



Controle de vibrações de vigas flexíveis por meio do uso de liga de memória de forma

Vibration control of flexible beams through the use of shape memory alloy

Maria Clara Roesler Mota¹, Angelo Marcelo Tusset²

RESUMO

Hoje em dia e na última década, um volume considerável de literatura foi dedicado ao problema de controlar as manobras de um sistema com componentes estruturais flexíveis. O controle de articulação de uma estrutura flexível é importante no projeto de controle de futuros manipuladores industriais e uma variedade de estruturas espaciais, principalmente na melhoria do desempenho do manipulador. Neste trabalho, lidamos com os controles de posição e vibração de sistemas flexíveis de estrutura de articulação. O controle de posição é feito por meio de um sistema de controle não linear usando o método State Dependent Ricatti Equations (SDRE), que usa controle sub-ótimo e pesquisa de estabilidade local do sistema. Neste artigo, a vibração é controlada usando Liga de Memória de Forma (SMA) aplicada à estrutura flexível. A liga de memória de forma foi usada porque exhibe propriedades especiais, como efeito de memória térmica, pseudoelasticidade e altas capacidades de amortecimento. Simulações numéricas e resultados experimentais demonstram a eficácia da estratégia de controle proposta, incluindo erros paramétricos.

PALAVRAS-CHAVE: Controle SDRE; Controle de Slewing; Estruturas Espaciais Flexíveis; Liga de Memória de Forma.

ABSTRACT

Nowadays and in the past decade, a considerable volume of literature has been devoted to the problem of controlling the maneuvers of a system having flexible structural components. Slewing control of a flexible structure is important in the control design of future industrial manipulators and a variety of Space structures, mainly in the improvement of the manipulator performance. In this work, we deal with the position and vibration controls of flexible slewing structure systems. The position control is made through a non-linear control system by using the method of State Dependent Ricatti Equations (SDRE), which uses sub-optimal control and system local stability search. In this paper, the vibration is controlled using Shape Memory Alloy (SMA) applied to the flexible structure. Shape memory alloy was used because they exhibit special properties like thermal shape memory effect, pseudo-elasticity, and high damping capacities. Numerical simulations and experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed control strategy, including parametric errors.

KEYWORDS: SDRE Control, Slewing Control, Flexible Space Structures, Shape Memory Alloy.

1. INTRODUÇÃO

Grandes estruturas flexíveis são amplamente utilizadas em muitas aplicações, por exemplo, aplicações de estruturas robóticas e aeroespaciais. O problema que envolve deformação e/ou vibração em sistemas estruturais pode ser resolvido empregando técnicas de controle convencionais, como as usadas em atuadores convencionais (elétricos, hidráulicos e pneumáticos). Os motores de corrente contínua são atuadores populares para manipuladores leves, não apenas porque podem gerar uma ampla gama de torque e velocidade angular, mas também porque são silenciosos, limpos e eficientes. No entanto, esses atuadores acham difícil gerar energia suficiente quando seus tamanhos e pesos são, de alguma forma, reduzidos. Vários trabalhos

¹ Bolsista da Fundação Araucária. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. E-mail: mariamota@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 9543632798082987.

² Docente do Departamento de Matemática. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. E-mail: tusset@utfpr.edu.br ID Lattes: 1204232509410955.



foram apresentados na literatura atual sobre esse assunto, por exemplo, Garcia e Inman (1991) consideraram o controle de articulação de uma estrutura flexível ativa, examinando as equações governantes de movimento de um sistema integrado de atuador-estrutura composto por um torque de feixe de alumínio fino acionado por um motor elétrico controlado por armadura e acionado por um atuador piezocerâmico distribuído por partes. A abordagem deles ofereceu a vantagem de reduzir as demandas de tensão de pico no motor. Além disso, essa abordagem de estrutura ativa reduziu substancialmente a deflexão máxima da ponta do feixe. Fenili (2000) iniciou o estudo do comportamento dinâmico não linear de estruturas flexíveis em movimentos de articulação plana para pressupostos de curvatura não linear e linear.

