



## MODELAGEM E CONTROLE DE FORÇA E POSIÇÃO DE UMA GARRA DE ROBÔ COM TRÊS DEDOS

**Glauco Augusto de Paula Caurin**

Universidade de Mogi das Cruzes, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Cx. P. 411 – 08790-970 – Mogi das Cruzes, SP, Brasil

**Carlos Magno de Oliveira Valente**

**Alexandre Schammas**

Universidade de São Paulo – EESC, Departamento de Engenharia Mecânica  
Cx. P. 359 – 13560-250 – São Carlos, SP, Brasil

***Resumo.** Este trabalho apresenta o processo de modelagem e controle adotado para uma garra de robô com três dedos, com o objetivo de controlar simultaneamente a posição da peça fixada e a força de contato entre a peça e os dedos, bem como controlar as forças de contato entre as peças e uma base fixa num processo de montagem automatizado. No modelo plano adotado para representar o contato entre os três dedos da garra e a peça, assume-se que toda deformação ocorre na extremidade da garra. Outra característica cinemática do modelo adotado é a presença de cadeias cinemáticas fechadas. Para modelar este tipo de sistema, interpretamos o mecanismo como um conjunto de transformadores cinemáticos conectados entre si pelas relações entre as coordenadas independentes. Desta forma, cada cadeia cinemática fechada é representada por um transformador, cujas entradas são as coordenadas independentes em número igual ao número de graus de liberdade da cadeia; e as saídas são as demais coordenadas do sistema. No caso específico da garra analisada, demonstramos que três transformadores cinemáticos podem representar, com vantagens, este sistema. Testes implementados em simulações por computador demonstram a interferência do comportamento de um dedo sobre os demais.*

***Palavras-chave:** Robótica, Garras, Sistemas Multi-Corpos, Controle de força.*

### 1. INTRODUÇÃO

Para acompanhar as exigências dos processos de automação atuais, as tarefas de controle têm se tornado cada vez mais complexas, envolvendo cada vez mais efeitos dinâmicos e não-linearidades. O controle de uma garra acoplada a um manipulador é um bom exemplo de um sistema de controle de alta complexidade. As garras utilizadas em indústrias são tão especializadas e complexas que, em alguns casos, chegam a ser mais sofisticadas que o próprio manipulador que as carrega. Por serem especializadas, cada tarefa exige a utilização de uma garra diferente. Assim, num processo de múltiplas tarefas, perde-se tempo desnecessário com trocas de garras e espaço para armazenamento das mesmas (Pfeiffer,

1996). Além disto, a garra flexível alcança o mesmo grau de flexibilidade do manipulador, ou seja, necessita apenas de uma reprogramação quando submetida a uma nova tarefa, evitando ser descartada. Por esta razão, propomos, em nosso trabalho, a construção de uma garra flexível, com habilidade para trabalhar em diferentes processos.

A garra proposta foi implementada numa configuração de três dedos independentes e deverá ser capaz de fixar objetos de formatos arbitrários, em processos de montagem, desmontagem, transporte e manipulação em geral. Para atender a estas exigências, o projeto foi dividido em dois subprojetos: planejamento da fixação e controle de força e posição. O primeiro subprojeto é responsável por definir os pontos onde o contato será estabelecido e também os esforços aplicados por cada dedo, de maneira a garantir a estabilidade da fixação. Já a segunda parte deverá garantir que a fixação planejada seja executada. Também é função deste último subprojeto evitar escorregamentos entre a peça e a garra.

Neste trabalho, serão tratados apenas os aspectos referentes ao controle de força aplicado pelos dedos. Em muitas aplicações de montagem, a necessidade de controle da força de contato com uma superfície externa dificulta a modelagem do sistema, não permitindo que a hipótese simplificadora de um sistema articulado formado por membros e juntas rígidas seja assumida (Griffis & Duffy, 1991). Ainda, a introdução de elasticidade no modelo do robô aumenta a complexidade do mesmo, dificultando a sua utilização em tempo real.

Apresentamos um modelo de contato que aproxima o comportamento do sistema quando em contato com superfícies, realizando também a manutenção e comando dos esforços estabelecidos no processo.

O trabalho está organizado da seguinte maneira. Na Seção 2, apresentamos a plataforma experimental utilizada para implementação do sistema. Na Seção 3, o sistema formado pela garra de três dedos em contato com uma peça é modelado, levando-se em consideração a elasticidade do contato. A seguir, Seção 4 propõe um algoritmo para controle de força utilizando o Método da Impedância e apresentamos os resultados.

