



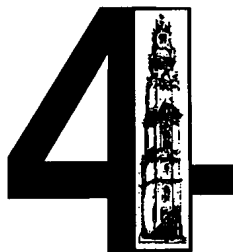
**4^{as} JORNADAS LUSO-ESPANHOLAS
DE
ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA**

**ACTAS
Volume 3**

PORTO, 6 - 8 JULHO 1995



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



CONTROLO DE ESTRUTURA VARIÁVEL DE MANIPULADORES COM FOLGAS E FLEXIBILIDADE NOS EIXOS

J.A. Tenreiro Machado

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Dep. Eng. Electrotécnica e de Computadores, 4099 Porto Codex, Portugal

RESUMO

Este artigo estuda o controlo de manipuladores com folgas e flexibilidade nos eixos através de um controlador com estrutura variável (CEV). O algoritmo é composto por um modelo de referência, a partir do qual se calcula a superfície de deslizamento, e por uma acção de controlo, que obriga o sistema a seguir o modelo considerado. No primeiro bloco estuda-se a adopção de modelos de primeira e segunda ordem (MPO's e MSO's). No segundo bloco estuda-se uma acção de controlo proporcional *versus* saturação. Com esta estratégia elimina-se a fase de aproximação e a frequência de comutação existente na fase de deslizamento. Para um manipulador com eixos rígidos um CEV associado a um MPO clássico mostra-se suficiente sendo, assim, desnecessária a adopção de um MSO. No entanto, na presença de folgas ou de flexibilidade nos eixos, o MPO revela-se instável ao passo que o CEV associado ao MSO apresenta um bom desempenho e elevada robustez.

Palavras-chave: Robots, manipuladores, controlo, flexibilidade, folgas.

1. Introdução

Os manipuladores robóticos são sistemas que apresentam fenómenos dinâmicos complexos e de natureza não-linear. Devido a esta razão, os controladores lineares revelam um desempenho muito limitado. No sentido de obter um sistema mais eficiente têm sido propostos controladores não-lineares e controladores adaptativos. No entanto, o peso computacional destes algoritmos é de tal modo elevado que tem condicionado a sua aplicação a realizações industriais. Uma estratégia alternativa consiste na adopção de controladores de Estrutura Variável (CEV's) que não requerem um modelo matemático preciso, que apresentam um peso computacional reduzido e que revelam uma boa robustez face a variações dos parâmetros do sistema [1-5]. Para um manipulador sob a acção de um CEV, cada eixo é condicionado a seguir uma referência que consiste num Modelo de Primeira Ordem (MPO). As trajectórias resultantes apresentam duas partes distintas: a fase de aproximação e a fase de deslizamento. Na primeira fase não existe a garantia de convergência ao passo que na segunda se verifica uma frequência de comutação devido à acção de controlo (discreta no tempo) que pode excitar as ressonâncias da estrutura mecânica. O presente artigo analisa o desempenho CEV's no controlo de manipuladores que exibem fenómenos dinâmicos complexos nos respectivos eixos. Nesta ordem de ideias, a secção 2 introduz os conceitos fundamentais relativos aos CEV's e desenvolve um algoritmo de controlo composto por dois blocos: um Modelo de Segunda Ordem (MSO) e uma acção de controlo proporcional e integral (PI) com saturação [6]. A secção 3 analisa o desempenho de CEV's que adoptam MPO's e MSO's. Os resultados obtidos para um robot com eixos rígidos mostram que o CEV-MPO é suficiente. Todavia, verifica-se que na presença de fenómenos dinâmicos adicionais, como é o caso de eixos flexíveis ou eixos com folgas, é

necessário um CEV-MSO dada a sua superior robustez. Por último, na secção 4 apresentam-se as principais conclusões que decorrem deste trabalho.

2. O Controlador de Estrutura Variável

Esta secção desenvolve um CEV constituído por dois blocos principais. Na subsecção 2.1 introduzem-se os conceitos fundamentais subjacentes aos CEV's e estuda-se o primeiro bloco do algoritmo, que consiste num modelo de referência. Nesta perspectiva, ponderam-se as vantagens e os inconvenientes que resultam da adopção de MPO's e de MSO's. Na subsecção 2.2 desenvolve-se o segundo bloco do algoritmo representado por uma acção de controlo "suavizada". Assim, tendo por base os fenómenos dinâmicos dos robots, estabelece-se uma acção de controlo que corresponde a um algoritmo PI clássico acompanhado de um efeito de saturação.

