

Sistemática procedural para o processo de cálculo da cinemática de Sistemas Multirrobo Cooperativos

Cristiane P. Tonetto, cris.tonetto@emc.ufsc.br¹

Henrique Simas, simas@emc.ufsc.br¹

Altamir Dias, altamir@emc.ufsc.br¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis-SC, 88040-900

Resumo. *O objetivo deste artigo é descrever o processo de programação de um Sistema Multirrobo Cooperativo (SMC). Um Sistema Multirrobo Cooperativo (SMC) é definido como um sistema composto por vários manipuladores, que auxiliam ou colaboram na realização de uma ou várias tarefas. Esse tipo de sistema é importante quando existem tarefas que, para serem cumpridas por um único robô, tornam a programação difícil, complexa ou mesmo impossível, e assim, precisa ser simplificada com a adição de mais robôs para facilitar a execução das tarefas. Neste artigo descreve-se o processo de programação de um SMC através de algumas etapas. Para isso, é proposta uma sequência de doze etapas que gera um procedimento sistemático para a programação cinemática de um SMC. As etapas envolvem desde a coleta das informações dos robôs envolvidos, a representação abstrata do sistema, até o cálculo da cinemática do sistema. Desta forma, pretende-se estabelecer uma sistemática que simplifique o processo de programação e modelamento cinemático de qualquer SMC, como se fosse um roteiro, apontando para uma padronização de programação. Por outro lado, sem uma técnica sistemática para programar SMC, a atividade de programação se torna bastante complexa na medida que se aumenta o número de robôs no sistema. No decorrer do artigo são discutidas estas etapas e é desenvolvido um exemplo relatando o passo a passo envolvendo cada etapa. O exemplo aborda o cálculo da cinemática de um sistema composto por três robôs antropomórficos compartilhando uma carga.*

Palavras-chave: *Sistemas Mutirrobo Cooperativos (SMC); Sistemática procedural de programação de robôs; Cinemática de SMC*

1. INTRODUÇÃO

O interesse no uso de sistemas robóticos compostos por mais de um manipulador começou nos anos 70, quando se percebeu algumas limitações impostas em aplicações que utilizavam um único braço robótico. Essas limitações foram detectadas devido a algumas tarefas serem difíceis ou mesmo impossíveis de serem realizadas por um único robô e sendo viabilizada quando dois ou mais robôs eram adicionados ao sistema (Caccavale e Uchiyama, 2008). Algumas dessas tarefas são por exemplo: o compartilhamento de carga, a montagem e o encaixe de múltiplas peças ou mesmo a manipulação de objetos flexíveis.

O objeto de estudo desse artigo é apresentar uma sistematização do problema de planejamento de tarefas robóticas baseado em Sistemas Multirrobo Cooperativos (SMC). Estes sistemas podem ser definidos como: "Um sistema composto por vários manipuladores, que auxiliam ou colaboram na realização de uma ou várias tarefas"(Tonetto, 2009). Para alcançar o objetivo principal é apresentado, também, algumas etapas necessárias para o cálculo da cinemática de Sistemas Multirrobo Cooperativos, visando facilitar e obter uma forma sistemática de trabalhar com o planejamento de tarefas para SMC.

Alguns trabalhos na literatura discutem a execução de tarefas industriais com dois ou mais robôs. Dentre estes, alguns autores podem ser citados como: Lewis (1996) introduziu o conceito de Jacobiano Relativo aplicado a dois manipuladores no planejamento de trajetórias. Tzafestas *et al.* (1998) focam suas pesquisas na cinemática de posição utilizando três robôs espaciais para a movimentação de um objeto de grandes dimensões de uma posição a outra. Owen *et al.* (2003) aplicaram o conceito de jacobiano relativo proposto por Lewis (1996) para a resolução da trajetória com dois robôs planares executando uma tarefa de usinagem. Dourado (2005) trabalha com dois e três robôs planares no cálculo da cinemática inversa baseada em helicoides para o planejamento de trajetórias no espaço operacional. Ribeiro (2007) definiu o conceito de Jacobiano de Cooperação baseado na formulação de Denavit-Hartenberg e também por helicoides para o cálculo da cinemática de Sistemas Multirrobo Cooperativos (Ribeiro *et al.*, 2007; Ribeiro e Martins, 2009). Outros trabalhos focados no controle de força e evitamento de colisão envolvendo dois ou mais manipuladores podem ser citados

como: Kwon e Lee (1998), Yim *et al.* (1999), Ju *et al.* (2002) e Chuang *et al.* (2006).

