



SỬ DỤNG CAMERA CHO MỤC ĐÍCH QUAN TRẮC VÀ PHÂN TÍCH ỨNG XỬ KẾT CẤU

Khúc Đăng Tùng¹, Nguyễn Ngọc Tuyền², Nguyễn Như Mai³

Tóm tắt: Quan trắc các ứng xử của kết cấu dưới tác động ngoại lực ngoài hiện trường là một công việc phức tạp, đắt tiền do phải đòi hỏi nhiều trang thiết bị cũng như các phương tiện hỗ trợ, đặc biệt cho các điểm đo khó tiếp cận. Bài báo này giới thiệu một phương pháp quan trắc mới có khả năng đo được chuyển vị động của công trình sử dụng camera đi cùng với công nghệ thị giác máy tính. Chuyển vị động của công trình có thể dùng cho việc tính toán chuyển vị tĩnh cũng như để xác định tần số dao động của kết cấu cho nhiều mục đích khác nhau, đặc biệt trong phân tích kết cấu và đánh giá sức khỏe công trình.

Từ khóa: Đánh giá sức khỏe công trình; chuyển vị động; camera; thị giác máy tính.

Summary: Structural health monitoring (SHM) is an interdisciplinary field to monitor structural behaviors for identifying abnormal performance or damage that may occur. Although acknowledged as a power tool for inspection and maintenance of existed civil structures, a SHM scheme is required complex and expensive equipment and implementation for obtaining structural responses. In this paper, a vision-based monitoring approach is introduced for monitoring structural displacements and natural frequencies, which can mitigate shortcomings of conventional measurement methods. Those obtained responses are then utilized for a structural identification study on a bridge model.

Keywords: Structural health monitoring; dynamic displacements; camera; computer vision.

Nhận ngày 6/7/2016, chỉnh sửa ngày 20/7/2016, chấp nhận đăng 20/8/2016



1. Giới thiệu chung

Trên thế giới hiện nay, đánh giá sức khỏe công trình (Structural Health Monitoring) là một chuyên ngành nghiên cứu sôi động nhất liên quan đến lĩnh vực kết cấu công trình và cơ sở hạ tầng. Tại Việt Nam, đánh giá sức khỏe công trình chưa được quan tâm đúng mức. Điều này dẫn đến thực trạng chất lượng công trình và cơ sở hạ tầng bị xuống cấp và giảm khả năng khai thác, đòi hỏi một lượng kinh phí lớn cho việc duy tu và khôi phục lại khả năng làm việc của các công trình đó. Một số nghiên cứu đã chứng minh rằng việc phát hiện sớm và kịp thời các hư hỏng nhỏ trong công trình sẽ tiết kiệm được khá nhiều chi phí so với việc sửa chữa lớn, duy tu, hoặc xây lại các công trình bị hư hỏng nặng [1, 2]. Chưa kể rằng, các công trình do chậm trễ sửa chữa dẫn đến sập đổ sẽ kéo theo nhiều thiệt hại và hệ lụy chẳng hạn như tính mạng con người, công việc chậm trễ, và giao thông gián đoạn. Các thiệt hại này hầu như khó có thể trực tiếp đo đếm được bằng tiền.

Xuất phát từ yêu cầu đó, khá nhiều phương pháp đánh giá sức khỏe công trình đã được tập trung nghiên cứu và đề xuất trong hai thập kỷ qua. Trong số các hướng nghiên cứu này, ứng dụng kỹ thuật thị giác máy tính (computer vision) và camera gần đây đã trở thành một hướng tiếp cận tiềm năng và nhận được nhiều sự quan tâm [3]. Một vài nghiên cứu liên quan đến quan trắc vết nứt và khuyết tật dưới bề mặt của bê tông cũng như bê tông nhựa mặt đường đã được thực hiện [4, 5]. Liên quan đến các ứng dụng đo đặc ứng xử của kết cấu công trình bao gồm cầu và nhà cao tầng, Lee và các đồng nghiệp đã sử dụng kỹ thuật nhận dạng điểm và đường bao của các đích ngắm (target) trên ảnh [6, 7]. Một nhánh nghiên cứu khác sử dụng công nghệ tương quan điểm ảnh (digital image correlation) cho các đích ngắm đã được tiến hành bởi nhiều tác giả [8, 9]. Gần đây, công nghệ quan trắc bằng camera đã đạt đến mức độ không cần các đích ngắm gắn trên kết cấu, điều này đã biến công nghệ đo đặc bằng camera trở nên tiện lợi hơn do hoàn toàn không yêu cầu phải tiếp cận điểm đo [10, 11]. Tại Việt Nam, sử dụng

¹TS, Khoa Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng. E-mail: tungkd@nuce.edu.vn.

²TS, Khoa Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng.

³ThS, Khoa Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng.

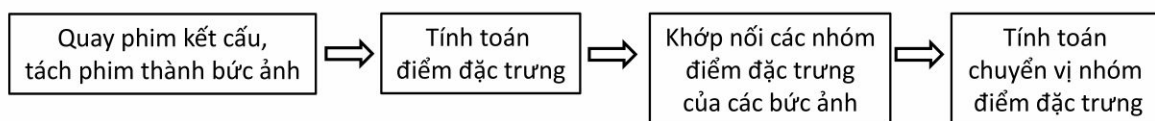
camera cho công tác đánh giá và kiểm định công trình hầu như chưa được nghiên cứu và đề xuất. Trong khi đó, phương pháp kiểm định này không yêu cầu phải có các hệ thống đầu đo (sensor) và bộ thu thập dữ liệu (Data Acquisition-DAQ) vốn dĩ rất đắt tiền và không tiện lợi khi sử dụng ngoài hiện trường do phải tiếp cận điểm quan trắc trên kết cấu, gắn các đầu đo và đầu nối dây. Chính vì vậy, nghiên cứu và ứng dụng camera cho mục đích đánh giá sức khỏe công trình tại Việt Nam sẽ mở ra một hướng tiếp cận hiệu quả và tiết kiệm, đặc biệt trong điều kiện nhiều cơ sở nghiên cứu cũng như cơ sở sản xuất chưa được trang bị (hoặc không có khả năng trang bị) các thiết bị đo đạc đắt tiền.

