



ESTUDO DA REDUNDÂNCIA CINEMÁTICA EM UMA MÃO MECÂNICA COM CINCO DEDOS

Max Suell Dutra

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Departamento de Engenharia Mecânica
Cx. P. 68503 – CEP. 21945-970 - Rio de Janeiro – Brasil
max@serv.com.ufrj.br

Marco Hiroshi Naka

Universidade Estadual Paulista – Ilha Solteira
Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Brasil 56 – Ilha Solteira – CEP 15385-000 - São Paulo – Brasil
mhnaka@yahoo.com

Resumo. Um sistema que possua mais graus de liberdade que o necessário para a realização de um determinado movimento é conhecido como redundante. Existem diversos sistemas redundantes em sistemas biológicos, como por exemplo: nos pés, nas mãos e na coluna vertebral, todavia nos projetos robóticos tem se evitado estes sistemas pelas dificuldades na simulação, na implementação dos atuadores e pelo custo envolvido. Neste trabalho é apresentado a redundância existente em uma mão mecânica com cinco dedos onde cada um possui quatro juntas de rotações simples. Embora a redundância do sistema tenha como consequência as dificuldades mencionadas, também traz como fator positivo o aumento da flexibilidade na manipulação de diferentes formas de objetos. Para a escolha da melhor solução (não unicidade) são aplicadas restrições ao movimento. As restrições se baseiam nos movimentos possíveis da mão humana e levam em consideração a versatilidade, a estabilidade e a segurança do agarramento. Neste trabalho são apresentados os equacionamentos matemáticos do agarramento para uma situação crítica, onde são usados apenas dois dedos e o objeto a ser agarrado é uma esfera, um objeto de difícil estabilidade, já que o agarramento é efetuado em pontos de contatos (Salisbury, 1982). É levado em conta também, as restrições encontradas na mão humana para estes equacionamentos.

Palavras-chave: *mão mecânica, redundância cinemática, manipulação, cinemática.*

1. INTRODUÇÃO

O emprego de mãos robóticas têm-se intensificado em diversas áreas, sejam nas linhas de produção industrial até a confecção de próteses. Neste segundo campo, a complexidade dos projetos são de grandeza maior, pois ao contrário do primeiro campo ligado à indústria, onde as mãos são projetadas para realizar tarefas pré-definidas e não exigem muita flexibilidade (Tanie, 1985), os projetos destes precisam levar em conta a versatilidade e a capacidade de manipulação encontradas na mão humana.

Nas mãos industriais (ou garras), a tarefa mais comum é o agarramento associado ao movimento do braço mecânico acoplado. O agarramento não exige, na maioria do caso, uma capacidade manipulativa. É bom que esteja bem claro que a capacidade de agarramento não depende da capacidade manipulativa, que significa a capacidade de manusear um objeto com apenas uma mão (Fuentes & Nelson, 1994), através do movimento dos dedos. Nas figuras 1 e 2 pode-se observar a rotação de um objeto em torno do eixo paralelo a palma da mão e a rotação em torno de um eixo normal a palma da mão mecânica.

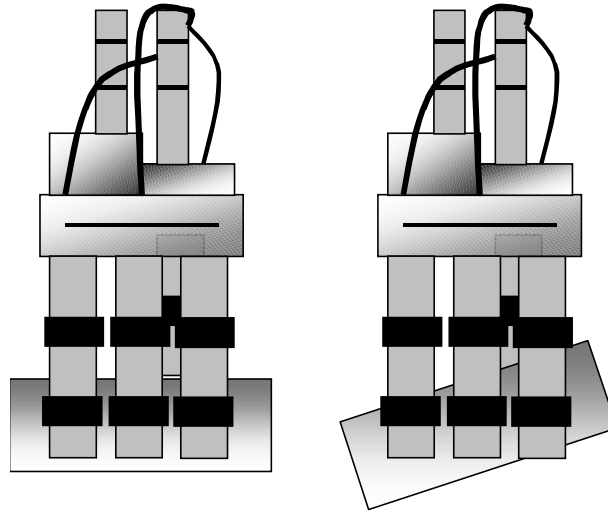


Figura 1. Rotação em torno de um eixo paralelo à palma da mão.

