

CONTROLE MULTIVARIÁVEL APLICADO A UM PROJETO DE MÃO ARTIFICIAL ROBÓTICA

André Ribeiro Lins de Albuquerque

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, alins@sc.usp.br

Marcio Aurélio Furtado Montezuma

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná - Cornélio Procópio, montezum@sc.usp.br

André Luis de Aguiar Mirandola

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, mirandol@sc.usp.br

Glauco Augusto de Paula Caurin

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, gcaurin@sc.usp.br

Eduardo Morgado Belo

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, belo@sc.usp.br

Resumo. *Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um controle seguidor de posição e orientação por meio de realimentação de estados de um modelo não linear de uma mão artificial robótica denominada BRAHMA (Brazilian Anthropomorphic Hand) - com 22 graus de liberdade. Neste trabalho são utilizados um modelo não linear e um linear de 3 dedos da BRAHMA dos quais foram implementados utilizando ferramentas apropriadas para a obtenção e integração das equações de movimento. O formalismo matemático que rege a dinâmica da BRAHMA é apresentado de forma criteriosa. O controle é testado pela imposição de movimentos à BRAHMA e as respostas são apresentadas por meio das simulações numéricas.*

Palavras-chave: modelagem, próteses de mão, garras, robótica, controle multivariável.

1. INTRODUÇÃO

Filósofos antigos como Anaxágoras (500?-428 ac) e Aristóteles (384-322 ac) já debatiam a respeito da relação entre a mão e a mente humana, pois tanto uma como outra fornece características ao ser humano que o diferencia dos outros animais. Paleontologistas mais recentemente, mostraram que a destreza mecânica da mão humana foi o maior fator que permitiu ao *Homo sapiens* desenvolver um cérebro superior (Bicchi, 2000).

A mão humana representa um grande desafio para a robótica devido a sua flexibilidade, destreza e por consequência grande potencialidade de aplicações. Quando se pensa em termos de cooperação entre homem e máquina e no uso de mãos artificiais como próteses, se introduzem novos desafios como o conforto, facilidade de uso e integração.

Quando os seres humanos capturam um objeto, parte do procedimento adotado é preestabelecida e parte do procedimento é otimizada instantaneamente. Os dedos posicionam-se de forma coerente e

forças são aplicadas de modo a não permitir que o objeto caia ou deslize. Muitos autores (Valero, 2000; Toft, 1980) afirmam ser a mão humana, uma das partes mais evoluídas do corpo humano, capaz de interagir de forma versátil com o meio ambiente através de movimentos, de sensações de contato, de controle de forças e outras habilidades que muitos pesquisadores nesta área gostariam de emular em garras robóticas e próteses de mão humana.

No início do século XX ocorreu uma grande onda de desenvolvimento na área próteses da mão humana provocada pela primeira guerra mundial. Atualmente, já se encontram disponíveis comercialmente próteses de mãos para crianças e, em desenvolvimento, cotovelos com velocidades controláveis. Apesar dos avanços na área, existem estudos recentes que mostram que ainda hoje aproximadamente 70% das próteses e órteses de membros superiores são abandonadas após pouco tempo de uso (Scherbina, 2002). Os benefícios alcançados com o uso destes equipamentos ainda são pequenos se comparados ao esforço de treinamento, adaptação e principalmente aos resultados obtidos.

Na grande maioria dos trabalhos da área, os modelos da mão foram desenvolvidos para aplicações clínicas e não se adaptam bem ao problema da análise de movimentos e dos respectivos comandos e acionamento. Muitos destes modelos foram construídos para predizer as forças aplicadas em músculos e tendões (Chao, 1976; Berne, 1977; Toft, 1980) ou, exploram considerações importantes para o design de órteses ou para cirurgias reconstrutivas.

Uma das contribuições que se pretende oferecer a área é a modelagem criteriosa da cinemática (Glauco et al, 2003) e da dinâmica de uma prótese de mão humana, simulando os movimentos e esforços gerados a partir de malhas de controle.

Este artigo apresenta o desenvolvimento das equações de movimento do projeto de prótese da mão humana, denominada BRAHMA (*Brazilian Anthropomorphic Hand*) e, de um controle multivariável de posição e orientação de um modelo não linear de três dedos da BAHMA (com 8 graus de liberdade) por meio de realimentação de estados.

