

ỨNG DỤNG ĐIỆN THOẠI THÔNG MINH VÀ PHÉP ĐO GIÁN TIẾP KHẢO SÁT DAO ĐỘNG CÔNG TRÌNH CẦU

Nguyễn Hường Dương^{a,*}

^a*Khoa Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 05/11/2024, Sửa xong 03/12/2024, Chấp nhận đăng 04/12/2024

Tóm tắt

Bài báo này sẽ trình bày ứng dụng cảm biến gia tốc trong điện thoại xác định tần số dao động riêng của hệ kết cấu. Điện thoại được gắn lên mô hình thí nghiệm cầu dầm thép nhíp giản đơn. Kỹ thuật phân tích trên miền tần số được sử dụng để phân tích dữ liệu đo dao động. Thêm vào đó, công nghệ đo dao động công trình cầu bằng phương pháp đo gián tiếp cũng được trình bày trong bài báo này. Thay vì đặt trực tiếp trên hệ kết cấu, điện thoại được đặt trên mô hình xe đo dao động. Kết quả phân tích tần số dao động riêng của mô hình cầu thí nghiệm nhận thấy rằng cảm biến trên điện thoại thông minh có độ chính xác cao, có thể xác định chính xác tần số dao động của ba dạng dao động riêng đầu tiên của mô hình cầu. Phép đo gián tiếp đáng tin cậy, sai số so với phép đo trực tiếp nhỏ hơn 1% và có thể ứng dụng trong thực tế. Việc ứng dụng các công nghệ tiên tiến hiện nay như kết hợp giữa cảm biến điện thoại thông minh và phép đo gián tiếp giúp đưa ra một giải pháp quan trắc cầu dễ lắp đặt, áp dụng, giá thành thấp.

Từ khóa: điện thoại thông minh; đo dao động; đo gián tiếp; công trình cầu; VBI.

APPLICATION OF SMARTPHONE AND INDIRECT MEASUREMENT METHOD FOR BRIDGE VIBRATION MONITORING

Abstract

This paper discusses the use of the acceleration sensor in a smartphone to determine the natural frequency of a structural system. The phone is attached to a simple-span steel girder bridge model for experimental purposes. The vibration measurement data is analyzed using the Frequency Domain Decomposition (FDD) technique. The paper also introduces a method for measuring bridge vibration using an indirect measurement approach, where the phone is placed on a vehicle instead of directly on the structural system. The analysis results demonstrate that the sensor on the smartphone provides highly accurate measurements and can precisely determine the first three natural frequency of the bridge model. The indirect measurement method is reliable, with an error of less than 1% compared to direct measurement, making it suitable for practical applications. The application of advanced technologies, such as the combination of smartphone sensors and indirect measurements, helps to provide an easy-to-install, apply, and low-cost bridge monitoring solution.

Keywords: smartphone; vibration based method; indirect method; bridge; VBI.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19\(1V\)-06](https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19(1V)-06) © 2025 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Khi khảo sát dao động công trình cầu phục vụ công tác đánh giá sức khỏe công trình, phân tích kết cấu thường sử dụng các cảm biến như gia tốc, chuyển vị, cảm biến quang lắp trực tiếp vào hệ kết cấu để đo lại phản ứng dao động của hệ [1]. Ngược lại cũng có các loại cảm biến không tiếp xúc hoạt động từ xa ghi lại hình ảnh video từ máy ảnh kỹ thuật số và máy quay có tốc độ cao [2, 3]. Sau đó các thông tin phản ứng của kết cấu về chuyển vị được phân tích dựa vào các kỹ thuật xử lý hình ảnh,

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: duongnh2@huce.edu.vn (Dương, N. H.)

video. Với các cảm biến không tiếp xúc cần có kỹ thuật xử lý dữ liệu riêng và thường có độ chính xác không cao bằng các loại cảm biến tiếp xúc. Các loại cảm biến tiếp xúc thường có độ chính xác cao tuy nhiên cần chế tạo riêng biệt, có giá thành tương đối cao và khó lắp đặt. Một giải pháp mới hiệu quả, tiết kiệm chi phí là ứng dụng công nghệ điện thoại thông minh như là một cảm biến tiếp xúc hoặc không tiếp xúc vào công tác đo khảo sát dao động. Điện thoại thông minh là thiết bị có hệ điều hành tiên tiến, có bộ nhớ trong, có khả năng tính toán và giao tiếp. Thêm vào đó, điện thoại có thể kết nối với các mạng di động, có thể cài đặt nhiều ứng dụng tiên tiến với giao diện thân thiện với người dùng, nhỏ gọn dễ lắp đặt và di chuyển. Trong các điện thoại thông minh hiện nay có lắp đặt các cảm biến có thể ứng dụng như cảm biến tiếp xúc bao gồm cảm biến gia tốc 3 trục, con quay hồi chuyển, hệ thống định vị toàn cầu, và ứng dụng như cảm biến không tiếp xúc có camera có độ phân giải cao. Các loại cảm biến này tạo nền tảng vững chắc để phát triển các ứng dụng của điện thoại vào lĩnh vực đo dao động [4].