Trong phạm vi bài báo này, sự biến thiên ứng xử của kết cấu sẽ được quan trắc và phân tích sử dụng các camera và công nghệ thị giác máy tính. Đầu tiên, các chuyển vị động của kết cấu dưới tác động của tải trọng được đo đạc dựa trên quy trình theo dõi vị trí ảnh của kết cấu đó trong một chuỗi các hình liên tục (video clip). Tiếp theo đó, dữ liệu chuyển vị động của kết cấu được lọc đi toàn bộ phần chuyển vị tĩnh, trong khi giữ lại thành phần động cho mục đích tính toán các tần số dao động. Biên độ dao động và tần số dao động được xác định tương ứng với hai mô hình có các điều kiện biên khác nhau nhằm quan sát và đánh giá sự biến đổi của chúng. Các thí nghiệm đã được thực hiện trong phòng với sự trợ giúp của các camera phổ thông như GoPro3 và Iphone5.



2. Cơ sở lý thuyết

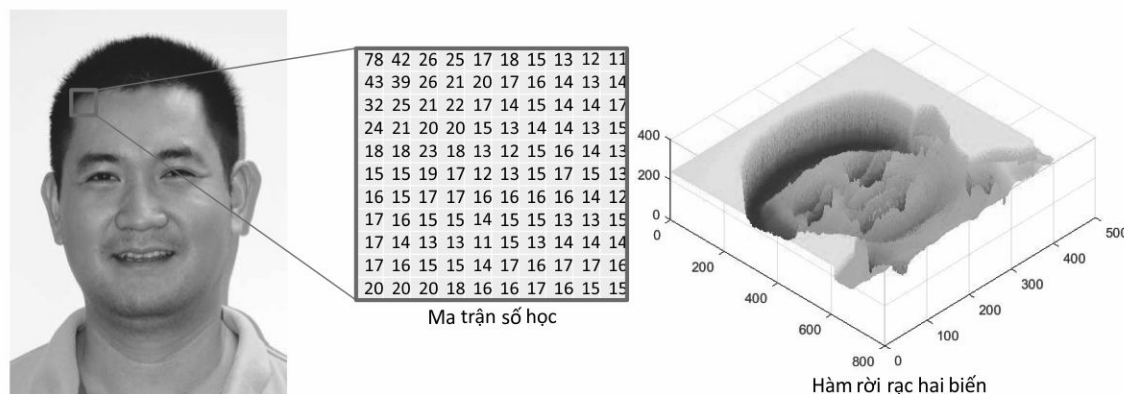
Quy trình đo chuyển vị động của kết cấu ứng dụng kỹ thuật thị giác máy tính được tiến hành theo các bước trên Hình 1. Các camera được sử dụng để quay phim kết cấu trong suốt quá trình gia tải. Tất nhiên, các camera phải được đặt trên hệ mặt bằng cố định, tránh rung động có thể ảnh hưởng xấu tới kết quả đo. Đoạn phim quay kết cấu sẽ được tách thành các bức hình riêng rẽ. Sau đó, hình ảnh của kết cấu trên từng bức hình sẽ được định vị bởi các điểm đặc trưng (image key-points). Để tính toán độ dịch chuyển của kết cấu giữa hai bức hình liên tiếp, hai nhóm điểm đặc trưng đã được định vị từ hai bức hình sẽ được khớp nối nhằm xác định độ dịch chuyển giữa chúng. Do các bức hình trong một video clip được ghi tuần tự theo thời gian (ví dụ như 30 hình/giây hoặc nhanh hơn), các cặp hình liên tiếp sẽ được phân tích cuốn chiếu nhằm tính toán chuyển vị động của kết cấu theo thời gian trong suốt quá trình quay phim. Trong các bước kể trên, việc xác định và định vị các điểm đặc trưng của kết cấu trong một bức ảnh cũng như việc khớp nối chúng trong chuỗi các hình liên tục là các thuật toán quan trọng nhất quyết định độ chính xác của phép đo.



Hình 1. Sơ đồ tính toán chuyển vị công trình sử dụng kỹ thuật thị giác máy tính

2.1 Điểm đặc trưng của bức ảnh

Trong lĩnh vực xử lý hình ảnh, một bức ảnh được tạo bởi các điểm ảnh (pixel). Ứng với mỗi điểm ảnh của một bức ảnh đen trắng, cường độ sáng sẽ được thể hiện thông một đại lượng số học biến thiên từ 0 đến 255 (Hình 2). Như vậy, về mặt toán học, một bức ảnh High Density (HD) có độ phân giải 1920 x 1080 sẽ được biểu thị như một ma trận số học $I(x,y)$ có $x = 1080$ hàng và $y = 1920$ cột. Các thuật toán xử lý hình ảnh sẽ được tiến hành thông qua việc phân tích ma trận số học này.