Este artigo está dividido em mais três seções. Na seção 2 são apresentadas as 12 etapas necessárias para a programação de um SMC para a execução de tarefas industriais. Na seção 3 é explorado um exemplo que aborda todos os passos descritos na seção 2. Por fim, na seção 4 são apresentadas as conclusões e considerações sobre esta pesquisa.

2. ETAPAS DO PROCESSO DE PROGRAMAÇÃO DE SMC

Na literatura são encontrados trabalhos com sistemas compostos com mais de um robô para a execução de tarefas, como foi salientado na seção 1. Porém, nenhum desses autores apresentam uma sistemática para determinar a cinemática de SMC. Considerando esse fato, a ideia deste artigo é estabelecer alguma rotina para o cálculo da cinemática de SMC. Este procedimento visa auxiliar de forma prática e educacional a programação de vários robôs trabalhando em cooperação.

As etapas propostas a seguir são baseadas na metodologia de estudos de robótica cooperativa baseada na teoria de helicoides, a qual é apoiada no método de Davies e nas cadeias virtuais de Assur. Durante a explanação de um exemplo na seção 3 essas metodologias serão introduzidas brevemente, porém mais detalhes podem ser encontrados nos trabalhos de: Davies (1981), Hunt (2000), Tsai (1999), Campos (2004), Campos *et al.* (2005), Simas (2008), Tonetto e Dias (2009a) e Tonetto e Dias (2009b).

Para estabelecer a sistemática para determinar a cinemática de SMC foram definidas 12 etapas:

1. Descrever o tamanho dos elos e o tipo de juntas (rotativa e prismática) de cada robô.
2. Estabelecer os sistemas de coordenadas de referência e fixos.
3. Especificar as tarefas e sub-tarefas a serem executadas pelo sistema.
4. Determinar os valores de s e s_o e as distâncias entre os sistemas de coordenada de referência com relação ao sistema de coordenadas fixo na base de cada robô.
5. Aplicar a técnica dos helicoides sucessivos para os valores de s e s_o .
6. Determinar os helicoides de cada uma das juntas que compõe o sistema.
7. Adicionar as cadeias virtuais de Assur ao sistema.
8. Fazer a representação abstrata do sistema através de um grafo.
9. Estabelecer, a partir do grafo do item anterior, as matrizes de incidência (B) e dos elos helicoides normalizados (D).
10. Determinar a matriz de rede N ($N = D \cdot \text{diag}\{B_i\}$, em que i é a i ésima linha da matriz B).
11. Definir as matrizes: N_p , N_s e os vetores: \dot{q}_p e \dot{q}_s .
12. Aplicar o método de Davies.

3. APLICAÇÃO DAS ETAPAS EM UM EXEMPLO

Para facilitar o entendimento das etapas sugeridas na seção anterior, é apresentado agora um exemplo que aborda cada uma das etapas apresentadas anteriormente. O exemplo consiste de um sistema multirrobo composto por três robôs antropomórficos. Na Fig. (1) é ilustrado um dos robôs com a identificação dos ângulos e elos.

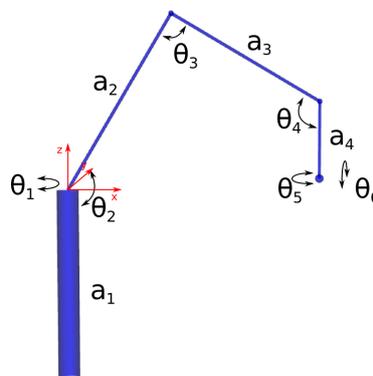


Figura 1. Robô antropomórfico.

Tabela 1. Valores de s e s_o para as juntas do manipulador com relação a uma configuração de referência.

