

Phân tích cấu trúc cầu cảng biển dựa trên dữ liệu mạng cảm biến với giải thuật Fast-Marching

■ PGS. TS. ĐẶNG XUÂN KIÊN(*); TS. ĐỖ VIỆT DŨNG; THS. TRẦN TIẾN ĐẠT; TS. LƯU HOÀNG MINH

Nhóm nghiên cứu AIT - Trường Đại học Giao thông vận tải TP. Hồ Chí Minh

■ THS. HỒ LÊ ANH HOÀNG

Nhóm nghiên cứu AIT - Trường Đại học Giao thông vận tải TP. Hồ Chí Minh

Trường Đại học Văn hiến

Email: (*)kien.dang@ut.edu.vn

TÓM TẮT: Cầu cảng biển là công trình có kết cấu phức tạp và đóng vai trò quan trọng trong các cảng biển. Do đó, quan trắc sức khỏe công trình biển (MSMH) trong quá trình tác động từ các phương tiện neo đậu cũng như các tải trọng môi trường cần phải được thực hiện nhằm đảm bảo an toàn khai thác. Bài báo đề xuất giải pháp quan trắc sức khỏe tổng quan công trình cầu cảng áp dụng thuật toán Fast-marching phân tích dữ liệu mạng cảm biến đa điểm gắn các vị trí trọng yếu công trình. Qua đó, tổng hợp biểu đồ vận quan trắc việc tiến triển tình trạng sức khỏe công trình theo thời gian. Các kết quả khả quan thu được đã minh chứng hệ thống đáp ứng tốt trong điều kiện khai thác.

TỪ KHÓA: Cầu cảng, Fast-marching, quan trắc sức khỏe công trình biển, mạng cảm biến đa điểm.

ABSTRACT: Marine berthing plays an important role in harbors with a complex structure. Therefore, marine structure health monitoring (MSHM) during the impact of the mooring vehicles and the environmental loads needs to be established to ensure safe operation. The paper proposes a solution to monitor the overall health of the berth, applying the Fast-marching algorithm to analyze the data of the multi-point sensor network set up at the essential points of the construction. Thereby, the MSHM synthesizes the texture health diagram to monitor the progress of the building over time. The positive results have proved the effectiveness of the proposed system in mining conditions.

KEYWORDS: Berth, Fast-marching, marine structure health monitoring, Multi-point sensor network.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Vận tải biển ngày càng chiếm vai trò lớn trong nền kinh tế Việt Nam. Trong đó, cầu cảng là công trình quan trọng trong các bến cảng nhằm giúp các phương tiện hàng hải cập bến và neo đậu, hành khách lên xuống và bốc dỡ hàng hóa. Cầu cảng được thiết kế tùy thuộc vào loại tàu phục vụ khai thác [1]. Trong đó, việc bố trí cấu trúc neo đậu tàu cần sử dụng tối ưu cả không gian và vị trí đặt. Các công trình neo đậu sẽ chịu tác động chính từ các lực ngang được gây ra bởi tác động của tàu neo đậu, lực kéo từ dây neo, áp lực

gió, sóng, lực địa chấn, áp lực đất, chênh lệch áp suất nước. Vì vậy, trước khi thiết kế xây dựng công trình cần phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến kết cấu như đặc điểm đất của vị trí để xuất xây dựng, điều kiện môi trường và phạm vi giao thông. Số lượng cầu cảng sẽ phụ thuộc vào số lượng tàu sử dụng cảng và thời gian cần thiết để dỡ hàng và tiếp nhận hàng hóa hoặc hành khách. Các kết cấu cầu neo đậu cần bố trí ở phần có kè chắn nhất của bến cảng hoặc dọc theo chiều gió và sóng biển.

Việc theo dõi sức khỏe công trình theo hai hình thức là giám sát cục bộ và giám sát tổng thể. Rõ ràng, việc giám sát tình trạng tổng thể công trình liên quan chặt chẽ đến tình trạng của kết cấu [2]. Các công trình biển sẽ chịu tác động đến từ môi trường như tính chất độ sụt lún tải trọng sóng gió tác động vào cấu trúc cầu làm giảm chất lượng khai thác công trình [3]. Do đó, công trình cầu cảng dưới tác động sự biến đổi tải trọng cộng hưởng thời tiết có thể gây ra các vết nứt dẫn đến sụp đổ công trình [4]. Trong điều kiện làm việc ngoài khơi, công trình biển như giàn khoan chịu tác động thường xuyên sóng và dòng chảy sẽ gây ra dao động hoặc sụt lún dẫn đến bề mặt làm việc bị nghiêng gây ra gây đổ công trình [5].