Hình 2. Biểu thị toán học của một ảnh đen trắng: Ma trận số học; hoặc là một hàm rời rạc 2 biến

Xác định và định vị điểm đặc trưng của một bức ảnh là một nhánh nghiên cứu lớn trong kỹ thuật thị giác máy tính. Điểm đặc trưng được định nghĩa như các điểm nổi bật của các vật thể trong một bức ảnh. Đặc điểm quan trọng nhất của điểm đặc trưng là tính bất biến của nó cho dù vật thể trong bức ảnh di chuyển hoặc được chụp dưới các góc độ khác nhau. Nếu ta coi ma trận bức ảnh $I(x,y)$ là một hàm 2 biến rời rạc (Hình 2), một thuật toán cơ bản xác định điểm đặc trưng dựa trên kỹ thuật phân tích trị riêng (eigenvalue) của ma trận Hessian [12]. Ma trận Hessian của ma trận bức ảnh $I(x,y)$ được xác định theo công thức như sau.

$$H = w \otimes \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

trong đó: $\otimes$ là phép toán tích chập được thực hiện giữa hai ma trận; w là ma trận lọc Gaussian nhằm lọc nhiễu của ảnh. I_x^2 , I_y^2 , và $I_x I_y$ là các ma trận đạo hàm bậc 2 của ma trận bức ảnh $I(x,y)$ lần lượt theo biến x , biến y và đồng thời cả hai biến x, y .

Một ma trận đặc trưng được biến đổi từ việc phân tích trị riêng kết hợp thực nghiệm $F(x,y)$ được kiến nghị nhằm tính toán các điểm đặc trưng [12]. Ma trận này được xác định bằng công thức dưới đây.

$$F = AB - C^2 - k(A + B)^2 \quad (2)$$

trong đó: $A = w \otimes I_x^2$

$$B = w \otimes I_y^2 \quad (3)$$

$$C = w \otimes I_x I_y$$

Hệ số k được xác định từ thực nghiệm, $k = 0.04 - 0.06$

Sau khi có được hàm $F(x,y)$, các điểm đặc trưng sẽ được xác định tương ứng với các điểm cực trị của ma trận này. Vị trí các điểm đặc trưng này sẽ được định vị thông qua hệ quy chiếu (x,y) của bức ảnh.

2.2 Độ chuyển dịch các điểm đặc trưng giữa các bức ảnh liên tục

Như đã trình bày ở phần trên, các điểm đặc trưng sẽ được tính toán và định vị theo hệ quy chiếu (x,y) cho từng bức ảnh riêng rẽ. Gọi S_i and S_{i+1} là 2 nhóm điểm đặc trưng thu được sau khi khớp nối từ hai bức hình liên tục thứ i và $i+1$, ta có.

$$S_i = \{K_i^1, K_i^2, \dots, K_i^{n-1}, K_i^n\} \quad (4)$$

Và

$$S_{i+1} = \{K_{i+1}^1, K_{i+1}^2, \dots, K_{i+1}^{n-1}, K_{i+1}^n\}$$

trong đó n là số điểm đặc trưng của từng bức ảnh, $K_i = (x_i, y_i)$ là tọa độ vị trí của từng điểm đặc trưng theo hệ quy chiếu ảnh. Khi đó quan hệ giữa hai nhóm điểm đặc trưng này sẽ được thể hiện qua phương trình chuyển đổi hệ quy chiếu giữa 2 hệ quy chiếu của bức hình i và $i+1$.

$$S_i = T * S_{i+1} \quad (5)$$

trong đó T là ma trận chuyển đổi tuyến tính affine. Độ xô dịch (chuyển vị) theo hai phương của 2 nhóm điểm đặc trưng này được xác định gần đúng thông qua hai tham số c và f trong ma trận T . Ma trận T được xác định bằng thuật toán phổ biến có tên bình phương tối thiểu (Least Square Fit) [10].

$$T = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

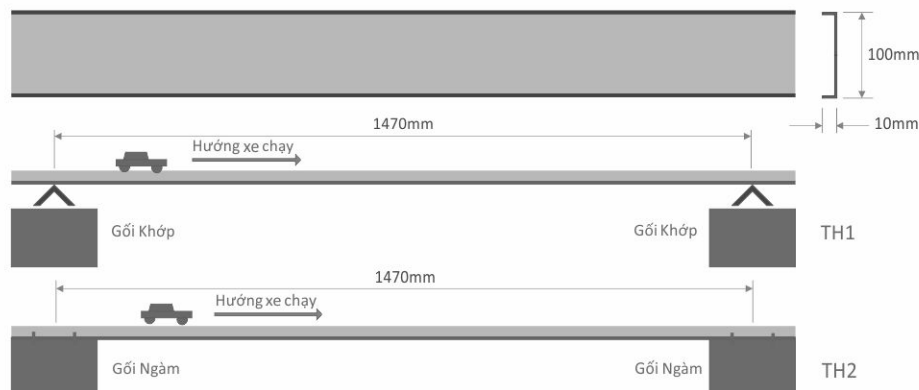


3. Thực nghiệm kiểm tra phương pháp

3.1 Thiết kế mô hình thí nghiệm

Phương pháp đo đặc chuyển vị động và tính toán tần số dao động của kết cấu sử dụng camera kết hợp kỹ thuật thị giác máy tính được kiểm tra trong phòng thí nghiệm. Một mô hình cầu dầm đơn giản bằng thép được thiết kế có chiều dài nhịp 1470mm, chiều rộng cầu 100mm có gờ cao 10mm. Hai gối của mô hình cầu được thiết kế có thể thay đổi từ kiểu gối ngàm sang gối khớp và ngược lại. Nhằm mục đích quan sát sự thay đổi ứng xử của kết cấu dầm gây ra bởi điều kiện biên thay đổi, hai sơ đồ kết cấu được thiết kế trên cơ sở thay đổi kiểu gối có tên gọi tương ứng: TH1 và TH2. Tại sơ đồ cầu TH1, hai gối cầu làm việc bình thường như các gối khớp tương tự trong kết cấu dầm đơn giản. Trong khi đó, sơ đồ cầu TH2 được lắp đặt tương ứng với trường hợp kết cấu các gối không thể xoay được bình thường theo như thiết kế ban đầu.