Juntas	s	s_o
1	(0, 0, 1)	(0, 0, 0)
2	(0, -1, 0)	(0, 0, 0)
3	(0, -1, 0)	(a_2 , 0, 0)
4	(0, -1, 0)	($a_2 + a_3$, 0, 0)
5	(0, 0, 1)	($a_2 + a_3 + a_4$, 0, 0)
6	(1, 0, 0)	($a_2 + a_3 + a_4$, 0, 0)

- Robô 2: $D_{x2} = 10, D_{y2} = 0, D_{z2} = 0$;
- Robô 3: $D_{x3} = 5, D_{y3} = 5, D_{z3} = 0$;

Estabelecidos os valores de s e s_o para cada uma das juntas dos três robôs, a próxima etapa, consiste em aplicar o método dos helicoides sucessivos. Neste método determina-se o helicóide resultante considerando a aplicação de vários deslocamentos helicoidais que um corpo rígido sofre devida a ação de outro corpo e o acoplamento entre eles, quando existir. A abordagem completa pode ser conferida nos escritos de Tsai (1999), no qual ele deduz as equações que representam matematicamente o deslocamento de um corpo rígido. Essas equações são obtidas a partir do Teorema de Chales. Tsai (1999) apresenta ainda a matriz de Rodrigues, utilizada para representar o deslocamento de um corpo rígido no espaço. A matriz de Rodrigues é dada por:

$$R_{\vec{s}, \theta} = \begin{bmatrix} (s_x^2 - 1)(1 - \cos \theta) + 1 & s_x s_y (1 - \cos \theta) - s_z \sin \theta & \dots \\ s_x s_y (1 - \cos \theta) + s_z \sin \theta & (s_y^2 - 1)(1 - \cos \theta) + 1 & \dots \\ s_x s_z (1 - \cos \theta) - s_y \sin \theta & s_y s_z (1 - \cos \theta) - s_x \sin \theta & \dots \\ 0 & 0 & \dots \\ \dots & s_x s_z (1 - \cos \theta) + s_y \sin \theta & t s_x - s_{o_x} (a_{11} - 1) - s_{o_y} a_{12} - s_{o_z} a_{13} \\ \dots & s_y s_z (1 - \cos \theta) - s_x \sin \theta & t s_y - s_{o_x} a_{21} - s_{o_y} (a_{22} - 1) - s_{o_z} a_{23} \\ \dots & (s_x^2 - 1)(1 - \cos \theta) + 1 & t s_z - s_{o_x} a_{31} - s_{o_y} a_{32} - s_{o_z} (a_{33} - 1) \\ \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Pelo uso do conceito dos deslocamentos helicoidais para a análise cinemática, o helicóide resultante de n deslocamentos helicoidais sucessivos é a premultiplicação das matrizes de transformação dada por:

$$A_r = A_1 A_2 A_3 \dots A_n \quad (6)$$

Assim, a posição do efetuador do manipulador pode ser calculada a partir dos movimentos das juntas dos robôs, representada pelos helicoides. Desta forma, a técnica dos helicoides sucessivos pode ser aplicada sobre os eixos das juntas com o objetivo de obter a posição do efetuador do robô. Para o exemplo em questão, a técnica é aplicada para estabelecer a influência que cada uma das juntas exerce sobre as outras, e assim, obter os valores de s e s_o que incluam essa influência.

Com os valores de s e s_o definidos, no passo 6 são calculados os helicoides de cada junta. Como os robôs só têm juntas rotativas (o passo h é nulo, ou seja, não existe movimento de translação), então a Eq. (3) é utilizada para determinar o helicóide de cada um das juntas que compõe o sistema.

No passo 7, são adicionadas as cadeias virtuais de Assur ao sistema. O objetivo principal desta etapa é analisar o movimento de uma cadeia cinemática ou ainda, usar as cadeias virtuais de Assur para impor o movimento em uma cadeia cinemática. Uma descrição mais detalhada desta abordagem é dada em Campos (2004), que foi quem introduziu o conceito formal de cadeias virtuais. A definição de cadeia virtual é dada como: uma cadeia cinemática formada por elos e juntas virtuais, que podem ser adicionadas a uma cadeia cinemática real (Campos *et al.* (2005)). A Fig. 3 ilustra os principais tipos de cadeias virtuais.

