BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC XÂY DỰNG

BÁO CÁO TỔNG KẾT

ĐỀ TÀI KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ CẤP TRƯỜNG NĂM 2017

NGHIÊN CỨU PHÁT HIỆN VÀ XÁC ĐỊNH VỊ TRÍ THAY ĐỔI ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH THÀNH PHẦN CHỦ YẾU

Mã số: 25 – 2017/KHXD

Chủ nhiệm đề tài: KS. Bùi Huy Tăng

Hà Nội, 12/2017

Mục lục

Mục lục ..... **i**

Danh mục các từ viết tắt ..... **iii**

Danh mục hình vẽ ..... **iv**

Danh mục bảng biểu ..... **v**

Chương 1 : Mở đầu ..... **- 1 -**

1.1 Tổng quan các phương pháp đánh giá sức khỏe công trình bằng phương pháp phân tích phi tham số vật lý kết cấu trên thế giới và tại Việt Nam ..... **- 1 -**

1.1.1 Tổng quan các phương pháp đánh giá sức khỏe công trình bằng phương pháp phân tích phi tham số vật lý kết cấu trên thế giới ..... - 1 -

1.1.2 Tổng quan các phương pháp đánh giá sức khỏe công trình bằng phương pháp phân tích phi tham số vật lý kết cấu tại Việt Nam ..... - 7 -

1.2 Tính cấp thiết của đề tài ..... **- 7 -**

1.3 Mục tiêu của đề tài ..... **- 8 -**

1.4 Cách tiếp cận ..... **- 8 -**

1.5 Phương pháp nghiên cứu ..... **- 8 -**

1.6 Đối tượng và phạm vi nghiên cứu ..... **- 9 -**

1.7 Nội dung nghiên cứu ..... **- 9 -**

Chương 2 Cơ sở lý thuyết phương pháp phân tích thành phần chủ yếu ..... **- 10 -**

2.1 Cơ sở lý thuyết các kỹ thuật tiền xử lý dữ liệu. ..... **- 10 -**

2.1.1 Loại bỏ phần động trong dữ liệu đo biến dạng hoặc chuyển vị bằng hàm Fourier Transform. ..... - 10 -

2.1.2 Chuẩn hóa dữ liệu đo bằng phương pháp tự tỉ lệ ..... - 12 -

2.2 Cơ sở lý thuyết phương pháp phân tích thành phần chủ yếu (PCA) ..... **- 13 -**

2.3 Cơ sở lý thuyết xác định chỉ số phát hiện và định vị hư hỏng trên kết cấu ..... **- 15 -**

2.3.1 Chỉ số phát hiện hư hỏng kết cấu ..... - 15 -

2.3.2 Chỉ số xác định vị trí hư hỏng ..... - 16 -

2.4 Thuật toán xác định hư hỏng kết cấu bằng phương pháp phân tích thành phần chủ yếu ..... **- 16 -**

Chương 3 Giới thiệu phần mềm Matlab 2014a, chương trình tính và mô hình cầu thép thí nghiệm ..... **- 19 -**

3.1 Giới thiệu phần mềm Matlab 2014a ..... **- 19 -**

3.1.1 Giới thiệu chung ..... - 19 -

3.1.2 Nguyên tắc cơ bản lập trình trong Matlab ..... - 19 -

3.2 Chương trình phân tích phát hiện hư hỏng kết cấu bằng phương pháp phân tích thành phần chủ yếu trên nền Matlab 2014a ..... - 21 -

3.3 Mô tả mô hình cầu thép thí nghiệm và dữ liệu thu thập ..... - 24 -

Chương 4 Kiểm tra khả năng của thuật toán thông qua phân tích dữ liệu đo từ mô hình cầu thép thí nghiệm ..... - 27 -

4.1 Kiểm tra khả năng phát hiện hư hỏng kết cấu dựa trên chỉ số DSF và đám mây thành phần chính. ..... - 27 -

4.2 Kiểm tra khả năng xác định sự thay đổi trạng thái kết cấu thông qua đám mấy thành phần chính yếu (vector riêng) ..... - 30 -

4.3 Kiểm tra khả năng định vị vị trí hư hỏng trên kết cấu bằng chỉ số DL ..... - 32 -

Chương 5 Kết luận và kiến nghị ..... - 33 -

5.1 Kết luận ..... - 33 -

5.2 Kiến nghị ..... - 33 -

Tài liệu tham khảo ..... - 34 -

Danh mục các từ viết tắt

PCA	Principal Component Analysis (Phân tích thành phần chủ yếu)
GUI	Graphical User Interface (Giao diện độ họa người dùng)
DSF	Damage Sensitive Feature (Tính nhạy cảm với hư hỏng)
DL	Damage Location (Vị trí hư hỏng)

Danh mục hình vẽ

Hình 1-1: Các bước thực hiện trong công tác đánh giá sức khỏe công trình ..... - 3 -

Hình 2-1: Hình vẽ biểu thị dữ liệu đo chuyển vị tại gối giữa của một mô hình cầu thép hai nhịp ..... - 10 -

Hình 2-2: Thành phần cấu tạo dữ liệu đo ..... - 11 -

Hình 2-3: Hình vẽ biểu diễn dữ liệu sau khi chuyển về miền tần số, cảm biến 5 ..... - 12 -

Hình 2-4: Hình biểu diễn nguyên lý phân tích thành phần chủ yếu ..... - 14 -

Hình 2-5: Hình vẽ mô tả phân phối chuẩn dữ liệu liên tục ..... - 16 -

Hình 2-6: Trình tự các bước thực hiện xác định hư hỏng kết cấu bằng phương pháp PCA. ..... - 17 -

Hình 2-7: Thuật toán phát hiện và định vị vị trí hư hỏng bằng phương pháp PCA ..... - 18 -

Hình 3-1: Mô hình cầu thép trong phòng thí nghiệm ..... - 24 -

Hình 3-2: Mô phỏng hư hỏng tổng thể và cục bộ của mô hình cầu ..... - 25 -

Hình 3-3: Ô tô mô hình được sử dụng gây kích thích lên kết cấu ..... - 25 -

Hình 3-4: Mặt bằng bố trí thiết bị và thiết lập trạng thái hư hỏng a) trạng thái ban đầu; b) trạng thái hư hỏng ..... - 26 -

Hình 4-1: Kết quả phân tích chỉ số DSF theo lần quan sát ứng với mỗi cảm biến ..... - 30 -

Hình 4-2: Đám mây dữ liệu trong không gian thành phần chính thứ nhất và thứ hai . - 31 -

Hình 4-3: Hình thể hiện chỉ số DL nhằm định vị vị trí hư hỏng kết cấu ..... - 32 -

Danh mục bảng biểu

Bảng 1-1: Bảng so sánh phương pháp phi tham số kết cấu và tham số kết cấu ..... - 2 -

Bảng 4-1: Bảng giá trị DL tại các vị trí cảm biến..... - 32 -

Chương 1 : Mở đầu

1.1 Tổng quan các phương pháp đánh giá sức khỏe công trình bằng phương pháp phân tích phi tham số vật lý kết cấu trên thế giới và tại Việt Nam

1.1.1 Tổng quan các phương pháp đánh giá sức khỏe công trình bằng phương pháp phân tích phi tham số vật lý kết cấu trên thế giới

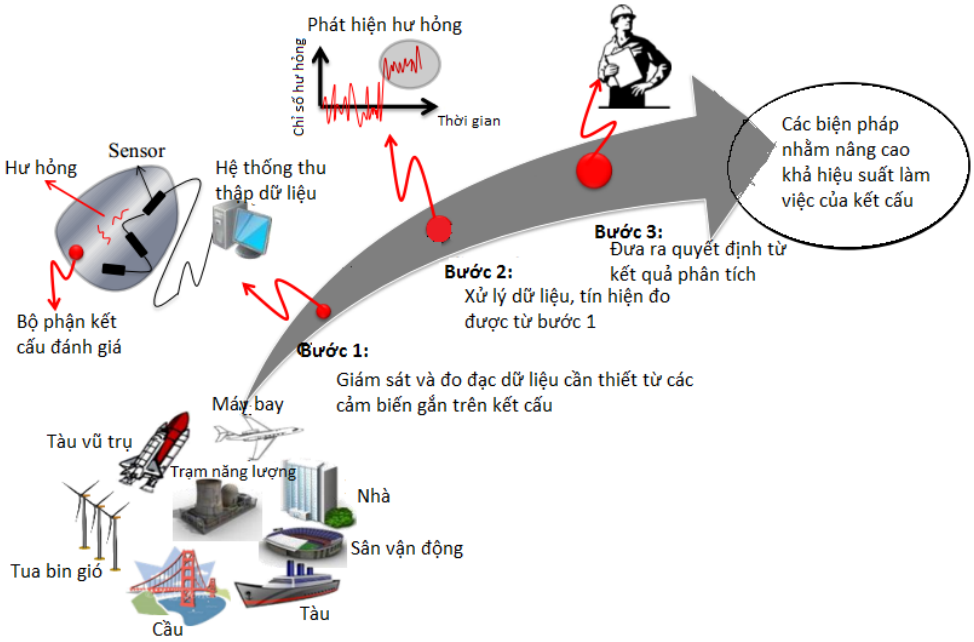
Trong những thập kỉ vừa qua, cùng với sự phát triển mạnh mẽ của kỹ thuật cảm biến (*sensing technology*) và thuật toán xử lý dữ liệu (*data processing*), giám sát sức khỏe công trình (*Structural health monitoring*) đã và đang là một trong những lĩnh vực được các nhà khoa học trên thế giới quan tâm đáng kể. Theo một số nghiên cứu gần đây, trong ngành công nghiệp của các nước phát triển, khoảng 40% tổng ngân sách sử dụng trong công nghiệp xây dựng được dùng để sửa chữa, duy tu và bảo dưỡng công trình cũ và chỉ khoảng 60% tổng ngân sách được sử dụng cho xây dựng công trình mới [26]. Riêng ở nước Mỹ có nhiều báo cáo nói rằng, hiện nay, một phần tư số cầu đang bị hư hỏng về kết cấu và hạn chế về chức năng, hằng năm Mỹ phải chi ngân sách lên đến 20.5 tỉ đô la để đánh giá, sửa chữa và cải tiến điều kiện làm việc của các cầu cũ [18].

Trong thực tế, giám sát đánh giá sức khỏe công trình được áp dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau như hàng không vũ trụ, cơ khí, xây dựng, giao thông ở những giai đoạn khác nhau gồm công tác kiểm tra chất lượng công trình mới, theo dõi hiệu suất vòng đời sử dụng hay đánh giá tình trạng công trình cũ. Trong đó, phát hiện và định vị vị trí hư hỏng là một trong những nội dung chính yếu nhất [12]. Hư hỏng kết cấu được định nghĩa là sự thay đổi đủ lớn về trạng thái, tính chất và ứng xử so với thể trạng mà kết cấu được xem là bình thường làm kết cấu không đủ khả năng chịu lực theo thiết kế đề ra. Quá trình đánh giá sức khỏe một công trình, nói chung trải qua ba giai đoạn chính. Giai đoạn 1 là bước khảo sát, gắn thiết bị đo lên công trình nhằm giám sát và thu thập dữ liệu cần thiết từ phản ứng của kết cấu dưới tác dụng của tải trọng và môi trường. Trong giai đoạn này, mặt bằng bố trí, chất lượng thiết bị cảm biến và tay nghề thi công ảnh hưởng đến chất lượng dữ liệu thu thập. Ở giai đoạn 2, quá trình xử lý dữ liệu bằng các thuật toán phù hợp được thực hiện dựa trên dữ liệu thu thập trong giai đoạn 1. Trong giai đoạn 2, về cơ bản có hai nhóm phương pháp xử lý dữ liệu đã và đang được áp dụng rộng rãi gồm nhóm phương pháp xử lý dữ liệu dựa trên tham số vật lý kết cấu (*Parametric Based Method*) hay còn có tên gọi khác như phương pháp mô hình tự do *(Model – free Method*), phương pháp dữ liệu định hướng (*Data – driven Method*), phương pháp phân tích tín hiệu trực tiếp (*Direct Signal Analysis*) và nhóm phương pháp xử lý dữ liệu phi tham số vật lý kết cấu (*Non – Parametric Based Method*) hay còn gọi là phương pháp dựa trên mô hình (*Model – Based Method*) [17, 34]. Việc lựa chọn áp dụng phương pháp nào phụ thuộc vào mục đích của công việc đánh giá sức khỏe công trình. Ưu nhược điểm của mỗi nhóm phương pháp và phạm vi áp dụng được thể hiện trong Bảng 1-1.

Bảng 1-1: Bảng so sánh phương pháp phi tham số kết cấu và tham số kết cấu

	Phương pháp phi tham số vật lý kết cấu	**Phương pháp dựa trên tham số vật lý kết cấu**
Ưu điểm	• Không cần mô hình kết cấu, do vậy không tốn thời gian và tiền vào công việc mô hình kết cấu. • Có thể phát hiện và định vị thay đổi/ hư hỏng kết cấu. • Có nhiều lựa chọn về phương pháp phân tích dữ liệu. • Sử dụng hiệu quả đối với những công trình có thời gian giám sát dài. • Có thể đưa ra dự báo về phát triển của hư hỏng dựa trên phương pháp hồi quy, tuy nhiên chỉ dựa trên xác suất- thống kê.	• Việc diễn giải dữ liệu và tìm hiểu nguyên nhân gây ra hư hỏng nếu có được thực hiện dễ dàng. • Ảnh hưởng của sự thay đổi tải trọng có thể được dự báo. • Có thể đưa ra các hướng dẫn cho các bước kiểm tra và đo đạc tiếp theo. • Kết quả dự đoán hư hỏng kết cấu trong tương lai có thể được đánh giá. • Hỗ trợ việc hình thành kế hoạch sửa chữa và gia cường kết cấu dựa trên mô hình phân tích.
Nhược điểm	• Khó khăn trong việc giải thích về thay đổi đặc tính vật lý kết cấu dựa trên kết quả phân tích. • Hỗ trợ ít trong việc đưa ra quyết định về mức độ sửa chữa và gia cường kết cấu. • Không trực tiếp đưa ra các hướng dẫn về việc kiểm tra và đo đạc trong các bước tiếp theo. • Không thể đưa ra được các lý do, nguyên nhân của hư hỏng.	• Mô hình hóa kết cấu là một công việc tốn nhiều thời gian, công sức và tiền bạc. • Các sai sót, chênh lệch trong mô hình và phép đo có thể dẫn đến việc đánh giá cho một mô hình sai. • Khó quản lý vì có một số lượng lớn mô hình ứng viên. • Để đánh giá mô hình đúng có thể yêu cầu một số vòng lặp trong việc diễn giải dữ liệu đo. • Kết cấu phức tạp với nhiều bộ phận sẽ gây khó khăn lớn trong việc mô hình.
Phạm vi áp dụng	• Kết cấu đánh giá không cần phân tích nguyên nhân. • Việc dự đoán ứng xử kết cấu không nằm trong mục đính của đánh giá. • Giám sát, đánh giá nhiều công trình một lúc.	• Mô hình thiết kế không chính xác và cần cập nhật. • Công trình quan trọng • Nghi ngờ kết cấu có hư hỏng. • Có nhiều vấn đề trong quản lý hồ sơ công trình.

Giai đoạn 3, dựa trên kết quả phân tích từ giai đoạn 2, người kĩ sư phải đưa ra các quyết định về trạng thái, điều kiện làm việc, cũng như các biện pháp xử lý nhằm nâng cao hiệu quả làm việc của kết cấu nhằm đảm bảo tính an toàn và khai thác của công trình. Minh họa các bước thực hiện trong công tác đánh giá sức khỏe công trình được thể hiện trên Hình 1-1.



