

Desenvolvimento de um código computacional para análise de vibração por captura de imagem

Development of a computational code for vibration analysis by image capture

RESUMO

Giovanni Luiz Fredo
giovannifredo@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

Paulo Rogerio Novak
novak@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Brasil

Nas últimas décadas, houve um aumento significativo de pesquisas na área de técnicas de medição sem contato. A fotogrametria, que é uma dessas técnicas, tem recebido atenção especial devido a sua praticidade, já que necessita basicamente de uma câmera digital doméstica e um computador, e por sua capacidade de alcançar medições em toda uma estrutura. Este trabalho tem como objetivo comprovar o funcionamento de um código computacional desenvolvido no programa livre Scilab para análise de vibração por captura de imagem, utilizando como base a fotogrametria digital. Para isso, dois sistemas foram analisados. O primeiro consiste na captação do sinal de um pêndulo simples, comparando os resultados de frequência natural obtidos com um modelo teórico. O segundo consiste em um sistema mecânico de um grau de liberdade, do qual os resultados foram comparados com a resposta teórica alimentada a partir de dados obtidos por um sensor convencional de medição, neste caso foi utilizado um acelerômetro. O cálculo dos deslocamentos foi efetuado pelo algoritmo Correlação de Imagem Digital. Para ambos os sistemas foi constatada uma boa concordância nos deslocamentos, assim como a estimativa de frequência natural de cada um, da qual foram registradas diferenças de até 2,63%.

PALAVRAS-CHAVE: Fotogrametria. Acelerômetro. Deslocamentos. Frequência natural.

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



ABSTRACT

In the last decades, there has been a significant increase of researches in the area of non-contact measurement techniques. Photogrammetry, which is one of these techniques, has received special attention due to its practicality, as it requires basically one domestic digital camera and one computer, and due to its capability to achieve full-field measurement. The objective of this work is to verify the behavior of a computer code developed on the free software Scilab for vibration analysis by image capture, using as base the digital photogrammetry. For this, two systems were monitored. The first consists on the signal capture of a simple pendulum, comparing the achieved results of natural frequency with a theoretic model. The second one consists on a one degree of freedom mechanical system, which the achieved results were compared with the theoretic response fed with the data achieved from a conventional sensor of measurement, in this case an accelerometer was used. The computation of the displacements was made by algorithm Digital Image Correlation. For both systems a good agreement was detected in the displacements, as well as the estimation of each natural frequency, which were registered differences until 2,63%.

KEYWORDS: Photogrammetry. Accelerometer. Displacements. Natural frequency.

INTRODUÇÃO

A necessidade de uma manutenção adequada e de qualidade na indústria vem aumentando com o passar do tempo. É nesse pensamento que se encaixa a ideia deste trabalho, já que a análise de vibração é uma das técnicas mais utilizadas na manutenção preditiva.

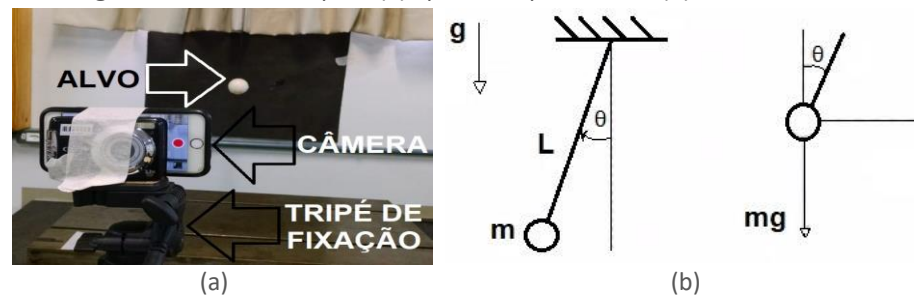
A análise por captura de imagem vem como uma alternativa de menor custo e mais simples quando comparada à métodos tradicionais de medição de vibração, como acelerômetros, já que não necessita de contato direto com a estrutura e para realizá-la necessita apenas de uma câmera digital comum e um computador.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um código computacional aplicado a análise de vibração por imagem utilizando a linguagem de programação do programa livre Scilab, assim como aplicar testes de comparação teórico experimental do processamento de imagem. Para os testes, dois sistemas foram analisados. O primeiro, a captação do sinal do pêndulo simples, comparando os resultados de frequência natural com um modelo teórico. O segundo, uma barra com uma mola acoplada, comparando os resultados obtidos com a resposta teórica alimentada a partir de um sensor tradicional de medição, um acelerômetro.

