



Controle de Vibrações de uma Viga de Material Compósito Utilizando Desigualdades Matriciais Lineares

RESUMO

Willian Faria dos Santos
wfsantos92@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

Edson Hideki Koroishi
edsonh@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

O presente trabalho dedica-se a implementação de técnicas de controle ativo de vibração em uma viga de material compósito, no qual atuadores piezelétricos são acoplados a estrutura, formando assim o conceito de estrutura compósita inteligente. As técnicas de controle utilizadas foram o regulador quadrático linear convencional e via desigualdades matriciais lineares com a inserção de incertezas no modelo. As respostas do sistema foram analisadas no domínio do tempo (deslocamento e tensão utilizada pelos atuadores) e no domínio da frequência (função resposta em frequência). Os resultados obtidos foram satisfatórios para ambos controladores na atenuação da resposta, possibilitando uma expressiva redução no tempo de oscilação e também nos picos de da resposta em frequência.

PALAVRAS-CHAVE: Controle ativo de vibração. Estrutura compósita inteligente. Regulador quadrático linear. Desigualdades matriciais lineares.

INTRODUÇÃO

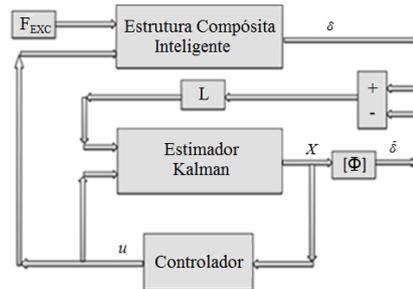
O conceito de estrutura inteligente, segundo Xinke e Haimin (2007), pode ser entendido como uma estrutura ou componente estrutural ligado ou incorporado a sensores e atuadores que permitem respostas simultâneas aos estímulos externos.

É proposto, no presente trabalho, o controle ativo de vibrações em uma viga de material compósito (na forma de viga engaste-livre), utilizando os controladores regulador linear quadrático (LQR do inglês, *Linear Quadratic Regulator*) convencional e via desigualdades matriciais lineares (LMI's do inglês, *Linear Matrix Inequalities*), sendo analisados os comportamentos da resposta dinâmica.

MÉTODOS

É abordada a técnica de controle ativo de vibração aplicado à uma viga compósito inteligente e sua forma esquemática é ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Controle ativo modal baseado na realimentação do controle no estado modal.



Fonte: Adaptado de Koroishi *et al.* (2014).

Na qual, $[L]$ é a matriz de ganho do estimador, δ corresponde ao deslocamento, $\hat{\delta}$ é o vetor de deslocamento estimado, X ao estado modal, F_{exc} a força externa e u o esforço de controle.

O controle LQR fornece um modo sistemático de cálculo da matriz de ganho de controle por realimentação de estado (Ogata, 2003). Para o sinal de controle a realimentação é dada pela equação (1):

$$\{u(t)\} = -[K_G]\{x(t)\} \quad (1)$$

O índice de desempenho J (equação (2)) deve ser minimizado levando em consideração da determinação da matriz de ganho $[K_G]$.

$$J = \int_0^{\infty} [\{x(t)\}^T [Q_{lqr} + K_G R_{lqr}] \{x(t)\}] dt \quad (2)$$

Na qual, $\{x(t)\}$ é o vetor de estados, $[Q_{lqr}]$ e $[R_{lqr}]$ matrizes hermitianas definida positiva ou simétrica real. A resolução do LQR via LMI's é demonstrado por Erkus e Lee (2004), onde o problema LQR/LMI é descrito pela equação (3):

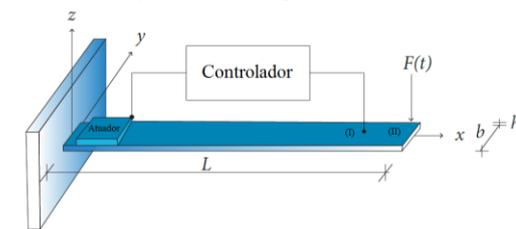
$$\min_x, P_{lmi}, X_{lmi} tr([Q_{lqr}][P_{lmi}]) + tr([X_{lmi}]) + tr([Y_{lmi}]N + tr([N]^T Y_{lmi}^T)) \quad (3)$$