Hình 1-1: Các bước thực hiện trong công tác đánh giá sức khỏe công trình

Theo nhóm phương pháp tham số vật lý kết cấu, hư hỏng sẽ được phát hiện và định vị dựa trên những thay đổi về đặc tính dao động của kết cấu. Những đặc tính dao động này được thể hiện thông qua các tham số mô hình như tần số dao động riêng [29], mô hình dạng dao động [27, 35] và mô hình giảm chấn, chúng là các hàm miêu tả thể chất vật lý của kết cấu gồm khối lượng, hệ số giảm chấn và độ cứng [30]. Khi kết cấu xuất hiện hư hỏng, các đại lượng vật lý thay đổi gây nên sự chêch lệch và khác biệt trong các tham số mô hình, đại diện cho đặc tính dao động kết cấu, dựa trên mức độ chênh lệch này trạng thái của kết cấu được xác định. Tuy nhiên các đặc tính dao động này rất dễ bị ảnh hưởng dưới sự biến đổi của môi trường và điều kiện tải trọng dẫn đến sai lệch trong việc đánh giá đúng thực trạng của kết cấu [2]. Hơn nữa, việc tạo các mô hình vật lý thể hiện chính xác ứng xử kết cấu tốn rất nhiều thời gian, làm chậm khả năng phát hiện hư hỏng và có thể làm tăng giá thành của quá trình phân tích.

Ở một hướng đi khác, cùng với sự phát triển của khoa học máy tính và thiết bị thu thập dữ liệu, nhóm phương pháp xác định trạng thái kết cấu dựa trên mô hình xác suất – thống kê (phương pháp phi tham số vật lý kết cấu) đã và đang dành được sự quan tâm lớn của các nhà khoa học trên thế giới trong những năm gần đây. Theo nhóm phương pháp này, phản ứng kết cấu được thu thập trong miền thời gian dưới dạng dữ liệu đo như chuyển vị, biến dạng, gia tốc thông qua các cảm biến (*sensor*), kết hợp với các thuật toán xử lý và phân tích dữ liệu dựa trên lý thuyết xác suất – thống kê, cho phép phát hiện và định vị những biến đổi/hư hỏng cục bộ và tổng thể về ứng xử kết cấu. Các bước

đánh giá kết cấu theo nhóm phương pháp này, nói chung, tuân theo các bước như đã trình bày ở trên. Về chi tiết, ở bước 2, xử lý dữ liệu gồm các bước nhỏ chính như sau: (i) sử dụng thuật toán phân tích nhằm hạn chế, loại bỏ ảnh hưởng ngẫu nhiên của điều kiện môi trường và các yếu tố khác trong quá trình khai thác công trình lên tham số đánh giá hư hỏng làm sai lệch trong việc đưa ra quyết định của người kỹ sư; (ii) định nghĩa trạng thái không hư hỏng của kết cấu và tham số sử dụng nhằm đánh giá trạng thái kết cấu; (iii) sử dụng thuật toán phân tích dữ liệu thu thập từ phản ứng kết cấu ở cả hai thể trạng, cơ bản và giám sát; (iv) thiết lập mối tương quan so sánh giữa hai trạng thái kết cấu thông qua tham số đánh giá; (v) đánh giá tình trạng kết cấu, dự báo xu hướng phát triển hư hỏng [11]. Để so sánh hai trạng thái kết cấu, nhóm phương pháp này sử dụng dữ liệu đo trong miền thời gian gồm chuyển vị, biến dạng, gia tốc thiết lập nên một mô hình thống kê đặc trưng cho đặc tính ứng xử kết cấu. Để nhận diện trạng thái kết cấu, các lý thuyết xác suất được áp dụng ở bước (v) [13]. Đánh giá kết cấu bằng nhóm phương pháp phi tham số vật lý cho phép rút ngắn thời gian phân tích, giảm thời gian phát hiện hư hỏng kể từ khi xuất hiện trên kết cấu, không phải trải qua bước mô hình kết cấu từ đó có thể giảm giá thành. Theo phương pháp này, tình trạng công trình có thể được xác định mà không cần kiến thức đánh giá chuyên sâu của chuyên gia, cũng như các tài liệu, hồ sơ về kích thước hình học và tính chất vật liệu công trình, phù hợp với phân tích đánh giá kết cấu một cách liên tục trong thời gian dài. Bên cạnh đó, phương pháp này cũng tồn tại một số nhược điểm như đã liệt kê trong Bảng 1-1. Do phương pháp này mới được quan tâm áp dụng trong lĩnh vực xây dựng trong khoảng 30 năm trở lại đây, bên cạnh các thuật toán được tạo ra và phát triển hiện vẫn còn nhiều vấn đề vướng mắc cần được nghiên cứu như thuật toán loại bỏ tác động nhiễu của mỗi trường, tải trọng, thuật toán phát hiện vị trí và đánh giá hư hỏng kết cấu có độ tin cậy cao.

Một số phương pháp cơ bản trong nhóm phương pháp phi tham số vật lý kết cấu đã được phát triển trong những năm vừa qua có thể kể đến gồm:

Phương pháp tương quan chéo (*Cross correlation*): Sử dụng lý thuyết tương quan chéo nhằm đánh giá sức khỏe công trình [4, 14, 36]. Theo phương pháp này, dữ liệu đo phản ứng tại các vị trí kết cấu được thu thập thông qua các cảm biến kết hợp với công thức tính tương quan, mối quan hệ giữa các vị trí trên kết cấu được thiết lập. Hệ số tương quan chéo giữa hai vị trí trên kết cấu được xác định theo công thức sau

$$p_{ij}(t_n) = \frac{\sum_{k=1}^{n}(s_i(t_k) - \mu_i) \times (s_j(t_k) - \mu_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{n}(S_i(t_k) - \mu_i)^2} \times \sqrt{\sum_{k=1}^{n}(S_j(t_k) - \mu_j)^2}} \quad (1)$$

Trong đó:

$p_{ij}(t_n)$ là hệ số tương quan chéo giữa cảm biến i và cảm biến j tại thời điểm t_n.

$S_i(t_k)$, $S_j(t_k)$ lần lượt là giá trị dữ liệu đo của cảm biến i và cảm biến j tại thời điểm t_k.

μ_i, μ_j lần lượt là giá trị trung bình của dữ liệu đo của cảm biến i và cảm biến j.

Nguyên tắc phát hiện sự thay đổi trong ứng xử kết cấu hoặc hư hỏng theo phương pháp này được xác định như sau: Khi ở một trạng thái nhất định, các vị trí trên kết cấu có mối quan hệ tương quan chéo với nhau, sự tương quan này được thể hiện thông qua hệ số tương quan chéo, nó không thay đổi theo thời gian dưới tác dụng ngẫu nghiên của tải trọng và môi trường. Chỉ khi có sự biến đổi về trạng thái (thay đổi độ cứng, thay đổi điều kiện biên do hư hỏng) làm cho đặc tính kết cấu bị thay đổi dẫn đến thay đổi về mối quan hệ tương quan giữa các vị trí. Tại những vị trí càng gần hư hỏng thì hệ số tương quan càng thay đổi mạnh. Do vậy, trong quá trình phân tích, dựa trên mức độ thay đổi của hệ số tương quan mà trạng thái của kết cấu được xác định. Để nâng cao tính chính xác của thuật toán, các bước tiền xử lý dữ liệu như hạn chế tác động của tải trọng ngẫu nhiên, môi trường, loại bỏ yếu tố động trong dữ liệu chuyển vị và biến dạng, loại bỏ dữ liệu thừa, tính hiệu quả của phương pháp sau khi tiền xử lý dữ liệu được thể hiện thông qua nghiên cứu của Tang [4].

Phương pháp tự hồi quy (*Auto – Regressive*): Sử dụng lý thuyết tự hồi quy nhằm xây dựng một mô hình xác suất – thống kê thể hiện đặc tính của dữ liệu đo cũng như đặc trưng của kết cấu, mô hình này sau đó được sử dụng để phân tích và định nghĩa các chỉ số hư hỏng nhằm xác định trạng thái kết cấu, thông thường các chỉ số phát hiện hư hỏng đều dựa trên hệ số hồi quy được xác định theo công thức (2) [6, 10, 12]. Theo nguyên lý của phương pháp này, dữ liệu đo từ phản ứng kết cấu là một chuỗi số liệu rời rạc, không tuân theo bất kì quy luật nào sẽ được mô hình sang một hàm toán học biểu diễn gần đúng đặc tính của dữ liệu. Thông qua mô hình toán học này, chỉ số xác định, thể hiện đặc trưng của kết cấu được định nghĩa. Dựa trên thay đổi của các chỉ số này kết hợp với lý thuyết xác suất, sự biến đối ứng xử trạng thái kết cấu hay hư hỏng được xác định.

$$x_{ij}(t) = \sum_{k=1}^{p} \phi_k x_{ij}(t-k) + \varepsilon_{ij}(t) \qquad (2)$$

Trong đó:

x_{ij} là dữ liệu đo của cảm biến thứ i với đoạn dữ liệu đo thứ j

ϕ_k là hệ số tự hồi quy thứ k

ε_{ij} là phần dữ liệu dự báo sai lệch giữa mô hình tự hồi quy với dữ liệu thực tế, thông thường được lấy theo quy luật phân bố chuẩn.

p là bậc của mô hình tự hồi quy.

Phương pháp phân tích mạng lưới thần kinh nhân tạo (*Artificial Neural Network*):

Phương pháp mạng lưới thần kinh nhân tạo kết hợp với lý thuyết xác suất thống kê là một phương pháp phát hiện hư hỏng trong kết cấu thông qua thuật toán phân tích xác định các yếu tố đột biến hoặc các yếu tố mới lạ [25]. Mạng lưới thần kinh nhân tạo là một tập hợp các mô hình toán học hoạt động dựa trên nguyên lý của mạng lưới thần kinh

sinh học mà trong đó đơn vị xử lý cơ bản là tế bào, một khái niệm mà ở trong lĩnh vực xây dựng gọi là cảm biến. Trong mỗi mô hình kết cấu cảm biến i được kết nối với các cảm biến j ở lớp trước và sau nó thông qua cường độ kết nối w_{ij}. Trong lớp k, tổng cường độ liên kết ở cảm biến i được tính toán từ tất cả tín hiệu $x_j^{(k-1)}$ của lớp trước (k-1) tạo nên một kích thích cho cảm biến i (z_i^k). Sau đó, lực kích thích này sẽ được phân tích thông qua hàm hiệu lực phi tuyến (*nonlinear activation function*) f nhằm đưa ra kết quả của cảm biến i. Công thức của quá trình phân tích, tính toán này được thể hiện như sau [5]:

$$x_i^{(k)} = f\left(z_i^{(k)}\right) = f\left(\sum_j w_{ij}^{(k)} x_j^{(k-1)}\right) \quad (3)$$

Kết quả phân tích theo công thức (3) được sử dụng cùng với lý thuyết xác suất – thống kê để đánh giá tình trạng kết cấu.

Phương pháp phân tích sóng gợn (*Wavelet Analysis Method*):

Phương pháp phân tích sóng gợn là phương pháp phân tích chuỗi dữ liệu đo trong miền thời gian thông qua các thành phần con, mà ở đó các thành phần này được xác định dựa trên những tham số ảnh hưởng đến chuỗi dữ liệu. Sau đó, thuật toán phân tích sẽ được thực hiện trên các thành phần con này nhằm trích xuất những thông tin quan trọng của chuỗi dữ liệu, từ đó hư hỏng trong kết cấu sẽ được phát hiện và định vị. Một cách cụ thể, giả sử chuỗi dữ liệu trong miền thời gian là Y_t, dựa trên phương pháp phân tích sóng, chuỗi dữ liệu Y_t sẽ được phân tích theo công thức sau [7, 19]:

$$Y_t = c_{J,k}\phi_{J,k}(t) + \sum_{j=1}^{J} d_{j,k}\psi(t) \quad (4)$$

Trong đó:

$c_{j,k}$ là hệ số tỉ lệ

$\phi_{j,k}$ là hàm tỉ lệ

$d_{j,k}$ là hệ số sóng gợn

Phương pháp phân tích thành phần chủ yếu (*Principle Component Analysis Method - PCA*):

Theo phương pháp này, một mô hình PCA được xây dựng dựa trên các thành phần chính yếu, mà trên đó dữ liệu đo được chiếu lên một số hướng chính với mục đích giảm không gian, chiều của biến mà lượng thông tin bị thất thoát là tối thiểu và vẫn đảm bảo giữ được đặc tính chính của dữ liệu cũng như đặc trưng cơ bản của kết cấu. Phương pháp này đã được áp dụng trên một số mô hình nhỏ thí nghiệm trong lĩnh vực cơ khí như cánh máy bay, tấm nhôm với lực kích thích được xác định trước và giả thiết rằng số lần lấy dữ liệu theo thời gian trong các lần đo là giống nhau [8, 20-22, 33]. Trong lĩnh vực xây dựng, Daniele Posenato đã so sánh phương pháp PCA với một số phương pháp phi tham số khác, trong bài báo đó tác giả đã sử dụng hai vector riêng ứng với hai giá trị riêng lớn nhất của ma trận tương quan dữ liệu làm chỉ số phát hiện hư hỏng [28].

Gần đây, ***phương pháp sử dụng thị giác máy tính*** (*Computer vision – based*) với dữ liệu thu thập thông qua các thiết bị chụp, quay hình (máy ảnh, máy quay) và thuật toán xử lý dữ liệu cũng đang được quan tâm lớn do tính thuật tiện và kinh tế [15, 16, 31].

1.1.2 Tổng quan các phương pháp đánh giá sức khỏe công trình bằng phương pháp phân tích phi tham số vật lý kết cấu tại Việt Nam

Ở Việt Nam trong khoảng 15 năm vừa qua, cũng đã bắt đầu có những nghiên cứu cơ bản về áp dụng các thuật toán trong nhóm phương pháp phân tích phi tham số vật lý kết cấu trong giám sát và đánh giá sức khỏe công trình xây dựng. Năm 2013, Trần Văn Liên và cộng sự đã nghiên cứu sử dụng phương pháp phân tích truyền sóng hai chiều dựa trên dữ liệu đo độ võng nhằm xác định vết nứt xiên bất kì trong tấm chịu uốn [32]. Năm 2014, Nguyễn Văn Khoa và cộng sự đã nghiên cứu xác định vết nứt trên một mô hình khung phẳng trong phòng thí nghiệm sử dụng phương pháp phân tích truyền sóng với số liệu đầu vào là các dạng dao động riêng đo được từ mô hình [24]. Năm 2016, Nguyễn Đức Phúc và Khúc Đăng Tùng đã nghiên cứu phát hiện hư hỏng kết cấu sử dụng kết hợp kỹ thuật phân tích giảm lượng ngẫu nhiên và phương pháp phân tích tự hồi quy cho một mô hình cầu thép trong phòng thí nghiệm [23]. Cũng trong năm này, Bùi Huy Tăng và Khúc Đăng Tùng đã có nghiên cứu về ảnh hưởng và hiệu quả của một số kỹ thuật tiền xử lý dữ liệu trước khi áp dụng phương pháp phân tích tương quan chéo nhằm xác định sự thay đổi ứng xử công trình dưới tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên [4]. Những nghiên cứu này được xem là những bước đi cơ bản ban đầu ở Việt Nam nhằm áp dụng phương pháp phân tích phi tham số vật lý kết cấu trong đánh giá sức khỏe công trình, một lĩnh vực đang được nhiều nhà khoa học trên thế giới quan tâm.