2. MODELAGEM DA BRAHMA

Um novo conceito de mão artificial foi desenvolvido por CAURIN et al (2003), cujo protótipo ficou denominado BRAHMA (*Brazilian Anthropomorphic Hand*), possuindo 22 graus de liberdade, 4 para cada dedo e 2 para a articulação do pulso, ilustrado na Fig. (1).

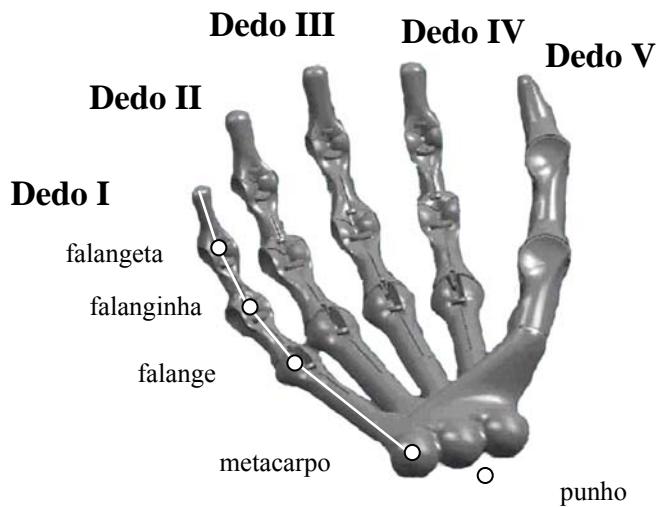


Figura 1 – Protótipo da BRAHMA

Neste protótipo foi estabelecida uma metodologia para determinação das coordenadas cartesianas das pontas dos dedos em relação a um sistema de coordenadas fixo ao punho (CAURIN et al, 2003), onde a cinemática direta é estabelecida de maneira analítica e a inversa de forma numérica. Com exceção do polegar (Dedo V), todos os outros dedos da mão artificial são tratados de forma análoga.

Tomou-se como base para a simulação computacional os dedos III, IV e V: médio, indicador e polegar, respectivamente e seus três últimos corpos: falangeta, falanginha e falange (Fig. 1).

Os dedos formam modelados como corpos rígidos independentes, ligados entre si por juntas de revolução e com sistemas fixos de coordenadas independentes para cada corpo rígido do dedo (Fig.2).

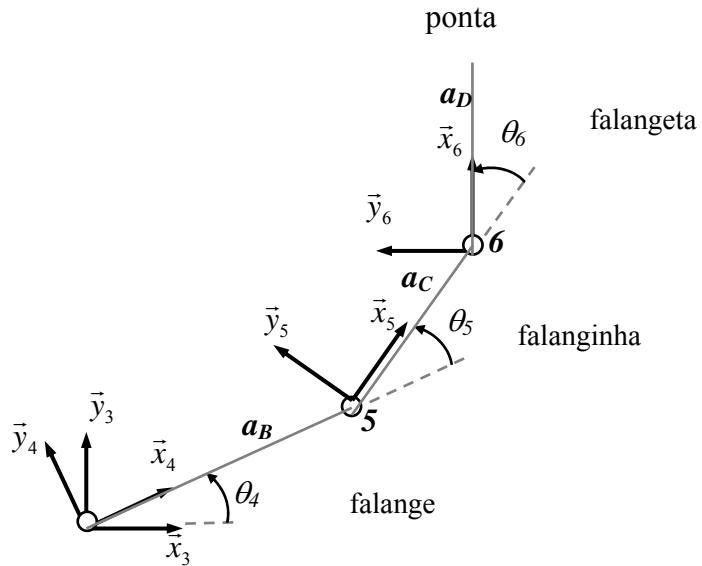


Figura 2: Modelagem dos três últimos corpos de um dedo genérico (Dedo IV).

