TẠP CHÍ ISSN: 1859-316X, e-ISSN: 3093-3161
KHOA HỌC CÔNG NGHỆ HÀNG HẢI
JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY

# PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG ĐỊNH VỊ PALLET THEO THỜI GIAN THỰC ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ BẢN SAO SỐ CHO KHO HÀNG THÔNG MINH

# DEVELOPMENT OF A REAL-TIME PALLET LOCALIZATION SYSTEM BASED ON DIGITAL TWIN TECHNOLOGY FOR SMART WAREHOUSE

**BÙI QUANG MINH[1], PHẠM THÁI HÀ[1], NGUYỄN THỊ THU PHƯƠNG[1], PHẠM NGỌC LINH[1], LÊ THỊ THU HIỀN[1], PHẠM VĂN TRIỆU[2], ĐÀM VĂN TÙNG[2*]**

*[1]Sinh viên Khoa Máy tàu biển, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam*
*[2]Khoa Máy tàu biển, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam*
**Email liên hệ: tungdv.mtb@vimaru.edu.vn*
*DOI: https://doi.org/10.65154/jmst.973*

**Tóm tắt**

*Trong bối cảnh cuộc Cách mạng công nghiệp 4.0, phần lớn các doanh nghiệp tại Việt Nam vẫn đang gặp khó khăn với phương thức quản lý kho thủ công dẫn tới việc thiếu tính hiệu quả và độ chính xác. Bài báo tiến hành nghiên cứu hệ thống định vị Pallet theo thời gian thực nhằm xây dựng một hệ thống kho thông minh dựa trên sự tích hợp giữa công nghệ mô phỏng 3D của Unity và nhận diện đối tượng bằng camera giúp doanh nghiệp có thể giám sát các vị trí Pallet trong kho một cách chính xác và trực quan hơn. Mô hình thử nghiệm hướng tới các doanh nghiệp vừa và nhỏ, chi phí hợp lý và dễ triển khai, góp phần thúc đẩy quá trình chuyển đổi số trong quản lý kho vận.*

**Từ khóa**: *Định vị Pallet, kho thông minh, mô phỏng 3D, nhận diện đối tượng.*

**Abstract**

*In the context of Industry 4.0, many enterprises in Vietnam continue to struggle with manual warehouse management, resulting in limited efficiency and accuracy. This paper investigates the design of a real-time Pallet localization model to develop a smart warehouse system based on the integration of Unity's 3D simulation technology and camera-based object recognition, allowing businesses to monitor Pallet positions in the warehouse more accurately and intuitively. The proposed prototype is tailored for SMEs, offering reasonable cost and ease of implementation, thereby contributing to the acceleration of digital transformation in warehouse management.*

**Keywords**: *Pallet localization, smart warehouse, 3D simulation, object detection.*

## 1. Đặt vấn đề

Hiện nay, tại các kho hàng trong các doanh nghiệp tại Việt Nam đặc biệt là doanh nghiệp quy mô vừa và nhỏ, phương pháp quản lý Pallet chủ yếu dựa vào bảng tính Excel hoặc sổ sách ghi chép truyền thống. Thực tế cho thấy các phương pháp này vẫn tiềm ẩn nhiều rủi ro như nhập - xuất sai hàng hóa, nhầm lẫn vị trí, gây tốn nhiều thời gian và nhân lực [1]. Điều này không chỉ ảnh hưởng đến quá trình vận hành kho hàng mà còn kéo theo chi phí vận hành ngày càng tăng cao.

Trong nghiên cứu của Vukićević và các cộng sự [2] đề xuất một giải pháp quản lý Pallet thông qua mã QR, thị giác máy tính và camera IP thông thường để theo dõi Pallet để giải quyết những vấn đề về độ tin cậy của mã QR bằng cách sử dụng nhiều góc nhìn. Cho thấy mô hình đạt độ chính xác đọc thẻ trên 97%, rút ngắn được thời gian kiểm kê và chứng minh tiềm năng ứng dụng trong các kho hàng với mức độ tự động hóa cao. Một nghiên cứu khác của Jianqiao Cheng và cộng sự [3] đã sử dụng camera gắn trên trần kết hợp công nghệ trí tuệ nhân tạo và mô hình YOLOv8 để giám sát kho hàng đúng với thời gian thực tế. Hiệu quả cho thấy khả năng theo dõi nhiều đối tượng được duy trì chính xác 84% số khung hình và xử lý tốt dữ liệu từ nhiều camera. Nghiên cứu của Al Mahmud A. và cộng sự [4] đã chỉ ra rằng việc kết hợp công nghệ RFID và IoT tự động theo dõi hàng tồn kho kết hợp với nền tảng đám mây để lưu trữ và phân tích dữ liệu theo thời gian thực sẽ cải thiện độ chính xác và giảm chi phí hoạt động. Nhóm tác giả cho thấy giải pháp RFID-IoT giúp nâng cao đáng kể độ chính xác của quản lý tồn kho, cải thiện khả năng hiển thị chuỗi cung ứng và góp phần giảm chi phí vận hành, đặc biệt là chi phí lao động và sai sót do con người. Nghiên cứu [5] đề xuất phương pháp kết hợp dữ liệu RGB-D bao gồm hình ảnh màu và thông tin chiều sâu, được sử dụng làm đầu vào để phát hiện và ước tính vị trí và hướng

