



4^{as} JORNADAS LUSO-ESPANHOLAS DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

ACTAS Volume 3

PORTO, 6 - 8 JULHO 1995



FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES



CONTROLO HÍBRIDO DE MANIPULADORES ROBÓTICOS

Abílio Azenha e J. A. Tenreiro Machado

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Laboratório de Sistemas, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Rua dos Bragas, 4099 PORTO CODEX, Portugal

RESUMO

Numerosas tarefas que envolvem manipulação requerem um controlo de força e de posição. Todavia, provou-se que os dois tipos de solicitações são incompatíveis, isto é, que não é possível controlar simultaneamente as duas variáveis. Nesta perspectiva foi proposto o algoritmo de controlo híbrido cujo princípio de funcionamento assenta na projecção em espaços ortogonais dos dois tipos de variáveis. No entanto, são conhecidas poucas experiências sobre este tipo de algoritmo. Este artigo debruça-se sobre diversos aspectos relativos à sua dinâmica e à sua robustez e desenvolve uma arquitectura alternativa baseada na teoria dos sistemas de estrutura variável.

Palavras-chave: Robots, manipuladores, controlo, controlo híbrido, sistemas de estrutura variável.

1. Introdução

Os manipuladores robóticos são sistemas mecânicos que exibem fenómenos complexos o que torna difícil a sua análise e o seu controlo. Estes factos levam a que a utilização de robots esteja confinada a tarefas que exigem pouca interacção com o ambiente. Todavia, nos últimos anos assistiu-se a uma intensa investigação sobre a modelização e o controlo de manipuladores para tarefas em que é requerido um controlo da força de contacto com o ambiente. As técnicas sugeridas encontram-se numa fase embrionária, razão pela qual aspectos tais como a robustez do algoritmo e o modelo apropriado para o ambiente são ainda pouco conhecidos. Este trabalho investiga as características do algoritmo de Controlo Híbrido (CH), tendo em atenção as suas características dinâmicas e a sua robustez. Nesta perspectiva, na secção 2 introduzem-se os conceitos fundamentais sobre os quais assenta o CH. De seguida, na secção 3, estuda-se a modificação do CH com o cálculo da cinemática através de uma matriz pseudo-inversa. Várias simulações com as duas estruturas propostas para o CH mostram que a robustez do algoritmo está muito longe do desejável. No sentido de ultrapassar os problemas encontrados, na secção 4 apresenta-se um novo CH baseado na teoria dos Sistemas de Estrutura Variável (SEV). As experiências efectuadas revelam um bom desempenho para vários tipos de modelos do ambiente de trabalho. Por último, na secção 5 apresentam-se as conclusões que decorrem deste estudo.

2. Controlo Híbrido

Mason [1] demonstrou que numerosas tarefas de manipulação envolvem um controlo simultâneo de força e de posição. Nesta perspectiva, Raibert e Craig [2] propuseram um algoritmo de CH e realizaram a experiência representada na Figura 1a). No entanto, são conhecidas poucas experiências sobre este tipo de algoritmo. Este artigo debruça-se sobre diversos aspectos relativos à sua dinâmica e à sua robustez.

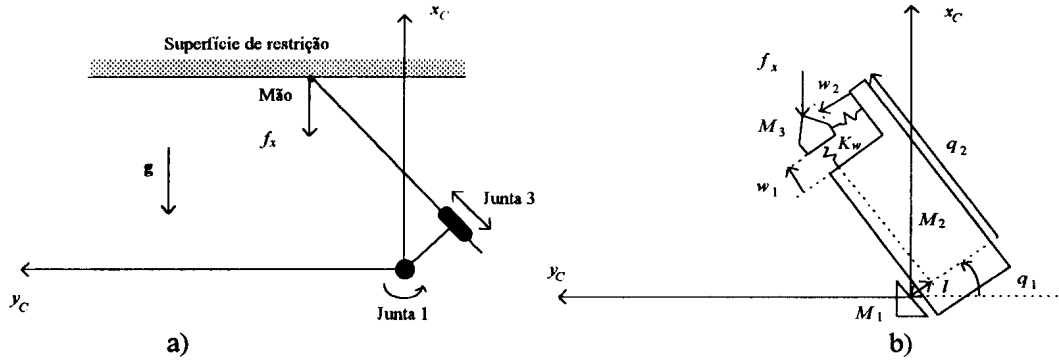


Figura 1 - Controlador híbrido proposto por Raibert e Craig.

