

Ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong quản lý và thi công công trình cầu: Tổng quan và định hướng nghiên cứu

Application of artificial intelligence in bridge construction management: Overview and research directions

> PGS.TS LÊ QUANG HANH

Trường Đại học Giao thông vận tải

Email: hanh1q@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Trong những năm gần đây, trí tuệ nhân tạo (Artificial Intelligence - AI) đã trở thành một trong những công nghệ cốt lõi thúc đẩy chuyển đổi số trong ngành Xây dựng. Đối với các dự án hạ tầng quy mô lớn như công trình cầu, giai đoạn thi công thường đối mặt với nhiều thách thức về quản lý tiến độ, kiểm soát chất lượng, an toàn lao động và tối ưu hóa nguồn lực. Nghiên cứu này tổng quan các hướng ứng dụng chính của AI trong giai đoạn thi công cầu dựa trên các nghiên cứu khoa học quốc tế gần đây. Kết quả cho thấy AI đang được áp dụng chủ yếu trong 5 lĩnh vực chính, bao gồm: (i) Lập kế hoạch và tối ưu hóa tiến độ thi công dựa trên máy học (machine learning); (ii) giám sát tiến độ thi công tự động bằng thị giác máy tính kết hợp camera và UAV; (iii) kiểm soát chất lượng và phát hiện khuyết tật kết cấu bằng các thuật toán học sâu; (iv) dự báo rủi ro và quản lý an toàn lao động trên công trường và (v) tích hợp AI với BIM và Digital Twin để xây dựng hệ thống quản lý thi công thông minh. Các nghiên cứu cho thấy việc ứng dụng AI có tiềm năng nâng cao đáng kể hiệu quả quản lý thi công, cải thiện độ chính xác trong giám sát công trường và giảm thiểu rủi ro trong các dự án cầu. Tuy nhiên, một số thách thức vẫn tồn tại, bao gồm hạn chế về dữ liệu huấn luyện, khả năng tổng quát hóa của mô hình giữa các dự án khác nhau và việc tích hợp AI vào quy trình quản lý xây dựng truyền thống. Nghiên cứu này góp phần hệ thống hóa các xu hướng nghiên cứu hiện nay và đề xuất các định hướng phát triển cho việc ứng dụng AI trong thi công công trình cầu.

Từ khóa: Trí tuệ nhân tạo (AI); quản lý thi công cầu; thị giác máy tính trong xây dựng; bản sao kỹ thuật số cho hạ tầng; mô hình thông tin xây dựng BIM; phân tích an toàn trong xây dựng.

ABSTRACT

In recent years, Artificial Intelligence (AI) has emerged as one of the key enabling technologies driving digital transformation in the construction industry. For large-scale infrastructure projects such as bridges, the construction phase often faces significant challenges related to schedule management, quality control, construction safety and resource optimization. This study provides a comprehensive review of the major applications of AI in the bridge construction phase based on recent international scientific literature. The findings indicate that AI is primarily applied in five key areas: (i) Construction planning and schedule optimization using machine learning techniques; (ii) automated construction progress monitoring through computer vision integrated with cameras and unmanned aerial vehicles (UAVs); (iii) quality control and structural defect detection using deep learning algorithms; (iv) construction safety management and risk prediction on construction sites and (v) the integration of AI with Building

Information Modeling (BIM) and Digital Twin technologies to develop intelligent construction management systems. Existing studies demonstrate that AI applications have significant potential to enhance construction management efficiency, improve the accuracy of site monitoring and mitigate risks in bridge construction projects. However, several challenges remain, including limitations in training data availability, the generalization capability of AI models across different projects and the integration of AI technologies into conventional construction management workflows. This study contributes to systematizing current research trends and proposes future directions for the application of AI in bridge construction engineering.

Keywords: Artificial intelligence (AI); bridge construction management; computer vision in construction; digital twin for infrastructure; BIM-enabled Construction; construction safety analytics; smart infrastructure systems.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngành Xây dựng toàn cầu từ lâu đã đối mặt với nhiều thách thức như năng suất thấp, mức độ không chắc chắn cao và rủi ro an toàn lớn. So với các ngành công nghiệp sản xuất, tốc độ tăng năng suất của ngành Xây dựng trong nhiều thập kỷ qua là rất chậm [1]. Các dự án hạ tầng quy mô lớn như công trình cầu đặc biệt phức tạp do quy mô lớn, quy trình thi công nhiều giai đoạn và yêu cầu an toàn cao.