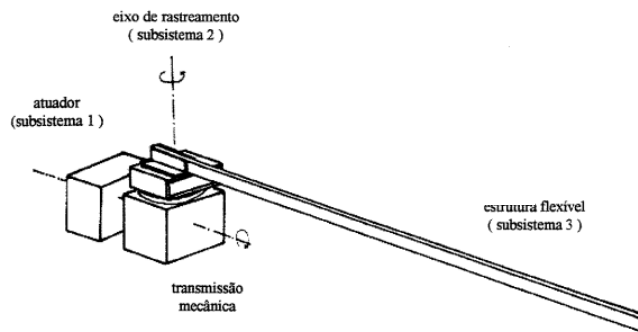
Hoje em dia, os atuadores não convencionais se tornaram uma alternativa levemente atraente aos atuadores convencionais e os mais promissores são aqueles baseados no efeito de memória de forma (EMF) de ligas metálicas e efeito piezoelétrico (PZE) de alguns materiais cerâmicos.

O objetivo deste presente trabalho é o estudo do problema de controle de vibrações em vigas flexíveis utilizadas em sistemas robóticos, considerando a utilização de atuador de liga de memória de forma (SMA). Sendo considerado neste trabalho um sistema robótico com um grau de liberdade.

2. METODOLOGIA

O sistema dinâmico cujo comportamento analisado neste trabalho consiste em um motor de corrente contínua (atuador) e uma estrutura flexível semelhante a uma viga giratória que deve ser movida. Um esquema geral desse sistema é mostrado na Fig. 1.

Figura 1 – Esquema de uma estrutura flexível giratória e sistema de atuador



Fonte: Fenili, 2000

As equações governantes de movimento para o sistema não linear e não ideal representado na Fig. 1 são derivadas do princípio estendido de Hamilton (Fenili e Balthazar, 2008):

$$\begin{aligned} \dot{v} &= -a_1 v - a_2 \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} &= -b_1 \dot{\theta} + b_2 v + b_3 \\ \ddot{z} &= -c_1 \dot{z} - c_2 z - c_3 \dot{\theta} + \dot{\theta}^2 z - c_4 \dot{\theta} \end{aligned} \quad (1)$$

Onde:

$$a_1 = \frac{R}{L_m}; \quad a_2 = \frac{K_b \beta}{L_m}; \quad b_1 = \frac{c \beta^2}{I_e + \beta^2 I_m}; \quad b_2 = \frac{\beta K_t}{I_e + \beta^2 I_m}; \quad b_3 = \frac{EI \phi''(0)}{I_e + \beta^2 I_m}; \quad c_1 = \mu; \quad c_2 = w^2; \quad c_3 = \alpha.$$



onde: L_m é a indutância do motor, R é a resistência do induzido do motor, K_b é a força contraeletromotriz constante do motor, I_e é a inércia associada ao eixo do motor, I_m representa a inércia das partes internas do motor, c representa o atrito interno do motor, K_t é a constante de torque do motor, E é o módulo de Young da viga, I é a inércia da seção transversal da viga, z representa a amplitude de vibração da viga, θ representa o deslocamento angular, v representa a corrente elétrica no induzido do motor, μ é o amortecimento estrutural da viga, w é a frequência natural da viga, ϕ são as formas vibratórias da viga, β representa a relação entre a viga e o motor, o termo $\theta^2 z$ é a rigidez centrípeta e $-c_1 \dot{z}$ representa o amortecimento estrutural da viga.