2.1. Modelo Dinâmico da BRAHMA

As equações de movimento da BRAHMA são obtidas pelo método de Lagrange. Uma vez que as variáveis \underline{q} constituem um conjunto de coordenadas generalizadas, ou variáveis independentes que descrevem os movimentos das juntas de um dos dedos da BRAHMA. As equações de movimento segundo Lagrange (CRAIG, 1989) podem ser escritas como:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(\underline{q}, \dot{\underline{q}}, t)}{\partial \dot{\underline{q}}_n} \right] - \frac{\partial L(\underline{q}, \dot{\underline{q}}, t)}{\partial \underline{q}_n} = \underline{F}_n - \beta_n \dot{\underline{q}}_n \quad (1)$$

onde $n = 1, \dots, N$ juntas independentes, \underline{F} é a força generalizada (torque) e β é o coeficiente de atrito nas articulações.

Deste modo, a Função Lagrangiana, ou simplesmente Lagrangeano, é determinada pela diferença de energia cinemática e energia potencial do sistema, assumindo a seguinte forma:

$$L(\underline{q}, \dot{\underline{q}}, t) = K(\underline{q}, \dot{\underline{q}}, t) - P(\underline{q}, t) \quad (2)$$

As equações de movimento são obtidas pela substituição da Eq. (2) na Eq. (1) para formar as derivadas apropriadas. O modelo dinâmico pode ser expresso, resumidamente, como equações diferenciais não-lineares de segunda ordem (KOIVO, 1989):

$$\sum_{k=1}^N D_{nk} \ddot{q}_k + \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N D_{nkj} \dot{q}_k \dot{q}_j + \underline{G}_n = \underline{F}_n + \beta_n \dot{q}_n \quad (3)$$

Do lado esquerdo da Equação (3), o primeiro termo representa componentes inerciais, o segundo, as componentes de Coriolis quando $k \neq j$ e centrípeta quando $k = j$, e o terceiro, a aceleração gravitacional. A representação de D_{nk} , D_{nkj} e \underline{G}_n são apresentadas como:

$$D_{nk} = \sum_{i=\max(n,k)}^N \text{tr} \left[\frac{\partial T_0^i}{\partial \underline{q}_n} J_i \left(\frac{\partial T_0^i}{\partial \underline{q}_k} \right)' \right] \quad (4)$$

$$D_{nkj} = \sum_{i=\max(n,k,j)}^N \text{tr} \left[\frac{\partial T_0^i}{\partial \underline{q}_n} J_i \left(\frac{\partial T_0^i}{\partial \underline{q}_k \partial \underline{q}_j} \right)' \right] \quad (5)$$

$$\underline{G}_n = - \sum_{i=n}^N m_i g' \frac{\partial T_0^i}{\partial \underline{q}_n} \underline{p}_i \quad (6)$$

onde $\text{tr} []$ significa a diagonal da matriz, T são as matrizes de transformadas homogêneas (CAURIN et al, 2003), \underline{p}_i é o centro de gravidade do enésimo link, J são as matrizes de inércia e “N” é o número de articulação do manipulador.

Com a equação dinâmica BRAHMA, determina-se os torques necessários das articulações para seguir uma trajetória desejada. Essa equação completa pode ser expressa por:

$$\begin{bmatrix} D_{11} & \cdots & D_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{n1} & \cdots & D_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \vdots \\ \ddot{q}_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{q}' C_1(\underline{q}) \dot{q} \\ \vdots \\ \dot{q}' C_N(\underline{q}) \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1(\underline{q}) \\ \vdots \\ G_N(\underline{q}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 - \beta_1 \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \tau_N - \beta_N \dot{q}_N \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{e} \quad C_N(\underline{q}) = \begin{bmatrix} D_{n11}(\underline{q}) & \cdots & D_{n1j}(\underline{q}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{nk1}(\underline{q}) & \cdots & D_{nkj}(\underline{q}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

onde a diagonal dessa matriz $C_N(\underline{q})$ (1.8), encontra-se os componentes de aceleração centrípeta e os outros termos estão associados a aceleração de Coriolis. A equação dinâmica da BRAHMA pode ser expressa resumidamente por:

$$D(\underline{q}) \ddot{q} + C(\underline{q}, \dot{q}) + G(\underline{q}) = \underline{F} \quad (9)$$

3. SISTEMA DE CONTROLE

São utilizados dois modelos de um dedo da garra gerados a partir do software de modelagem dinâmica ADAMS, um linearizado e um não linear, ambos contendo oito entradas que são os torques nos articulações, uma vez que se optou por simular apenas 3 dedos da BRAHMA e seus três últimos corpos: falangeta, falanginha e falange (Fig. 1) e dezenas de saídas, das quais oito são os deslocamentos angulares nas articulações e as outras oito, a derivada desses deslocamentos.