Trong bối cảnh đó, trí tuệ nhân tạo (AI) đang nổi lên như một công nghệ mang tính chuyển đổi trong lĩnh vực kỹ thuật xây dựng. Thông qua việc tích hợp học máy (Machine Learning), thị giác máy tính (Computer Vision), robot và công nghệ Digital Twin, AI có khả năng cải thiện đáng kể quá trình ra quyết định, tự động hóa và quản lý an toàn trong quá trình thi công cầu.

Các nghiên cứu gần đây cho thấy ứng dụng AI trong thi công cầu chủ yếu tập trung vào 5 lĩnh vực chính:

1. Lập kế hoạch và tối ưu hóa tiến độ thi công
2. Giám sát tiến độ thi công tự động bằng thị giác máy tính
3. Kiểm soát chất lượng và phát hiện khuyết tật
4. Quản lý an toàn và dự báo rủi ro trong thi công
5. Quản lý thi công thông minh dựa trên BIM và Digital Twin

Kết quả của các nghiên cứu cho thấy việc ứng dụng AI có tiềm năng nâng cao đáng kể hiệu quả quản lý thi công, cải thiện độ chính xác trong giám sát công trường và giảm thiểu rủi ro trong các dự án cầu. Tuy nhiên, một số thách thức vẫn tồn tại, bao gồm hạn chế về dữ liệu huấn luyện, khả năng tổng quát hóa của mô hình giữa các dự án khác nhau và việc tích hợp AI vào quy trình quản lý xây dựng truyền thống. Nghiên cứu này góp phần hệ thống hóa các xu hướng nghiên cứu hiện nay và đề xuất các định hướng phát triển cho việc ứng dụng AI trong thi công công trình cầu.

2. ỨNG DỤNG AI TRONG LẬP KẾ HOẠCH VÀ TỐI ƯU TIẾN ĐỘ THI CÔNG

Lập kế hoạch thi công là một trong những nhiệm vụ quan trọng nhất trong các dự án xây dựng cầu. Các phương pháp truyền thống như CPM và PERT chủ yếu dựa vào kinh nghiệm của chuyên gia và dữ liệu lịch sử.

Trong những năm gần đây, các mô hình học máy đã được phát triển nhằm cải thiện việc lập tiến độ thi công bằng cách học các mẫu dữ liệu từ các dự án trước đó.

Điển hình là, Valdebenito và cộng sự (2024) [3] đã đề xuất một hệ thống lập tiến độ thi công dựa trên AI tích hợp với BIM, cho phép tự động tạo tiến độ thi công từ dữ liệu IFC của mô hình BIM. Kết quả cho thấy hệ thống này cải thiện đáng kể độ chính xác so với các phương pháp lập tiến độ truyền thống.

Tương tự, Zhang và cộng sự (2023) [4] đã sử dụng thuật toán học tăng cường (Reinforcement Learning) để tối ưu hóa phân bổ tài

nguyên trong các dự án hạ tầng phức tạp.

Trong thi công cầu, các kỹ thuật này đặc biệt hữu ích cho việc tối ưu hóa các phương pháp thi công như:

- Thi công đúc hẫng cân bằng;
- Thi công đẩy dầm (incremental launching);
- Thi công cầu dây văng;
- Thi công cầu bê tông phân đoạn.

Các phương pháp thi công này có sự phụ thuộc phức tạp giữa các công đoạn, do đó rất phù hợp với các mô hình tối ưu hóa bằng AI.

3. ỨNG DỤNG THỊ GIÁC MÁY TÍNH TRONG GIÁM SÁT TIẾN ĐỘ THI CÔNG CẦU

Thị giác máy tính (Computer Vision) là một trong những lĩnh vực nghiên cứu phát triển mạnh nhất trong ngành tin học xây dựng.

Các hệ thống giám sát thi công hiện đại thường sử dụng camera công trường, drone và UAV để thu thập dữ liệu hình ảnh từ hiện trường. Sau đó, các thuật toán học sâu (Deep Learning) được sử dụng để nhận diện các hoạt động thi công và đánh giá tiến độ dự án.

Yang và cộng sự (2023) [5] đã phát triển một hệ thống nhận dạng thông minh cho giám sát thi công cầu sử dụng mạng nơ-ron tích chập (CNN). Hệ thống có khả năng tự động nhận diện các cấu kiện cầu và ước lượng tiến độ thi công từ dữ liệu ảnh chụp bằng drone.

