

NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP TẠO MÔ HÌNH BỀ MẶT PHỤC VỤ ĐO ĐẠC BIẾN DẠNG KẾT CẤU BẰNG CÔNG NGHỆ TƯƠNG QUAN HÌNH ẢNH

Khúc Đăng Tùng^{a,*}, Andy Nguyen^b, Lê Tùng Lâm^c, Lại Đức Giang^c

^a*Khoa Xây dựng cầu đường, Trường Đại học Xây dựng,*

55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^b*School of Civil Engineering & Surveying, University of Southern Queensland,*

37 Sinnathamby Boulevard, Springfield Central, QLD 4300, Australia

^c*Khoa Công nghệ thông tin, Trường Đại học Xây dựng,*

55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 27/08/2019, Sửa xong 19/09/2019, Chấp nhận đăng 02/10/2019

Tóm tắt

Tại Việt Nam, đo đạc biến dạng trong kết cấu thường phụ thuộc vào hai loại cảm biến chính là cảm biến điện trở và cảm biến dây rung. Nhược điểm của những phương pháp đo đạc cổ điển này là các cảm biến phải được gắn trực tiếp vào cấu kiện, gây khó khăn trong công tác chuẩn bị cũng như đẩy chi phí lắp đặt lên cao. Bài báo này nghiên cứu và thử nghiệm phương pháp đo biến dạng dựa vào kỹ thuật xử lý hình ảnh từ camera, được gọi là thuật toán tương quan hình ảnh (DIC). Nghiên cứu tập trung vào việc thử nghiệm một số các cách tạo mô hình bề mặt nhằm giúp phương pháp đo biến dạng DIC có độ chính xác tốt hơn và phù hợp hơn với từng loại vật liệu bao gồm thép và bê tông. Phương pháp tạo mô hình cho đo đạc biến dạng trong thí nghiệm kéo thanh thép sử dụng chấm bút phủ và phun sơn. Với thí nghiệm nén mẫu bê tông, phương pháp tạo mô hình chấm chấm bao gồm phun sơn trực tiếp, phủ cát, chấm bút phủ và phun sơn qua lưới. Kết quả thực nghiệm cho thấy rằng phương pháp chấm bút phủ phù hợp với thí nghiệm kéo thanh thép, trong khi phương pháp phủ cát và phun sơn trực tiếp khá phù hợp với thí nghiệm nén mẫu bê tông.

Từ khóa: đo biến dạng; cảm biến; tương quan hình ảnh; mô hình chấm chấm.

INVESTIGATION OF SPECKLE PATTERN FOR STRAIN MEASUREMENT OF CIVIL STRUCTURES USING DIGITAL IMAGE CORRELATION

Abstract

In Vietnam, strain measurement in civil engineering is mainly employed by using two types of sensors including strain gauges and vibrating wire gauges. The limitations of using those sensors are troublesome installation, wiring cable and highly-cost equipment. This paper aims to introduce an alternative strain measurement method based on vision technique, namely Digital Image Correlation – DIC. The research mostly focuses on the investigation of speckle patterns in digital image correlation for steel and concrete structures to obtain better strain measuring results. The speckle patterns prepared for rebar tests were paint spraying and use of correction pens. For concrete specimen tests, the speckle patterns were conducted by paint spraying, correction pens, sand sprinkling, and grid paint spraying. The experiment results shown that the correction pen method is suitable with steel tests, while sand sprinkling and paint spraying are proper for concrete tests.

Keywords: strain measurement; sensor; digital image correlation; speckle pattern.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14\(1V\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14(1V)-01) © 2020 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

*Tác giả chính. Địa chỉ e-mail: tungkd@nuce.edu.vn (Tùng, K. Đ.)

1. Giới thiệu

Trong lĩnh vực xây dựng, công tác đo biến dạng của kết cấu được thực hiện thường xuyên và phổ biến. Công việc đo đạc này có thể được tiến hành trong phòng thí nghiệm nhằm xác định các đặc trưng cơ lý của vật liệu xây dựng, thí nghiệm cho các cấu kiện đặc biệt, hoặc được sử dụng ngoài hiện trường cho công tác đánh giá và kiểm định công trình. Trên thế giới cũng như tại Việt Nam hiện nay, hai loại cảm biến chính thường được sử dụng là cảm biến điện trở (strain gauge) và cảm biến dây rung (vibrating wire gauge). Trong hai loại cảm biến này, cảm biến điện trở, phát minh và đăng ký bản quyền bởi Ruge Arthur từ năm 1944 [1], được sử dụng rộng rãi hơn do có giá thành khá rẻ. Nguyên tắc hoạt động của cảm biến điện trở dựa theo đặc tính của một nhóm vật liệu đặc biệt làm cảm biến, đó là quá trình thay đổi kích thước vật liệu sẽ làm thay đổi điện trở của chính nó. Như vậy khi kết cấu bị lực tác động dẫn đến biến dạng, cảm biến điện trở gắn trên (hoặc trong) kết cấu sẽ biến dạng theo. Một bộ đo đặc biệt sẽ xác định được sự thay đổi điện trở trong cảm biến và chuyển đổi giá trị thay đổi điện trở này ngược lại sang biến dạng. Hình 1 thể hiện hình ảnh của hai loại cảm biến điện trở phổ biến nhất dùng đo biến dạng cho vật liệu thép và bê tông trong xây dựng, và bộ đọc tín hiệu.