Rung động là yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến độ vững chắc của kết cấu công trình, là vấn đề cần được quan tâm hiện nay [6]. Thuật toán kỹ thuật rung nghịch đảo được áp dụng trên mô hình tham chiếu hai chiều và ba chiều giảm lược nhằm xác định sớm các sự cố có thể xảy ra cấu trúc công trình biển [7]. Bên cạnh đó, giải pháp mạng nơ-ron học sâu (DNN) được sử dụng nhằm phát hiện các điểm có khả năng nứt gãy của cấu trúc cơ khí dựa trên phân tích dữ liệu tần số rung các thành phần không chắc chắn gây ra [8]. Mặt khác, hệ thống giám sát và phát hiện bất thường cho công trình cầu có tích hợp trí tuệ nhân tạo (AI) cũng được áp dụng ngày càng rộng rãi dựa trên công nghệ kết nối công nghệ cảm biến không dây [9]. Tổng thể các nghiên cứu tập trung phát triển các giải pháp giám sát các yếu tố bất định gây ra tai nạn công trình như rung lắc, độ nghiêng và độ vững chắc của kết cấu công trình. Các giải pháp đề xuất phần lớn tập trung trong việc phát triển lý thuyết thông minh và giám sát tập trung tại các điểm cục bộ nên chưa mang tính tổng thể.

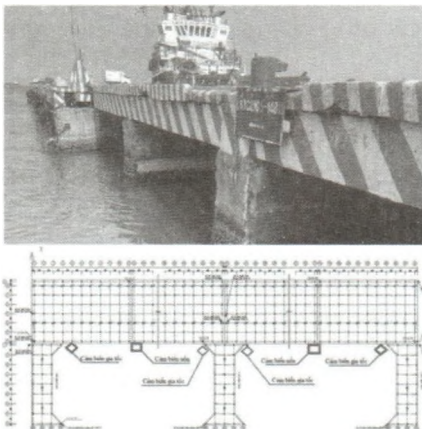
Bài báo đề xuất giải pháp giám sát sức khỏe tổng thể cầu cảng dựa trên đo lường sự chuyển vị kết cấu công trình. Nhóm nghiên cứu áp dụng thuật toán Fast-marching phân tích dữ liệu mạng cảm biến đa điểm gắn trên các điểm trọng yếu của công trình cầu cảng vùng biển Vũng Tàu - Việt Nam. Những đóng góp chính của nghiên cứu bao gồm:

- Thiết lập mạng cảm biến gắn các vị trí trọng yếu của cầu cảng;
- Áp dụng thuật toán Fast-marching phân tích dữ liệu mạng cảm biến xác định tình trạng sức khỏe tổng thể của cầu cảng;
- Tổng hợp biểu đồ vận quan trắc việc tiến triển tình trạng sức khỏe công trình theo thời gian.

2. THIẾT LẬP HỆ THỐNG MẠNG CẢM BIẾN GIÁM SÁT TÌNH TRẠNG KẾT CẤU CẦU CẢNG

Cấu trúc cầu cảng là một dự án cần chi phí đầu tư lớn, nên việc sử dụng tối ưu cả không gian và chi phí mang cấp thiết cao. Trong đó, việc kiểm soát tình trạng sức khỏe kết cấu công trình dựa vào việc thu thập dữ liệu cảm biến thời gian thực chính xác giữ vai trò quan trọng trong khai thác công trình. Hệ thống quan trắc sức khỏe công trình bao gồm hệ mạng cảm biến bố trí đan xen tại các điểm trọng yếu nhằm xác định các thông số liên quan đến trạng thái thời gian thực của kết cấu. Mạng cảm biến thiết lập trong nghiên cứu này giải quyết các mục tiêu cụ thể như sau:

- Xây dựng mạng cảm biến gia tốc để giám sát sự chuyển vị nghiêng của cầu cảng;
- Thiết lập mạng cảm biến uốn để giám sát độ nứt gãy công trình.