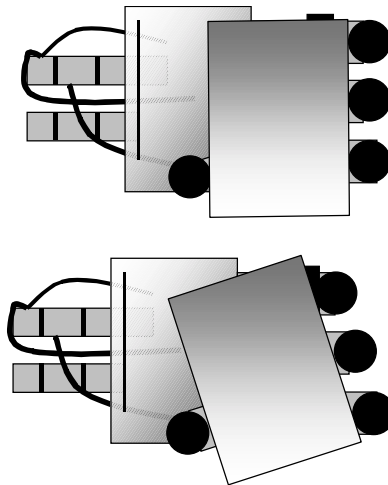


Figura 2. Rotação em torno de um eixo normal à palma da mão.

Já nas mão protéticas, é necessário que a mão tenha uma capacidade manipulativa similar à da mão humana. Para que haja a possibilidade de manipulação, é necessário que o sistema de posição dos dedos da mão mecânica, formem um sistema redundante (Murray & Sastry, 1990). A redundância do sistema flexibiliza o agarramento e permite a manipulação do objeto.

O objetivo deste trabalho é apresentar o estudo do aperto de uma mão mecânica com cinco dedos, onde cada dedo é um sistema redundante de grau 1, procurando se obter uma similaridade com a mão humana e permitir agarramentos seguros e manipulações precisas. É apresentada uma forma de tratamento para esse tipo de sistema redundante. Apesar da complexidade na obtenção das soluções, a opção em desenvolver um sistema redundante acarreta em grandes benefícios para a capacidade de manipulação da mão.

2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A mão que está sendo avaliada é um projeto que está em fase de desenvolvimento. Como um dos objetivos é o seu emprego na parte de próteses, tem se buscado inicialmente, uma similaridade com a mão humana. A anatomia de uma mão humana, pode ser observada segundo a figura abaixo:

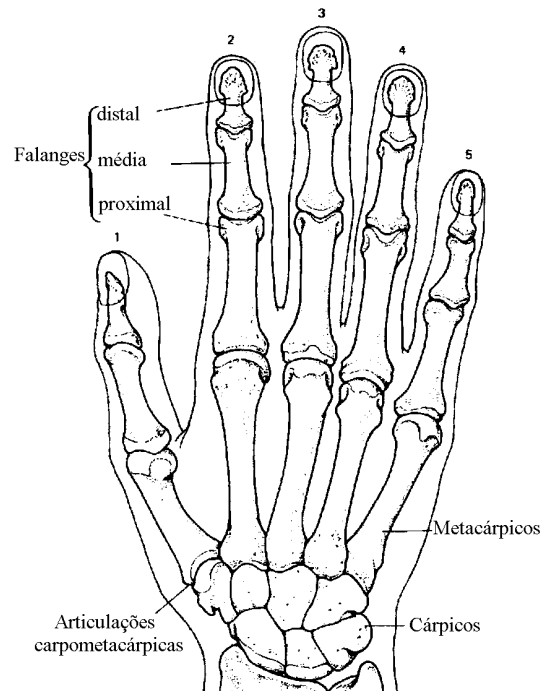


Figura 3. Morfologia da mão humana (Dutra, 1990)

Observa-se que cada dedo possui quatro graus de liberdade, que são representados por juntas de rotações simples que unem três falanges por dedo e uma palma, perfazendo um total de 20 graus de liberdade. Com base nesses dados, a mão mecânica tem sido desenvolvida com essas características, além da questão dimensional, em outras palavras, a mão possui um tamanho de acordo com a mão de um adulto normal.

3. O PROBLEMA DA REDUNDÂNCIA

Para se descrever um ponto no espaço (P) precisa-se de apenas 3 coordenadas.

$$P = (x_1, y_1, z_1) \quad (1)$$

Para que este mesmo ponto seja atingido pela ponta do dedo (S) de um ser humano necessita-se do conhecimento de quatro coordenadas.

$$S = f(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4) \quad (2)$$

A necessidade de se conhecer os quatros ângulos pode ser constatado na figura abaixo, onde é apresentado o formato de dedo escolhido.

