



ANÁLISE CINESTÁTICA DE UMA GARRA ANTROPOMÓRFICA DE TRÊS DEDOS UTILIZANDO A TEORIA HELICOIDAL

Paulo Marcos de Aguiar

Universidade de São Paulo – EESC – Av. Trabalhador São Carlense,400 CEP 13566-590 – São Carlos – SP. pmaguiar@sc.usp.br

Glauco Augusto de Paula Caurin

Universidade de São Paulo – EESC – Av. Trabalhador São Carlense,400 CEP 13566-590 – São Carlos – SP. gcaurin@sc.usp.br

Mirian Pérsia Mendes

Universidade de São Paulo – SMA-ICMC - Av. Trabalhador São Carlense,400 CEP 13566-590 – São Carlos – SP. mpmendes@icmc.sc.usp.br

Resumo. É apresentada uma análise cinestática da GAUSP (Garra Antropomórfica da Universidade de São Paulo), garra antropomórfica para robôs. Para que seja feita uma boa aproximação devem ser levados em consideração a variação no tempo das forças e velocidades generalizada; a geometria e elasticidade da garra, a geometria do objeto e o tipo de contato entre o objeto e os dedos da garra. Através da análise cinestática é possível levar todos estes fatores em consideração além da influência que cada dedo exerce no sistema de manipulação. A teoria helicoidal será utilizada para esta análise, que permite trabalhar no espaço vetorial de dimensão seis, mas com os resultados representados no espaço Euclidiano tridimensional. Assim é possível trabalhar com vetores de deslocamentos generalizados e forças generalizadas, ambos de dimensão seis. Um problema prático é simulado em computador para teste e validação das aproximações cinestáticas realizadas. Este teste consiste no controle simultâneo da força e posição de uma garra antropomórfica com três dedos (GAUSP) e nove graus de liberdade (três por dedo) pegando um objeto. O controlador executa sua tarefa utilizando uma única matriz de controle. Os resultados obtidos da simulação são apresentados e discutidos.

Palavras chave: garras robóticas, controle de força e posição, manipulador, teoria helicoidal.

1. INTRODUÇÃO.

Este trabalho é motivado pela crescente demanda por robôs que trabalham de forma cooperativa, i.e. com a capacidade de interagir com outras máquinas de forma inteligente. Programar robôs muitas vezes se torna uma tarefa árdua pela falta de flexibilidade de determinadas partes do robô, como os órgãos terminais, que não vêm tendo uma evolução de acordo com o restante do sistema robótico como por exemplo, os braços manipuladores Liegeois (2000). Uma tendência que vem se fortalecendo é o surgimento de algoritmos robóticos que funcionam de forma parecida aos computacionais porém com o objetivo de tornar o robô apto a executar vários tipos de tarefas, como ocorre hoje com os computadores. Assim há a necessidade de que os robôs sejam flexíveis e uma das principais partes que deve ter esta flexibilidade são as garras; que fazem o papel de interface entre o robô e o meio. Quando se fala em garras com o fim de executar vários tipos de tarefas fica

claro que esta deve ter a capacidade de pegar e manipular objetos. Esta capacidade implica em várias condições como o tipo de contato Fig.(3) entre o dedo e o objeto, a influência de cada dedo no sistema, a reorientação destes dedos e a correção de forças aplicadas. Para que estas características possam ser levadas em conta, uma boa análise cinestática do sistema deve ser elaborada e para tanto a teoria helicoidal (*screw theory*) foi escolhida para as aproximações neste trabalho, como vem sendo utilizada em outros como o de Duffy & Romdhane (1990). Através das forças generalizadas, que são intrínsecas quando se usa a teoria helicoidal, monta-se a matriz W das forças generalizadas a qual será utilizada para se construir a matriz de transformação da pega G , Salisbury, J.K. (1982). Para a validação das aproximações foram feitas simulações computacionais de um controlador simultâneo de força e posição utilizando-se a matriz G obtida das análises cinestáticas do sistema. Estas simulações foram implementadas através do programa ADAMS (usado para construir o modelo da garra e visualizar as simulações) e o Matlab/Simulink (usado para a integração numérica da simulação e realização das análises). O protótipo da GAUSP Fig. (1) desenvolvido pelo Laboratório de Mecatrônica da USP possui três dedos com três graus de liberdade cada um, totalizando nove graus de liberdade na garra. Os dedos são atuados por cabos, e uma câmara CCD é utilizada para captura da imagem do objeto a ser fixado Fig. (2). A imagem é processada utilizando redes neurais artificiais e os três melhores pontos para se fixar o objeto são definidos Valente (1999).



