

CONTROLE DE TRAJETÓRIA DE UM MANIPULADOR COM DOIS GRAUS DE LIBERDADE

**Virgílio Cassiano da SILVA¹, Thompson Siqueira PAULO², Daniel L. F. RODRIGUES³,
Thiago O. A. ROCHA⁴, José Henrique d'SOUZA⁵**

Centro Federal de Educação Tecnológica do RN – CEFET/RN

Departamento Acadêmico de Tecnologia Industrial – DATIN

Núcleo de Desenvolvimento em Mecatrônica – NUDEM

Av. Salgado Filho, 1159 Tirol CEP 59.015-000 Natal-RN

E-mail: mecatronica@cefetrn.br^{1,2,3,4}, ricky@cefetrn.br⁵

RESUMO

Este trabalho apresenta uma abordagem direta para o controle de movimentação de um manipulador cilíndrico no espaço tridimensional, apesar do robô ter apenas dois graus de liberdade. A área de trabalho é caracterizada por um sólido de revolução e a análise cinemática tanto direta quanto inversa é realizada para permitir que o controlador possa identificar as posições fisicamente alcançáveis dentro de seu volume de trabalho. Um polinômio interpolador de 3ª ordem é utilizado para fazer com que o sistema de orientação possa seguir uma trajetória previamente definida pelo controlador. Os resultados obtidos por simulação atestam a eficácia da técnica empregada apesar de sua simplicidade quando comparada com as utilizadas por robôs de mesma topologia. Um protótipo de baixo custo está sendo concluído e assim poderá servir para testar a validade desta estratégia com os dados obtidos da literatura.

PALAVRAS-CHAVE: Manipulador, Trajetória, Polinômio Interpolador, Cinemática.

1. INTRODUÇÃO

A área de Automação Industrial apresenta inúmeros desafios ao Integrador de Tecnologias, o qual deve está sintonizado com as tendências mercadológicas, com as novas tecnologias e com os novos conceitos de organização industrial.

Um dos principais componentes de uma planta industrial é o robô e para utilizá-lo adequadamente faz-se necessário o estudo do modelo a ser usado.

O objetivo deste trabalho é elaborar um sistema de controle e automação de um manipulador cilíndrico com dois graus de liberdade e deslocamento angular limitado a 180° . Para a obtenção dessas metas foram necessários o estudo do espaço de trabalho, das cinemáticas Direta e Inversa e da geração de trajetória. Além da implementação de algoritmo e de circuitos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo FERNANDES (2006), o espaço ou volume de trabalho é a região dentro da qual o manipulador pode posicionar o *end effector* (a ponta) ou como o volume total conformado pelo percurso do punho, quando o manipulador efetua todas as trajetórias possíveis (d'SOUZA, 2006, p.20).

O espaço de trabalho está relacionado com a chamada estrutura cinemática dos manipuladores que é dada pela configuração das juntas primárias (três primeiras).

2.1. ESPAÇO DE TRABALHO (LOPES et al, 2007a)

O braço robótico utilizado é um manipulador cilíndrico que apresenta um movimento angular no plano horizontal e um deslocamento linear no plano vertical (Figura 1). Portanto, temos um robô com apenas dois (2) graus de liberdade (DoF).

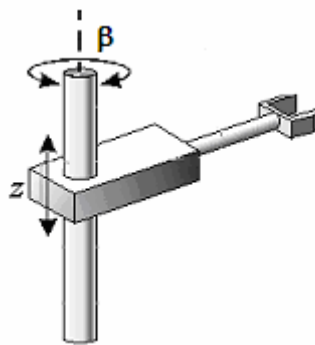


Figura 1 – Manipulador cilíndrico.

Assim, o espaço de trabalho deverá ser a área externa da metade de um determinado cilindro.

Área de trabalho: Roll $\beta = 180^\circ$

Eixo Z = 200 mm

Raio = 304,6 mm.

Analisando a Figura 1, percebe-se que a garra está situada na extremidade do raio e que este não é retrátil, isto é, não se desloca para frente e/ou para trás ao longo do tempo. Portanto, os pontos que podem ser alcançados pelo órgão terminal estão localizados na superfície e sua área é a própria área lateral do cilindro e é dada por (TIZZIOTTI, 1982, p.367):

$$A_L = 2\pi r \times h \quad (1)$$

Onde, “r” é o comprimento do elo da garra e “h” é a altura do eixo z.