của Pallet trong không gian 3D. Với cơ chế chú ý chéo thông qua hai mô-đun GAV-FR và VAG-FR, mô hình giúp tăng cường tương tác hai chiều giữa đặc trưng hình học và thị giác; trong đó GAV-FR là mô-đun sử dụng thông tin 3D để nhận biết hình ảnh màu còn VAR-FR là mô-đun khai thác tín hiệu hình ảnh màu để lọc dữ liệu 3D. Phương pháp đạt mức cải thiện trung bình 13,5% và AUC tối đa 0,83 đối với Pallet chưa chất hàng, đồng thời duy trì tốc độ xử lý nhanh ở mức 87 ms đáp ứng tốt nhu cầu thực tế trong kho vận. Trong đó AUC (Area Under Curve) đại diện cho diện tích dưới đường cong của sai số khoảng cách trung bình, được tính toán bằng cách thay đổi các ngưỡng sai số từ 0 đến tối đa 10cm để đánh giá độ chính xác tổng thể. Kết quả thử nghiệm chứng minh hiệu năng vượt trội so với các kỹ thuật hiện đại, khẳng định tiềm năng ứng dụng trong các hệ thống tự động hóa kho bãi. Nhìn chung các nghiên cứu này đều tập trung vào việc tối ưu hóa chi phí và thời gian vận hành giúp cho quy trình quản lý kho trở nên hiệu quả hơn.

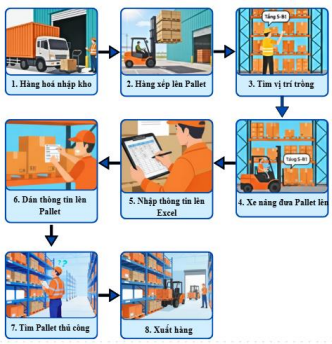
Tuy nhiên, phần lớn các giải pháp được đề xuất đều hướng tới các kho tự động hóa cao, không phù hợp với các doanh nghiệp quy mô vừa và nhỏ do chi phí đầu tư ban đầu cao, yêu cầu hạ tầng công nghệ phức tạp và cần đội ngũ chuyên môn kỹ thuật để vận hành. Hệ thống RFID dù cho phép theo dõi hàng hóa tự động với độ chính xác cao và giảm đáng kể các thao tác thủ công nhưng lại đòi hỏi chi phí lớn cho thẻ RFID, đầu đọc, hạ tầng mạng và phần mềm quản lý [6].

Trong quá trình khảo sát thực tế tại kho sản xuất của Công ty TNHH LG Electronics Việt Nam Hải Phòng, nhóm nghiên cứu nhận thấy doanh nghiệp đang áp dụng phương pháp quản lý Pallet hàng hóa bằng hệ thống tem màu tương ứng theo thời gian thực nhằm phân biệt thời gian lưu kho của từng lô hàng. Cách này được thiết kế nhằm hỗ trợ công tác phân loại và theo dõi chu kỳ lưu kho của từng lô hàng. Theo quy trình này, hàng hóa được sắp xếp và xuất nhập theo nguyên tắc "nhập trước - xuất trước" (FIFO), góp phần đảm bảo chất lượng, hạn chế tình trạng hàng tồn lâu ngày và tối ưu không gian lưu trữ. Tuy nhiên, phương pháp này vẫn còn tồn tại một số hạn chế nhất định như sai sót trong quá trình in tem và dán tem, tem có thể bị bong tróc hoặc phai màu trong môi trường kho, chưa giám sát trực quan được mức độ lấp đầy kho. Ngoài ra, phương pháp này còn phụ thuộc nhiều vào kinh nghiệm cá nhân của nhân viên kho, khó tổng hợp và phân tích dữ liệu lịch sử lưu kho, từ đó gây khó khăn cho nhân viên mới khi tìm kiếm hàng hóa.

Bên cạnh đó, nhóm nghiên cứu đã đi khảo sát thực tế một vài kho như kho lạnh của công ty dịch vụ Cảng Hải Phòng, kho sản xuất của công ty TNHH Aurora Art, kho sản xuất của công ty TNHH Zhong Xin Ya Tai, kho sản xuất của công ty TNHH Giấy Thụy Thiên thì nhận thấy quy trình tiếp nhận và lưu trữ hàng hóa trong kho được tổ chức theo đơn vị Pallet. Khi hàng về, xe nâng sẽ thực hiện dỡ hàng từ thùng container, vận chuyển vào khu vực kho và xếp hàng lên các khoang kệ tương ứng. Vị trí lưu trữ được phân tầng và định danh theo cấu trúc khoang tầng (ví dụ: Tầng 5 - B1), tạo thành hệ thống mã vị trí dạng ký hiệu không gian trong kho (Hình 1).

*Hình 1. Hiện trạng quản lý kho tại các doanh nghiệp*

Trong quá trình vận hành, nhân viên sẽ lựa chọn vị trí trống bất kỳ trên kệ để đưa hàng vào, không sắp xếp theo vị trí cố định nào. Thông tin vị trí sau đó được ghi vào bảng tính Excel theo quan sát và nhập liệu của nhân viên (Hình 2). Việc ghi chép thủ công này dễ dẫn đến nguy cơ cao về sai lệch thông tin vị trí, mất thời gian tìm kiếm hàng hóa, công tác kiểm kê định kỳ cũng phụ thuộc phần lớn vào nhân lực, yêu cầu nhiều thời gian để đối chiếu giữa thực tế và dữ liệu trên bảng tính. Điều này không chỉ làm tăng chi phí lao động mà còn gây ra nhiều khó khăn trong việc phát hiện kịp thời chênh lệch tồn kho, ảnh hưởng đến khả năng quyết định điều độ, lập kế hoạch nhập - xuất và tối ưu dung lượng kho hàng.




