

PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG ĐỊNH VỊ TRONG NHÀ
SỬ DỤNG CÔNG NGHỆ BĂNG THÔNG SIÊU RỘNG
DEVELOPING A WAREHOUSE POSITIONING SYSTEM
BASED ON ULTRA-WIDEBAND TECHNOLOGY

VŨ QUỐC TRỌNG¹, ĐẶNG HÀ DUYÊN¹, NGUYỄN MAI HƯƠNG²,
PHẠM KHÁNH LY², NGUYỄN QUANG THUẬN³, PHẠM MINH NGỌC⁴,
NGUYỄN MINH ĐỨC⁵

¹Sinh viên Khoa Kinh tế, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam,

²Sinh viên Khoa Máy tàu biển, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

³Sinh viên Viện Đào tạo quốc tế, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

⁴Khoa Máy tàu biển, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

⁵Khoa Kinh tế, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam,

*Email liên hệ: ducnguyen@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.1110>

Tóm tắt

Trong bối cảnh chuyển đổi số mạnh mẽ trong lĩnh vực logistics và quản lý kho, hệ thống định vị trong nhà (Indoor Positioning System - IPS) ngày càng nhận được sự quan tâm nhờ khả năng hỗ trợ giám sát, theo dõi và tối ưu hóa hoạt động. Thông qua việc tổng hợp và phân tích các nghiên cứu trước đây về hệ thống định vị trong nhà, nghiên cứu này tập trung xây dựng một hệ thống định vị trong nhà ba chiều dựa trên công nghệ băng thông siêu rộng và đánh giá độ chính xác của hệ thống qua các chỉ số về sai số và độ lệch chuẩn. Kết quả thực nghiệm trong môi trường kho cho thấy hệ thống đạt độ chính xác ở mức decimet, với sai số RMSE trên mặt phẳng ngang (x, y) dao động từ 0,15m đến 0,3m, thể hiện tính ổn định cao. Nghiên cứu hướng tới phát triển một giải pháp định vị trong nhà hiệu quả, đơn giản với chi phí thấp; đồng thời đề xuất các hướng cải thiện hiệu suất IPS trong môi trường công nghiệp phức tạp.

Từ khóa: Hệ thống định vị trong nhà ba chiều, băng thông siêu rộng, kho, logistics.

Abstract

In the context of strong digital transformation in logistics and warehouse management, the Indoor Positioning System (IPS) is receiving increasing attention thanks to its ability to support monitoring, tracking, and operational optimization. Through the synthesis and analysis of previous studies on indoor positioning systems, this research focuses on developing a three-

dimensional indoor positioning system based on Ultra-Wideband (UWB) technology and evaluating its accuracy using error metrics and standard deviation. Experimental results in a warehouse environment showed decimeter-level accuracy, with RMSE on the horizontal plane (x, y) ranging from 0.15m to 0.3m, demonstrating high stability. The study aims to develop an efficient, simple, and cost-effective indoor positioning solution, while also proposing directions to improve IPS performance in complex industrial environments.

Keywords: Three-dimensional indoor positioning system, ultra-wideband, warehouse, logistics.

1. Mở đầu

IPS (Indoor Positioning System), viết tắt của Hệ thống định vị trong nhà, là một hệ thống được thiết kế để xác định vị trí của các đối tượng như hàng hóa, thiết bị và con người trong các khu vực mà hệ thống định vị vệ tinh (như GPS, Galileo, Glonass) không thể hoạt động hiệu quả hoặc không cung cấp đủ độ chính xác như trong các tòa nhà, nhà kho,...

Trong bối cảnh thương mại điện tử, logistics và chuỗi cung ứng ngày càng phát triển, yêu cầu về tối ưu hóa quản lý kho hàng đang trở thành yếu tố quyết định năng lực cạnh tranh của doanh nghiệp. Hệ thống định vị trong nhà là một trong những giải pháp công nghệ với tiềm năng góp phần nâng cao hiệu quả quản lý thông qua việc theo dõi vị trí chính xác của hàng hóa, tối ưu hóa hoạt động vận chuyển, lấy hàng, nhập xuất kho, từ đó giảm thiểu thời gian và chi phí lao

động, tăng cường khả năng kiểm soát, an toàn và an ninh kho hàng, đặc biệt với các mặt hàng giá trị cao hoặc cần bảo quản đặc biệt, hỗ trợ ra quyết định điều hành và hoạch định kho thông minh, hướng tới mô hình kho hàng số hóa trong tương lai [1].

Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu về hệ thống định vị trong nhà còn đang gặp ít nhất một trong các nhược điểm sau: chi phí cao, triển khai phức tạp, phạm vi hoạt động hạn chế, độ chính xác thấp ($>\pm 3\text{m}$). Đồng thời, số lượng nghiên cứu về hệ thống định vị trong nhà 3 chiều ở Việt Nam cũng còn hạn chế. Vì vậy, thiết kế một giải pháp định vị ba chiều trong nhà chi phí thấp, dễ vận hành và hoạt động hiệu quả là cấp thiết, đặc biệt ở Việt Nam với 98% các doanh nghiệp có quy mô vừa và nhỏ và gặp nhiều rào cản về chi phí [2]. Bài báo sẽ tổng hợp các nghiên cứu liên quan đến xây dựng hệ thống định vị trong nhà trong quá khứ, so sánh các ưu điểm và nhược điểm của các công nghệ và thuật toán định vị được sử dụng trong hệ thống định vị trong nhà, qua đó phát triển một giải pháp định vị hiệu quả với chi phí tối ưu ứng dụng công nghệ băng thông siêu rộng và các thiết bị như Raspberry Pi Pico và bo mạch phát triển UWB Ai-thinker BU-03

Bài báo được cấu trúc như sau: Phần 2 sẽ tổng hợp các nghiên cứu trước đó về hệ thống định vị trong nhà. Phần 3 trình bày thiết kế hệ thống. Phần 4 trình bày kết quả thí nghiệm và Phần 5 đưa ra kết luận.

2. Tổng quan về hệ thống định vị trong nhà

2.1. Công nghệ

Công nghệ nhận dạng bằng sóng vô tuyến (Radio Frequency Identification - RFID) là hệ thống sử dụng sóng vô tuyến để nhận dạng và theo dõi đối tượng từ xa. Trong đó, RFID bị động chủ yếu phục vụ kiểm soát người và hàng hóa ra/vào với chi phí thấp, tuy nhiên tầm hoạt động hạn chế và không thể cung cấp thông tin vị trí chính xác [1]. RFID chủ động cải thiện được phạm vi và độ chính xác hơn (từ $\pm 0,5\text{--}1\text{ m}$) [3], song chi phí đầu tư và bảo trì cao, đồng thời tín hiệu dễ bị suy hao trong môi trường kim loại hoặc ẩm ướt. Wi-Fi là công nghệ mạng không dây phổ biến, có ưu điểm tận dụng hạ tầng sẵn có và vùng phủ rộng, nhưng độ chính xác thấp (khoảng $\pm 5\text{--}15\text{ m}$) [1] và chịu ảnh hưởng lớn từ nhiễu môi trường, khiến khả năng định vị chi tiết bị hạn chế. Bluetooth năng lượng thấp (Bluetooth Low Energy - BLE) là công nghệ truyền thông không dây tiêu thụ điện năng thấp, được sử dụng phổ biến nhờ chi phí rẻ, triển khai đơn giản và tương thích với nhiều thiết bị di động, tuy nhiên độ chính xác chỉ ở mức trung bình và không đáp ứng được các yêu cầu định vị thời gian thực với sai số nhỏ.

Khắc phục những hạn chế trên, công nghệ băng thông siêu rộng (Ultra-Wideband - UWB) nổi bật như một giải pháp IPS tiên tiến. UWB là một kỹ thuật truyền thông không dây sử dụng các xung tín hiệu rất ngắn (vài nano-giây) với băng thông lớn (thường trên 500 MHz). Công nghệ này hoạt động trong dải tần từ khoảng 3,1 GHz đến 10,6 GHz với mức công suất phát thấp nhằm hạn chế gây nhiễu đến các hệ thống vô tuyến khác. Nhờ đặc tính này, UWB cho phép truyền dữ liệu và đo khoảng cách với độ phân giải thời gian rất cao, từ đó đạt độ chính xác định vị cao, độ trễ thấp và ít bị ảnh hưởng bởi nhiễu đa đường. Mặc dù công nghệ này cũng tồn tại một số hạn chế như chi phí đầu tư và độ phức tạp triển khai của UWB còn tương đối lớn song công nghệ này đặc biệt phù hợp cho các ứng dụng đòi hỏi độ chính xác cao như theo dõi hàng hóa giá trị, robot tự hành và tự động hóa kho logistics, qua đó khẳng định vai trò vượt trội của UWB so với các công nghệ IPS truyền thống.