Hình 2.1: Tổng quan bố trí mạng cảm biến cho cầu cảng

Việc thu thập dữ liệu mạng cảm biến gắn trên các điểm trọng yếu cầu cảng sử dụng công nghệ không dây, đảm bảo an toàn cho các tàu neo đậu xếp dỡ hàng hóa [10]. Mục tiêu chính của hệ thống giám sát là giúp neo đậu các tàu đã cập cảng an toàn và có thể tự động quản lý các tác vụ như truyền nhận tất cả dữ liệu mạng cảm biến về trạm giám sát tình trạng sức khỏe công trình trên bờ. Thiết lập mạng cảm biến có N nút trong mạng đa điểm, mô hình mạng cảm biến đa điểm được tổng hợp như sau [11]:

$$X_{k+1} = f(X_k) + \omega_k, Z_k^n = h^n(X_k) + v_k^n \quad (1)$$

Trong đó: $n = 1, \dots, N$ mô tả các nút cảm biến với $N \geq 2$. Bên cạnh đó, $X_k \in R^m$ là vector trạng thái giá trị mạng cảm biến và $Z_k^n \in R^l$ là vector đo lường tại thời điểm k. $f(\cdot)$ và $h^n(\cdot)$ biểu thị với vector chuyển đổi trạng thái phi tuyến và đo lường tương ứng. ω_k và v_k^n biểu thị cho lực tác động nhiễu Gauss. $\omega_k \sim N(0, Q_k)$ là nhiễu quá trình với giá trị trung bình trong miền giới hạn 0 đến cận phương sai Q_k . $v_k^n \sim N(0, R_k^n)$ là nhiễu đo lường với giá trị trung bình trong miền giá trị 0 đến cận phương sai R_k^n . Phép đo được xác định từ các nút cảm biến và được xác định bởi phương trình:

$$y_k^n = \lambda_{0,k} z_k^n + \Lambda_{1,k} \lambda_{d_k,k} z_{k-d_k}^n + \Lambda_{2,k} v_k^n \quad (2)$$

Với: $\Lambda_{1,k} = (1 - \lambda_{0,k})$, $\Lambda_{2,k} = (1 - \lambda_{0,k})$, $d_k \geq 1$ là các bước trễ của cảm biến tại thời điểm k. Các biến $\lambda_{0,k}$ và $\lambda_{d_k,k}$ có giá trị độc lập lẫn nhau và thỏa mãn định luật phân bố Bernoulli. Các thuộc tính của $\lambda_{0,k}$ và $\lambda_{d_k,k}$ được xác định [12].

$$\begin{cases} \text{Prob}\{\lambda_{0,k} = 1\} = E[\lambda_{0,k}] = \alpha, \\ \text{Prob}\{\lambda_{0,k} = 0\} = E[1 - \lambda_{0,k}] = 1 - \alpha, \\ \text{Prob}\{\lambda_{d_k,k} = 1\} = E[\lambda_{d_k,k}] = \mu, \\ \text{Prob}\{\lambda_{d_k,k} = 0\} = E[1 - \lambda_{d_k,k}] = 1 - \mu \end{cases} \quad (3)$$

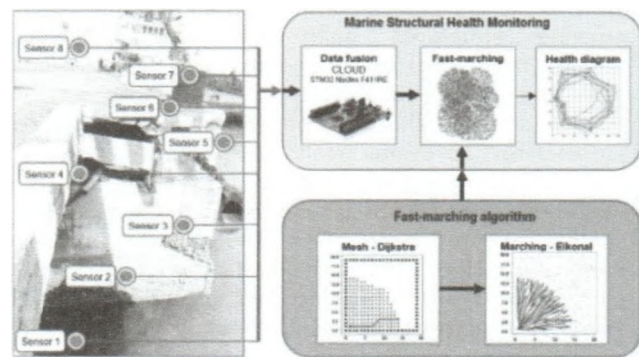
Ta có, $\alpha \in [0, 1]$ là các đại lượng vô hướng. Tập dữ liệu thống kê $\Lambda_{1,k}$ và $\Lambda_{2,k}$ được xác định:

$$E[\Lambda_{1,k}] = \bar{\Lambda}_1, E[\Lambda_{2,k}] = \bar{\Lambda}_2 \quad (4)$$

Trong đó: $\bar{\Lambda}_1 = 1 - \alpha$, $\bar{\Lambda}_2 = (1 - \alpha)(1 - \mu)$. Mạng dữ liệu thu được từ mạng cảm biến đa điểm sẽ là giá trị đầu vào cho hệ thống phân tích dữ liệu nhằm xác định tình trạng sức khỏe công trình cầu cảng. Áp dụng thuật toán Fast-marching phân tích dữ liệu mạng cảm biến đa điểm xác định tình trạng sức khỏe cầu cảng sẽ được trình bày trong nội dung tiếp theo.