1.2 Tính cấp thiết của đề tài

Thực tế, trong lĩnh vực xây dựng hiện đại nói chung, công trình được đánh giá thường có kích thước rất lớn với nhiều kết cấu và chi tiết phức tạp, đặc biệt là công trình cầu, dẫn đến số lượng biến và dữ liệu khổng lồ. Điều này làm cho thời gian phân tích kéo dài, chậm khả năng phát hiện hư hỏng, ảnh hưởng đến công tác đánh giá, sửa chữa gây nguy hiểm cho công trình và người sử dụng. Hơn nữa, với lượng dữ liệu xử lý lớn dẫn đến những yêu cầu cao về thiết bị lưu trữ, phân loại dữ liệu cũng như gây khó khăn, phức tạp trong viết chương trình xử lý dữ liệu. Ngoài ra, trong điều kiện khai thác thực tế, dữ liệu đo bị ảnh hưởng bởi rất nhiều yếu tố ngẫu nhiên thay đổi theo không gian và thời gian làm giảm độ chính xác của thuật toán phân tích và kết luận của kỹ sư. Khi số lượng biến càng nhiều thì ảnh hưởng của những yếu tố ngẫu nhiên này càng lớn dẫn đến những sai lệch không đáng có trong kết quả phân tích. Do vậy, khi phân tích đánh giá một kết cấu thực tế có kích thước lớn, nhiều cấu kiện phức tạp, đòi hỏi một thuật toán hiệu quả có thể giảm không gian biến hoặc chiều của biến mà vẫn giữ được những đặc tính cơ bản của dữ liệu đo cũng như không làm mất đi những đặc trưng kết cấu.

Một trong những phương pháp hiệu quả nhất để giải quyết vấn đề nêu trên là phương pháp phân tích thành phần chủ yếu (*Principle Component Analysis – PCA*). Theo đó, một tập hợp dữ liệu biến đa chiều thu thập từ một kết cấu lớn, phức tạp sẽ được phân tích đưa về không gian chiều nhỏ hơn nhằm đơn giản hóa trong quá trình phân tích cũng như giảm thời gian phát hiện hư hỏng mà vẫn giữ được các tính chất quan trong của dữ liệu hay nói cách khác là vẫn giữ được đặc trưng cơ bản của trạng thái kết cấu.

1.3 Mục tiêu của đề tài

Xây dựng thuật toán và viết chương trình phát hiện hư hỏng xuất hiện trên kết cấu dựa trên nguyên lý của phương pháp phân tích thành phần chủ yếu và lý thuyết xác suất – thống kê bằng phần mềm Matlab.

Kiểm tra, đối chiếu tính đúng đắn của thuật toán bằng cách áp dụng, phân tích và xử lý dữ liệu đo từ một mô hình cầu thép 4 nhịp trong phòng thí nghiệm tại trường Đại học miền trung Florida.

1.4 Cách tiếp cận

Tổng hợp một số phương pháp đánh giá sức khỏe công trình sử dụng nhóm phương pháp phân tích phi tham số vật lý kết cấu bao gồm phương pháp phân tích thành phần chủ yếu trên thế giới và tại Việt Nam thông qua các bài báo khoa học và sách.

Phân tích, đánh giá những vấn đề mà các phương pháp tìm hiểu đã giải quyết được cũng như những khó khăn đang gặp phải.

Đề xuất một phương pháp phân tích hiệu quả - dựa trên phương pháp phân tích thành phần chủ yếu - nhằm phát hiện hư hỏng xuất hiện trên công trình lớn với nhiều cấu kiện phức tạp.

Viết thuật toán và sử dụng phần mềm Matlab để lập trình phương pháp phân tích thành phần chủ yếu để phát hiện hư hỏng xuất hiện trên kết cấu.

Kiểm tra tính đúng đắn của thuật toán bằng cách áp dụng phân tích, xử lý dữ liệu đo từ một mô hình cầu thép thí nghiệm.

1.5 Phương pháp nghiên cứu

Sử dụng phương pháp tìm kiếm, tổng hợp nhằm tìm hiểu một số nghiên cứu đã, đang thực hiện trên thế giới và tại Việt Nam liên quan đến nội dung của đề tài.

Sử dụng phương pháp phân tích nhằm chỉ ra những vấn đề các nghiên cứu đã thực hiện được cũng như những khó khăn mà các nghiên cứu gặp phải.

Sử dụng phương pháp đánh giá, tổng hợp đề xuất một phương pháp phát hiện hư hỏng đối với kết cấu lớn, phức tạp.

Sử dụng phương pháp lập trình để viết code cho phương pháp đề xuất.

Sử dụng phương pháp kiểm tra, đối chiếu, so sánh nhằm kiểm tra tính đúng đắn của thuật toán thông qua dữ liệu đo từ một mô hình cầu thí nghiệm.

1.6 Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu: Kết cấu mô hình cầu thép bốn nhịp trong phòng thí nghiệm.

Phạm vi nghiên cứu: Phát hiện và xác định vị trí hư hỏng dựa trên phương pháp phân tích thành phần chủ yếu thông qua dữ liệu đo biến dạng của một mô hình cầu thép trong phòng thí nghiệm.

1.7 Nội dung nghiên cứu

Đề tài "Nghiên cứu phát hiện và xác định vị trí thay đổi ứng xử của kết cấu bằng phương pháp phân tích thành phần chủ yếu" được thực hiện với nội dung như sau:

Tìm hiểu, so sánh và phân tích ưu, nhược điểm của một số thuật toán trong nhóm phương pháp phân tích phi tham số vật lý kết cấu nhằm phát hiện và định vị vị trí hư hỏng xuất hiện trên công trình.

Kiến nghị chỉ số phát hiện và xác định vị trí hư hỏng kết cấu dựa trên phương pháp phân tích thành phần chủ yếu, áp dụng cho công trình lớn, nhiều cấu kiện phức tạp.

Viết thuật toán, lập trình chương trình trên nền Matlab, nhằm phát hiện và xác định vị trí hư hỏng xuất hiện trên kết cấu, dựa trên phương pháp phân tích thành phần chủ yếu.

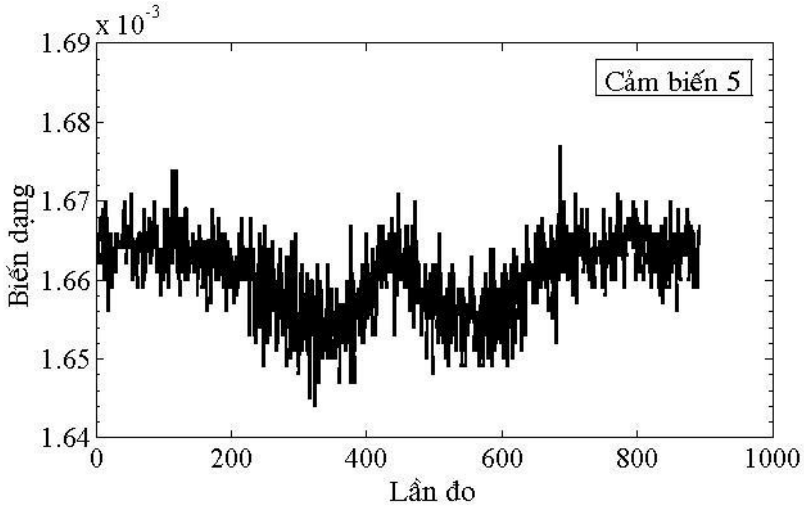
Kiểm tra tính đúng đắn của thuật toán và chương trình bằng cách áp dụng phân tích, xử lý dữ liệu đo từ một mô hình cầu thép thí nghiệm.

Chương 2 Cơ sở lý thuyết phương pháp phân tích thành phần chủ yếu

2.1 Cơ sở lý thuyết các kỹ thuật tiền xử lý dữ liệu.

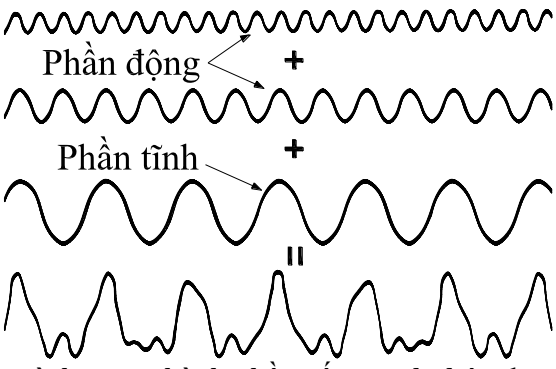
2.1.1 Loại bỏ phần động trong dữ liệu đo biến dạng hoặc chuyển vị bằng hàm Fourier Transform.

Các dữ liệu đo biến dạng và chuyển vị thu thập liên tục trong một khoảng thời gian, dưới điều kiện tải trọng tác dụng động, ngẫu nhiên được biểu diễn thông qua hai loại: phần dữ liệu tĩnh đại diện cho phần tác dụng tĩnh của tải trọng lên kết cấu và phần dữ liệu động gây ra bởi sự xung kích của tải trọng trong quá trình di chuyển. Tùy theo mục đích và phương pháp phân tích mà có thể chỉ phần dữ liệu tĩnh hoặc phần dữ liệu động hoặc dữ liệu kết hợp cả hai được sử dụng. Trong phương pháp sử dụng thuật toán phân tích thành phần chủ yếu dựa trên dữ liệu đo biến dạng, theo một số nghiên cứu thì khi sử dụng phần dữ liệu tĩnh phân tích sẽ đạt hiệu quả và độ chính xác cao hơn so với sử dụng phần dữ liệu động hoặc phần dữ liệu kết hợp cả hai [18]. Hình vẽ biểu diện dữ liệu đo biến dạng của một cảm biến gắn tại gối giữa (cảm biến 5) của một mô hình cầu thép thí nghiệm 2 nhịp được thể hiện trên Hình 2-1.



Hình 2-1: Hình vẽ biểu thị dữ liệu đo chuyển vị tại gối giữa của một mô hình cầu thép hai nhịp

Về bản chất, dữ liệu đo từ một cảm biến của một kết cấu dưới tác dụng tải trọng ngẫu nhiên là tổng đại số của các hàm dữ liệu có dạng hình sin và cosin với biên độ và tần số thay đổi [9]. Thông thường trong lĩnh vực xây dựng, phần dữ liệu tĩnh có tần số nhỏ hơn, giá trị độ lớn tần số lớn hơn nhiều so với dữ liệu động, Hình 2-2. Dựa trên nguyên lý này, một số phương pháp phân tích nhằm tách phần dữ liệu tĩnh và phần dữ liệu động được thực hiện bằng cách chuyển đổi và phân tích trong miền tần số được đề xuất. Một trong những phương pháp cổ điển, đơn giản và hữu hiệu nhất là phương pháp chuyển đổi Fourier Transform.



Hình 2-2: Thành phần cấu tạo dữ liệu đo.

Theo phương pháp Fourier Transform, dữ liệu liên tục trong miền thời gian sẽ được chuyển về miền tần số theo công thức sau:

$$c_k = \frac{1}{T_o}\int_{T_o} x(t)e^{-jk\Omega_o t}dt \quad (5)$$

Hoặc đối với dữ liệu rời rạc thì áp dụng công thức sau:

$$c_k = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (6)$$

Trong đó:

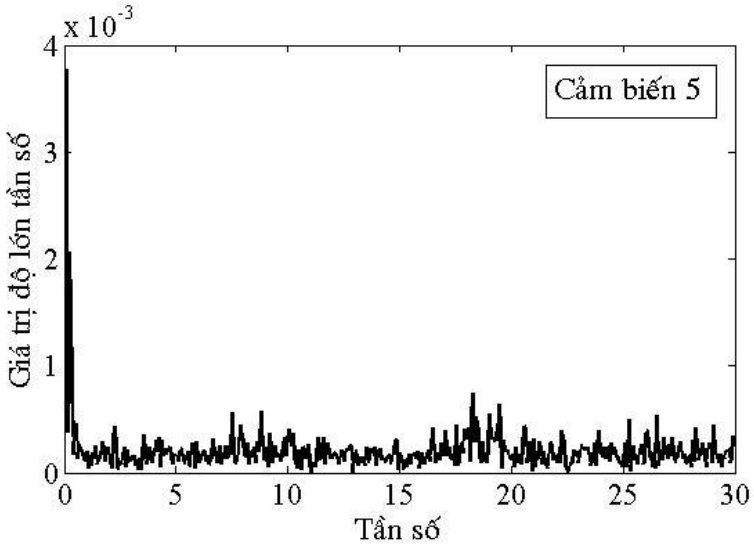
c_k là dữ liệu đo sau khi chuyển sang miền tần số

T_o là chu kì của hàm dữ liệu liên tục

x(t) là hàm dữ liệu đo trong miền thời gian

N là số mẫu của dữ liệu đo rời rạc

Sau khi chuyển sang miền tần số, dựa trên nguyên lý đã nêu ở trên, một giá trị ngưỡng của tần số sẽ được định nghĩa thông qua tính lặp dần để loại bỏ những thành phần động có giá trị tần số lớn trong dữ liệu đo, thông thường giá trị ngưỡng tần số này có giá trị thay đổi từ 0 Hz đến 2 Hz. Điều này có nghĩa là, thành phần dữ liệu đo có tần số lớn hơn giá trị ngưỡng này sẽ được xem là thành phần động của dữ liệu và được loại bỏ. Hình vẽ về hàm thời gian sau khi chuyển về miền tần số của cảm biến tại gối giữa của một mô hình cầu thép 2 nhịp trong phòng thì nghiệm được thể hiện trên Hình 2-3. Trong nghiên cứu này, với dữ liệu đo biến dạng của một mô hình cầu thép, sau quá trình thử lặp, giá trị ngưỡng tần số được lựa chọn trong thuật toán là 0.5 Hz.



Hình 2-3: Hình vẽ biểu diễn dữ liệu sau khi chuyển về miền tần số, cảm biến 5.

Sau khi loại bỏ phần dữ liệu có giá trị tần số cao hơn giá trị ngưỡng, dữ liệu sẽ được truyền ngược về miền thời gian theo công thức sau:

Đối với hàm dữ liệu liên tục:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k e^{jk\Omega_o t} \quad (7)$$

Đối với dữ liệu rời rạc:

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (8)$$

2.1.2 Chuẩn hóa dữ liệu đo bằng phương pháp tự tỉ lệ

Trong đánh giá sức khỏe công trình nói chung, kết cấu cầu nói riêng, việc giám sát và thu thập dữ liệu đo được thực hiện trong một khoảng thời dài ở các điệu kiện môi trường và khí hậu khác nhau cũng như sự ảnh hưởng nhất thời của tải trọng khai thác do điều kiện kết cấu. Những tác động này biến đổi theo không gian, thời gian và phụ thuộc vào nhiều yếu tố mà đôi khi người kỹ sư đánh giá không lường trước được, gây ra những tác động lên cảm biến dẫn đến kết quả đo bị sai lệch, không phản ánh đúng đặc tính làm việc của kết cấu. Để hạn chế ảnh hưởng của các yếu tố này, nhiều phương pháp được đề xuất, trong đó có phương pháp tự thay đổi tỉ lệ (*Autoscaling*) được nhiều nhà nghiên cứu sử dụng [6, 12, 18].

Theo phương pháp này, dữ liệu đo sẽ được phân tích nhằm đưa giá trị trung bình của chuỗi dữ liệu về 0 và đưa độ lệch chuẩn về giá trị đơn vị. Quá trình này được thực hiện theo công thức sau:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu_i}{\sigma_i} \quad (9)$$

Trong đó:

x_{ij}, $\overline{x}_{ij}$ là dữ liệu đo của cảm biến j tại thời điểm i trước và sau khi chuẩn hóa.