2.1. O Modelo de Referência

Nos CEV's clássicos cada eixo é condicionado a seguir um MPO da forma:

$$\sigma_i = \dot{e}_i + \zeta_i e_i = 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (1a)$$

$$e_i = q_{di} - q_i \quad (1b)$$

onde n é o número de graus de liberdade, $\{q_{di}, \dot{q}_{di}\}$ e $\{q_i, \dot{q}_i\}$ são, respectivamente, as posições e as velocidades desejadas e reais da junta i , ζ_i é o valor próprio que determina a fase de deslizamento e e_i é o erro de posição. Uma vez estabelecido um modelo de referência, o CEV implementa um algoritmo que "força" o manipulador a seguir a equação (1). Usualmente a acção de controlo $u(t)$ é da forma:

$$u = u[\text{sgn}(\sigma)] \quad (2)$$

onde σ_i representa a superfície de deslizamento e $\text{sgn}(\)$ é a função sinal. Quando a acção de controlo satisfaz a condição $\sigma_i \dot{\sigma}_i < 0$, então a estabilidade assintótica fica garantida. No entanto, a condição (1) implica trajectórias descontínuas no plano de fase (PF), impossíveis de seguir pelas inércias do manipulador. Este facto leva à existência de uma trajectória de aproximação no PF, desde a condição inicial até ao deslizamento, que é sensível a perturbações. Por outro lado, durante a fase de deslizamento o controlador tem que provocar trajectórias fortemente convergentes para σ_i o que, devido ao tempo não nulo de cálculo, dá origem a uma frequência de comutação que pode excitar as ressonâncias da estrutura mecânica. Deste modo, constata-se que o modelo de mais baixa ordem, compatível com a dinâmica de um manipulador, deve ser da forma:

$$\sigma_i = \ddot{e}_i + 2\xi_i \omega_{ni} \dot{e}_i + \omega_{ni}^2 e_i = 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

onde ξ_i e ω_{ni} são, respectivamente, o coeficiente de amortecimento e a frequência natural não-amortecida do eixo i . Neste caso, as trajectórias no plano de fase são contínuas de acordo com a expressão:

$$\left[\frac{\dot{q}_i(t) - \zeta_{1i} q_i(t)}{\dot{q}_i(0) - \zeta_{1i} q_i(0)} \right]^{\zeta_{1i}} \left[\frac{\dot{q}_i(t) - \zeta_{2i} \dot{q}_i(t)}{\dot{q}_i(0) - \zeta_{2i} \dot{q}_i(0)} \right]^{-\zeta_{2i}} = 1, \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

onde ζ_{1i} e ζ_{2i} são os valores próprios (para se obter uma resposta sobre-amortecida) de (3). Assim, existe sempre uma trajectória no PF que contém o ponto $\{q_i(0), \dot{q}_i(0)\}$ (i.e. o estado inicial do sistema), pelo que fica eliminada a fase de aproximação e os problemas de convergência a ela associados.

A aplicação do modelo de referência num sistema digital, com uma frequência de cálculo f finita, provoca um atraso da acção de controlo e problemas adicionais nas trajectórias do sistema no PF. Quando se adopta um MPO, a acção de controlo $u(t)$ provoca trajectórias convergentes para a referência (1), que é única. Como já foi referido, a transição de estado ideal seria instantânea e descontínua mas, para um robot, a trajectória real é contínua e a aproximação de (1) demora algum tempo. A existência deste fenómeno, quer para $\sigma_i < 0$ quer para $\sigma_i > 0$, provoca o aparecimento de uma oscilação em torno de (1) que é nefasta para a estabilidade do sistema e para a fiabilidade dos actuadores. Por outro lado, quando se adopta um MSO, existe sempre uma trajectória “suave” que, no PF, passa pelo estado actual do sistema e o conduz de acordo com a referência. Assim, é possível definir uma trajectória que adopta $\{q(j), \dot{q}(j)\}$ como condição inicial de acordo com a expressão:

$$\left[\frac{\dot{q}_i(t) - \zeta_{1i} q_i(t)}{\dot{q}_i(j) - \zeta_{1i} q_i(j)} \right]^{\zeta_{1i}} \left[\frac{\dot{q}_i(t) - \zeta_{2i} \dot{q}_i(t)}{\dot{q}_i(j) - \zeta_{2i} \dot{q}_i(j)} \right]^{-\zeta_{2i}} = 1, i = 1, \dots, n \quad (5a)$$

$$f^{-1}j \leq t \leq f^{-1}(j+1) \quad (5b)$$

Comparando o MSO com o MPO clássico, conclui-se que o MSO dá lugar a respostas com uma maior “suavidade” e apresenta uma maior estabilidade. Em contrapartida, o MSO requer um sinal de aceleração o que faz apelo a acelerómetros ou a um algoritmo de diferenciação discreta que pode apresentar problemas de sensibilidade a ruídos.

2.2. O Algoritmo de Controlo

No tocante ao segundo bloco do CEV, desenvolveu-se um algoritmo que, conjuntamente com (2), providencia trajectórias “suaves”, isto é, sem a frequência de comutação referida. Sabe-se que a dinâmica de um manipulador obedece às equações:

$$T = J(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) \quad (6)$$

onde $J(q)$ é a matriz das inércias, $C(q, \dot{q})$ representa os binários Coriolis/centrípetos e $G(q)$ são os binários gravitacionais. Como o vector $C(q, \dot{q}) + G(q)$ contém somente funções contínuas, e as variáveis $q(t)$, $\dot{q}(t)$ são contínuas no tempo, os binários nos eixos T devem apresentar uma componente “suave” T_s . Por outro lado, T pode apresentar descontinuidades devido à componente inercial $J(q)\ddot{q}$. Consequentemente, a acção de controlo deve providenciar as duas componentes, o que é conseguido com o algoritmo ($i = 1, \dots, n$):

$$T_{VSSi} = \begin{cases} D_i \operatorname{sgn}(\sigma_i) & \text{se } \operatorname{abs}(\sigma_i) \geq \delta_i \\ (D_i/\delta_i)\sigma_i & \text{se } \operatorname{abs}(\sigma_i) < \delta_i \end{cases} \quad (7a)$$

$$T_s(j) = T_s(j-1) + K T_{VSS}(j) \quad (7b)$$

$$T(j) = T_s(j) + T_{VSS}(j) \quad (7c)$$

onde K é uma matriz (diagonal) de ganhos. Os parâmetros δ_i e D_i definem o bloco proporcional *versus* saturação da junta i , tal que D_i/δ_i é o ganho da zona proporcional e D_i é a saída da saturação.

Alternativamente, o algoritmo (7) pode ser interpretado como a integração de uma acção PI clássica num esquema de estrutura variável. Assim, a não-linearidade (7a) corresponde a um bloco de ganho variável que “ajusta” a acção de controlo de acordo com a amplitude do sinal erro. Para valores pequenos do erro, que resultam do “normal” funcionamento do sistema, o bloco apresenta um ganho apreciável. Para erros elevados, resultantes de um planeamento de trajectória “insatisfatório”, o bloco reduz o ganho a fim de evitar acções de controlo muito exageradas. Nesta perspectiva, o algoritmo (7)

segue também alguns estudos que investigam acções de correcção através de não-linearidades do tipo saturação [7-8].