Các công trình giao thông đặc biệt là các công trình cầu trải qua thời gian sử dụng lâu dài có thể bị hư hỏng dẫn đến sụp đổ mất an toàn cho người dùng. Do vậy việc đánh giá sức khỏe công trình cầu là hết sức cần thiết và nhận được nhiều sự quan tâm. Một trong các phương pháp hiệu quả để đánh giá sức khỏe công trình là phương pháp dựa vào dao động [5–7]. Đối với các phương pháp truyền thống cảm biến đo dao động thường được gắn trực tiếp trên các bộ phận công trình cầu và từ đó tìm ra các đặc tính động như tần số dao động, dạng dao động riêng tại thời điểm khảo sát. Dựa vào các thông số dao động này mà tình trạng hư hỏng của công trình được đánh giá. Trong những năm gần đây, một mô hình kỹ thuật mới gọi là mô hình tương tác giữa xe và cầu (VBI) được phát triển và quan tâm. Đây là mô hình đo dao động cầu gián tiếp qua dao động của xe chạy trên cầu. Phương pháp này cho phép khảo sát dao động của công trình cầu mà không cần lắp đặt, gắn thiết bị nào trực tiếp vào hệ kết cấu từ đó giảm đáng kể chi phí so với các phương pháp đánh giá sức khỏe công trình truyền thống.

Trong các nghiên cứu lý thuyết ban đầu về mô hình VBI, Yang và cs. [8, 9] đã đề xuất ý tưởng sử dụng phương tiện qua cầu để xác định các thông số động học của công trình cầu. Và ngay sau đó, nhóm nghiên cứu đã thành công trong bài toán thực nghiệm xác định tần số dao động của công trình cầu nhờ các cảm biến đặt trên một xe đẩy có hai trục bánh xe [10]. Bên cạnh nhóm nghiên cứu của Yang, nhiều nhóm nghiên cứu trên thế giới đã thực hiện các thử nghiệm khác nhau sử dụng ý tưởng này. Oshima và cs. [11] đã sử dụng mô hình xe kết hợp với máy kích thích dao động để xác định tần số dao động riêng của cầu. Họ kiến nghị rằng nên cho xe chạy với tốc độ thấp để đạt được hiệu quả cao hơn. Một xe buýt được trang bị thiết bị đo dao động cũng được sử dụng để khảo sát tình trạng của cầu [12].

Điện thoại thông minh cũng được nhiều nhà nghiên cứu sử dụng như là thiết bị khảo sát dao động trong mô hình VBI. Matarazzo và cs. [13, 14] đã thực hiện nghiên cứu sử dụng các phương tiện khác nhau để khảo sát dao động của cầu Harvard (Boston, MA) và cầu Cổng Vàng (San Francisco, CA). Trong các nghiên cứu này, nhóm tác giả đã sử dụng các phương tiện khác nhau được trang bị điện thoại thông minh để đo phản ứng gia tốc của kết cấu và từ đó đánh giá hư hỏng xuất hiện. Tần số dao động riêng của cầu Cổng Vàng đã được khảo sát dựa vào dữ liệu đo dao động từ điện thoại của nhóm tài xế xe taxi. Việc thu thập và xử lý dữ liệu lớn thông tin dao động được cung cấp từ cộng đồng góp phần vào kế hoạch bảo trì hợp lý và có thể kéo dài thêm 30% năm phục vụ mà không tốn thêm chi phí. Trong một nghiên cứu khác, điện thoại thông minh được gắn vào xe đạp để khảo sát dao động của cầu đi bộ. Phương pháp này đã giúp nhóm nghiên cứu khảo sát công trình cầu không cho phép các loại xe ô tô được tiếp cận để thu thập các thông tin động lực học công trình một cách chính xác [15]. Các nghiên cứu trong phòng thí nghiệm, chế tạo các mô hình VBI, rô bốt tự động và đề xuất các phương pháp đánh giá sức khỏe công trình cũng được báo cáo trong nhiều nghiên cứu [16–18].

Theo xu thế mới trên thế giới, nghiên cứu này nhằm mục đích xây dựng mô hình VBI thực hiện phép đo gián tiếp trong phòng thí nghiệm tại Việt Nam. Máy đo gia tốc ba chiều từ điện thoại thông minh được ứng dụng thay thế cho các đầu đo có dây truyền thống. Thêm vào đó, mô hình xe đo dao động được chế tạo thành công có thể ứng dụng trong công tác phân tích đo đặc công trình cầu. Việc sử dụng thành công điện thoại thông minh như một đầu đo gia tốc không dây và phương pháp đo gián tiếp mở ra một phương pháp quan trắc dao động công trình cầu hiệu quả, hiện đại, và giá thành thấp.

2. Cơ sở lý thuyết

Để xác định được tần số dao động riêng của công trình cầu, phương pháp truyền thống là các đầu đo sẽ được gắn chặt trên bề mặt cầu (Hình 1(a)). Tuy nhiên, Yang và cs. [19] đã phát triển phương pháp đo gián tiếp, sử dụng các đầu đo đặt trên xe và đo lại dao động trong khi xe qua cầu và từ đó tìm ra được tần số dao động riêng của cầu (Hình 1(b)). Do các đầu đo đặt trên xe nên phương pháp đo gián tiếp không làm ảnh hưởng tới xe chạy trên cầu và thuận tiện khi tiến hành.

