

MODELAMENTO E ANÁLISE DOS MOVIMENTOS DE UM OMBRO BIOMECÂNICO

Fabio Rubio, Faculdade Tecnologia Termomecanica, fabio.rubio@cefsa.edu.br

André Ferrus Filho, Faculdade Tecnologia Termomecanica, andreffilho@terra.com.br

Nilson Yukihito Tamashiro, Faculdade Tecnologia Termomecanica, pro5827@cefsa.edu.br

Valdir Costa, Faculdade Tecnologia Termomecanica, pro4747@cefsa.edu.br

Silvio Celso Peixoto Gomes, Faculdade Tecnologia Termomecanica, speixoto@cefsa.edu.br

Resumo. O objetivo principal deste trabalho é desenvolver os estudos de um modelamento matemático através de um mecanismo antropomórfico multifuncional que reproduza os movimentos dos membros superiores de um ser humano. Neste modelamento será aplicado o método de Denavit Hartenberg para que com os devidos valores apresentados, ser possível definir a localização das posições do mecanismo no espaço, assim sendo, possibilitar a montagem das matrizes de posicionamento, as quais serão comparadas com a mobilidade de um braço humano. Este método pode ser aplicado em momentos fisioterápicos e auxiliar pacientes que passam por tratamentos de reabilitação em seus braços, ombros, clavícula, cotovelos e/ou afins da seguinte maneira: ao serem levantados os potenciais de movimento de uma pessoa com tal biótipo físico, no processo de fisioterapia, podem ser comprovados matematicamente os avanços reais por esse modelo, colaborando com a precisão em diagnósticos médicos.

Palavras chave: Denavit Hartenberg. Ombro Biomecânico. Modelamento Matemático.

Denavit Hartenberg. Ombro Biomecânico. Modelamento Matemático.

1. INTRODUÇÃO

Para estabelecermos estratégias de controle de posição de juntas robóticas eficientes e precisas (erro próximo de zero), descrevemos o movimento do mecanismo por equações diferenciais que levam em consideração sua arquitetura construtiva, a massa dos diferentes elementos, as inércias e o tensor de inércia relacionado com a carga transportada, além da modelagem completa de seu sistema de acionamento.

Este trabalho visa abordar a robótica industrial, com o estabelecimento da sua evolução ao longo do tempo e o estudo dos principais conceitos que permitem a análise cinemática e dinâmica dos mecanismos manipuladores, como de sua estrutura de controle.

Portanto, neste contexto são apresentados conceitos básicos relacionados à programação off-line do mecanismo, à simulação de mecanismos em softwares comerciais e consequentemente, o ponto forte do trabalho fica por conta dos aspectos referentes à modelagem cinemática direta do mecanismo robótico, à algoritmos para a geração de trajetórias em relação às juntas e ferramenta de trabalho e ainda à modelagem dinâmica e ao projeto do sistema de controle com a descrição da aplicação prática visando à fisioterapia como base.

2. JUSTIFICATIVA

O ombro é sede freqüente de lesões nos esportes competitivos. Na literatura revisada a incidência varia de 8 a 13% de todas as lesões atléticas. As lesões nos esportes de arremesso são comuns na prática clínica; as lesões nos membros superiores giram em torno de 75% do total e a articulação do ombro é a região mais afetada (ABDALLA, et al 2001).

Os problemas na região do ombro acometem 66% dos nadadores, 57% dos jogadores de beisebol, 44% dos de voleibol e 7% dos golfistas. A grande incidência de lesões é acarretada por excesso de treinos e pela própria exigência do esporte. Em 50% dos tenistas profissionais, encontraram patologias na articulação do ombro (ABDALLA, et al 2001).

3. MODELAGEM CINEMÁTICA DE MANIPULADORES

3.1. Descrição de um robô industrial

Um manipulador mecânico consiste de elos, conectados por juntas prismáticas ou rotacionais. Cada par junta-elos constitui um grau de liberdade. Assim, para um manipulador com N graus de liberdade, temos N pares juntas-elos, onde o primeiro elo é a base de sustentação do robô (sistema de coordenadas inerciais fixado) e no seu último elo é incorporada a sua ferramenta de trabalho. O conhecimento completo das variáveis articulares de um robô θ_i determina o posicionamento de sua ferramenta no sistema de coordenadas de trabalho (HERMINI, 2000).