## 2. A PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Na Fig.1, apresentamos, de maneira resumida, a forma de operação da garra para manipular objetos desconhecidos. Valente *et al.* (1999) decompõe o sistema em três etapas sequenciais básicas:

- processamento de imagem,
- planejamento da configuração dos pontos de contato e
- controle das forças aplicadas pelos dedos.

Foram implementados algoritmos de processamento suficientemente rápidos para garantir a aplicação *on-line* deste sistema. Assim, o processamento de imagem utiliza o algoritmo do vizinho mais próximo (Schalkoff, 1989) para extrair cinquenta pontos que definem o contorno do objeto, considerando a imagem de topo fornecida pelo sistema de visão. Estes dados são utilizados como entrada para a etapa de planejamento do contato, baseada em redes neurais. Nesta etapa, um pré-processamento define um polígono aproximado sobre os pontos do contorno, utilizando uma rede neural Competitiva de Hopfield (Chung *et al.*, 1994; Araújo & Tanaka, 1995). Tal processamento simplifica a análise e facilita o treinamento da próxima etapa neural. Desta forma, a seqüência de operação do sistema prossegue com uma rede RBF (*Radial Basis Functions*) treinada pelo algoritmo *Global Ridge Regression* (Orr, 1998), que define os três pontos de contato entre a garra e a peça. Os resultados deste sistema demonstram sua habilidade de calcular pontos estáveis de contato, mesmo para objetos de formato bem

mais complexo do que as simples formas geométricas utilizadas como conjunto de treinamento.

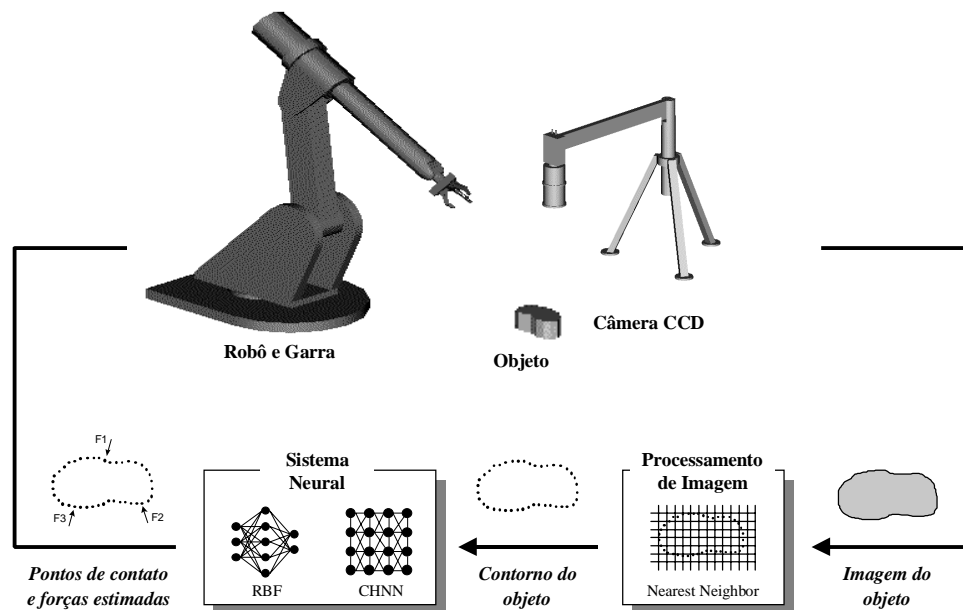


Figura 1 - Diagrama mostrando a seqüência de operação do sistema de manipulação. A imagem do objeto é capturada pela câmera CCD. Esta imagem é processada em um conjunto finito de pontos que definem o contorno do objeto. Este conjunto é fornecido ao sistema neural, que calcula os três pontos de fixação da garra.

A plataforma experimental é constituída por um robô ABB, uma câmera CCD Hitashi Denshi, uma placa Creative Labs de aquisição de imagens e uma garra construída em nosso laboratório. A garra é acionada por servo-motores Maxon de corrente contínua. Cada motor está acoplado a um *encoder* HP de 500 ppv e a um redutor planetário com relação de transmissão de 156:1. Esta configuração permite, à garra, executar movimentos precisos, o que é muito útil para o controle de força. Os drivers dos motores estão conectados a um barramento VME. Todos os processos são executados numa placa de processamento Motorola MVME 162 (*target*), utilizando o ambiente de programação em tempo real XOberon.