- a) Disposição do robot e da superfície de restrição. Os eixos 1 e 3 do robot proporcionam um movimento num plano normal ao vector aceleração da gravidade. A mão está em contacto com o plano horizontal.
b) Modelo usado para simulação da tarefa de controlo híbrido.

O manipulador, o sensor de força (no punho), a mão do manipulador e a superfície de restrição foram modelizados como se mostra na Fig. 1b). As equações de estado do robot e da superfície de restrição são:

$$\ddot{q}_1 = \frac{1}{I_1(q_2)} [\tau_1 + B_1(\dot{q}_1) + q_2 K_w w_2 + l K_w w_1] \quad (1a)$$

$$\ddot{q}_2 = \frac{1}{M_2 + M_3} [\tau_2 + B_2(\dot{q}_2) + K_w w_1] \quad (1b)$$

$$\ddot{w}_1 = \frac{1}{M_3} [-K_w w_1 - f_x \cos(q_1)] \quad (2a)$$

$$\ddot{w}_2 = \frac{1}{M_3} [-K_w w_2 + f_x \sin(q_1)] \quad (2b)$$

$$f_x = K_r (C_x - C_{x_r}) \quad (3a)$$

$$C_x = q_2 \cos(q_1) + l \sin(q_1) \quad (3b)$$

Onde C_{xr} localização da superfície restrição
 K_w rigidez do sensor de força
 K_r rigidez da superfície restrição
 M_1, M_2, M_3 massas dos elos 1, 2 e da mão, respectivamente
 l desvio (offset) do elo 2
 $B_1(\dot{q}_1), B_2(\dot{q}_2)$ atrito das juntas 1 e 2 do manipulador,

$$B_i(\dot{q}_i) = \begin{cases} -\text{sgn}(\dot{q}_i) \left[\min(\tau_{s,i}, |\tau_i|) \right], & \text{peq. } \dot{q}_i \\ -\text{sgn}(\dot{q}_i) [\tau_{c,i}], & \text{doutro modo} \end{cases}$$

onde τ_s é a constante de atrito estático, τ_c é a constante de atrito de Coulomb e τ é o binário do actuador da junta
momento de inércia na junta 1,

$$I_1(q_2)$$

$$I_1(q_2) = 3.98 - 5.25q_2 + 6.47q_2^2 \quad \text{kg} \cdot \text{m}^2.$$

A Figura 2 mostra, em detalhe, o diagrama de blocos do algoritmo CH. Nesta figura o bloco J representa o Jacobiano da transformação cinemática do manipulador e o bloco Λ corresponde à transformação de coordenadas do espaço das juntas para o espaço operacional dadas pelas expressões:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} l \cos(q_1) - q_2 \sin(q_1) & \cos(q_1) \\ q_2 \cos(q_1) + l \sin(q_1) & \sin(q_1) \end{bmatrix} \quad (4a)$$

$$\mathbf{\Lambda}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} q_2 \cos(q_1) + l \sin(q_1) \\ q_2 \sin(q_1) - l \cos(q_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \end{bmatrix} \quad (4b)$$