A Figura (4) mostra a configuração do sistema após a adição das cadeias virtuais. Para este sistema, foram adicionadas quatro cadeias virtuais do tipo PPPS, neste caso, cadeia espacial (a sigla PPPS significa que a cadeia virtual contém três juntas virtuais prismáticas e uma junta virtual esférica). A cadeia virtual CV_0 representa o movimento da peça com relação ao mundo e as CV_i com $i = 1, 2, 3$ descrevem o movimento da peça com relação ao efetuador final de cada robô. Para a tarefa estabelecida na etapa 3, o movimento da peça é imposto através da cadeia virtual CV_0 , pois, nesse caso, é a peça que irá sofrer movimento com relação ao mundo. Os efetuadores finais de cada robô estão fixos na peça, ou seja, não existe movimento relativo entre a peça e os efetuadores, assim, as cadeias virtuais CV_i com $i = 1, 2, 3$ são nulas.

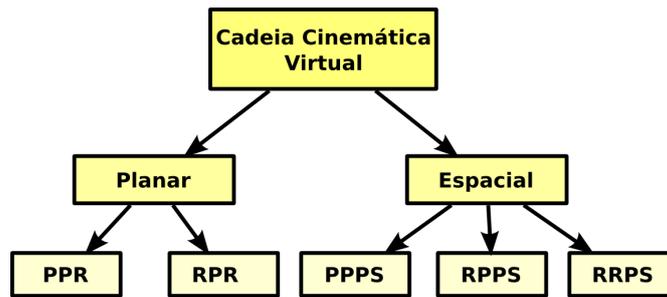


Figura 3. Cadeias Virtuais de Assur.

Caso, se deseje que algum dos robôs execute alguma operação sobre a peça, é só atribuir a trajetória desejada através da cadeia virtual que representa o movimento relativo entre esse efetuador e a peça.

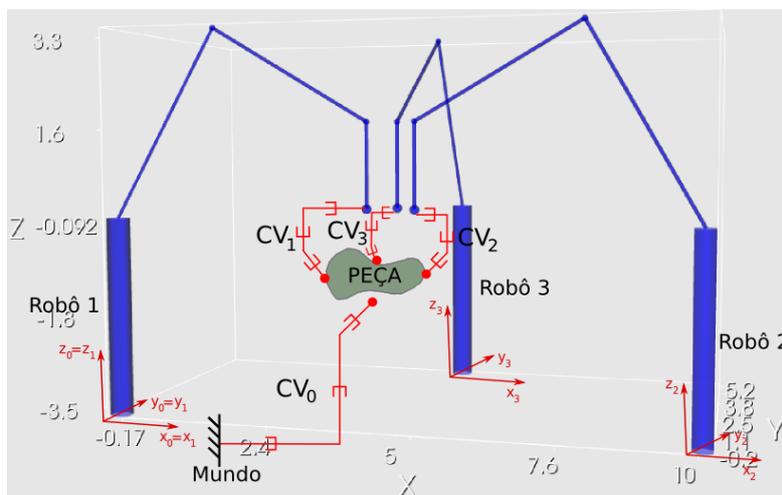


Figura 4. Representação do sistema com a adição das cadeias virtuais de Assur.

A importância da adição das cadeias virtuais ao sistema ficará evidente mais adiante, quando será tratado o método de Davies.

Seguindo a sistemática proposta na seção 2, no próximo passo monta-se uma representação abstrata do sistema (etapa 8), facilitando o cálculo da cinemática e a visualização dos acoplamentos entre os robôs. Essa representação pode ser feita utilizando a teoria de grafos. Com a representação através de grafos, torna-se possível encontrar a equação de restrição do sistema de forma sistemática. A Figura (5) ilustra o grafo que representa o sistema em questão, em que CV_0 , CV_1 , CV_2 e CV_3 são os subgrafos que representam as cadeias virtuais adicionadas no sistema e R_1 e R_2 são os subgrafos que representam os robôs.

O grafo representado na Fig. (5) é simplificado para facilitar a visualização e suas arestas contém mais informações do que aquela mostrada visualmente. Nesta representação por grafos foram omitidos os vértices referentes as juntas dos robôs e das cadeias virtuais para simplificar a visualização, mas eles devem ser considerados no cálculo da cinemática (cabe ressaltar que a Malha 3 é a malha que inclui o subgrafo CV_0 , R_3 e CV_3).