Khảo sát bài toán dao động bao gồm mô hình dầm có chiều dài nhịp L , mô men đàn hồi E , mô men quán tính I , khối lượng m kết hợp với mô hình xe có khối lượng riêng m_v được đỡ trên lò xo có độ cứng k_v . Phương trình dao động của hệ cầu và xe được biểu diễn như sau:

$$m_v \ddot{q}_v + k_v (q_v - u|_{x=vt}) = 0 \quad (1)$$

$$m\ddot{u} + EIu'''' = f_c(t) \delta(x - vt) \quad (2)$$

trong đó q_v thể hiện dịch chuyển theo phương thẳng đứng của lò xo, u là chuyển vị theo phương thẳng đứng của cầu, dấu chấm thể hiện phép đạo hàm theo thời gian t và dấu phẩy thể hiện đạo hàm theo quãng đường, $x = v \times t$ với v là vận tốc xe chạy, δ là hàm delta. Lực tiếp xúc $f_c(t)$ giữa xe và dầm được tính như sau:

$$f_c(t) = k_v (q_v - u|_{x=vt}) + m_v g \quad (3)$$

trong đó g là gia tốc trọng trường. Có thể thấy rằng chuyển vị của xe không chịu ảnh hưởng của gia tốc trọng trường khi công thức (1) không thấy xuất hiện thông số này, q_v được tính toán dựa vào phương trình cân bằng lực của xe. Trong khi đó, chuyển vị của dầm u phụ thuộc vào khối lượng riêng của xe thể hiện qua giá trị của lực tiếp xúc $f_c(t)$.

Nếu bỏ qua ảnh hưởng của của hệ số cản, dạng dao động đầu tiên của hệ trên đã được giải bởi Yang và cs. [19]. Phương trình chuyển vị của xe theo phương đứng là:

$$q_v = \frac{-2F}{mL(\Omega^2 - \omega_b^2)} \left(\sin \Omega t - \frac{\Omega}{\omega_b} \sin \omega_b t \right) \quad (4)$$

trong đó $F = m_v g$; $\omega_b = \frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$; $\Omega = \frac{\pi v}{L}$.

Để tìm ra gia tốc chuyển vị xe, phương trình (1) được viết lại như sau:

$$\ddot{q}_v + \left(-\omega_v^2 \sin \frac{\pi vt}{L} \right) q_b + \omega_v^2 q_v = 0 \quad (5)$$

Giải phương trình ra ta có:

$$\ddot{q}_v = \frac{\Delta \omega_v^2}{2(1 - S^2)} A_1 \cos \omega_v t + A_2 \cos \frac{2\pi vt}{L} + A_3 \cos \left(\omega_b - \frac{\pi v}{L} \right) t + A_4 \cos \left(\omega_b + \frac{\pi v}{L} \right) t \quad (6)$$

trong đó $\Delta = -2\frac{m_v g L^3}{\pi^4 EI}$; $\omega_v = \sqrt{\frac{k_v}{m_v}}$; $S = \frac{\pi v}{L \omega_b}$; $\mu = \frac{\omega_b}{\omega_v}$;

$$A_1 = 1 - \frac{1}{1 - (2\mu S)^2} - \frac{S}{1 - \mu^2(1 - S)^2} + \frac{S}{1 - \mu^2(1 + S)^2}; \quad A_2 = \frac{(2\mu S)^2}{1 - (2\mu S)^2};$$

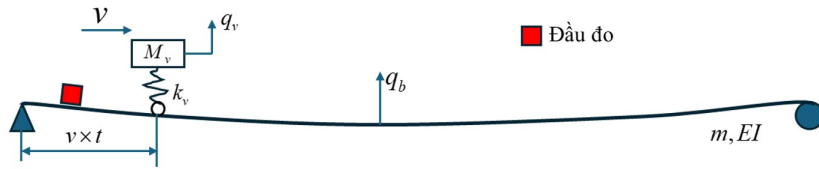
$$A_3 = -\frac{S\mu^2(1 - S)^2}{1 - \mu^2(1 - S)^2}; \quad A_4 = \frac{S\mu^2(1 + S)^2}{1 - \mu^2(1 + S)^2}$$

Công thức (6) thể hiện gia tốc của xe, trong thành phần có ảnh hưởng bởi tần số dao động riêng của cầu ω_b , vận tốc xe chạy trên cầu v và tần số dao động riêng của xe ω_v . Như vậy, nếu như dùng các phép phân tích số liệu gia tốc đặt trên xe có thể tìm ra tần số dao động riêng của cầu với mức độ chính xác dựa vào vận tốc xe chạy, độ bằng phẳng của mặt cầu [20]. Nếu cầu hoàn toàn bằng phẳng, có điều kiện để đặt xe đứng yên trên cầu thì phương pháp gián tiếp đặt đầu đo trên xe hoàn toàn có thể áp dụng để tìm ra chính xác tần số dao động riêng của cầu.