Seendo $[P_{lmi}]$ uma matriz positiva definida, $[X_{lmi}]$ e $[Y_{lmi}]$ são as soluções da LMI, N a posição do vetor de ruído e $tr()$ denota o traço da matriz. O ganho do controlador é estimado pela equação (4):

$$[K_G] = [Y_{lmi}][P_{lmi}]^{-1} \quad (4)$$

A viga possui 306 [mm] de comprimento, 25,5 [mm] de largura e 1 [mm] de espessura, e é formada por 5 camadas de grafite/epóxi de espessura de 0,2 [mm], com as orientações de $[45^\circ / 0^\circ / 45^\circ / 0^\circ / 45^\circ]$ (Koroishi *et al.*, 2015). O atuador cerâmico piezelétrico está ligado ao topo da superfície da viga, a 1 [mm] de distância do engaste. A viga de estrutura compósita inteligente estudada neste trabalho é ilustrada na Figura 2.

Figura 2 – Viga de material compósito em engaste-livre com controle ativo de vibração.



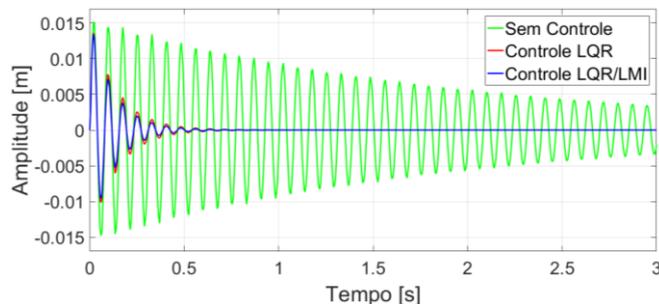
Fonte: Adaptado de Koroishi *et al.* (2015).

A força de excitação de carga 1 [N] foi aplicada no ponto (II) ilustrado na Figura 2 e as respostas no domínio do tempo foram capturadas no ponto (I). O atuador piezelétrico é conectado a um sistema de controle ativo, assim as amplitudes de vibração são minimizadas com o tempo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados obtidos é apresentada a partir da simulação numérica computacional no *software* MATLAB®. As respostas determinísticas da amplitude para o sistema sem controle, com controle LQR e LQR via LMI no domínio do tempo são apresentados na Figura 3.

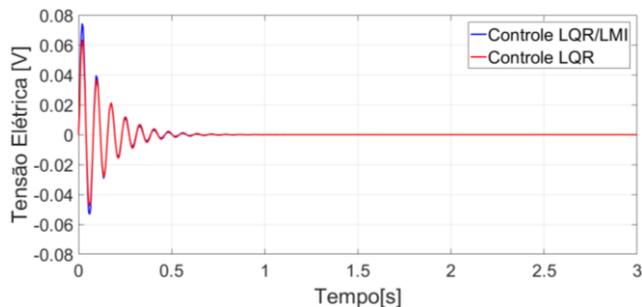
Figura 3: Resposta determinística da amplitude em função do tempo.



Fonte: Autoria própria (2017).

Nota-se que os resultados obtidos, na Figura 3, demonstram a atenuação dos níveis de oscilação em menos de 1[s]. O nível da tensão elétrica nos controladores é verificado na Figura 4.

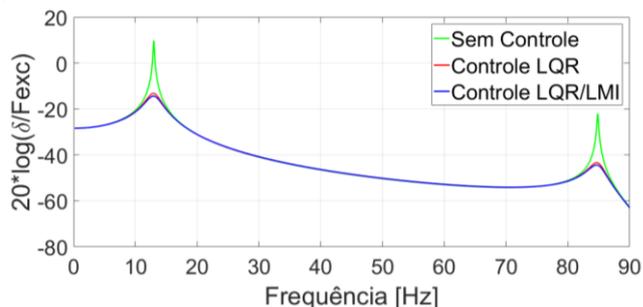
Figura 4: Tensão elétrica em função do tempo nos controladores.