(a) Cảm biến điện trở đo kết cấu thép (nhỏ),
Cảm biến điện trở đo kết cấu bê tông (lớn)



(b) Bộ thu và xử lý dữ liệu từ cảm biến điện trở

Hình 1. Bộ thiết bị đo biến dạng bằng cảm biến điện trở

Cảm biến dây rung được phát minh và đăng ký bản quyền bởi Exner Rainer vào năm 1977 [2]. Chúng được sử dụng ít phổ biến hơn, đặc biệt tại Việt Nam, do giá thành khá cao. Cảm biến dây rung hoạt động dựa trên nguyên tắc tần số của dây rung trong cảm biến sẽ thay đổi khi chiều dài (hay lực căng) của dây rung thay đổi. Như vậy, một thiết bị đo đặc biệt sẽ xác định được sự thay đổi tần số dao động của dây rung, từ đó chuyển đổi ngược lại sang biến dạng tỷ đối của dây rung (cũng chính là biến dạng tỷ đối của cấu kiện). Mặc dù có giá thành đắt hơn đáng kể, kết quả đo đạc của cảm biến

dây rung thường chính xác hơn, ổn định hơn kết quả biến dạng thu được từ cảm biến điện trở. Mặc dù ưu điểm nổi bật của các loại cảm biến này là đều có thể đo đạc được các kết quả biến dạng khá chính xác, chúng vẫn có một số nhược điểm trong quá trình sử dụng chẳng hạn như yêu cầu sự lắp đặt và đo đạc bởi các kỹ thuật viên lành nghề, hạn chế về phạm vi đo đạc, các cảm biến điện trở hầu như chỉ dùng được một lần, và yếu tố đặc biệt liên quan tới giá thành của các bộ đo tín hiệu khá đắt tiền [3].

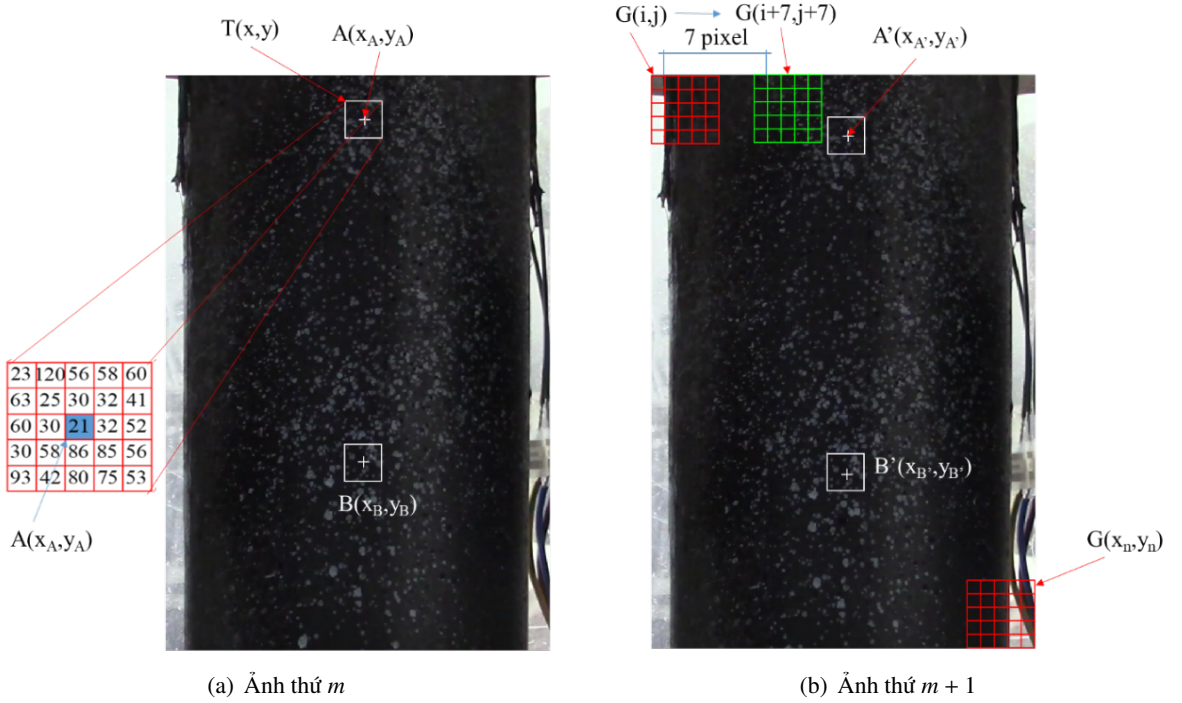
Từ những nhược điểm kể trên, kết hợp với thực trạng tại Việt Nam hoàn toàn chỉ sử dụng các cảm biến cổ điển, đặc biệt là cảm biến điện trở để đo đạc biến dạng, bài báo này nhằm mục đích giới thiệu một phương pháp đo biến dạng khác sử dụng công nghệ phân tích hình ảnh có tên gọi kỹ thuật tương quan hình ảnh (Digital Image Correlation - DIC). Kỹ thuật tương quan hình ảnh là một công nghệ cổ điển nhằm theo dõi các vị trí đã được định vị trong một chuỗi các bức ảnh. Như vậy, nếu ta quay phim một kết cấu bị biến dạng dưới tác động của tải trọng, các vị trí được định vị trên ảnh chụp của kết cấu đó sẽ được kỹ thuật DIC theo dõi liên tục. Sự thay đổi vị trí của các điểm đó sẽ được sử dụng để tính toán biến dạng tương đối giữa chúng và đó chính là biến dạng của kết cấu. Kỹ thuật này lần đầu được thử nghiệm trong lĩnh vực đo đạc cơ khí chế tạo từ khoảng 30 năm trước [4, 5]. Hiện nay phương pháp đo đạc dựa trên DIC đã liên tục được nghiên cứu và phát triển trên thế giới, không chỉ được sử dụng để đo đạc biến dạng trong kết cấu mà còn có thể sử dụng cho việc đo đạc chuyển vị động [6, 7]. Phương pháp đo biến dạng DIC có thể được áp dụng khi đo đạc cho các cấu kiện rất nhỏ (khi không thể gắn được cảm biến thông thường), hoặc các mảng kết cấu rất lớn và liên tục (khi phải sử dụng rất nhiều cảm biến thông thường) [8]. Phương pháp đo biến dạng DIC được ứng dụng chủ yếu ở trong phòng thí nghiệm do việc thuận tiện bố trí camera cũng như điều kiện ánh sáng phù hợp. Với các thí nghiệm đo đạc ngoài hiện trường, phương pháp đo biến dạng DIC sẽ gặp khó khăn hơn do khoảng cách từ camera đến bề mặt cần đo khá lớn. Tuy nhiên, việc ứng dụng phương pháp DIC cho đo đạc chuyển vị động ngoài hiện trường vẫn có thể được tiến hành khá phổ biến.