3. Controlo de Manipuladores com Flexibilidade e Folgas nos Eixos

Nesta secção analisa-se o desempenho do CEV correspondente ao algoritmo (7), adoptando MPO's e MSO's de acordo com as expressões (1) e (3), respectivamente. A fim de testar a robustez dos controladores, consideraram-se, neste estudo, três casos com complexidade dinâmica crescente:

- O robot 2R ideal, isto é., com eixos rígidos (Fig. 1a)
- O robot 2R com eixos flexíveis (Fig. 1b)
- O robot 2R com folgas nos eixos (Fig. 1c)

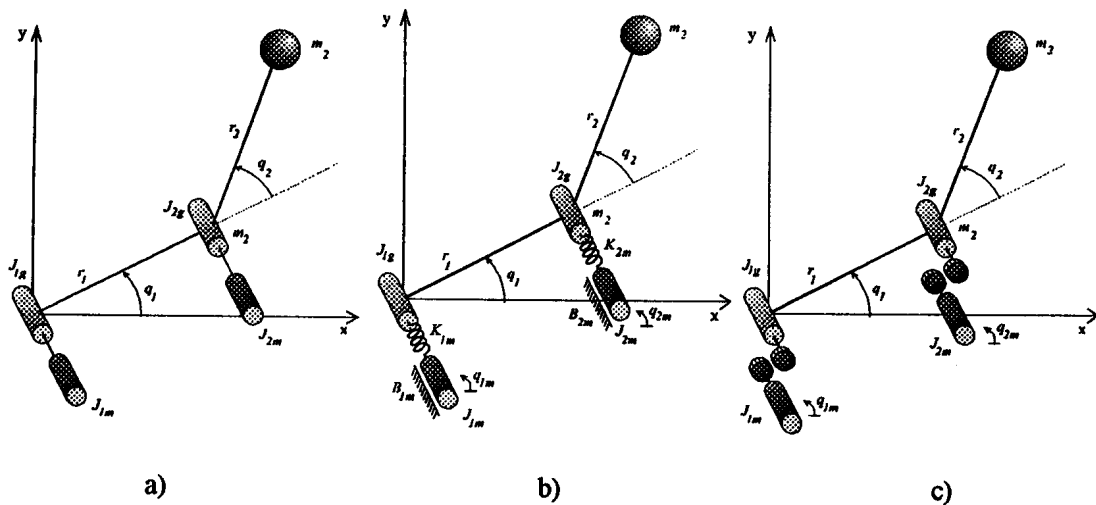


Figura 1 - Robot 2R com:
a) Eixos ideais (*i.e.* rígidos)
b) Eixos flexíveis
c) Folgas nos eixos.

A dinâmica do robot 2R ideal é dada pela equação diferencial não-linear (6) tal que:

$$J(q) = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)r_1^2 + m_2r_2^2 + 2m_2r_1r_2C_2 + J_{1m} + J_{1g} & m_2r_2^2 + m_2r_1r_2C_2 \\ m_2r_2^2 + m_2r_1r_2C_2 & m_2r_2^2 + J_{2m} + J_{2g} \end{bmatrix} \quad (8a)$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_2r_1r_2S_2\dot{q}_2^2 - 2m_2r_1r_2S_2\dot{q}_1\dot{q}_2 \\ m_2r_1r_2S_2\dot{q}_1^2 \end{bmatrix} \quad (8b)$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} g(m_1r_1C_1 + m_2r_1C_1 + m_2r_2C_{12}) \\ gm_2r_2C_{12} \end{bmatrix} \quad (8c)$$

onde $C_i = \cos(q_i)$, $C_{ij} = \cos(q_i + q_j)$ e $S_i = \sin(q_i)$. Neste caso, T_m , o binário fornecido pelos actuadores, é idêntico ao binário T transmitido à estrutura do robot, resultando a equação:

$$T_m = T \quad (9)$$

Para o caso do robot 2R com flexibilidade nos eixos, o modelo dinâmico (6)-(8) deve incluir os fenómenos adicionais [9-10]. Assim, o binário motor T_m , fornecido pelos actuadores, e o binário T que chega aos eixos da estrutura do robot, obedecem agora às equações:

$$T_m = J_m \ddot{q}_m + B_m \dot{q}_m + K_m (q_m - q) \quad (10a)$$

$$T = K_m (q_m - q) \quad (10b)$$

onde J_m , B_m e K_m são as matrizes $n \times n$ diagonais que modelizam a inércia, o atrito viscoso e a flexibilidade na transmissão.