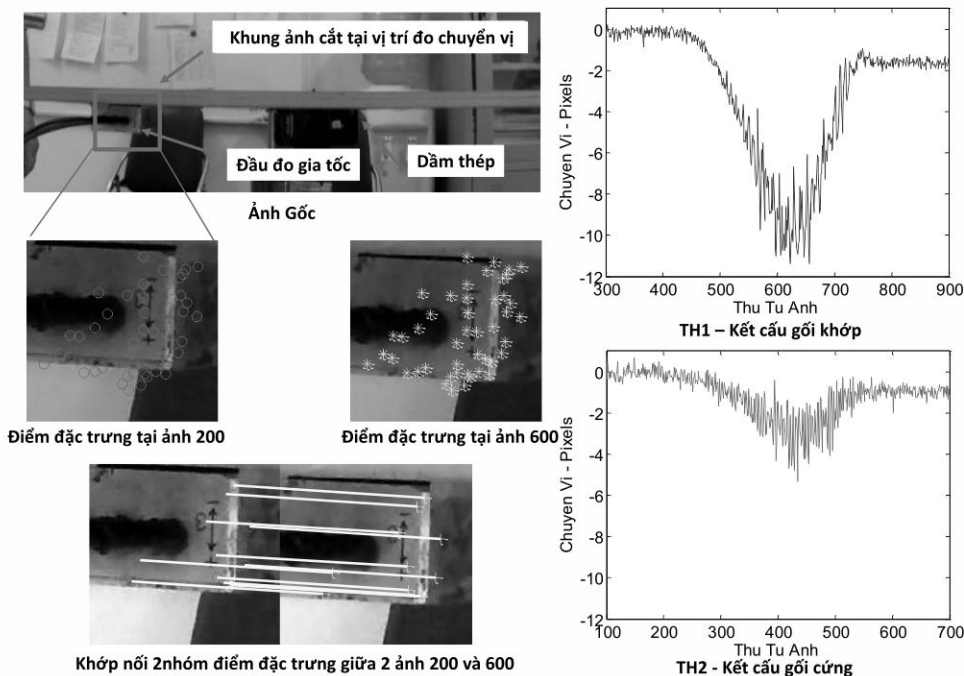
Tải trọng tác dụng lên trên mô hình cầu là một mô hình xe ô tô cỡ nhỏ. Mô hình xe này sẽ được kéo di chuyển dọc theo cầu từ điểm đầu đến điểm cuối trong các trường hợp thí nghiệm. Nhằm mục đích kiểm tra kết quả đo đặc bằng camera, một đầu đo gia tốc đã được gắn vào kết cấu dầm cầu để tính toán tần số dao động kết cấu dựa trên số liệu đo gia tốc. Chi tiết mô hình cầu và các sơ đồ kết cấu được thể hiện như Hình 3.



Hình 3. Mô hình thí nghiệm và các trường hợp kết cấu

3.2 Kết quả thí nghiệm

Kết quả thí nghiệm được thể hiện trên Hình 4. Có thể thấy rằng chỉ một phần nhỏ của bức ảnh (đánh dấu khung màu đỏ) tương ứng với vị trí cần đo chuyển vị động được tiến hành phân tích. Các điểm đặc trưng chỉ được tính toán trong phạm vi các bức ảnh nhỏ được cắt ra từ các bức ảnh gốc. Mục đích của việc này để tập trung vào vị trí nhỏ cần đo đặc cũng như giúp các phần mềm xử lý ảnh chạy nhanh hơn. Phía bên trái của Hình 4 thể hiện các điểm đặc trưng được xác định tương ứng với bức ảnh thứ 200 (màu đỏ) và thứ 600 (màu xanh lá cây). Các bức hình này được lấy ra từ một đoạn phim dài khoảng 20 giây. Như vậy, đoạn phim này bao gồm xấp xỉ 1200 bức ảnh do tốc độ máy quay là 60 hình/giây. Cuối cùng, các điểm đặc trưng có chất lượng tốt nhất được khớp nối phục vụ cho việc tính toán sự chuyển dịch của 2 khối điểm đặc trưng này. Quá trình khớp nối thành công được thể hiện qua các đường nối màu vàng. Bằng mắt thường có thể thấy rằng khối các điểm đặc trưng màu xanh lá cây đã dịch chuyển đi xuống khá rõ rệt so với các khối điểm đặc trưng màu đỏ. Dĩ nhiên, các tác giả đã cố tình lựa chọn sự chuyển dịch lớn xuất hiện giữa bức ảnh 200 và 600. Với các bức ảnh liên tục, chẳng hạn như ảnh thứ 200 và 201, sự chuyển vị là không thể nhận biết bằng mắt thường.