O sistema (1) pode ser representado em espaço de estados da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -a_1 x_1 - a_2 x_3 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ \dot{x}_3 &= -b_1 x_3 + b_2 x_1 + b_3 x_4 \\ \dot{x}_4 &= x_5\end{aligned}\tag{2}$$

$$\dot{x}_5 = -c_1 x_5 - c_2 x_4 + c_3 b_1 x_3 - c_3 b_2 x_1 - c_3 b_3 x_4 + x_3^2 x_4$$

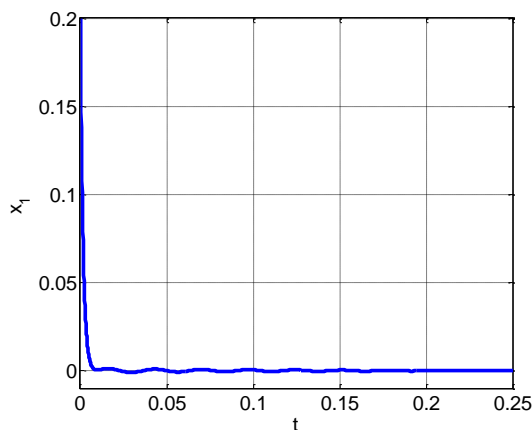
onde: $x_1 = v$, $x_2 = \theta$, $x_3 = \dot{\theta}$, $x_4 = z$ e $x_5 = \dot{z}$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

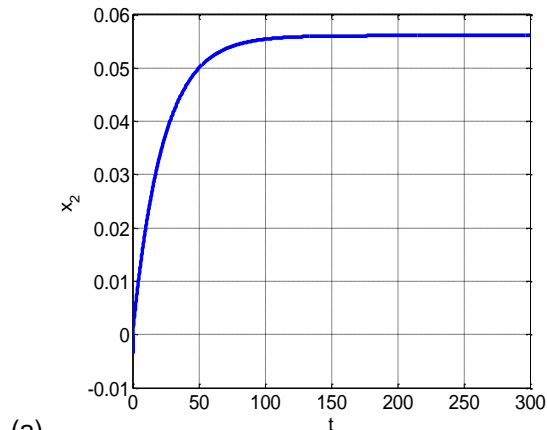
Para as simulações numéricas serão considerados os seguintes parâmetros: $c = 4,629 \cdot 10^{-3}$, $K_t = 5,281 \cdot 10^{-2}$, $K_b = 5,281 \cdot 10^{-2}$, $L_m = 3,1 \cdot 10^{-3}$, $R = 1,914952$, $I_m = 6,540 \cdot 10^{-5}$, $I_e = 6,540 \cdot 10^{-7}$, $L = 1,2$, $\mu = 0,1$, $E = 0,7 \cdot 10^{11}$, $I = 1,562 \cdot 10^{-13}$, $w = 11,3097$, $\varphi'' = 4,8984$, $\alpha = 0,821$, $\beta = 0,05$, $x_{10} = 0,2$, $x_{20} = 0,002$, $x_{30} = 0,1$ e $x_{40} = 0,001$.

Nas Figuras 2 são apresentados o comportamento do sistema (2) sem a utilização de controle de posição ou vibração.

Figura 2- (a) Corrente elétrica aplicada no motor. (b) Deslocamento angular do eixo do motor. (c) Deflexão da ponta da viga.



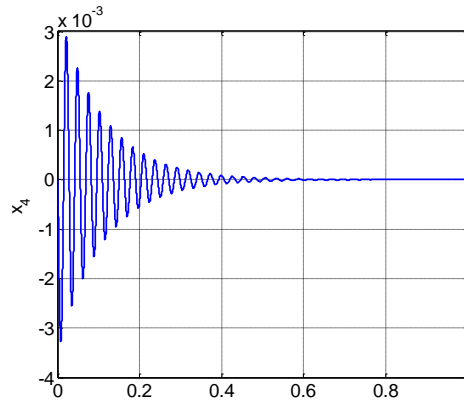
Fonte: Autor (2023)



(a)

Fonte: Autor (2023)

(b)



Fonte: Autor (2023)

Fonte: Autor (2023)

(c)

Controle de posição com o uso do Controle SDRE e controle de vibração com o uso da liga de memória

O modelo de liga de memória de forma utilizado neste trabalho considera o modelo polinomial proposto por Falk e considera uma energia livre na forma polinomial. O modelo polinomial considera tanto variáveis internas quanto um potencial de dissipação para descrever os efeitos de pseudoelasticidade e de memória de forma.