3. ÁP DỤNG GIẢI THUẬT FAST-MARCHING TRONG PHÂN TÍCH SỨC KHỎE CẦU CẢNG

Phương pháp giám sát tổng thể cấu trúc công trình chuyển vị dựa trên thuật toán Fast-marching theo dõi tình trạng kết cấu công trình biến dạng vào việc thu thập dữ liệu thời gian thực chính xác, truyền thông tin về trạm trung tâm để phát tín hiệu cảnh báo khi quan sát thấy tình trạng bất thường. Dữ liệu mạng cảm biến đa điểm được đồng bộ hóa và thu thập qua bộ xử lý trung tâm. Các dữ liệu được phân tích với giải pháp Fast-marching được trình bày tổng quan tại Hình 3.1, gồm 2 giai đoạn như sau: 1) Định giá trị các nút cảm biến trên biểu đồ lưới và áp dụng giải thuật Dijkstra để xác định đường nối giữa các điểm; 2) Chuyển đổi đường nối thành các quỹ đạo cong tối ưu sử dụng phương trình Eikonal.



Hình 3.1: Hệ thống xử lý dữ liệu cảm biến đa điểm với giải thuật Fast-marching

Giải pháp Dijkstra thực hiện truy cập các đường cạnh từ điểm bắt đầu đến điểm tham chiếu, hoạt động theo hai nguyên tắc [13]: a) đường nối phụ trong tập hợp các đường nối ngắn nhất xác định theo khoảng cách ngắn nhất; b) với khoảng cách x ngắn nhất, một đường tiến triển từ A đến C qua điểm thứ ba B sẽ luôn có khoảng cách lớn hơn hoặc bằng x. Đặt M biểu thị cho số lượng điểm tham chiếu, Δ_{ck} là hàm tính toán di chuyển tức thời từ điểm tham chiếu J ở giai đoạn trước $P_{i-1,j}$ đến điểm tham chiếu hiện tại $P_{i,j}$ với thời gian di chuyển cần thiết Δ_{tk} . Hàm tính toán Δ_{ck} được xác định:

$$\Delta_{C_k} = f(U(P_{i-1,k}), W(P_{i-1,k})) \Delta_{t_k} \quad (5)$$

Hàm đánh giá chuyển động đến điểm tham chiếu hiện tại $P_{i,j}$ có thể được viết lại như sau:

$$cP_{i,j} = \begin{bmatrix} cP_{i-1,1} + \Delta c_1 \\ cP_{i-1,2} + \Delta c_2 \\ \vdots \\ cP_{i-1,M} + \Delta c_M \end{bmatrix} \quad (6)$$

Với: $cP_{i-1,k}$ minh họa đánh giá tổng cho quá trình tiến triển đến điểm đích $P_{i-1,j}$. Tối thiểu hóa n với hàm đánh giá tối ưu (5) làm đường nối tối ưu đến điểm $P_{i,j}$. Do đó, đường nối phụ có đánh giá tối thiểu từ điểm bắt đầu đến đoạn thứ i được lưu lại.

Phương pháp Fast-marching (FM) [14] xác định đường vân nối tối ưu trong thiết lập kết hợp các giá trị của mạng cảm biến. Thiết lập giải pháp FM bao gồm các yếu tố sau [15]:

1) Không gian trạng thái: $X \subseteq R^2$ (hoặc R^3) nhưng trong phép tính đại số gần đúng, N thay thế bởi lưới điểm N được sử dụng. Do đó, các điểm lưới được chia thành $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ trong miền 3D).

2) Hàm tốc độ: $F: x \rightarrow R^+$. Tại mỗi điểm trong không gian sẽ luôn tương ứng với một tốc độ.

3) Bắt đầu thiết lập đường vân tiến triển $\Gamma \subseteq X$. Tốc độ bắt đầu tại điểm tham chiếu bằng 0.