Como o ângulo de Roll apresenta um deslocamento máximo de apenas 180°, a área de trabalho é:

$$A_T = \frac{A_L}{2} \quad (2)$$

Uma visualização geométrica do espaço de trabalho é mostrada na Figura 2.

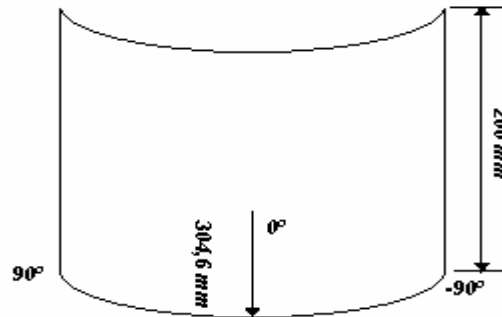


Figura 2 – Forma geométrica do espaço de trabalho.

Os pontos alcançáveis pelo manipulador podem ser testados através da equação reduzida da circunferência (GIOVANNI & BONJORNO, 1992, p.74)

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (3)$$

Deve-se ter o cuidado de observar que o ponto (x,y), expresso em coordenadas cartesianas, enquanto que a altura do ponto deverá estar situada entre o nível mais baixo (nulo) e o mais elevado (200 mm) do manipulador.

2.2. CINEMÁTICA

A cinemática é o estudo dos movimentos relativos existentes entre os diferentes componentes de um robô manipulador (d'SOUZA, 2006, p.52). Definem-se dois problemas fundamentais no estudo cinemático: o problema direto e o inverso.

2.2.1. CINEMÁTICA DIRETA (LOPES et al, 2007b)

Na cinemática direta parte-se da posição angular de cada junta ou vetor de variáveis de junta “q” e determina-se a posição e orientação da garra. A partir da Figura 1, obtém-se um modelo simbólico plano de suas juntas (Figura 3).

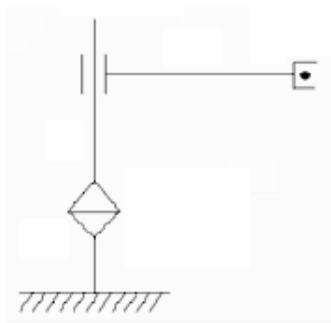


Figura 3– Modelo planar do manipulador.

Utilizando a Figura 3 como modelo de estudos, associa-se os referenciais aos diversos componentes do robô: base (0); deslocamento de Roll (1); deslocamento vertical (2) e a garra (3). A Figura 4 ilustra esse procedimento.

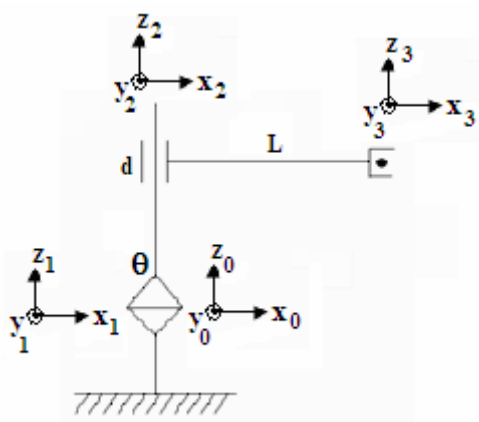


Figura 4 – Modelo de estudo com os referenciais.

Tomando por base a Figura 4, pode-se montar a tabela dos parâmetros de Denavit-Hartenberg (DH), seguindo a descrição cinemática de elo e de junta (ROSÁRIO, 2005). A Tabela 1 ilustra esses parâmetros.

Tabela 1 - Parâmetros DH

i	\mathbf{a}_{i-1}	α_{i-1}	\mathbf{d}_i	θ_i
1	0	0	0	θ
2	0	0	\mathbf{d}	0
3	L	0	0	0

De acordo com os parâmetros DH (Tabela 1), a localização do referencial $\{i\}$ em relação ao referencial anterior $\{i-1\}$ pode ser obtida a partir de uma sequência de translações e rotações ao longo dos eixos x_i e z_i (d'SOUZA, 2006).