O modelo linearizado em variáveis de estados é utilizado para realizar o controle em torno da posição de linearização. É formado por quatro matrizes: A, B, C e D. A matriz A possui dimensões $n \times n$ onde n é o número de estados sendo igual a duas vezes o número de graus de liberdade do sistema, neste caso a dimensão é 16, totalizando 8 graus de liberdade no sistema a ser controlado. A matriz B possui dimensões $n \times m$ onde m é igual a 8 que é o número de entradas do sistema. A matriz C é $p \times n$ onde p é o número de saídas do sistema, sendo esta igual a 16, e a matriz D é $p \times m$ com todos os seus elementos nulos.

O modelo não linear é utilizado para simular o comportamento do dedo real e testar a eficiência do controle utilizado.

3.1. Sistema de Controle Seguidor

O Sistema linearizado de malha aberta é representado abaixo pelas equações de estado de *n*-ésima ordem e as equações de saída de *p*-ésima ordem.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (10)$$

$$y = Cx = \begin{bmatrix} E \\ F \end{bmatrix} x \quad (11)$$

onde y é um vetor $p \times 1$ e $w = Ex$ é um vetor $m \times 1$ representando as saídas que são requeridas para seguir o vetor de entrada θ .

O controle por realimentação de estados é projetado com o intuito de que o vetor w siga o comando de entrada θ quando este seja um comando de entrada constante por partes. Segundo D'Azzo & Houpis, (1995) o método do projeto consiste em adicionar um vetor comparador e integrador que satisfaça a seguinte equação:

$$\dot{z} = \theta - w = \theta - Ex. \quad (12)$$

O sistema de malha aberta é então governado pelas equações aumentadas de estado e saída formadas a partir da Eq. (9) à Eq. (12)

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ -E & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \theta \\ &= \bar{A}x' + \bar{B}u + \bar{B}'\theta \\ y &= \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} = \bar{C}x' \end{aligned} \quad (13)$$

D'Azzo e Houpis (1995) mostram que a lei de controle a ser usada é:

$$u = K_1 x + K_2 z = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Satisfeita a condição de controlabilidade e observabilidade (D'Azzo e Houpis, 1995), o diagrama representando o sistema de controle por realimentação, consistindo das equações de estado e de saída dadas pelas Eq. (9) e Eq. (10) e a lei de controle dada pela Eq. (14), é mostrado na Fig. (3). Esta lei de controle atribui o espectro de autovalores de malha fechada. A equação de malha fechada é:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}' &= \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{z}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K}_1 & \mathbf{B}\mathbf{K}_2 \\ -\mathbf{E} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \theta \\ &= \mathbf{A}'_{cl} \mathbf{x}' + \mathbf{B}' \mathbf{r}.\end{aligned}\quad (16)$$

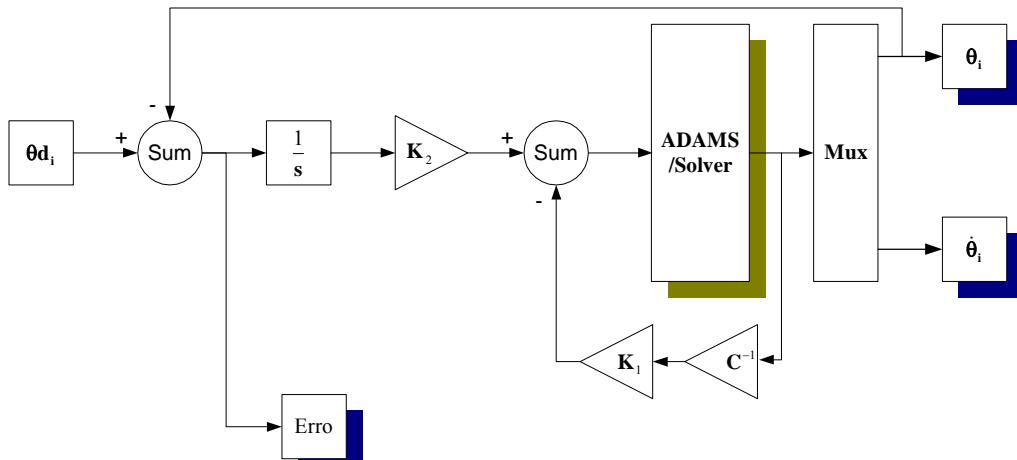


Figura 3 - Sistema de Controle Seguidor.