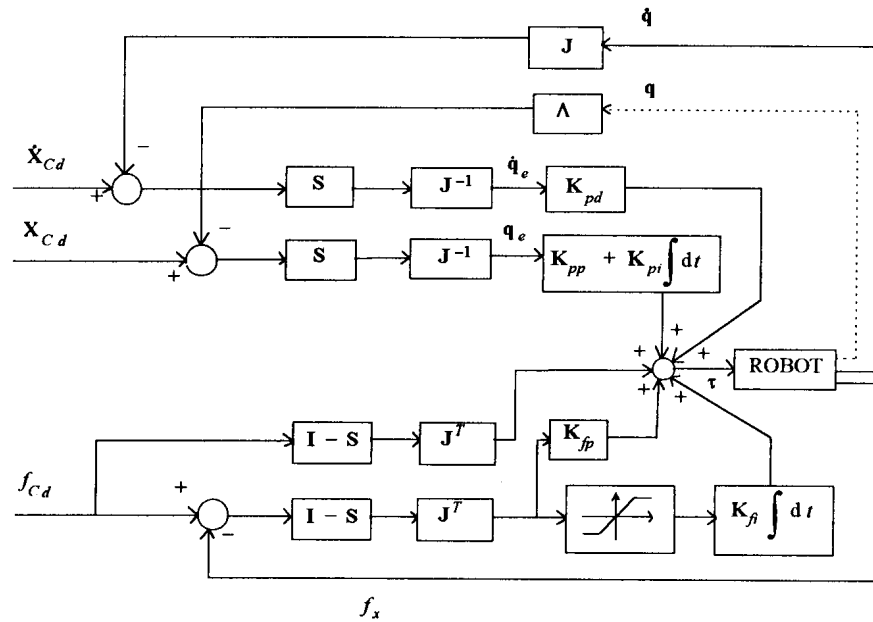


Figura 2 - Implementação do controlador híbrido.

A expressão para $J^{-1}S$ é a seguinte:

$$J^{-1}S = \frac{1}{[l \cos(q_1) - q_2 \sin(q_1)] \sin(q_1) - [q_2 \cos(q_1) + l \sin(q_1)] \cos(q_1)} \begin{bmatrix} 0 & -\cos(q_1) \\ 0 & l \cos(q_1) - q_2 \sin(q_1) \end{bmatrix} \quad (5)$$

A simulação do sistema robot-sensor-ambiente foi levada a cabo através do método Runge-Kutta de quarta ordem de integração numérica de equações diferenciais ordinárias.

Como um exemplo, apresentam-se na Fig. 3 os gráficos correspondentes a uma simulação com $K_p = 9 \times 10^5$ N/m e uma frequência do controlador $f = 1$ kHz. Considerou-se uma entrada em degrau do sinal de referência de força $f_{Cd} = 1$ N e manteve-se a referência de posição constante. Como valores iniciais para as coordenadas generalizadas do robot considerou-se $q_1 = \pi/6$ rad e $q_2 = 0.3$ m. Após um transitório inicial (aproximadamente 1.6 seg) verifica-se, em ambas as saídas, o aparecimento de uma oscilação com amplitude crescente e frequência 200 Hz. Para testar o CH a modificações do ambiente fez-se a simulação da Fig. 4 onde se diminui a constante de elasticidade para $K_p = 9 \times 10^4$ N/m.

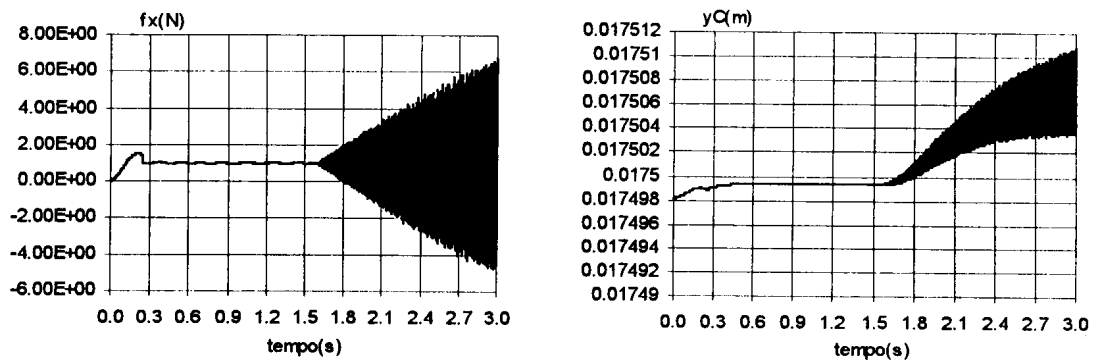


Figura 3 - Resposta (f_x e y_C) do CH para $f_{Cd} = 1$ N, $f = 1$ kHz e uma constante de elasticidade da superfície $K_p = 9 \times 10^5$ N/m.