Para o caso do robot 2R com folgas nos eixos [11-12], ocorrem choques dinâmicos entre as inércias das juntas J_{ii} e dos motores J_{im} . Pelo princípio da conservação da quantidade de movimento, as velocidades $\{\dot{q}_i, \dot{q}_{im}\}$ e $\{\dot{q}'_i, \dot{q}'_{im}\}$ das inércias da junta e do motor “antes” e “após” o choque são dadas por:

$$\dot{q}'_i = \frac{\dot{q}_i (J_{ii} - \varepsilon J_{im}) + \dot{q}_{im} J_{im} (1 + \varepsilon)}{J_{ii} + J_{im}} \quad (11a)$$

$$\dot{q}'_{im} = \frac{\dot{q}_i J_{ii} (1 + \varepsilon) + \dot{q}_{im} (J_{im} - \varepsilon J_{ii})}{J_{ii} + J_{im}} \quad (11b)$$

onde ε é a constante de Newton que define o grau de elasticidade do choque ($\varepsilon = 0$ choque plástico, $\varepsilon = 1$ choque elástico).

Nas experiências com os três sistemas robóticos, decidiu-se adoptar valores numéricos (Tabela I) idênticos aos usados por outros investigadores [2-3]. Numa perspectiva similar, o CEV é solicitado a conduzir o robot do estado inicial:

$$[q_1(0), \dot{q}_1(0), q_2(0), \dot{q}_2(0)]^T \equiv [-2.784, 0, -1.204, 0]^T \quad (12)$$

para o estado final:

$$[q_1(\infty), \dot{q}_1(\infty), q_2(\infty), \dot{q}_2(\infty)]^T \equiv [0, 0, 0, 0]^T \quad (13)$$

Tabela I - Parâmetros do robot 2R

i	m_i	r_i	J_{im}	J_{ig}	B_{im}	K_{im}
1	0.5	1.0	1.0	4.0	10^2	$2 \cdot 10^4$
2	6.25	0.8	1.0	4.0	10^2	$2 \cdot 10^4$

Após algumas experiências com o robot 2R ideal e uma frequência de amostragem $f = 2 \cdot 10^3$ Hz, os parâmetros do CEV-MSO foram ajustados para os valores indicados na Tabela II. Para proceder a uma comparação, no caso de um CEV-MPO decidiu-se atribuir como valor próprio o valor dominante do caso anterior, ou seja:

$$\zeta_i = \text{Valor Proprio Dominante } (\zeta_{1i}, \zeta_{2i}), \quad i = 1, 2 \quad (14)$$

A Fig. 2 mostra as trajectórias, no PF, do robot 2R ideal sob a acção dos CEV-MSO e CEV-MPO. Neste caso, conclui-se que o MSO é desnecessário já que o CEV-MPO apresenta um desempenho satisfatório.

Tabela II - Parâmetros do CEV

i	CEV-MSO					CEV-MPO			
	ζ_{1i}	ζ_{2i}	K_i	D_i	δ_i	ζ_i	K_i	D_i	δ_i
1	0.26795	3.73205	10^{-1}	10^2	10^2	0.26795	10^{-1}	10^6	10^2
2	1.33975	18.6602	10^{-1}	10^2	10^2	1.33975	10^{-1}	10^6	10^2