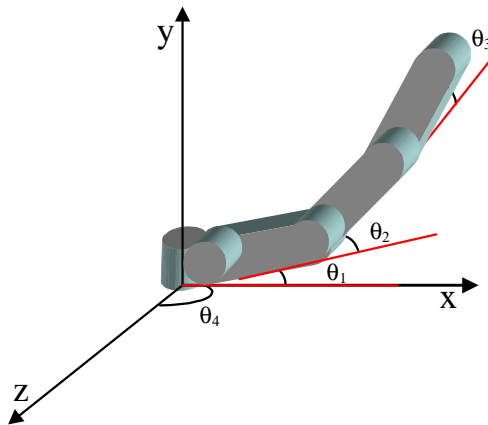


Figura 4. Desenho do dedo com o sistema de coordenada e os ângulos das juntas.

O comprimento dos elos são definidos por L_1 , L_2 e L_3 . Esses valores são constantes e variam de acordo com o projeto.

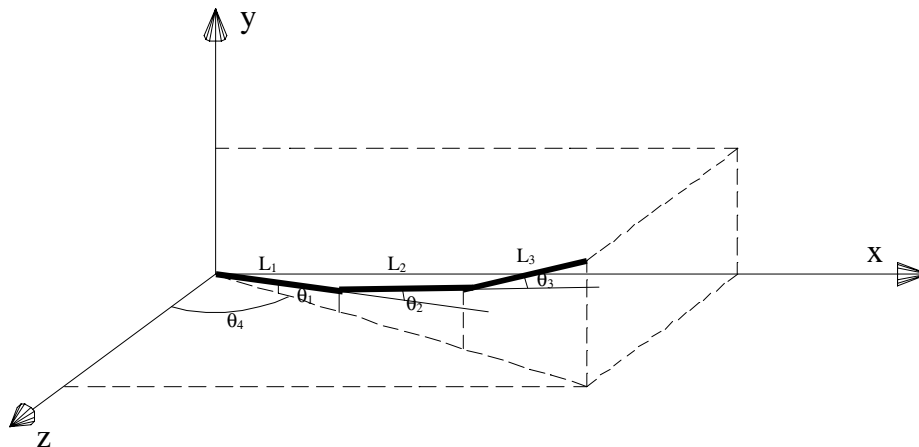


Figura 5. Desenho esquemático de dedo no sistema de coordenadas xyz.

A posição da ponta do dedo pode ser calculada como:

$$\begin{aligned}x_1 &= [L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)] \sin \theta_4 \\y_1 &= L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\z_1 &= [L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)] \cos \theta_4\end{aligned}\quad (3)$$

Dado as coordenadas da ponta do dedo (x_1 , y_1 , z_1) deseja-se determinar os valores de θ_1 , θ_2 , θ_3 e θ_4 , necessários para que a ponta do dedo atinja a posição desejada.

O valor de θ_4 pode ser determinado facilmente dividindo o valor de x_1 por z_1 , e temos:

$$\tan \theta_4 = \frac{x_1}{z_1}\quad (4)$$

Pode-se notar do sistema de equações (3), que temos um sistema com mais incógnitas do que equações o que identifica matematicamente o sistema como redundante. Ou seja, existem infinitas respostas possíveis.

4. POSSÍVEIS SOLUÇÕES PARA O PROBLEMA DA REDUNDÂNCIA

Para resolver esse tipo de problema, existem inúmeras considerações que podem ser adotadas que levam a determinadas soluções. Mas é necessário verificar se essas considerações estão de acordo com a segurança do aperto, isto irá determinar se a solução pode ser adotada ou não.

Quanto a questão dinâmica, onde as forças de inércia estão envolvidas, é necessário considerar que a segurança do aperto está relacionada com a possibilidade da ocorrência do escorregamento (Mishra & Silver, 1989). Caso o objeto escorregue, então a segurança do aperto estará comprometida (Romdhane & Duffy, 1990).

Para avaliar essa questão é preciso fazer certas considerações. Uma delas é baseada na seguinte observação de Pavlov (Matsuoka, 1995): as crianças quando iniciam o processo de manipulação de objetos, não os seguram de forma segura, pois não conseguem utilizar o polegar de forma adequada, sendo que o polegar é o que gera a segurança no agarramento. E de fato, se analisarmos atentamente essa observação, veremos que grande parte das operações de agarramento que realizamos, é feita com o auxílio do polegar e de um outro dedo.

O polegar é o dedo que faz o movimento de oposição em relação aos demais dedos. Assim sendo, o polegar torna-se um importante referencial, uma vez que ele se encontra envolvido em grande parte dos agarramentos.

