

Kiểm soát an toàn công tác lắp đặt hệ mặt dựng bằng phương pháp lai ghép trí tuệ nhân tạo

Safety control of façade system installation using hybrid artificial intelligence method

> PGS.TS TRẦN ĐỨC HỌC¹, THS PHẠM ĐỨC THẮNG¹, KS NGUYỄN VIỆT THÀNH VINH²

¹GV Khoa Kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Bách khoa - Đại học Quốc gia TP.HCM

Email: tdhoc@hcmut.edu.vn; thang.bmkt@hcmut.edu.vn

²HVCH Khoa Kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Bách khoa - Đại học Quốc gia TP.HCM

Email: thanhvinhcek14@gmail.com

TÓM TẮT

Hiện tượng ngã trên cao thường là nguyên nhân chính gây thương tích và tử vong trong thi công xây dựng. Mặc dù người lao động đã nhận thức được những nguy hiểm liên quan đến việc không đeo dây an toàn, nhưng nhiều người lại quên hoặc cố tình không đeo khi làm việc trên cao. Thiết bị bảo vệ cá nhân (Personal Protective Equipment - PPE) phù hợp được nêu trong các quy tắc an toàn được sử dụng rộng rãi để đảm bảo an toàn cho người lao động. Việc đào tạo được cho là có hiệu quả trong việc giảm thiểu hành vi chấp nhận rủi ro và cải thiện cách làm việc của công nhân tại công trường xây dựng. Tuy nhiên, công tác huấn luyện về an toàn lao động bằng hình thức giám sát trực tiếp vẫn còn những hạn chế. Nghiên cứu này đã sử dụng thuật toán mới YOLOv8 "Bạn chỉ nhìn một lần" (You only look once - YOLO), bao gồm 5 biến thể của nó bao gồm YOLOv8n, YOLOv8s, YOLOv8m, YOLOv8l, YOLOv8x, để kiểm tra an toàn trong quá trình thi công lắp đặt hệ mặt dựng. Một bộ dữ liệu bao gồm 10978 hình ảnh được tìm kiếm và thu thập để thiết lập một hệ thống giám sát an toàn kỹ thuật số thông qua các giai đoạn huấn luyện và kiểm tra. Thuật toán YOLOv8 có tốc độ phát hiện trung bình có thể lên đến 136 khung hình trên mỗi giây, đáp ứng yêu cầu phát hiện đối tượng tiệm cận với thời gian thực tế nhất. Nghiên cứu này cung cấp giải pháp tối ưu khi mô hình sẽ được lưu trữ trên máy chủ đám mây và thông báo tự động đến người quản lý.

Từ khóa: An toàn lao động; trí tuệ nhân tạo; hệ mặt dựng.

ABSTRACT

Fall from height is often the main cause of injury and death in construction site. Although workers are aware of the dangers related to not wearing safety harnesses, many people forget or intentionally do not wear them when working at heights. Personal Protective Equipment (PPE) that complies with safety regulations is widely used to ensure worker safety. Training is considered effective in reducing risk-taking behaviors and improving the working practices of construction workers. However, direct supervision for occupational safety training still has limitations. This study utilized the new YOLOv8 algorithm "You only look once" (YOLO), which includes 5 variations of it including YOLOv8n, YOLOv8s, YOLOv8m, YOLOv8l, YOLOv8x, to ensure safety during the installation and construction of the facade system. A dataset consisting of 10978 images was searched and collected to establish a digital safety monitoring system through training and testing phases. The YOLOv8 algorithm has an average detection speed of up to 136 frames per second, meeting the requirement for real-time object detection. This study provides an optimal solution when the model will be stored on a cloud server and automatically notifies the manager.

Từ khóa: Safety; artificial intelligence; facade system.

1. GIỚI THIỆU

Trong vài thập kỷ qua, hệ mặt dựng sử dụng kính như một loại tường đương đại mới, tích hợp hữu cơ thẩm mỹ kiến trúc và tiết kiệm năng lượng và đóng một vai trò quan trọng trong các tòa nhà hiện đại [1]. Sự ra đời của các hệ thống mặt dựng tiên tiến do tiến bộ công nghệ - lắp đặt các mô đun đã mở ra một chương mới trong quá trình định hình kiến trúc của tòa nhà cũng như tạo điều kiện để thực thi những ý tưởng táo bạo mang đến những biểu tượng mới cho thế giới hiện đại ngày

nay. Hệ thống mặt dựng thuộc các công trình cao tầng được lắp đặt và vận chuyển trên cao gây ra hàng loạt những rủi ro cho nhà thầu trong quá trình thi công cũng như việc vận chuyển linh kiện đến vị trí đã được định hình từ trước. Thực tế cho thấy đang có rất nhiều vụ tai nạn lao động xảy ra trong ngành xây dựng, hiện trạng đó không chỉ lấy đi sinh mạng quý giá của công người và giảm chất lượng cuộc sống mà còn gây chậm trễ trong ngành xây dựng và là gánh nặng tài chính cho người sử dụng lao động và người lao động [2].