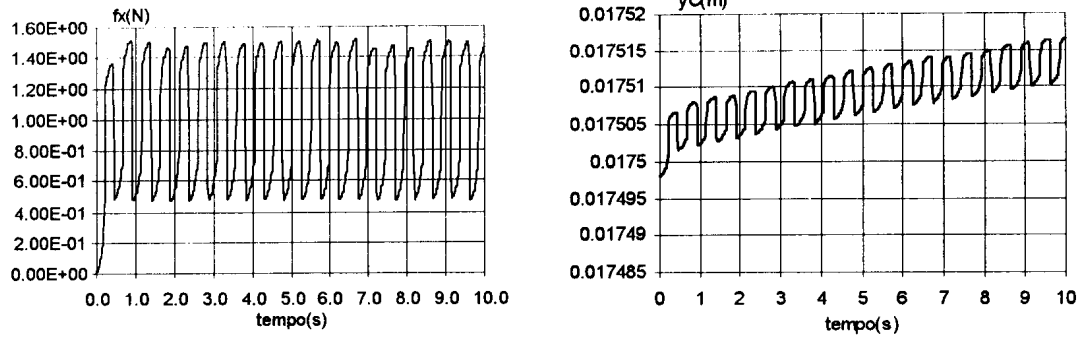


Figura 4 - Resposta (f_x e y_C) do CH para $f_{Cd} = 1$ N, $f = 1$ kHz e uma constante de elasticidade da superfície $K_p = 9 \times 10^4$ N/m.

3. Correção Através da Pseudo-Inversa

Tendo por base o algoritmo exposto na secção 2, foram repetidas as simulações anteriores com a modificação da pseudo-inversa na parte de controlo de posição da arquitectura original. Segundo Fisher e Mujtaba [3] esta modificação leva a um sistema teoricamente estável para todas as entradas. A matriz pseudo-inversa $(SJ)^+$ é única e pode ser obtida através do método da decomposição em valores singulares [4] porque tem determinante nulo. Neste caso, $(SJ)^+$ é dada pela expressão:

$$(SJ)^+ = \frac{1}{[q_2 \cos(q_1) + l \sin(q_1)]^2 + [\sin(q_1)]^2} \begin{bmatrix} 0 & q_2 \cos(q_1) + l \sin(q_1) \\ 0 & \sin(q_1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Os valores atribuídos aos diversos parâmetros foram idênticos aos utilizados na subsecção anterior. Assim, nas Figuras 5 e 6 mostram-se as evoluções temporais da força f_x e da posição y_C , para uma frequência de amostragem $f = 1$ kHz e uma superfície de restrição com constante de elasticidade dada por $K_p = 9 \times 10^5$ N/m e $K_p = 9 \times 10^4$ N/m, respectivamente.

O CH com a reformulação da pseudo-inversa tem um comportamento superior ao do algoritmo originalmente proposto por Raibert e Craig. No entanto, constata-se que ambos têm sérios problemas de estabilidade apresentando uma baixa robustez.

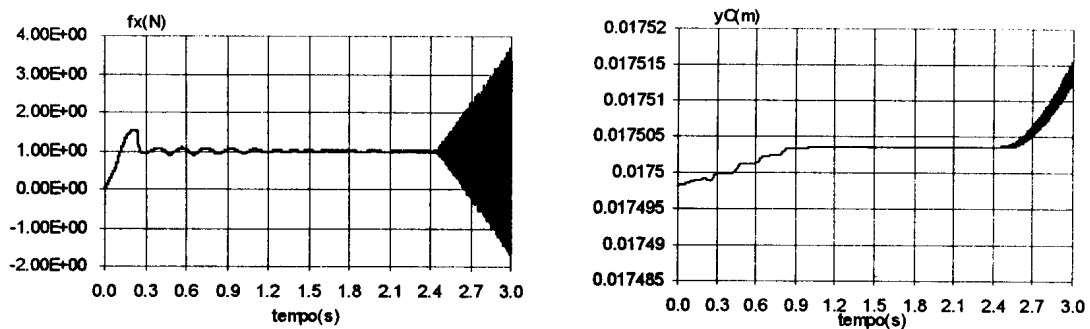


Figura 5 - Resposta (f_x e y_C) do CH com a modificação da pseudo-inversa para $f_{Cd} = 1$ N, $f = 1$ kHz e uma constante de elasticidade da superfície $K_p = 9 \times 10^5$ N/m.