*Hình 2. Hiện trạng quy trình nhập - xuất hàng trong kho*

TẠP CHÍ ISSN: 1859-316X, e-ISSN: 3093-3161
KHOA HỌC CÔNG NGHỆ HÀNG HẢI
JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY

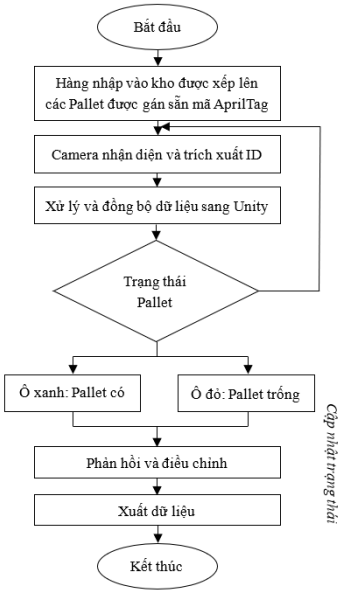
Trong khi đó, Q. Qi và cộng sự đã xem xét và nghiên cứu ứng dụng công nghệ bản sao số trong sản xuất thông minh [7]. Kết quả nghiên cứu cho thấy công nghệ bản sao số cho phép xây dựng mô hình số đại diện cho một hệ thống vật lý, trong đó dữ liệu từ môi trường thực được cập nhật và đồng bộ liên tục nhằm phản ánh chính xác trạng thái và hành vi của đối tượng trong thời gian thực. Trong lĩnh vực quản lý kho, công nghệ bản sao số cho phép mô phỏng trực quan không gian lưu trữ, theo dõi vị trí và trạng thái của Pallet, đồng thời hỗ trợ giám sát và ra quyết định dựa trên dữ liệu thời gian thực [7]. Việc ứng dụng công nghệ bản sao số giúp tăng cường khả năng quan sát, giảm phụ thuộc vào thao tác thủ công, đồng thời tạo nền tảng cho quá trình số hóa và tự động hóa quản lý kho hàng tại các doanh nghiệp vừa và nhỏ.

Từ những vấn đề trên, nhóm tác giả đã đề xuất đề tài phát triển hệ thống định vị Pallet ứng dụng công nghệ bản sao số dành cho các doanh nghiệp vừa và nhỏ, qua đó hỗ trợ công nhân trong quá trình tìm kiếm hàng hóa và góp phần nâng cao mức độ số hóa trong công tác quản lý kho.

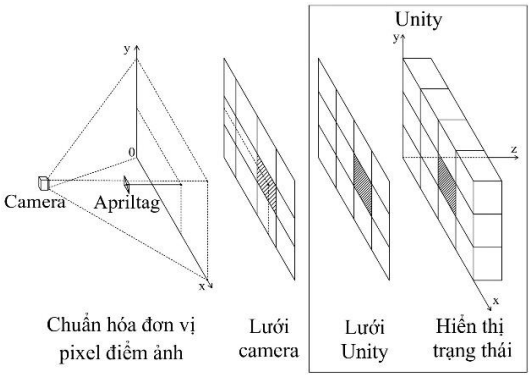
## 2. Nguyên lý hoạt động của hệ thống

Nguyên lý và cơ chế hoạt động của hệ thống được thể hiện trên Hình 3 và Hình 4, theo đó các camera được lắp đặt cố định tại vị trí trung tâm phía trước kệ để đảm bảo góc nhìn bao quát, sau đó sẽ thu thập dữ liệu từ các thẻ AprilTag được gán trên từng Pallet. Mỗi thẻ Pallet sẽ được mang một mã định danhpalle, từ đó hệ thống có thể nhận dạng, xác định vị trí Pallet trong cơ sở dữ liệu. Sau khi xử lý hình ảnh và tính toán vị trí không gian, dữ liệu sẽ được đồng bộ với mô hình khoang kệ được dựng trong Blender và được hiển thị lên Unity theo thời gian thực. Mỗi khoang lưu trữ trên mô hình được chia theo dạng lưới và hiển thị trạng thái theo các màu sắc khác nhau: Màu xanh cho Pallet có hàng, màu đỏ cho Pallet trống. Nhờ cơ chế đồng bộ liên tục giữa kho hàng thực và mô hình ảo, người quản lý có thể nhanh chóng định vị được vị trí Pallet, giám sát tình trạng hàng hóa theo thời gian thực và đưa ra được quyết định kịp thời trong nhập xuất và sắp xếp Pallet trong kho. Điều này giúp tối ưu hóa được quy trình vận hành, giảm thiểu các sai sót thủ công và nâng cao hiệu quả quản lý trong hệ thống kho hàng.