Hình 4. Kết quả đo dao động cho hai trường hợp sơ đồ kết cấu: TH1 và TH2

Kết quả chuyển vị động được trình bày phía bên phải của Hình 4. Như đã nói ở phần trình bày thí nghiệm, hai sơ đồ thí nghiệm được thiết kế tương ứng với trường hợp kết cấu bình thường với liên kết gối hai đầu khớp, và trường hợp kết cấu gối không còn làm việc như hai khớp. Kết quả chuyển vị động gây ra bởi cùng một loại tải trọng (xe ô tô mô hình) đã cho thấy sự chênh lệch rõ rệt về chuyển vị giữa hai thí nghiệm. Với trường hợp dầm hai đầu khớp, chuyển vị lớn nhất thu được khi xe ô tô ở vị trí giữa nhịp là 11.39 pixel. Trong khi đó, với cùng loại tải trọng xe mô hình này, chuyển vị lớn nhất thu được ở sơ đồ kết cấu TH2 đo được chỉ là 4.67 pixel. Toàn bộ quá trình xử lý hình ảnh được thực hiện bằng các code chạy trên nền tảng MatLab. Có thể thấy rằng, việc xác định vị trí các điểm đặc trưng được tính toán chính xác ở mức độ dưới 1 pixel (subpixel). Mặc dù công nghệ chính xác dưới 1 pixel được sử dụng ở đây, bài báo này không đi sâu chi tiết vào công nghệ này.

Về mặt định tính, kết quả thí nghiệm hoàn toàn phù hợp với đặc tính kết cấu bởi vì kết cấu dầm có hai đầu gối cứng sẽ có độ cứng tổng thể lớn hơn kết cấu tương tự có hai đầu khớp. Điều đó dẫn đến chuyển vị của dầm trong sơ đồ TH1 sẽ lớn hơn chuyển vị trong sơ đồ TH2. Một điểm nữa cũng cần chú ý về kết quả đo khi chuyển vị của dầm không về “không (0)” đối với cả hai trường hợp thí nghiệm. Nguyên nhân được nhận định là do tải trọng xe không thể hoàn toàn được kéo ra khỏi dầm khi xe di chuyển về phía cuối cầu. Đây là một nhược điểm của mô hình cầu mà các tác giả chỉ phát hiện khi tiến hành xử lý số liệu thí nghiệm. Đơn vị đo chuyển vị trình bày trong bài báo này là đơn vị điểm ảnh-pixel. Phương pháp cần thêm một bước phân tích để chuyển đổi đơn vị điểm ảnh về đơn vị SI thông thường (mm). Tuy nhiên trong phạm vi bài báo này tập trung hơn vào việc tính toán tần số dao động, vốn dĩ không bị phụ thuộc vào thứ nguyên của các ứng xử, giai đoạn chuyển đổi đơn vị đã không được giới thiệu. Phương pháp chuyển đổi đơn vị dựa trên cân chỉnh máy quay có thể xem chi tiết tại bài báo [10] đã được đăng tải.



4. Tính toán dao động riêng của kết cấu từ kết quả đo chuyển vị động

Trong lĩnh vực đánh giá sức khỏe công trình, đặc biệt trong công trình cầu, sử dụng trực tiếp kết quả đo chuyển vị khá bất tiện và không mang lại nhiều lợi ích. Nguyên nhân do giá trị chuyển vị của kết cấu phụ thuộc vào tải trọng vốn không thể xác định chính xác trong nhiều trường hợp (ví dụ như tải trọng xe ô tô trong giao thông, tải trọng gió...). Chính vì vậy, một nhánh nghiên cứu của lĩnh vực đánh giá sức khỏe công trình dựa trên các phân tích động học công trình nhằm nhận dạng các đặc trưng động học của kết cấu, chẳng hạn như tần số dao động, dạng dao động riêng (modal shape) và tỷ số giảm chấn (damping ratio)... Các đặc trưng động học này có tương quan chặt chẽ đến độ cứng của kết cấu, trong khi chúng có thể được xác định mà không phụ thuộc vào tải trọng ngoài. Như vậy, sự thay đổi độ cứng của kết cấu do hư hỏng có thể được nhận dạng thông qua sự thay đổi của các thông số động học. Trong nhóm này, tần số dao động là một thông số khá phổ biến do việc tính toán tần số dao động từ kết quả quan trắc kết cấu khá tiện lợi và chính xác.

Tần số dao động có thể được xác định từ kết quả đo động của kết cấu như chuyển vị động, vận tốc động, và gia tốc. Phổ biến nhất để tính toán tần số dao động là từ dữ liệu đo gia tốc. Với số liệu chuyển vị động, quy trình cần thêm một bước để loại bỏ thành phần tĩnh trong chuyển vị động trước khi dùng cho tính toán tần số. Mặc dù có khá nhiều phương pháp để tách thành phần tĩnh và thành phần động của chuyển vị động, sử dụng kết hợp thuật toán chuyển đổi Fourier thuận và nghịch được sử dụng khá rộng rãi. Chuyển đổi Fourier là một thuật toán nhằm phân tích một chuỗi dữ liệu rời rạc được ngầm hiểu là kết hợp của nhiều chuỗi dữ liệu tuần hoàn tương ứng với các tần số khác nhau. Giả sử ta có chuỗi dữ liệu rời rạc $D(t)$ theo thời gian t , kết quả phân tích chuỗi dữ liệu này được tính toán theo công thức sau.

