Ứng dụng trí tuệ nhân tạo và thiết bị bay không người lái trong giám sát, kiểm tra và bảo trì kết cấu cầu. Ảnh: ST.

Ứng dụng thiết bị bay không người lái tích hợp trí tuệ nhân tạo trong kiểm tra, giám sát cầu tại Việt Nam:

Hướng tiếp cận số hóa và quản lý vòng đời công trình

Lương Xuân Chiểu, Ngô Thanh Bình

Trường Đại học Giao thông Vận tải

Trong bối cảnh nhiều công trình cầu tại Việt Nam đã và đang bước vào giai đoạn khai thác dài hạn, chịu áp lực lớn từ gia tăng lưu lượng giao thông và tác động của điều kiện môi trường, yêu cầu nâng cao chất lượng công tác kiểm tra, giám sát an toàn kết cấu ngày càng trở nên cấp thiết. Các phương pháp kiểm tra truyền thống dựa chủ yếu vào lao động thủ công không chỉ tốn kém, tiềm ẩn rủi ro mất an toàn mà còn khó đáp ứng yêu cầu theo dõi liên tục và quản lý dữ liệu dài hạn. Việc ứng dụng thiết bị bay không người lái (UAV) tích hợp trí tuệ nhân tạo (AI) trong kiểm tra cầu vì vậy không chỉ là giải pháp công nghệ mang tính hỗ trợ, mà đã trở thành nhu cầu tất yếu nhằm hiện đại hóa công tác quản lý hạ tầng giao thông, nâng cao hiệu quả, độ chính xác và an toàn, đồng thời tạo nền tảng cho chuyển đổi số và quản lý vòng đời công trình theo hướng bền vững.

Yêu cầu thực tiễn đối với công tác kiểm tra, giám sát cầu

Hệ thống kết cấu hạ tầng giao thông đường bộ, đặc biệt là các công trình cầu, giữ vai trò then chốt trong bảo đảm kết nối vùng, thúc đẩy phát triển kinh tế - xã hội và bảo đảm an ninh, an toàn giao thông quốc gia. Tại Việt Nam, cùng với quá trình đô thị hóa nhanh và sự gia tăng mạnh mẽ của lưu lượng phương tiện, nhiều công trình cầu đã và đang phải khai thác vượt quá cường độ thiết kế ban đầu. Không ít cầu được xây dựng từ nhiều thập kỷ trước, đến nay đã bước sang giai đoạn khai thác dài hạn, tiềm ẩn nguy cơ xuống cấp kết cấu nếu không được theo dõi, đánh giá kịp thời.

Trong thực tiễn, công tác kiểm tra cầu hiện nay vẫn chủ yếu dựa trên các phương pháp truyền thống như sử dụng dàn giáo, xe nâng chuyên dụng hoặc tiếp cận trực tiếp bằng con người. Các phương pháp này tuy đã được chuẩn hóa về mặt quy trình nhưng bộc lộ nhiều hạn chế: Chi phí lớn, thời gian triển khai kéo dài, ảnh hưởng đến tổ chức giao thông và đặc biệt là tiềm ẩn rủi ro mất an toàn lao động. Bên cạnh đó, dữ liệu kiểm tra thường mang tính rời rạc, khó tích hợp, chưa đáp ứng yêu cầu quản lý xuyên suốt vòng đời công trình trong bối cảnh chuyển đổi số.

Trước yêu cầu hiện đại hóa công tác quản lý hạ tầng giao thông và phù hợp với định hướng chuyển đổi số ngành giao thông vận tải, việc nghiên cứu và ứng dụng các giải pháp công nghệ mới, trong đó nổi bật là nền tảng UAV tích hợp AI đang trở thành một hướng đi có tính tất yếu. Đây không chỉ là xu thế quốc tế mà còn phù hợp với điều kiện thực tiễn của Việt Nam trong việc nâng cao hiệu quả quản lý, giảm chi phí và bảo đảm an toàn.

Làm chủ công nghệ và thiết bị

UAV khi được tích hợp với các thuật toán AI, đặc biệt là thị giác máy tính và học sâu, cho phép thực hiện thu thập, xử lý và phân tích dữ liệu hiện trạng công trình một cách tự động, chính xác và liên tục. Thay vì phụ thuộc hoàn toàn vào đánh giá cảm quan của con người, hệ thống UAV-AI có thể hỗ trợ kỹ sư kiểm định nhận diện sớm các dấu hiệu hư hỏng kết cấu, từ đó đưa ra các quyết định bảo trì, sửa chữa kịp thời.

Hệ thống UAV-AI kiểm tra cầu được thiết kế theo kiến trúc nhiều lớp, bảo đảm tính mở rộng, khả năng tích hợp và dễ dàng nâng cấp trong tương lai. Cấu trúc tổng thể bao gồm ba lớp chính.

Lớp thứ nhất là lớp phương tiện tự hành, bao gồm các UAV cất hạ cánh thẳng đứng (VTOL) phục vụ kiểm tra bề mặt trên, thân trụ, dầm và các khu vực khó tiếp cận từ mặt đất.

Lớp thứ hai là lớp cảm biến và AI biên (Edge-AI). Tại lớp này, các cảm biến hình ảnh độ phân giải cao, camera thị giác - nhiệt và các thiết bị đo hỗ trợ được tích hợp trực tiếp trên phương tiện. Dữ liệu thu thập được xử lý sơ bộ ngay tại biên bằng các máy tính nhúng AI, cho phép phát hiện nhanh các khuyết tật bề mặt như vết nứt, bong tróc, thấm nước hoặc biến dạng cục bộ, đồng thời giảm tải cho hệ thống truyền dữ liệu về trung tâm.