Hệ thống cho phép xác định và theo dõi vị trí Pallet theo thời gian thực với độ chính xác cao nhờ sự kết hợp giữa camera và thẻ định danh AprilTag. Việc xây dựng mô hình kho 3D và hiển thị trạng thái bằng mã màu giúp người quản lý nhanh chóng xác định vị trí Pallet và các khoang trống, từ đó rút ngắn thời gian




*Hình 3. Sơ đồ nguyên lý hoạt động của hệ thống*



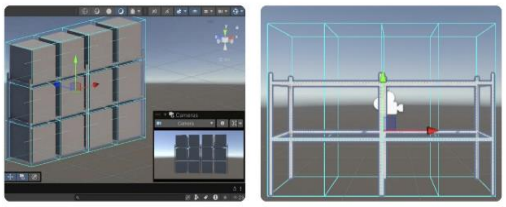

*Hình 4. Cơ chế hoạt động của hệ thống*

tìm kiếm và giảm sai sót trong quá trình vận hành. Bên cạnh đó, chi phí triển khai phù hợp với kho hàng quy mô vừa và nhỏ đồng thời dễ dàng tích hợp mở rộng với hệ thống quản lý kho (WMS) dưới dạng mô-đun. Tuy nhiên, hệ thống vẫn tồn tại một số hạn chế về số lượng camera sử dụng, vị trí đặt camera và trong môi trường ánh sáng thiếu ổn định sẽ ảnh hưởng đến khả năng nhận diện AprilTag.

## 3. Thiết kế và chế tạo hệ thống

Dựa trên nguyên lý hoạt động của mô hình, nhóm nghiên cứu đã tiến hành triển khai xây dựng mô hình 3D chi tiết, đồng thời chế tạo mô hình vật lý thu nhỏ nhằm đánh giá khả năng ứng dụng thực tế của hệ thống. Mô hình 3D được thiết kế chi tiết trên phần mềm Blender, trong đó các kệ hàng được thiết kế với kích thước 1:1 để đảm bảo được độ chính xác cao trong quá trình ánh xạ.

Mô hình thiết kế 3D trên Blender sau khi hoàn thiện sẽ được xử lý đồng bộ và xuất trực tiếp sang phần mềm Unity để phục vụ cho quá trình mô phỏng. Trong quá trình chuyển đổi, các thông số hình học về kích thước và vật liệu của mô hình cần được giữ nguyên nhằm đảm bảo tính nhất quán giữa mô hình số và hệ thống thực. Trên nền tảng Unity, hệ thống cho phép bổ sung các đối tượng phụ trợ cần thiết để hỗ trợ quá trình nội suy và định vị Pallet. Hình 5 minh hoạ mô hình khoang kệ 3D sau khi được tích hợp vào môi trường Unity và được cập nhật dữ liệu nhận diện từ camera thực tế theo thời gian thực.



*Hình 5. Mô hình 3D mô phỏng hệ thống trên Unity*

Song song với quá trình thiết kế mô hình 3D, mô hình khoang kệ vật lý được chế tạo nhằm phục vụ thử nghiệm và đánh giá hệ thống. Mô hình được lắp ráp từ các thanh sắt chữ V theo đúng kích thước và tỷ lệ của mô hình 3D, đảm bảo tính tương thích giữa môi trường vật lý và mô hình số. Sau khi hoàn thiện khung giá kệ, các Pallet được bố trí tại từng vị trí lưu trữ để mô phỏng hoạt động xếp dỡ hàng hóa trong kho thực tế; trên mỗi Pallet, các mã nhận diện AprilTag được gán nhằm hỗ trợ quá trình phát hiện và định vị bằng thị giác máy. Để nhận diện và xác định vị trí Pallet trên khung kệ, một camera được lắp đặt đối diện khoang kệ nhằm bao quát toàn bộ khu vực lưu trữ (Hình 6).

***Hình 6. Mô hình vật lý hệ thống sau khi chế tạo***

*1. Pallet hàng hoá; 2. Kệ lưu giữ; 3. Mã AprilTag có ID; 4. Hệ thống camera; 5. Máy tính xử lý trung tâm.*

Các thông số bố trí thiết bị trong mô hình được lựa chọn bám sát điều kiện thực tế tại các nhà kho hiện nay. Cụ thể, hệ thống gồm một dãy kệ ba tầng với sức chứa tối đa 12 Pallet.

## 4. Phương pháp nhận diện và định vị Pallet

Trong quá trình xây dựng hệ thống định vị Pallet trong kho hàng, việc xác định khả năng quan sát và nhận diện thẻ AprilTag ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác và phạm vi ứng dụng của hệ thống. Camera được mô hình hóa theo mô hình Pinhole [8], trong đó mối quan hệ giữa trường nhìn, độ phân giải ảnh và khoảng cách quan sát quyết định kích thước của đối tượng trên mặt phẳng ảnh. Trong thị giác máy tính, tiêu cự thường được biểu diễn lại theo đơn vị pixel để thuận tiện cho mô hình hóa camera. Khi đó, tiêu cự pixel được suy ra từ tiêu cự vật lý và kích thước 1 pixel trên cảm biến [9]:

$$f_{pixel} = \frac{f_x}{S_x} \quad (1)$$

Trong đó: $f_{pixel}$ là tiêu cự đơn vị pixel, $f_x$ là tiêu cự vật lý của ống kính, $S_x$ là kích thước vật lý 1 pixel trên cảm biến.

Theo cách tương tự, độ dài tiêu cự vật lý được suy ra từ góc nhìn:

$$f_X = \frac{W}{2\tan(\frac{\theta}{2})} \quad (1)(1)$$

Trong đó: $f_x$ là tiêu cự, $\theta$ là góc nhìn ngang FOV, $W$ là chiều rộng cảm biến.