Thông thường, một hệ thống DIC đơn giản nhất chỉ bao gồm các trang thiết bị sau: một camera kỹ thuật số giá rẻ dùng để thu hình ảnh tại vị trí cần đo; một máy vi tính để xử lý hình ảnh sử dụng thuật toán tương quan; một số phụ kiện khác như tripod để cố định camera; ngoài ra còn cần sơn, màu nước, bút phủ, keo, ... để tạo mô hình đốm chấm.

2. Cơ sở lý thuyết của kỹ thuật tương quan hình ảnh

Như ta đã biết, một bức ảnh thường được chuyển đổi toán học thành các ma trận cường độ sáng theo một phương trình toán học nhất định. Ví dụ một bức ảnh đen trắng có độ phân giải 1920×1080 pixel sẽ được mô tả như một ma trận có kích thước 1920×1080 , trong khi đó, một bức ảnh màu sẽ được mô tả bằng ba ma trận có kích thước 1920×1080 tương ứng với ba bộ màu là Đỏ, Xanh lá cây và Xanh lục. Kỹ thuật tương quan hình ảnh DIC là một thuật toán cơ bản trong lĩnh vực xử lý hình ảnh. Mục đích của thuật toán này là tìm kiếm và nhận dạng các vị trí hoặc khu vực quan tâm (thường gọi là ROI) trong một chuỗi các bức ảnh khác nhau của cùng một vật thể. Cơ sở lý thuyết của thuật toán dựa trên việc xác định mức độ tương quan của khu vực quan tâm ROI giữa các bức ảnh khác nhau, lúc này đã được định nghĩa như một ma trận. Như vậy, kỹ thuật tương quan hình ảnh thật ra chính là quá trình so sánh tương quan giữa các ma trận cường độ sáng.

Để giải thích quy trình thực hiện thuật toán một cách tường minh hơn, Hình 2 cho ta thấy hai bức ảnh chụp m và $m + 1$ của cùng một mẫu bê tông cường độ siêu cao (UHPC) tại hai thời điểm khác nhau khi mẫu bê tông chịu các tải trọng nén khác nhau. Giả sử ta tiến hành chọn hai điểm quan tâm là $A(x_A, y_A)$ và $B(x_B, y_B)$ tại bức ảnh m nhằm xác định sự biến dạng giữa chúng tại thời điểm mà bức ảnh $m + 1$ được chụp. Sử dụng thuật toán phân tích tương quan hình ảnh sẽ giúp ta tìm được vị trí của A và B trên bức ảnh kế tiếp, lần lượt được gọi là các điểm $A'(x_{A'}, y_{A'})$ và $B'(x_{B'}, y_{B'})$.



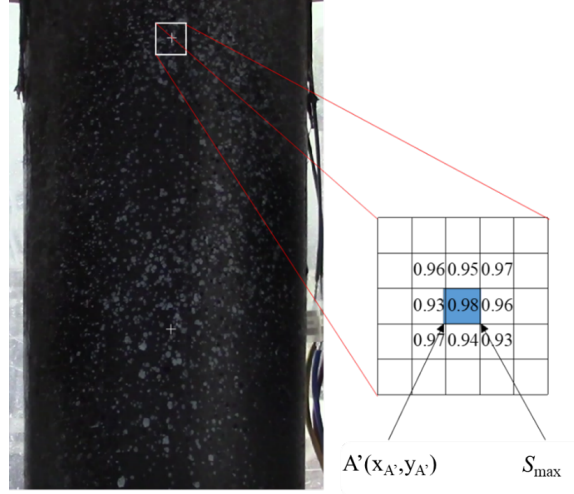
Hình 2. Mô phỏng kỹ thuật tương quan hình ảnh

Đầu tiên, thuật toán sẽ trích một ma trận được hình thành bởi các điểm ảnh lân cận điểm A , gọi là ma trận T thông thường sẽ có kích thước 3×3 , 5×35 hoặc 7×37 . Trong bài báo này, ma trận được chọn có kích thước 5×35 . Mỗi giá trị của ma trận T đại diện cho giá trị cường độ sáng tại điểm ảnh tương ứng, thường có giá trị từ 0-255, trong đó giá trị thấp nhất đại diện cho màu đen và giá trị cao nhất đại diện cho màu trắng. Ở ma trận T này, vị trí của điểm A sẽ nằm tại trọng tâm của ma trận (Hình 2(a)). Để tìm được vị trí của điểm A' , rất nhiều ma trận G có cùng kích thước với ma trận T được cắt ra từ bức ảnh $m + 1$ bằng cách cho thay đổi lần lượt các tham số hàng và cột theo như mô tả trên Hình 2(b). Sau đó, với mỗi ma trận G được cắt ra, một so sánh tương quan giữa ma trận T và ma trận G được thực hiện theo công thức (1).

$$s = \frac{\sum_{x,y,i,j} [T(x, y) - \mu(T)] \cdot [G(i, j) - \mu(G)]}{\sqrt{\sum_{x,y} [T(x, y) - \mu(T)]^2 \cdot \sum_{i,j} [G(i, j) - \mu(G)]^2}} \quad (1)$$

trong đó s là hệ số tương quan giữa 2 ma trận T và G có giá trị nằm trong đoạn $[0, 1]$, $\mu(T)$ và $\mu(G)$ lần lượt là giá trị trung bình của hai ma trận. Giá trị s này sẽ được lưu trữ lại trong một ma trận tương quan S tại vị trí tương ứng với vị trí trung tâm của ma trận G trong bức ảnh $m + 1$.