Các nghiên cứu sử dụng công nghệ băng thông siêu rộng UWB cho thấy ưu điểm lớn về độ chính xác cao. Alarifi và cộng sự [4] đã thực hiện một nghiên cứu tổng quan toàn diện về các công nghệ định vị trong nhà, trong đó UWB được đánh giá là giải pháp có độ chính xác cao nhất (vài centimet), phù hợp cho môi trường công nghiệp nơi tín hiệu Wi-Fi và BLE thường bị nhiễu. Tuy vậy, nhóm tác giả chỉ ra rằng chi phí đầu tư ban đầu cho thiết bị UWB và yêu cầu đồng bộ thời gian giữa các điểm neo (anchors) khiến công nghệ này khó phổ biến trong ứng dụng thực tế. Tiếp nối hướng nghiên cứu này, bài báo [5] đã phát triển một hệ thống định vị thời gian thực sử dụng UWB kết hợp thuật toán học máy (machine learning) cho quản lý kho hiệu quả. Hệ thống này sử dụng các thẻ (tags) và điểm neo (anchors) tự chế tạo, cùng thuật toán Time of Flight (ToF) và bộ lọc Kalman để định vị hàng hóa và phương tiện di chuyển. Kết quả cho thấy độ chính xác đạt mức centimet, đồng thời có khả năng trực quan hóa 3D vị trí của đối tượng trong kho. Tuy nhiên, hạn chế chính của mô hình là chi phí phần cứng cao và cấu hình hệ thống phức tạp, khó triển khai đại trà trong kho hàng vừa và nhỏ. Trong khi đó, nghiên cứu [6] đã đề xuất hệ thống định vị kết hợp UWB và thiết bị dẫn đường quán tính (Inertial navigation system - INS) với mục tiêu giảm chi phí triển khai. Thay vì sử dụng ba điểm neo UWB như thông thường, hệ thống này chỉ cần một điểm neo duy nhất có vị trí chưa xác định, sau đó dùng dữ liệu cảm biến quán tính để ước lượng vị trí neo trong giai đoạn khởi tạo. Kết quả cho thấy sai số định vị đạt dưới 1 m, đồng thời giảm hơn 80% chi phí so với hệ thống UWB truyền

thống. Tuy nhiên, hệ thống vẫn tồn tại độ trôi cảm biến (sensor drift) và phụ thuộc vào độ chính xác ban đầu của phép ước lượng INS.

2.2. Dữ liệu định vị

Các nghiên cứu hiện nay thường phân loại dữ liệu định vị thành 3 nhóm chính: Dữ liệu dựa trên thời gian, dữ liệu dựa trên cường độ tín hiệu và dữ liệu dựa trên góc.

Trong đó, các phương pháp dựa trên thời gian như Time of Flight (ToF), Time Difference of Arrival (TDoA) và ToA (Time of Arrival) được sử dụng rộng rãi nhờ khả năng cung cấp độ chính xác cao. Nguyên lý chung của các phương pháp này là đo thời gian truyền của tín hiệu giữa thiết bị phát và thiết bị thu, từ đó suy ra khoảng cách dựa trên vận tốc lan truyền của sóng [7]. Cụ thể, ToA đo trực tiếp thời gian tín hiệu truyền từ bộ phát đến bộ thu, trong khi TDoA khai thác sự chênh lệch thời gian tín hiệu đến nhiều anchor để xác định vị trí thông qua các đường hyperbol [8]. Các nghiên cứu chỉ ra rằng nhóm phương pháp này đạt độ chính xác cao (thậm chí ở mức centimet khi kết hợp với UWB), tuy nhiên yêu cầu đồng bộ thời gian chặt chẽ hoặc hạ tầng phần cứng phức tạp [9].