Lớp thứ ba là lớp điều hành và giám sát, thường được triển khai dưới dạng trạm điều khiển mặt đất tích hợp AI (GCS-AI). Lớp này cho phép hiển thị trực quan dữ liệu kiểm tra, thực hiện đo đạc, lưu trữ, so sánh dữ liệu theo thời gian và hỗ trợ kỹ sư đưa ra đánh giá tổng hợp về tình trạng kết cấu công trình.

Cách tiếp cận phân lớp giúp hệ thống có thể triển khai linh hoạt tại các khu vực đô thị đông đúc, trên các cầu vượt sông lớn hoặc trong điều kiện giao thông phức tạp, đồng thời tạo nền tảng cho việc mở rộng các chức năng thông minh trong tương lai.

Một trong những thách thức lớn đối với việc ứng dụng UAV trong kiểm tra công trình hạ tầng quy mô

lớn là bài toán năng lượng và thời gian bay. Các UAV sử dụng pin truyền thống thường bị giới hạn về tầm hoạt động và thời gian làm việc, đặc biệt khi phải bay treo lâu tại các vị trí cần quan sát chi tiết.

Nhằm khắc phục các nhược điểm trên, chúng tôi đã đề xuất và thử nghiệm giải pháp UAV-VTOL sử dụng nguồn năng lượng lai, kết hợp giữa pin LiPo và động cơ xăng, đồng thời định hướng phát triển các cấu hình sử dụng pin nhiên liệu hydro (hydrogen fuel cell) thông qua hợp tác với các đối tác trong và ngoài nước. Trong mô hình này, pin nhiên liệu đảm nhiệm cung cấp công suất ổn định cho giai đoạn bay hành trình, trong khi pin phụ trợ đảm nhận vai trò bù công suất đỉnh khi cất - hạ cánh thẳng đứng hoặc bay treo tại các khu vực có nhiễu động mạnh.

Giải pháp năng lượng lai không chỉ giúp kéo dài đáng kể thời gian bay mà còn mở rộng phạm vi hoạt động ngoài tầm nhìn trực tiếp (BVLOS), nâng cao độ tin cậy của hệ thống khi thực hiện các nhiệm vụ kiểm tra cầu quy mô lớn. Đây là một hướng tiếp cận phù hợp với xu thế phát triển UAV công nghiệp hiện nay và có tiềm năng ứng dụng rộng rãi tại Việt Nam.

Không chỉ dừng lại ở việc nhận diện, các thuật toán AI còn được thiết kế để ước lượng sai số đo và đánh giá độ tin cậy của kết quả phát hiện, giúp kỹ sư kiểm định có thêm cơ sở khoa học trong quá trình ra quyết định. Dữ liệu được gắn tọa độ không gian và thời gian, cho phép theo dõi sự phát triển của hư hỏng qua nhiều chu kỳ kiểm tra.

Kết quả thực nghiệm tại một số công trình cầu trên địa bàn Hà Nội cho thấy, hệ thống đạt độ tin cậy cao trong phát hiện vết nứt, với sai số đo đạc ở mức nhỏ, đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật của công tác kiểm định hiện trường. Điều này khẳng định tiềm năng ứng dụng thực tế của AI trong lĩnh vực quản lý hạ tầng giao thông.

Hiệu quả kinh tế - kỹ thuật mang lại

So với phương pháp kiểm tra cầu truyền thống, giải pháp UAV-AI mang lại nhiều lợi ích rõ rệt cả về kinh tế lẫn kỹ thuật. Trước hết, thời gian và chi phí kiểm tra được giảm đáng kể nhờ hạn chế nhu cầu lắp đặt dàn giáo, huy động thiết bị nặng và nhân lực lớn. Thứ hai, việc giảm thiểu can thiệp trực tiếp vào công trình giúp hạn chế ảnh hưởng đến khai thác giao thông, đặc biệt tại các tuyến huyết mạch.

Quan trọng hơn, giải pháp này góp phần nâng cao mức độ an toàn cho lực lượng kiểm định, đồng thời tạo lập cơ sở dữ liệu số hóa phục vụ công tác quản lý vòng đời công trình. Dữ liệu kiểm tra được lưu trữ có hệ thống, dễ dàng truy xuất và phân tích, tạo tiền đề cho việc áp dụng các mô hình quản lý hiện đại dựa trên dữ liệu.

Trong tương lai, nhóm nghiên cứu định hướng phát triển hệ thống theo hướng xây dựng bản sao số (Digital Twin) cho công trình cầu. Cách tiếp cận này phù hợp với chiến lược chuyển đổi số ngành giao thông vận tải, đồng thời đóng góp vào mục tiêu phát triển bền vững, sử dụng hiệu quả nguồn lực và kéo dài tuổi thọ công trình hạ tầng.

Việc ứng dụng UAV tích hợp AI trong kiểm tra, giám sát cầu tại Việt Nam là một hướng đi có cơ sở khoa học và thực tiễn rõ ràng. Giải pháp không chỉ góp phần nâng cao hiệu quả, an toàn và tính minh bạch trong công tác kiểm định mà còn mở ra khả năng xây dựng các hệ thống quản lý hạ tầng thông minh dựa trên dữ liệu. Trong bối cảnh chuyển đổi số quốc gia, đây là một trong những lĩnh vực ứng dụng công nghệ cao có tiềm năng lớn, cần được tiếp tục nghiên cứu, hoàn thiện và nhân rộng trong thời gian tới ✍