Như vậy, kết thúc quá trình so sánh tương quan sẽ cho ta một ma trận các hệ số tương quan S . Số phần tử của ma trận S bằng số lượng ma trận G và cũng chính bằng số điểm ảnh của bức ảnh m và $m + 1$. Lúc này, vị trí có hệ số tương quan s lớn nhất chính là vị trí mà hai ma trận G và T gần nhau nhất và đây cũng là vị trí của điểm A' trong ảnh $m + 1$ (Hình 3). Để việc xác định hệ số tương quan lớn nhất $s_{\max}$ được dễ dàng và chính xác, kỹ thuật DIC thường yêu cầu phải tạo mô hình chấm chấm trên bề mặt của cấu kiện cần đo đạc. Lặp lại quá trình tương tự đối với điểm B , ta sẽ tìm được tọa độ của điểm B' trong ảnh $m + 1$.



Hình 3. Vị trí có hệ số tương quan s lớn nhất chính là tọa độ của điểm A' trong ảnh $m + 1$

Sau khi đã xác định được vị trí của hai điểm A' và B' , biến dạng giữa hai điểm A và B tại thời điểm chụp bức ảnh $m + 1$ được xác định theo công thức (2).

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

trong đó $\mathcal{E}$ là biến dạng tỉ đối giữa hai điểm A và B ; L là khoảng cách giữa hai điểm A và B tại bức ảnh m ; ΔL là giá trị thay đổi khoảng cách giữa hai điểm AB và $A'B'$ được xác định bằng công thức (3). Mặc dù các giá trị khoảng cách trên ảnh đều được đo đạc theo đơn vị pixel, giá trị biến dạng vẫn có thể xác định được do chúng là giá trị biến dạng tỷ đối.

$$\Delta L = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} - \sqrt{(x_{B'} - x_{A'})^2 + (y_{B'} - y_{A'})^2} \quad (3)$$

trong đó x_A, y_A, x_B, y_B là tọa độ của hai điểm A và B được chọn trước trên bức ảnh m ; $x_{A'}, y_{A'}, x_{B'}, y_{B'}$ là tọa độ của hai điểm A' và B' đã tìm được trên bức ảnh $m + 1$ bằng thuật toán phân tích tương quan hình ảnh.

Thông thường trong đo đạc biến dạng, trị số biến dạng theo phương X và Y thường được quan tâm riêng biệt. Khi đó giá trị biến dạng theo từng phương có thể được xác định theo hai công thức rút gọn như dưới đây.

$$\mathcal{E}_X = \frac{(x_B - x_{B'}) - (x_A - x_{A'})}{x_B - x_A} \quad (4)$$

$$\mathcal{E}_Y = \frac{(y_B - y_{B'}) - (y_A - y_{A'})}{y_B - y_A} \quad (5)$$

Như vậy, ta có thể thấy rằng phương pháp đo đạc biến dạng sử dụng công nghệ DIC khá linh hoạt và mềm dẻo. Các biến dạng có thể đo tại bất cứ khu vực nào trên bề mặt cấu kiện đã được tạo (hoặc có sẵn) mô hình chấm chấm thông qua việc lựa chọn các điểm mốc. Hơn thế nữa, biến dạng có thể đo đồng thời theo hai phương X và Y tại rất nhiều vị trí cùng một thời điểm, trong khi nếu sử dụng các cảm biến cổ điển sẽ phải cần số lượng cảm biến rất lớn. Tóm lại, các bước chính của kỹ thuật đo biến dạng sử dụng công nghệ DIC bao gồm:

- Tạo mô hình đốm chấm trên bề mặt của kết cấu tại vị trí cần đo.
- Thiết lập camera để quay dữ liệu hình ảnh tại vị trí có mô hình đốm chấm trong quá trình cấu kiện bị biến dạng dưới tác động của tải trọng.
- Xử lý hình ảnh trên máy tính bằng thuật toán tương quan hình ảnh. Chuyển vị của các điểm mốc được xác định, từ đó xác định được biến dạng của kết cấu.

3. Tạo mô hình đốm chấm

Như đã trình bày ở phần trước, mô hình đốm chấm là một yêu cầu quan trọng trong công tác đo đặc biến dạng sử dụng kỹ thuật DIC. Mục đích của việc tạo mô hình đốm chấm là nhằm tạo ra các ma trận tương quan S có nhiều vị trí có giá trị $s_{\max}$ nổi bật. Trong trường hợp không tạo mô hình đốm chấm, ma trận tương quan S thường có rất nhiều các giá trị giống nhau, không nổi bật, làm cho việc xác định vị trí $s_{\max}$ rất khó khăn và không chính xác. Mô hình đốm chấm thường phải được chuẩn bị trước lên bề mặt của cấu kiện cần đo đặc theo rất nhiều phương pháp khác nhau, hai trong số nhiều cách tạo mô hình đốm chấm phổ biến được thể hiện trên Hình 4. Dù được chuẩn bị theo bất kỳ hình thức nào, một mô hình đốm chấm tốt cần phải có đầy đủ các tính chất sau [9]: độ tương phản cao; có tính ngẫu nhiên; tính đẳng hướng; độ bám chắc.