A representação por grafos torna mais fácil a construção da matriz de incidência (B), que indica a presença de cada aresta na malha do grafo. A matriz é montada da seguinte forma, cada linha da matriz indica uma malha do grafo e cada coluna uma aresta. Cada elemento da matriz é definido como:

- 0, se a aresta não esta presente na malha;
- 1, se a aresta esta presente na malha e na mesma direção da malha;
- -1, se a aresta esta presente na malha, porém na direção contrária da malha.

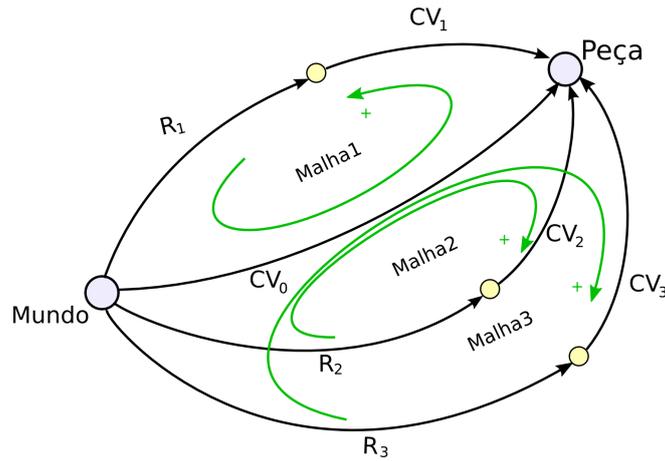


Figura 5. Grafo que representa o sistema composto por 3 robôs antropomórficos.

Para o grafo em questão a matriz de incidência é (etapa 9):

$$B = \begin{matrix} & CV_0 & CV_1 & R_1 & CV_2 & R_2 & CV_3 & R_3 \\ \begin{matrix} malha1 \\ malha2 \\ malha3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} [1]_{1 \times 6} & [-1]_{1 \times 6} & [-1]_{1 \times 6} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ [1]_{1 \times 6} & 0 & 0 & [-1]_{1 \times 6} & [-1]_{1 \times 6} & 0 & 0 \\ [1]_{1 \times 6} & 0 & 0 & 0 & 0 & [-1]_{1 \times 6} & [-1]_{1 \times 6} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (7)$$

A matriz linha de helicoides normalizados D é dada pela Eq. (8), montada na etapa 9. Note que a ordem de adição dos helicoides normalizados na matriz D deve ser a mesma adotada na matriz B :

$$D = \begin{bmatrix} [\hat{\$}_{CV_0}]_{6 \times 6} & [\hat{\$}_{CV_1}]_{6 \times 6} & [\hat{\$}_{R_1}]_{6 \times 6} & [\hat{\$}_{CV_2}]_{6 \times 6} & [\hat{\$}_{R_2}]_{6 \times 6} & [\hat{\$}_{CV_3}]_{6 \times 6} & [\hat{\$}_{R_3}]_{6 \times 6} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Assim, para obter a matriz de rede N (etapa 10), basta multiplicar a matriz de helicoides D pela matriz diagonal de B :

$$N = D \text{diag}\{B_i\} \quad (9)$$

onde B_i é a matriz formada pela linha i da matriz B .

Então, a matriz de rede N é dada pela equação:

$$N = \begin{bmatrix} [\hat{\$}_{CV_0}]_{6 \times 6} & [-\hat{\$}_{CV_1}]_{6 \times 6} & [-\hat{\$}_{R_1}]_{6 \times 6} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ [\hat{\$}_{CV_0}]_{6 \times 6} & 0 & 0 & [-\hat{\$}_{CV_2}]_{6 \times 6} & [-\hat{\$}_{R_2}]_{6 \times 6} & 0 & 0 \\ [\hat{\$}_{CV_0}]_{6 \times 6} & 0 & 0 & 0 & 0 & [-\hat{\$}_{CV_3}]_{6 \times 6} & [-\hat{\$}_{R_3}]_{6 \times 6} \end{bmatrix} \quad (10)$$

A matriz N é decomposta em N_s e N_p (etapa 11). A matriz N_s contém os helicoides normalizados referentes as juntas na qual se deseja obter as velocidades. Já a matriz N_p é formada pelos helicoides normalizados referentes as juntas com velocidades conhecidas.