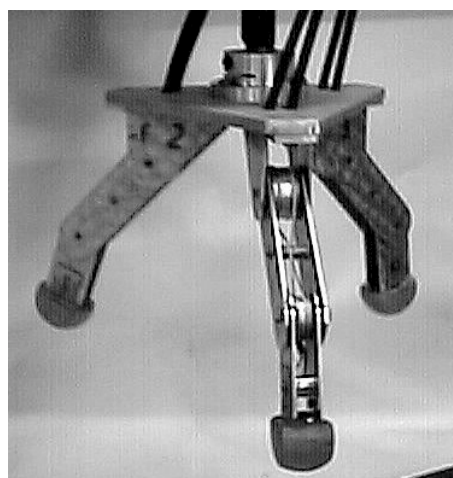


Figura 2 - A configuração da garra, composta por três partes: uma base de fixação e duas falanges.

A configuração da garra (Fig. 2) envolve três dedos com dois graus de liberdade cada, sendo cada dedo acionado por apenas um atuador. Tal acionamento de duas articulações por apenas um atuador é viabilizado por uma montagem especial de dois cabos de transmissão (tendões): um responsável pela abertura da garra e outro pelo fechamento. Um sistema de polias conduz os tendões pela estrutura do dedo. A estrutura do dedo é composta por três partes: uma base de fixação e duas falanges, todas construídas a partir de chapas de alumínio de 1,5 mm de espessura. O mecanismo resultante é leve, fácil de montar e libera o espaço interno para a montagem do sistema de tendões. A modelagem matemática deste mecanismo é apresentada na próxima seção.

### 3. MODELAGEM DO CONTATO

Assumimos um modelo simplificado para o contato entre os três dedos da garra e a peça, utilizando, como exemplo, uma peça retangular como ilustra a Fig. 1. Assume-se, também, que toda a deformação ocorre na extremidade da garra (elasticidade se deve principalmente a pequenas semi-esferas de borracha introduzidas nas pontas dos dedos). Na base de cada dedo são definidos pontos de referências A, B e C.

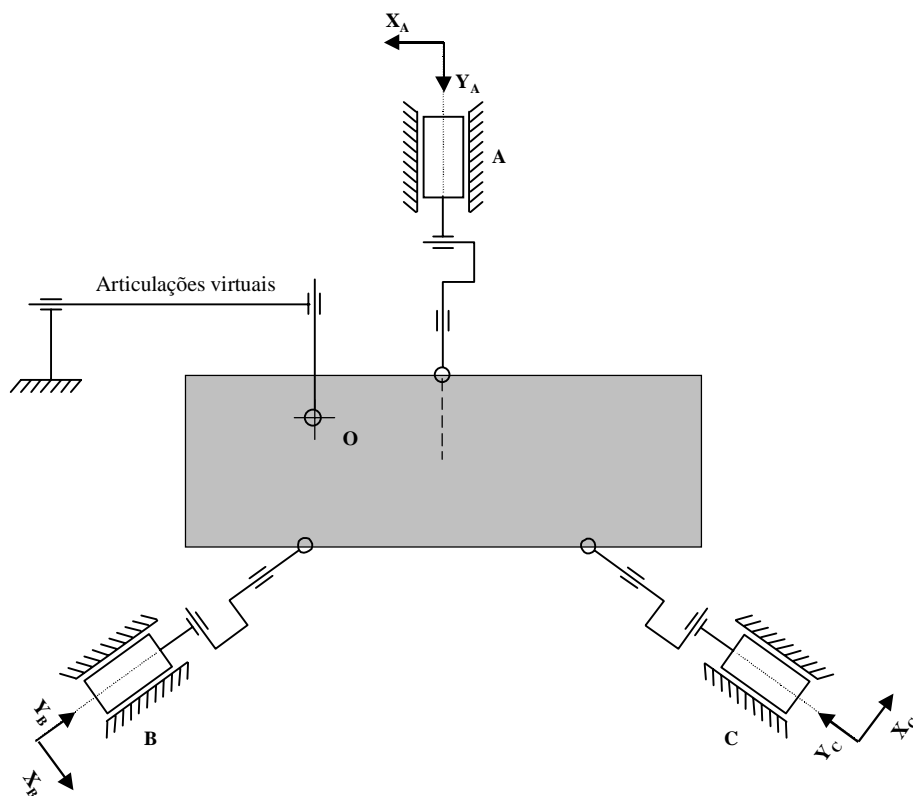


Figura 3 - Modelo adotado para representar o contato entre os três dedos da garra e uma peça retangular.