A forma de energia livre de Helmholtz (ψ) foi escolhida de tal maneira de que há pontos de mínimo e máximo representando estabilidade e instabilidade de cada fase da liga com memória de forma. Usualmente, no modelo unidimensional proposto para as ligas com memória de forma, Savi e Braga (1993), três fases são consideradas: austenita (A) e duas variantes da fase martensita ($+M$, $-M$). A energia livre é escolhida de tal forma, que para altas temperaturas ($T > T_A$), há somente um ponto de mínimo desaparecendo a deformação, representando o equilíbrio da fase austenítica. Por outro lado, em baixas temperaturas ($T_M < T$), a fase martensítica é estável e a energia deve ter dois pontos de mínimo desaparecendo a deformação. Para temperaturas intermediárias ($T_M < T < T_A$), a energia livre deve ter pontos de equilíbrio correspondendo a ambas as fases. Portanto, a energia livre é definida como uma equação polinomial do sexto grau, em que há pontos de mínimo e máximo representando cada fase de estabilidade e instabilidade das ligas. Logo, o potencial de energia livre é definido como sendo:

$$\rho\psi(\varepsilon, T) = \frac{1}{2}q(T - T_M)\varepsilon^2 - \frac{1}{4}b\varepsilon^4 + \frac{b^2}{24q(T_A - T_M)}\varepsilon^6 \quad (3)$$

Onde q e b são constantes positivas, T_A é a temperatura sobre a qual a fase austenítica é estável e T_M é a temperatura abaixo a qual a fase martensítica é estável. Assim, a equação constitutiva é dada por:

$$\sigma = q(T - T_M)\varepsilon - b\varepsilon^3 + \frac{b^2}{4q(T_A - T_M)}\varepsilon^5 \quad (4)$$

A grande vantagem do modelo polinomial proposto por Falk, diz respeito à sua simplicidade. Este modelo representa qualitativamente os efeitos de pseudoelasticidade e de memória de forma, sendo, portanto, representativo da física do problema estudado. Introduzindo o controle de posição u_1 , e a equação da liga de memória de forma (4) na equação (2) no sistema abaixo:



$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -a_1x_1 - a_2x_3 + d_1u_1 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ \dot{x}_3 &= -b_1x_3 + b_2x_1 + b_3x_4 \\ \dot{x}_4 &= x_5 \\ \dot{x}_5 &= -c_1x_5 - c_2x_4 + c_3b_1x_3 - c_3b_2x_1 - c_3b_3x_4 + x_3^2x_4 + \bar{b}x_4^3 - \bar{e}x_4^5 + d_2u_2\end{aligned}\quad (5)$$

Onde: $d_2 = -\bar{q}$ e u_2 é a variável de controle que depende da temperatura do SMA e dado por:

$$u_2 = (T - T_M)x_4 \quad (6)$$

Onde o sinal de controle (u_1) representa a voltagem aplicada aos terminais e (u_2) representa a variação na rigidez da viga.

Considerando a obtenção do sinal de controle u_1 e u_2 através do controle SDRE:

$$u = -R^{-1}(x)B^T(x)P(x)x \quad (7)$$

Sendo considerados os estados desejados X^* , e as matrizes A, B, Q e R:

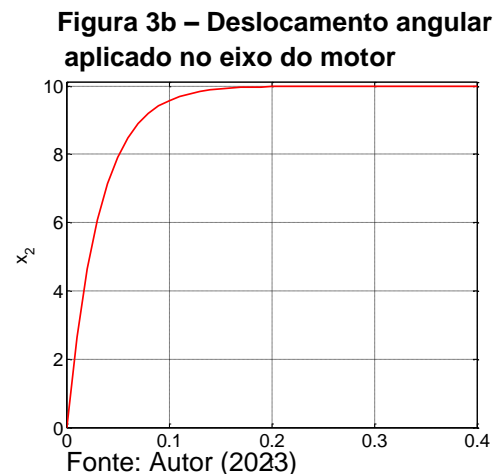
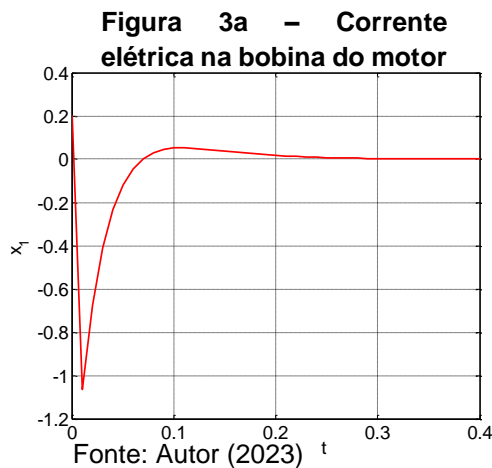
$$A(x) = \begin{bmatrix} -a_1 - x_2 & x_1 & -a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ b_2 & 0 & -b_1 & b_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -c_3b_2 & 0 & c_3b_1 & -c_2 - c_3b_3 + x_3^2 + \bar{b}x_4^2 - \bar{e}x_4^4 & -c_1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_m} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & d_2 \end{bmatrix} \text{ e } Q = 10^4 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10^3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ e}$$

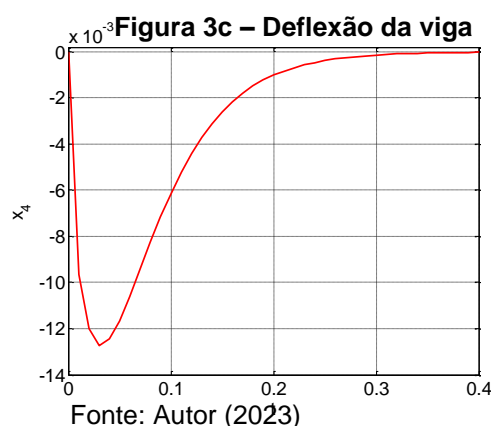
$$R = 10^{-4} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

A variação da temperatura aplicada no SMA pode ser obtida igualando (6) e (7):

$$T = \begin{cases} T_M & \text{for } x_4 = 0 \\ \frac{u_2}{x_4} + T_M & \text{for } x_4 \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

O comportamento do sistema (2) com controles (u_1) e (u_2) e parâmetros $q=1,56987$, $b=114367,3469$ e $e=7235491,366$, pode ser observado nas Figura 3.





2. CONCLUSÃO

Como pode ser observado nos resultados apresentados nas Figuras 2 e 3, o controle simultâneo da posição e da vibração da viga resultou em melhores resultados (Figura 3) do que o sistema sem controle (Figura 2). Os resultados demonstram que a utilização do SMA é uma alternativa para o controle de vibrações de elos de manipuladores robóticos, e que é possível controlar as tensões do SMA pelo controle de sua temperatura.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece a Fundação Araucária pela bolsa de IC recebida.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

BRINSON, L. C. Comportamento Constitutivo Unidimensional de Ligas com Memória de Forma: Derivação Termomecânica com Funções de Material Não Constantes e Variável Interna de Martensita Refinada. **Revista de Sistemas e Estruturas de Materiais Inteligentes**, v. 4, p. 229-242, 1993.

ELAHINIA, M.H.; AHMADIAN, M. Um modelo fenomenológico aprimorado para SMA: I. As deficiências dos modelos existentes. **Materiais e Estruturas Inteligentes**, v. 14, p. 1297-1308, 17 out. 2005.

FENILLI, A. Modelagem não linear de estruturas flexíveis giratórias: Abordagens ideais e não ideais. In: FENILLI, André. **Materiais e Estruturas Inteligentes**. 2014. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia, Universidade de Campinas, 2000.

FENILLI, A.; BALTHAZAR, J.M. Sobre a solução analítica para o sistema semelhante a uma viga flexível em giro: análise da parte linear do problema perturbado. **Jornal de mecânica teórica e aplicada**, v. 46, p. 51-68, 2008.