$$N_s = \begin{bmatrix} [-\hat{\$}_{R_1}]_{6 \times 6} & 0 & 0 \\ 0 & [-\hat{\$}_{R_2}]_{6 \times 6} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [-\hat{\$}_{R_3}]_{6 \times 6} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$N_p = \begin{bmatrix} [\hat{\$}_{CV_0}]_{6 \times 6} & [-\hat{\$}_{CV_1}]_{6 \times 6} & 0 & 0 \\ [\hat{\$}_{CV_0}]_{6 \times 6} & 0 & [-\hat{\$}_{CV_2}]_{6 \times 6} & 0 \\ [\hat{\$}_{CV_0}]_{6 \times 6} & 0 & 0 & [-\hat{\$}_{CV_3}]_{6 \times 6} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Os vetores \dot{q}_s e \dot{q}_p são vetores que representam a magnitude das velocidades das juntas, no qual, \dot{q}_s corresponde as velocidades das juntas desconhecidas, a serem determinadas e \dot{q}_p é o vetor que contém as velocidades das juntas com velocidades conhecidas. O vetor \dot{q}_p é dado pela derivada das trajetórias de cada efetuador dos robôs, que foram definidas na especificação da tarefa (etapa 3). Neste caso é o vetor \dot{q}_p :

$$\dot{q}_p = [\dot{q}_{CV_0} \quad \dot{q}_{CV_1} \quad \dot{q}_{CV_2} \quad \dot{q}_{CV_3}] \quad (13)$$

$$\dot{q}_p = [-0.6 \sin(t) \quad 0,6 \cos(t) \quad 0 \quad 0] \quad (14)$$

Com as matrizes N_p , N_s e \dot{q}_p definidas, passa-se a etapa 12, aplicar o Método de Davies.

O Método de Davies é uma forma sistemática para relacionar as velocidades de uma cadeia cinemática fechada. O método é uma adaptação da Lei de circulação de Kirchhoff e diz que: a soma das velocidades relativas pares cinemáticos ao longo de qualquer cadeia cinemática fechada é zero (Davies (1981)), ou seja:

$$\sum_{i=0}^n \mathcal{S}_i = \sum_{i=0}^n \hat{\mathcal{S}}_i \dot{q}_i = 0 \quad (15)$$

em que n é o número de juntas do sistema. A Equação (15) pode ser reescrita:

$$\sum_{i=0}^n N \dot{q} = 0 \quad (16)$$

em que N é a matriz de rede que contém os helicoides normalizados. Esta equação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} N_s \\ \vdots \\ N_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_s \\ \vdots \\ \dot{q}_p \end{bmatrix} = 0 \quad (17)$$

Assim, separando as matrizes e isolando as matrizes referentes as juntas secundárias, tem-se a relação:

$$N_s \dot{q}_s = -N_p \dot{q}_p \quad (18)$$

Se a matriz N_s admitir inversa, as magnitudes das velocidades das juntas secundárias \dot{q}_s podem ser calculadas através da seguinte relação:

$$\dot{q}_s = -N_s^{-1} N_p \dot{q}_p \quad (19)$$

Substituindo as matrizes N_s , N_p e \dot{q}_p na Eq. 19, tem-se as velocidades das juntas secundárias em função das juntas primárias. Para o sistema em questão, foi realizada uma simulação e ilustrado na Fig. 6.