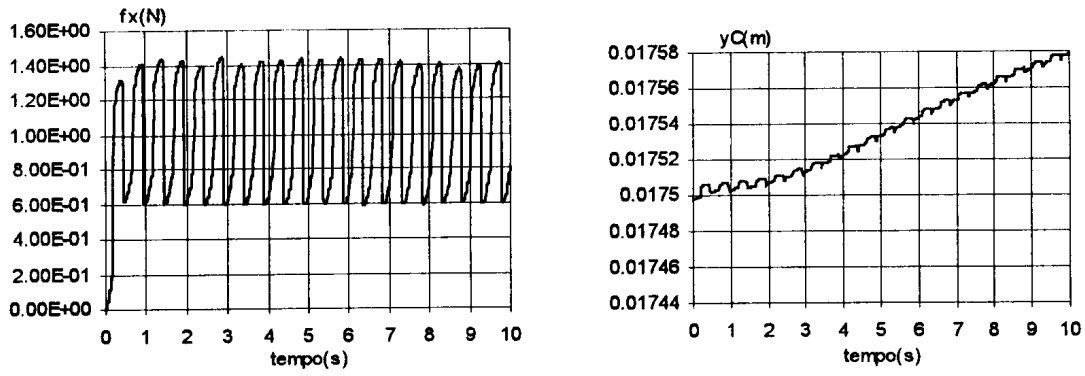


Figura 6 - Resposta (f_x e y_C) do CH com a modificação da pseudo-inversa para $f_{Cd} = 1 \text{ N}$, $f = 1 \text{ kHz}$ e uma constante de elasticidade da superfície $K_p = 9 \times 10^4 \text{ N/m}$.

4. Controlador Híbrido com Estrutura Variável

Os sistemas de controlo com estrutura variável (CEV's) têm baixa carga computacional, elevada robustez, boa capacidade de seguimento de trajectória e não requerem um modelo matemático detalhado [5-7]. Neste sentido, efectuaram-se experiências nas quais se substituíram os controladores PID e PI, respectivamente dos anéis de posição e de força, por um CEV.

Na Fig. 7 estão representados os CEV's integrados nos anéis de posição e força. Cada um dos CEV's é constituído por dois blocos: no primeiro bloco define-se a superfície de deslizamento σ_i e no segundo bloco implementa-se uma acção de controlo adequada. A superfície de deslizamento σ_i é dada por:

$$\sigma_i = \dot{q}_{esi} + c_i q_{esi} \quad (7)$$

onde as variáveis q_{esi} e $\dot{q}_{esi}$ são, respectivamente, o erro de posição e o erro de velocidade para a coordenada i . O parâmetro $c_i \in \mathbb{R}$ é uma constante positiva que representa o valor próprio associado a σ_i . A acção de controlo, como é frequente nos CEV's, adoptou-se do tipo "on-off" com uma zona proporcional para reduzir a amplitude da frequência de comutação durante o deslizamento. O parâmetro τ_{maxi} é o binário máximo e o parâmetro Δ_i define a largura da zona proporcional.

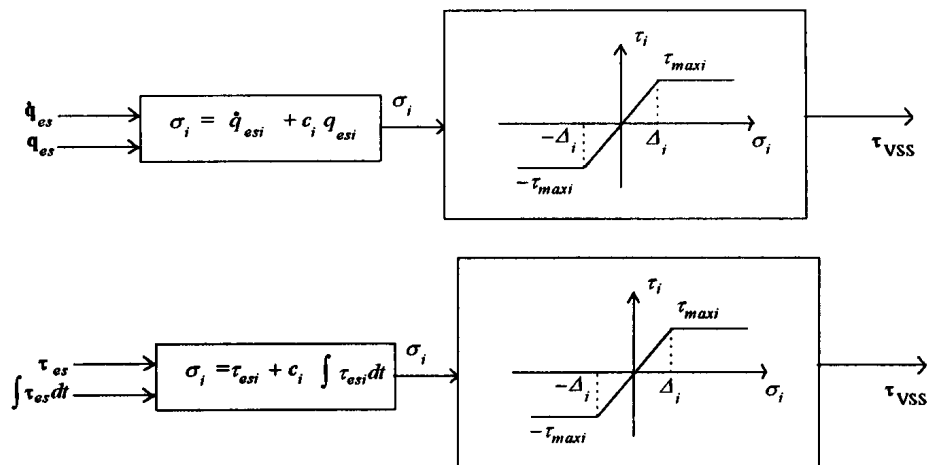


Figura 7 - Diagramas de blocos dos CEV's integrados nos anéis de controlo de posição e de força.