A obtenção da matriz \bar{K} é realizada a partir da seleção dos autovalores a serem atribuídos à matriz da planta de malha fechada A'_{cl} na equação 12.

$$\sigma(\overline{A} + \overline{B}\overline{K}) = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n+m}\} \quad (17)$$

e um conjunto associado de autovetores

$$v(\overline{A} + \overline{BK}) = \{v_1, v_2, \dots, v_{n+m}\} \quad (18)$$

que são selecionados a fim de se obter as características de resposta no tempo desejadas. Os autovalores e autovetores são relacionados pela equação:

$$[\bar{A} + \bar{B}\bar{K}]v_i = \lambda_i v_i \quad (19)$$

que pode ser colocada na forma:

$$[\bar{A} - \lambda_i I \quad \bar{B}] \begin{bmatrix} v_i \\ g_i \end{bmatrix} = 0 \quad (20)$$

para $i = 1, 2, \dots, n+m$,

Para satisfazer a equação (16), o vetor $[v_i^T \ g_i^T]^T$ deve pertencer ao núcleo de:

$$\bar{S}(\lambda_i) = [\bar{A} - \lambda_i I \quad \bar{B}] \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n+m. \quad (22)$$

A notação $\ker S(\lambda_i)$ é usada para definir o espaço nulo que contém todos os vetores $[v_i^T \ g_i^T]^T$ para que a equação (16) seja satisfeita (D'Azzo e Houpis, 1995). A Eq. (21) pode ser usada para formar a igualdade matricial

$$[g_1 \quad g_2 \quad \dots \quad g_{n+m}] = [\bar{K}v_1 \quad \bar{K}v_2 \quad \dots \quad \bar{K}v_{n+m}] \quad (23)$$

onde se obtém a matriz \bar{K} como segue:

$$\bar{K} = [g_1 \quad g_2 \quad \dots \quad g_{n+m}] [v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_{n+m}]^{-1} = QV^{-1} \quad (24)$$

Observa-se que os autovalores podem ter valores repetidos de número igual às entradas do sistema. Isso se deve ao fato do espaço nulo ter dimensão igual ao número de entradas. Assim associa-se um autovalor repetido a um vetor da base do espaço nulo. Com isso, todas as colunas da matriz V continuam sendo linearmente independentes e, por isso, a matriz V^{-1} existe.

4. RESULTADOS

Para a implementação do controle, adotou-se o seguinte conjunto de autovalores para a planta em malha fechada:

$$\sigma(\bar{A} + \bar{B}\bar{K}) = \left\{ \underbrace{-30, \dots, -30}_{8 \text{ autovalores}}, \underbrace{-40, \dots, -40}_{8 \text{ autovalores}}, \underbrace{-50, \dots, -50}_{8 \text{ autovalores}} \right\} \quad (25)$$

Os valores de entrada atribuídos para serem seguidos pelo sistema de controle foram:

$$\theta_d = \{-0.3; -0.4; -0.5; -0.6; -0.7; -0.8; -0.9; -1\} \quad (26)$$

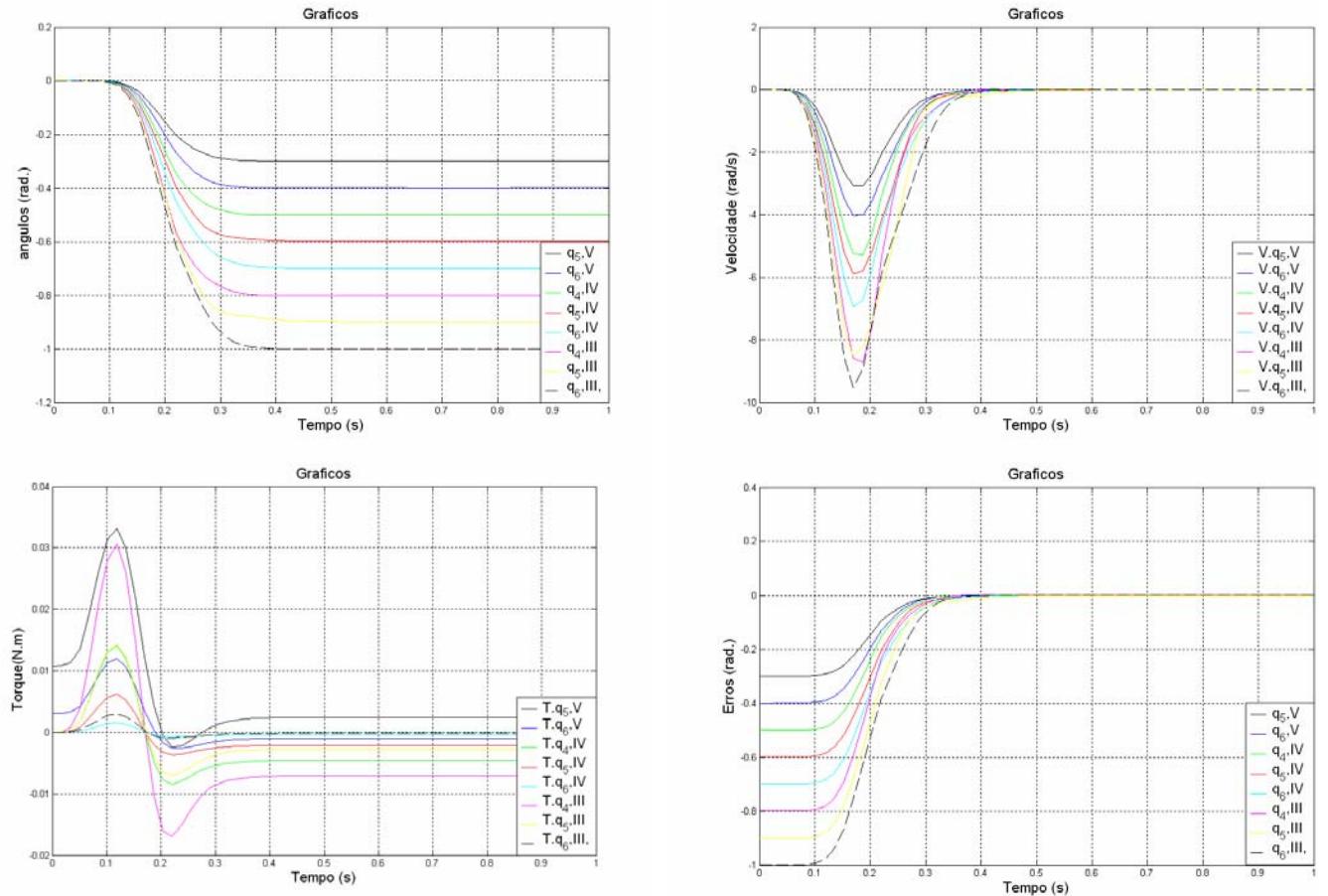


Figura 4 – Resultados da Simulação do sistema de controle. Têm-se como resultados os deslocamentos e velocidades angulares nas articulações, os torques nas articulações e por fim os valores dos erros.

4.1. Análise dos Resultados

Por meio das simulações, procurou-se analisar o comportamento das grandezas físicas envolvidas na dinâmica do sistema. Na Figura (3) encontram-se os gráficos de velocidade e força, úteis para determinar as características do sistema de acionamentos, como potência e rotação no caso de motores elétricos. Nos gráficos de deslocamento angular e erro, observa-se que a influência da componente transitória da resposta é menor quanto maior forem os autovalores atribuídos. Ainda analisando os gráficos de deslocamento angular e erro constata-se que o sistema controlado apresenta um comportamento estável com amortecimento crítico, ou seja, sem *overshoot*, conforme projetado no sistema de controle (atribuição de autovalores reais com valores negativos). O tempo de estabilização está abaixo de 0,4 segundos, sendo eficiente para a maior parte das tarefas do sistema, como por exemplo: manipulação, fixação, movimentos velozes e precisos.