Hình 4. Hình thức tạo mô hình đốm chấm sử dụng chấm bút phủ và phun sơn

Thông thường mô hình đốm chấm thường được chia ra làm hai loại: mô hình đốm tự nhiên và mô hình đốm nhân tạo [10]. Trong trường hợp bề mặt của kết cấu có sẵn những đốm chấm phân bố tự nhiên một cách hợp lý, thỏa mãn những điều kiện được liệt kê bên trên thì nó có thể được sử dụng trực tiếp để áp dụng kỹ thuật DIC. Tuy nhiên trong thực tế không phải kết cấu nào mà bề mặt của nó cũng có sẵn sự phân bố phù hợp như thế. Vì vậy, chúng ta cần nghĩ đến các phương pháp tạo mô hình đốm nhân tạo để thay thế. Trong nhóm mô hình đốm nhân tạo này, phổ biến nhất là sử dụng bình phun sơn lên bề mặt kết cấu. Theo nghiên cứu về mô hình đốm chấm dùng trong DIC của W.S. LePage thì phương án tối ưu nhất là sử dụng mô hình đốm đen trên bề mặt cấu kiện được sơn trắng để tối ưu hóa độ tương phản trên bề mặt mẫu thí nghiệm [11]. Điều này được giải thích do mô hình đốm đen có gradient cường độ trung bình mức xám cao hơn dẫn đến có giảm kích thước của ma trận T xuống khá nhỏ (có thể dùng cỡ ma trận 3×3) và việc này dẫn đến tăng độ chính xác của kết quả đo.

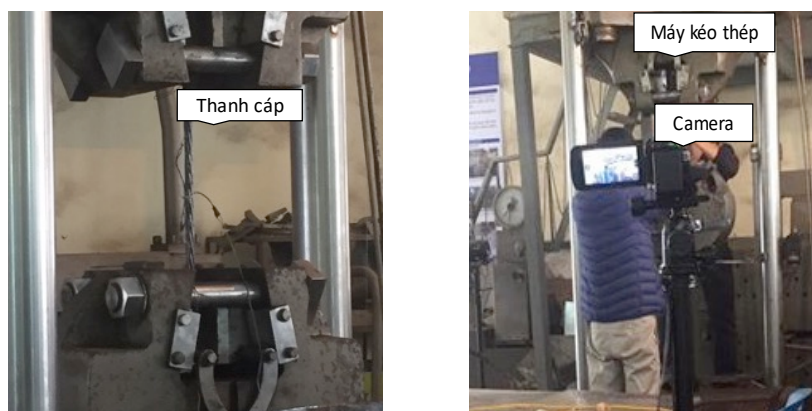
Các phương pháp tạo mô hình đốm nhân tạo có thể kể đến như: in thạch bản (lithography), chùm ion tập trung (focused ion beam), kỹ thuật nén khí (compressed air technique), phủ nano, ... Tuy nhiên khi thực hiện các thí nghiệm có quy mô nhỏ trong phòng, một số các phương pháp đơn giản hơn có thể được sử dụng như sử dụng bình phun sơn (air brushing), dùng bút phủ (bút xóa) chấm ngẫu nhiên lên trên bề mặt mẫu, dùng cát (trắng hoặc đen tùy vào màu sắc của mẫu) phủ lên trên bề mặt mẫu, ... Các phương pháp này thường có chi phí thấp, dễ thực hiện trong khi hiệu quả tăng độ tương phản trên bề mặt mẫu có thể chấp nhận được. Nhược điểm của những phương pháp này đòi hỏi độ tỉ mỉ khá cao trong quá trình thực hiện và cũng đòi hỏi tay nghề của kỹ thuật viên, nếu không, mô hình đốm chấm sẽ không thể đáp ứng được những yêu cầu cơ bản và dẫn đến sai lệch kết quả đo.

Phương pháp đo biến dạng sử dụng công nghệ DIC được nhóm nghiên cứu thực hiện trên hai loại thí nghiệm phổ biến nhất trong lĩnh vực xây dựng: thí nghiệm kéo thép và thí nghiệm nén mẫu bê tông. Hầu như các loại biện pháp tạo mô hình đốm chấm đều đã được thử nghiệm trong nghiên cứu này nhằm rút ra các mô hình hợp lý nhất cho từng loại vật liệu cũng như bề mặt khác nhau. Các thí nghiệm được thực hiện và mô tả trong các phần tiếp theo.

4. Thực nghiệm và kết quả

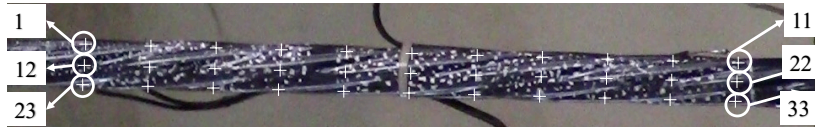
4.1. Ứng dụng đo biến dạng do lực kéo cho cáp thép

Trong phần này, mẫu thí nghiệm là các cáp có bọc silicon của một cầu dây văng. Thí nghiệm nhằm mục đích xác định các đặc tính vật liệu của cáp. Để thực hiện thí nghiệm, các đoạn cáp được cắt ngắn có chiều dài khoảng 60 cm để có thể kẹp vào hệ thống máy kéo nén MTS tại Phòng thí nghiệm và kiểm định công trình thuộc trường Đại học Xây dựng (LAS-XD125). Trên mỗi một đoạn thép, nhóm nghiên cứu tiến hành gắn hai cảm biến điện trở nhằm mục đích kiểm tra kết quả đo đặc biến dạng theo phương pháp DIC. Hai cách tạo mô hình đốm chấm bằng phun sơn và bút phủ đã được thử nghiệm tại thí nghiệm này như trên Hình 4. Để thực hiện phương pháp đo, một camera phổ thông Panasonic VIXIA R42 được sử dụng gắn trên một tripod ở khoảng cách khoảng 3 m so với mẫu thử. Camera đã tiến hành quay phim liên tục mẫu thí nghiệm trong suốt thời gian gia tải. Đồng thời, bộ đo biến dạng sử dụng cảm biến điện trở cũng được đấu nối vào hai cảm biến để có thể thu các giá trị biến dạng tương ứng với từng thời điểm gia tải theo các cấp 2 tấn, 4 tấn, ... đến 20 tấn. Hình 5 mô tả thực tế bố trí thí nghiệm và máy quay tại phòng thí nghiệm LAS-XD125.