Para o anel de controlo de força substituiu-se o controlador PI por um CEV tendo por entradas o vector τ_{es} e o seu integral obtido por via numérica. Logo, a superfície de deslizamento passa a ser descrita por:

$$\sigma_i = \tau_{esi} + c_i \int \tau_{esi} dt \quad (8)$$

Assim, evita-se o cálculo de uma superfície de deslizamento com a derivada temporal de τ_{es} que, obviamente, introduziria níveis elevados de ruído. Note-se ainda que se manteve o termo de antecipação deste anel dado pela expressão (Fig. 8):

$$\tau_{FF} = \mathbf{J}^T (\mathbf{I} - \mathbf{S}) \mathbf{f}_{Cd} \quad (9)$$

A fim de testar o CH com os CEV's simulou-se o sistema com a modificação da pseudo-inversa para os dois casos analisados anteriormente, isto é, para constantes de elasticidade $K_p = 9 \times 10^5$ N/m e $K_p = 9 \times 10^4$ N/m (Figuras 9 e 10, respectivamente). Os parâmetros utilizados para os CEV's foram: $\tau_{max1} = 0.1$ Nm, $\tau_{max2} = 1$ N, $c = 0.1$ e $\Delta_i = 0.1$ ($i = 1, 2$).

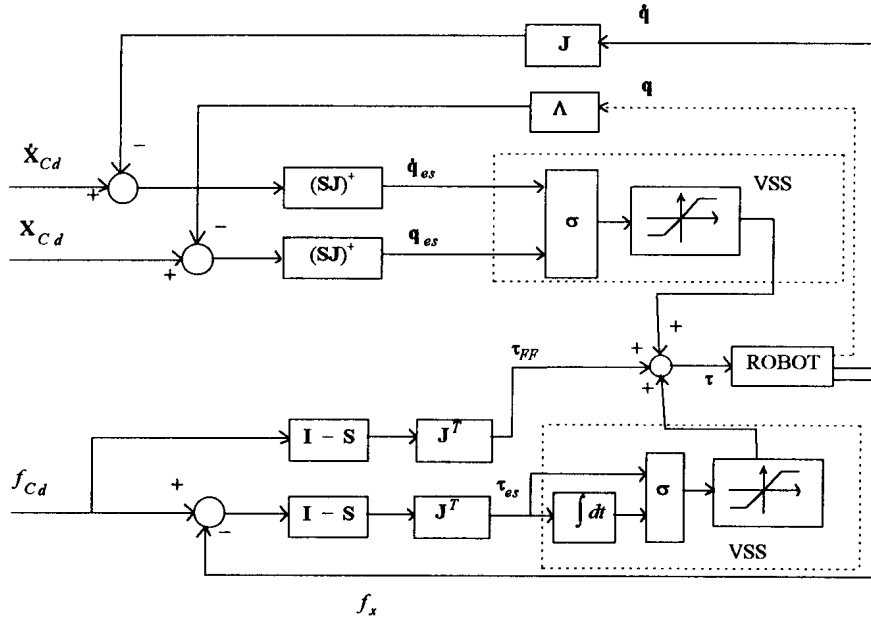


Figura 8 - Diagrama de blocos do CH com a modificação da pseudo-inversa e CEV's.

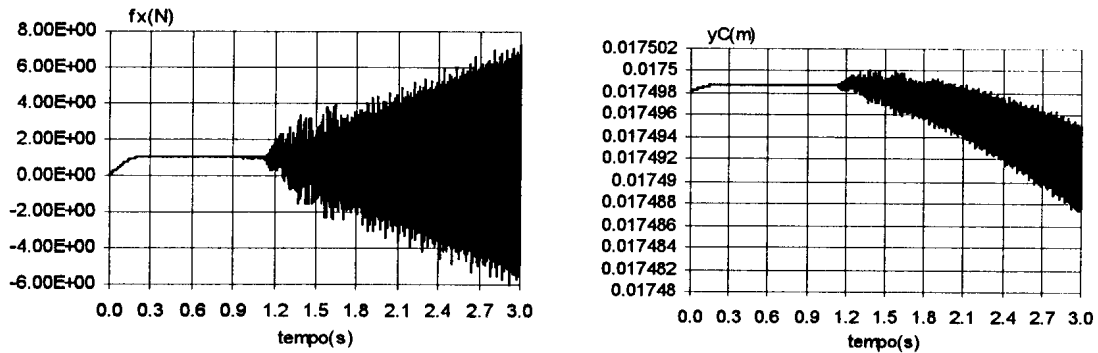


Figura 9 - Resposta (f_x e y_C) do CH com a modificação da pseudo-inversa e CEV's para $f_{Cd} = 1$ N, $f = 1$ kHz e uma constante de elasticidade da superfície $K_p = 9 \times 10^5$ N/m.