Tiêu cự $fx$ thiết lập mối quan hệ giữa kích thước thực của thẻ AprilTag và kích thước của ảnh [10]. Kích thước cạnh của thẻ trên ảnh được xấp xỉ:

$$Spx = \frac{f_{pixel} \cdot S}{Z} \quad (3)$$

Trong đó: $S$ là kích thước cạnh thực của AprilTag, $Z$ là khoảng cách từ điểm đặt AprilTag đến camera.

Từ công thức trên thấy được kích thước thẻ trên ảnh tỷ lệ nghịch với khoảng cách quan sát. Dựa trên thực nghiệm với các mức độ phân giải khác nhau, độ tin cậy của AprilTag được xấp xỉ $S_{min} \approx 30\,pixel$ [11]. Điều kiện nhận diện được tính với công thức:

$$S_{pixel} \geq S_{min} \quad (4)$$

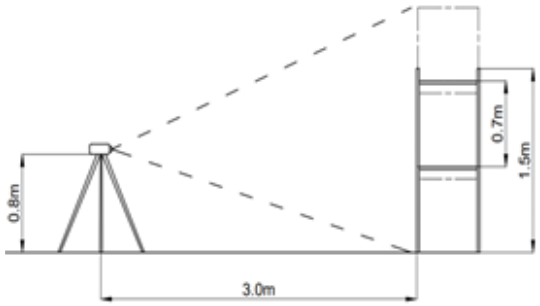
Dựa trên mô hình mối quan hệ giữa tiêu cự và kích thước ảnh khoảng cách tối đa lý thuyết $Z_{max}$ để hệ thống có thể nhận diện được thẻ AprilTag với kích thước điểm ảnh tối thiểu $S_{min}$. Với cấu hình camera có tiêu cự $f_X = 1280\,pixel$, kích thước vật lý của thẻ

TẠP CHÍ ISSN: 1859-316X, e-ISSN: 3093-3161
KHOA HỌC CÔNG NGHỆ HÀNG HẢI
JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY

$s_m = 0{,}09m$ và ngưỡng nhận diện tối thiểu $s_{min} = 30 pixel$ khoảng cách tới hạn được tính toán như sau [12]:

$$z_{max} = \frac{f_x \times s_m}{s_{min}} = \frac{1280 \times 0{,}09}{30} = 3{,}84 \quad (5)$$

Do đó, trong sơ đồ bố trí thực nghiệm tại Hình 7, nhóm nghiên cứu quyết định thiết lập khoảng cách từ camera đến kệ hàng là Z=3,0m. Việc lựa chọn giá trị $Z<Z_{max}$ (cụ thể 3,0m < 3,84m) nhằm mục đích tạo ra một vùng đệm an toàn về độ tin cậy. Tại khoảng cách 3,0m, kích thước hiển thị của thẻ trên khung hình sẽ lớn hơn đáng kể so với ngưỡng 30 pixel, đảm bảo thuật toán nhận diện hoạt động ổn định và chính xác ngay cả khi điều kiện ánh sáng thay đổi hoặc camera rung lắc nhẹ.




*Hình 7. Sơ đồ bố trí thiết bị trong hệ thống*

Để phục vụ quá trình xử lý ảnh và tăng tính ổn định cho thuật toán phát hiện AprilTag, ảnh màu thu được từ camera được chuyển sang ảnh xám theo công thức chuẩn [9]:

$$Gray = 0{,}299R + 0{,}587G + 0{,}114B \quad (6)$$

Trong đó: Gray là giá trị cường độ pixel xám, R,G,B ở đây là giá trị kênh màu theo phạm vi [0,255].

Sau khi phát hiện AprilTag, hệ thống tiến sang bước xác định vị trí không gian của thẻ thông qua mô hình hình học camera. Quan hệ giữa toạ độ pixel của thẻ và hệ toạ độ camera được mô tả tại ma trận nội tại [8]:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Trong đó: $f_x, f_y$ là tiêu cự theo đơn vị pixel, $c_x, c_y$ là toạ độ tâm ảnh.

Toạ độ pixel của tâm thẻ $u, v$ được chuẩn hóa về hệ toạ độ camera thông qua:

$$X_n = \frac{u - c_x}{f_x}, Y_n = \frac{v - c_y}{f_y} \quad (8)$$

Từ các tọa độ chuẩn hóa và tập hợp các điểm góc của thẻ AprilTag, bài toán ước lượng pose được giải bằng thuật toán solvePnP [13] nhằm xác định ma trận quay **R** và vector tịnh tiến **t** Trong hệ tọa độ camera, vector $\mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_x & t_y & t_z \end{bmatrix}^T$ biểu diễn trực tiếp vị trí không gian của Pallet, trong đó thành phần $t_z$ là khoảng cách từ camera đến Pallet.

Khi hệ thống camera được lắp đặt cố định đối diện kệ và mô hình kho đã chia sẵn theo dạng lưới trong Unity, định vị Pallet sẽ được đơn giản hóa qua phép nội suy từ toạ độ Pixel sang lưới khoang [14]:

$$row = \left[ \frac{y - y_{min}}{\Delta y} \right], col = \left[ \frac{x - x_{min}}{\Delta x} \right] \quad (9)$$

Trong đó: *x, y* là toạ độ pixel trên ảnh camera; $x_{min}$, $y_{min}$ là toạ độ gốc ảnh; $\Delta x, \Delta y$ là kích thước 1 ô lưới theo trục ngang/ dọc được xác định từ số hàng $N_{row}$ và số cột $N_{col}$ của kệ:

$$\Delta x = \frac{W}{N_{col}}, \Delta y = \frac{H}{N_{row}} \quad (10)$$

Trong đó: *W, H* là chiều rộng và chiều cao của ảnh theo pixel.