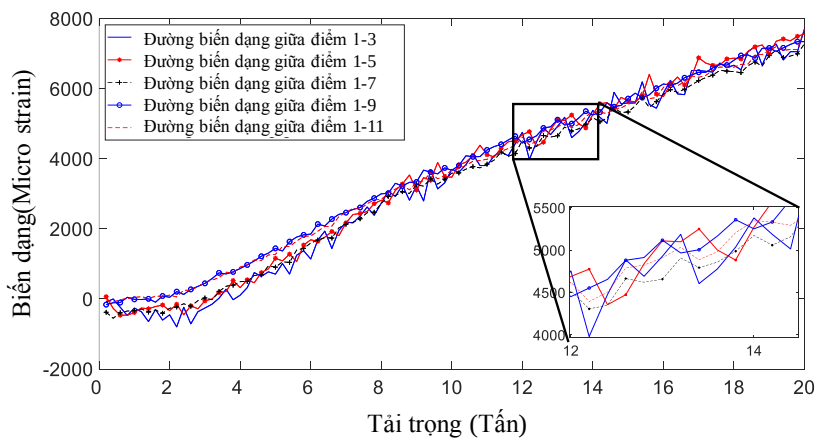
Hình 5. Bố trí thí nghiệm và máy quay

Sau khi quá trình gia tải kết thúc, một đoạn video ghi lại toàn bộ quá trình biến dạng của tảo cáp tương ứng với lực kéo, cùng với đó là bộ dữ liệu thu được từ các cảm biến điện tử tại các mức gia tải. Đoạn video quay được sẽ được xử lý bằng thuật toán tương quan hình ảnh nhằm trích xuất dữ liệu biến dạng. Đầu tiên, các điểm quan tâm được xác định tại bức ảnh đầu tiên. Nhằm kiểm tra mức độ tin cậy của thuật toán, tổng cộng 33 điểm quan tâm được thiết lập để xác định biến dạng giữa chúng. Các điểm này được chia thành ba cột, mỗi cột gồm 11 điểm được đánh số từ trái qua phải như trên Hình 6. Do thanh cáp chỉ chịu kéo, biến dạng tỉ đối giữa bất kỳ cặp điểm nào nằm trên cùng một cột cũng phải tương đương nhau.



Hình 6. Vị trí các điểm quan tâm ROI được định vị trên bức ảnh đầu tiên

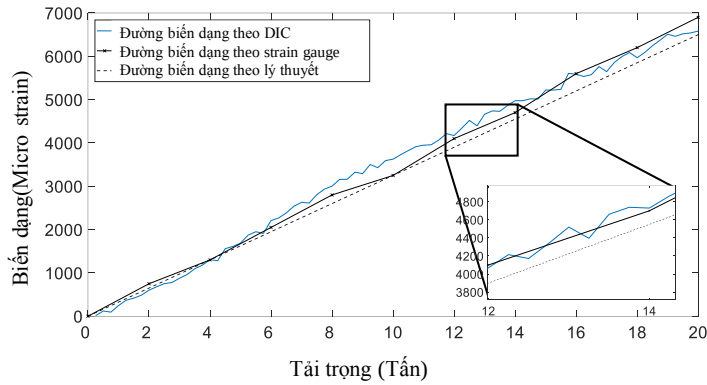
Hình 7 thể hiện quá trình phát triển biến dạng của tảo cáp theo tải trọng giữa các cặp điểm 1-3, 1-5, 1-7, 1-9, 1-11 tại cột thứ nhất. Có thể thấy các đường biến dạng khá trùng khớp với nhau, điều đó có nghĩa là biến dạng của tảo cáp tại các vị trí này xấp xỉ bằng nhau, hay nói cách khác kết quả đo bằng kỹ thuật DIC khá sát với lý thuyết và có độ tin cậy.



Hình 7. Đường biến dạng – tải trọng của tảo cáp xác định từ các cặp điểm quan tâm

Để kiểm tra kỹ hơn độ chính xác trong kết quả đo của kỹ thuật DIC, ta sẽ đem so sánh đường biến dạng trung bình của cột có kết quả chính xác nhất (trong thí nghiệm này là cột số 2) với kết quả thu được từ các cảm biến điện trở và kết quả tính toán theo lý thuyết có sử dụng các thông số như diện tích tảo cáp 140 mm^2 và mô đun đàn hồi của tảo cáp là 195000 MPa . Hình 8 cho ta thấy đường biến dạng đo được bằng kỹ thuật DIC khá phù hợp với đường biến dạng đo được từ cảm biến điện trở, cũng như với đường biến dạng theo lý thuyết. Với sai số kết quả đo trung bình khoảng dưới 5%, kết quả đo biến dạng bằng kỹ thuật tương quan hình ảnh DIC hoàn toàn có thể sử dụng được nhằm thay thế cho các cảm biến thông thường trong các thí nghiệm kéo thép.

Kết quả phân tích cũng cho thấy phương pháp tạo mô hình chấm chấm bằng bút phủ phù hợp hơn so với phương pháp phun sơn khi mẫu tảo cáp sử dụng mô hình phun sơn hầu như không thể xác định được giá trị biến dạng. Điều này có thể giải thích do bề mặt của cấu kiện đo quá bé, phương pháp phun sơn đã không thể tạo ra một mô hình chấm chấm phù hợp đáp ứng các yêu cầu tối thiểu đã được



Hình 8. So sánh kết quả đo của kỹ thuật DIC với kết quả đo bằng cảm biến điện trở và đường biến dạng lý thuyết