Figura 1 – Protótipo da GAUSP

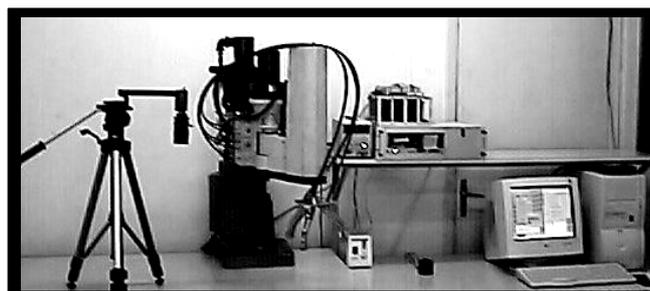


Figura 2 – Conjunto Para Teste da Garra

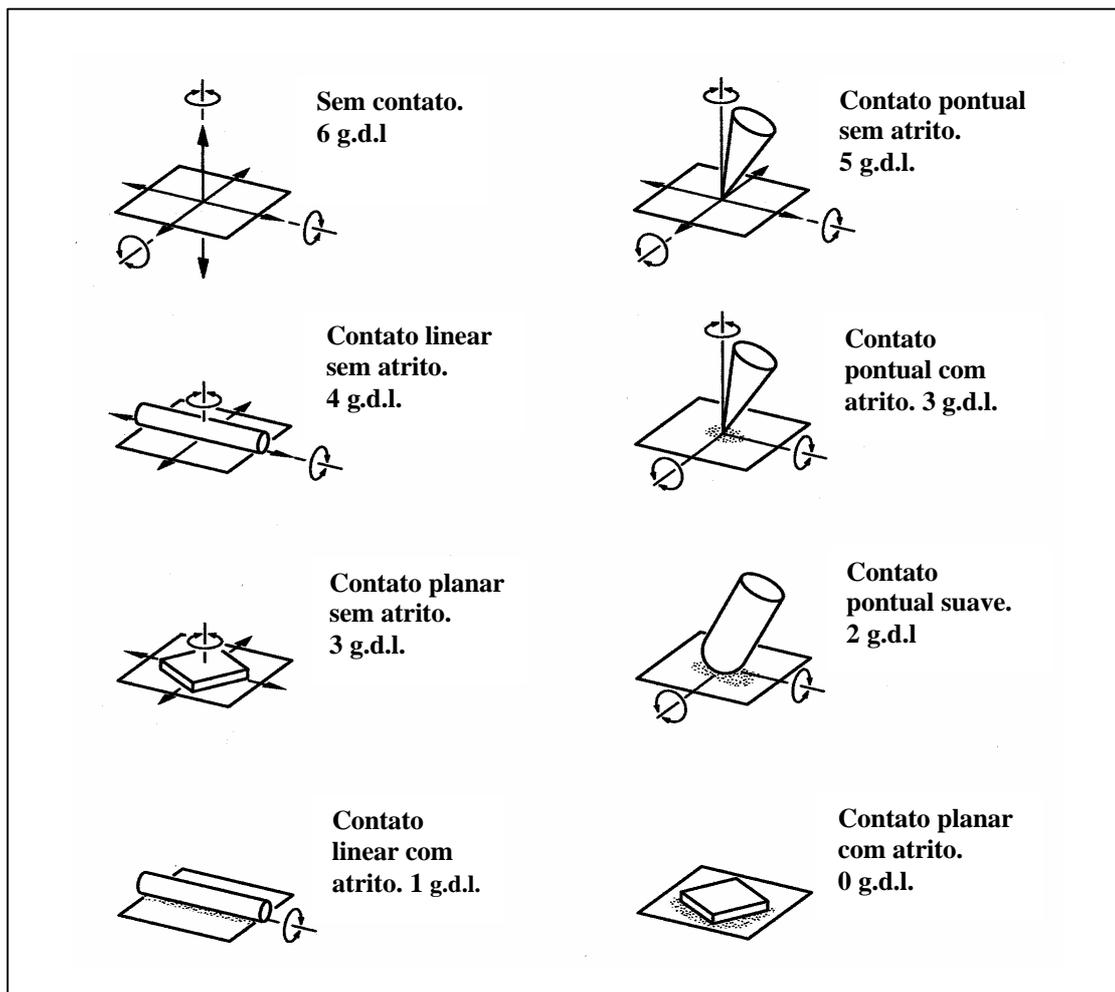


Figura -3 - Modelos de Contato.

2. TEORIA HELICOIDAL

A teoria helicoidal (*screw theory*), Phillips (1984) e Ball (1900), começou a ser concebida em 1800 com estudos de Chasles e Poinot. Ela surgiu da necessidade de se entender os movimentos de corpos rígidos, de translação e rotação, do ponto de vista geométrico. O teorema de Chasles diz que um corpo rígido pode se mover de uma posição à outra através de um movimento constituído de uma rotação sobre uma reta, que é chamada de eixo, seguida de uma translação paralela a essa mesma reta. Um movimento de corpo rígido, que é uma combinação de uma rotação com uma translação, é conhecido como movimento generalizado. O movimento descrito por Chasles é do tipo helicoidal e portanto denomina-se movimento helicoidal. A versão infinitesimal de um movimento helicoidal fornece uma descrição da velocidade instantânea de um corpo rígido em termos de suas componentes linear e angular. Poinot enunciou que todo sistema de forças aplicado à um corpo rígido pode ser substituído por uma única força aplicada sobre uma reta, seguido de um torque aplicado sobre esta mesma reta. O movimento helicoidal leva aos conceitos chamados de força generalizada, representada por um par $\omega = (\text{força}, \text{momento})$; e de velocidade generalizada associada a esse par, representada por um par $\xi = (\text{velocidade linear}, \text{velocidade angular})$. Embora concebida na época mencionada acima, essa teoria só foi realmente formalizada em 1900 por Ball, R. S. Matematicamente, essa formalização se dá com o uso da Álgebra Linear e Grupos de Matrizes e, mais abstratamente, pelo uso dos Grupos de Lie e Álgebras de Lie. Emprega-se de maneira

essencial (como ferramentas fundamentais) as coordenadas homogêneas, para representar os movimentos rígidos, e a matriz exponencial, que a cada velocidade generalizada associa um movimento helicoidal. Para cada tipo de contato entre corpos rígidos estão associados dois conjuntos de retas: um sobre o qual podem ser exercidas forças generalizadas, e um outro sobre o qual podem ser exercidas as velocidades generalizadas. Estes dois conjuntos de retas são duais no sentido em que ao se obter um deles obtém-se automaticamente o outro. Isso pode ser visto na análise do contato pontual com atrito ilustrado na fig. (4).