Ngành Xây dựng là một trong những ngành có tỷ lệ tử vong và thương tích cao nhất so với các ngành khác [3]. Mặc dù ngành xây dựng đã cho thấy những cải thiện đáng kể về hiệu suất an toàn trong nhiều năm qua, nhưng té ngã vẫn là nguyên nhân hàng đầu gây tử vong và thương tích nghiêm trọng [4]. Trên toàn thế giới, ít nhất 108.000 công nhân thiệt mạng tại các công trường mỗi năm, con số này chiếm khoảng 30% tổng số tai nạn lao động gây tử vong [5]. Trong đó, 535 (30,1%) tai nạn lao động gây tử vong đối với công nhân tại Hàn Quốc từ năm 2011 đến năm 2017; 854 (18,2%) tại Mỹ từ năm 2011 đến năm 2014 và 315 (32,8%) tại Nhật Bản từ năm 2015 đến năm 2017 [6]. Những con số thống kê đã chỉ ra được mức độ nghiêm trọng về hiện trạng những tai nạn hy hữu trong quá trình xây dựng, tuy nhiên vẫn còn tồn đọng những người lao động có ý thức kém và đưa ra những lý do cho việc không tuân thủ các quy tắc về an toàn lao động được cho là do sự khó chịu khi đeo dây bảo hộ và những hạn chế mà nó gây ra khi di chuyển [7].

Một số nhà nghiên cứu đã đề xuất các phương pháp tự động phát hiện phương tiện bảo vệ cá nhân nhằm nâng cao chất lượng công việc kiểm định an toàn và giải quyết các vấn đề liên quan đến thương tích do té ngã [8-10]. Thông thường, camera giám sát công trường đóng vai trò như một khung và các phương pháp tiếp cận dựa trên tầm nhìn thực hiện phát hiện đội mũ bảo hiểm thông qua một số giai đoạn, chủ yếu bao gồm nhận dạng chuyển động của con người và định vị mũ bảo hộ [11]. Tuy nhiên, trong quá trình thi công lắp đặt hệ mặt dựng luôn đòi hỏi người lao động cần trang bị các thiết bị chuyên dụng như áo chống rơi toàn thân, dây giảm chấn và giày bảo hộ để đảm bảo an toàn.

Trong những năm gần đây, khái niệm học sâu (Deep Learning), học từ nhiều đặc trưng của đối tượng đang là chủ đề nóng trong vấn đề trí tuệ nhân tạo. Một cuộc tìm kiếm dữ liệu mở rộng đã được tiến hành để xác định các vật thể được áp dụng ứng dụng học sâu hiện có trong ngành xây dựng [12]. Hàng loạt những mô hình ứng dụng học sâu đã và đang được phát triển, cung cấp các giải pháp phân tích dự báo với tốc độ xử lý các lớp trong hình ảnh nhanh [13]. Qua đó, dễ dàng phát hiện đối tượng, tránh nhầm lẫn các vật thể trong không gian phức tạp khó nắm bắt [14]. Hiện nay, khi nhắc đến mô hình phát hiện đối tượng (Object Detection) dựa trên ứng dụng học sâu, thuật toán phổ biến nhất có thể kể đến là mạng nơ ron phân tích chập dựa trên vùng (R-CNN, Faster-RCNN,...). Nhưng biến thể tối ưu hơn của nó hiện nay bao gồm máy ảnh dò một lần (Single Shot Detector) và bạn chỉ nhìn một lần (You Only Look Once) đã chứng minh được sự vượt trội hơn về thời gian xử lý. Trong đó thuật toán YOLO đạt được kết quả tốt nhất dựa trên các chỉ số về độ chính xác trung bình (mAP) và tốc độ khung hình (FPS) [15].