$$d(h) = \sum_{t=1}^n D(t)W_n^{(t-1)(h-1)} \quad (7)$$

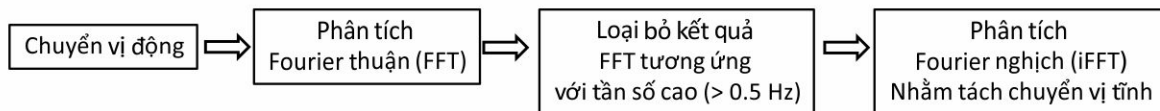
trong đó:

$$W_n = e^{(-2\pi i)/n} \quad (8)$$

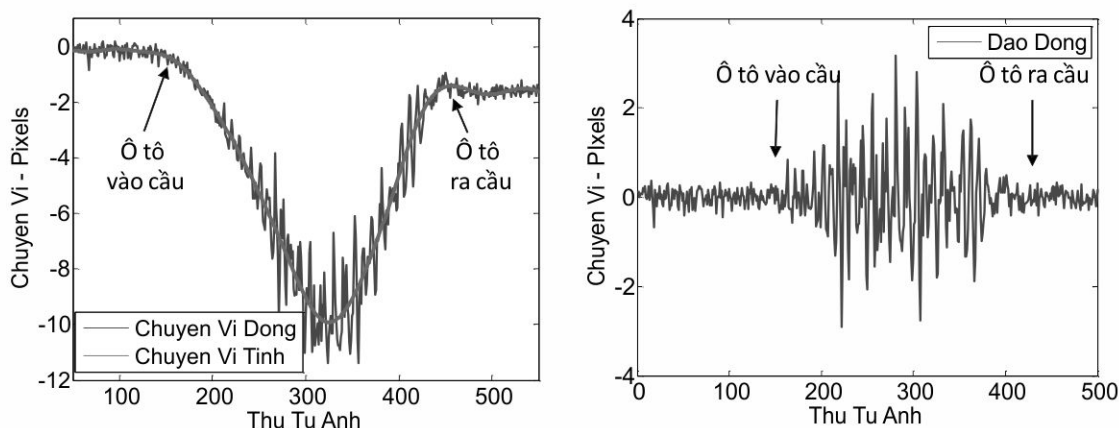
$d(h)$ là chuỗi kết quả rời rạc theo tần số (Hz); n là số lượng dữ liệu trong chuỗi rời rạc $D(t)$ và $d(h)$. Trong bài báo này, chuỗi dữ liệu rời rạc $D(t)$ chính là dữ liệu chuyển vị động được đo đạc theo thời gian. Do tốc độ quay phim của máy quay là 60 hình/giây, khoảng cách giữa các dữ liệu sẽ là 1/60 giây. Số lượng dữ liệu n chính là số lượng bức ảnh trong 1 đoạn phim (khoảng hơn 1000 ảnh/dữ liệu tùy thuộc vào từng thí nghiệm).

Sơ đồ quy trình tính toán thành phần động này được thể hiện như Hình 5. Kết quả thành phần động của dữ liệu thu được cho trường hợp TH1 - hai gối khớp được thể hiện như Hình 6. Ta có thể thấy chuyển vị tĩnh của kết cấu (chuyển vị có tần số nhỏ hơn 0.5 Hz) được tách ra theo quy trình trên Hình 5 được thể hiện là đường màu đỏ. Thành phần động sẽ được tính toán như hiệu số của chuyển vị động (màu xanh) trừ đi thành phần tĩnh (màu đỏ).

Kết quả này được thể hiện phía bên phải của Hình 6 cho thấy kết cấu chỉ thực sự dao động mạnh khi tải trọng xe mô hình di chuyển trên kết cấu. Các phần dữ liệu trước và sau giai đoạn này thu được do nhiễu động của phép đo kết hợp các dao động gây ra bởi môi trường xung quanh. Đoạn dữ liệu dao động có biên độ lớn này sẽ được tách riêng cho phân tích tính toán tần số dao động của kết cấu.

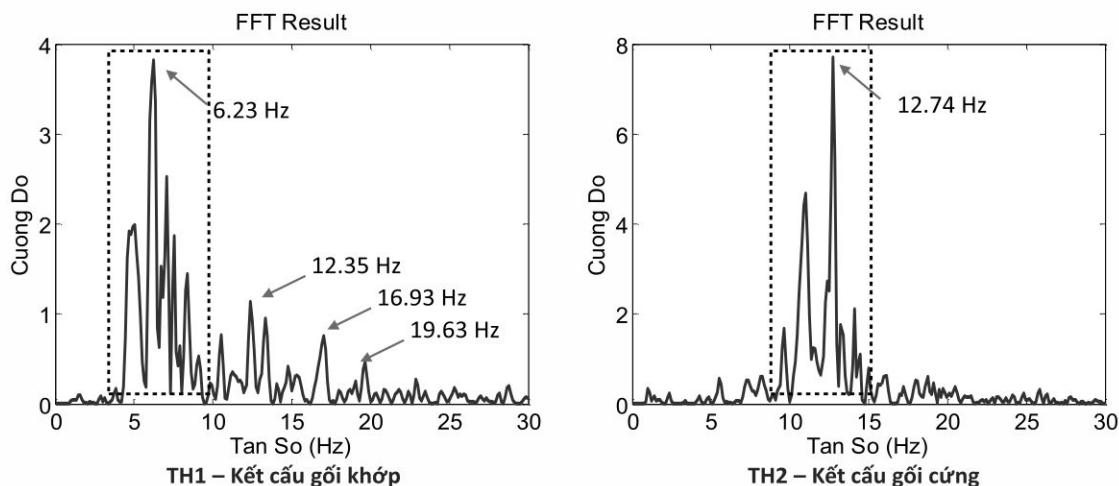


Hình 5. Trình tự tách thành phần tĩnh và động của chuyển vị động dựa vào thuật toán FFT