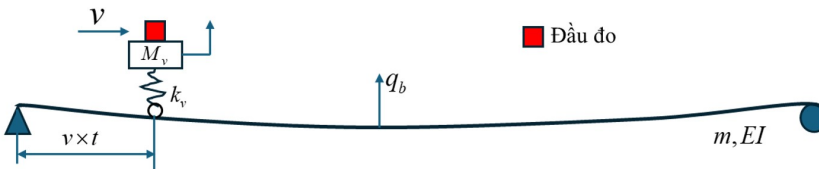
Khi đặt trực tiếp đầu đo trên cầu, tần số dao động riêng của cầu được tìm dựa vào phép phân tích Fourier của thông số chuyển vị cầu $u(x, t)$. Với dạng dao động đầu tiên, chuyển vị cầu được tính lại như sau:

$$u(x, t) = q_b(t) \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (7)$$

$$q_b = \frac{\Delta}{1 - S^2} \left(\sin\left(\frac{\pi v t}{L}\right) - S \sin(\omega_b t) \right) \quad (8)$$



(a) Phương pháp trực tiếp, đầu đo được gắn trên cầu



(b) Phương pháp gián tiếp, đầu đo được gắn trên xe chạy qua cầu

Hình 1. Xác định các thông số dao động của cầu

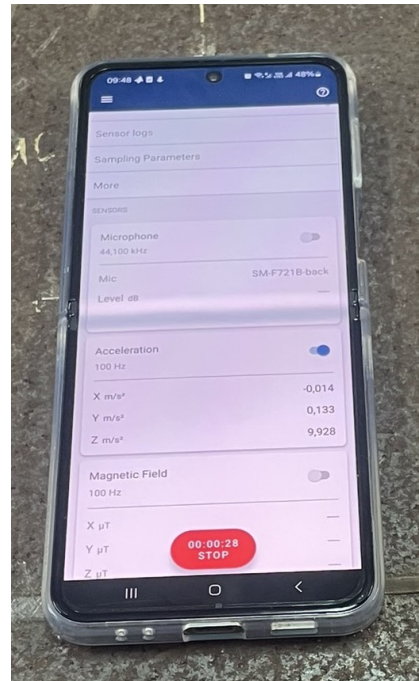
3. Mô hình thí nghiệm

3.1. Quan trắc dao động trên điện thoại thông minh

Các cảm biến được lắp đặt trong điện thoại thông minh có thể ứng dụng trong công tác quan trắc dao động là cảm biến gia tốc, con quay hồi chuyển (Gyroscope), camera và hệ thống định vị toàn cầu (GPS). Cảm biến gia tốc tích hợp trên điện thoại thông minh có thể ghi lại gia tốc chuyển động rung của máy, từ đó xác định được gia tốc chuyển động rung của kết cấu. Ưu điểm của thông số đo gia tốc đó là chứa các thông tin tổng thể và cục bộ của hệ kết cấu, có khả năng đo các chuyển động nhỏ trên một dải tần số rộng [21]. Các máy đo gia tốc tích hợp của điện thoại thông minh dựa trên hệ thống vi cơ điện dung (MEMS) [22]. Nhờ vậy các máy đo gia tốc trên điện thoại thông minh có thể đo các lực

gia tốc không đổi (trọng lực), thay đổi theo thời gian (rung động) tác động đến điện thoại thông minh theo các hướng ngang (X), dọc (Y) và thẳng đứng (Z). Cảm biến GPS trên điện thoại thông minh là một máy thu thông báo vị trí trên trái đất. Máy thu nhận tín hiệu từ các vệ tinh và sử dụng thông tin để tính toán khoảng cách của nó với từng vệ tinh. Bằng cách đo khoảng cách từ nhiều vệ tinh, máy thu có thể xác định vị trí chính xác của điện thoại. Cảm biến con quay hồi chuyển cung cấp thông tin định hướng và góc quay phù hợp để nhận dạng chuyển động trong không gian ba chiều. Cảm biến này thường được ứng dụng để bổ sung cho la bàn, và có khả năng đo góc nghiêng trên một bộ phận hoặc trên toàn bộ hệ kết cấu.