2. CÁC NGHIÊN CỨU LIÊN QUAN TRƯỚC ĐÂY

Căn cứ vào các khả năng gây tác động nghiêm trọng cho người lao động khi thi công trên cao, các biện pháp ngăn ngừa và giảm thiểu mức độ ảnh hưởng của thương tích có thể được phân loại thành 2 thành phần: chủ động hoặc bị động [16]. Các biện pháp có tính chất thụ động được dựa trên việc phân tích dữ liệu tan nạn té ngã để phát triển các chiến lược phòng ngừa trong tương lai. Ví dụ, xác định những yếu tố góp phần gây ra tai nạn chết người từ các báo cáo TNLĐ và thu thập dữ liệu từ các cuộc kiểm tra an toàn thường xuyên [17]. Tuy nhiên vẫn còn nhiều hạn chế về thời gian và phương án ứng cứu kịp thời do chỉ dựa trên các dự án và một vài trường hợp nhất định.

Các chiến lược chủ động bao gồm các biện pháp phòng ngừa vào đào tạo và giáo dục an toàn. Ví dụ cụ thể: thực hiện các

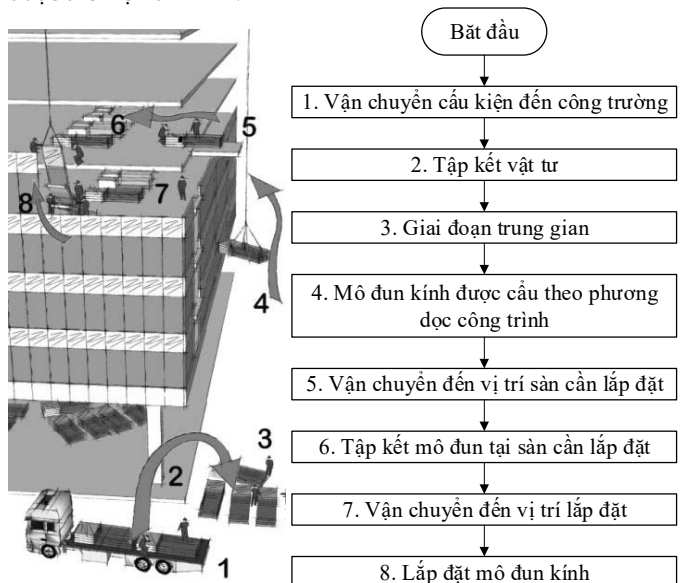
chương trình huấn luyện chống rơi ngã qua một thử nghiệm đã được thiết kế và tiến hành để thu thập dữ liệu qua đó có thể đo lường nguy cơ té ngã trong các tình huống khác nhau của công nhận xây dựng [16]. Gần đây, các phương pháp dựa trên tầm nhìn đã thu hút được sự quan tâm đáng kể của các nhà nghiên cứu. Các kỹ thuật phát hiện dựa trên tầm nhìn có thể quan sát nhiều đối tượng trong quá trình thi công tại các địa điểm công trường một cách toàn diện, chính xác và nhanh chóng [18]. Mneymneh, et al. [19] thu thập bộ dữ liệu được lấy từ các video ghi lại trên công trường, qua đó đã tạo ra một khung tích hợp để phát hiện việc đội mũ bảo hộ của người lao động dựa trên thị giác máy tính. Wu, et al. [20] đã xây dựng bộ dữ liệu điểm chuẩn phát hiện mũ bảo hộ dựa trên mô hình máy dò một lần (Single Shot Detector) để dự đoán và kiểm tra. Hệ thống này có hiệu quả trong tất cả mọi điều kiện và độ chính xác trung bình (mAP) lên đến 83,89%.

Cùng với sự phát triển vượt bậc của ngành công nghiệp trí tuệ nhân tạo trong những năm gần đây, đã có sự gia tăng đáng kể về tốc độ xử lý và độ chính xác của các thuật toán để huấn luyện các mô hình học sâu. Hàng loạt phương pháp phát hiện đối tượng bạn chỉ nhìn một lần (YOLO) đang dần trở nên hiệu quả và chính xác để trở thành mô hình chính để kiểm tra an toàn. Redmon, et al. [14] lần đầu tiên giới thiệu và đưa ra các thông số đáng kinh ngạc khả năng xử lý và tốc độ của mô hình YOLO so với các mô hình phân tích chập tiên nhiệm bao gồm DPM và R-CNN. Đã có rất nhiều các biến thể của YOLO ra đời qua các nghiên cứu của Nain, et al. [21], Wang, et al. [22], Li, et al. [23] đều đã đề xuất các giải pháp phát hiện mũ bảo hộ với kết quả chính xác cao và tiệm cận với thời gian thực.