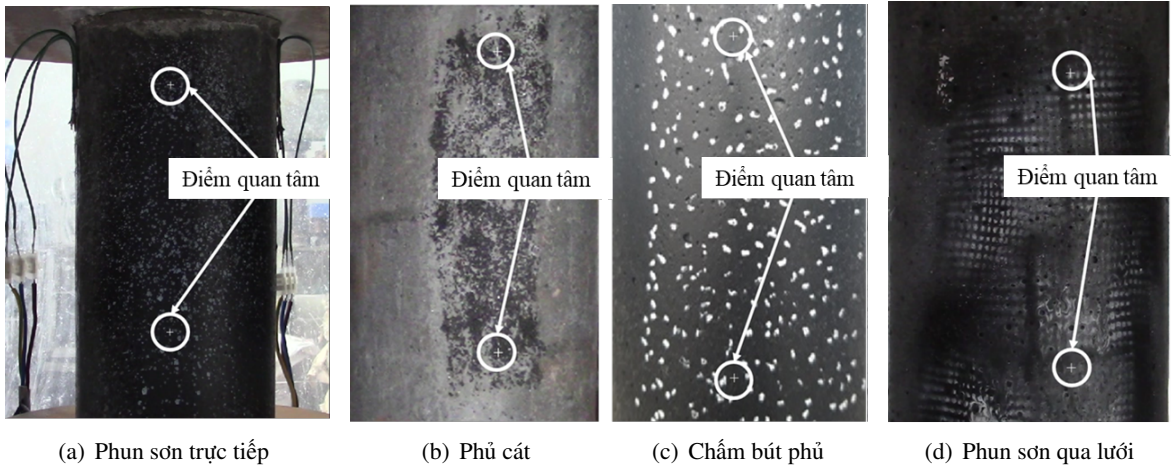
liệt kê tại Mục 3. Hơn thế nữa, với bề mặt trơn nhẵn bọc silicon đã hoàn toàn làm mất khả năng dính bám với sơn phun trong trường hợp này. Như vậy chỉ qua một vài thí nghiệm, việc lựa chọn phương pháp tạo mô hình chấm chấm hợp lý đã cho thấy có tính quyết định đến kết quả của phép đo biến dạng DIC. Các thí nghiệm tiếp theo trên các mẫu bê tông ở phần sau đây theo sẽ củng cố nhận định này.

4.2. Nghiên cứu các mô hình chấm chấm phù hợp cho cấu kiện bê tông

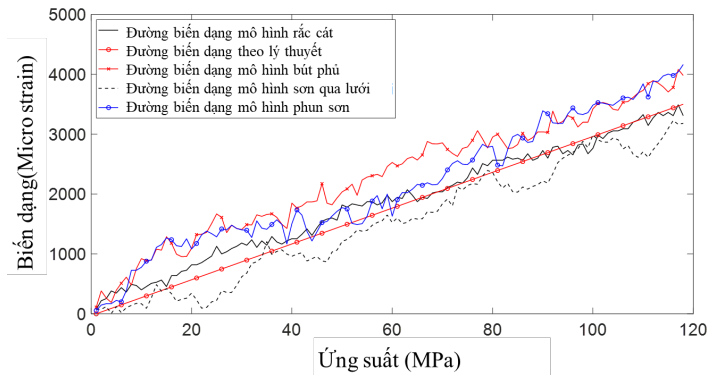
Như đã đề cập ở Mục 3, nhóm nghiên cứu đã tiến hành thử nghiệm một vài phương pháp tạo mô hình chấm chấm thường được sử dụng trên bề mặt kết cấu bê tông bao gồm: phun sơn, rắc cát, sử dụng bút phủ chấm ngẫu nhiên và phun sơn qua bề mặt lưới thép. Trong phần này, các thí nghiệm được thực hiện thông qua việc xác định biến dạng nén của các mẫu bê tông. Các kết quả thu được nhằm đánh giá độ chính xác và phù hợp của kỹ thuật DIC khi sử dụng với các mô hình chấm chấm khác nhau cho cấu kiện bê tông. Trong thí nghiệm này, mẫu thí nghiệm là các mẫu bê tông có dạng hình trụ tròn, kích thước $d \times h = 10 \times 20$ cm, trong đó d là đường kính mặt đáy, h là chiều cao mẫu bê tông. Bề mặt của mỗi mẫu được phủ các mô hình chấm chấm bằng các phương pháp như phun sơn, phun sơn qua lưới, chấm bút phủ và rắc cát (Hình 9).

Các mẫu bê tông được thí nghiệm nén đến phá hoại và toàn bộ quá trình biến dạng mẫu bê tông được camera ghi lại. Lặp lại quá trình xử lý hình ảnh tương tự như các thí nghiệm kéo tạo cấp đã trình bày ở phần trên, kết quả thu được dưới dạng các biểu đồ biến dạng – ứng suất tương ứng được thể hiện như trên Hình 10. Các đường biến dạng này được so sánh với đường biến dạng lý thuyết sử dụng các thông số vật liệu như mô đun đàn hồi của bê tông UHPC là $E = 45000$ MPa, diện tích bề mặt mẫu trụ $A = 0,0078$ m².

Có thể thấy đường biến dạng tương ứng với mô hình rắc cát bám khá sát đường biến dạng tính theo công thức lý thuyết. Trong khi đó, mô hình phun sơn cho kết quả tương đối gần với đường lý thuyết ở giai đoạn ứng suất từ 40-80 MPa. Điều này chứng tỏ hai mô hình này khá phù hợp để sử dụng trong thí nghiệm xác định biến dạng nén của mẫu bê tông. Đặc biệt trong mô hình rắc cát, các hạt cát đen có màu tương phản với màu của mẫu bê tông làm cho các điểm quan tâm nổi bật hơn (Hình 9(b)), dẫn đến việc theo dõi độ dịch chuyển của các điểm này trở nên chính xác hơn. Đường biến dạng của mô hình chấm bút phủ và mô hình phun sơn qua lưới dù có cùng xu hướng nhưng lại lệch khá xa đường biến dạng lý thuyết. Điều này là do mô hình chấm chấm được chuẩn bị không tốt, các chấm chấm bằng bút phủ có kích thước quá to, quá thưa và không thực sự ngẫu nhiên (Hình 9(c)). Điều này có thể giải thích do bề mặt mẫu bê tông khá rộng nên công tác chấm điểm khó thực hiện hơn nhiều so với