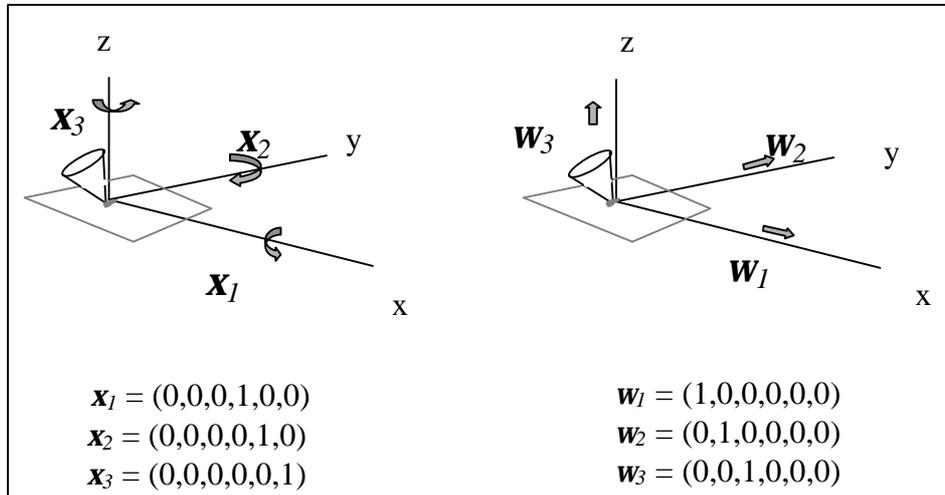


Figura. 4 – Contato Pontual com Atrito

Na figura acima as velocidades generalizadas e as forças generalizadas são oriundas do tipo de contato. Nota-se que tanto os vetores de força generalizadas quanto os de velocidades generalizadas possuem 6 coordenadas, representando as forças aplicadas no objeto e os momentos e as velocidades lineares e angulares, respectivamente. Todo movimento de corpo rígido pode ser escrito como a exponencial de alguma velocidade generalizada. Assim tem-se o helicóide e o movimento helicoidal. Um helicóide (*screw*) S é uma terna (l, h, M) constituída por um eixo l , um passo h e uma amplitude M . Um movimento helicoidal é uma rotação de uma quantia $\theta = M$ sobre o eixo l seguida de uma translação de uma quantia $h\theta$ paralela a esse eixo l . Quando $h = \infty$ então o movimento helicoidal correspondente, consiste de uma translação pura ao longo do eixo do helicóide de uma distância M . O passo do helicóide é a razão da translação pela rotação quando é assumido $\theta \neq 0$. O helicóide é representado por um vetor de dimensão 6, $S = (S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6)$ conhecido como coordenadas helicoidais.

O eixo l do helicóide é :

$$l = \left\{ \frac{(S_1, S_2, S_3) \times (S_4, S_5, S_6)}{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} \right\} + I(S_1, S_2, S_3) : I \in \mathbf{R} \quad (1)$$

O passo h do helicóide é :

$$h = \frac{S_1 S_4 + S_2 S_5 + S_3 S_6}{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} \quad (2)$$

A amplitude do helicóide é:

$$M = \begin{cases} \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} & , \text{ se } h < \infty; \\ \sqrt{S_4^2 + S_5^2 + S_6^2} & , \text{ se } h = \infty. \end{cases} \quad (3)$$

3. EQUILÍBRIO DE FORÇAS

Há certas formas de contato e forças de atrito que podem ser aplicadas a um objeto completamente restrito, sem que o equilíbrio seja perdido. Através da aproximação algébrica é possível identificar estas *forças internas* que permitem avaliar se uma determinada pega irá restringir completamente o objeto ou não. A aproximação geométrica fornece a visualização destas forças internas e é recomendada apenas para casos mais simples. Neste trabalho será desenvolvida somente a aproximação algébrica.

3.1. Aproximação Algébrica

Assume-se que n forças generalizadas atuam sobre o objeto, dos quais p tem sentido único e portanto $n-p$ são bidirecionais podendo atuar no sentido positivo ou negativo. Monta-se então a matriz das forças generalizadas, W , que será da forma $(6 \times n)$. Nas p primeiras colunas tem-se os vetores de único sentido representando os forças generalizadas em coordenadas helicoidais:

$$W = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_p, \omega_{p+1}, \dots, \omega_n] \quad (4)$$

Para aplicar ao objeto um conjunto de forças generalizadas que resista as forças externas que atuam sobre ele, como força peso e forças que surjam do encontro do objeto com obstáculos do meio, é necessário encontrar o vetor das intensidades das forças generalizadas, \underline{c} , que satisfaça :

$$W \underline{c} = \omega \quad (5)$$

onde o vetor ω representa as intensidades das forças externas. Os primeiros p elementos de \underline{c} devem ser positivos pois são os coeficientes dos elementos da matriz W que têm sentido único (forças internas).