A distância entre a base e o ponto de contato (sem considerar as deformações), são definidos respectivamente por  $l_A$ ,  $l_B$  e  $l_C$  (Fig. 4). Um sistema de articulações virtual (Hiller, 1990) com três graus de liberdade é adicionada ao modelo, e tem a função de facilitar o cálculo da posição e atitude da peça no plano, uma vez que suas coordenadas representam estas grandezas.

A flexibilidade na extremidade de cada dedo A, B e C da garra é modelada definindo-se articulações que permitem a existência de movimentos numa determinada direção, e introduzido-se, em cada articulação, um conjunto mola-amortecedor capaz de reproduzir o comportamento elástico do material.

É importante mencionar que modelamos o sistema peça-garra como um único mecanismo. Ao analisarmos a Fig. 3, uma característica cinemática importante a observar é a presença de *loops* ou cadeias cinemáticas fechadas. Para modelar este tipo de sistema de maneira apropriada, utilizamos um tratamento proposto por (Kecskeméthy, 1993), que consiste na interpretação do mecanismo em um conjunto de transformadores conectados entre si. Neste tratamento, cada *loop* cinemático é representado por um único transformador.

Pelo critério de Grübler (Eq. 1), observamos que o mecanismo apresenta um número total de graus de liberdade  $f$  igual a 6 (seis):

$$\begin{aligned} f &= \sum f_i - 3(n_a - n_c) = 6 \\ f &= 15 - 3(7 - 4) = 6 \end{aligned} \quad (1)$$

$f_i \Rightarrow$  número graus de liberdade na articulação  $i \in \{0, \dots, n_a\}$

$n_a \Rightarrow$  número de articulações

$n_c \Rightarrow$  número de corpos rígidos

Da diferença  $(n_a - n_c)$ , estabelecemos que o mecanismo apresenta 3 *loops* cinemáticos fechados. Utilizando o mesmo critério já adotado para o mecanismo como um todo, podemos observar que cada *loop* apresenta 4 graus de liberdade:

$$f = 7 - 3(4 - 3) = 4 \text{ graus de liberdade de liberdade.} \quad (2)$$

Analisamos os 3 *loops* como transformadores isolados. Cada unidade será representada, matematicamente, considerando-se as condições de contorno para a coerência geométrica do fechamento do *loop*. Para isto, adotaremos uma forma de análise um pouco diferente da proposta original de Kecskeméthy. No tratamento apresentado neste trabalho, são impostas condições de fechamento correspondendo à geometria do contato. Através das projeções destas condições em eixos do sistema de coordenadas, são efetuadas as análises necessárias.

As condições de fechamento do contato entre o dedo A e a peça são ilustradas na Fig. 4 e podem ser representadas pela seguinte relação:

$$\underline{l}_A + \underline{u}_A + \underline{d}_A - \underline{s} + \underline{AO} = 0 \quad (3)$$

$\underline{l}_A \Rightarrow$  vetor ligando a base do dedo A ao ponto de contato com a peça (sem considerar as deformação);

$\underline{u}_A \Rightarrow$  vetor das deformações elásticas no contato;

$\underline{d}_A \Rightarrow$  vetor ligando o ponto onde o contato foi estabelecido inicialmente a posição atual do CG da peça;

$\underline{s} \Rightarrow$  vetor ligando a posição inicial do CG a sua posição atual;

$\underline{AO} \Rightarrow$  vetor ligando a posição inicial do CG a base do dedo.

A projeção desta relação nos eixos  $x$  e  $y$  do sistema de coordenadas A permite definir as coordenadas de deformações  $\underline{u}_A$  nestas direções. Estas coordenadas correspondem, exatamente, aos deslocamento das juntas introduzidas no modelo da Fig. 3. Além disto, a Eq. 3 permite expressar  $\underline{u}_A$  em função da posição do CG, da sua orientação e das coordenadas dos dedos.