μ_j, σ_j là giá trị trung bình và độ lệch chuẩn của dữ liệu đo tại cảm biến j được xác định theo công thức sau:

$$\mu_j = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_{ij}}{N} \quad (10)$$

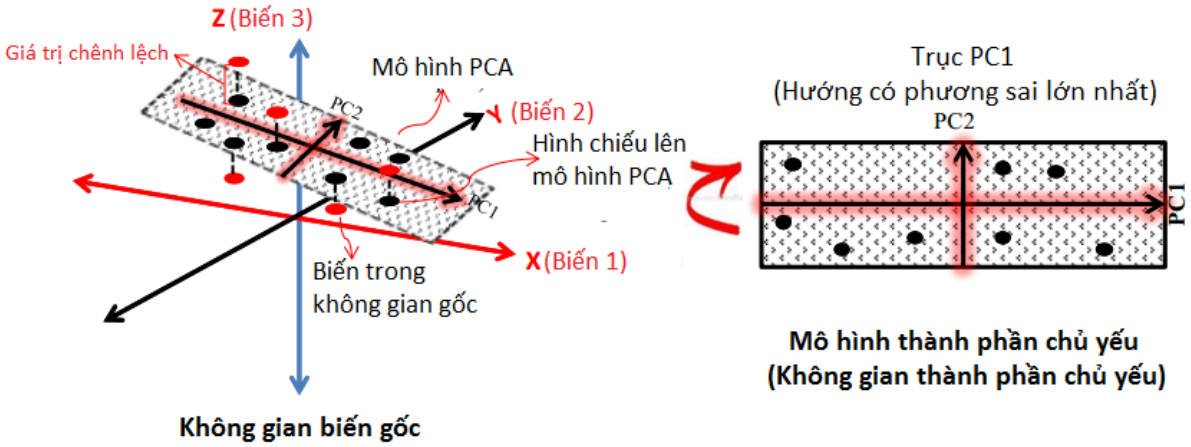
$$\sigma_i = \frac{1}{N-1}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(x_{ij} - \mu_j\right)^2} \quad (11)$$

2.2 Cơ sở lý thuyết phương pháp phân tích thành phần chủ yếu (PCA)

Phương pháp phân tích thành phần chủ yếu hay còn gọi phương pháp chiếu dữ liệu là một trong những phương pháp phổ biến trong phân tích thống kế các hàm đa biến, được áp dụng trong nhiều ngành khoa học khác nhau. Nguồn gốc bắt nguồn của phương pháp này có thể từ các nhà khoa học gồm Person hoặc Cauchy hoặc Jordan, Cayley, Silverster và Hamilton nhưng nguyên lý hiện đại của phương pháp mà vẫn được áp dụng tới nay được hình thành bởi Hoteling [1].

Mục tiêu của phương pháp PCA là phân tích, chiếu và nén dữ liệu từ một hàm đa biến, đa chiều hoặc đa không gian về một hệ không gian chính (tọa độ chính) ít biến, ít chiều hơn mà vẫn giữ được những đặc tính cơ bản, quan trọng của dữ liệu. Từ đó, một hệ dữ liệu nhiều biến, nhiều chiều sẽ được biểu diễn đơn giản hơn thông qua một không gian mới dựa trên các thành phần gọi là thành phần chủ yếu. Điều này sẽ làm đơn giản hóa quá trình phân tích cũng như giảm thời gian phân tích của những bộ dữ liệu đồ sộ được thu thập trên một công trình lớn với nhiều cấu kiện phức tạp trong khoảng thời gian dài.

Theo phương pháp phân tích thành phần chủ yếu, thành phần chính thứ nhất được yêu cầu là thành phần có phương sai dữ liệu lớn nhất, do vậy thành phần này sẽ giữ nhiều thông tin dữ liệu nhất. Thành phần chính thứ hai được tính toán dựa trên hai điều kiện là vuông góc với thành phần chính thứ nhất và phương sai lớn nhất có thể. Các thành phần chính khác cũng được xác định tương tự, tuy nhiên việc áp dụng phương pháp này trong ngành xây dựng thì chỉ cần một số thành phần chính đầu tiên. Các giá trị của biến dữ liệu trong không gian chính mới được gọi là hệ số điểm (*factor score*), các hệ số điểm này có thể được hiểu một cách theo hình học đơn giản là hình chiếu của những biến dữ liệu cũ lên không gian chính mới, Hình 2-4.



Hình 2-4: Hình biểu diễn nguyên lý phân tích thành phần chủ yếu

Để áp dụng phương pháp PCA trong đánh giá sức khỏe công trình, dữ liệu đo từ các cảm biến gắn trên kết cấu được lưu trữ dưới dạng ma trận **X** với kích thước m×n, trong đó m là số lần đo theo thời gian, n là số cảm biến phân tích được gắn trên kết cấu. Sau đó, ma trận phương sai $\mathbf{C_x}$, là ma trận thể hiện mối tương quan tuyến tính giữa các cảm biến đo gắn trên kết cấu theo các lần đo của ma trận **X**, được tính theo công thức sau:

$$\boldsymbol{C_x} = \frac{1}{n-1}\boldsymbol{X^T X} \quad (12)$$

Các hướng thành phần chủ yếu được định nghĩa là các vector riêng (**P**) của ma trận phương sai $\mathbf{C_x}$ tương ứng với các giá trị riêng (Λ) của nó thỏa mãn theo công thức sau:

$$(\boldsymbol{C_x} - \Lambda \boldsymbol{I})\boldsymbol{P} = 0 \; hoặc \; \boldsymbol{C_x P} = \boldsymbol{P}\Lambda \quad (13)$$

Các vector riêng sau đó được sắp xếp theo thự tự từ lớn đến nhỏ của giá trị riêng tương ứng, mỗi vector riêng được xem như là một chiều không gian đơn vị chính trong không gian thành phần chính. Những vector riêng có giá trị riêng lớn là những hướng không gian chính yếu nhất mà theo đó lượng thông tin của dữ liệu được lưu trữ nhiều nhất. Để giảm thiểu hóa lượng thông tin (số không gian biến) phải xử lý nhằm giảm thời gian phân tích, nâng cao tốc độ phát hiện hư hỏng kể từ khi nó xuất hiện trên kết cấu, các chiều không gian đơn vị thứ yếu tương ứng với giá trị riêng nhỏ được bỏ qua. Dữ liệu tương ứng với những không gian phụ này được coi như là thành phần nhiễu, không được đưa vào trong phân tích đặc tính kết cấu [8]. Những thành phần chính còn lại được thiết lập tạo thành một không gian mới gọi là không gian chính PCA. Ma trận hình chiếu của dữ liệu gốc trong không gian chính PCA được gọi là ma trận điểm (*score matrix* - **T**) xác định theo công thức:

$$\boldsymbol{T} = \boldsymbol{X}\overline{\boldsymbol{P}} \quad (14)$$

Trong đó $\overline{\boldsymbol{P}}$ là ma trận các vector riêng chính (ma trận thành phần chính) được lấy từ ma trận **P** tương ứng với một số vector có giá trị riêng lớn nhất.

2.3 Cơ sở lý thuyết xác định chỉ số phát hiện và định vị hư hỏng trên kết cấu

Chỉ số xác định hư hỏng được định nghĩa là đại lượng đặc trưng cho phản ứng của kết cấu, khi trạng thái kết cấu bị thay đổi/hư hỏng thì chỉ số xác định này cũng sẽ biến đổi theo, dựa trên sự biến đổi này hư hỏng trên kết cấu được phát hiện và định vị. Như vậy, một chỉ số xác định hư hỏng được định nghĩa là tốt khi ở một trạng thái kết cấu nhất định chỉ số này không bị thay đổi lớn mặc dù có sự biến thiên không ngừng của tải trọng và ảnh hưởng của môi trường xung quanh, và khi trạng thái kết cấu thay đổi thì chỉ số này phải nhạy bén thay đổi tương ứng.

2.3.1 Chỉ số phát hiện hư hỏng kết cấu

Trong nghiên cứu này, một chỉ số hư hỏng mới được tác giả đề xuất kết hợp với lý thuyết xác suất nhằm phát hiện nhanh chóng và định vị chính xác vị trí hư hỏng xảy ra trên kết cấu. Chỉ số hư hỏng này được xác định bằng cách tính tổng của tích của dữ liệu hình chiếu lên hướng chính yếu nhất (hướng có phương sai lớn nhất – có giá trị riêng lớn nhất – có lượng thông tin dữ liệu lớn nhất) với diện tích của hai lần đo dữ liệu gốc liên tiếp tương ứng của các cảm biến được gắn trên kết cấu. Do dữ liệu hình chiếu lên hướng chính yếu nhất của không gian chính PCA được xem đại lượng đặc trưng cho kết cấu (do dữ liệu này chứa nhiều thông tin của dữ liệu gốc nhất), nên chỉ số hư hỏng này sẽ được định nghĩa là giá trị đại diện cho phản ứng của kết cấu tại vị trí cảm biến tương ứng (vị trí cảm biến có dữ liệu gốc được xét với dữ liệu hình chiếu chính yếu nhất). Phương pháp xác định chỉ số này được thực hiện như sau:

Dựa trên ma trận hình chiếu **T,** vector dữ liệu hình chiếu chính yếu nhất được xác định T_1 (dữ liệu hình chiếu ở cột 1 của ma trận **T**). Sau đó vector chỉ số xác định hư hỏng kết cấu tương ứng với cảm biến được xác đinh theo công thức sau:

$$DSF = |S^T|T_1 \quad (15)$$

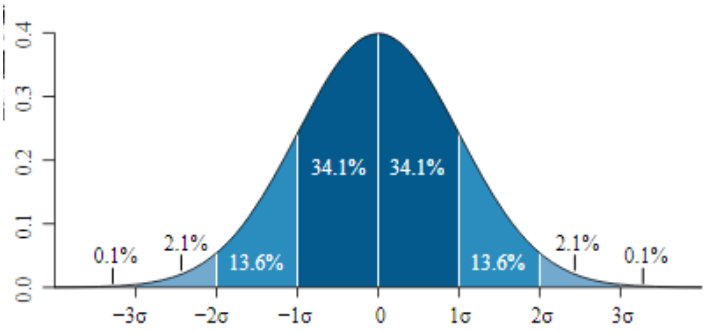
Hay nói cách khác chỉ số hư hỏng của cảm biến i được xác định theo công thức sau:

$$DSF_i = |S_i^T|T_1 \quad (16)$$

Trong đó S_i là giá trị diện tích của hai dữ liệu đo gốc liên tiếp của cảm biến i.

Chỉ số hư hỏng này sẽ được tính toán cho các bộ dữ liệu ở trạng thái cơ bản của kết cấu và định nghĩa nó như phần tiêu chuẩn để đối chiếu, so sánh và đánh giá với các trạng thái kết cấu trong giai đoạn giám sát. Để đưa ra quyết định về sự xuất hiện hư hỏng trên kết cấu, một khái niệm cơ bản trong lý thuyết xác suất được sử dụng đó là độ lệch chuẩn. Theo lý thuyết xác suất, trong một chuỗi phép đo của một đối tượng và sử dụng thiết bị đo không đổi trong điều kiện nhất định thì sẽ có khoảng 68% dữ liệu nằm trong khoảng -1σ đến 1σ (σ là độ lệch chuẩn), khoảng 95% dữ liệu đo nằm trong khoảng -2σ đến 2σ và khoảng 99.7% dữ liệu đo nằm trong khoảng -3σ đến 3σ, Hình 2-5. Trong lĩnh vực

xây dựng, thông thường con số 2σ được sử dụng để làm tiêu chuẩn đánh giá. Theo đó, trong nghiên cứu này, nếu giá trị trung bình của chỉ số hư hỏng ở trạng thái kết cấu đánh giá nằm ngoài khoảng hai độ lệch chuẩn của chỉ số hư hỏng ở trạng thái cơ bản thì sự xuất hiện hư hỏng trên kết cấu ở trạng thái đánh giá được xác định. Ngược lại, xem như kết cấu không bị hư hỏng.



Hình 2-5: Hình vẽ mô tả phân phối chuẩn dữ liệu liên tục

Ngoài ra, để có một cái nhìn trực quan về sự thay đổi trạng thái kết cấu trước và sau khi xảy ra hư hỏng. Các đám mây của thành phần chủ yếu thứ nhất và thành phần chủ yếu thứ hai được in ra. Nếu như các đám mây ở trạng thái cơ bản và trạng thái đánh giá cách biệt nhau, chứng tỏ kết cấu bị biến đổi về tính chất và thay đổi về trạng thái. Vị trí cảm biến mà có đám mây cách biệt nhau được xác định là vị trí gần với hư hỏng của kết cấu. Ngược lại, nếu các đám mây ở hai trạng thái hòa quyện vào nhau, chứng tỏ trạng thái kết cấu không thay đổi hoặc thay đổi không đáng kể.

2.3.2 Chỉ số xác định vị trí hư hỏng

Vị trí hư hỏng được xác định là vị trí có sự chênh lệch đủ lớn giữa hai trạng thái kết cấu. Khi sự chênh lệch giữa hai trạng thái kết cấu tại một cảm biến càng lớn thì khả năng xảy ra hư hỏng tại vị trí cảm biến đó càng nhiều. Dựa trên nguyên lý này chỉ số xác định vị trí hư hỏng được định nghĩa là sự chênh lệch của chỉ số phát hiện hư hỏng giữa hai trạng thái của kết cấu và được xác định theo công thức sau:

$$DL_i = \frac{|DSF_i^{Damage} - DSF_i^{Undamage}|}{DSF_i^{Undamage}} \quad (17)$$

Trong đó:

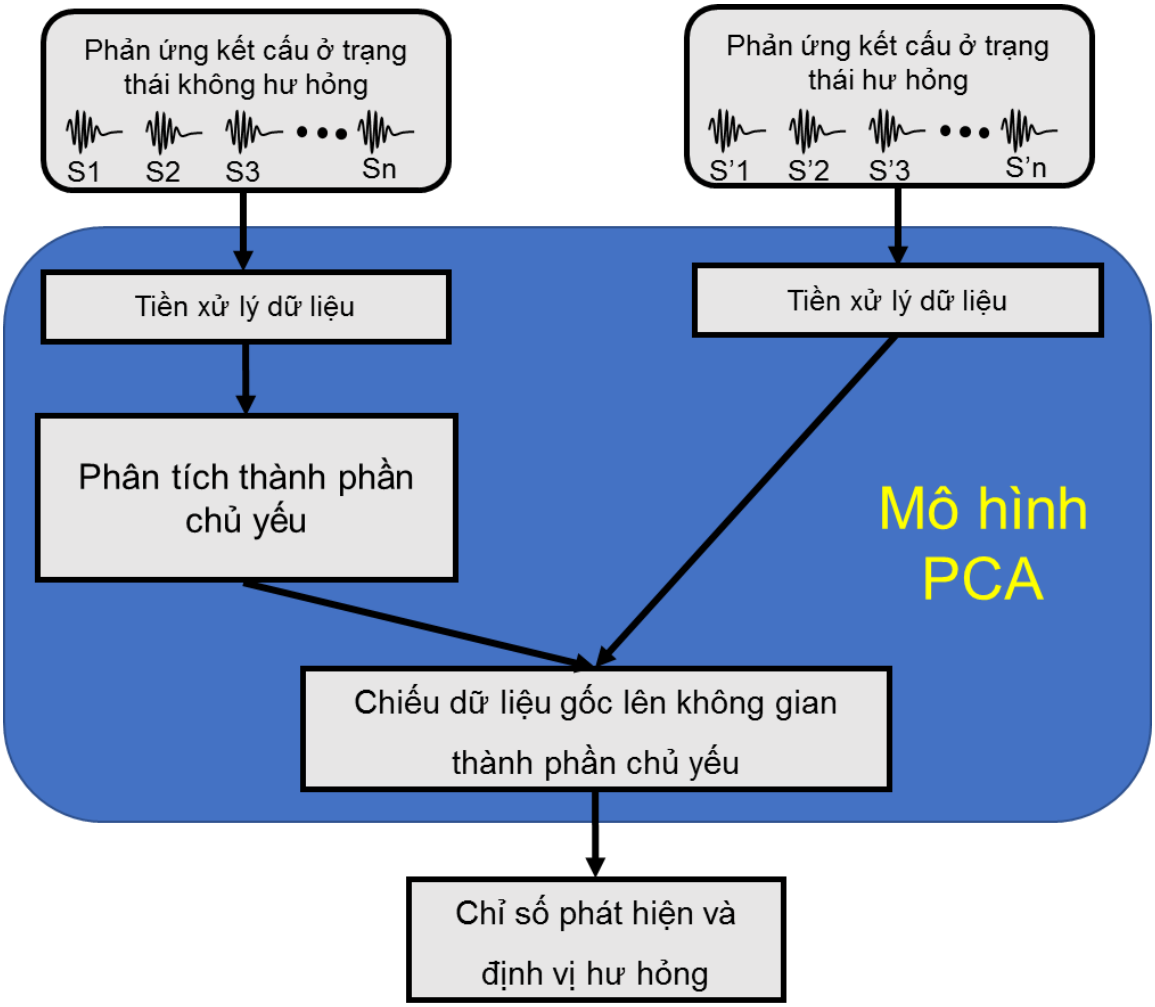
DSF_i^{Damage}, $DSF_i^{Undamage}$ lần lượt là chỉ số phát hiện hư hỏng của cảm biến i tại trạng thái đánh giá và trạng thái cơ bản của kết cấu.