Se $n = 6$ e W tem posto 6, então $\underline{c} = W^{-1} \omega$. Devemos ter ao menos 7 forças generalizadas aplicados sobre o objeto para conseguirmos restringi-lo completamente, Lakshmirarayana,K.(1978). No caso de $n = 7$ teremos a seguinte solução para a equação 5:

$$\underline{c} = \underline{c}_p + \lambda \underline{c}_h \quad (6)$$

onde :

\underline{c}_p = é a solução particular da equação 6

\underline{c}_h = é a solução homogênea para a equação 6

λ = é uma variável livre arbitrária, que determina a magnitude da força interna.

Segundo Lakshiminarayana (1978), se todos os λ_{c_h} são positivos para qualquer valor de \underline{c}_p , pode-se encontrar um vasto número de λ que deixarão todos os elementos de \underline{c} positivos satisfazendo a equação 6.

4. MATRIZ DE TRANSFORMAÇÃO G

Quando ocorre a pega de um objeto por uma garra observa-se a formação de cadeias fechadas avaliando-se em termos da cinemática. Já em termos da estática nota-se o surgimento de forças externas e internas, que são definidas ao longo do texto. Para trabalhar-se num sistema destes torna-se interessante, então, um estudo cinestático (estático e movimento instantâneo). A matriz de transformação G, Salisbury (1982), permitirá o trabalho num universo cinestático e a obtenção das 4 relações básicas necessárias para o sensoriamento e controle na manipulação de corpos por garras antropomórficas. G é uma matriz quadrada de posto e dimensão iguais ao número das n forças generalizadas principais que são aplicadas sobre o corpo. Esta matriz, em uma primeira fase, é definida pelo tipo de contato que temos entre o corpo e os dedos que atuam no corpo, e portanto só precisa ser recalculada caso o tipo de contato seja alterado. Assim pode-se dizer que a matriz G é constante para determinada pega. As *forças generalizadas que atuam sobre o corpo* serão representadas por F. No caso de manipulação por garras, cadeia fechada, F incluirá o conjunto de forças generalizadas que atuam sobre o corpo e as intensidades *das forças internas*, conjunto de forças que ao serem aplicadas no objeto levam a resultante nula. Da mesma forma V será utilizado para representar as *velocidades generalizadas do corpo*. Para uma cadeia fechada além do conjunto de velocidades generalizadas contará também as intensidades das velocidades internas. A função da matriz G pode ser entendida comparando-a com a matriz Jacobiana, J. A matriz G está para a manipulação em cadeia fechada assim como a J está para a manipulação em cadeia aberta.

4.1. Construção da Matriz G

Devido as forças serem exercidas sobre o corpo por juntas paralelas, as projeções para encontrar os elementos de G, geometricamente, terão a forma inversa, deste modo é obtido inicialmente G^{-T} e G^{-1} , e para chegar-se a G^T e G aplica-se a matriz de inversão. Para montar a matriz G^{-T} é necessário primeiramente, montar a matriz W, Eq. (4), e fazer uma análise conforme descrita no item anterior no intuito de garantir a plena restrição do corpo. Isto requer que o posto da matriz seja 6 e que os primeiros p elementos de \underline{c} , correspondentes as forças generalizadas de contato de sentido único, possam ser arbitradas positivas. Então tem-se que a matriz G^{-T} é formada pelos argumentos (6 x n) da matriz W e pelos (n - 6) n-elementos, vetores base, da solução homogênea.

$$G^{-T} = \begin{bmatrix} W \\ \hline \underline{c}_{1,h}^T \\ \cdot \\ \cdot \\ \underline{c}_{n-6,h}^T \end{bmatrix} \quad (7)$$

A matriz G^{-T} será quadrada, e assumindo que os (n - 6) $c_{i,h}$ são linearmente independentes e preenchem o espaço nulo (n - 6) de W, G^{-T} será também inversível.