Segundo PAZOS (2002), o algoritmo para obtenção das transformações homogêneas a partir do parâmetro DH é visto a seguir:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ c\alpha_{i-1}s\theta_i & c\alpha_{i-1}c\theta_i & -s\alpha_{i-1} & -d_is\alpha_{i-1} \\ s\alpha_{i-1}s\theta_i & s\alpha_{i-1}c\theta_i & c\alpha_{i-1} & d_ic\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{Onde: } c\theta = \cos(\theta) \quad (5a)$$

$$s\theta = \sin(\theta) \quad (5b)$$

$$c\alpha = \cos(\alpha) \quad (5c)$$

$$s\alpha = \sin(\alpha) \quad (5d)$$

O problema da cinemática direta é solucionado com auxílio dos parâmetros DH (Tabela 1) e da equação (4). Portanto,

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & L\cos\theta \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & L\sin\theta \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2.1. CINEMÁTICA INVERSA (LOPES et al, 2007b)

Diferentemente da cinemática direta, na cinemática inversa obtém-se o quanto cada motor de junta deve se deslocar para conduzir a garra até uma posição e orientação especificadas. Pela geometria do manipulador (Figura 3), observa-se que a posição da garra é especificada por um ponto tridimensional (x, y, z) e que sua orientação está associada ao plano da base denominada de θ^* . Partindo-se das coordenadas cartesianas (x, y, z) pode-se encontrar a transformação homogênea resultante como:

$${}^0T_3^* = \begin{bmatrix} \cos\theta^* & -\sin\theta^* & 0 & x \\ \sin\theta^* & \cos\theta^* & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Comparando-se a equação (7) com a obtida para a cinemática direta (6), pode-se encontrar o vetor de variáveis de junta \mathbf{q}^* que conduz a garra ao ponto cartesiano (x, y, z) especificado. Portanto,

$$x = L\cos\theta^* \quad (8a)$$

$$y = L\sin\theta^* \quad (8b)$$

$$z = d^* \quad ..(8c)$$

Combinando-se (8b) e (8a), obtém-se que

$$\theta^* = \tan(y, x) \quad (9)$$

Assim, o vetor de variáveis de junta é dado como:

$$\vec{q} = \begin{bmatrix} \theta^* \\ d^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan(y, x) \\ z \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.3. GERAÇÃO DA TRAJETÓRIA (LOPES et al, 2007c)

Segundo MOLINA,

“O problema do controle da posição consiste em determinar as excitações necessárias a serem dadas aos atuadores das juntas para que o Órgão Terminal siga uma determinada trajetória e, simultaneamente, rejeitar distúrbios originários de efeitos dinâmicos não modelados, tais como atrito e ruídos”.

O controle de robôs manipuladores consiste na especificação de uma tarefa até a determinação dos esforços que devem ser aplicados pelos atuadores de juntas de modo a executá-la (d'SOUZA, 2006, p.61).

Ao se calcular a trajetória (caminho sujeito a restrições temporais) do ponto atual até o ponto final, busca-se uma suavização do movimento do manipulador, isso é conseguido através da geração de referências intermediárias para os controladores de juntas. A trajetória pode ser gerada tanto em espaço de juntas quanto em espaço cartesiano (ROSÁRIO, 2005).

Para se obter um movimento mais suave no manipulador, se faz necessária à utilização do método de interpolação com polinômio cúbico, e assim, calcula-se a trajetória.

2.3.1. POLINÔMIO INTERPOLADOR

Para se gerar uma trajetória é preciso que haja uma descrição temporal da posição, velocidade e aceleração de cada articulação do manipulador. Partindo da equação polinomial de terceira ordem, que representa a posição (θ) do manipulador, é possível encontrar a equação da velocidade ($d\theta/dt$) e da aceleração ($d^2\theta/dt^2$).

$$\theta(t) = a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (11a)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = 3a_3 t^2 + 2a_2 t + a_1 \quad (11b)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = 6a_3 t + 2a_2 \quad (11c)$$

Aplicando as condições de contorno e considerando um tempo total de deslocamento igual a “T” segundos, obtêm-se os coeficientes do polinômio como sendo:

$$a_0 = q_0 \quad (12a)$$

$$a_1 = \dot{q}_0 \quad (12b)$$

$$a_2 = \ddot{q}_0 \quad (12c)$$

$$a_3 = \frac{q^* - q_0}{T^3} - \frac{\dot{q}_0}{T^2} - \frac{\ddot{q}_0}{T} \quad (12d)$$

A quantidade de pontos intermediários entre a posição inicial e a posição desejada, determinará quão suave o manipulador chegará ao seu objetivo, visto que o mesmo passará por cada um até chegar ao objetivo.