Để kiểm chứng tính đúng đắn của mô hình lý thuyết và thuật toán đề xuất, hệ thống đã được triển khai thử nghiệm trong môi trường phòng thí nghiệm, từ đó đánh giá hiệu quả nhận diện và độ tin cậy của phương pháp định vị Pallet.

## 5. Thử nghiệm và phân tích kết quả

### *5.1. Thiết lập bài toán thử nghiệm*

Sau khi sắp xếp và đồng bộ dữ liệu từ camera, dữ

***Hình 8. Mô phỏng kệ kho trên giao diện Unity***

*1. Khối xanh: Khoang kệ có Pallet*

*2. Khối đỏ: Khoang kệ trống*

liệu hình ảnh sẽ được cập nhật ngay lập tức trên giao diện Unity.

Ở giao diện của Unity, vị trí và trạng thái cái Pallet sẽ được hiển thị theo các mã màu: Màu xanh thể hiện vị trí có Pallet; màu đỏ vị trí trống; các mã ID được đồng bộ từ các mã AprilTag. Nhờ cơ chế này, mọi sự thay đổi ở kho thực tế lập tức được cập nhật lên giao diện Unity giúp nhân viên có thể kiểm kê, điều phối nhập xuất hàng nhanh chóng với độ chính xác cao, phản ứng nhanh trong điều kiện vận hành thực tế.

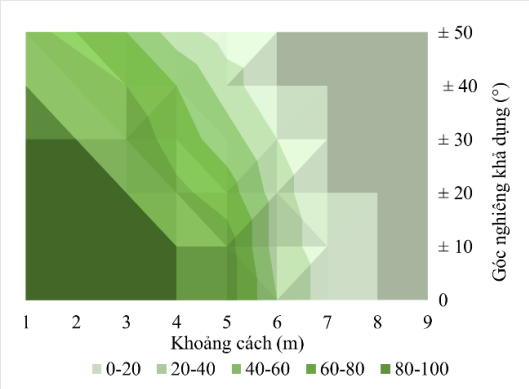
Sau khi hoàn tất việc đồng bộ mô hình vật lý và môi trường Unity, nhóm nghiên cứu đã tiến hành thử nghiệm thực tế để đánh giá độ ổn định và phạm vi nhận diện của camera đối với mã AprilTag 9cm x 9cm được thí nghiệm với bốn cấu hình độ phân giải camera khác nhau gồm HD, Full HD, 2K, 4K. Với mỗi cấu hình, camera được đặt tại khoảng cách 3m đến 5m so với kệ hàng, kết hợp với góc nghiêng từ $-50^0$ đến $50^0$ nhằm mô phỏng đầy đủ các vị trí linh hoạt và điều kiện thực tế trong kho hàng. Thử nghiệm thực hiện 10 lần lặp lại cho mỗi cấu hình dưới ánh sáng tiêu chuẩn để đo tỷ lệ nhận diện chính xác ID và vị trí của các Pallet, làm cơ sở so sánh độ tin cậy nhận dạng của camera trong kho hàng.

### *5.2. Phân tích kết quả*

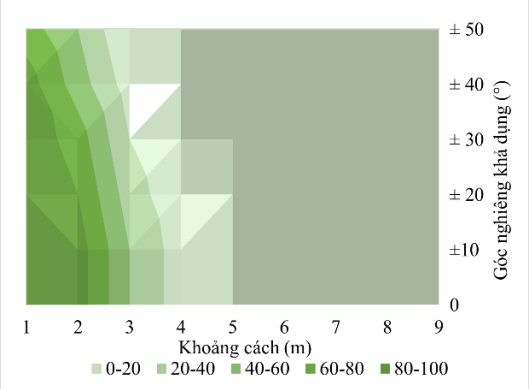
Nhằm đánh giá toàn diện ảnh hưởng của độ phân giải của camera đến khả năng nhận diện ID và xác định vị trí Pallet trong kho hàng, nghiên cứu tiến hành thí nghiệm với 4 độ phân giải khác nhau gồm HD, Full HD, 2K và 4K. Đối với mỗi cấu hình, tỷ lệ nhận diện chính xác được phân tích theo sự thay đổi của khoảng cách và góc đặt camera, từ đó phản ánh mức độ nhận diện trong các điều kiện quan sát khác nhau. Kết quả thu được tổng hợp và thể hiện dưới dạng biểu đồ trực quan, cho phép so sánh rõ ràng hiệu quả nhận dạng giữa các mức độ phân giải.

Kết quả cho thấy ở cấu hình HD, vùng nhận dạng của camera bị giới hạn: 80 - 100% chỉ xuất hiện trong khoảng cách ngắn dưới khoảng 3m đến 3,5m và chỉ nhận diện trong các góc nhỏ dưới $30^o$ đến $40^o$. Với khoảng cách xa hơn hoặc góc nghiêng lớn hơn, tỷ lệ nhận diện mã AprilTag dần giảm xuống dưới 50%.