MATERIAL E MÉTODOS

Para o primeiro teste, um pêndulo simples foi montado no Laboratório de Vibrações da UTFPR Câmpus Pato Branco. Na Figura, 1 é mostrado o aparato experimental, assim como o esquema teórico do mesmo.

Figura 1 – Pêndulo simples: (a) aparato experimental; (b) modelo teórico.



Fonte: (a) autoria própria; (b) adaptada de Sotelo Jr. e França (2006).

O movimento do pêndulo pode se definir pelo ângulo θ (RAO, 2009), sendo descrito por uma função seno. Supondo vibração livre, que a barra de comprimento L possua uma massa desprezível e que não há dissipação de energia, aplica-se a segunda lei de Newton para translação e rotação, do qual se chega a Equação Diferencial Ordinária (EDO) demonstrada pela Eq. (1).

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \left(\frac{g}{L}\right) \text{sen}(\theta) = 0 \quad (1)$$

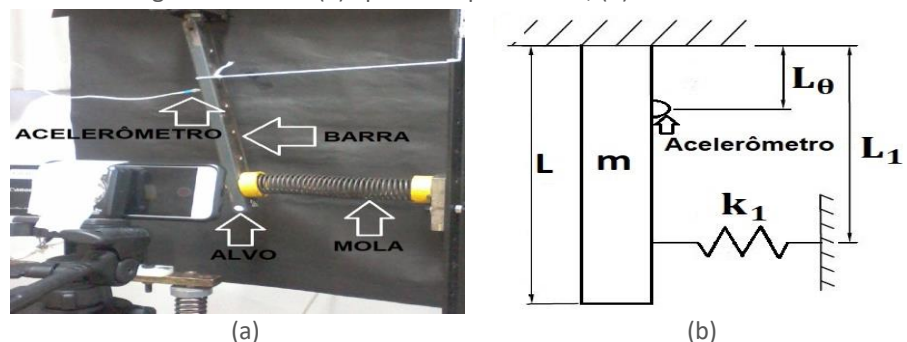
Considerando $\theta \ll 1$, faz-se a aproximação $\text{sen}(\theta) \cong \theta$. Portanto, substituindo na Eq. (1) e resolvendo a EDO, chega-se a Eq. (2), que define a frequência natural do pêndulo simples (f), dada em Hertz.

$$f = \sqrt{\frac{g}{L}} \frac{1}{2\pi} \quad (2)$$

Pela Eq. (2), nota-se que a frequência natural depende apenas da aceleração da gravidade $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ e do comprimento conhecido $L = 1,75 \text{ m}$. Foram realizadas medições em duas distâncias Δx diferentes entre alvo (bola de sinuca) e a câmera digital (celular), sendo elas 60 cm e 1,5 m, com o pêndulo tendo excitação manual. Para cada distância, duas excitações iniciais foram feitas, uma com o ângulo θ muito pequeno e outra com θ maior. Para cada caso um vídeo de 45 segundos foi gravado pela câmera de um celular iPhone, com gravação a 30 frames por segundo (fps) e resolução de imagem 1920 x 1080 pixels. Ressalta-se que as frequências naturais devem estar abaixo de 10 Hz, pois a câmera grava a 30 fps, ou 30 Hz, e pelo critério de Nyquist, a frequência de vibração do sistema monitorado deve ser menor que metade deste valor (PEDRINI; SHWARTZ, 2008). Todos os vídeos foram gravados com o flash da câmera ligado e as luzes apagadas. Para todos os casos, esperava-se uma frequência natural (f) de aproximadamente 0,38 Hz. Para o desenvolvimento do código e processamento das imagens, foi utilizado um notebook de processador AMD A10-5745M APU com Radeon(tm) HD Graphics de 2,10 GHz e memória RAM instalada 8,00 GB, e o aplicativo livre Scilab.