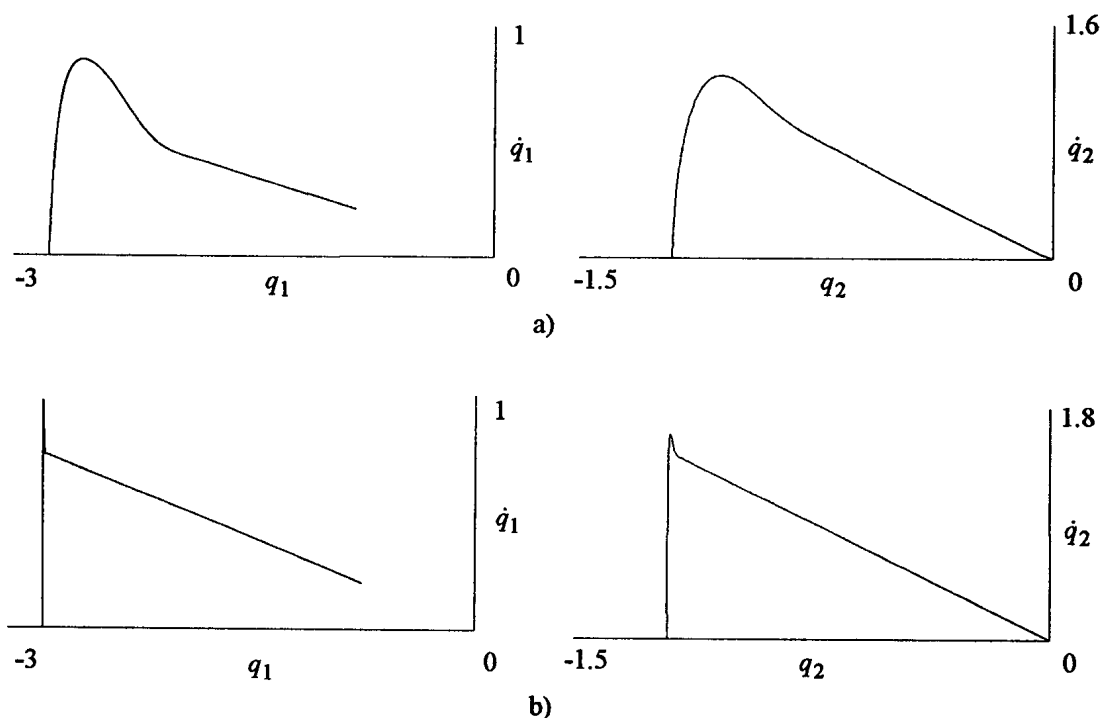


Figura 2 - Trajectórias no plano de fase para um robot 2R ideal (*i.e.* com eixos rígidos) sob a acção de:
a) CEV-MSO
b) CEV-MPO

De facto, a necessidade de um MSO só é sentida para modelos dinâmicos mais complexos como, por exemplo, para um robot com flexibilidade nos eixos (Fig. 3). Nesta experiência, o CEV-MSO, sintonizado com os parâmetros anteriores, apresenta um bom desempenho, ao passo que o CEV-MPO revela um comportamento fortemente instável. Assim, foi necessário proceder a um ajuste dos parâmetros fazendo $D_i = 10^4$ de modo a reduzir o ganho D_i/δ_i . Mesmo assim, as trajectórias do CEV-MPO representadas na Fig. 3 mostram, claramente, que o sistema se encontra perto do limite de estabilidade.

Por último, realizando a mesma experiência para o robot com folgas nos eixos, depara-se com a ocorrência de fenómenos de grande complexidade dinâmica, que se traduzem por uma difícil controlabilidade. Esta dificuldade é sentida particularmente para o caso de se considerar a existência de choques elásticos ($\varepsilon = 1$). No entanto, num caso real esta situação extrema não se verifica, sendo de prever uma perda de energia associada a cada choque. Assim, simulou-se o sistema para um choque caracterizado por uma constante de Newton com valor $\varepsilon = 0.9$ e uma folga $h = 0.1$ rad. As trajectórias no PF, representadas na Fig. 4, revelam, mais uma vez, o superior desempenho do CEV-MSO.

Os resultados das experiências efectuadas demonstram o excelente desempenho do CEV-MSO. Por outro lado, conclui-se os MPO's são suficientes para sistemas pouco exigentes, mas são incapazes de lidar adequadamente com fenómenos dinâmicos complexos.