4) Thiết lập hàm mục tiêu $G \subseteq X$.

5) Hàm thời gian: $T: x \rightarrow R^+$. Thời gian tiến triển đường vân từ điểm khởi tạo đến điểm đích.

6) Lan truyền: Trong mạng lưới điểm, tốc độ tại điểm lưới i, j th được ký hiệu là F_{ij} .

Vấn đề chính là tính toán sự tiến triển đường vân theo thời gian. Giả sử, $\Phi(x,t)$ là khoảng cách nghĩa là $\Phi(x,t = t_1) = d$. Nếu khoảng cách từ điểm x lan truyền tại thời điểm $t = t_1$ là d . Tập hợp điểm trên đường tiến triển tại thời điểm $t = t$ được xác định bởi:

$$\Gamma(t = t_1) = \{x | \phi(x, t = t_1) = 0\} \quad (7)$$

Phương trình của đường vân tiến hóa thu được bằng cách giải phương trình vi phân đã cho như sau:

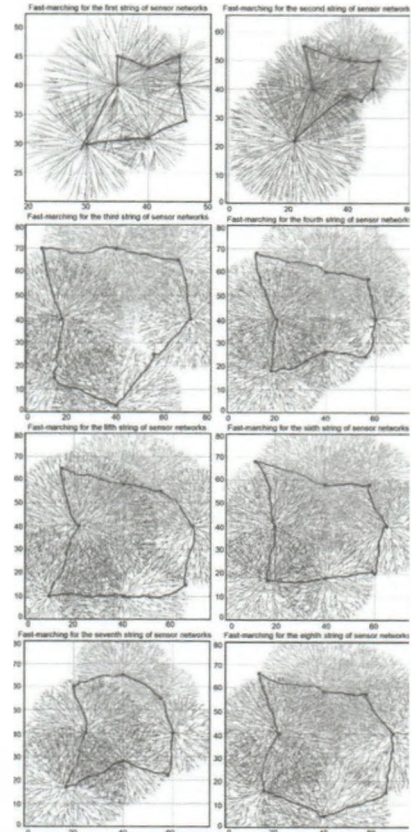
$$\begin{aligned} \phi(x, t = t_1) &= 0, \phi_0(x(t), t = 0) \\ \Rightarrow \phi_1 + \nabla(\phi(x(t), t))x'(t) &= 0 \\ \Rightarrow \phi_1 + F|\nabla(\phi)| \end{aligned} \quad (8)$$

Ta có, $n \approx \nabla(\Phi)/|\nabla(\Phi)|$, đường cong tiến triển đến các điểm với vận tốc F , do những điểm định vị cũng di chuyển cùng vận tốc. Trong không gian đa chiều kết hợp khái niệm độ dốc trực giao với các tập mức của hàm đến $T(\theta)$, chúng ta có thể mô tả chuyển động của mặt trước như là giải pháp theo điều kiện biên. Nếu tốc độ F chỉ phụ thuộc vào vị trí, phương trình Eikonal được xác định như sau:

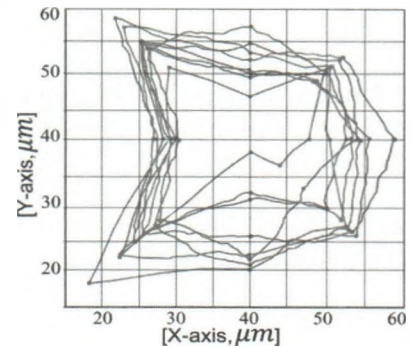
$$|\nabla T|F = 1 \quad (9)$$

4. KẾT QUẢ VÀ ĐÁNH GIÁ

Nhóm nghiên cứu thiết lập hệ thống tổng hợp các lực tác động lên cầu cảng với quá trình hoạt động thực tế khi tàu dịch vụ cập cảng xếp dỡ hàng hóa. Chuỗi dữ liệu mạng cảm biến được thu thập trực tiếp từ cầu cảng đưa đến bộ xử lý trung tâm xử lý với giải pháp FM. Kịch bản thực nghiệm áp dụng giải pháp Fast-marching phân tích sự chuyển vị cầu cảng theo thời gian, dựa trên dữ liệu đo lường của hệ cảm biến đa điểm thiết lập tại các điểm trọng yếu của công trình từ tháng 8/2022 đến tháng 02/2023 (trong 6 tháng) thu thập tập dữ liệu 4.000 mẫu chia thành 8 nhóm lưu trữ (mỗi nhóm khoảng 500 mẫu). Trong mỗi nhóm lưu trữ, nhóm tác giả truy xuất 1 chuỗi dữ liệu ngẫu nhiên theo thời gian cho 8 cảm biến cùng 1 thời gian T (mỗi ngày giám sát thu được 32 chuỗi dữ liệu, chi tiết 8 chuỗi trích xuất dữ liệu thể hiện tại Bảng 4.1).