5. CONCLUSÃO

Os ambientes de desenvolvimento do modelo e do controle se apresentaram eficientes. O ambiente de modelagem Adams® se mostrou prático e flexível na obtenção e integração das equações dinâmicas da BRAHMA. O controle foi desenvolvido no ambiente de desenvolvimento Matlab/Simulink®. A co-simulação foi realizada de maneira simples e direta.

O controle seguidor projetado nesse trabalho é eficiente para controlar a posição do modelo não linear da BRAHMA para os autovalores em malha fechada escolhidos, apresentando boa acuracidade mesmo com a atribuição de grandes deslocamentos angulares. Pelas respostas apresentadas, pode-se constatar que em até 4 décimos de segundos o sistema converge para os valores requeridos, porém, simulações para diversos tipos de sinais de entrada (ex. senoidal, rampa, etc.) ainda se fazem necessárias para uma melhor análise dos resultados do controle em diferentes condições de trabalho da mão.

Nesse trabalho, desenvolveu-se um sistema de controle multivariável linear para um sistema com 8 graus de liberdade. O próximo passo é o desenvolvimento do controle para o sistema completo com 22 graus de liberdade.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro à pesquisa.

8. REFERÊNCIAS

- Berme, N., Paul, J.P., Purves, W.K., 1977, “A biomechanical analysis of the metacarpophalangeal joint”, *J. of Biomechanics*, Vol.10, pp.409-412.
- Bicchi, A., 2000, “Hand for Dexterous Manipulation and Robust Grasping: A Difficult Road Toward Simplicity”, In: *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMOTION*, Vol.16, No.6, pp.652-662.
- Chao, E. Y. Opgrande, J. D. Axmer, F.E., 1976, “Three-dimensional force analysis of finger joints in selected isometric hand functions”, *J. Biomechanics*, Vol.9, pp.389-396.
- Craig, J.J., 1989, “Introduction to Robotics : mechanical and control. EUA”, Addison-Wesley.
- D’Azzo, J. J.; Houpis, H. C., 1995, “Linear Control System Analysis and Desing: Conventional and Modern”, New York, McGraw Hill.
- Caurin G. A. P et. all., 2003, “Modelagem e Simulação da Prótese Mecatrônica BRAHMA 1 – Brazilian Anthropomorphic Hand”, IN: DINCOM - Inc. 2º Congresso Temático de Dinâmica e Controle da SBMAC. 2003.
- Koivo, A. J, 1989, “Fundamentals for Control of Robotic Manipulators”, John Wiley & sons, Inc, New York.
- Scherbina, K., 2002, “Prosthetics Upper Limb - Patient Care Management”, IN: 11th International Trade Show and World Congress Workshop, May 8th to 11th.

Toft, R., Berme, N, 1980, "A biomechanical analysis of the joint of the thumb", *J. of Biomechanics*, Vol.13, pp.353-360.

Valero, F. J, 2000, "Applying Principles of Robotics to Understand the Biomechanics, Neuromuscular Control and Clinical Rehabilitation of Human Digits", IN: *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*. pp. 270–275.

MULTIVARIABLE CONTROL APPLIED IN A ROBOT ARTIFICIAL HAND

André Ribeiro Lins de Albuquerque

University of São Paulo – São Carlos Engineering School, alins@sc.usp.br

Marcio Aurélio Furtado Montezuma

Federal Center of Technological Education of Paraná, montezum@sc.usp.br

André Luis de Aguiar Mirandola

University of São Paulo – São Carlos Engineering School, mirandol@sc.usp.br

Glauco Augusto de Paula Caurin

University of São Paulo – São Carlos Engineering School, gcaurin@sc.usp.br

Eduardo Morgado Belo

University of São Paulo – São Carlos Engineering School, belo@sc.usp.br

Abstract. In this work the position control of the five fingers artificial robotic hand BRAHMA (Brazilian Anthropomorphic Hand) is investigated. To simulate the behavior of such a complex system, a dynamic linear model and a dynamic non-linear model both with 22 degrees of freedom were developed. The development of the BRAHMA equations of motion is presented in a detailed form. The multivariable control strategy was implemented using a state space representation through state feedback of BRAHMA's non-linear model. The control was tested imposing predefined movements to the BRAHMA and analyzing the answers with respect to desired position and velocity behavior.

Keywords: *modeling, hand prostheses, gripper, robotic, multivariable control.*