Các thông tin về phản ứng động của kết cấu dưới tác dụng của tải trọng là rất quan trọng để phục vụ công tác phân tích kết cấu, thiết kế và đánh giá sức khỏe công trình. Do các thông số về phản ứng gia tốc của kết cấu là một trong những thông số quan trọng và hiệu quả nên nhiều các thiết bị đo gia tốc khác nhau đã được chế tạo phù hợp với các hệ kết cấu khác nhau về độ nhạy, dải tần số cũng như giá thành. Trong đó, cảm biến 3 chiều MEMS tích hợp trên điện thoại thông minh là loại cảm biến dễ ứng dụng và rẻ tiền. Điện thoại thường được gắn bằng băng dính hoặc băng dính hai mặt vào bề mặt của cấu kiện cần đo. Khi được gắn chặt vào cấu kiện, máy đo gia tốc MEMS ba trục của điện thoại thông minh có thể được coi là công cụ đáng tin cậy để ghi lại và thu thập các phản hồi gia tốc chính xác, đặc biệt là những phản hồi dưới 100 Hz, theo ba hướng (tức là trục ngang, trục dọc và trục thẳng đứng) khi kết hợp với một số ứng dụng của bên thứ ba. Một số các ứng dụng được bên thứ ba phát triển để đo dao động của hệ kết cấu như Accelerometer analyzer [23], Matlab Mobile [15], Phyphox [24]. Các ứng dụng của bên thứ ba này chủ yếu được phát triển cho một số tác vụ cụ thể có thể tương tác với một số tính năng phần cứng và hệ điều hành. Các ứng dụng này có trách nhiệm thu thập và phân tích dữ liệu từ các phần cứng đó. Hình 2 thể hiện ứng dụng Matlab Mobile trên điện thoại Samsung Flip 4 và được sử dụng để đo dao động của kết cấu tấm thép trong nghiên cứu thực nghiệm. Tần số lấy mẫu 100 Hz và thời gian lấy mẫu là 120 s được cài đặt tùy theo nhu cầu của người dùng.



Hình 2. Đo dao động trên điện thoại Samsung Flip 4

3.2. Mô hình xe và cầu

Thí nghiệm đo dao động được thực hiện tại phòng thí nghiệm bộ môn Cầu công trình ngầm, trường Đại học Xây dựng Hà Nội. Mô hình thí nghiệm bao gồm mô hình cầu thép, là một tấm bản thép nhíp giản đơn dài 2,5 m, rộng 0,35 m và dày 0,01 m. Một gối cố định và một gối di động được bố trí cách nhau 2 m. Để thực hiện phép đo gián tiếp, mô hình xe đo được chế tạo. Xe nặng 5 kg dài 60 cm rộng 30 cm, có thể thay đổi khoảng cách trục và có thể di chuyển trên cầu. Trên bốn trục bánh xe có bố trí các lò xo, điện thoại đo gia tốc được gắn trên thanh ngang ở phía trên xe. Hình 3 thể hiện mô hình xe và dầm trong phòng thí nghiệm và các kích bản bố trí phép đo dao động. Trọng lượng của điện thoại được xem như không đáng kể so với trọng lượng của xe và dầm thép. Dầm được kích thích dao động bằng búa gỗ. Trong nghiên cứu này, phương pháp OMA (Operational Modal Analysis) được sử dụng

để xác định tần số dao động riêng của hệ. Do vậy độ lớn lực kích thích không cần phải xác định trước. Độ lớn của lực và vị trí búa gõ là bất kỳ trên tấm thép.

Để xác định tính chính xác và độ nhạy của phép đo gia tốc bằng điện thoại thông minh và phép đo gián tiếp, khảo sát 3 kịch bản như sau:

- Kịch bản 1: Không kể đến tải trọng của xe. Điện thoại được gắn trực tiếp trên cầu bằng băng keo và thực hiện phép đo trực tiếp. Thêm vào đó, 2 cảm biến gia tốc của hãng NI với độ nhạy nằm trong khoảng $10,13 - 10,50 \text{ mV/m/s}^2$ được gắn vào tấm thép để khảo sát dao động. Điện thoại đặt tại vị trí bất kỳ trên tấm và tương tự với các cảm biến gia tốc (Hình 3(a)).

- Kịch bản 2: Kể đến tải trọng của xe. Điện thoại được gắn trực tiếp trên cầu bằng băng keo và thực hiện phép đo trực tiếp khi có xe đứng trên cầu (Hình 3(b)).

- Kịch bản 3: Điện thoại được gắn trên xe và thực hiện phép đo gián tiếp (Hình 3(c)).