4.2 Análise de Forças Externas e Internas

Define-se força generalizada como :

$$\underline{F} = [f_x, f_y, f_z, m_x, m_y, m_z, \lambda_1, \dots, \lambda_{n-6}]^T \quad (8)$$

Onde, os primeiros 6 elementos representam as forças generalizadas que são aplicadas sobre o corpo, forças externas, e os $n - 6$ restantes representam a magnitude das forças internas. Sendo \underline{F} definido como um vetor das intensidades das forças generalizadas de contato para um contato de n forças generalizadas, então :

$$\underline{F} = G^T \underline{F} \quad (9)$$

$$\underline{F} = [c_1, \dots, c_n]^T \quad (10)$$

$$\underline{F} = G^T \underline{F} \quad (11)$$

5. CONTROLADOR

Para a validação dos estudos cinestáticos aqui apresentados, foi desenvolvido um controlador simultâneo de força e posição baseado na matriz G , Aguiar (2001). Estes estudos foram realizados através da teoria helicoidal e sintetizados na matriz de transformação G ; matriz que contém informações da posição dos dedos, do tipo de contato, das forças e deslocamentos e também da rigidez durante o processo de pega; relacionando o efeito que cada dedo exerce no sistema. O problema de controle realizado foi a pega de objeto de controle

6. RESULTADOS

Foram feitas várias simulações utilizando os programas ADAMS e Matlab/Simulink de forma associativa e embora hajam desvios nas curvas obtidas os resultados ainda não foram plenamente otimizados. Deve ser observado que o controlador foi utilizado para a pega de objetos com formas variadas sem ter sido otimizado para cada uma delas. Na figura abaixo Fig.(5) tem-se o gráfico dos deslocamentos das extremidades dos dedos e na figura seguinte Fig.(6) o gráfico das forças nas extremidades dos dedos. Nos gráficos das figuras a seguir quando se lê “dedo 1x”, por exemplo, deve-se entender que a função (deslocamento ou força) ocorre na extremidade do dedo 1 na direção x . Nas curvas seguintes, as quais respondem ao controle da garra baseado em seu estudo cinestático, observa-se a coerência das atitudes em relação ao estímulo inicial. Observa-se na figura 5 que as posições equivalentes as forças internas, ou seja, as posições que não devem variar negativamente ficaram estáveis. Estas posições são as do dedo 1 na direção x e a do dedo 2 na direção x , o que demonstra que a pega está segura sem perigo objeto do objeto escorregar. O dedo 3 na posição y ficou instável, pois foi considerado na formulação da matriz G que esta direção não era essencial para haver uma pega segura. Na figura 6 as forças que devem ser contrárias e de mesmo módulo (forças internas), referentes a $1x$ e $2x$, mantiveram-se estáveis como desejável. As forças referentes a $1y$ e $2y$, somadas, devem ser contrárias e de igual magnitude a $3y$ para que o equilíbrio seja mantido nesta direção. Este comportamento pode ser notado no gráfico porém ainda existem diferenças entre as magnitudes, devido a instabilidades que podem ser corrigidas através das forças internas.