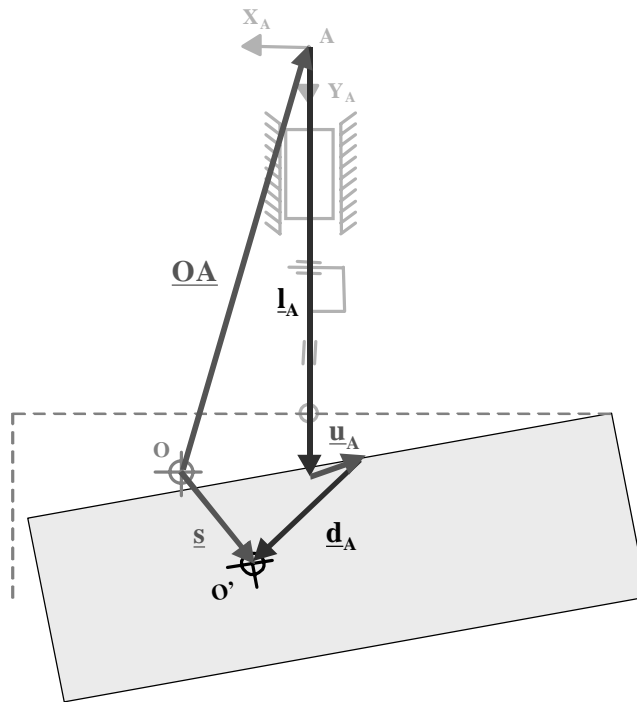


Figura 4 - Efeito de um deslocamento da posição da peça em um dos *loops* cinemáticos. A peça retangular foi movida de uma posição original (figura pontilhada) para uma segunda posição (figura cinza).

De forma análoga, são definidas relações para os outros três dedos, e assim obtemos:

$$l_B + u_B + d_B - s + \underline{BQ} = 0 \quad (4)$$

$$l_C + u_C + d_C - s + \underline{CQ} = 0 \quad (5)$$

É importante mencionar que cada uma destas relações está representada num sistema de coordenadas distintos. Assim, um cuidado especial deve ser tomado ao substituir os valores numéricos de  $s$  em cada expressão.

Como já mencionamos, a topologia do mecanismo pode ser representada através do conjunto de transformadores cinemáticos (Fig. 5). Como cada transformador tem 4 graus de liberdade, este exige sempre 4 grandezas independentes de entrada. O vetor  $s$  é representado, neste diagrama, por duas componentes  $X_{CG}$  e  $Y_{CG}$ . O mesmo acontecendo com o vetor  $u_A$ .

A introdução de um sentido às linhas que conectam os transformadores representa a adoção de um fluxo de solução para as expressões cinemáticas. No entanto, a escolha das grandezas de entrada e saída depende do processo que está sendo realizado. Para a simulação do mecanismo em computador, adotamos o fluxo da Fig 6A. Neste caso, partindo-se das posições  $l_i$  ( $i = A, B, C$ ) impostas aos dedos e das posições  $X_{CG}$  e  $Y_{CG}$  e atitude  $\theta_{CG}$  sucessivas do CG (entradas), os transformadores cinemáticos são utilizados para calcular os valores das deformações  $u_i$  nos contatos (saídas). De forma oposta, para controle do dedo, o fluxo de cálculo se inverte. Assim, na saída, temos os valores  $l_A$ ,  $l_B$  e  $l_C$  das posições dos dedos que implicam numa combinação de deformações desejadas (entradas). Um dos possíveis fluxos a se adotar neste caso é ilustrado na Fig. 6B.

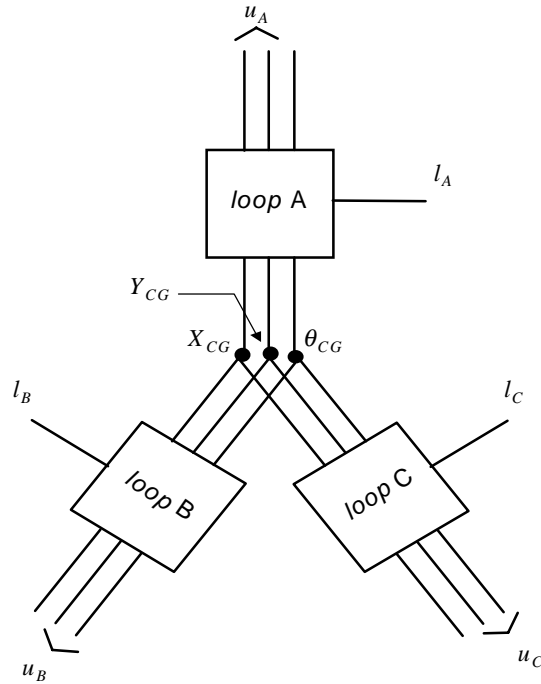


Figura 5 - Representação da cinemática do sistema peça-garra através de transformadores cinemáticos. O esquema ilustra, exclusivamente, a cinemática relativa de posições. Um esquema análogo pode ser utilizado para representar as relações entre velocidades e acelerações.