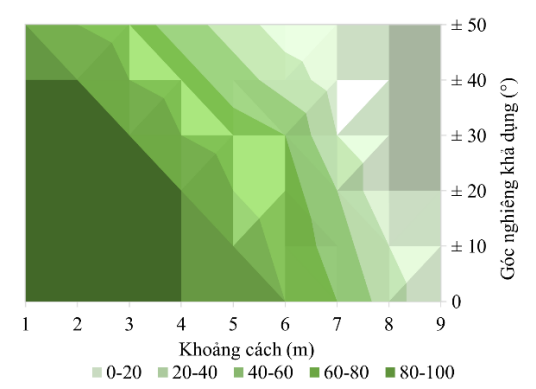
Với cấu hình Full HD thì tỷ lệ nhận dạng được cải



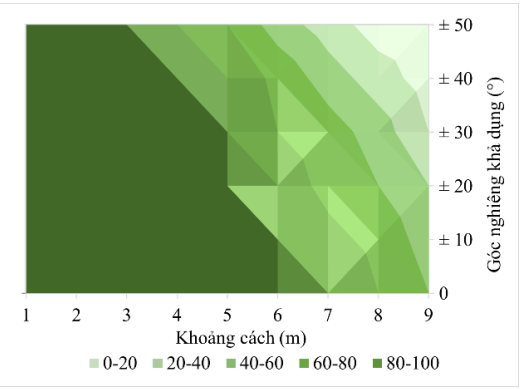

*Hình 9. Bản đồ nhiệt tỷ lệ nhận dạng theo khoảng cách và góc camera ở độ phân giải HD*




*Hình 10. Bản đồ nhiệt tỷ lệ nhận dạng theo khoảng cách và góc camera ở độ phân giải Full HD*




*Hình 11. Bản đồ nhiệt tỷ lệ nhận dạng theo khoảng cách và góc camera ở độ phân giải 2K*




*Hình 12. Bản đồ nhiệt tỷ lệ nhận dạng theo khoảng cách và góc camera ở độ phân giải 4K*

TẠP CHÍ ISSN: 1859-316X, e-ISSN: 3093-3161
KHOA HỌC CÔNG NGHỆ HÀNG HẢI
JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY

thiện đáng kể so với cấu hình HD. Biểu đồ cho thấy khoảng cách có tỷ lệ nhận dạng từ 80% đến 100% đã kéo dài đến khoảng 4 - 4,5m trong vùng góc nghiêng 0° đến 30°. Tuy nhiên, tại khoảng cách lớn hơn vẫn xuất hiện nhiều góc nghiêng không nhận diện được mã AprilTag.

Cấu hình 2K cho thấy sự cân bằng tốt hơn giữa chất lượng và phạm vi quan sát. Vùng tỷ lệ nhận dạng bao quát gần như toàn bộ khoảng cách từ 0,5m đến 4,5m trong khoảng góc 0° đến 40°. Với khoảng cách vượt quá 5m hoặc góc nghiêng lớn hơn 50°, tỷ lệ nhận dạng mới bắt đầu giảm. Điều này cho phép đặt camera xa hơn và cao hơn so với hai cấu hình trước mà vẫn duy trì được độ tin cậy của phép đo vị trí Pallet.

Với cấu hình 4K, tỷ lệ nhận dạng đạt mức tốt nhất trong bốn cấu hình. Tỷ lệ nhận dạng đạt 90% đến 100% trên toàn bộ vùng khoảng cách 0,5m đến 5m và góc nghiêng tới 50°. Điều này cho thấy độ phân giải rất cao giúp hệ thống nhận diện tốt các vị trí Pallet ở khoảng cách xa hoặc những góc nhìn nghiêng hơn. Tuy nhiên, chi phí xử lý dữ liệu và yêu cầu về đường truyền ở cấu hình 4K rất cao, nên việc sử dụng cấu hình này chỉ cần thiết với các kho quy mô lớn hoặc khi cần giảm số lượng camera.

Dựa trên so sánh 4 cấu hình, nhóm nghiên cứu lựa chọn 2K làm cấu hình tối ưu cho mô hình định vị Pallet trong kho hàng. Cấu hình này cung cấp vùng nhận dạng đủ rộng để bao phủ toàn bộ kệ trong mô hình thí nghiệm, đồng thời vẫn đảm bảo khả năng xử lý thời gian thực trên phần cứng. Kết quả thử nghiệm đã khẳng định được tính khả thi và mở ra được hướng ứng dụng rộng rãi cho doanh nghiệp muốn chuyển đổi số và tăng cường tự động hóa quản lý kho hàng. Đây là bước quan trọng để phát triển hệ thống định vị Pallet hiện đại, nâng cao năng lực quản lý và tối ưu chi phí vận hành.

## 6. Đề xuất cải tiến

Để nâng cao khả năng ứng dụng thực tế của mô hình định vị, nhóm nghiên cứu đã đề xuất tích hợp hệ thống vào nền tảng quản lý thông qua cơ chế đồng bộ dữ liệu vị trí và trạng thái Pallet theo thời gian thực. Dữ liệu nhận diện từ camera sẽ được truyền trực tiếp sang mô-đun tồn kho nhằm tự động cập nhật tồn kho, quan sát được vị trí của Pallet và hỗ trợ báo cáo và kiểm soát một cách trực quan. Bên cạnh đó, việc phát triển mô-đun hiển thị và tương tác với bản đồ kho trên đồng bộ hai chiều với mô hình 3D của Unity sẽ hỗ trợ nhà quản lý có thể truy xuất nhanh vị trí Pallet trong quá trình vận hành và hỗ trợ xe nâng di chuyển dễ dàng trong kho. Ngoài ra, việc có một cơ chế cảnh báo khi camera không nhận diện được Pallet sẽ giúp hệ thống trở nên hoàn thiện hơn. Những cải tiến này sẽ mở ra được khả năng triển khai rộng rãi tại trong lĩnh vực kho vận của logistics. các doanh nghiệp vừa và nhỏ, góp phần thúc đẩy quá trình chuyển đổi số.