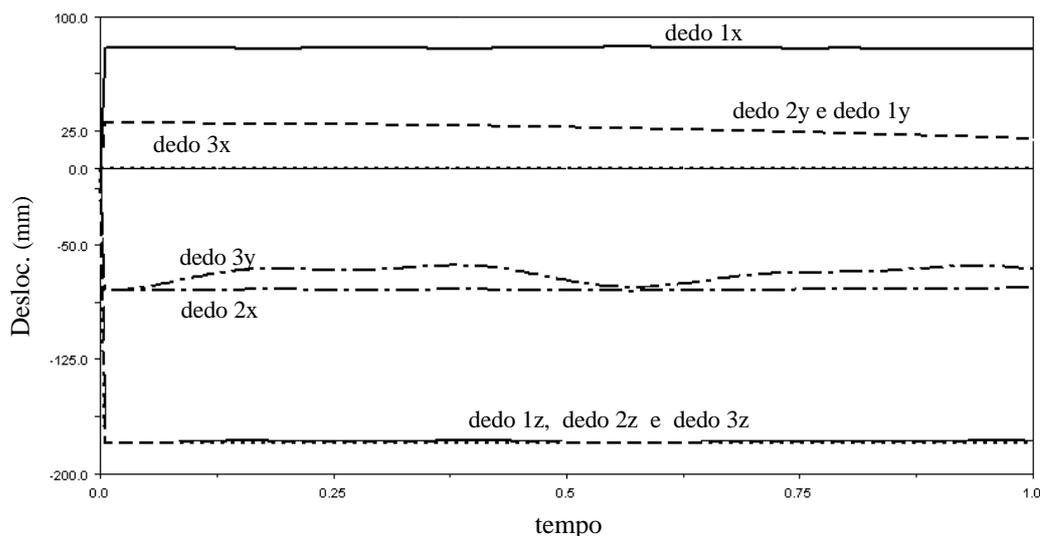


Fig.5 – Deslocamento das Extremidades dos Dedos

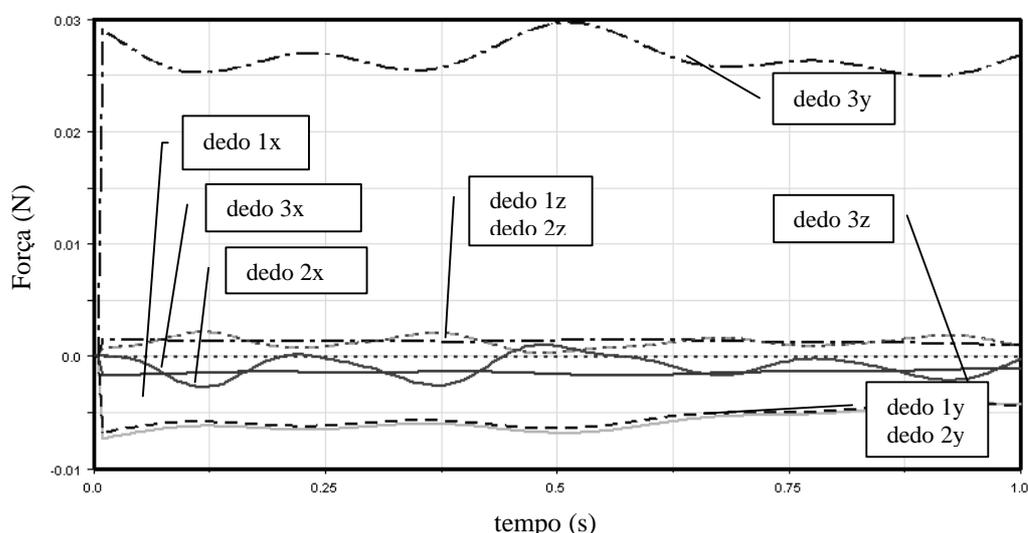


Fig.6 – Forças na Extremidade dos Dedos

7. CONCLUSÃO

Durante todo trabalho foram desenvolvidos estudos cinestáticos para que se pudesse trabalhar num ambiente em que a mudança de parâmetros de um dos elementos (dedos) influi em todo o conjunto no processo de pega. Foi necessário estudar como os contatos funcionam, como influenciam nas forças generalizadas, daí a necessidade de se estudar cada um dos tipos de contatos. A análise das restrições do corpo, como ocorrem, quando e como verificar sua existência ou não, foram de fundamental importância no trabalho. O estudo do deslocamento de corpos rígidos foi realizado concluindo-se que a melhor teoria para este fim é a Teoria Helicoidal. Por fim, foi estudada a matriz de transformação G, para manipulação em cadeias fechadas, a qual contém todas as informações cinestáticas do sistema habilitando-a a ser utilizada como parte fundamental do controlador simultâneo de força e posição proposto para validação dos estudos. Além de garras este estudo aplica-se a robôs que trabalham de forma cooperativa. Assim pode-se concluir que foram estabelecidos fundamentos matemáticos para o uso de garras antropomórficas e robôs cooperativos para execução de manipulações.

8. REFERÊNCIAS

- ADAMS REFERENCE MANUAL (1998) – Mechanical Dynamics, version 10.0
- Aguiar, P. M.; Caurin, G. A. P.; Barbieri, F. A. A., 2001, Simultaneous Force and Position Control of Anthropomorphic Grippers, Proceedings of the 9th International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics, Florianópolis, Brazil, pp 243-248.
- Ball, R.S., 1900, A Treatise on the Theory of Screws. GB, Cambridge University Press
- Romdhane, L.; Duffy, J.J.; 1990, Kinematic Analysis of Multifingered Hand, International Journal of Robotics, vol 9, USA
- Lakshmirnarayana, K., 1978, Mechanics of Form Closure, ASME Paper No. 78 – DET – 32
- Liegeois, A., 2000, Modélisation et comande des robots manipulateurs. *Techniques de l'Ingénieur*, article n° S7 730, Université Montpellier
- Phillips, J., 1984, Freedom in Machinery, GB, vol 1 e 2, Cambridge University Press