(a) Kịch bản 1



(b) Kịch bản 2



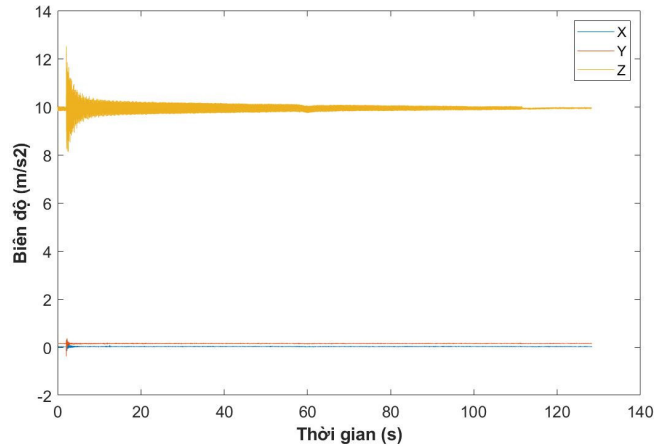
(c) Kịch bản 3

Hình 3. Các kịch bản đo dao động tấm bản thép

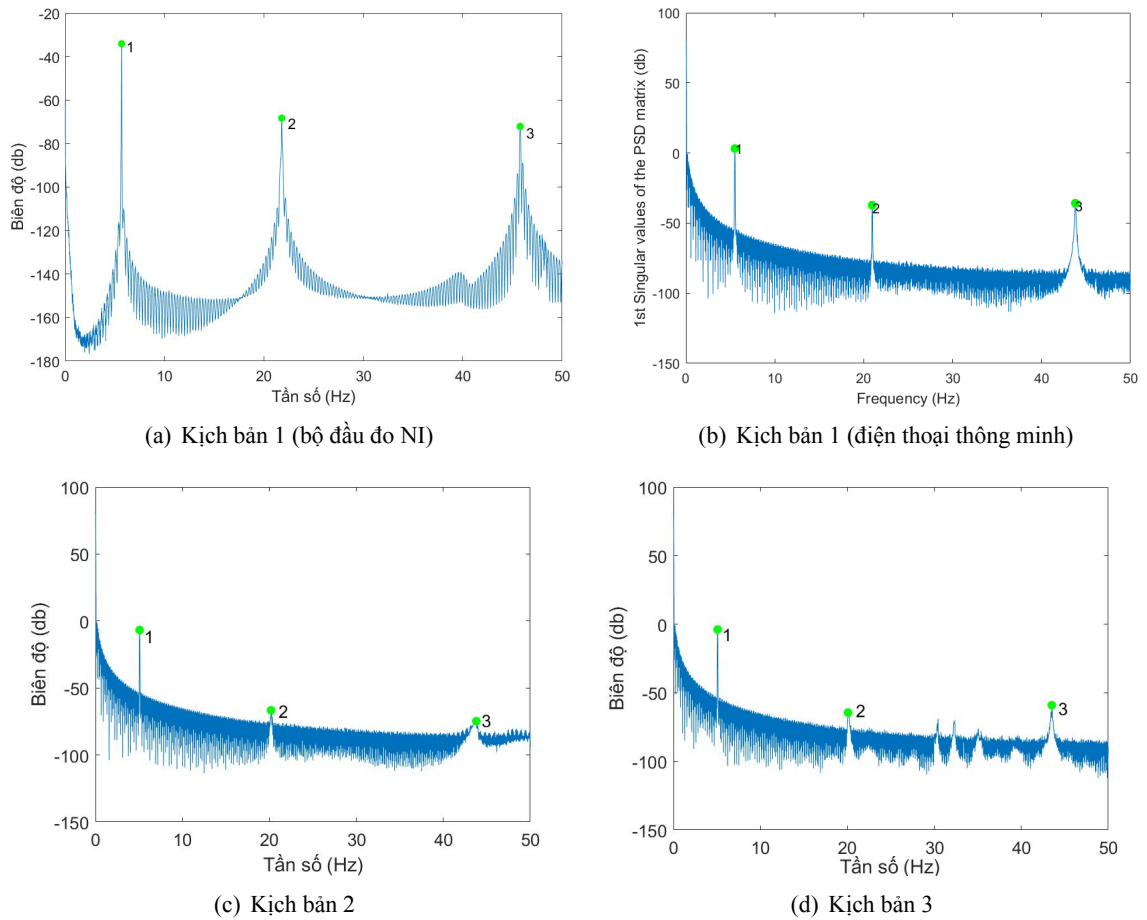
3.3. Kết quả và thảo luận

Dữ liệu đo gia tốc của dầm thép được thu thập theo thời gian theo 3 phương được thể hiện trên Hình 4, trong đó biên độ dao động theo phương thẳng đứng (phương Z) có xét đến ảnh hưởng của gia tốc trọng trường. Kỹ thuật phân tích trên miền tần số FDD [25] được thực hiện trên dữ liệu đo của nhiều lần đo khác nhau, từ đó tìm ra được tần số ổn định nhất trong tất cả các phép đo, đặc trưng cho tần số dao động riêng của cầu tương ứng với các dạng dao động khác nhau. FDD dựa trên phân tích giá trị kỳ dị của ma trận mật độ phổ giúp phân tích các trường hợp có chế độ cách nhau gần. Hơn nữa, FDD tập trung tất cả thông tin vào một biểu đồ duy nhất; đó là biểu đồ các giá trị kỳ dị của ma trận mật độ phổ, thân thiện với người dùng.

Hình 5 thể hiện biểu đồ ma trận mật độ phổ của kỹ thuật phân tích FDD của ba kịch bản thí nghiệm. Dựa vào ma trận này, ba tần số dao động riêng của ba dạng dao động đầu tiên của dầm thép được tìm thấy và tổng hợp trong Bảng 1. Sai số của phép đo từ cảm biến NI và từ điện thoại di động được thể hiện trong ngoặc ở kịch bản 1. Đối với cả 3 dạng dao động đầu tiên sai số giữa 2 phép đo đều nhỏ hơn 5%. Điều đó chứng tỏ rằng các cảm biến gia tốc MEMS trên điện thoại có độ chính xác tương đương với các cảm biến chuyên dụng. Tuy nhiên hạn chế của các cảm biến gia tốc trên MEMS đó là tần số lấy mẫu không cao, lớn nhất là 100 Hz đối với ứng dụng Matlab Mobile sử dụng trong nghiên cứu này. Do vậy sẽ gặp hạn chế khi xác định các dao động có tần số lớn.