Theo các nghiên cứu đã nói ở trên, phân tích dữ liệu bằng phương pháp giám sát dựa trên tầm nhìn hiệu quả trong việc giám sát các hành vi an toàn lao động trong quá trình thi công. Tuy nhiên với rủi ro tai nạn lao động nghiêm trọng trong quá trình thi công trên cao, người lao động cần đặc biệt tuân thủ yêu cầu về các trang bị bảo hộ chuyên dụng. Do đó, nghiên cứu này tiếp tục sử dụng thuật toán You Only Look Once mới được cải tiến để chủ động kiểm soát an toàn với tính năng nhận diện các thiết bị bảo hộ lao động hoàn chỉnh.

3. MÔ TẢ QUY TRÌNH LẮP ĐẶT HỆ MẶT DỰNG

Các tiêu chí kỹ thuật dựa trên nghiên cứu của Friblick, et al. [24] được thể hiện ở Hình 1.

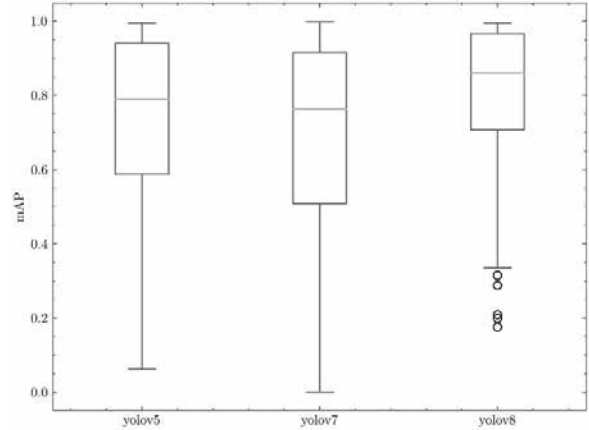


Hình 1. Quy trình lắp đặt hệ mặt dựng điển hình

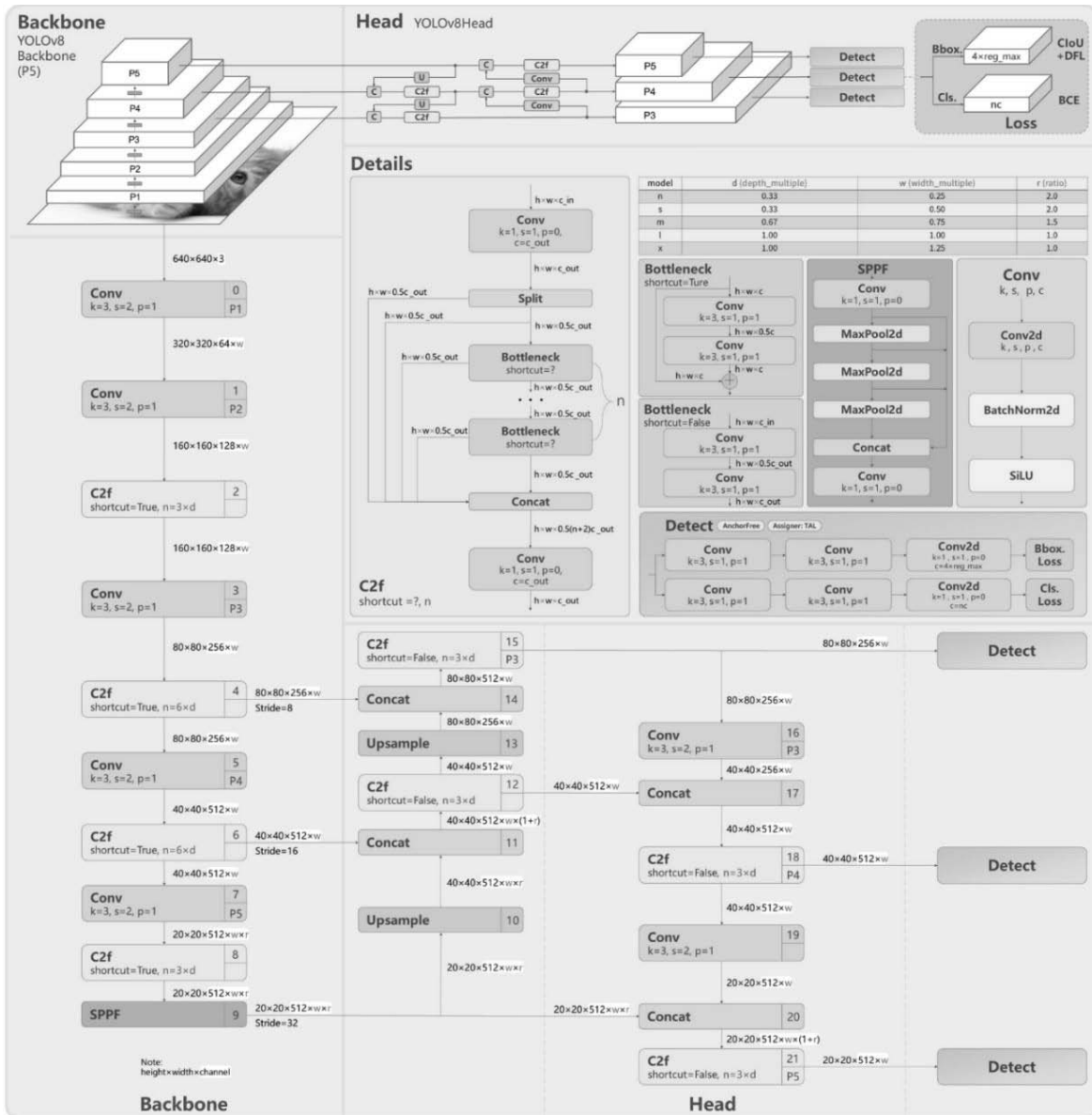
4. PHƯƠNG PHÁP ĐỀ XUẤT THUẬT TOÁN YOLOV8