Hình 9. Mẫu bê tông thí nghiệm được tạo mô hình chấm chấm bằng các phương pháp



Hình 10. Biểu đồ so sánh các kết quả biến dạng áp dụng các mô hình chấm chấm khác nhau và kết quả theo lý thuyết

khi chấm điểm trên bề mặt tạo cáp. Với mô hình phun sơn qua lưới, các chấm chấm có màu sắc khá mờ nhạt, không nổi bật trên bề mặt bê tông. Ngoài ra do các lỗ lưới được thiết kế khá giống nhau đã làm mất tính ngẫu nhiên của mô hình chấm chấm (Hình 9(d)). Các kết quả trên cho thấy việc tạo mô hình chấm chấm đóng vai trò vô cùng quan trọng trong kỹ thuật DIC, mô hình chấm chấm tốt giúp làm nổi bật các đặc trưng của bề mặt mẫu thí nghiệm, làm tăng độ chính xác của thuật toán xử lý hình ảnh tương quan. Ngoài ra, cũng cần chú ý đến điều kiện chiếu sáng, độ phân giải của máy quay để có thể thu được kết quả chính xác nhất từ kỹ thuật DIC.

5. Kết luận và kiến nghị

Bài báo đã giới thiệu một phương pháp đo biến dạng kết cấu dựa vào thuật toán phân tích tương quan hình ảnh. Kết quả đo biến dạng bằng kỹ thuật DIC được kiểm chứng thông qua hai thí nghiệm: xác định biến dạng kéo trong tạo cáp thép và biến dạng nén trong các mẫu bê tông. Trong thí nghiệm kéo cáp thép, kết quả đo biến dạng bằng kỹ thuật DIC được so sánh với kết quả thu được từ cảm biến điện trở và đường biến dạng theo công thức lý thuyết. Trong thí nghiệm này, việc tạo mô hình chấm

chấm bằng bút phủ đã cho kết quả khá chính xác. Tuy nhiên phương pháp tạo mô hình đốm chấm bằng phun sơn đã hoàn toàn không hiệu quả do bề mặt cấu kiện cần đo quá nhỏ và không có độ dính bám. Trong thí nghiệm nén mẫu bê tông, nhóm tác giả đã đề xuất và kiểm chứng độ phù hợp của một số mô hình đốm chấm bao gồm: mô hình phun sơn trực tiếp, mô hình chấm bút phủ, mô hình phủ cát và mô hình phun sơn qua lưới. Kết quả cho thấy các mô hình khác nhau sẽ cho ra kết quả với độ chính xác khác nhau. Mô hình phủ cát và phun sơn trực tiếp cho kết quả khá chính xác so với công thức lý thuyết; tuy nhiên, mô hình chấm bút phủ và mô hình phun sơn qua lưới lại cho kết quả chưa được như mong muốn.

Kỹ thuật DIC có chi phí trang thiết bị thấp, công tác chuẩn bị và lắp đặt đơn giản, thời gian xử lý của thuật toán phân tích tương quan có thể chấp nhận được. Như vậy đây có thể là một lựa chọn thay thế hợp lý cho các phương pháp đo đặc truyền thống nhằm giảm bớt chi phí trong công tác thí nghiệm vật liệu, đo đặc cấu kiện và kết cấu trong phòng cũng như ngoài hiện trường. Phương pháp cũng khá phù hợp khi có thể đo được biến dạng của cả một vùng, theo nhiều phương khác nhau thay vì chỉ đo tại một vài vị trí như cách đo đặc truyền thống. Tuy nhiên, một số điểm cần chú ý khi tiến hành phương pháp như điều kiện chiếu sáng khi thiết lập máy quay, độ phân giải của máy quay, độ tương phản trên bề mặt mẫu thí nghiệm và đặc biệt là phương pháp tạo mô hình đốm chấm để có được kết quả chính xác nhất.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Bộ Giáo dục và Đào tạo, và Trường Đại học Xây dựng cho đề tài mã số B2017-XDA-09.

Tài liệu tham khảo

- [1] Ruge, A. C. (1944). *U.S. Patent No. 2,350,972*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [2] Exner, R. (1977). *U.S. Patent No. 4,058,007*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [3] Li, J., Hao, H., Fan, K., Brownjohn, J. (2015). [Development and application of a relative displacement sensor for structural health monitoring of composite bridges](#). *Structural Control and Health Monitoring*, 22(4):726–742.
- [4] Bruck, H. A., McNeill, S. R., Sutton, M. A., Peters, W. H. (1989). [Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction](#). *Experimental Mechanics*, 29(3):261–267.
- [5] Chu, T. C., Ranson, W. F., Sutton, M. A. (1985). Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental Mechanics*, 25(3):232–244.
- [6] Pan, B., Qian, K., Xie, H., Asundi, A. (2009). [Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review](#). *Measurement Science and Technology*, 20(6):062001.
- [7] Tùng, K. Đ., Tuyền, N. N., Mai, N. N. (2016). [Monitoring of structural behaviors using low-end cameras](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐH XD*, 10(4):3–10.
- [8] Pan, B., Xie, H., Guo, Z., Hua, T. (2007). [Full-field strain measurement using a two-dimensional Savitzky-Golay digital differentiator in digital image correlation](#). *Optical Engineering*, 46(3):033601.
- [9] Pan, B., Da-fang, W. U., Xia, Y. (2010). Study of Speckle Pattern Quality Assessment used in Digital Image Correlation [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2:120–129.
- [10] Dong, Y. L., Pan, B. (2017). [A review of speckle pattern fabrication and assessment for digital image correlation](#). *Experimental Mechanics*, 57(8):1161–1181.
- [11] LePage, W. S., Shaw, J. A., Daly, S. H. (2017). [Optimum paint sequence for speckle patterns in digital image correlation](#). *Experimental Techniques*, 41(5):557–563.