Como se verifica pela Fig. 9, as respostas do sistema em regime permanente sob a acção dos CEV's apresentam também uma oscilação. Como se sabe, este fenómeno deve-se a ressonância entre a inércia da mão do manipulador e as "molas" que representam a superfície de restrição e o transdutor de força. Constata-se que a frequência de ressonância está de acordo com a expressão [2]:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_r + K_w}{M_3}} \quad (10)$$

No entanto, o regime transitório melhorou consideravelmente quando comparado com os algoritmos PI e PID clássicos. Para o caso representado na Fig. 10 o sistema exibe um bom comportamento e embora o transitório seja lento não existe qualquer sobre-elevação ou oscilação em regime permanente.

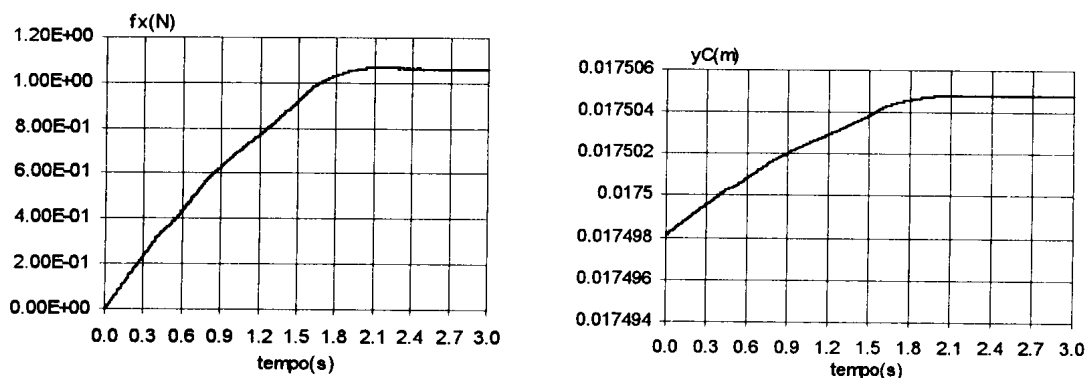


Figura 10 - Resposta (f_x e y_C) do CH com a modificação da pseudo-inversa e CEV's para $f_{Cd} = 1$ N, $f = 1$ kHz e uma constante de elasticidade da superfície $K_p = 9 \times 10^4$ N/m.

Nas Figuras 11 e 12 apresentam-se os binários solicitados pelo CH, com a modificação da pseudo-inversa, respectivamente para controladores clássicos e CEV's nos anéis de controlo de posição e de força. A componente FF é o binário de antecipação do anel de controlo de força (constante para uma entrada em degrau). Por seu lado, os termos PID-P e PI-F na Fig. 11 e CEV-P e CEV-F significam os binários de saída dos controladores clássicos e dos CEV's dos anéis de posição e de força.

Nas simulações efectuadas com os CEV's verificou-se que os parâmetros τ_{maxi} têm uma importância significativa no regime transitório. Aumentando-se τ_{maxi} de uma década, e mantendo a inclinação da função saturação constante (através do ajuste dos parâmetros Δ_i), o sistema reage mais rapidamente, mas a estabilidade piora devido a excitação dos modos ressonantes. No entanto, para $K_p = 9 \times 10^4$ N/m o CEV com $\tau_{max1} = 1$ Nm, $\tau_{max2} = 5$ N, $\Delta_1 = 1$, $\Delta_2 = 0.5$ e $c = 0.1$, é mais rápido (Fig. 13).

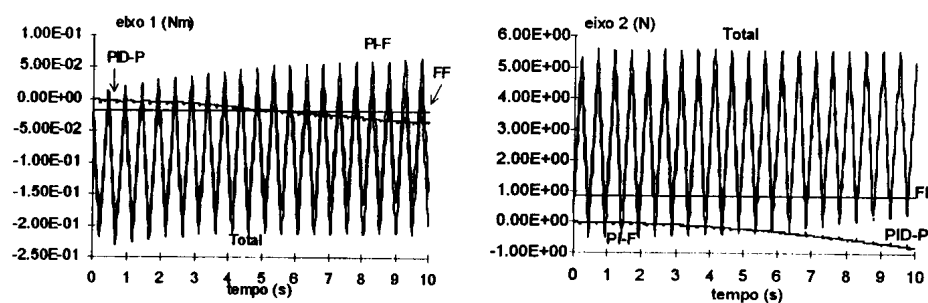


Figura 11 - Binários para o CH sob acção PID e PI nos anéis de posição e força ($K_p = 9 \times 10^4$ N/m).