Hình 4. Dữ liệu gia tốc dầm theo ba phương



Hình 5. Biểu đồ ma trận mật độ phổ trên miền tần số FDD

Sai số của tần số dao động riêng của kịch bản thứ 2, dầm thép có kể đến tải trọng xe với tần số dao động của kịch bản 1 tương ứng được tính toán và là giá trị phần trăm trong ngoặc ở kịch bản 2, Bảng 1. Tải trọng xe không đáng kể so với tải trọng dầm nên sự thay đổi tần số là nhỏ, khoảng 7,97% với dạng dao động thứ nhất, 3,62% với dạng dao động thứ hai và 0,11% với dạng dao động thứ 3. Tuy

các biến đổi đều nhỏ hơn 10% nhưng phép đo bằng điện thoại thông minh vẫn nhận diện được, điều này chứng tỏ độ tin cậy và mức độ chính xác của cảm biến gia tốc MEMS tích hợp trên điện thoại.

Sai số tần số dao động riêng xác định bằng phương pháp đo gián tiếp (kịch bản 3) được so sánh với phương pháp đo trực tiếp (kịch bản 2) và biểu diễn bằng giá trị phần trăm trong ngoặc ở kịch bản 3, Bảng 1. Sai số tính toán được ở cả ba dạng dao động đều nhỏ hơn 1%. Như vậy phép đo gián tiếp khi điện thoại được đặt trên mô hình VBI cũng có mức độ chính xác gần như tương đương với điều kiện xe đặt trực tiếp trên tấm thép. Cả phương pháp đo gián tiếp và cảm biến điện thoại đều có thể sử dụng để khảo sát dao động của hệ kết cấu với độ chính xác cao.

Bảng 1. Tổng hợp tần số dao động của dầm thép (Hz)

	Dạng thứ 1	Dạng thứ 2	Dạng thứ 3
Kịch bản 1 (NI)	5,69	21,86	45,8
Kịch bản 1	5,52 (3,08%)	20,97 (4,24%)	43,8 (4,57%)
Kịch bản 2	5,08 (7,97%)	20,21 (3,62%)	43,75 (0,11 %)
Kịch bản 3	5,08 (0%)	20,17 (0,2%)	43,51 (0,55%)

4. Kết luận

Bài báo này đã đề xuất và khảo sát phương pháp khảo sát dao động của công trình dựa vào điện thoại thông minh và phương pháp đo gián tiếp sử dụng mô hình VBI. Với sự phát triển của công nghệ, điện thoại thông minh ngày nay đều được tích hợp các cảm biến 3 chiều MEMS, khi kết hợp với các ứng dụng của bên thứ ba có thể ứng dụng để đo gia tốc của kết cấu. Kết quả khảo sát khi sử dụng cảm biến điện thoại xác định tần số dao động riêng của dầm thép nhận thấy rằng, khi trọng lượng của dầm thay đổi dẫn đến tần số dao động riêng của dầm thay đổi khoảng 8% thì dữ liệu đo dao động của điện thoại cũng nhận diện được sự thay đổi này. Với phép đo gián tiếp, điện thoại được gắn trên mô hình xe đo dao động, kết quả xác định tần số dao động của phép đo gián tiếp và phép đo trực tiếp có sai số không đáng kể, nhỏ hơn 1%. Với sự phát triển công nghệ, việc tích hợp điện thoại và phép đo gián tiếp có thể ứng dụng trong các nghiên cứu về phân tích kết cấu hoặc đánh giá sức khỏe công trình khi giải pháp này dễ lắp đặt, rẻ tiền, hiệu quả cao. Ngoài ra, các công nghệ tích hợp trên điện thoại thông minh có thể giúp truyền tải nhanh các thông tin trên miền thời gian thực, tạo ra các ứng dụng hiệu quả, thân thiện với người dùng.

Lời cảm ơn

Cảm ơn nhóm sinh viên lớp 64CD3 Nguyễn Văn Thìn, Phan Tất Bảo, Hoàng Tuấn Anh, Nguyễn Văn Cường, Trịnh Minh Hiền đã hỗ trợ nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Lynch, J. P., Sohn, H., Wang, M. L. (2022). *Sensor Technologies for Civil Infrastructures: Volume 2: Applications in Structural Health Monitoring*. Woodhead Publishing.
- [2] Sony, S., Laventure, S., Sadhu, A. (2019). [A literature review of next-generation smart sensing technology in structural health monitoring](#). *Structural Control and Health Monitoring*, 26(3):e2321.
- [3] Tùng, K. Đ., Tuyền, N. N., Mai, N. N. (2016). Monitoring of structural behaviors using low-end cameras. *Sử dụng camera cho mục đích quan trắc và phân tích ứng xử kết cấu*, 10(4):3–10.
- [4] Sarmadi, H., Entezami, A., Yuen, K.-V., Behkamal, B. (2023). [Review on smartphone sensing technology for structural health monitoring](#). *Measurement*, 223:113716.
- [5] Dương, N. H., Bảo, N. Q. (2023). [Xác định vùng hư hỏng trên kết cấu dạng bản sử dụng độ cong dạng dao động theo hai phương và mạng nơ ron tích chập](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCN XD) - ĐHXDHN*, 17(3V):66–77.