Golparvar-Fard và cộng sự (2015) [2] là những người tiên phong trong nghiên cứu giám sát tiến độ thi công tự động bằng cách kết hợp thị giác máy tính với mô hình BIM.

Các nghiên cứu gần đây cho thấy hệ thống giám sát dựa trên AI có thể:

- Tự động nhận diện các cấu kiện kết cấu;
- Ước lượng tỷ lệ hoàn thành công việc;
- Phát hiện sự chậm tiến độ.

Các hệ thống này giúp giảm đáng kể nhu cầu kiểm tra hiện trường thủ công.

4. ỨNG DỤNG AI TRONG KIỂM SOÁT CHẤT LƯỢNG THI CÔNG CẦU

Kiểm tra chất lượng là yếu tố quan trọng để đảm bảo an toàn kết cấu trong quá trình thi công cầu.

Theo phương pháp truyền thống, công tác kiểm tra thường được thực hiện bằng quan sát trực tiếp của các kỹ sư. Tuy nhiên, phương pháp này tốn nhiều thời gian và dễ xảy ra sai sót do yếu tố con người.

Các kỹ thuật thị giác máy tính và học sâu hiện nay đã được sử dụng rộng rãi để phát hiện các khuyết tật kết cấu cầu.

Cha và cộng sự (2017) [6] đã phát triển hệ thống phát hiện vết nứt bê tông bằng CNN với độ chính xác cao.

Mostafa và cộng sự (2021) [7] sử dụng hệ thống UAV kết hợp

với học sâu để phát hiện các khuyết tật bề mặt cầu.

Các nghiên cứu gần đây còn kết hợp công nghệ quét laser và photogrammetry với AI để tạo mô hình as-built chính xác của các kết cấu cầu.

Những công nghệ này giúp tự động hóa quá trình kiểm soát chất lượng trong thi công cầu.

5. ỨNG DỤNG AI TRONG QUẢN LÝ AN TOÀN THI CÔNG

An toàn lao động là một trong những vấn đề quan trọng nhất trong thi công cầu.

Các công trình cầu thường có nhiều rủi ro do:

- Làm việc trên cao;
- Nâng hạ cấu kiện nặng;
- Thi công trên sông hoặc biển.

Các nghiên cứu gần đây đã áp dụng AI để giám sát điều kiện an toàn trên công trường.

Fang và cộng sự (2020) [8] đã phát triển hệ thống giám sát an toàn dựa trên thị giác máy tính có khả năng phát hiện các hành vi nguy hiểm của công nhân.

Các nghiên cứu khác sử dụng mô hình học máy để dự báo tai nạn lao động dựa trên dữ liệu an toàn lịch sử.

Các mô hình này có thể xác định các yếu tố rủi ro như:

- Sự mệt mỏi của công nhân;
- Điều kiện làm việc không an toàn;
- Sự cố thiết bị;
- Điều kiện môi trường.

Các hệ thống cảnh báo sớm dựa trên AI có thể giúp giảm đáng kể nguy cơ tai nạn.

6. DIGITAL TWIN VÀ HỆ THỐNG THI CÔNG CẦU THÔNG MINH

Công nghệ Digital Twin gần đây đã trở thành một hướng nghiên cứu quan trọng trong lĩnh vực hạ tầng thông minh.

Digital Twin là bản sao số của một tài sản vật lý được kết nối với dữ liệu thời gian thực từ các hệ thống cảm biến và giám sát.

Trong thi công cầu, Digital Twin có thể tích hợp nhiều nguồn dữ liệu khác nhau như:

- Mô hình BIM;
- Dữ liệu tiến độ thi công;
- Dữ liệu cảm biến;
- Dữ liệu môi trường.

Yishuo và cộng sự (2024) [9], Lu và cộng sự (2020) [10], Wu và cộng sự (2025) [11] đã đề xuất một khung Digital Twin cho quản lý thi công cầu tích hợp BIM và dữ liệu IoT.

Hệ thống cho phép các kỹ sư:

- Theo dõi tiến độ thi công theo thời gian thực;
- Mô phỏng các phương án thi công khác nhau;
- Hỗ trợ ra quyết định trong quản lý dự án.

Digital Twin cũng hỗ trợ dự báo và tối ưu hóa trong các dự án hạ tầng quy mô lớn.