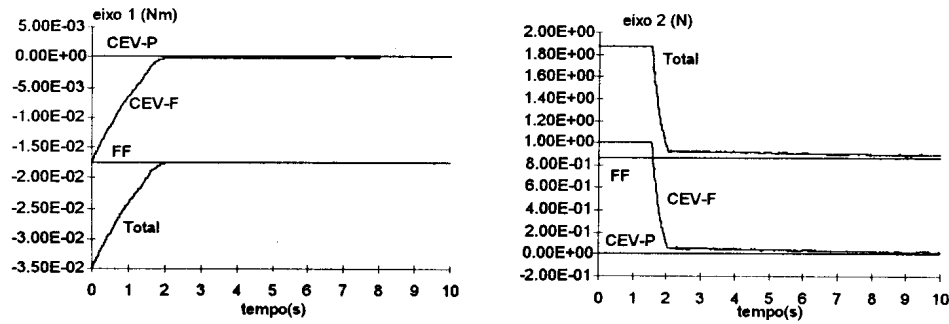


Figura 12 - Binários para o CH sob acção dos CEV's nos anéis de posição e força ($K_p = 9 \times 10^4$ N/m).

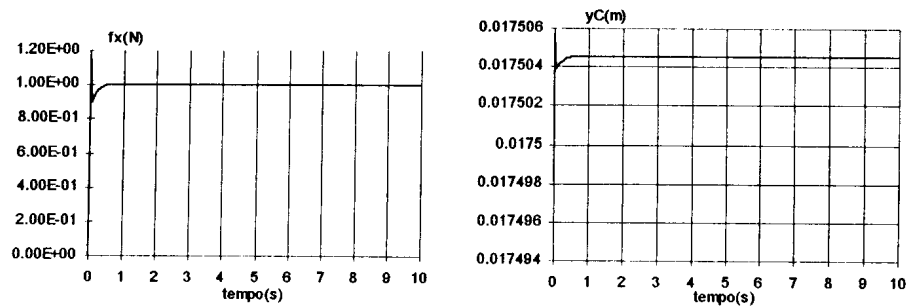


Figura 13 - Resposta (f_x e y_C) do CH com a modificação da pseudo-inversa e CEV's para $f_{Cd} = 1$ N, $f = 1$ kHz, $K_p = 9 \times 10^4$ N/m e parâmetros $\tau_{max1} = 1$ Nm, $\tau_{max2} = 5$ N, $\Delta_1 = 1$, $\Delta_2 = 0.5$ e $c = 0.1$.

5. Conclusão

O algoritmo de CH tem por princípio de funcionamento a projecção em planos ortogonais das componentes a controlar em posição e em força. No entanto, existe pouca experiência sobre inúmeros aspectos, tais como a sua robustez e estabilidade. Neste artigo estudou-se este problema e desenvolveu-se um CEV que ultrapassa parte das limitações exibidas pelo CH baseado em acções de controlo PID e PI clássicas. Assim, este artigo contribui para a extensão das arquitecturas de controlo a vários tipos de variáveis e para o desenvolvimento de sistemas integrando múltipla informação sensorial.

Referências

- [1] M. T. Mason, "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 11, No. 6, pp. 418-432, 1981.
- [2] M. H. Raibert e J.J. Craig, "Hybrid Position/Force Control of Manipulators", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 102, No.2, pp. 126-133, 1981.
- [3] W. D. Fisher e M. S. Mujtaba, "Sufficient Stability Condition for Hybrid Position/Force Control", Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Nice-France, pp. 1336-1341, 1992.
- [4] T. Yoshikawa, "Foundations of Robotics – Analysis and Control", The MIT Press, Cambridge-Massachusetts, London-England, 1990.
- [5] V. I. Utkin, "Variable Structure Systems with Sliding Modes", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 22, pp. 212-222, 1977.
- [6] K.-K. D. Young, "Controller Design for a Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 8, No. 2, pp. 101-109, 1978.
- [7] J. A. T. Machado e J. L. M. de Carvalho, "A Smooth Variable Structure Control Algorithm for Robot Manipulators", Proc. of the IEE Int. Conf. on CONTROL, Oxford-UK, 1988.