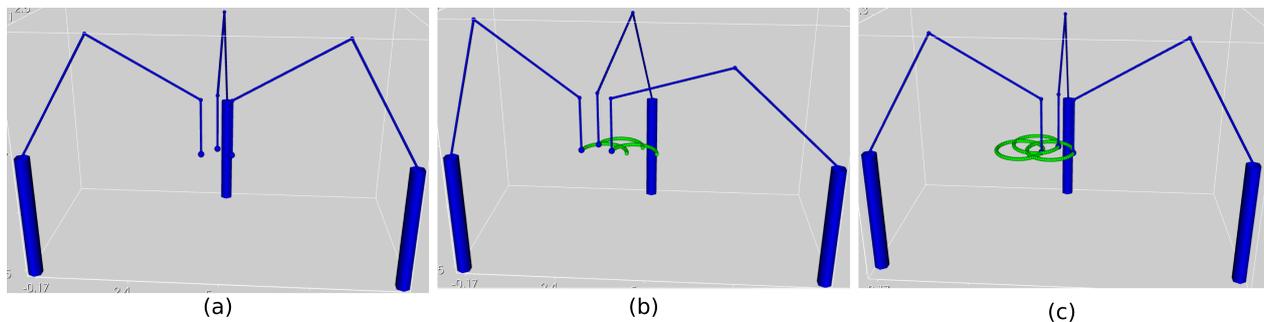


Figura 6. Execução da tarefa em três momentos: (a) Início da tarefa; (b) Meio da tarefa; (c) Tarefa completada.

As simulações e os códigos foram implementadas utilizando o software Octave (Eaton (2010)). Outras combinações de SMC foram testados, usando diferentes tipos de robôs para validar esta sistemática proposta, obtendo bons resultados. O próximo passo é passar esta estrutura de dados para controlar a execução de tarefas fisicamente em laboratório, dado que os resultados serviram para fazer uma programação fora de linha (*off-line* de um Sistema Robótico Cooperativo - SMC).

4. CONCLUSÕES

O cálculo da cinemática de SMC ainda é um campo pouco explorado e a maioria dos autores abordam sistemas contendo dois ou no máximo três robôs. Os trabalhos anteriores estabelecem diferentes formas (muitas vezes própria e restritivas a configuração estabelecidas pelos autores) para o cálculo da cinemática de um SMC, em particular. Neste artigo, foi apresentado as etapas fundamentais para auxiliar o processo de programação de SMC, que pode ser aplicado para um número qualquer de robôs. Essas etapas visam estabelecer uma sistemática procedural que auxilie tanto de forma

educativa quanto prática, bem como aponta a possibilidade de generalização do processo para qualquer configuração de um SMC.

O próximo passo desta pesquisa, será a introdução de algumas técnicas de evitamento de colisão entre os robôs e dos manipuladores com o seu entorno (o ambiente da tarefa), estudando mais a fundo o uso e a propagação de cadeias virtuais para auxiliar a solução deste tipo de problema, além de propor formulações, via técnicas de uso de grafos para inserção de restrições e relaxamento no comportamento cinemático de SMCs.