DL_i là chỉ số xác định vị trí hư hỏng của cảm biến i.

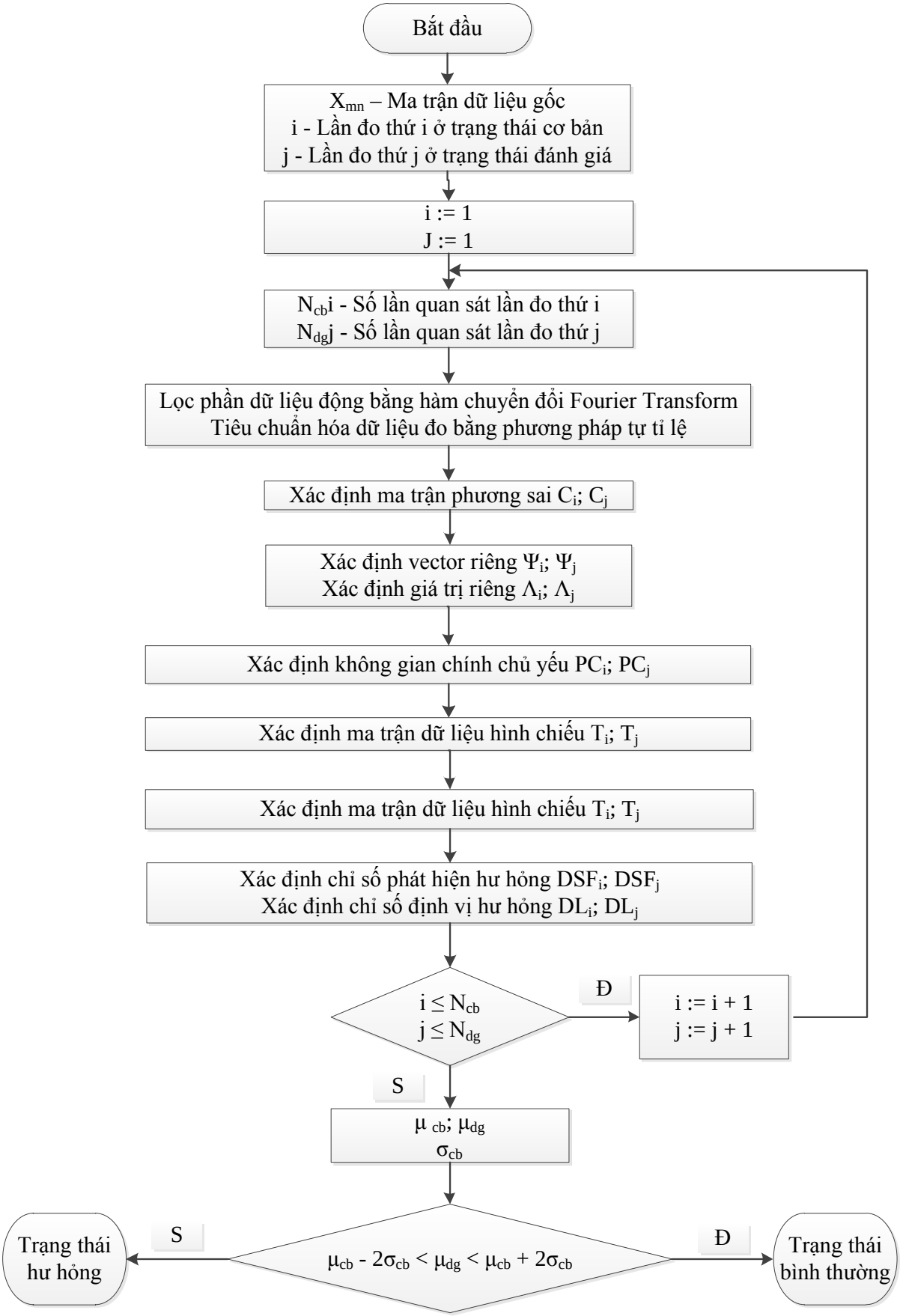
Chỉ số DL_i càng cao thì khả năng xảy ra hư hỏng tại vị trí cảm biến i càng lớn.

2.4 Thuật toán xác định hư hỏng kết cấu bằng phương pháp phân tích thành phần chủ yếu

Trình tự các bước thực hiện phát hiện và định vị vị trí hư hỏng dựa trên phương pháp phân tích thành phần chủ yếu được thể hiện trên Hình 2-6.



Hình 2-6: Trình tự các bước thực hiện xác định hư hỏng kết cấu bằng phương pháp PCA



Hình 2-7: Thuật toán phát hiện và định vị vị trí hư hỏng bằng phương pháp PCA

Chương 3 Giới thiệu phần mềm Matlab 2014a, chương trình tính và mô hình cầu thép thí nghiệm

3.1 Giới thiệu phần mềm Matlab 2014a

3.1.1 Giới thiệu chung

Matlab là một phần mềm rất mạnh với nhiều chức năng và hàm định nghĩa sẵn, được sử dụng để xử lý các vấn đề liên quan đến tính toán, lập trình trong ngành khoa học và kỹ thuật. Do có nhiều hàm được định nghĩa sẵn nên nó có thể biến những phép toán cực kỳ phức tạp khi lập trình trong phần mềm khác trở nên cực kì đơn giản, chỉ bằng một dòng lệnh để gọi hàm đây ra, nếu thực hiện trong Matlab. Vì vậy phần mềm Matlab được coi là một phần mềm lập trình dành cho những người không phải chuyên ngành về lập trình. Ngoài ra, một trong những đặc điểm thú vị để phân biệt giữa phần mềm Matlab với các phần mềm lập trình khác như C++ và Java là nó có thể được sử dụng một cách tương tác giữa người dùng và phần mềm [3]. Điều này có nghĩa là, khi một dòng lệnh được đánh trong Matlab thì sẽ nhận được câu trả lời từ phần mềm ngay lập tức, nếu dòng lệnh chứa lỗi thì phần mềm Matlab sẽ đưa ra ngay thông báo lỗi và đề xuất cách sửa.

Tên của phần mềm "Matlab" được viết tắt từ MATrix LABoratory bởi vì hệ thống thuật toán và hàm của Matlab được thiết kế để tính toán xử lý dữ liệu thông qua các ma trận.

Để có thể lập trình hiệu quả trong phần mềm Matlab, người sử dụng cần phải đạt hai yêu cầu sau:

- Phải học và hiểu chính xác các nguyên tắc viết câu lệnh và cách thức lập trình trong Matlab.
- Phải có khả năng đưa ra các ý tưởng logic để giải quyết các vấn đề cụ thể.

Ngoài ra, phần mềm Matlab còn hỗ trợ chức năng cho người sử dụng tự tạo giao diện theo ý muốn (GUI) nhằm đơn giản quá và phổ cập hóa sử dụng cho những người khác.

3.1.2 Nguyên tắc cơ bản lập trình trong Matlab

Matlab là một phần mềm lập trình phân tích tính toán dựa trên nguyên lý xử lý ma trận. Nó có thể thực hiện các chức năng giống máy tính cơ bản như cộng, trừ, nhân, chia, các phép tính về số phức, căn thức, số mũ, logarit, các phép toán về lượng giác như cosin, sine, tan, cotan. Nó cũng có các chức năng giống máy tính cá nhân như khả năng lưu trữ, tìm kiếm lại dữ liệu. Ngoài ra, Matlab là một trong những phần mềm rất mạnh về đồ họa, nó cho phép biểu diễn dữ liệu, kết quả phân tích thông qua hình ảnh, đồ thị ở nhiều hình thức khác nhau trong không gian hai chiều (2D) và không gian ba chiều (3D). Tuy nhiên, chức năng thú vị nhất của phần mềm Matlab là có thể được sử dụng để lập trình dễ dàng bởi một người không phải chuyên gia lập trình nhằm giải quyết một vấn đề cụ thể trong nhiều lĩnh vực khác nhau.

Mục tiêu chính của công việc thiết kế chương trình là nó phải làm việc, dễ đọc và dễ hiểu phục vụ cho mục đích sửa chữa dễ dàng khi có yêu cầu. Để làm việc tốt, các chương trình phải thỏa mãn các yêu cầu liên quan đến các vấn đề, lớp vấn đề cần giải quyết, đặc biệt là diễn tả chi tiết mục đích của thuật toán, giá trị đầu vào, phương pháp phân tích, giá trị đầu ra và các yêu cầu đặc biệt khác, phải được hiểu rõ nhằm thiết kế thuật toán và chương trình tính ngắn gọn, súc tích, hiệu quả. Chương trình tính nên được phân chia ra thành từng phần riêng nhằm giải quyết lần lượt từng vấn đề nhỏ với mục đích làm cho thuật toán dễ hiểu, dễ quản lý và sửa chữa khi có yêu cầu, đặc biệt với những chương trình phức tạp có nhiều dòng lệnh. Khi đó, mỗi chương trình con xử lý mục đích nhỏ tương ứng sẽ được đánh giá độc lập trước khi áp dụng nó vào trong chương trình tổng thể. Một đoạn code được coi là tốt khi nó làm việc đúng, dễ dàng đánh giá trong giai đoạn kiểm tra, dễ dàng sửa khi có lỗi xuất hiện. Trong quá trình viết code, ở mỗi dòng lệnh nên ghi lại chú giải về mục đích của nó để sau một thời gian xem lại có thể hiểu một cách nhanh chóng. Các bước thiết kế một chương trình tính trong Matlab được trình bày chi tiết sau đây [3]:

Bước 1: Phân tích vấn đề

Người viết chương trình phải nhận ra và hiểu được hoàn toàn các vấn đề cần phân tích. Một cái nhìn tổng thể về phương pháp xử lý phải được đưa ra.

Bước 2: Xác định vấn đề

Phát triển một đề cương chi tiết của vấn đề giải quyết theo các hàm toán học tương thích với chương trình máy tính áp dụng.

Bước 3: Xác định kết quả yêu cầu

Định nghĩa các biến đầu vào và kết quả yêu cầu từ chương trình phân tích.

Bước 4: Viết thuật toán

Quá trình viết thuật toán được thực hiện từng bước một, giải quyết lần lượt những vấn đề nhỏ tương ứng được liệt kê ra từ bài toán tổng thể. Mục đích của viết thuật toán là tạo ra được một sườn kế hoạch nhằm giải quyết các vấn đề yêu cầu. Thuật toán được viết với tiêu chí dễ hiểu và dễ dàng chuyển đổi sang ngôn ngữ lập trình.

Bước 5: Viết chương trình

Chuyển đổi ý tưởng từ thuật toán sang ngôn ngữ lập trình tương ứng (ví dụ: Matlab). Tìm kiếm và loại bỏ những lỗi sai xuất hiện trong chương trình cho đến khi chạy thành công.

Bước 6: Đánh giá

Tiến hành đánh giá, so sánh kết quả tính của Matlab với kết quả tính từ các chương trình khác với điều kiện bài toán không thay đổi. Ngoài ra, so sánh đối chiếu với phương pháp lý thuyết và số liệu thí nghiệm nếu có thể.. Mục tiêu của bước này nhằm chứng minh tính đúng đắn và tăng tính tin cậy cho chương trình tính.

Bước 7: Áp dụng

3.2 Chương trình phân tích phát hiện hư hỏng kết cấu bằng phương pháp phân tích thành phần chủ yếu trên nền Matlab 2014a

Chương trình tính được lập trình dựa trên nền và các hàm trong phần mềm Matlab 2014a như sau:

Phần 1: Nhập dữ liệu vào phần mềm

```
clear all
clc
No=40;
for i1=1:No
    test=sprintf('test%d.lvm', i1);
    A1{i1}=importfile(test, 24,
1100);
    dtest=sprintf('dtest%d.lvm',
i1);
    A2{i1}=importfile(dtest,24,
1100);
end
```

```
%tên của file lưu dữ
liệu đo
%nhập dữ liệu từ file
folder
```

Phần 2: Trích xuất dữ liệu phân tích

```
for i=1:No
    AA1{i}= A1{i}(:, 18:37);
    AA2{i}= A2{i}(:, 18:37);
end
```

```
%dữ liệu biến dạng nằm
từ cột 18 đến cột 37
trong bộ dữ liệu đo
```

Phần 3: Lọc loại bỏ phần dữ liệu động bằng phương pháp Fourier Transform

```
Fs= 60;
for i=1:No
    for j= 1:Nsensor
        L1{i}(1, j)=
length(AA1{i}(:,j));
        L2{i}(1, j)=
length(AA2{i}(:,j));
        FFT1{i}(:,j)= fft(AA1{i}(:,j));
        FFT2{i}(:,j)= fft(AA2{i}(:,j));
%
%
        AFWhole1{i}(:,j)=
abs(FFT1{i}(:,j));
        AFWhole2{i}(:,j)=
abs(FFT2{i}(:,j));
        AF1{i}(:,j)=
AFWhole1{i}(1:fix((L1{i}(1,
j))./2)+1,j);
        AF2{i}(:,j)=
AFWhole2{i}(1:fix((L2{i}(1,
j))./2)+1,j);
        AF1{i}(2:end-
1,j)=2*AF1{i}(2:end-1,j);
```

```
%khai báo tần số lấy
mẫu dữ liệu
%chiều dài dữ liệu
trường hợp baseline
và damage
%chuyển dữ liệu từ
miền thời gian sang
miền tần số bằng FT
%tính độ lớn của tần
số

%lấy một bên của tần
số


%loại bỏ giá trị đầu
và cuối
```

```
        AF2{i}(2:end-
1,j)=2*AF2{i}(2:end-1,j);
        f1{i}(:,j)=
Fs*((0:(L1{i}(1,j))./2)./(L1{i}(1,j)));
        f2{i}(:,j)=
Fs*((0:(L2{i}(1,j))./2)./(L2{i}(1,j)));
    end
end
%%
% Lọc dữ liệu và chuyển ngược về miền
thời gian
Hz= 0.5;
for i= 1:40
    for j= 1:Nsensor
        T1{i}(1,j)= (L1{i}(1,j))./Fs;
%
        T2{i}(1,j)= (L2{i}(1,j))./Fs;
        B1{i}(:,j)= ifft(FFT1{i}(1:
round(Hz*T1{i}(1,j)),j), L1{i}(1,j),
'symmetric');
        B2{i}(:,j)= ifft(FFT2{i}(1:
round(Hz*T2{i}(1,j)),j), L2{i}(1,j),
'symmetric');
    end
end
```