3.2 Sistemas de referência

Um Sistema Articular pode ser representado matematicamente através de n corpos móveis C_i ($i = 1, 2, \dots, n$) e de um corpo C_0 fixo, interligados por n articulações, formando uma estrutura de cadeia, sendo que estas juntas podem ser rotacionais ou prismáticas

Para representar a situação relativa dos vários corpos da cadeia, é dado a cada elemento C_i um referencial R_i . Com isso, podemos relacionar um determinado referencial R_{i+1} ($o_{i+1}, x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}$) com o seu anterior R_i (o_i, x_i, y_i, z_i), assim como também o sistema de coordenadas de origem da base “Fig. (1)” através da “Eq. (1)”, onde $A_{i,i+1}$ representa as matrizes de transformação homogênea de rotação e L_i o vetor de translação de uma origem a outra, onde $A_{i,i+1}$ é resultante do produto matricial global entre as diversas matrizes de transformações homogêneas relacionadas com rotações ou translações sucessivas das diferentes articulações “Eq. (2)” (COUTINHO, 1993, apud ROSÁRIO, 2002).

$$o_{i+1} = o_i + A_{i,i+1} * L_i \quad (1)$$

$$A_{i,i+1} = A_{1,2}. A_{2,3}. \dots A_{i,i+1} \quad (2)$$

onde

$$A_{i,i+1} = \begin{bmatrix} Nx_o & Sx_o & Ax_o \\ Ny_o & Sy_o & Ay_o \\ Nz_o & Sz_o & Az_o \end{bmatrix} \quad (3)$$

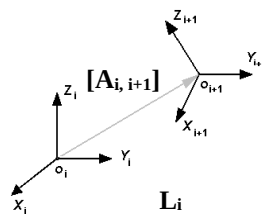


Figura 1 – Sistema de referência utilizado

Fonte: Robótica Industrial - Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos, 2002, p. 22.

Qualquer rotação no espaço pode ser decomposta em um grupo de rotações elementares ao longo dos eixos X, Y e Z. A matriz de rotação utilizada na equação de transformação é associada com a rotação elementar do referencial correspondente em relação ao seu anterior.

Este procedimento matemático pode ser estendido para toda extensão do modelo. Assim sendo, a matriz de orientação de um ponto de interesse pode ser obtida pela “Eq. (2)” Com isso, o posicionamento completo de um corpo rígido no espaço, poderá ser facilmente obtido através da “Eq. (1)” que fornece o seu vetor posição, sendo que a “Eq. (3)” representa a matriz de orientação associada a partir da implementação do método dos Ângulos de Euler ou dos ângulos RPY (Row, Pitch, Yall) às três direções de rotação associadas aos correspondentes eixos de coordenadas.

3.3 Notação de Denavit-Hartenberg

Para descrever a translação e rotação entre dois links adjacentes, Denavit e Hartenberg propuseram um método matricial para estabelecimento sistemático de um sistema de coordenadas fixo para cada link de uma cadeia cinemática articulada.

A representação de Denavit Hartenberg resulta na obtenção de uma matriz de transformação homogênea 4×4 , representando cada sistema de coordenadas do link na junta, em relação ao sistema de coordenadas do link anterior.

Um sistema de coordenadas cartesianas ortonormal (X_i, Y_i, Z_i) pode ser estabelecido para cada link no seu eixo de junta, onde $i = 1, 2, \dots, N$ (N número de graus de liberdade) mais o sistema de coordenadas da base. Assim, uma junta rotacional tem somente 1 grau de liberdade, e cada sistema de coordenadas (X_i, Y_i, Z_i) do braço do robô corresponde a junta $i+1$, sendo fixo no link i .

Quando o acionador ativa a junta i , o link i deve mover-se com relação ao link $i-1$. Assim, o i -ésimo sistema de coordenadas é solidário ao link i , se movimentando junto com o mesmo. Assim, o n -ésimo sistema de coordenadas se movimentará com o elemento terminal (link n). As coordenadas da base são definidas como o sistema de coordenadas 0 (X_0, Y_0, Z_0), também chamado de sistema de referência inercial. Os sistemas de coordenadas são determinados e estabelecidos obedecendo três regras:

- O eixo Zi-1 é colocado ao longo do eixo de movimento da junta i.
- O eixo Xi é normal ao eixo Zi-1, e apontando para fora dele.
- O eixo Yi completa o sistema utilizando a regra da mão direita.