YOLOv8 hiện đang là mô hình YOLO đạt độ chính xác cao nhất đến thời điểm hiện tại có thể sử dụng cho tác vụ phát hiện đối tượng, phân loại hình ảnh và phân chia các vật thể. So với các phiên bản tiền nhiệm trước của YOLO, YOLOv8 đạt giá trị điểm chuẩn Benchmark vượt trội khi kết quả so sánh với các mô hình trước là YOLOv5 và YOLOv7 trong **Hình 2** cho ra được tốc độ xử lý hình ảnh và cho ra kết quả cải thiện đáng kể. Có năm biến thể của YOLOv8 để phát hiện, phân đoạn và phân loại: YOLOv8n, YOLOv8s, YOLOv8m, YOLOv8l, YOLOv8x. Nhìn chung, cấu trúc mạng YOLOv8 (**Hình 3**) vẫn giữ nguyên so với mô hình YOLOv5 bao gồm: mạng đường trục; nút cổ chai; đầu phát hiện; hàm mất mát. Tuy nhiên, YOLOv8 tích hợp mô đun C2f (**Hình 4**) là một cải tiến trên mô đun C3 ban đầu. Mô đun này chủ yếu để cập đến lợi thế kiến trúc ELAN trong YOLOv7 với đa dạng thông tin về độ dốc (Gradient). C2f có chức năng giảm một lớp tích chập tiêu chuẩn và tận dụng tối đa mô đun chứa các thành phần của mạng neural bị giới hạn trong quá trình xử lý để mở rộng nhánh của độ dốc nhằm

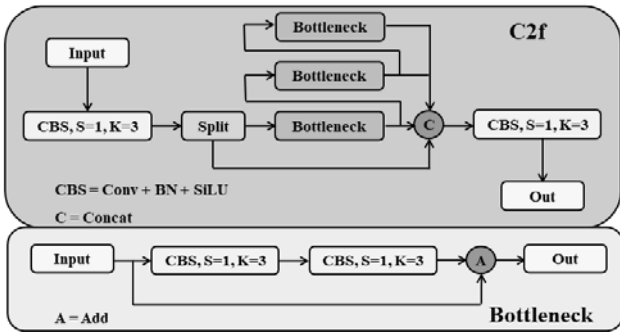
thu thập được thông tin về luồng độ dốc phong phú hơn trong khi vẫn đảm bảo được trọng lượng nhẹ.