Assim, para o agarramento de uma esfera, temos a seguinte situação, em termos de força:

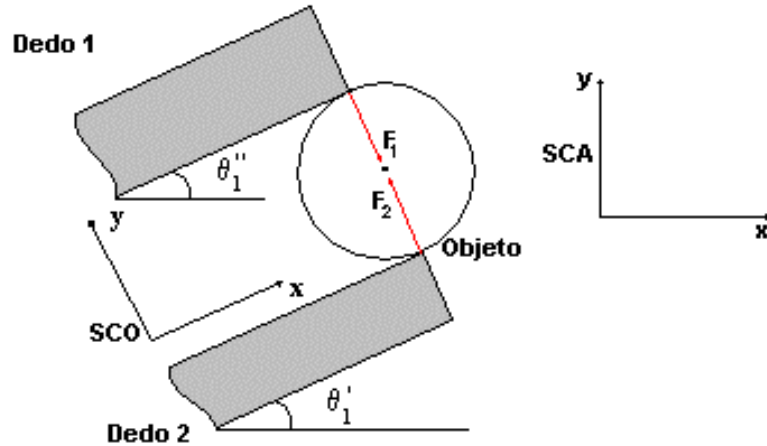


Figura 6. Agarramento levando em consideração as forças envolvidas.

O sistema de coordenadas do objeto {SCO} é construído com x sendo um vetor unitário na direção tangencial e y na direção normal ao contato com o objeto no dedo 2 (figura 6). O outro sistema é o sistema de coordenadas absoluto {SCA}. Os dois sistemas de coordenadas podem ser observados na figura 6. A relação entre eles é:

$$\{SCO\} = R_z(\theta_1') \cdot \{SCA\} \quad (5)$$

onde,

$$R_z(\theta_1') = \begin{vmatrix} \cos \theta_1' & -\sin \theta_1' & 0 \\ \sin \theta_1' & \cos \theta_1' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (6)$$

que é a matriz de rotação homogênea em torno do eixo z do sistema de coordenadas {SCA}.

Para obtermos um agarramento seguro, é necessário que a resultante das forças na direção x ({SCO}) sobre o objeto seja nula. A partir do sistema de coordenadas {SCO} (figura 6), temos as seguintes equações de equilíbrio:

$$\sum F_x = F_{at} - F_2 \cos \theta_1'' = 0 \quad (7)$$

onde, F_{at} é a força de atrito entre o polegar e o objeto, F_2 é a força exercida pelo dedo sobre o objeto e θ_1'' é o ângulo formado pelo dedo 2 em relação ao {SCA}. Temos, então que F_{at} é dado por:

$$F_{at} = \mu \cdot F_1 \quad (8)$$

onde, μ é o coeficiente de atrito entre o objeto e o polegar, e F_1 é a força exercida pelo polegar sobre o objeto.

Desta forma, combinando (7) com (8), temos:

$$\mu \cdot F_1 = F_2 \cos \theta_1'' \quad (9)$$

logo:

$$\cos \theta_1'' = \frac{F_1 \cdot \mu}{F_2} . \quad (10)$$

Assumindo que μ seja constante, então o ângulo θ_1'' depende somente das relações das forças F_1 e F_2 . Considerando que a força que o polegar exerce é máxima, pois ela faz oposição aos demais dedos da mão e que a força máxima admissível por dedo é de 4N, pode-se concluir que F_1 também é uma constante e vale 4N. Assim, considerando:

$$F_1 \cdot \mu = k \text{ (constante)} \quad (11)$$

temos:

$$\cos \theta_1'' = \frac{k}{F_2} \quad (12)$$

Desta forma, os valores de F_2 e $\cos \theta_1''$ dependem um do outro. Caso um decresça, o outro necessariamente precisa sofrer um acréscimo para satisfazer a equação 12. Se considerarmos que F_2 também é máxima, ou seja, igual a 4N, temos a seguinte relação:

$$\cos \theta_1'' = \mu \quad (13)$$

onde, temos:

$$\theta_1'' = \arccos(\mu) \quad (14)$$

Observando a figura 5, temos que:

$$\theta_1'' + \theta_1' = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = C \text{ (constante)} \quad (15)$$