Através destas regras podemos observar que:

A escolha do sistema de coordenadas é livre, podendo ser colocada em qualquer parte da base de suporte, enquanto que a posição do eixo Z0 deverá ser a do eixo de movimento da primeira junta. O último sistema de coordenadas (n-ésimo) pode ser colocado em qualquer parte do elemento terminal, enquanto que o eixo Xi é normal ao eixo Zi-1.

- θ_i é o ângulo de junta obtido entre os eixos Xi-1 e Xi no eixo Zi-1 (usar a regra da mão direita).
- d_i é a distância entre a origem do (i-1)-ésimo sistema de coordenadas até a interseção do eixo Zi-1 com o eixo Xi ao longo do eixo Zi-1.
- a_i é a distância (off-set) entre a interseção do eixo Zi-1 com o eixo Xi até a origem o i-ésimo sistema de referência ao longo do eixo Xi (ou a menor distância entre os eixos Zi-1 e Zi).
- α_i é o ângulo offset entre os eixos Zi-1 e Zi medidos no eixo Xi (usando a regra da mão direita).

Para uma junta rotacional, d_i , a_i , e α_i são os parâmetros da junta, variando o seu valor na rotação do link i em relação ao link i-1. Para uma junta prismática θ_i , a_i e α_i são os parâmetros da junta, enquanto d_i é a variável de junta (deslocamento linear) (COUTINHO,1993; ROSÁRIO, 2002).

Uma vez os sistemas de coordenadas D-H tenham sido estabelecidos, uma matriz de transformação homogênea pode facilmente ser desenvolvida relacionando o i-ésimo ao (i-1)-ésimo frame de coordenadas. A figura 13 mostra que um ponto r_i expresso no i-ésimo sistema de coordenadas pode ser expresso no (i-1)-ésimo sistema de coordenadas como r_{i-1} aplicando as transformações sucessivamente apresentadas a seguir:

- “Rotação no eixo Zi-1 de um ângulo de θ_i para alinhar o eixo Xi-1 com o eixo Xi (o eixo Xi-1 é paralelo ao eixo Xi e aponta para a mesma direção).
- Translação uma distância de d_i ao longo do eixo Zi-1 para trazer os eixos Xi-1 e Xi na coincidência.
- Translação ao longo do eixo Xi uma distância de a_i para trazer as duas origens também como o eixo X na coincidência.
- Rotação do eixo Xi um ângulo de α_i para trazer os dois sistemas de coordenadas na coincidência.
- Cada uma destas quatro operações pode ser expressa através de uma matriz homogênea de rotação-translação, e o produto destas quatro matrizes de transformações elementares produz uma matriz de transformação homogênea composta $i-1A_i$, conhecida como matriz de transformação de D-H, para sistemas de coordenadas adjacentes, i e i-1.

$$i-1A_i = T_{z,d} T_{z,\theta} T_{x,a} T_{x,\alpha}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

A transformação inversa será:

$$[i-1A_i]^{-1} = iA_{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i & 0 & -a_i \\ -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & \sin \alpha_i & -d_i \sin \alpha_i \\ \sin \alpha_i \sin \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & \cos \alpha_i & -d_i \cos \alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde a_i , α_i , d_i são constantes, e θ_i é a variável de junta para uma junta rotativa.

Para uma junta prismática a variável de junta é d_i , enquanto a_i , α_i , θ_i são constantes. Neste caso, $i-1A_i$ será definido como:

$$i-1A_i = T_{z,\theta} T_{z,d} T_{x,\alpha} \text{ e sua inversa será: } = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[i-1A_i]-1 = iA_i-1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & \sin\theta_i & 0 & 0 \\ -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & \sin\alpha_i & -d_i \sin\alpha_i \\ \sin\alpha_i \sin\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & \cos\alpha_i & -d_i \cos\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

4. DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO

A figura “Fig. (2)” acima demonstra o mecanismo em questão, trata-se de um robô serial com quinze juntas, sendo que nove são fixas e seis são moveis, possibilitando assim seis graus de liberdade.