Hình 2. Điểm RF Benchmark của YOLOv5, YOLOv7, YOLOv8 (Nguồn: [25])



Hình 3. Cấu trúc mạng YOLOv8 (Nguồn: [25])



Hình 4. Cấu trúc C2f (Nguồn: [26])

5. TRƯỜNG HỢP NGHIÊN CỨU

5.1 Bộ dữ liệu hình ảnh

Bộ dữ liệu về thi ết bị bảo hộ cá nhân chủ yếu được thu thập bởi các camera giám sát ngoài trời tại các công trường xây dựng và thông qua trình thu thập dữ liệu web Shutterstock [27]. Các video cũng được thu thập từ những người làm việc ở độ cao khác nhau có liên quan đến công tác lắp đặt hệ mặt dựng. Tập dữ liệu thử nghiệm được chia ngẫu nhiên thành hai phần: (1) huấn luyện và (2) thử nghiệm. Nghiên cứu này xác định thiết bị bảo hộ lao động bao gồm: giày, quần áo bảo hộ, nón bảo hộ, thiết bị chống rơi (Hình 5). Hiệu suất của các mô hình được xem xét dựa trên phần mềm mã nguồn mở và miễn phí TensorFlow. Cấu hình máy thử nghiệm được thiết lập như sau: bộ xử lý trung tâm (CPU) Intel(R) Core (TM) i7-7820HQ; bộ xử lý đồ họa (GPU) NVIDIA Quadro M1200. Môi trường huấn luyện chính Ubuntu phiên bản 20.04 dựa trên ngôn ngữ lập trình Python.



Hình 5. Thiết bị bảo hộ khi làm việc trên cao

Các chỉ số đánh giá hiệu năng chính của mô hình bao gồm: precision: thể hiện sự chuẩn xác của việc phát hiện các điểm tích cực (Positive). Chỉ số này càng cao thì mô hình nhận các điểm tích cực càng chuẩn. Recall là một hệ thước đo quan trọng, đo lường tỷ lệ dự báo chính xác các trường hợp tích cực trên toàn bộ các mẫu. Chỉ số Recall thể hiện khả năng phát hiện tất cả các điểm tích cực trên mô hình, tỷ lệ này càng cao cho thấy khả năng bỏ sót các điểm tích cực rất thấp. Điểm số F1 là điểm số dung hòa giữa Recall và Precision giúp ta có căn cứ để lựa chọn mô hình. Điểm số F1 càng cao cho ra kết quả mô hình càng chính xác.

$$Precision = \frac{True\ Positive}{True\ Positive + False\ Positive} \tag{1}$$

$$Recall = \frac{True\ Positive}{True\ Positive + False\ Negative} \tag{2}$$

$$F1\ score = \frac{2 * Precision * Recall}{Precision + Recall} \tag{3}$$

5.2 Kết quả và so sánh

Để kiểm chứng độ chính xác của mô hình được đề xuất, dữ liệu đầu vào sẽ trích xuất từ một video thực tế từ công trường xây dựng của dự án The 678 Tower, địa điểm thi công tại 67 Hoàng Văn Thái, phường Tân Phú, quận 7, TP.HCM. Video thu được (Hình 6) hiển thị thông tin về các trang thiết bị bảo hộ yêu cầu trong quá trình thi công và số lượng người lao động tham gia vào công tác thi công lắp đặt hệ mặt dựng.



Hình 6. Hình ảnh từ dự án thực tế

Kết quả của quá trình huấn luyện mô hình YOLOv8 được đưa ra trong Hình 7. Qua kết quả thực hiện được ta nhận thấy YOLOv8 mang lại hiệu quả khá tối ưu trong bài toán nhận diện thiết bị bảo hộ lao động và kiểm soát số lượng công nhân với các thông số hiệu suất đặc trưng (Bảng 1). Với một mô hình thử nghiệm, độ chính xác 93.9% và giá trị chính xác trung bình 98.4% là kết quả tương đối tốt trong trường hợp tập cơ sở dữ liệu dùng để huấn luyện (Training) mô hình chưa tối ưu về độ lớn và chất lượng. Về thời gian và tốc độ nhận diện, mô hình cũng đạt kết quả khá tốt. Đối với Video Clip có độ phân giải cao và phổ biến hiện nay là 1920 x 1080 pixel, tức là trong 01 giây sẽ quét được 30 khung hình (Frame), mô hình với tốc độ xử lý 6 khung hình trong 1 giây (6 frames/s) và tần suất xử lý 5 khung hình mỗi lần (5 frames/lần) đáp ứng được khá tốt khi chỉ tốn khoảng thời gian là 30s cho một Video Clip có thời lượng là 15s.