Para o segundo teste, uma barra rígida de comprimento $L = 400 \text{ mm}$, massa $m = 1,693 \text{ kg}$, foi posicionada na vertical conforme é mostrado na Figura 2, pinada em uma das pontas, com uma mola de rigidez $k_1 = 309,25 \text{ N/m}$ a uma distância $L_1 = 343 \text{ mm}$ da ponta superior e um acelerômetro a uma distância $L_\theta = 160 \text{ mm}$. O sistema foi colocado em movimento com excitação manual, monitorado com o acelerômetro e filmado ao mesmo tempo em duas situações: primeiro sem o uso do flash e luzes ligadas, e segundo com o uso do flash e luzes desligadas. Em ambos os casos a distância entre o alvo (barra) e a câmera foi de 50 cm e para cada situação um vídeo de 25 segundos foi gravado.

Figura 2 – Barra: (a) aparato experimental; (b) modelo teórico.



Fonte: autoria própria.

Como pode ser visto na Figura 2, um alvo foi demarcado a uma distância $L_0 = 382 \text{ mm}$ da ponta superior para a monitoria do movimento. Como no primeiro teste, um modelo teórico foi desenvolvido. Considerando o movimento da barra em vibração livre e que não há dissipação de energia no sistema, aplicou-se a segunda lei de Newton, do qual se chegou a EDO demonstrada pela Eq. (3).

$$I_0 \frac{d^2\theta}{dt^2} + \left((k_1 L_1^2) + \left(mg \frac{L}{2} \right) \right) \theta = 0 \quad (3)$$

Onde I_0 é o momento de inércia da barra, dado pela Eq. (4).

$$I_0 = \frac{mL^2}{3} \quad (4)$$

Supondo uma solução para a EDO do tipo $\theta(t) = \theta \cos(\omega t - \varphi)$, chega-se a conclusão que a frequência natural da barra (f) em Hertz, é dada pela Eq. (5).

$$f = \sqrt{\frac{(k_1 L_1^2) + (m g \frac{L}{2})}{I_0}} \frac{1}{2\pi} \quad (5)$$

Substituindo os valores mostrados na Eq. (5), chega-se a uma frequência natural do modelo teórico de 3,34 Hz. Usando as condições de contorno: aceleração inicial (a_0) indicada pelo acelerômetro e partindo do repouso, ou seja, velocidade inicial (v_0) igual a zero, obtém-se as constantes do modelo teórico, das quais o ângulo φ possui valor zero. Portanto, a solução é dada pela Eq. (6).

$$\theta(t) = -\frac{a_0}{\omega^2} \cos(\omega t) \quad (6)$$

Onde ω é o valor da frequência natural dada em rad/s, ou seja, $\omega = 2\pi f$. Esta equação representa o movimento em qualquer ponto da barra. Como o interesse é analisar o deslocamento no alvo, multiplicamos a Eq. (6) pela distância L_0 . O valor de frequência natural detectado pelo acelerômetro foi ($f = 3,005$ Hz), portanto ($\omega = 18,88$ rad/s) para ambos os casos.

Para o caso sem flash, o valor obtido pelo acelerômetro ficou $a_0 = 4,08$ m/s². Substituindo este e o valor de ω na Eq. (6), chega-se na Eq. (7), a qual descreve o deslocamento teórico do alvo em milímetros para este caso.

$$\theta(t) = -27,33 \cos(18,88t) \quad (7)$$

Como o deslocamento detectado pelo código no Scilab nos dá um resultado em pixels, foi feito um ajuste para que ambas as curvas ficassem na mesma unidade. Para isso, a raiz do valor quadrático médio das curvas experimentais e teóricas foi calculado, uma razão entre estes foi efetuada e então multiplicada na curva experimental. Após isto, uma Transformada Rápida de Fourier (FFT – Fast Fourier Transform) foi aplicada em ambas as curvas para chegar ao domínio da frequência do sistema.