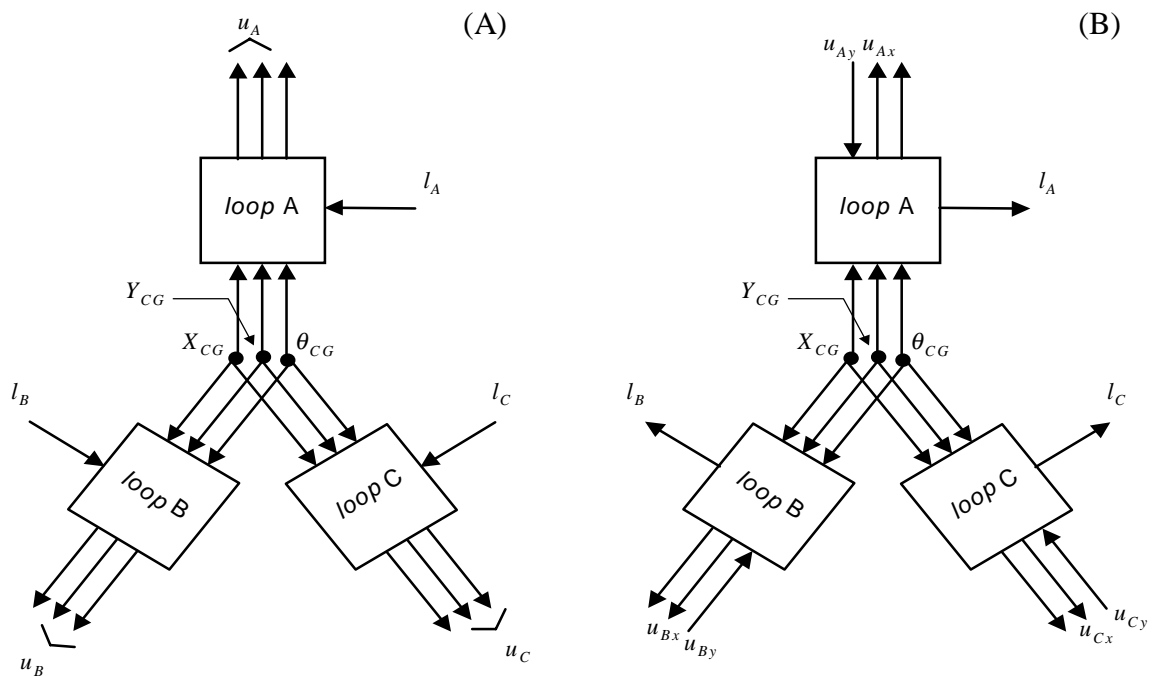


Figura 6 - Fluxo de solução adotado para dois processos diferentes, sendo que as setas indicam as entradas e saídas dos transformadores. (A) fluxo de solução para simulações em computador; (B) fluxo de solução adotado para utilização do modelo no comando/controlado do sistema.

#### 4. SIMULAÇÃO E CONTROLE

Existem diferentes propostas para o controle de força em garras de robôs. O método a ser utilizado depende fortemente do modelo adotado. Neste trabalho, utilizaremos o método da Impedância (Koivo, 1989), no qual o controle de posição/velocidade é feito em cascata como podemos observar na Fig. 7. Outros testes estão sendo realizados, utilizando o controle cinestático (Romdhane & Duffy, 1990; Griffis & Duffy, 1991).