Bảng 1. Điểm chỉ số của mô hình YOLOv8

Mô hình YOLOv8 nhận diện thiết bị bảo hộ	
Độ chính xác (Precision)	0.939
Chỉ số gợi nhớ (Recall)	0.99
Giá trị chính xác trung bình (mAP)	0.984
F1 score	0.97

Bảng 2 cho thấy kết quả thử nghiệm của tất cả các thuật toán được xem xét. So với phiên bản YOLOv5 và YOLOv4 trước đó, YOLOv8x cho thấy sự hiệu quả tuyệt đối ở tất cả các chỉ số. Đối với hai mô hình còn lại, kết quả cho thấy các họ mô hình sử dụng Mạng nơ-ron tích chập dựa trên khu vực như MobilenetV3 và Resnet50 vẫn chưa thể soán ngôi của YOLO nói chung và YOLOv8x nói riêng về hiệu năng và mức độ ứng dụng. Trung bình, YOLOv8x vượt trội so với các thuật toán được xem xét khác, ngụ ý rằng YOLOv8x hỗ trợ mạnh mẽ việc giải quyết vấn đề an toàn trong các công trường xây dựng. Kết quả thử nghiệm chứng minh rằng phiên bản nâng cao của YOLOv8 vượt trội hơn tất cả các mô hình phát hiện khác về độ chính xác và khả năng thu hồi. Ngoài ra, một số các dự án khác được trích xuất để kiểm chứng độ chính xác và tăng tính khả thi của mô hình (Hình 6).

Bảng 2. So sánh hiệu suất các mô hình

Mô hình	Chỉ số		
	Precision	Recall	F1 score
YOLOv8	0.939	0.99	0.97
YOLOv5	0.74	0.66	0.70
YOLOv4	0.73	0.62	0.67
Faster-RCNN MobilenetV3	0.59	0.54	0.57
Faster-RCNN Resnet50	0.65	0.58	0.61



Hình 7. Kết quả nhận diện đối với công tác lắp đặt hệ mặt dựng

5.3 Ý nghĩa và đóng góp thiết thực

Mô hình được đề xuất vượt trội so với các nghiên cứu hiện có về độ chính xác và tốc độ xử lý hình ảnh tiệm cận nhất với thời gian thực. Về mặt thực tế nghiên cứu sẽ hỗ trợ người quản lý có góc nhìn tổng quát hơn trong quá trình thi công lắp đặt hệ mặt dựng, giúp tiết kiệm thời gian và đưa ra các giải pháp ứng cứu kịp thời thông qua các công tác huấn luyện về an toàn để cải thiện về nhận thức, văn hóa an toàn tại nơi làm việc của người lao động.

6. KẾT LUẬN

Quá trình thi công hệ mặt dựng tại các công trường xây dựng luôn đặt tình trạng người lao động vào những tình huống nguy hiểm và rủi ro vì đặc thù công tác lắp đặt trên cao. Quản lý an toàn là cần thiết để giảm tai nạn lao động. Nghiên cứu này đã giới thiệu một phiên bản cải tiến mới nhất của họ mô hình YOLO để phát hiện thiết bị bảo vệ cá nhân từ yêu cầu cấp bách về vấn đề tai nạn lao động và kiểm soát số lượng công nhân tại các vị trí cần lắp đặt dựa trên sự kết hợp giữa thiết bị ghi hình cảm biến và trí tuệ nhân tạo. Thuật toán phát hiện đối tượng kích thước nhỏ và chồng chéo nhau dựa trên cảm biến camera, khác với cảm biến camera truyền thống, sự kết hợp giữa cảm biến camera và trí tuệ nhân tạo để giải quyết một số vấn đề trong YOLOv8 mới phát hành và các thuật toán phát hiện đối tượng kích thước nhỏ hiện có được phân tích và giải quyết. Trong tương lai,

bộ dữ liệu về công tác thi công lắp đặt hệ mặt dựng được mở rộng bao gồm các linh kiện lắp đặt và thiết bị vận chuyển chuyên dụng. Cùng với đó sẽ tiến hành phát triển mô hình để nhận diện đa đối tượng trong cùng một khung hình.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Đại học Quốc gia TP.HCM (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số **DS2022-20-01**

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] W. Lu et al., "Thermal response and resistance optimization of various types of point-supported glass facades," vol. 224, pp. 610-621, 2019.

[2] S. Siddiqui, "US construction worker fall accidents: Their causes and influential factors," 2014.

[3] M. Alkaissy, M. Arashpour, B. Ashuri, Y. Bai, and R. J. S. s. Hosseini, "Safety management in construction: 20 years of risk modeling," vol. 129, p. 104805, 2020.

[4] L. D. Nguyen, D. Q. Tran, M. P. J. J. o. C. E. Chandrawinata, and Management, "Predicting safety risk of working at heights using Bayesian networks," vol. 142, no. 9, p. 04016041, 2016.