Ngược lại, dữ liệu dựa trên cường độ tín hiệu thu nhận (Received Signal Strength Indicator - RSSI) được sử dụng phổ biến nhờ chi phí thấp và dễ triển khai. RSSI ước lượng khoảng cách dựa trên suy hao công suất tín hiệu trong môi trường truyền dẫn [10]. Tuy nhiên, nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng độ chính xác của RSSI thường bị ảnh hưởng mạnh bởi nhiễu đa đường và suy hao tín hiệu, đặc biệt trong môi trường kho logistics có nhiều vật cản kim loại; dẫn đến sai số lớn hơn so với các phương pháp dựa trên thời gian [11].

Ngoài ra, dữ liệu định vị dựa trên góc thường được sử dụng để cải thiện độ chính xác trong các hệ thống định vị trong nhà. Phương pháp tiêu biểu là Angle of Arrival (AoA), trong đó vị trí của đối tượng được xác định dựa trên góc đến của tín hiệu tại các anchor. Thay vì đo khoảng cách như ToF hay RSSI, AoA sử dụng các mảng ăng-ten để ước lượng hướng truyền của sóng, từ đó xác định vị trí thông qua giao điểm của các tia góc [7]. AoA cho phép định vị với ít anchor hơn, nhưng đòi hỏi phần cứng ăng-ten phức tạp và đắt tiền [4].

Trong bối cảnh đó, dữ liệu ToF được lựa chọn làm cơ sở cho nghiên cứu nhờ độ chính xác và tính ổn định cao. ToF đo trực tiếp thời gian lan truyền tín hiệu (thường kết hợp với UWB), cho phép tính khoảng cách với sai số ở mức centimet đến decimet

trong môi trường trong nhà [5]. So với ToA, ToF giảm yêu cầu đồng bộ hóa nhờ kỹ thuật đo hai chiều (Two-Way Ranging) [9]. Đồng thời, so với TDoA và RSSI, ToF ít bị ảnh hưởng bởi nhiễu đa đường và suy hao tín hiệu, phù hợp với môi trường logistics phức tạp [4].

2.3. Thuật toán định vị

Thuật toán định vị đóng vai trò trong việc chuyển đổi dữ liệu đo lường (khoảng cách, thời gian, cường độ tín hiệu) thành tọa độ vị trí thực tế của đối tượng. Các nghiên cứu hiện nay phân loại thuật toán định vị thành hai phương pháp chính: Phương pháp dựa trên dữ liệu và phương pháp hình học.

Thuật toán Fingerprinting đại diện cho nhóm phương pháp dựa trên dữ liệu. Phương pháp này xây dựng một cơ sở dữ liệu tín hiệu trong giai đoạn offline, sau đó so khớp dữ liệu đo được trong thời gian thực để tìm ra vị trí của đối tượng [9]. Fingerprinting có ưu điểm là hoạt động tốt trong môi trường phức tạp, nơi các mô hình toán học khó mô phỏng. Tuy nhiên, nhược điểm lớn là chi phí xây dựng và duy trì cơ sở dữ liệu cao, đồng thời độ chính xác có thể suy giảm khi môi trường thay đổi [7].

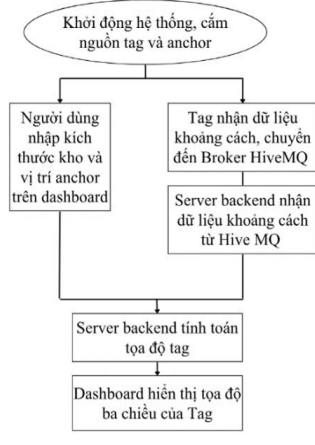
Nhóm phương pháp hình học bao gồm Trilateration (Định vị 3 điểm) và Multilateration (Định vị đa điểm), trong đó vị trí được xác định dựa trên quan hệ hình học giữa đối tượng và các anchor. Trilateration sử dụng khoảng cách từ ít nhất ba hoặc bốn anchor để xác định vị trí thông qua giao điểm của các đường tròn hoặc mặt cầu. Đây là thuật toán phổ biến nhất do tính đơn giản, dễ triển khai và phù hợp với các hệ thống sử dụng dữ liệu khoảng cách như ToF hoặc RSSI [4]. Trong khi đó, Multilateration là sự mở rộng của Trilateration, sử dụng nhiều phép đo hơn (TDoA hoặc ToA) để cải thiện độ chính xác thông qua các phương pháp tối ưu như bình phương tối thiểu. Các nghiên cứu cho thấy khi kết hợp với các công nghệ định vị có độ chính xác cao như UWB hoặc BLE, Trilateration có thể đạt sai số ở mức decimet, đáp ứng tốt yêu cầu trong kho bãi và cảng biển [9]. Do đó, Trilateration được xem là lựa chọn phù hợp nhằm đảm bảo sự cân bằng giữa độ chính xác, chi phí triển khai và khả năng ứng dụng thực tiễn trong các hệ thống định vị trong nhà.