O movimento do manipulador sobre os ângulos do vetor formará a trajetória real do manipulador que será diferente da trajetória ideal, ocorrendo assim um erro. Um algoritmo que exemplifica os passos para a geração de trajetória é mostrado na Figura 5.

```
Entre tarefa desejada.  
Calcule  $\theta^*$ .  
Gerar trajetória (vetor de pontos intermediários).  
Enquanto  $\theta[i] \neq \theta^*$  faça.  
    Enviar  $\theta[i]$  para atuador.  
    Incremente  $i$ .  
    Leia  $\theta$ .  
Obtenha tarefa atual.  
Calcule erro.
```

Figura 5– Algoritmo.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No primeiro momento, que foi feita a determinação do espaço de trabalho do manipulador, foi possível observar que a área de trabalho não é um sólido de revolução, mas se situa no limite deste sólido, ou seja, se assemelha a uma “casca” ou “película” cilíndrica e que os pontos alcançáveis pelo órgão terminal (garra) estarão localizados na superfície de um semicilindro de revolução.

Em seguida, foi realizado o estudo da cinemática direta e da cinemática inversa, onde o primeiro diz respeito à determinação da posição e orientação da garra conhecendo a posição angular de cada junta e o segundo consiste em determinar quanto é que deve girar cada motor de junta, de modo a levar a garra a uma posição e orientação especificadas.

Logo após, foi apresentado o estudo da geração de trajetória pelo Método da Interpolação com Polinômio Cúbico, que proporciona a geração do vetor posições intermediários na obtenção de um movimento suave do manipulador do seu ponto inicial até o seu ponto final.

O projeto ainda está em fase de testes. Procuramos, a princípio, simular o algoritmo de controle de posição criado pelo grupo via porta paralela, já que prontamente desenvolvemos também o hardware de controle para ambos os motores, cuja simulação, utilizando o software Proteus 6.9, apresentou resultados satisfatórios.

O principal problema é o fato dos motores ser acionado um de cada vez. Certamente para se contornar essa dificuldade será utilizada um circuito de controle específico para trajetória com um microcontrolador (PIC), já que com as suas características será possível acionar os atuadores simultaneamente e fazer com que suas reações aos sinais do computador sejam mais rápidas (tempo real). O hardware já simulado, combinado com o microcontrolador, já está sendo arquitetado e em breve será simulado também.

REFERÊNCIAS

d'SOUZA, J. H. **Introdução à Robótica**. Natal: DATIN – CEFET. 2006.

FERNANDES, O. R. **Robôs Manipuladores: Tipos e Linguagens**. 2006.

GIOVANNI, J. R. & BONJORNO, J. R. **Matemática 3**: Geometria Analítica, Números Complexos, Polinômios, Limites e Derivadas, Noções de Estatística: 2º Grau. São Paulo: FTD. 1992.

LABOISSIÈRE, O. **Robô Cilíndrico** fabricado por Hudson Control Group. Disponível em http://www.polimig.com.br/~lobo/robotica/teoria/cap_03_rob.pdf. Acesso 20 jul 2007.

LOPES, D.; AZEVEDO, F.; CASSIANO, V.; OLIVEIRA, T. & SIQUEIRA, T. **Manipulador Cilíndrico**: Espaço de Trabalho. Relatório de Pesquisa. Natal: DATIN – CEFET. 2007a.

_____. **Manipulador Cilíndrico**: Análise Cinemática. Relatório de Pesquisa. Natal: DATIN – CEFET. 2007b.

_____. **Manipulador Cilíndrico**: Geração de Trajetória. Relatório de Pesquisa. Natal: DATIN – CEFET. 2007c.

MOLINA S. R. **Introdução à dinâmica e ao controle de manipuladores robóticos**.

PAZOS, Fernando. **Automação de Sistemas e Robótica**. Rio de Janeiro: Axcel Books do Brasil Editora, 2002.

ROSÁRIO, José M. **Princípios da Mecatrônica**. São Paulo: Prentice Hall do Brasil, 2005.

SICA, C. **Sistemas Automáticos com Microcontroladores 8031/8051**. São Paulo: Novatec. 2006.

TIZZIOTTI, J. G. **Matemática**: Programa Completo 2º Grau. São Paulo: Ática. 1982.