7. THÁCH THỨC VÀ KHOẢNG TRỐNG NGHIÊN CỨU

7.1. Tổng hợp các nghiên cứu tiêu biểu về AI trong thi công công trình cầu

Bảng 1. Bảng tổng hợp các nghiên cứu tiêu biểu về AI trong thi công cầu

Tác giả	Năm	Phương pháp AI	Ứng dụng
Golparvar-Fard	2015	Computer Vision	Giám sát tiến độ
Cha et al.	2017	CNN	Phát hiện vết nứt

Tác giả	Năm	Phương pháp AI	Ứng dụng
Mostafa et al.	2021	UAV + Deep Learning	Kiểm tra cầu
Fang et al.	2020	Deep Learning	Giám sát an toàn
Lu et al.	2020	Digital Twin	Thi công cầu thông minh
Yang et al.	2023	CNN	Giám sát thi công cầu
Zhang et al.	2023	Reinforcement Learning	Tối ưu tiến độ
Valdebenito et al.	2024	AI + BIM	Lập tiến độ tự động

Mặc dù đã có nhiều tiến bộ, việc ứng dụng AI trong thi công cầu vẫn còn nhiều thách thức.

7.2. Thiếu dữ liệu

Các mô hình AI cần lượng dữ liệu lớn để huấn luyện. Tuy nhiên, dữ liệu thi công thường rời rạc và chưa được chuẩn hóa.

7.3. Khả năng tổng quát hóa

Các dự án cầu có thiết kế, môi trường và phương pháp thi công khác nhau. Vì vậy, các mô hình AI được huấn luyện trên một dự án có thể không hoạt động tốt trên dự án khác.

7.4. Tích hợp vào hệ thống quản lý

Nhiều giải pháp AI vẫn ở mức nghiên cứu và chưa được tích hợp đầy đủ vào quy trình quản lý dự án thực tế.

7.5. Tính minh bạch của AI

Trong các dự án hạ tầng quan trọng, các kỹ sư cần các hệ thống AI có khả năng giải thích để hỗ trợ ra quyết định.

8. ĐỀ XUẤT ĐỊNH HƯỚNG NGHIÊN CỨU

Từ tổng quan nghiên cứu và ứng dụng đã được tìm hiểu và phân tích, bài báo đề xuất các định hướng nghiên cứu cụ thể trong tương lai cần tập trung như sau.

8.1. Xây dựng cơ sở dữ liệu thi công chuẩn hóa

Trong bối cảnh chuyển đổi số ngành Xây dựng, đặc biệt đối với lĩnh vực thi công công trình cầu, dữ liệu hiện trường được tạo ra từ nhiều nguồn khác nhau như mô hình BIM, hồ sơ thiết kế, nhật ký thi công, biên bản chất lượng, báo cáo tiến độ và dữ liệu hình ảnh, tuy nhiên vẫn tồn tại ở trạng thái phân tán, không đồng nhất và thiếu chuẩn hóa về cả cấu trúc lẫn ngữ nghĩa. Thực trạng này làm hạn chế khả năng tích hợp, khai thác và đặc biệt là ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong quản lý thi công.

Trên cơ sở đó, hướng nghiên cứu đề xuất tập trung vào việc phát triển một khung chuẩn hóa dữ liệu thi công công trình cầu theo cách tiếp cận tích hợp giữa mô hình thông tin công trình hạ tầng (IFC Bridge), ontology miền và knowledge graph, nhằm xây dựng một cơ sở dữ liệu ngữ nghĩa có khả năng máy hiểu và liên thông.

Trong khung nghiên cứu này, các kỹ thuật AI, đặc biệt là xử lý ngôn ngữ tự nhiên và học máy, được sử dụng để tự động trích xuất, chuẩn hóa và ánh xạ dữ liệu từ các nguồn phi cấu trúc như nhật ký và báo cáo hiện trường vào mô hình dữ liệu chuẩn.

Nghiên cứu không chỉ hướng tới việc nâng cao chất lượng dữ liệu thông qua các tiêu chí như tính đầy đủ, tính nhất quán và khả năng truy vết, mà còn tạo nền tảng cho các ứng dụng nâng cao như phát hiện bất thường, dự báo tiến độ, kiểm soát chất lượng và hỗ trợ ra quyết định trong thi công cầu.

Với cách tiếp cận này, AI không được xem là công cụ độc lập, mà là thành phần trong một hệ sinh thái dữ liệu gồm chuẩn BIM, ontology và knowledge graph, qua đó góp phần hình thành một môi trường dữ liệu chung có ngữ nghĩa, phục vụ hiệu quả cho quản

lý thi công thông minh và phát triển bền vững trong lĩnh vực hạ tầng giao thông.