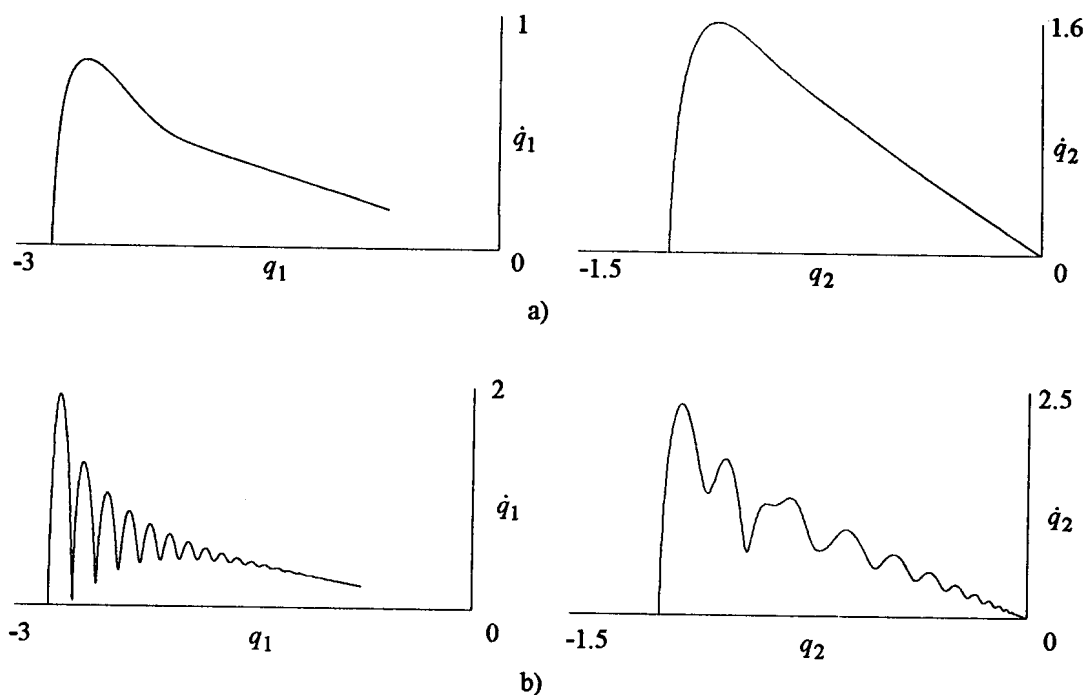


Figura 3 - Trajectórias no plano de fase para um robot 2R com flexibilidade nos eixos sob a acção de:
a) CEV-MSO
b) CEV-MPO

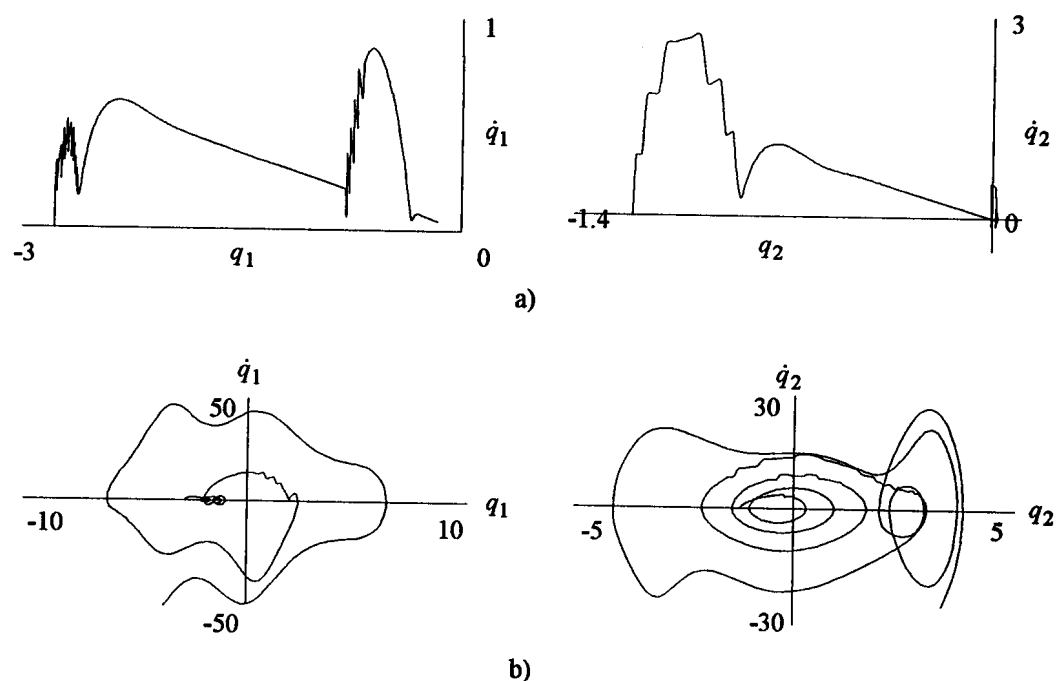


Figura 4 - Trajectórias no plano de fase para um robot 2R com folgas nos eixos sob a acção de:
a) CEV-MSO ($\epsilon = 0.9, h = 0.1$)
b) CEV-MPO ($\epsilon = 0.9, h = 0.1$)