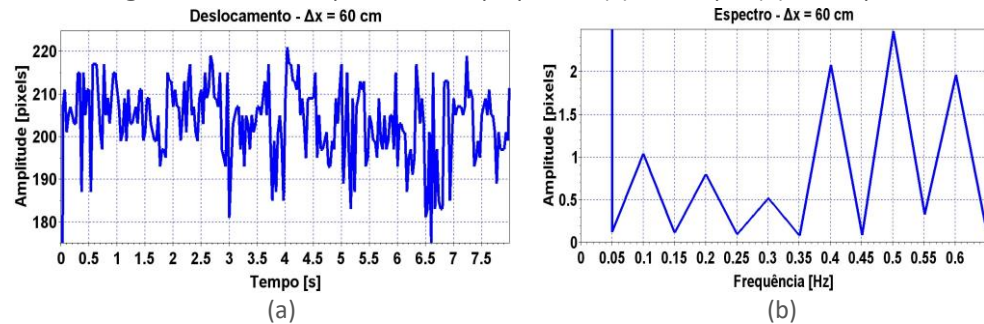
Para o caso com flash, o valor obtido foi $a_0 = 6,66$ m/s². Seguindo os mesmos, chega-se na Eq. (8), que demonstra o deslocamento para este caso.

$$\theta(t) = -44,60 \cos(18,88t) \quad (8)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

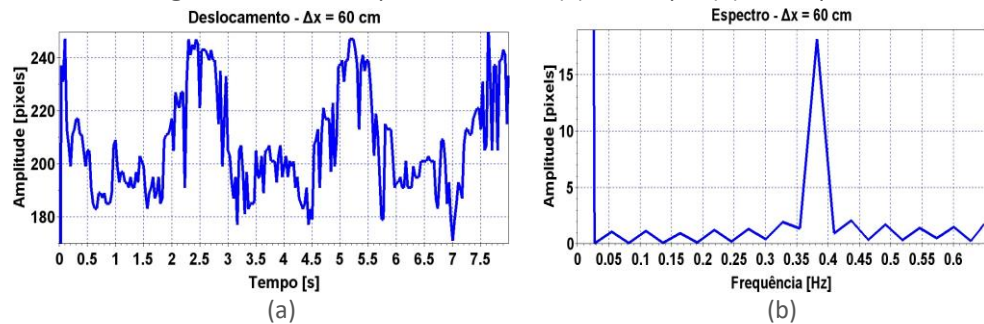
Nas Figuras 3, 4 e 5 são mostrados os resultados do primeiro teste. O intervalo de tempo analisado foi de 0 a 8,0 segundos e o intervalo de frequência foi de 0 Hz a 0,65 Hz. Nota-se pela Figura 3, que para pequenas oscilações a análise se mostrou ineficaz. Isso se deu pela ocorrência de uma sobreposição dos alvos devido a pequenas oscilações. Portanto não realizou-se o teste de pequenas oscilações para a outra distância. Pelos resultados, nota-se que a frequência natural (f) se deu em torno de 0,37 Hz para todos os casos de maiores oscilações, o que é bem próximo ao valor teórico.

Figura 3 – Resultado para θ muito pequenos: (a) no tempo; (b) na frequência.



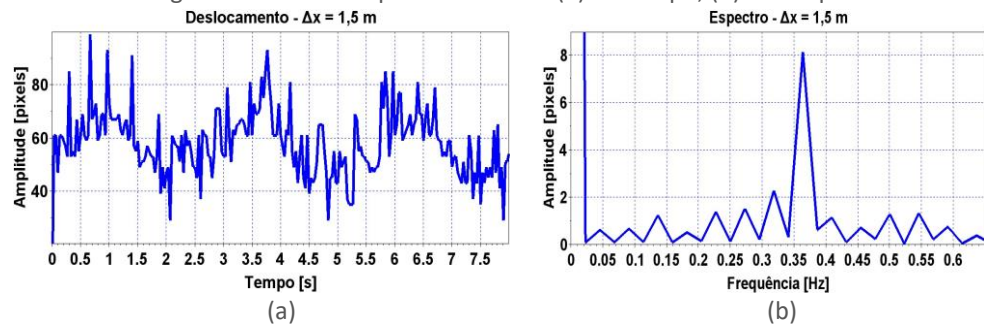
Fonte: autoria própria.