%tính tần số

%khai báo ngưỡng tần số

%tính khoảng tần số chuyển đổi từ miền tần số sang miền thời gian

%dữ liệu sau khi lọc

Phần 4: Tiêu chuẩn hóa dữ liệu đo

```
for i=1:No
    for j=1:Nsensor
        MeanC1{i}(:,j)=
mean(B1{i}(:,j));
        MeanC2{i}(:,j)=
mean(B2{i}(:,j));
        StandC1{i}(:,j)=
std(B1{i}(:,j));
        StandC2{i}(:,j)=
std(B2{i}(:,j));
    end
end
%%
for i=1: No
    for j= 1:Nsensor
        D1{i}(:,j)= (B1{i}(:,j)-
MeanC1{i}(1,j))./StandC1{i}(:,j);
        D2{i}(:,j)= (B2{i}(:,j)-
MeanC2{i}(1,j))./StandC2{i}(:,j);
    end
end
```

%tính giá trị trung bình của chuỗi dữ liệu

%tính độ lệch chuẩn của chuỗi dữ liệu

%chuẩn hóa dữ liệu

Phần 5: Mô hình thành phần chủ yếu

```
%%
for i=1:40
    CovD1{i}= cov(D1{i});
    CovD2{i}= cov(D2{i});
end
%%
for i= 1:40
    [EV1{i} ED1{i}]=
pcacov(CovD1{i});
    [EV2{i} ED2{i}]=
pcacov(CovD2{i});
end
%
Npca= 8;
for i=1:40
    PCEV1{i}= EV1{i}(:, 1:Npca);
    PCEV2{i}= EV2{i}(:, 1:Npca);
end
%%
%
for i=1:40
    ScE1{i}= D1{i}*PCEV1{i};
    ScE2{i}= D2{i}*PCEV1{i};
end
%%
% Computation of Coefficient Matrix
for i= 1:40
    CoE1{i}= D1{i}.'*ScE1{i};
    CoE2{i}= D2{i}.'*ScE2{i};
end
```

%tính ma trận phương sai

%tính giá trị riêng và vector riêng

%khai báo số lượng thành phần chính dùng để phân tích

%trích xuất thành phần chính

%xác định ma trận hình chiếu

Phần 6: Tính chỉ số hư hỏng và in

```
Sensor = 20;
for i= 1:40
    for j= 1:length(D1{i})-1
        Area1{i}(j,:)=
((D1{i}(j,:)+D1{i}(j+1,:))./2);
    end
    Area1{i}(length(D1{i}),:)=
D1{i}(length(D1{i}),:);
    for j= 1: length(D2{i})-1
        Area2{i}(j,:)=
(D2{i}(j,:)+D2{i}(j+1,:))./2;
    end
    Area2{i}(length(D2{i}),:)=
D2{i}(length(D2{i}),:);
end
for i=1:40
    DSF1{i}= Area1{i}'*ScE1{i};
    DSF2{i}= Area2{i}'*ScE2{i};
end
```

%gán cảm biến cần tính phân tích

%tính diện tích hai giá trị đo liên tiếp (hình thang)

%tính tích số diện tích với độ lớn của dữ liệu

```
for i=1:40
    DSFfirst1{i}= DSF1{i}(:, 1);
    DSFfirst2{i}= DSF2{i}(:, 1);
end
CDSFfirst1= abs(cat(2,
DSFfirst1{:}));
CDSFfirst2= abs(cat(2,
DSFfirst2{:}));
CDSFfirst= cat(2, CDSFfirst1,
CDSFfirst2);
%% Plot
meanCDSFfirst1= mean(CDSFfirst1, 2);
meanCDSFfirst2= mean(CDSFfirst2, 2);
stdCDSFfirst1= std(CDSFfirst1,0,2);
plot(CDSFfirst(Sensor, :));
hold on
plot(1:40, meanCDSFfirst1(Sensor,
:));
plot(1:40, meanCDSFfirst1(Sensor,
:)+2*stdCDSFfirst1(Sensor, :));
plot(1:40, meanCDSFfirst1(Sensor,
:)-2*stdCDSFfirst1(Sensor, :));
plot(41:80, meanCatDSFfirst2(Sensor,
:));
```

```
chiếu trong PCA tương
ứng
%trích xuất giá trị ứng
với hướng chính nhất
trong mô hình PCA




%tính giá trị trung bình
của chỉ số hư hỏng ứng
với mỗi trạng thái kết
cấu
%tính độ lệch chuẩn của
chỉ số hư hỏng ứng với
trạng thái cơ bản
%In
```

3.3 Mô tả mô hình cầu thép thí nghiệm và dữ liệu thu thập

Dữ liệu đo, được sử dụng nhằm kiểm tra tính đúng đắn của thuật toán phát hiện và định vị vị trí hư hỏng dựa trên phân tích thành phần chủ yếu trong nghiên cứu này, là giá trị đo chuyển vị thu thập từ 20 cảm biến gắn trên một mô hình cầu thép thí nghiệm 4 nhịp được thực hiện tại phòng thí nghiệm trường Đại học miền trung Florida, Mỹ.

Mô hình cầu thép thí nghiệm 4 nhịp gồm hai nhịp chính bố trí liên tục, chiều dài mỗi nhịp là 350cm, hai nhịp biên bố trí hai bên cách biệt với nhịp chính có chiều dài mỗi nhịp 120cm. Hai nhịp biên này có tác dụng tạo đường dẫn vào cầu cho ô tô nhằm tránh những xung kích đột ngột gây sai lệch trong kết quả đo. Bản mặt cầu được làm bằng thép tấm có chiều dày 3.2mm, bề rộng 1.2m, được đỡ bởi hai dầm thép hộp HSS 25×25×3mm đặt cách nhau 60cm, Hình 3-1.



Hình 3-1: Mô hình cầu thép trong phòng thí nghiệm

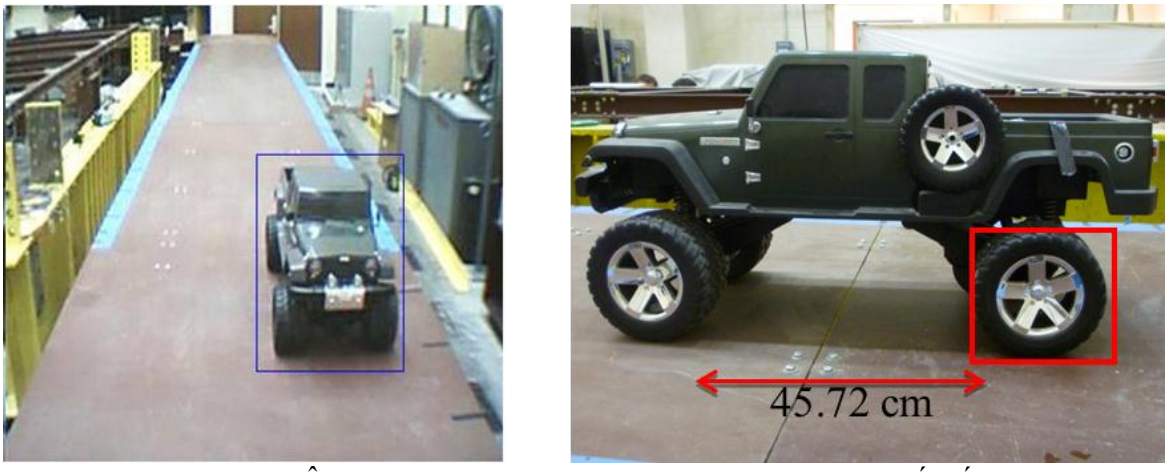
Nhằm mục đích thiết lập trạng thái hư hỏng tổng thể, điều kiện biên của cầu được thiết kế để có thể dễ dàng thay đổi từ gối di động, gối cố định sang ngàm. Ngoài ra, để mô hình những hư hỏng cục bộ, mô hình cầu được gắn các bu lông liên kết giữa bản mặt cầu và dầm cầu nhằm tạo tính liên hợp trong làm việc, các bu lông này có thể được tháo ra hoặc lắp vào với mục đích mô phỏng những hư hỏng cục bộ, Hình 3-2. Trong phạm vị nghiên cứu này, một bộ dữ liệu đo từ mô hình mô phỏng hư hỏng tổng thể được phân tích.



Hình 3-2: Mô phỏng hư hỏng tổng thể và cục bộ của mô hình cầu

Tải trọng sử dụng nhằm gây kích thích lên kết cấu là xe ô tô mô hình có trọng lượng trục trước 68.7N, trục sau 78.5N được đặt cách nhau 45.72cm, Hình 3-3. Để mô phỏng dòng giao thông thay đổi liên tục trong điều kiện thực tế, ô tô sẽ được kéo chạy ngẫu nhiên qua lại trên cầu. Trong quá trình ô tô chạy trên cầu, các thiết bị đo cảm biến gắn trên dầm cầu sẽ đo giá trị biến dạng tương ứng với vị trí gắn.

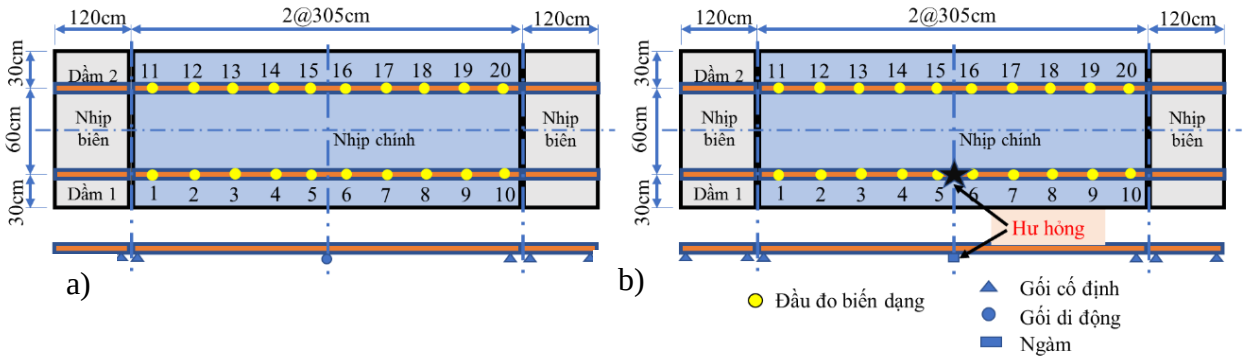
Nhằm mô phỏng quá trình giám sát lâu dài trong thực tế và tối thiểu hóa sai số chủ quan trong quá trình đo, 40 bộ dữ liệu từ 20 cảm biến tương ứng với 40 lần đo cho mỗi trạng thái kết cấu được thực hiện. Điều này có nghĩa là 40 bộ dữ liệu đo được thu thập ở trạng thái kết cấu cơ bản, và 40 bộ dữ liệu khác được đo ở trạng thái kết cấu có mô phỏng hư hỏng xảy ra.



Hình 3-3: Ô tô mô hình được sử dụng gây kích thích lên kết cấu

Quá trình trích xuất và thu thập phản ứng kết cấu được thực hiện thông qua 20 cảm biến đo biến dạng gắn trên hai dầm HSS của 2 nhịp chính mô hình cầu, tốc độ lấy mẫu của thiết bị đo 250Hz. Sơ đồ bố trí thiết bị đo, kích thước mô hình cầu, vị trí và phương pháp mô phỏng hử hỏng được thể hiện trên Hình 3-4.

Theo đó, hư hỏng tổng thể sẽ được thiết lập bằng cách thay đổi điều kiện biên gối giữa của dầm 1 từ gối di động sang ngàm. Điều này có nghĩa là hư hỏng được mô phỏng tại gần vị trí cảm biến 5 và 6 nhất.



Hình 3-4: Mặt bằng bố trí thiết bị và thiết lập trạng thái hư hỏng a) trạng thái ban đầu; b) trạng thái hư hỏng

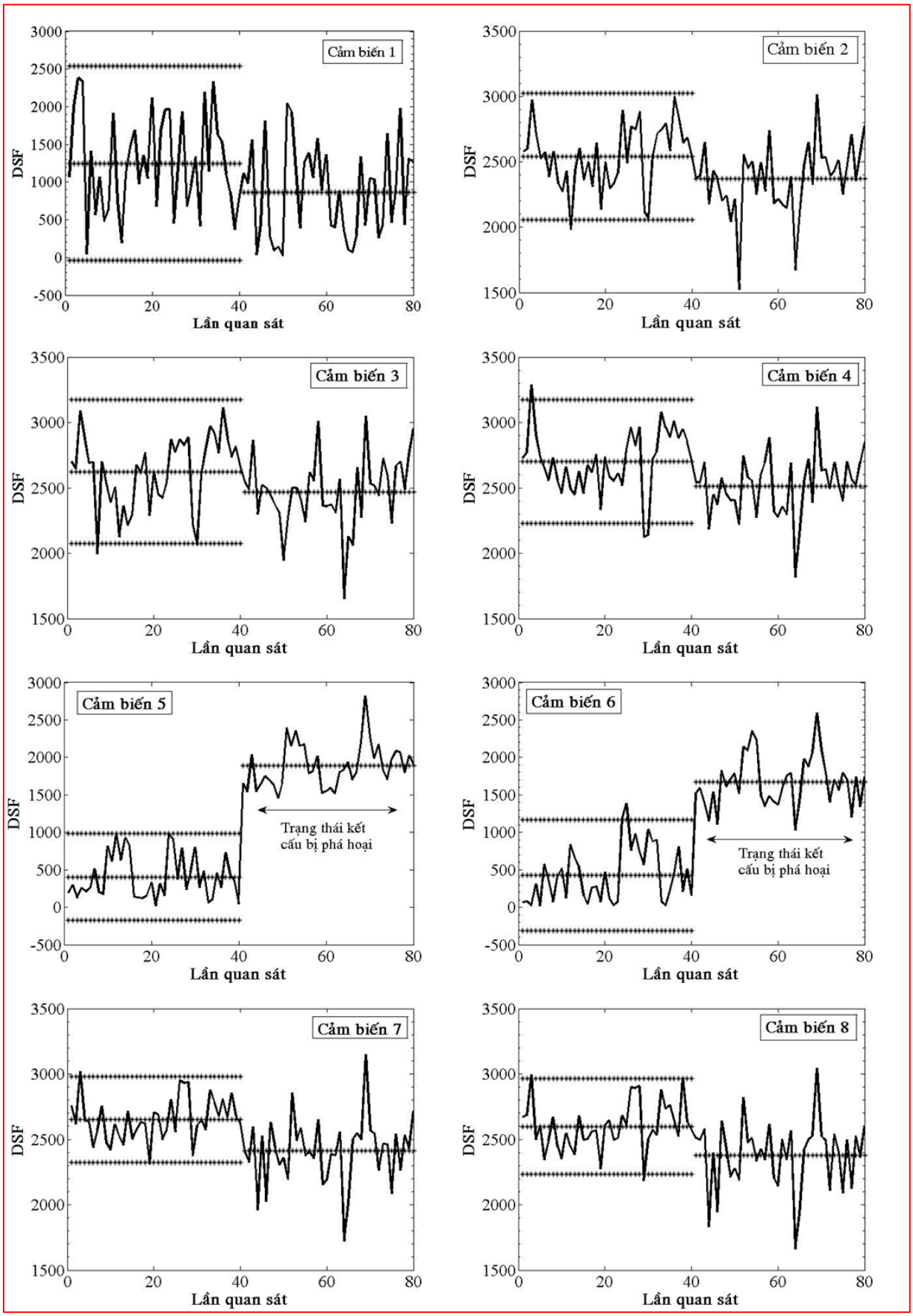
Chương 4 Kiểm tra khả năng của thuật toán thông qua phân tích dữ liệu đo từ mô hình cầu thép thí nghiệm