8.2. Tích hợp AI với BIM và Digital Twin

Sự tích hợp giữa trí tuệ nhân tạo (AI), mô hình thông tin công trình (BIM) và Digital Twin đang mở ra một hướng tiếp cận mới trong quản lý xây dựng, cho phép chuyển từ quản lý dựa trên dữ liệu tĩnh sang hệ thống thông minh dựa trên dữ liệu thời gian thực.

Tuy nhiên, quá trình tích hợp này vẫn gặp nhiều thách thức do sự không đồng nhất về cấu trúc và ngữ nghĩa dữ liệu, cũng như hạn chế trong việc đồng bộ giữa mô hình thiết kế và trạng thái thực tế của công trình. Nghiên cứu này đề xuất một khung tích hợp AI-BIM-Digital Twin, trong đó BIM cung cấp nền tảng dữ liệu kỹ thuật, Digital Twin phản ánh trạng thái vận hành động của công trình và AI đóng vai trò xử lý, phân tích và hỗ trợ ra quyết định.

Việc kết hợp các kỹ thuật AI với các mô hình ngữ nghĩa như ontology và knowledge graph cho phép nâng cao chất lượng dữ liệu, tăng cường khả năng liên thông và khai thác thông tin, đồng thời hỗ trợ các ứng dụng như dự báo tiến độ, phát hiện bất thường và tối ưu hóa nguồn lực. Cách tiếp cận này góp phần xây dựng nền tảng cho các hệ thống quản lý xây dựng thông minh, hướng tới phát triển hạ tầng số hóa và bền vững.

8.3. Phát triển robot thi công cầu thông minh

Sự phát triển của công nghệ robot và trí tuệ nhân tạo đang tạo ra những thay đổi căn bản trong lĩnh vực thi công công trình cầu, đặc biệt trong bối cảnh yêu cầu ngày càng cao về an toàn, chất lượng và hiệu quả thi công. Tuy nhiên, việc ứng dụng robot trong thi công cầu vẫn còn hạn chế do môi trường làm việc phức tạp, điều kiện địa hình đa dạng và thiếu các hệ thống điều khiển thông minh có khả năng thích ứng theo thời gian thực.

Nghiên cứu này đề xuất định hướng phát triển robot thi công cầu thông minh dựa trên sự tích hợp giữa AI, hệ thống cảm biến và mô hình số công trình, cho phép robot thực hiện các nhiệm vụ như lắp dựng, đổ bê tông, kiểm tra chất lượng và giám sát hiện trường với mức độ tự động hóa cao.

Trong đó, AI đóng vai trò xử lý dữ liệu cảm biến, nhận diện môi trường và tối ưu hóa hành vi điều khiển, giúp robot thích ứng với điều kiện thi công thực tế. Đồng thời, việc kết nối với các nền tảng số như BIM và Digital Twin cho phép đồng bộ giữa kế hoạch thi công và trạng thái thực tế, qua đó nâng cao hiệu quả điều phối và kiểm soát.

Kết quả kỳ vọng là một hệ thống robot có khả năng hoạt động an toàn, chính xác và linh hoạt, góp phần thúc đẩy tự động hóa trong thi công cầu và hướng tới xây dựng thông minh, bền vững.

8.4. Hệ thống giám sát thi công tự động

Hệ thống giám sát thi công tự động đang trở thành một thành phần quan trọng trong quá trình chuyển đổi số ngành Xây dựng, đặc biệt đối với các công trình cầu có quy mô lớn và điều kiện thi công phức tạp. Tuy nhiên, các phương pháp giám sát truyền thống chủ yếu dựa vào quan sát thủ công và báo cáo định kỳ, dẫn đến độ trễ thông tin, thiếu tính liên tục và khó phát hiện kịp thời các sai lệch trong quá trình thi công.

Nghiên cứu này đề xuất phát triển một hệ thống giám sát thi công tự động dựa trên sự tích hợp giữa cảm biến, thị giác máy tính và trí tuệ nhân tạo, cho phép thu thập, phân tích và đánh giá dữ liệu hiện trường theo thời gian thực. Hệ thống có khả năng nhận diện trạng thái thi công, theo dõi tiến độ, phát hiện bất thường và hỗ trợ kiểm soát chất lượng thông qua việc xử lý dữ liệu từ hình ảnh, video và các thiết bị đo lường.