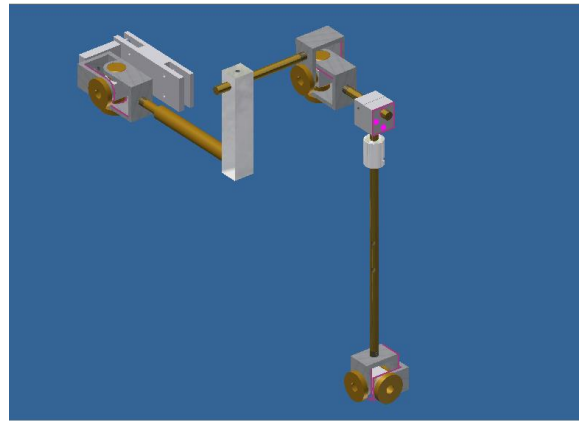


Figura 2 - Mecanismo do Ombro

Fonte: Elaboração própria

Para iniciar com as definições dos parâmetros, deve-se definir a base de sustentação do mecanismo, considerando que o mesmo deve descrever os posicionamentos das juntas dos membros superiores humanos, com o intuito de melhor visualização do resultado final, deve-se definir a posição inicial do mecanismo como sendo a mesma origem da base do esqueleto humano, os pés do indivíduo a ser avaliado, ou seja, adota-se como base um elo virtual que corresponde a diferença entre a altura de onde o ombro está posicionado em relação ao solo. Consideremos a título de exemplo que em um determinado indivíduo esta altura seja correspondente a 1200 mm.

Como fora citado, o eixo x(di) da primeira junta está a 1200 mm de distância em relação ao eixo x (di) da base, preenchemos então o campo di.

O eixo z (αi) da primeira junta do cardan está a -90 graus em relação ao eixo z (αi) da base preenche-se então o campo αi, como é demonstrado no exemplo acima.

Observando o projeto do mecanismo, nota-se que a junta cardan, nada mais é do que duas juntas rotativas, que estão na mesma origem, entretanto possuem ângulos

Sendo assim, seguindo esse método, obtêm-se todos os parâmetros DH das juntas de nosso mecanismo, sintetizando que cada junta representa o seguinte movimento.

αi = Angulação do eixo z da junta em relação à junta anterior

ai = Distância linear entre o eixo x da junta e o eixo x da anterior

Θi = Angulação do eixo x da junta em relação ao eixo x anterior (rotação variável da junta, aquela que variara assim que o movimento for realizado)

di = Distância linear entre o eixo z da junta

A “Tab. (1)” corresponde aos parâmetros de Denavit Hartenberg

Tabela1: Parâmetro de Denavit Hartenberg para o Ombro

Junta	α_i	a_i	θ_i	d_i	Tipo
1	-90	0	0	1200	R
2	90	0	0	0	R
3	0	290	0	0	R
4	-90	0	0	150	R
5	90	0	0	150	R
6	90	0	0	-50	R
7	-90	0	0	0	R
8	90	0	90	0	R
9	-90	0	0	0	R
10	0	0	0	-50	R
11	0	150	-90	0	R
12	0	0	-90	-200	R
13	90	0	0	0	R
14	90	0	0	0	R
15	0	0	0	200	R

Com o mecanismo plotado, conforme “Fig. (3)” averigua-se, se este apresenta o mesmo formato que fora idealizado, e se o tiver, é possível simular seus movimentos através do comando “drivebot (r)”. Este comando faz surgir uma tela que permite alterar e visualizar variação da angulação de cada junta do robô, não esquecendo que nesse mecanismo há 9 juntas fixas, e apenas 6 que permitem movimento, sendo essas a 1ª, a 2ª, a 7ª, a 9ª, a 14ª e a 15ª junta, respectivamente, desde modo na simulação do movimento, deve-se apenas simular o movimentos dessas.

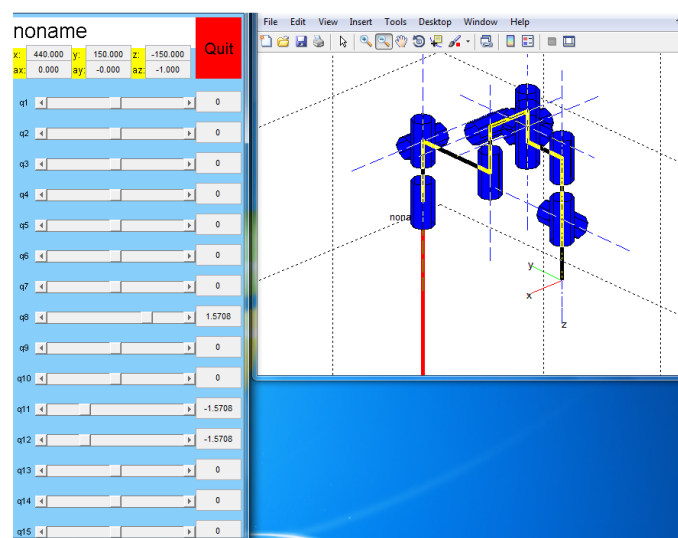


Figura 3 - Imagem da plotagem do robô, juntamente com a tela do comando drivebot (r).
(Robotics Toolbox – MATLAB).
Fonte: Elaboração própria.