[5] G. E. Gürçanlı and U. J. I. h. Müngen, "Analysis of construction accidents in Turkey and responsible parties," vol. 51, no. 6, pp. 581-595, 2013.

[6] J. Choi, B. Gu, S. Chin, and J.-S. J. A. i. C. Lee, "Machine learning predictive model based on national data for fatal accidents of construction workers," vol. 110, p. 102974, 2020.

[7] M. Zhang, D. J. C. M. Fang, and Economics, "A cognitive analysis of why Chinese scaffolders do not use safety harnesses in construction," vol. 31, no. 3, pp. 207-222, 2013.

[8] N. Ngoc-Thoan, D.-Q. T. Bui, C. N. Tran, and D.-H. J. I. J. o. C. M. Tran, "Improved detection network model based on YOLOv5 for warning safety in construction sites," pp. 1-11, 2023.

[9] J. B. H. Yap, M. Skitmore, C. G. Y. Lam, W. P. Lee, and Y. L. J. I. J. o. C. M. Lew, "Advanced technologies for enhanced construction safety management: investigating Malaysian perspectives," pp. 1-10, 2022.

[10] M. Akinlolu, T. C. Haupt, D. J. Edwards, and F. J. I. J. o. C. M. Simpeh, "A bibliometric review of the status and emerging research trends in construction safety management technologies," vol. 22, no. 14, pp. 2699-2711, 2022.

[11] Q. Fang et al., "Detecting non-hardhat-use by a deep learning method from far-field surveillance videos," vol. 85, pp. 1-9, 2018.

[12] T. D. Akinoshio et al., "Deep learning in the construction industry: A review of present status and future innovations," vol. 32, p. 101827, 2020.

[13] X.-W. Chen and X. J. I. a. Lin, "Big data deep learning: challenges and perspectives," vol. 2, pp. 514-525, 2014.

[14] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You only look once: Unified, real-time object detection," in Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2016, pp. 779-788.

[15] H. Wang, Z. Hu, Y. Guo, Z. Yang, F. Zhou, and P. J. A. S. Xu, "A real-time safety helmet wearing detection approach based on CSYOLOv3," vol. 10, no. 19, p. 6732, 2020.

[16] H. Jebelli, C. R. Ahn, and T. L. J. S. s. Stentz, "Fall risk analysis of construction workers using inertial measurement units: Validating the usefulness of the postural stability metrics in construction," vol. 84, pp. 161-170, 2016.

[17] C.-F. Chi, T.-C. Chang, and H.-I. J. A. e. Ting, "Accident patterns and prevention measures for fatal occupational falls in the construction industry," vol. 36, no. 4, pp. 391-400, 2005.

[18] M. Zhang, M. Zhu, and X. Zhao, "Recognition of high-risk scenarios in building construction based on image semantics," Journal of Computing in Civil Engineering, vol. 34, no. 4, p. 04020019, 2020.

[19] B. E. Mneymneh, M. Abbas, and H. J. J. o. C. i. C. E. Khoury, "Vision-based framework for intelligent monitoring of hardhat wearing on construction sites," vol. 33, no. 2, p. 04018066, 2019.

[20] J. Wu, N. Cai, W. Chen, H. Wang, and G. J. A. i. C. Wang, "Automatic detection of hardhats worn by construction personnel: A deep learning approach and benchmark dataset," vol. 106, p. 102894, 2019.

[21] M. Nain, S. Sharma, and S. Chaurasia, "Safety and compliance management system using computer vision and deep learning," in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, vol. 1099, no. 1, p. 012013: IOP Publishing.

[22] C.-Y. Wang, A. Bochkovskiy, and H.-Y. M. J. a. p. a. p. a. Liao, "YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors," 2022.

[23] Y. Li, Q. Fan, H. Huang, Z. Han, and Q. J. D. Gu, "A Modified YOLOv8 Detection Network for UAV Aerial Image Recognition," vol. 7, no. 5, p. 304, 2023.

[24] F. Friblick, I. D. Tommelein, E. Mueller, and J. H. Falk, "Development of an integrated facade system to improve the high-rise building process," in Proceedings of the 17th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC 17), Taipei, Taiwan, 2009, pp. 359-370.

[25] <https://blog.roboflow.com/whats-new-in-yolov8/>.

[26] N. D. Nath, A. H. Behzadan, and S. G. J. A. i. C. Paal, "Deep learning for site safety: Real-time detection of personal protective equipment," vol. 112, p. 103085, 2020.

[27] <https://www.shutterstock.com/vi/>.