Hình 4.1: Kết quả thu được trong kịch bản thực nghiệm



Hình 4.2: Biểu đồ giám sát sức khỏe công trình cầu cảng
Bảng 4.1. Chuỗi dữ liệu mạng cảm biến truy xuất ngẫu nhiên từ 8 nhóm lưu trữ

Nhóm	CB 1 mm	CB 2 mm	CB 3 mm	CB 4 mm	CB 5 mm	CB 6 mm	CB 7 mm	CB 8 mm
1	-0,0499	-0,0394	-0,0111	-0,0125	-0,1520	-0,1495	-0,1161	-0,1293
2	-0,0223	-0,2369	-0,1488	-0,0086	-0,0301	-0,0172	0,0106	0,0133
3	-0,0101	0,0086	0,0250	0,0301	-0,0118	0,0169	0,0350	0,0247
4	-0,0199	-0,0067	0,0272	0,0233	-0,0194	0,0003	0,0321	0,0245
5	-0,0074	-0,0001	0,0365	0,0264	-0,0208	-0,0045	0,0306	0,0352
6	-0,0196	-0,0023	0,0301	0,0252	-0,0189	-0,0059	0,0328	0,0282
7	-0,0196	-0,0084	0,0284	0,0238	-0,0206	0,0101	0,0269	0,0255
8	-0,0189	0,0047	0,0304	0,0267	-0,0196	-0,0032	0,0291	0,0350

Kết quả thực nghiệm theo dõi sự chuyển vị công trình cầu cảng dựa trên sự tiến triển của đường cong (minh họa như Hình 4.2) cho thấy giá trị đường nổi biên dạng thẳng chiếm đa số và chỉ xuất hiện 1 đường nổi gấp khúc từ cảm biến 2 đến 3, qua đó đã minh chứng tình trạng sức khỏe công trình biển (cầu cảng) duy trì tình trạng ổn định với sự chuyển vị rất thấp do quá trình hạ thủy hoặc thả neo của tàu từ bên ngoài ảnh hưởng. Khi đường nổi tiến triển với vận tốc F thì những điểm định vị cũng biến đổi cùng vận tốc. Đường nổi các nút cảm biến N tiến triển đều với bán kính hướng tâm không dao động, cho thấy cấu trúc công trình vững chắc trong giới hạn đảm bảo hạn mức an toàn. Bên cạnh đó, việc đánh giá chính xác hư hỏng kịp thời là cần thiết để nhận ra các nguy hại có thể xảy ra cho công trình biển. Rõ ràng, việc phát triển giải pháp quan trắc sức khỏe tổng quan công trình mang lại hiệu quả cao trong việc ngăn ngừa sự phân rã kết cấu có thể gây sự cố. Biểu đồ quan trắc sức khỏe tổng quan cầu cảng được trình bày trên Hình 4.2, biểu thị các đường vận tiến triển theo từng chuỗi giá trị cảm biến không có đường gãy gấp khúc minh chứng kết cấu công trình an toàn trong quá trình khai thác.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã phân tích được tác động của phương tiện neo đậu và yếu tố môi trường lên kết cấu công trình biển. Thiết lập mạng cảm biến đo lường các dạng tác động gây nguy hại đến công trình (rung chấn và nứt gãy) tại các vị trí trọng yếu của cầu cảng, qua đó, các dữ liệu thu được từ mạng cảm biến phân tích với tình trạng sức khỏe tổng thể của công trình. Do tập dữ liệu chỉ mới thu thập trong thời gian 6 tháng nên kết quả thu được chưa mang tính xác thực cao. Kết quả khả thi bước đầu của nghiên cứu là cơ sở để tiến hành mở rộng ứng dụng cho các hệ thống quan trắc sức khỏe công trình biển.