Đồng thời, việc kết nối với các nền tảng số như BIM và Digital Twin giúp đồng bộ giữa kế hoạch và thực tế thi công, qua đó nâng cao tính minh bạch và khả năng ra quyết định. Cách tiếp cận này

góp phần xây dựng một môi trường thi công thông minh, an toàn và hiệu quả, đáp ứng yêu cầu ngày càng cao của các dự án hạ tầng hiện đại.

8.5. Hệ thống hỗ trợ ra quyết định thông minh cho quản lý hạ tầng

Trong bối cảnh phát triển hạ tầng quy mô lớn và yêu cầu quản lý ngày càng phức tạp, việc ra quyết định hiệu quả đòi hỏi sự tích hợp và khai thác đồng thời nhiều nguồn dữ liệu khác nhau. Tuy nhiên, các hệ thống quản lý truyền thống thường thiếu khả năng phân tích tổng hợp và hỗ trợ ra quyết định theo thời gian thực, dẫn đến việc phản ứng chậm trước các biến động trong quá trình vận hành và bảo trì công trình.

Nghiên cứu này đề xuất phát triển một hệ thống hỗ trợ ra quyết định thông minh cho quản lý hạ tầng dựa trên sự tích hợp giữa trí tuệ nhân tạo, mô hình dữ liệu ngữ nghĩa và các nền tảng số như BIM và Digital Twin. Hệ thống cho phép thu thập, chuẩn hóa và phân tích dữ liệu từ nhiều nguồn, bao gồm dữ liệu vận hành, bảo trì, cảm biến và lịch sử công trình, từ đó cung cấp các khuyến nghị tối ưu về bảo trì, phân bổ nguồn lực và quản lý rủi ro.

Việc áp dụng các mô hình học máy và suy luận trên knowledge graph - đồ thị tri thức giúp nâng cao khả năng dự báo, phát hiện bất thường và đánh giá kịch bản, hỗ trợ người quản lý đưa ra quyết định kịp thời và chính xác. Cách tiếp cận này góp phần xây dựng hệ thống quản lý hạ tầng thông minh, hướng tới tối ưu hóa chi phí vòng đời và đảm bảo tính bền vững của công trình.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Barbosa, F. et al. Executive Summary-Reinventing Construction through a Productivity Revolution. McKinsey Global Institute, February 2017.
- [2] Golparvar-Fard, M., Peña-Mora, F., & Savarese, S. Automated progress monitoring using computer vision. Automation in Construction, 2015.
- [3] Valdebenito, R. and Eric Forcael. Integrating Artificial Intelligence and BIM in Construction: Systematic Review and Quantitative Comparative Analysis. Applied Science, 5(23):12470, November 2025.
- [4] Y Zhang, X Li, Y Teng, Q Shen, S Bai. A Reinforcement Learning Framework for Maximizing the Net Present Value of Stochastic Multi-work Packages Project Scheduling Problem. International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate, 2023.
- [5] H Yang and M Xia. Advancing bridge construction monitoring: AI-based building information modeling for intelligent structural damage recognition. Applied Artificial Intelligence, Taylor & Francis, 2023.
- [6] Cha, Y.J., Choi, W. and Büyükköztürk, O. Deep Learning-Based Crack Damage Detection Using Convolutional Neural Networks. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 32, 361-378, 2017.
- [7] Mostafa Aliyari, Enrique López Drogue and Yonas Zewdu Ayele. UAV-Based Bridge Inspection via Transfer Learning. Sustainability, Published by MDPI, Online ISSN: 2071-1050, 13(20):11359, October 2021.
- [8] Fang, Q., Li, H., Luo, X. Computer vision for behaviour-based safety in construction: A review and future directions. Advanced Engineering Informatics, vol. 43, 100980, January 2020.
- [9] Yishuo Jiang, Shuaiming Su, Shuxuan Zhao, Ray Y. Zhong, Waishan Qiu, Miroslaw, J. Skibniewski, Ioannis Brilakis, George, Q. Huang. Digital twin-enabled synchronized construction management: A roadmap from construction 4.0 towards future prospect. Developments in the Built Environment, vol. 19, 100512, October 2024.
- [10] Q Lu, X Xie, AK Parlikad, JM Schooling. Digital twin-enabled anomaly detection for built asset monitoring in operation and maintenance. Automation in Construction, 2020.
- [11] Yuxing Wu, Zhou Li. Digital twin-enabled BIM-blockchain integration for automated and transparent construction progress payments Developments in the Built Environment, vol. 24, 100781, December 2025.
- [12] Abdul Raheman Mohammed. Smart Construction Management Using AI. International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering, vol. 12, Issue 11, November 2024.