- [6] Dương, N. H., Bảo, N. Q. (2023). [Xác định vị trí hư hỏng trên kết cấu dạng bản sử dụng ma trận độ mềm và số liệu đo dao động](#). *Transport and Communications Science Journal*, 74(5):570–581.
- [7] Thiện, N. C., Duy, H. Đ., Cường, N. H., Sỹ, B. V., Cao, L. T. (2022). [Đánh giá sự thay đổi của tần số dao động và dạng dao động cho khung bê tông cốt thép dưới tác dụng của tải trọng](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN*, 16(1V):22–34.
- [8] Yang, Y.-B., Lin, B.-H. (1995). [Vehicle-bridge interaction analysis by dynamic condensation method](#). *Journal of Structural Engineering*, 121(11):1636–1643.
- [9] Yang, Y.-B., Lin, C. W., Yau, J. D. (2004). [Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle](#). *Journal of Sound and Vibration*, 272(3–5):471–493.
- [10] Lin, C. W., Yang, Y. B. (2005). [Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: An experimental verification](#). *Engineering Structures*, 27(13):1865–1878.
- [11] Oshima, Y., Yamaguchi, T., Kobayashi, Y., Sugiura, K. (2008). Eigenfrequency estimation for bridges using the response of a passing vehicle with excitation system. *Bridge Maintenance, Safety, Management, Health Monitoring and Informatics*, page 591.
- [12] Miyamoto, A., Yabe, A. (2011). [Bridge Condition Assessment based on Vibration Responses of Passenger Vehicle](#). *Journal of Physics: Conference Series*, 305:012103.
- [13] Matarazzo, T. J., Santi, P., Pakzad, S. N., Carter, K., Ratti, C., Moaveni, B., Osgood, C., Jacob, N. (2018). [Crowdsensing Framework for Monitoring Bridge Vibrations Using Moving Smartphones](#). *Proceedings of the IEEE*, 106(4):577–593.
- [14] Matarazzo, T. J., Kondor, D., Milardo, S., Eshkevari, S. S., Santi, P., Pakzad, S. N., Buehler, M. J., Ratti, C. (2022). [Crowdsourcing bridge dynamic monitoring with smartphone vehicle trips](#). *Communications Engineering*, 1(1).
- [15] Quqa, S., Giordano, P. F., Limongelli, M. P. (2022). [Shared micromobility-driven modal identification of urban bridges](#). *Automation in Construction*, 134:104048.
- [16] Shirzad-Ghaleroudkhani, N., Mei, Q., Gül, M. (2020). [Frequency Identification of Bridges Using Smartphones on Vehicles with Variable Features](#). *Journal of Bridge Engineering*, 25(7).
- [17] Shirzad-Ghaleroudkhani, N., Gül, M. (2020). [Inverse Filtering for Frequency Identification of Bridges Using Smartphones in Passing Vehicles: Fundamental Developments and Laboratory Verifications](#). *Sensors*, 20(4):1190.
- [18] Nguyen, D. H., Nguyen, Q. B., Abdel Wahab, M. (2021). [Monitoring Bridge Frequencies Using Passing Vehicle](#). *Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Damage Modelling and Assessment*, Ghent University, Belgium, Springer Singapore, 27–36.
- [19] Yang, Y. B., Lin, C. W. (2005). [Vehicle–bridge interaction dynamics and potential applications](#). *Journal of Sound and Vibration*, 284(1–2):205–226.
- [20] Yang, Y. B., Li, Y. C., Chang, K. C. (2012). [Effect of road surface roughness on the response of a moving vehicle for identification of bridge frequencies](#). *Interaction and multiscale mechanics*, 5(4):347–368.
- [21] Lynch, J. P., Sohn, H., Wang, M. L. (2022). *Sensor technologies for civil infrastructures: Volume 1: Sensing hardware and data collection methods for performance assessment*. Woodhead Publishing.
- [22] Grouios, G., Ziagkas, E., Loukovitis, A., Chatzinikolaou, K., Koidou, E. (2022). [Accelerometers in Our Pocket: Does Smartphone Accelerometer Technology Provide Accurate Data?](#) *Sensors*, 23(1):192.
- [23] Guzman-Acevedo, G. M., Vazquez-Becerra, G. E., Millan-Almaraz, J. R., Rodriguez-Lozoya, H. E., Reyes-Salazar, A., Gaxiola-Camacho, J. R., Martinez-Felix, C. A. (2019). [GPS, Accelerometer, and Smartphone Fused Smart Sensor for SHM on Real Scale Bridges](#). *Advances in Civil Engineering*, 2019 (1).
- [24] Shirzad-Ghaleroudkhani, N., Mei, Q., Gül, M. (2022). [A crowdsensing-based platform for transportation infrastructure monitoring and management in smart cities](#). *The Rise of Smart Cities*, Elsevier, 609–624.
- [25] Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P. (2000). Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition. *IMAC 18: Proceedings of the International Modal Analysis Conference (IMAC)*, San Antonio, Texas, USA, 625–630.