4.1. Obtenção da relação volt x graus no potenciômetro

Para adquirir essa relação, é necessário criar um dispositivo graduado que pode ser acoplado em um dos potenciômetros utilizados no mecanismo, para assim observar a variação da angulação do curso do mesmo, e obter sua relação ddp x graus.

Os valores a seguir foram obtidos experimentalmente conforme demonstrado na “Tab. (2)” e “Tab. (3)”:

Tabela 1: Amostragem

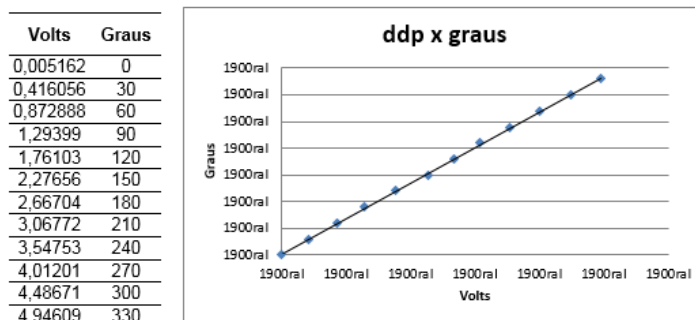


Tabela 2: Volts a cada 30 graus

Graus	Volts	ddp
0 - 30	0,416056 - 0,00516205	0,410894
30 - 60	0,872888 - 0,416056	0,456832
60 - 90	1,29399 - 0,872888	0,421102
90 - 120	1,76103 - 1,29399	0,46704
120 - 150	2,27656 - 1,76103	0,51553
150 - 180	2,66704 - 2,27656	0,39048
180 - 210	3,06772 - 2,66704	0,40068
210 - 240	3,54753 - 3,06772	0,47981
240 - 270	4,01201 - 3,54753	0,46448
270 - 300	4,48671 - 4,01201	0,4747
300 - 330	4,94609 - 4,48671	0,45938
Média		0,449175
Mediana		0,45938
Desvio Padrão		0,038418
para cada 1 grau		0,014973

Através do gráfico acima, conclui-se que esta é uma relação linear, e com a tabela acima, nota-se que a cada grau que é variado no curso do potenciômetro, adquire-se uma variação de 0,014973 volts. Sendo assim a equação da conversão volt x graus para o potenciômetro utilizado neste projeto é:

$$\text{Graus} = \frac{\text{volts}}{0,014973}$$

5. CONCLUSÃO

Após efetuarmos os testes finais, apesar de algumas limitações encontradas ao longo do desenvolvimento do projeto, observamos que os resultados obtidos foram plenamente satisfatórios ao que havia sido proposto e planejado anteriormente, fazendo com que fossem alcançadas as metas da proposta do trabalho. A definição de matrizes de posicionamento permite que os movimentos tenham suas trajetórias definidas auxiliando em projetos de braços robóticos com movimentos semelhantes aos de um ombro humano. Abre oportunidade para o desenvolvimento de exoesqueletos vestíveis passivos e ativos e que dependem de liberdade na região do ombro, já que esta é uma das articulações que apresentam maior grau de liberdade e complexidade. O resultado destes na fisioterapia para reabilitação ou para diagnóstico posicional podem ser comprovados matematicamente, assim colaborando com a precisão em diagnósticos médicos.

6. REFERÊNCIAS

ABDALLA, Renê Jorge et al e retorno à prática esportiva. **Lesões musculoesqueléticas no ombro do atleta: mecanismo de lesão, diagnóstico**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Ortopedia e Traumatologia, 2001. Disponível em: <<http://www.rbo.org.br/materia.asp?mt=710&idIdioma=1>>. Acesso em: 20 abr. 2011.

COUTINHO, L., **Um Ambiente Integrado de Desenvolvimento de Software a Robótica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.

DENAVIT, J., HARTENBERG, R., A **kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices**, ASME J. on Applied Mechanics, pp. 215-221, 1955.

HERMINI, Helder Anibal, **Modelagem, implementação e controle de sistemas biomecânicos envolvendo aspectos cinemáticos**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.