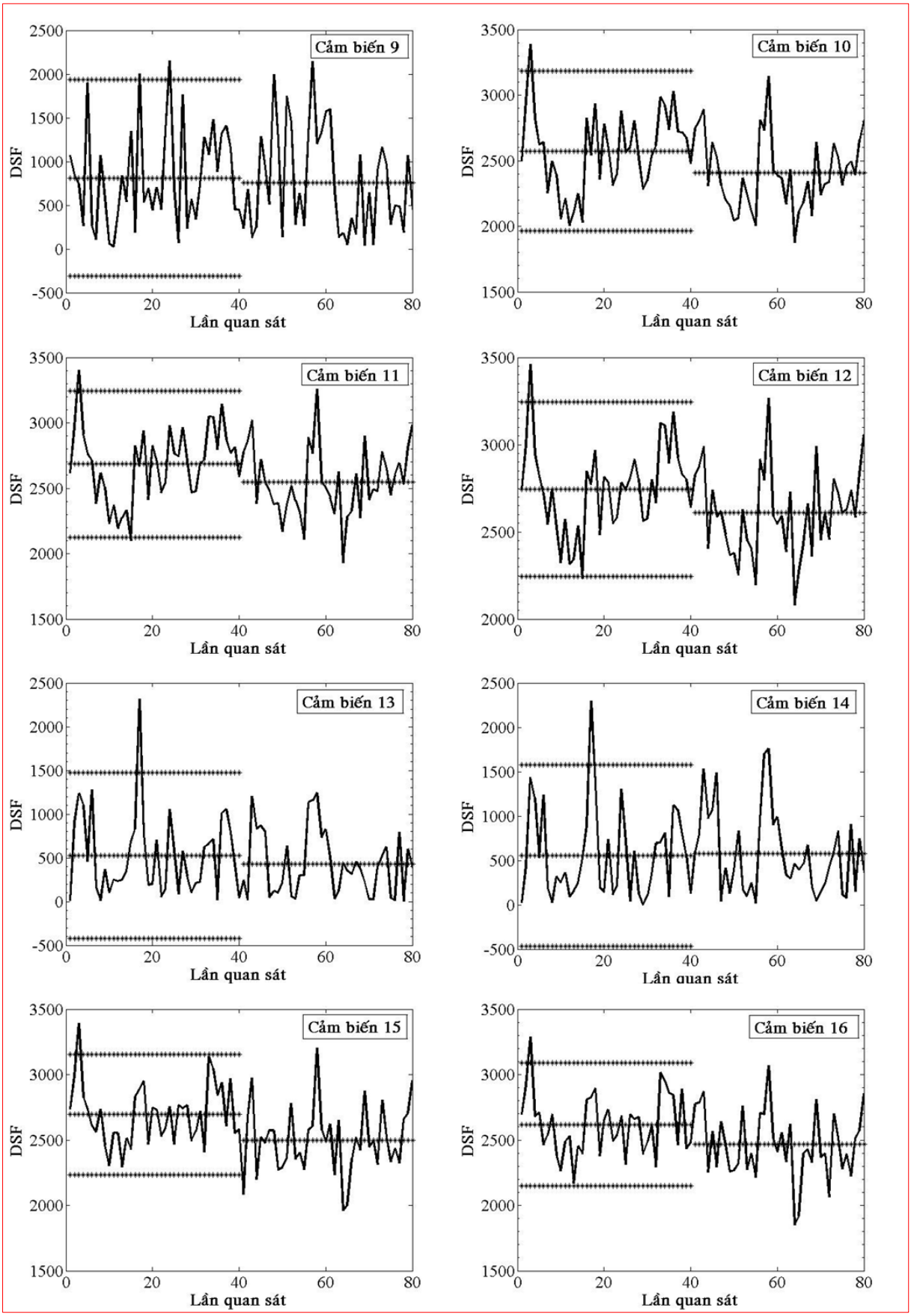
4.1 Kiểm tra khả năng phát hiện hư hỏng kết cấu dựa trên chỉ số DSF và đám mây thành phần chính.

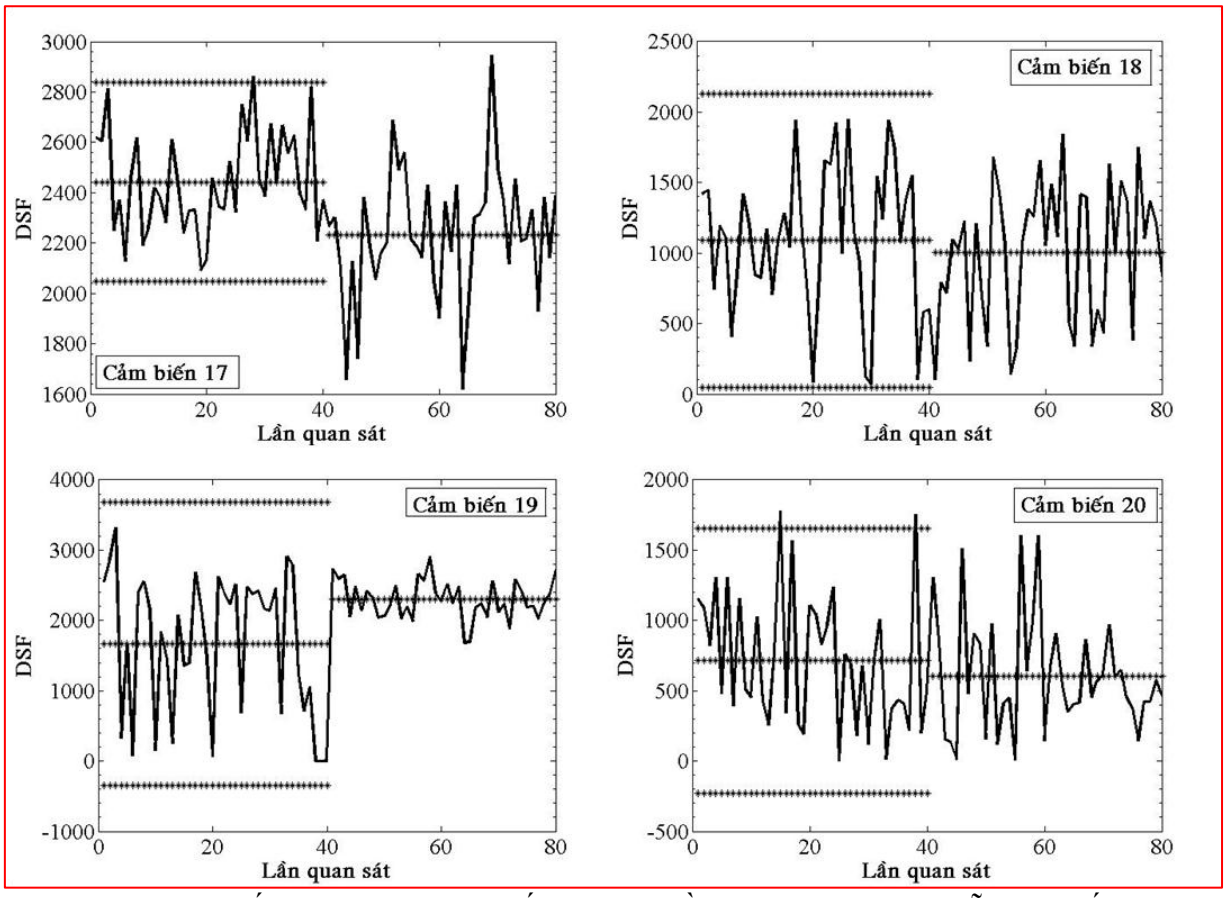
Chỉ số phát hiện hư hỏng kết cấu DSF được xác định bằng cách tính tổng của tích của dữ liệu hình chiếu lên hướng chính yếu nhất trong không gian chính với diện tích của hai dữ liệu gốc liên tiếp của cảm biến gắn trên kết cấu. Chỉ số này đặc trưng cho ứng xử của kết cấu tại vị trí gắn cảm biến tương ứng với bộ dữ liệu được đưa vào phân tích.

Chỉ số DSF được tính toán dựa trên phương pháp phân tích thành phần chủ yếu kết hợp với lý thuyết xác suất. Theo đó, chỉ số DSF tương ứng với 40 lần đo ở trạng thái kết cấu cơ bản được sử dụng như là bộ chỉ số chuẩn nhằm đối chiếu so sánh với bộ chỉ số DSF ở trạng thái kết cấu đánh giá. Ngưỡng hư hỏng được thiết lập là hai lần độ lệch chuẩn ở trạng thái cơ bản. Nếu giá trị DSF ở trạng thái đánh giá vượt quá ngưỡng hư hỏng này, thì sự hư hỏng xuất hiện trên kết cấu được kết luận, ngược lại kết cấu vẫn ở trạng thái bình thường. Kết quả phân tích chỉ số DSF từ dữ liệu đo ở trong cả hai trạng thái kết cấu được thể hiện trên Hình 4-1.

Từ kết quả phân tích dữ liệu đo ta thấy, tại các cảm biến 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 giá trị DSF ở trạng thái đánh giá (trạng thái mô phỏng hư hỏng) không vượt quá ngưỡng hai lần độ lệch chuẩn của các giá DSF tính từ trạng thái cơ bản của kết cấu. Do đo, kết luận về khả năng không hư hỏng của kết cấu tại các vị trí này được đưa ra. Tuy nhiên, tại vị trí cảm biến 5 và cảm biến 6, giá trị DSF trung bình ở trạng thái đánh giá vượt ra ngoài ngưỡng định nghĩa từ DSF ở trạng thái cơ bản, do vậy tại các vị trí này xuất hiện hư hỏng/ phá hoại trên kết cấu ở giai đoạn đánh giá. Kết quả chi tiết được thể hiện trên hình Hình 4-1 hoàn toàn phù hợp với mô phỏng hư hỏng trong mô hình cầu thép thí nghiệm.


Cảm biến 1
Cảm biến 2
Cảm biến 3
Cảm biến 4
Cảm biến 5
Cảm biến 6
Cảm biến 7
Cảm biến 8
DSF
Lần quan sát
Trạng thái kết cấu bị phá hoại


Cảm biến 9
Cảm biến 10
Cảm biến 11
Cảm biến 12
Cảm biến 13
Cảm biến 14
Cảm biến 15
Cảm biến 16
DSF
Lần quan sát



Hình 4-1: Kết quả phân tích chỉ số DSF theo lần quan sát ứng với mỗi cảm biến

4.2 Kiểm tra khả năng xác định sự thay đổi trạng thái kết cấu thông qua đám mấy thành phần chính yếu (vector riêng)

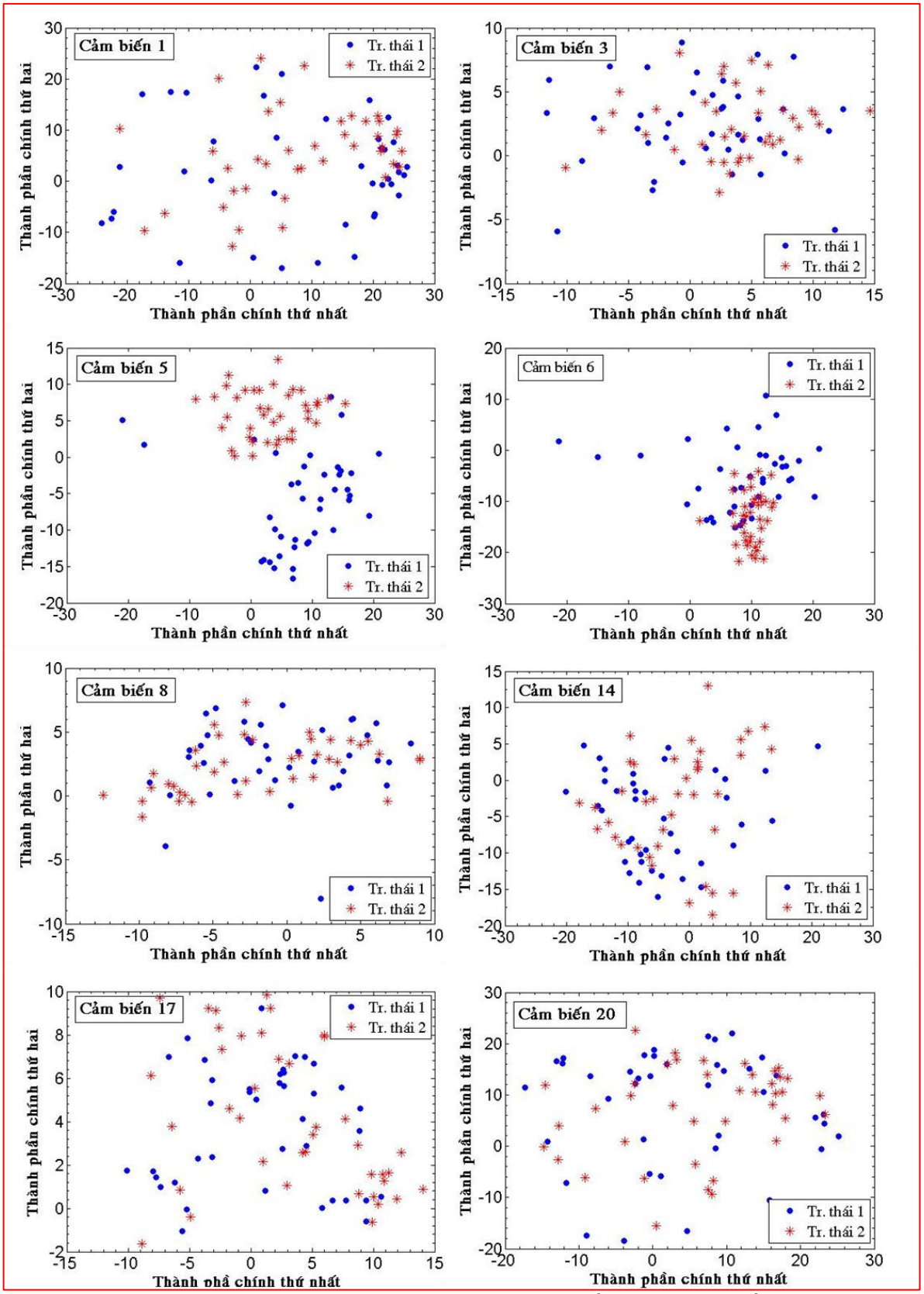
Trong phân tích thành phần chủ yếu, dữ liệu đa chiều tương quan gốc sẽ được chiếu lên một không gian chính mới được thiết lập từ các thành phần chính chủ yếu (vector riêng) của mô hình PCA tạo nên một bộ dữ liệu mới không tương quan và ít chiều hơn.

Các thành phần chính chủ yếu này là các đại lượng đặc trưng cho trạng thái kết cấu, điều này đã được chứng minh trong nhiều nghiên cứu [6, 8, 21, 28]. Theo đó, thông thường chỉ một số thành phần chính yếu đầu tiên ứng với các giá trị vector riêng tương ứng lớn nhất được sử dụng trong phân tích bởi vì nó đã bao gồm hầu như toàn bộ các thông tin hữu ích về đặc tính của kết cấu. Những thông tin từ những không gian chính còn lại được xem là nhiễu và bỏ qua. Trong lĩnh vực xây dựng, thông thường 2 đến 3 thành phần chính đầu tiên được sử dụng.