Fonte: Autoria própria (2017).

Devido a aceleração da atenuação da resposta, o controlador LQR via LMI, consome inicialmente mais energia quando comparado ao LQR. A Figura 4 apresenta o gráfico da função resposta em frequência (FRF), considerando os dois primeiros modos da estrutura.

Figura 4: Função Resposta em Frequência (FRF) do sistema sem controle e controlado.



Fonte: Autoria própria (2017).

Para o primeiro e segundo modo, 13[Hz] e 84,9[Hz], respectivamente, observa-se uma atenuação de aproximadamente 23[dB] e 21,35[dB]. Já no controle LQR via LMI as atenuações foram 24,2 [dB] no primeiro modo e 22,4 [dB] no segundo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O controle LQR via LMI mostrou-se mais eficaz na atenuação da resposta, observa-se que a tensão elétrica consumida pelos controladores é dependente do comportamento da resposta, portanto, inicialmente necessitou de um maior gasto de energia. A obtenção da função resposta em frequência permitiu a determinação dos modos de vibrar da estrutura e mostrou que a técnica aplicada possibilitou reduções expressivas nos picos de frequência. De um modo geral, os resultados obtidos demonstraram que as técnicas de controle aplicadas foram validadas.

Vibration Control of a Beam of Composite Material Using Linear Matrix Inequalities

ABSTRACT

The present work aims at implement techniques of active vibration control to a beam of composite material, where the piezoelectric actuators are coupled to the structure, thus establishing a concept of intelligent structure. The control techniques used were conventional linear quadratic regulator and solved by linear matrix inequalities with the insertion of model uncertainties. The system's responses were analyzed in the time domain (displacement and voltage used by the actuators) and in the frequency domain (frequency response function). The applied control technique obtained satisfactory results for both controllers in the response attenuation, allowing an expressive reduction in the oscillation time and also in the frequency peaks.

KEYWORDS: Active Vibration Control. Intelligent composite structure. Linear Quadratic Regulator. Linear Matrix Inequalities.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação Araucária – Paraná/Brasil pelo suporte financeiro, o qual possibilitou a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ERKUS, B.; LEE, Y. J. **Linear matrix inequalities and MATLAB LMI toolbox**. In: University of Southern California Group Meeting Report, Los Angeles, California, 2004.

KOROISHI, E. H.; MOLINA, F. A. L.; FARIA, A. W.; STEFFEN, V. J. **Robust Optimal Control Applied to a Composite Laminated Beam**. Journal of Aerospace Technology and Management, v. 7, n. 1, p. 70-80, 2015, doi: 10.5028/jatm.v7i1.389.

KOROISHI, E.H.; BORGES, A.S.; CAVALINI JR, A.A.; STEFFEN JR, V. **Numerical and Experimental Modal Control of Flexible Rotor Using Electromagnetic Actuator**. Mathematical Problems in Engineering, v. 2014, n. 2014, p. 1-14, 2014. doi: 10.1155/2014/361418.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**, Prentice-Hall do Brasil, São Paulo, Brazil, p. 788, 2003.

XINKE, G.; HAIMIN, T. **Active vibration control of a cantilever beam using bonded piezoelectric sensors and actuators**. In: Electronic Measurement and Instruments. ICEMI'07. 8th International Conference on. IEEE, p. 4-85-4-88, 2007.

Recebido: 31 ago. 2017.

Aprovado: 02 out. 2017.

Como citar:

SANTOS, W. F.; KOROISHI, E. H. Controle de Vibrações de uma Viga de Material Compósito Utilizando Desigualdades Matriciais Lineares. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 22., 2017, Londrina. **Anais eletrônicos...** Londrina: UTFPR, 2017. Disponível em: <<https://eventos.utfpr.edu.br/sicite/sicite2017/index>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Willian Faria dos Santos

Avenida Santos Dumont, 278 apto 04, Centro, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil.

Direito autoral:

Este resumo expandido está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.