5. REFERÊNCIAS

- Caccavale, F. e Uchiyama, M., 2008. *Handbook of Robotics*, Spring, Verlag, chapter 29: Cooperative Manipulators, pp. 701–718.
- Campos, A., 2004. *Cinemática diferencial de manipuladores empregando cadeias virtuais*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC.
- Campos, A., Guenther, R. e Martins, D., 2005. “Differential kinematics of serial manipulators using virtual chains”. *Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. XXVII, No. 4, pp. 345 – 356. ABCM.
- Chuang, J.H., Lin, C.C. e Chou, T.H., 2006. “An alternate priority planning algorithm for dual-arm systems”. *IEEE ISIE*, Vol. 4, pp. 3084–3089. doi:10.1109/ISIE.2006.296108.
- Davies, T.H., 1981. “Kirchhoff’s circulation law applied to multi-loop kinematic chains”. *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 16, No. 3, pp. 171 – 183. ISSN 0094-114X. doi:10.1016/0094-114X(81)90033-1.
- Dourado, A.O., 2005. *Cinemática de Robôs Cooperativos*. Master’s thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC.
- Eaton, J.W., 2010. “Gnu octave”. URL <http://www.gnu.org/software/octave/>. University of Wisconsin, Department of Chemical Engineering. Acessado em 09/03/2010.
- Hunt, K.K., 2000. “Don’t cross-thread the screw”. *A Symposium Commemorating the Legacy, Works, and Life of Sir Robert Stawell Ball Upon the 100th Anniversary of A Treatise on the Theory of Screws*, pp. pp. 1–36.
- Ju, M.Y., Liu, J.S. e Hwang, K.S., 2002. “Real-time velocity alteration strategy for collision-free trajectory planning of two articulated robot manipulators”. *J. Intell. Robotics Syst.*, Vol. 33, No. 2, pp. 167–186. ISSN 0921-0296. doi:<http://dx.doi.org/10.1023/A:1014617010456>.
- Kwon, W. e Lee, B.H., 1998. “A new optimal force distribution scheme of multiple cooperating robots using dual method”. *J. Intell. Robotics Syst.*, Vol. 21, No. 4, pp. 301–326. ISSN 0921-0296. doi:<http://dx.doi.org/10.1023/A:1007917003845>.
- Lewis, C., 1996. “Trajectory generation for two robots cooperating to perform a task”. In *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 2, pp. 1626–1631. doi:10.1109/ROBOT.1996.506945.
- Owen, W.S., Croft, E.A. e Benhabib, B., 2003. “Minimally compliant trajectory resolution for robotic machining”. *Proceedings of ICAR 2003 The 11th International Conference on Advanced Robotics*, pp. 702–707.
- Ribeiro, L., Guenther, R. e Martins, D., 2007. “Screw-based relative jacobian for manipulators cooperating in a task”. In *Proceedings of COBEM 2007. 19th International Congress of Mechanical Engineering*, Brasília, Brazil.
- Ribeiro, L. e Martins, D., 2009. “Screw-based relative jacobian for manipulators cooperating in a task using assur virtual chains”. In *Proceedings of COBEM 2009. 20th International Congress of Mechanical Engineering*, Gramado-RS, Brazil.
- Ribeiro, L.P.G., 2007. “Modelagem cinemática de sistemas robóticos cooperativos: o jacobiano de cooperação”. Qualificação de Doutorado.
- Simas, H., 2008. *Planejamento de trajetórias e evitamento de colisão em tarefas de manipuladores redundantes operando em ambientes confinados*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.
- Tonetto, C.P. e Dias, A., 2009a. “Cooperative robot kinematics to perform load sharing tasks”. In *Proceedings of the 19th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*. Teesside University, Gemini, Middlesbrough, pp. 130 – 138.
- Tonetto, C.P. e Dias, A., 2009b. “Trajectory planning with redundant cooperative robotics systems”. In *Proceedings of 20th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2009)*. ABCM, Gramado, RS, Brazil.
- Tonetto, C.P., 2009. *Processo de generalização da cadeia cinemática de sistemas robóticos cooperativos para o compartilhamento de tarefas*. Qualificação de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC.
- Tsai, L.W., 1999. *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. Jonh Wiley & Sons, INC.
- Tzafestas, C.S., Prokopiou, P.A. e Tzafestas, S.G., 1998. “Path planning and control of a cooperative three-robot system manipulating large objects”. In *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. Kluwer Academic Publishers, Vol. 22, pp. 99–116.
- Yim, W., Selvarajan, M. e Wells, W.R., 1999. “Sliding mode cooperative motion control of dual arm manipulators”. *Artificial Life and Robotics*, Vol. 3, No. 3, Springer Japan. doi:10.1007/BF02481134.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

Procedural Systematics for the process of kinematics computation for Cooperative Multirobot Systems

Cristiane P. Tonetto, cris.tonetto@emc.ufsc.br¹

Henrique Simas, simas@emc.ufsc.br¹

Altamir Dias, altamir@emc.ufsc.br¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis-SC, 88040-900

Abstract. *The purpose of this paper is to describe the process of the Cooperative Multirobot System (CMS) programming. A Cooperative Multirobot System (CMS) is defined as a system composed by several manipulators, that assist or collaborate in order to perform one or more tasks. This kind of system is important when there are tasks that, to be fulfilled by only one robot, imply in hard, complex or even impossible programming, and so, need to be simplified with the addition of more robots to make it easier to perform the tasks. In this paper, it is described the programming process of the CMS in some steps. For this, a sequence is proposed with twelve steps that generate a systematic procedure for kinematics programming of a CMS. The steps include the information gathering for the system's robots, the abstract representation of the system, and the kinematics computation of the system. In this way, it is intended to establish a systematic that simplifies the programming process and kinematics modeling of any CMS, as if it would be a script to be followed, leading to one standardized programming. By the other hand, without a systematical technique to program CMS, the programming activity is increasingly complex as the number of robots gets higher. In the paper these steps are discussed and is developed an example describing step by step of the procedure. The example presents the computation of the kinematics of a system composed by three anthropomorphic robots sharing a load.*

Keywords: *Cooperative Multirobot System (CMS); Procedural systematics for robots programming; kinematics of cooperative robots system;*