Trong nghiên cứu này, giá trị dữ liệu chiếu lên hai thành phần chính đầu tiên được phân tích nhằm đánh giá sự thay đổi trạng thái kết cấu. Kết quả chi tiết được thể hiện trên Hình 4-2 cho một số cảm biến điển hình.

Theo đó, tại các cảm biến 1, 3, 8, 14, 17, 20 và một số cảm biến khác không thể hiện trong hình, giá trị dữ liệu đo trong không gian chính mới gồm hai thành phần chính đầu tiên hòa quyện vào nhau, không phân biệt được đâu là dữ liệu của trạng thái cơ bản, đâu là dữ liệu ở trạng thái phá hoại. Do vậy, kết luận tại các vị trí cảm biến này, trạng thái kết cấu không thay đổi hoặc thay đổi không nhiều được đưa ra. Ngược lại, tại cảm

biến 5 và 6, đặc biệt cảm biến 5, dữ liệu không gian mới ở hai trạng thái kết cấu tách biệt nhau và có thể phân biệt rõ ràng. Điều này chứng tỏ tại vị trí của cảm biến 5 và cảm biến 6, trạng thái kết cấu bị thay đổi lớn. Kết quả này phù hợp với mô phỏng hư hỏng trên cầu thép mô hình trong phòng thí nghiệm.



Hình 4-2: Đám mây dữ liệu trong không gian thành phần chính thứ nhất và thứ hai

4.3 Kiểm tra khả năng định vị vị trí hư hỏng trên kết cấu bằng chỉ số DL

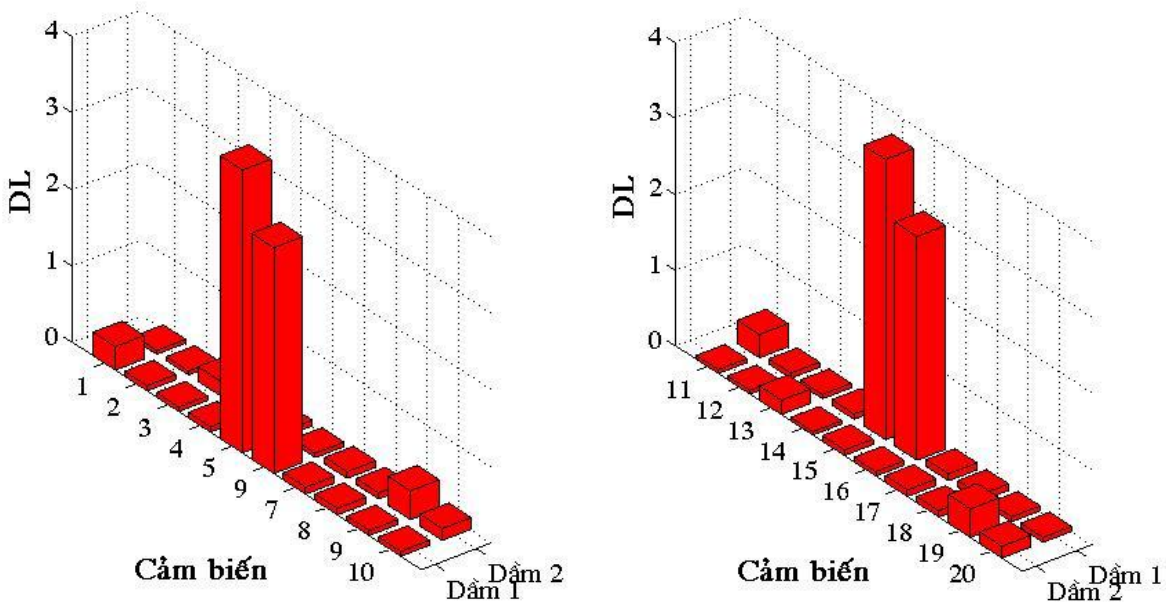
Trong nghiên cứu này, vị trí hư hỏng kết cấu được xác định dựa trên mức độ khác biệt giữa hai trạng thái kết cấu được thể hiện thông qua chỉ số DL. Theo đó, khi giá trị của chỉ số DL càng lớn chứng tỏ sự khác biệt giữa đặc tính kết cấu ở giai đoạn đánh giá và giai đoạn cơ bản càng nhiều và có khả năng xảy ra hư hỏng càng mạnh. Kết quả chi tiết về chỉ số định vị hư hỏng DL tại các vị trí cảm biến được thể hiện trên Hình 4-3.

Theo đó, tại các vị trí cảm biến 5 và cảm biến 6 có chỉ số DL lớn hơn nhiều so với các vị trí cảm biến còn lại. Tại vị trí cảm biến 5 có giá trị DL lớn nhất là 3.68, tại cảm biến 6 có giá trị DL là 2.94, điều này có nghĩa gần như là tại vị trí cảm biến 5 và cảm biến 6, đặc tính của kết cấu ở trạng thái đánh giá lần lượt khác gấp 3.68 và 2.94 lần so với trạng thái kết cấu cơ bản. Tại những vị trí cảm biến khác giá trị của DL tương đối nhỏ, giá trị DL chi tiết được thể hiện trong Bảng 4-1.

Bảng 4-1: Bảng giá trị DL tại các vị trí cảm biến

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
0.306	0.067	0.059	0.070	3.685	2.942	0.091	0.085	0.066	0.064
0.050	0.050	0.188	0.044	0.073	0.058	0.086	0.081	0.376	0.154
S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12

Như vậy, nếu có hư hỏng xảy ra thì tại vị trí cảm biến 5 và cảm biến 6 sẽ có khả năng xảy ra hư hỏng lớn nhất. Điều này hoàn toàn đúng với mô phỏng hư hỏng đã được thiết lập ở mô hình cầu thép như đã nêu ở mục trên.



Hình 4-3: Hình thể hiện chỉ số DL nhằm định vị vị trí hư hỏng kết cấu

Chương 5 Kết luận và kiến nghị

5.1 Kết luận

- Nghiên cứu đã trình bày tổng quan công tác đánh giá sức khỏe công trình trên thế giới và tại Việt Nam, đặc biệt là các phương pháp phát hiện và định vị vị trí hư hỏng trên kết cấu nằm trong nhóm phương pháp phân tích phi tham số vật lý kết cấu.
- Nghiên cứu đã trình bày một số kỹ thuật tiền xử lý dữ liệu gồm phân tích chuyển đổi Fourier Transform nhằm loại bỏ phần dữ liệu động đo tải trọng xung kích gây ra và thuật toán tự tỉ lệ nhằm giảm thiểu ảnh hưởng của các yếu tố tác động từ môi trường đến kết quả đo. Các thuật toán này được áp dụng với mục đích loại bỏ những tác động nhiễu, không liên quan đến phân tích trạng thái kết cấu, nâng cao độ chính xác của kết quả phân tích trong việc thực hiện mô tả đặc trưng trạng thái kết cấu.
- Nghiên cứu đã đề xuất chỉ số phát hiện và chỉ định vị vị trí hư hỏng kết cấu mới, có khả năng phát hiện hiệu quả hư hỏng xuất hiện trên công trình.
- Nghiên cứu đã trình bày thuật toán và viết chương trình tính dựa trên nền Matlab 2014a nhằm phát hiện và định vị vị trí hư hỏng xuất trên kết cấu công trình dựa trên phương pháp phân tích thành phần chủ yếu và lý thuyết xác suất.
- Thuật toán và chương trình tính đã được kiểm tra tính đúng đắn cũng như khả năng phát hiện và định vị vị trí hư hỏng thông qua phân tích dữ liệu đo biến dạng thu được từ một mô hình cầu thép thí nghiệm 4 nhịp thực hiện tại phòng thí nghiệm trường Đại học miền trung Florida.

5.2 Kiến nghị

Kiến nghị kiểm tra, xác thực mức độ phát hiện hư hỏng và khả năng xác định vị trí phá hoại từ bộ dữ liệu đo của một công trình thực tế. Việc này, yêu cầu phải có nhiều thiết bị đo gắn lên công trình thực tế và đo trong thời gian dài. Ngoài ra, việc mô phỏng các hư hỏng trên kết cấu thực tế cũng là một vấn đề khó khăn. Hơn nữa trong điều kiện môi trường thực tế dữ liệu đo chịu ảnh hưởng bởi rất nhiều yếu tố ngẫu nhiên làm sai lệch kết quả đo. Do vậy, có thể đề xuất một đề tài mới với đầy đủ kinh phí để thực hiện những vấn đề trên.

Tài liệu tham khảo

1. Abdi, Hervé and Williams, Lynne J. (2010), "Principal component analysis", *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*. 2(4), pp. 433-459.

2. Aktan, F. Necati Catbas and A. Emin (2002), "Condition and Damage Assessment: Issues and Some Promising Indices", *Journal of Structural Engineering*. Vol. 128(No. 8), pp. 1026–1036.

3. Brian D. Hahn, Daniel T. Valentine (2007), *Essential MATLAB® for Engineers and Scientists*, Elsevier Ltd.

4. Bùi Huy Tăng, Khúc Đăng Tùng (2016), "Xác định hệ số tương quan chuyển vị cho mục đích đánh giá sức khỏe công trình", *Hội thảo khoa học Xây dựng lần thứ 17*.

5. Charles R. Farrar, Keith Worden (2013), *Structural Health Monitoring A Machine Learning Perspective-*, A John Wiley & Sons, Ltd., .

6. Cheung, A., et al. (2008), "The application of statistical pattern recognition methods for damage detection to field data", *Smart Materials and Structures*. 17(6), p. 065023.

7. Chui, Charles K. (1992), *An Introduction to Wavelets (Wavelet Analysis and Its Applications Series)*, Academic Press.

8. D.A. Tibaduiza, L.E. Mujica, J. Rodellar (2011), "Structural Health Monitoring Based on Principal Component Analysis: Damage Detection, Localization and Classification", *Advances in Control, Dynamics, Monitoring and Aplications*, pp. 978-984.

9. Dimitris G. Manolakis, Vinay K. Ingle (2011), *Applied Digital Signal Processing Theory and Practice*, Cambridge University Press, New York.

10. Farahani, Reza V.; Penumadu, Dayakar (2016), "Damage identification of a full-scale five-girder bridge using time-series analysis of vibration data", *Engineering Structures*. 115, pp. 129-139.

11. Farrar, C. R.; Worden, K. (2007), "An introduction to structural health monitoring", *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 365(1851), pp. 303-15.

12. Gul, Mustafa and Catbas, F. Necati (2011), "Damage Assessment with Ambient Vibration Data Using a Novel Time Series Analysis Methodology", *Journal of Structural Engineering*. 137(12), pp. 1518-1526.

13. Hoon Sohn, Charles R. Farrar, Francois Hemez and Jerry Czarnecki (2002), "A Review of Structural Health Monitoring Literature 1996 – 2001", *Conference Paper*.

14. Idé, Tsuyoshi; Papadimitriou, Spiros; Vlachos, Michail (2007), "Computing Correlation Anomaly Scores Using Stochastic Nearest Neighbors", pp. 523-528.

15. Khuc, Tung and Catbas, F. Necati (2016), "Computer vision-based displacement and vibration monitoring without using physical target on structures", *Structure and Infrastructure Engineering*. 13(4), pp. 505-516.

16. Khuc, Tung and Catbas, F. Necati (2017), "Completely contactless structural health monitoring of real-life structures using cameras and computer vision", *Structural Control and Health Monitoring*. 24(1), p. e1852.

17. Laory, Irwanda; Trinh, Thanh N.; Smith, Ian F. C. (2011), "Evaluating two model-free data interpretation methods for measurements that are influenced by temperature", *Advanced Engineering Informatics*. 25(3), pp. 495-506.

18. Malekzadeh, Masoud, et al. (2014), "An integrated approach for structural health monitoring using an in-house built fiber optic system and non-parametric data analysis", *Smart Structures and Systems*. 14(5), pp. 917-942.

19. Moyo, P. and Brownjohn, J. M. W. (2002), "Detection of Anomalous Structural Behaviour Using Wavelet Analysis", *Mechanical Systems and Signal Processing*. 16(2-3), pp. 429-445.

20. Mujica, L. E., et al. (2010), "Q-statistic and T2-statistic PCA-based measures for damage assessment in structures", *Structural Health Monitoring: An International Journal*. 10(5), pp. 539-553.

21. Mujica, L. E., et al. (2014), "A structural damage detection indicator based on principal component analysis and statistical hypothesis testing", *Smart Materials and Structures*. 23(2), p. 025014.

22. Mujica, L. E., et al. (2008), "Multivariate statistics process control for dimensionality reduction in structural assessment", *Mechanical Systems and Signal Processing*. 22(1), pp. 155-171.

23. N.D. Phuc, K.D. Tung (2016), "Ứng dụng mô hình phân tích phi tham số nhằm phát hiện hư hỏng kết cấu cầu sử dụng dữ liệu đo gia tốc", *Tạp chí Cầu đường Việt Nam*.

24. N.V. Khoa, T.V. Liên, and T.A. Hào (2014), "Kiểm tra thực nghiệm phương pháp xác định vết nứt trong khung bằng phương pháp phân tích Wavelet bằng phân tích dừng của các dạng dao động", *Tạp chí khoa học công nghệ xây dựng*. số 22/12, pp. 3-11.

25. Neves, A. C., et al. (2017), "Structural health monitoring of bridges: a model-free ANN-based approach to damage detection", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 7(5), pp. 689-702.

26. P. Kumar Mehta, Paulo J. M. Monteiro (2006), *Concrete Microstructure, Properties, and Materials*, McGraw-Hill.

27. P. S. Skjmrbk, S. R. K. Nielsen (1996), "Identification of Damage in Reinforced-Concrete Structures from Earthquake Records Optimal Location of Sensors", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 15, pp. 347-358.

28. Posenato, Daniele, et al. (2008), "Model-free data interpretation for continuous monitoring of complex structures", *Advanced Engineering Informatics*. 22(1), pp. 135-144.

29. Salawu, O. S. (1997), "Detection of structural damage through changes in frequency: A riview", *Engineering Structures*. Vol. 19(No. 9), pp. 718-723.

30. Scott W. Doebling, Charles R. Farrar, and Michael B. Prime (1998), "A summary review of Vibration - Based damage identification methods ", *The Shock and Vibration Digest*. Vol. 30, pp. 91-105.

31. Shi, Jing, et al. (2010), "Beam damage detection using computer vision technology", *Nondestructive Testing and Evaluation*. 25(3), pp. 189-204.

32. T.V. Lien, T.A. Hào, and N.M. Đưc (2013), "Xác định vị trí vết nứt trong tấm chịu uốn bằng phân tích wavelet chuyển vị và dạng dao động riêng", *Hội Kết cấu và Công nghệ Việt Nam*. số 13/IV, pp. 53-65.

33. Tibaduiza, Diego A., et al. (2015), "Structural damage detection using principal component analysis and damage indices", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 27(2), pp. 233-248.

34. Worden, K . (1997), "Damage detection using a novelty measure- Worden", *J. Sound Vib.* 201(1), pp. 85-101.

35. Yang, Chen Oyadiji, S. Olutunde (2017), "Damage detection using modal frequency curve and squared residual wavelet coefficients-based damage indicator", *Mechanical Systems and Signal Processing*. 83, pp. 385-405.

36. Yang, Zhichun; Yu, Zhefeng; Sun, Hao (2007), "On the cross correlation function amplitude vector and its application to structural damage detection", *Mechanical Systems and Signal Processing*. 21(7), pp. 2918-2932.