Lời cảm ơn: Bài báo có nội dung là một phần kết quả nghiên cứu thuộc Đề tài cấp Bộ DT223015.

Tài liệu tham khảo

[1]. T. Vivek, R. Durga Prasad (2016), *Analysis and design of marine berthing structure*, Int, Journal of Engineering Research and Application, 6: 46-56.

[2]. Huang, C., Wei, Z. (2019), *Research on Structural Health Monitoring of Seaport Wharf*, In: Yuan, Y., Cui, J., Mang, H.A. (eds) Computational Structural Engineering, Springer, Dordrecht, 1291-1299.

[3]. Jianyun Ying, Xuefeng Xu, Weiyong Shi, Junbiao Zhang, Xuchen Jin (2020), *Coastal engineering study on the impacts of wharf design on hydrodynamic forces in Sansha Bay Geo Spatial environment*, European Journal of Remote Sensing, 53:sup1, 63-72.

[4]. Yonglai Zheng, Ruxue Zhang (2023), *Experimental study on the damage characteristic and assessment of transverse bent frame of high-piled wharf under impact load*, Developments in the Built Environment, 14: 100124.

[5]. Y. Garbatov, M. Tekgoz, C. Guedes Soares (2017), *Experimental and numerical strength assessment of stiffened*

plates subjected to severe non-uniform corrosion degradation and compressive load, Ships and Offshore Structures, 12(4): 461-473.

[6]. Mohammed Abdulaziz (2017), *Study of the vortex-induced vibrations in off-shore structures*, Doctor of Philosophy Institute of Ship Technology, Ocean Engineering and Transport Systems (ISMT) University of Duisburg-essen.

[7]. Mohammad H. H., Alireza L., Kiarash M. D., Ali Akbar G. (2017), *Inverse Vibration Technique for Structural Health Monitoring of Offshore Jacket Platforms*, Applied Ocean Research, 62: 181-198.

[8]. Arellano-Espitia F, Delgado-Prieto M, Martinez-Viol V, Saucedo-Dorantes JJ, Osornio-Rios RA. (2020), *Deep-Learning-Based Methodology for Fault Diagnosis in Electromechanical Systems*, Sensors, 20(14):3949.

[9]. Đặng Xuân Kiên, Đồng Văn Hương, Hồ Lê Anh Hoàng (2021), *Thiết kế hệ thống theo dõi và phát hiện bất thường cho cầu đường bộ dựa trên trí tuệ nhân tạo*, Tạp chí GTVT, số 6, 51-54.

[10]. C. Wang, H. Ma (2011), *Data Collection in Wireless Sensor Networks by Utilizing Multiple Mobile Nodes*, 2011 Seventh International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, Beijing, China, 83-90.

[11]. K. Tsukamoto, H. Ueda, H. Tamura, K. Kawahara, Y. Oie (2009), *Design of Wireless Sensor Network for Multi-Point Surveillance of a Moving Target Based on the Relationship Between Tracking Probability and Sensor Density*, 2009 6th IEEE Consumer Communications and Networking Conference, Las Vegas, NV, USA, 1-5.

[12]. Z. Jiahao, G. Shesheng, L. Guo, X. Juan, Q. Xiaomin, G. Bingbing (2021), *Distributed recursive filtering for multi-sensor networked systems with multi-step sensor delays, missing measurements and correlated noise*, Signal Processing, 181: 107868-107892.

[13]. H. Wang, W. Mao, L. Eriksson (2019), *A Three-Dimensional Dijkstra's algorithm for multi-objective ship voyage optimization*, Ocean Engineering, 186:106131-106146.

[14]. Per-Erik D., Qingfen Lin (2003), *A Modified Fast Marching Method*, Conference: Image Analysis, 13th Scandinavian Conference, SCIA 2003, Halmstad, Sweden, 1154-1161.

[15]. Yuanchang Liu, Richard Bucknall, Xinyu Zhang (2017), *The fast marching method based intelligent navigation of an unmanned surface vehicle*, Ocean Engineering, 142: 363-376.

Ngày nhận bài: 17/3/2023

Ngày chấp nhận đăng: 25/4/2023

**Người phản biện: PGS. TS. Võ Công Phương
PGS. TS. Đồng Văn Hương**