Figura 4 – Resultado para θ maiores: (a) no tempo; (b) na frequência.



Fonte: autoria própria.

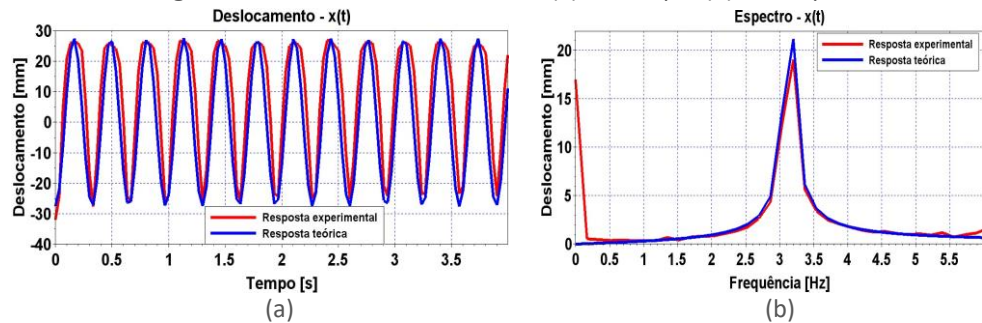
Figura 5 – Resultado para θ maiores: (a) no tempo; (b) na frequência.



Fonte: autoria própria.

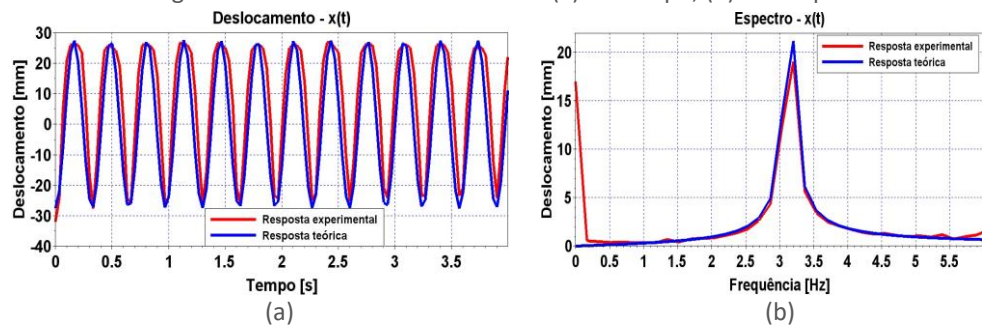
Nas Figuras 6 e 7, são mostrados os resultados do segundo teste, comparando os resultados do modelo teórico com a resposta experimental obtida com o código. Neste caso, o intervalo de tempo analisado foi de 0 a 4 segundos e o de frequência foi de 0 Hz a 6,0 Hz. Pelos resultados, nota-se que para ambos os casos a comparação teórico experimental do processamento de imagem possui concordância, principalmente quando observado o domínio da frequência, do qual a frequência natural (f) se deu em torno de 3,2 Hz. A diferença para o valor calculado analiticamente se deve ao fato do sistema ter sido considerado vibração livre, quando na verdade ocorreu um amortecimento.

Figura 6 – Resultado caso sem flash: (a) no tempo; (b) na frequência.



Fonte: autoria própria.

Figura 7 – Resultado caso com flash: (a) no tempo; (b) na frequência.



Fonte: autoria própria.

CONCLUSÃO

Com o primeiro teste, é possível afirmar que para oscilações muito pequenas este código não foi eficaz. Já para oscilações maiores, o mesmo mostrou-se consistente, chegando a 2,63% de diferença teórico experimental para frequência natural.

Com o segundo teste, conclui-se que o sinal sem flash se comportou de forma mais consistente do que o com flash, porém ambos os resultados de frequência natural foram satisfatórios, com até 0,63% de diferença teórico experimental.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Fundação Araucária, a Secretaria de Estado da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior do Paraná (SETI) e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo apoio para o desenvolvimento deste trabalho.



REFERÊNCIAS

PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. R. Análise de Imagens Digitais. **Princípios, Algoritmos e Aplicações**, São Paulo, 2008. Thomson.

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas**. 4 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.