3. Thiết kế hệ thống

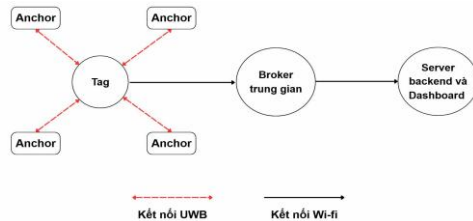
Hệ thống bao gồm 2 phần chính: Phần cứng bao gồm 2 loại thiết bị: Các tag gắn trên các mục tiêu cần định vị và anchor gắn ở các vị trí cố định trong kho, Phần mềm bao gồm server nhận dữ liệu định vị từ các

tag và dashboard để giao tiếp với người dùng. Tổng quan quá trình hoạt động của hệ thống được thể hiện ở Hình 1 và 2.

3.1. Nguyên lý định vị



Hình 1. Lưu đồ hoạt động tổng quan của hệ thống



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc của hệ thống

Nguyên lý định vị của hệ thống dựa trên hai phương pháp chính là đo khoảng cách bằng Two-Way Ranging và định vị bằng phương pháp Trilateration (định vị đa điểm). Two-Way Ranging (TWR) là một kỹ thuật xác định khoảng cách giữa hai thiết bị dựa trên việc đo thời gian bay (Time of Flight - ToF) của tín hiệu vô tuyến. Phương pháp này cực kỳ phổ biến trong các công nghệ định vị chính xác cao như UWB vì nó không yêu cầu các thiết bị phải đồng bộ hóa đồng hồ với nhau một cách tuyệt đối.

Nguyên lý cốt lõi là đo tổng thời gian một tín hiệu đi từ thiết bị A đến thiết bị B và quay trở lại. Quá trình đo được thực hiện thông qua việc trao đổi tín hiệu giữa Tag và Anchor. Cụ thể, tại thời điểm T_0 , Tag phát một tín hiệu đến Anchor. Anchor nhận tín hiệu này tại thời điểm T_1 , sau đó xử lý trong một khoảng thời gian nội bộ và phản hồi lại Tag tại thời điểm T_2 . Cuối cùng, Tag nhận được thông tin phản hồi này tại thời điểm T_3 . Dựa trên các thời điểm thu phát, ta có thể xác định các đại lượng thời gian như sau:

Thời gian phản hồi của Anchor:

$$T_{reply} = T_2 - T_1 \quad (1)$$

Thời gian khứ hồi của quá trình truyền nhận:

$$T_{round} = T_3 - T_0 \quad (2)$$

Thời gian truyền sóng (Time of Flight - ToF) được xác định theo công thức:

$$ToF = \frac{T_{round} - T_{reply}}{2} \quad (3)$$

Từ đó, ta xác định được khoảng cách giữa Tag và Anchor theo công thức:

$$d = ToF \times c \quad (4)$$

Trong đó: c là vận tốc ánh sáng, $c \approx 300000m/s$.

Sau khi có dữ liệu từ khoảng cách, tọa độ của vật cần định vị sẽ được xác định thông qua phương pháp định vị đa điểm yêu cầu tối thiểu 4 mốc định vị với khoảng cách xác định đến vật cần định vị. Tọa độ của vật cần định vị sẽ được xác định thông qua hệ phương trình:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = d_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = d_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = d_3^2 \\ (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 = d_4^2 \end{cases} \quad (5)$$

Trong đó:

(x, y, z) : Tọa độ Tag cần tìm;

(x_i, y_i, z_i) : Tọa độ Anchor thứ i ;

d_i : Khoảng cách đo được từ Tag tới Anchor thứ i .

