

$$\dot{e} = \dot{x}_d - J_a(q)\dot{q} \quad (2.8)$$

Sendo  $x_d(t)$  uma trajetória desejada, deseja-se que  $x$  atinja  $x_d(t)$  em  $t \rightarrow \infty$ . A entrada de controle para o sistema é um valor de  $u = \dot{q}$ , logo, assumindo que  $J_A(q)$  é quadrada e não singular, a escolha da lei de controle

$$u = J_A^{-1}(q)\bar{u} \quad (2.9)$$

leva ao sistema linear:

$$\dot{e} = \dot{x}_d - \bar{u} \quad (2.10)$$

Se for escolhido  $\bar{u}$ :

$$\bar{u} = \dot{x}_d + K(x_d - x) \quad (2.11)$$



obtem-se a seguinte dinâmica para o erro

$$\dot{e} + \mathbf{K}e = 0 \quad (2.12)$$

## 2.4 Servo Visão

A tarefa proposta na Servo Visão é controlar a posição e orientação do efetuador do manipulador, em relação a um alvo, usando características visuais extraídas de uma imagem. A câmera pode ser carregada pelo manipulador (montada no efetuador) ou colocada em um ponto fixo, observando tanto o efetuador como o alvo.

### 2.4.1 Servo Visão Baseada em Posição

Em um sistema de servo visão baseado em posição a posição e orientação do alvo com respeito a câmera  $\mathbf{T}_{CT}$  é estimada. O problema de estimação da posição e orientação é discutido no apêndice ?. Especifica-se uma posição desejada relativa ao sistema de coordenadas do alvo  $\mathbf{T}_{C^*T}$  e deseja-se determinar o movimento necessário para mover a câmera para a posição desejada, que chamamos de  $\mathbf{T}_\delta$ .

$$\mathbf{T}_{CT} = \mathbf{T}_\Delta \mathbf{T}_{C^*T} \quad (2.13)$$

$$\mathbf{T}_\Delta = \mathbf{T}_{CT} \mathbf{T}_{C^*T}^{-1} \quad (2.14)$$

# Capítulo 3

## Tetis

### 3.1 Parâmetros Denavit–Hartenberg

Tabela 3.1: Parametros Denavit–Hartenberg

| Elo | $a_i$ | $\alpha_i$ | $d_i$  | $\vartheta_i$ |
|-----|-------|------------|--------|---------------|
| 1   | 0     | $\pi/2$    | 0      | $\vartheta_1$ |
| 2   | $E_3$ | 0          | 0      | $\vartheta_2$ |
| 3   | $E_4$ | 0          | 0      | $\vartheta_3$ |
| 4   | $E_5$ | $-\pi/2$   | $-M_5$ | $\vartheta_4$ |

# Capítulo 4

## Implementação

A implementação dos algoritmos de controle detalhados nos capítulos anteriores for feita como extensão ao software RobotGUI desenvolvido pela equipe do LEAD-GSCAR, idealizado por Alex F. Neves Msc.

### 4.1 Motivação

Modular, genérico, ...

### 4.2 Ferramentas

Os seguintes softwares e *frameworks* foram utilizados:

- Linux (Ubuntu) como Sistema Operacional
- C++ como linguagem de programação
- ROS como *framework* principal utilizado o RobotGUI, fornecendo comunicação entre nós através de mensagens e serviços. Será descrito mais detalhadamente na próxima seção.
- Qt como *framework* para elaboração da interface gráfica.

### 4.3 ROS

### 4.4 Conceitos

Primeiramente define-se como Computador Base aquele que será utilizado pelo operador para controlar e visualizar dados do robô. Define-se Computador Embarcado,

ou do Robô aquele que está no robô conectado a todos os equipamentos, sensores e atuadores. O software executa módulos diferentes no robô e na base.

A arquitetura do RobotGUI baseia-se nos seguintes conceitos principais:

- Componentes
  - Lidam com a comunicação e processam dados no Computador Base

# Capítulo 5

## Resultados e Discussões

### 5.1 Respostas das Juntas

Para verificar se de fato são válidas as premissas assumidas na seção 2.3 para aplicação de uma estratégia de controle cinemático foi levantada para cada uma das juntas a resposta a uma onda quadrada tal que:

$$u = A \operatorname{sgn}(\sin(2\pi t/f))$$

onde o período  $T = 1/f = 1s$  e a amplitude  $A = 0.5rad/s$

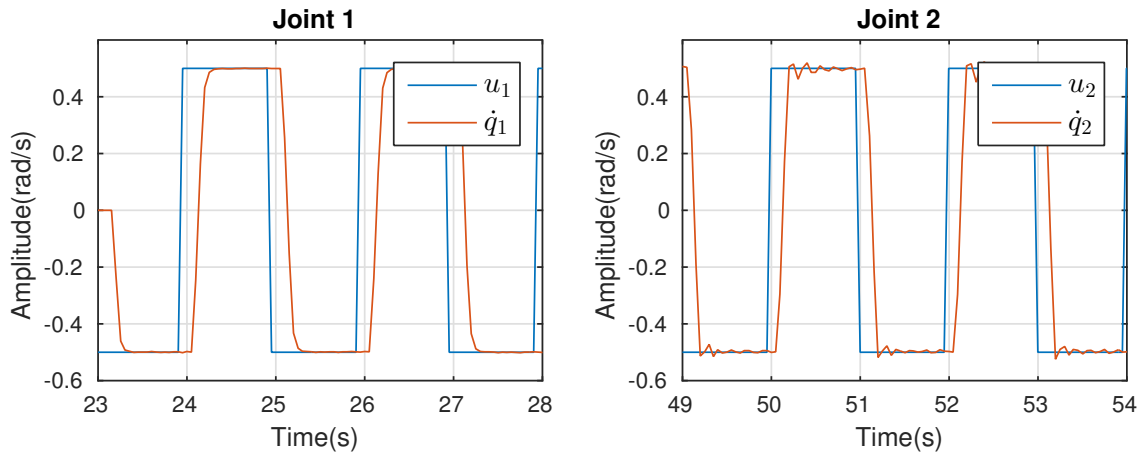


Figura 5.1: Resposta das juntas

## Capítulo 6

## Conclusões

## Referências Bibliográficas

# Apêndice A

## Estimação da posição e orientação