Hình 6. Kết quả tách thành phần động của chuyển vị động

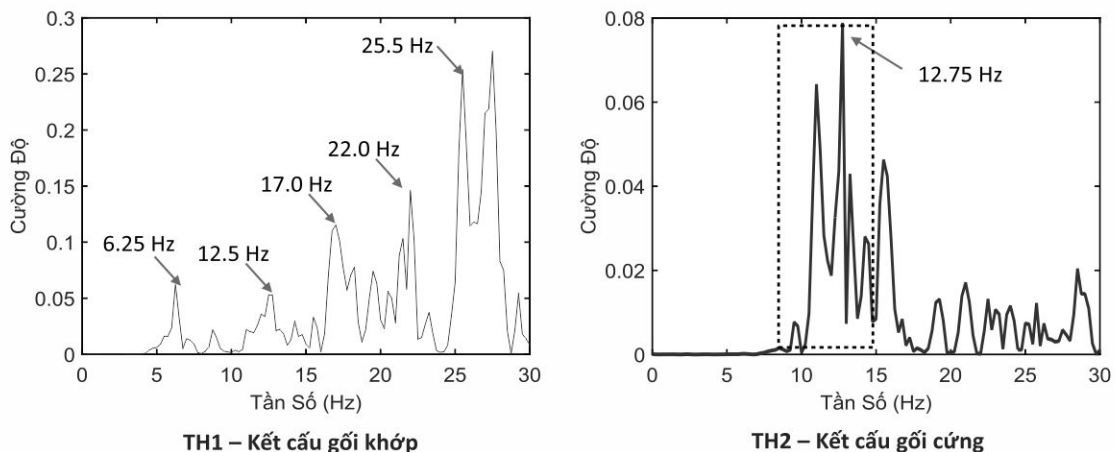
Tần số dao động cũng được tính toán sử dụng thuật toán chuyển đổi Fourier (FFT). Hình 7 cho thấy kết quả FFT cho cả hai sơ đồ kết cấu: TH1 - dầm có hai gối khớp, và TH2 - dầm có hai gối ngàm. Kết quả này cho ta thấy có một sự thay đổi lớn về tần số dao động của kết cấu giữa hai trường hợp, đặc biệt tại khu vực được đánh dấu với khung chữ nhật màu đen. Với kết cấu dầm hai gối khớp, tần số dao động đầu tiên được tính toán với giá trị 6.23 Hz trong khi tần số dao động thứ hai khoảng 12.35 Hz. Tần số dao động đầu tiên của kết cấu dầm có hai đầu ngàm đã bị dịch chuyển sang giá trị 12.74 Hz. Các tần số dao động tiếp theo với TH2 không thể xác định được hoặc không rõ ràng. Tuy nhiên, sự khác biệt về dao động riêng đầu tiên của hai trường hợp kết cấu gối khớp TH1 (6.23 Hz) và kết cấu gối cứng TH2 (12.74 Hz) là rất rõ rệt. Như vậy, tương tự như kết quả chuyển vị thu được đã trình bày ở phần trên, kết quả về tần số dao động thu được trong TH2 lớn hơn khá nhiều so với TH1 do kết cấu dầm có hai đầu gối cứng (TH2) có độ cứng tổng thể lớn hơn kết cấu tương tự có hai gối khớp (TH1).



Hình 7. Tần số dao động của kết cấu được đo bằng camera cho hai trường hợp: TH1 và TH2

Như đã trình bày ở phần thiết kế thí nghiệm, một đầu đo gia tốc được gắn dưới đáy dầm tại đúng vị trí cần đo chuyển vị động bằng camera (Hình 4). Dữ liệu gia tốc thu được từ đầu đo này cũng được sử dụng cho mục đích tính toán tần số dao động của dầm cho hai trường hợp sơ đồ kết cấu TH1 và TH2. Kết quả tần số dao động xác định bằng đầu đo gia tốc được thể hiện như trên Hình 8. Từ Hình 7 và Hình 8 có thể thấy rằng kết quả tần số dao động xác định bằng đầu đo gia tốc và camera là khá trùng khớp cho cả hai sơ đồ kết cấu TH1 và TH2. Với cả hai trường hợp, mặc dù dữ liệu từ đầu đo gia tốc có thể nhận dạng được thêm một số tần số dao động cao, các tần số thấp còn lại hầu như trùng với các tần số thấp được nhận dạng bởi camera. Điều này hoàn toàn dễ hiểu khi các đầu đo gia tốc được thiết kế riêng cho mục đích nhận dạng tần số dao động, trong khi đó các camera sử dụng trong thí nghiệm này là các camera phổ thông, không được chế tạo cho mục đích làm thí nghiệm. Mặc dù vậy, kết quả cho thấy khá tốt để có thể sử dụng camera phổ thông thay thế cho việc sử dụng các đầu đo gia tốc và bộ đọc dữ liệu vốn rất đắt tiền.

Tần số dao động cũng được tính toán sử dụng thuật toán chuyển đổi Fourier (FFT). Hình vẽ 7 cho thấy kết quả FFT cho cả hai sơ đồ kết cấu: TH1 - dầm có hai gối khớp, và TH2 - dầm có hai gối ngàm. Kết quả này cho ta thấy có một sự thay đổi lớn về tần số dao động của kết cấu giữa hai trường hợp, đặc biệt tại khu vực được đánh dấu với khung chữ nhật màu đen. Với kết cấu dầm hai gối khớp, tần số dao động đầu tiên được tính toán với giá trị 6.23 Hz trong khi tần số dao động thứ hai khoảng 12.35 Hz. Tần số dao động đầu tiên của kết cấu dầm có hai đầu ngàm đã bị dịch chuyển sang giá trị 12.74 Hz. Các tần số dao động tiếp theo với TH2 không thể xác định được hoặc không rõ ràng. Tuy nhiên, sự khác biệt về dao động riêng đầu tiên của hai trường hợp kết cấu gối khớp TH1 (6.23 Hz) và kết cấu gối cứng TH2 (12.74 Hz) là rất rõ rệt. Như vậy, tương tự như kết quả chuyển vị thu được đã trình bày ở phần trên, kết quả về tần số dao động thu được trong TH2 lớn hơn khá nhiều so với TH1 do kết cấu dầm có hai đầu gối cứng (TH2) có độ cứng tổng thể lớn hơn kết cấu tương tự có hai gối khớp (TH1).