Để xác định tọa độ ba chiều của Tag, hệ phương trình khoảng cách phi tuyến tính này được chuyển đổi thành một hệ phương trình tuyến tính có dạng $AX = B$ bằng cách thực hiện phép trừ giữa phương trình của Anchor đầu tiên và $n-1$ phương trình kế tiếp. Quá trình này giúp loại bỏ các hạng tử bậc hai (x^2, y^2, z^2) , từ đó thu được các ma trận như sau:

$$A = 2 \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 & z_n - z_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$B = \begin{bmatrix} d_1^2 - d_2^2 + K_2 - K_1 \\ d_1^2 - d_3^2 + K_3 - K_1 \\ \vdots \\ d_1^2 - d_n^2 + K_n - K_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Trong đó $K_i = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$ biểu diễn bình phương khoảng cách từ gốc tọa độ đến Anchor thứ i .

Khi đó, vector vị trí tối ưu $X = [x, y, z]^T$ được tính toán bằng cách sử dụng giả nghịch đảo Moore-Penrose như sau:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (8)$$

3.2. Phần cứng

Hai thiết bị chính sử dụng để cấu thành các tag và anchor là Raspberry Pi Pico W và bo mạch phát triển UWB Bu03 của Ai-thinker.



Hình 3. Mặt trước và sau của bo mạch phát triển Ai-thinker Bu03

Bo mạch phát triển UWB Bu03 Ai-thinker sử dụng module UWB DW3000, với tốc độ truyền dữ liệu dao động từ 850Kbps đến 6,8Mbps, tiêu thụ điện tương ứng từ 18,77mA đến 53,74mA qua nguồn USB type C. Module có bán kính kết nối khoảng 15m trong điều kiện nhiều vật cản và lên tới 30m trong môi trường lý tưởng. Module này được sử dụng để đo khoảng cách với các module cùng loại qua phương pháp TWR.



Hình 4. Mặt trước của Raspberry Pi Pico W 2022

Raspberry pi pico W với khả năng kết nối Wi-fi 2,4Ghz và Bluetooth 5,2 cho phép truyền tải dữ liệu với tốc độ lên đến 12Mbps và tiêu thụ điện năng tương ứng ở mức 40mA qua nguồn USB type A khi kết nối Wi-fi. Thiết bị này đóng vai trò truyền tải dữ liệu về khoảng cách lên server backend qua Wi-fi.

Tag bao gồm 2 thành phần chính: Module UWB được kết nối với Bu03 Ai-thinker thông qua dây jumper và breadboard, có nhiệm vụ đo khoảng cách đến các anchor qua kết nối UWB và Raspberry Pi Pico W gửi dữ liệu khoảng cách đo được đến server qua giao thức MQTT.

Anchor là các bo mạch phát triển Ai-thinker Bu03 đóng vai trò như các mốc định vị và được đặt ở các

tọa độ xác định trong không gian kho. Các anchor được bố trí sao cho mỗi điểm trong kho nằm trong bán kính hoạt động của ít nhất 4 Anchor không đồng phẳng để đảm bảo đủ dữ liệu cho thuật toán Trilateration.

3.3. Giao thức MQTT

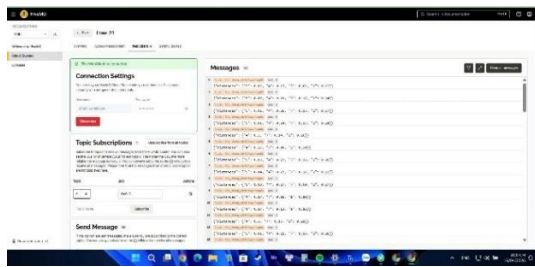
Dữ liệu về khoảng cách sẽ được trao đổi thông qua giao thức truyền tin nhẹ (Message Queuing Telemetry Transport - MQTT). Đây là một giao thức truyền thông hoạt động theo cơ chế Publish/Subscribe (Xuất bản/Đăng ký), được thiết kế cho các hệ thống có băng thông hạn chế và yêu cầu tiêu thụ năng lượng thấp. Trong mô hình này, Broker (máy chủ môi giới) chịu trách nhiệm tiếp nhận, phân loại và chuyển tiếp các gói tin từ thiết bị gửi (Publisher) đến các thiết bị nhận (Subscriber) thông qua các kênh định danh gọi là Topic.