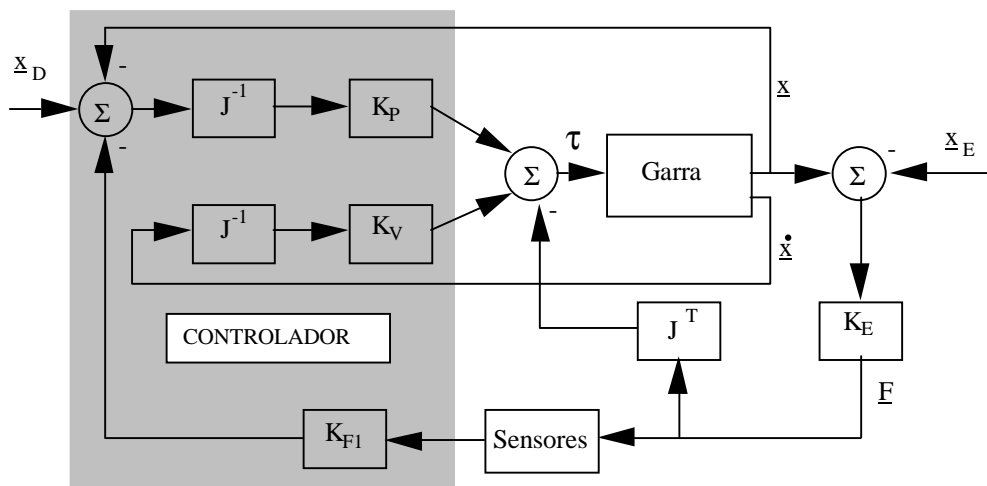


Figura 7 - Arquitetura do controle simultâneo de força e posição, utilizando o Método de Impedância.

Após implementado, o controlador foi exposto a testes, nos quais todos os dedos foram submetidos a uma variação degrau de 10 N aplicada a uma pré-tensão já existente. Os resultados podem ser observados nos gráficos da Fig. 8. É importante observar que a entrada degrau, não influencia apenas o dedo onde o distúrbio é aplicado diretamente, mas também influencia os contatos dos outros dedos. Nas curvas apresentadas na Fig. 8, observamos o comportamento da força de contato nos dedos A e B (curvas contínuas) quando variamos o comando de força em 10N. O comportamento do dedo C é muito semelhante ao do dedo B devido à simetria da peça.

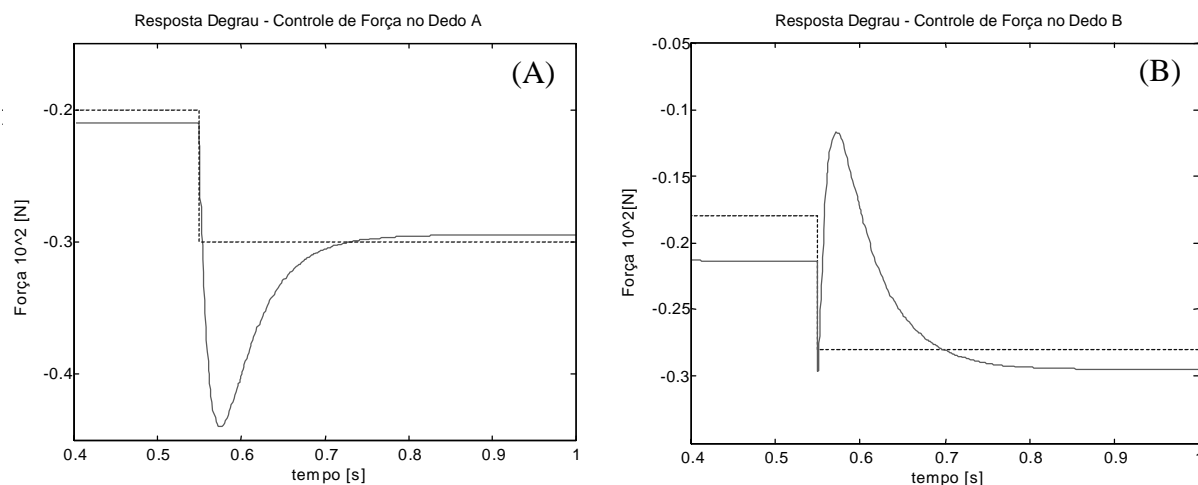


Figura 8 - Influência de uma variação de 10 N aplicada ao comando do dedo A e do dedo B.



É importante, também, observar o comportamento das coordenadas  $l_A$ ,  $l_B$  e  $l_C$ , que representam o acionamento dos respectivos dedos. A Fig. 9 ilustra o movimento de acionamento do dedo A em função do tempo (vide também coordenada  $l_A$  na Fig. 4), para o mesmo teste de controle dos diagramas anteriores.

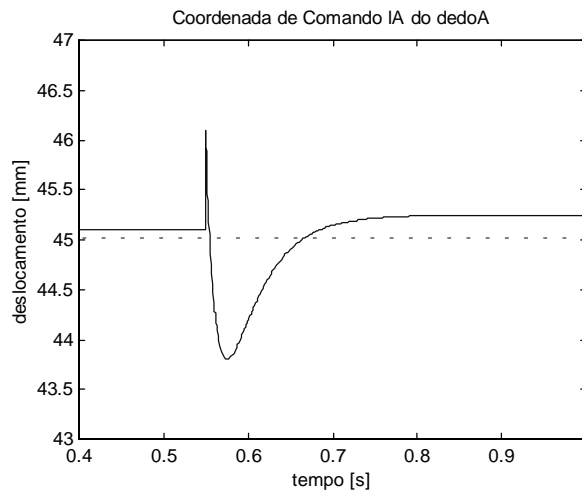


Figura 9 - Comportamento da grandeza  $l_A$  em função do tempo. Este gráfico representando o comportamento do dedo A sem levar em consideração as deformações no contato.