Hình 8. Tần số dao động của kết cấu được đo bằng đầu đo gia tốc cho hai trường hợp: TH1 và TH2



5. Kết luận

Bài báo đã giới thiệu một phương pháp mới sử dụng camera và kỹ thuật thị giác máy tính để đo được các ứng xử quan trọng của kết cấu mà không cần phải gắn bất cứ trang thiết bị gì lên trên công trình. Phương pháp hy vọng sẽ mở ra một hướng mới trong công tác đo đạc ngoài hiện trường, đặc biệt có thể áp dụng cho các vị trí đo đạc khó khăn như dưới gầm cầu, đỉnh tháp với chi phí rất thấp... Ở những bước thử nghiệm đầu tiên, các tác giả đã áp dụng phương pháp đo mới này cho hai mô hình cầu thí nghiệm tương ứng với hai trường hợp giả định: (1) cầu dầm giản đơn với các gối khớp và (2) cầu dầm giản đơn với các gối cứng. Kết quả đo biên độ dao động lớn nhất của kết cấu cho hai trường hợp giả định 1 và 2 lần lượt là ~11.39 pixel và ~4.67 pixel. Các dữ liệu động này tiếp tục được phân tích và xử lý để tính toán thông số động học quan trọng của kết cấu, tần số dao động. Kết quả tần số dao động đầu tiên của trường hợp TH1 là 6.23Hz và của trường hợp TH2 là 12.74Hz. Các kết quả tần số dao động này cũng đã được so sánh với kết quả thu được từ đầu đo dao động. Mặc dù chỉ sử dụng các camera phổ thông như GoPro3 và Iphone 5, xét về mặt định tính, các kết quả thu được là hoàn toàn phù hợp về mặt phân tích kết cấu.

Phương pháp đo đạc mới này sẽ được thực nghiệm ngoài hiện trường trên các công trình thật nhằm kiểm tra tính khả thi để có thể áp dụng thực tế. Với đặc điểm đơn giản, dễ sử dụng, và đặc biệt không yêu cầu các trang

thiết bị rất đắt tiền như các đầu đo và bộ thu thập dữ liệu, phương pháp được hy vọng sẽ phù hợp với điều kiện sử dụng tại Việt Nam. Mặc dù vậy, phương pháp đo đạc này khá tốn thời gian cho công việc phân tích hình ảnh. Do đó các kết quả đo chuyển vị không thể xác định được ngay tại hiện trường mà cần phải được xử lý và xác định sau ở trong phòng. Ngoài ra, dữ liệu hình ảnh thường có dung lượng lớn có thể gây khó khăn cho công tác lưu trữ; và việc xử lý khối dữ liệu này đòi hỏi người kỹ sư phải có những hiểu biết cơ bản về chuyên ngành có liên quan.

Tài liệu tham khảo

1. Catbas FN, Kijewski-Correa T (2013), "Structural identification of constructed systems: Collective effort toward an integrated approach that reduces barriers to adoption", *Journal of Structural Engineering*, 139:1648-1652.
2. Zaurin R, Khuc T, Catbas FN (2016), "Hybrid Sensor-Camera Monitoring: Case Study of a Real Bridge for Damage Detection", *Journal of Bridge Engineering*.
3. Webb G, Vardanega P, Middleton C. (2014), "Categories of SHM Deployments: Technologies and Capabilities", *Journal of Bridge Engineering*.
4. Oliveira H, Correia PL. (2013), "Automatic road crack detection and characterization", *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on* 2013,14:155-168.
5. Yin Z, Wu C, Chen G. (2014), "Concrete crack detection through full-field displacement and curvature measurements by visual mark tracking: A proof-of-concept study", *Structural Health Monitoring* 2014,13:205-218.
6. Lee JJ, Shinozuka M. (2006), "A vision-based system for remote sensing of bridge displacement", *NDT & E International*,39:425-431.
7. Lee J-J, Ho H-N, Lee J-H. (2012), "A vision-based dynamic rotational angle measurement system for large civil structures", *Sensors*,12:7326-7336.
8. Kim SW, Jeon BG, Kim NS, Park JC. (2013), "Vision-based monitoring system for evaluating cable tensile forces on a cable-stayed bridge", *Structural Health Monitoring*,12:440-456.
9. Feng MQ, Fukuda Y, Feng D, Mizuta M. (2015), "Nontarget vision sensor for remote measurement of bridge dynamic response", *Journal of Bridge Engineering*,20:04015023.
10. Khuc T, Catbas FN. (2016), "Completely contactless structural health monitoring of real-life structures using cameras and computer vision", *Structural Control and Health Monitoring*.
11. Yoon H, Elanwar H, Choi H, Golparvar-Fard M, Spencer BF. (2016), "Target-free approach for vision-based structural system identification using consumer-grade cameras", *Structural Control and Health Monitoring*.
12. Harris C, Stephens M. (1988), "A combined corner and edge detector", In: *Alvey vision conference: Manchester, UK*; pp. 50.