Trong hệ thống đề xuất, sau khi nhận được dữ liệu khoảng cách từ bo mạch phát triển Ai-thinker Bu03, Raspberry Pi Pico đóng vai trò Publisher, gửi dữ liệu khoảng cách thông qua Wi-fi lên một máy chủ trung gian. Máy chủ này là HiveMQ (nền tảng MQTT Broker) - một dịch vụ môi giới tin nhắn hỗ trợ giao thức MQTT, có chức năng tiếp nhận, quản lý và phân phối dữ liệu giữa các thiết bị trong hệ thống. Cụ thể, HiveMQ hoạt động như một Broker, nhận các bản tin từ Publisher và chuyển tiếp đến các thiết bị đã đăng ký nhận dữ liệu. Server backend sau đó đóng vai trò là Subscriber nhận dữ liệu khoảng cách từ HiveMQ.

3.4. Phần mềm

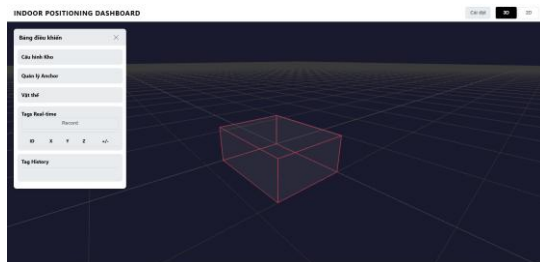
Phần mềm của hệ thống bao gồm server backend với vai trò chạy thuật toán định vị từ dữ liệu khoảng cách nhận được và dashboard hiển thị trực quan vị trí ba chiều.

Server backend bao gồm 2 module chính với lần lượt các vai trò nhận thông tin từ các tag qua giao thức MQTT và chạy thuật toán định vị. Module tiếp nhận dữ liệu khoảng cách duy trì kết nối liên tục với HiveMQ, nhận các gói thông tin dưới định dạng JavaScript Object Notation (JSON) - một định dạng dữ liệu dạng văn bản, giúp biểu diễn và trao đổi dữ liệu một cách nhẹ, dễ đọc và dễ xử lý. Các dữ liệu JSON sau khi nhận sẽ được phân tách, sắp xếp dữ liệu khoảng cách tương ứng với số thứ tự anchor. Module thuật toán định vị xử lý dữ liệu khoảng cách bằng thuật toán trilateration, kết hợp với dữ liệu về vị trí các anchor để định vị tag.



Hình 5. Cấu trúc bản tin dữ liệu định dạng JSON

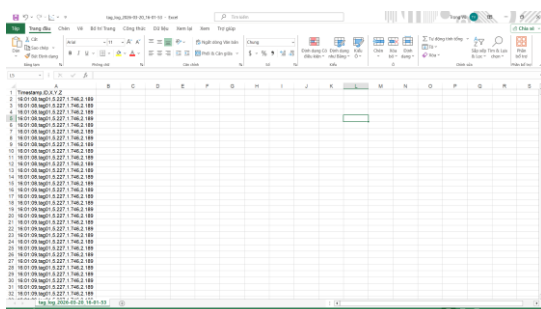
Dashboard đóng vai trò hiển thị trực quan vị trí trong thời gian thực, cùng với một số tính năng cho phép người dùng tùy chỉnh vị trí của anchor và nhập kích thước kho. Người dùng cũng có thể nhập tọa độ và kích thước của một số vật cản dưới dạng các hình hộp chữ nhật, qua đó mô phỏng tương đối không gian định vị.



Hình 6. Dashboard hiển thị tọa độ ba chiều

Tính năng Record cho phép người dùng có thể ghi lại tọa độ liên tục của Tag trong 1 khoảng thời gian. Các tọa độ này được tổng hợp ở phần Tag History và có thể được tải về dưới dạng file CSV như sau:

Các thông tin định vị bao gồm Timestamp (Nhãn thời gian), ID (số hiệu của Tag) và tọa độ ba chiều X, Y, Z của Tag.