- Salisbury, J.K., 1982, Kinematic and Force analysis of Articulated Hands, Stanford. Phd Thesis, Stanford University
- Valente, C.M.O, 1999, Fixação de Objetos de Formato Geométrico Desconhecido Utilizando Redes Neurais Artificiais, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP

Kinestatic Analysis of Three Finger Anthropomorphic Gripper Based on Screw Theory

Paulo Marcos de Aguiar

Universidade de São Paulo – EESC – Av. Trabalhador São Carlense, 400 – CEP. 13566-590 – São Carlos – SP - Brazil
pmaguiar@sc.usp.br

Glauco Augusto de Paula Caurin

Universidade de São Paulo – EESC – Av. Trabalhador São Carlense, 400 – CEP. 13566-590 – São Carlos – SP - Brazil
gcaurin@sc.usp.br

Mirian Percia Mendes

Universidade de São Paulo – SMA-ICMC – Av. Trabalhador São Carlense, 400 – CEP. 13566-590 – São Carlos – SP - Brazil
mpmendes@icmc.sc.usp.br

***Abstract.** This paper presents a kinestatic analysis of the GAUSP (Anthropomorphic Gripper of University of São Paulo) anthropomorphic robot gripper. To approximate, in a efficient way, the functions accomplished by a human hand, the controller is conceived taking into consideration: the time-variable space, the forces information, the gripper geometry, the gripper elastic characteristics, the object geometry and the intermittent contact possibilities. With the kinestatic analysis these characteristics may be take into consideration (more complete model). The screw theory was adopted in this work. This theory allows the analysis in a three-dimensional Euclidian space of a six –dimensional complex problems. The methods is suitable for the analysis of the various grasping information. manipulation tasks, influence of multiple fingers actions, elasticity, etc. Provided from the kinestatics analysis. The experimental system adopted for testing and validation of the kinestatic approach, consists on a robot gripper with three-finger and nine degrees of freedom (three d.o.f. for each finger). A force and position controller for all three fingers was implemented using a single kinestatic control matrix. The results obtained with the proposed controller, based on the kinestatic analysis, are presented and discussed.*

***Keywords.** robotics gripper, position and force control, manipulator, screw theory*