4. Conclusões

Neste artigo estudou-se a adopção de modelos de primeira e segunda ordem em algoritmos de controlo de estrutura variável para vários sistemas dinâmicos. Para robots com transmissões ideais, isto é, com eixos rígidos, verificou-se que um CEV-MPO apresenta um desempenho capaz. Este tipo de sistema dinâmico tem sido objecto de intensa investigação e os resultados publicados estão de acordo com as experiências apresentadas. No entanto, a inclusão de fenómenos dinâmicos adicionais, como são os casos da flexibilidade e das folgas nos eixos, tem sido algo negligenciada pelos investigadores. O artigo debruça-se sobre este problema e revela que a consideração destes fenómenos é essencial para o desenvolvimento de controladores suficientemente robustos. De facto, as simulações demonstram que o CEV-MPO é incapaz de dar uma resposta adequada às exigências colocadas pelos novos fenómenos dinâmicos, ao passo que o CEV-MSO se revela consideravelmente mais robusto. Neste sentido, o presente estudo constitui uma contribuição para o desenvolvimento de novos algoritmos de controlo para sistemas exibindo fenómenos dinâmicos complexos tais como a flexibilidade e as folgas.

Referências

- [1] Vadim I. Utkin, "Variable Structure Systems With Sliding Modes", IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 22, pp. 212-222, April 1977.
- [2] Kar-Keung D. Young, "Controller Design for a Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. 8, pp. 101-109, Feb. 1978.
- [3] Russel G. Morgan e Umit Ozguner, "A Decentralized Variable Structure Control Algorithm for Robotic Manipulators," IEEE J. Robotics and Automation, vol. 1, pp. 57-65, March 1985.
- [4] Jean-Jacques E. Slotine, "The Robust Control of Robot Manipulators", The Int. J. Robotics Research, vol. 4, n. 2, pp. 49-64, Summer, 1985.
- [5] Hideki Hashimoto, Koji Maruyama e Fumio Harashima, "A Microprocessor-Based Robot Manipulator Control with Sliding Mode," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 34, pp. 11-18, Feb. 1987.
- [6] J. A. Tenreiro Machado e J. L. Martins de Carvalho, "A New Variable Structure Controller for Robot Manipulators," Third IEEE Int. Symp. on Intelligent Control, Arlington, Virginia, USA, 1988.
- [7] G. Honderd, B. C. Slegtenhorst e J. Hordijk, "Non-Linear and Adaptive Control of a Direct-Drive Motor for Robot Applications", European Conf. on Power Electronics and Applications, pp. 3.211-3.216, Brussels, 1985.
- [8] A. Lokshin e S. Lee, "The Robust Application of a Computer Torque Control to Manipulators Subject to Saturations," Proc. ACC, pp. 1786-1789, Atlanta, Georgia, 1988.
- [9] Mohammad M. F. Dado e A. H. Soni, "Dynamic Response Analysis of a 2-R Robot with Flexible Joints," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automat., USA, 1987.
- [10] J. A. Tenreiro Machado, "Variable Structure Control of Manipulators with Compliant Joints," IEEE Int. Symp. on Industrial Electronics, Budapeste, Hungria, 1993.
- [11] J.Y.S: Luh, William D. Fisher e Richard P.C. Paul, "Joint Torque Control by a Direct Feedback for Industrial Robots", IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 28, pp. 153-161, Feb. 1983.
- [12] Nichols G. Dagalakis e Donald R. Myers, "Adjustment of Robot Joint Gear Backlash," The Int. Journal of Robotics Research, vol. 4, n. 2, pp. 65-80, Summer 1985.