A pequena variação no valor de  $l_A$  (após 0,7 s) corresponde à variação de deformação desejada e a resposta é suficientemente rápida para atender às exigências da tarefa de controle proposta.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta um procedimento para modelar cadeias cinemáticas fechadas que se estabelecem quando uma garra fixa uma peça de formato geométrico conhecido. A partir deste modelo, um sistema de controle baseado no Método da Impedância foi implementado para o controle dos esforços no contato.

Dos resultados obtidos, podemos observar que ainda se faz necessária uma melhora de desempenho do sistema quanto à acuracidade e ao sobre-sinal das forças aplicadas. No exemplo exposto, é possível observar desvios indesejáveis de até 0,5 N. Por outro lado, nota-se, também, que sistema proposto já consegue atender ao objetivo de controle simultâneo das forças de contato nos dedos, apresentando um comportamento dinâmica estável e suave.

### *Agradecimentos*

Esta pesquisa é financiada pela Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, Brasil.

## REFERÊNCIAS

- Araújo, A. F. R., Tanaka, J. S., 1995, Variação de um modelo de rede neural Competitiva de Hopfield para aproximação poligonal. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Simpósio Brasileiro de Redes Neurais, October 18-20, São Carlos, Brazil, pp.193-198.
- Chung, P. C. *et al.*, 1994, Polygonal approximation using a Competitive Hopfield neural network, Pattern Recognition, vol.27, n.11, pp.1505-1512.

- Griffis, M. & Duffy, J., 1991, Kinestatic Control: A Novel Theory for Simultaneously Regulating Force and Displacement, ASME Journal of Mechanical Design, vol.103, Dec.
- Hiller, M., 1990, Kinematical Control of a Combined Wheeled and Legged Vehicle RoboTRAC, Proceedings of the 8<sup>th</sup> CISM-IFTOMM Symposium ROM.MAN.SY, July, Cracow, Poland.
- Kecsckeméthy, A., 1993, Objektorientierte Modellierung der Dynamik von Mehrkörpersystemen mit Hilfe von Übertragungselementen, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20 Nr. 88, VDI Verlag.
- Koivo, A. J., 1989, Fundamentals for control of Robotic Manipulator, John Wiley & Sons Inc, New York.
- Orr, M. J., 1998, Optimising the widths of Radial Basis Functions, Proceedings of the 5<sup>th</sup> Simpósio Brasileiro de Redes Neurais, December 9-11, Belo Horizonte, Brazil, pp.26-29.
- Pfeiffer, F., 1996, Grasping with Hydraulic Fingers - An example of Mechatronics, IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, vol.1, n.2, pp.158-167.
- Romdhane, L; Duffy, J., 1990, Kinestatic Analysis of Multifingered Hands, The International Journal of Robotics Research, vol.9, n.6, pp.3-18.
- Schalkoff, R. J., 1989, Digital Image Processing and Computer Vision, John Wiley & Sons Inc, New York.
- Valente, C. M. O. *et al.* (1999) The Role of the RBF Training in a Neural Model for Object Grasping, Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and System, October 17-21, Kyongju, Korea (in press).

## MODELLING AND CONTROL OF A THREE-FINGERED GRIPPER

**Abstract.** *This paper presents the modeling and control of an three-fingered gripper, with the aim of simultaneously controlling the position of grasped object and the contact forces between the object and the fingers, as well as controlling the contact forces between the objects and a fixed base in the assembly process. In our planar model, for representing the contact between the three fingers and the object, it is assumed that every deformation occurs in the finger tips. Other model kinematics characteristics is the presence of closed kinematic loop. For modeling this type of system, the mechanism is interpreted as a kinematic transformer set connected themselves by the relationship of independent coordinates. Therefore, each closed kinematic loop is represented by a transformer, whose inputs are the independent coordinates in equal number of degrees of freedom of loop; and the outputs are the further system coordinates. In our case, we demonstrate that three kinematic transformers can represent this system with advantages. Simulation tests show the interference of one finger behavior over the others.*

**Keywords:** *Robotics, Grippers, Multibody Systems, Force control.*