Logo, implementando (15) em (4.a) e (4.b), temos:

$$\begin{aligned} x_1 &= [L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos C] \sin \theta_4 \\ y_1 &= L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \sin C \end{aligned} \quad (16.a \text{ e } 16.b)$$

onde o último termo de cada equação do lado direito é uma constante. Sendo θ_4 conhecido (equação 4) o sistema de equações se torna determinado e é possível encontrar soluções que

atendam as restrições impostas ao sistema. Na resolução deste problema, é observado que as variáveis θ_1 e θ_2 possuem duas raízes, pois possuem multiplicidade 2. A decisão de qual é a raiz adequada vai depender das restrições do espaço de trabalho de cada dedo, bem como das restrições das juntas, que são:

$$0 \leq \theta_n \leq 90^\circ \quad (17)$$

onde, θ_n são os ângulos de inclinações de cada junta com relação ao sistema de coordenada {SCD} (Sistema de Coordenadas do Dedo). O {SCD} é formado pelo longitudinal do dedo anterior, e a sua normal, conforme pode ser observado na figura abaixo:

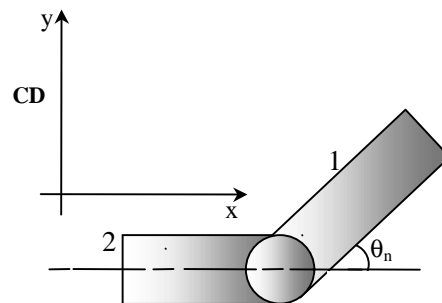


Figura 7. Sistema de Coordenadas {SCD}

As restrições impostas ao sistema são aproximadamente as mesmas encontradas nos dedos das mãos humanas, onde apenas o ângulo θ_2 possui o limite superior diferente e pode variar entre 0 e 95° .

Fazer o ângulo θ_2 e θ_3 terem os mesmos valores é outra restrição que poderia ser utilizada neste sistema. Os valores destes ângulos são normalmente próximos nas mãos humanas e poderiam ser utilizados para facilitar os cálculos, o projeto do sistema de controle e a fabricação do sistema. Embora seja o que acontece nas mãos humanas, teria um efeito não desejado para nós devido ao fato do sistema natural ser flexível e o mecânico ser mais rígido, dificultando a manipulação dos objetos.

5. CONCLUSÕES

Pôde-se avaliar neste trabalho o agarramento de uma mão mecânica com cinco dedos, utilizando-se apenas dois dedos, utilizando-se apenas dois dedos, o que representa uma situação crítica de agarramento.

Observou-se que a existência da redundância gera uma complexidade na obtenção das posições das juntas que ligam os elos, embora demande numa excelente vantagem: aumento na capacidade manipulativa da mão, e por consequência, a sua flexibilidade.

O uso de mais de dois dedos, proporcionam agarramentos mais seguros, uma vez que com dois dedos, apenas 40% das formas de objetos podem ser manipuladas, guardando-se as devidas proporções (Matsuoka, 1995).

Os estudos futuros levarão em conta os agarramentos com mais de dois dedos e o uso da palma da mão mecânica no processo de agarramento.

Agradecimentos

Agradecemos a FAPESP e a FUNDUNESP pelo apoio financeiro cedido para a execução deste projeto.

REFERÊNCIAS

- FUENTES, O., NELSON C.R., Morphing Hands and Virtual Tools (or What Good is an Extra Degree of Freedom), Computer Science Department, The University of Rochester, New York, Technical Report 551, December 1994.
- MATSUOKA, Y.; Embodiment and Manipulation Learning Process for a Humanoid Hand, Master of Science Thesis Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1995.
- MISHRA, B. e SILVER, N. Some Discussion of Static Gripping and its Stability, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 19, no.4, 1989.
- MURRAY, R.M., SASTRY, S.S., Mathematical Problems in Grasping and Manipulation by Multifingered Robot Hands, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Symposia in Applied Mathematics, January 1990.
- TANIE, K. Design of Robot Hands, Handbook of Industrial Robotics, John Wiley & Sons, New York, 1985.
- ROMDHANE, L.; DUFFY, J.; Optimum Grasp for Multi-fingered hands with point contact with friction, Center of Intelligent Machines and Robotics, University of Florida, Le Forum de Genie Mecanique 1990.
- SALISBURY Jr., J. K.; Kinematic and Force Analysis of Articulated Hands, Stanford University, PhD Thesis, May 1982.
- DUTRA, M. S.; Projeto, Construção, Análise e Testes de uma Mão Mecânica com Quatro Dedos, Master of Science Thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1990.