## 7. Kết luận

Nghiên cứu đã tiến hành thiết kế và chế tạo hệ thống định vị Pallet theo thời gian thực trong kho hàng ứng dụng công nghệ bản sao số. Hệ thống sử dụng việc tích hợp camera, công nghệ nhận dạng bằng mã định danh AprilTag, xử lý hình ảnh bằng OpenCV và mô phỏng không gian lưu trữ trong Unity. Thông qua việc đồng bộ giữa kho vật lý và môi trường ảo, hệ thống giúp theo dõi trực quan vị trí Pallet và trạng thái hàng hóa trong kho hàng góp phần giải quyết các hạn chế của các phương pháp quản lý kho thủ công tại các doanh nghiệp vừa và nhỏ.

Kết quả thử nghiệm cho thấy hệ thống đạt tỷ lệ nhận dạng AprilTag ổn định ở mức 80% - 100% với khoảng cách camera từ 2,5m đến 3m trong vùng góc nghiêng từ 0° đến 30°. Trong bốn cấu hình, cấu hình camera 2K là phương án tối ưu nhất do đáp ứng đủ phạm vi nhận diện cần thiết trong kho thử nghiệm, đồng thời vẫn đảm bảo khả năng xử lý thời gian thực. Hơn nữa, đây cũng là độ phân giải phổ biến được nhiều doanh nghiệp kho vận sử dụng trong việc giám sát an ninh, tăng tính thực tế cho mô hình thử nghiệm.

Từ kết quả nghiên cứu trên cho thấy hệ thống định vị Pallet hoàn toàn khả thi và phù hợp để triển khai trong các quy mô vừa và nhỏ với chi phí đầu tư thấp. Trong tương lai, nhóm nghiên cứu sẽ mở rộng việc tích hợp với hệ thống quản lý kho hàng để đồng bộ thông tin nhập - xuất - tồn kho cũng như phát triển các chức năng hỗ trợ quản trị nhằm đặt nền tảng tiến tới mô hình kho thông minh. Nghiên cứu này đã mở ra hướng đi bền vững cho các doanh nghiệp vừa và nhỏ trong bối cảnh công nghiệp 4.0, đồng thời khẳng định tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp sản xuất tại Việt Nam.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **SV25-26.12**.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Thien NH, Phat NT, Dung NTA, Ha PTM. (2022), *Designing a warehouse management system in Vietnam*, Vol.03(05), pp.87-93.

[2] Vukićević A, Mladineo M, Banduka N, Mačužić I. (2021), *A smart Warehouse 4.0 approach for the pallet management using machine vision and*

*Internet of Things (IoT): A real industrial case study*. Advances in production engineering & management, Vol.16(3), pp.297-306.

[3] Cheng J, Verhulst C, De Clercq P, Van De Velde S, Sagaert S, Mertens M, et al. (2025), *Real-Time Warehouse Monitoring with Ceiling Cameras and Digital Twin for Asset Tracking and Scene Analysis*. Logistics. Vol.9(4), p. 153.

[4] Al Mahmud A., Hossan Z., Tiwari A., Khatoon R., Sharmin S., Hosain S., Ferdousmou J. (2025), *Reviewing the integration of RFID and IoT in supply chain management: Enhancing efficiency and visibility*. Journal of Posthumanism, Vol.5(3), pp.409-437.

[5] Vu V-D, Hoang D-D, Tan PX, Nguyen V-T, Nguyen T-U, Hoang N-A, et al. (2024), *Occlusion-robust pallet pose estimation for warehouse automation.* IEEE Access, Vol.12, pp.1927-1942.

[6] Chí, T. H. (2024). *Ứng dụng công nghệ IOT trong lĩnh vực quản trị kho hàng tại Viễn Thông Long An*. Tạp chí Kinh tế - Công nghiệp, Số 37, tr.77-82.

[7] Qi Q, Tao F, Zuo Y, Zhao D. (2018), *Digital twin service towards smart manufacturing.* Procedia Cirp. Vol.72, pp.237-242.

[8] Hartley R., Zisserman A. (2003), *Multiple view geometry in computer vision*, Cambridge University Press, Cambridge.

[9] Distante A, Distante C. (2020), *Camera calibration and 3D reconstruction*. Handbook of Image Processing and Computer Vision, Vol.3: From Pattern to Object, pp.599-667.

[10] Poynton C. (2012), *Digital video and HD: Algorithms and interfaces*, Elsevier, Oxford.

[11] Olson E. (2011), *AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, pp.3400-3407.

[12] Bui M. T., Doskocil R., Krivanek V. (2019), *The analysis of the effect of the parameters on indirect distance measurement using a digital camera*, Proceedings of the International Conference on Military Technologies (ICMT), pp.1-9.

[13] Fischler MA, Bolles RC. (1981), *Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography*. Communications of the ACM, Vol.24(6), pp.381-395.

[14] Knowles, K. W. (2001), *Points, Pixels, Grids and Cells: A Mapping and Gridding Primer*. National Snow and Ice Data Center.

| | |
|---|---|
| Ngày nhận bài: | 16/01/2026 |
| Ngày nhận bản sửa: | 07/02/2026 |
| Ngày duyệt đăng: | 02/03/2026 |