Hình 7. File CSV truy xuất tọa độ vị trí của Tag

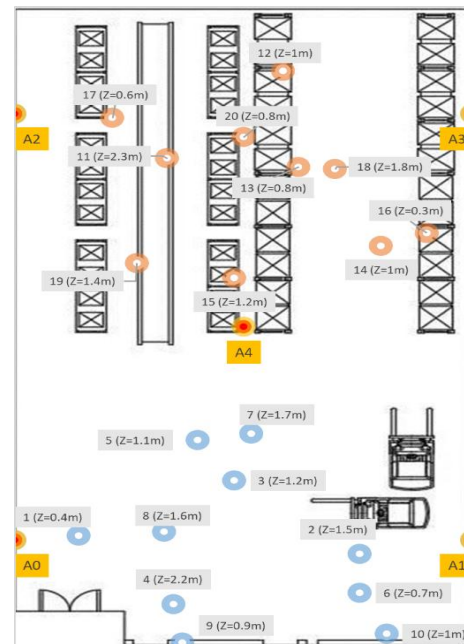
4. Đánh giá độ chính xác

4.1. Thiết kế thí nghiệm

Thí nghiệm được tiến hành tại kho mô phỏng của

Trung tâm đào tạo Logistics tiểu vùng sông Mekong - Nhật Bản tại Việt Nam. Kho có diện tích 15x30m, được bố trí 4 dãy kệ kim loại 3 tầng, sử dụng các pallet bằng nhựa và gỗ. Hàng hóa bên trong bao gồm các hộp xốp và kiện hàng bằng gỗ. Ngoài ra, không gian kho còn có 2 xe nâng cùng 1 hệ thống băng chuyền.

Để đảm bảo tính chính xác, các khoảng cách tham chiếu thực tế đều được đo bằng thước laser Xiaomi Duka LS-P với sai số thiết bị dưới 2mm. 10 Anchor được chia ra thành 5 cặp và được bố trí ở các điểm từ A₀ đến A₄ như Hình 8. Mỗi cặp bao gồm một anchor trên mặt đất và một Anchor treo trên tường với độ cao 4,2m từ mặt sàn kho. Quá trình thử nghiệm được thực hiện đối với Tag ở hai trạng thái: tĩnh và động. Các bo mạch phát triển Bu03 trên Tag và Anchor được cấu hình với tần suất đo khoảng cách là 500 lần/phút. Tag được cấu hình để gửi dữ liệu khoảng cách đến Broker với tần suất tương tự.



Hình 8. Vị trí đặt Anchor và các tọa độ tham chiếu (1-20) cùng chiều cao Z

Ở trạng thái tĩnh, nhóm nghiên cứu chọn ra 20 tọa độ tham chiếu, được thể hiện trong Hình 8. Tại mỗi điểm, 500 mẫu tọa độ được thu thập liên tục trong khoảng 1 phút và trích xuất thông qua file CSV từ hệ thống nhằm tính toán độ phân tán của dữ liệu thông qua độ lệch chuẩn (Standard Deviation - SD) và sai số trung bình bình phương (Root Mean Square Error - RMSE) của tọa độ vị trí trên hệ thống so sánh với tọa độ tham chiếu.

Ở thí nghiệm động, Tag được gắn lên xe đẩy hàng ở độ cao cố định là 0,8m và di chuyển theo các đoạn

thăng được đánh dấu trên mặt sàn kho.

Vị trí của Tag sẽ được trích xuất thông qua tính năng Record và Tag History trên Dashboard. Dữ liệu từ các file CSV sẽ được sử dụng để tính toán sai số và độ lệch chuẩn trên phần mềm Excel.

RMSE theo từng trục ở các điểm tham chiếu được tính lần lượt qua các công thức sau:

$$RMSE_k = \sqrt{\frac{1}{500} \sum_{i=1}^{500} (\hat{k}_i - k_i)^2} \quad (9)$$

Trong đó:

$RMSE_k$: Căn bậc hai của sai số toàn phương trung bình tính riêng trên một trục (x, y hoặc z);

$\hat{k}_i$: Tọa độ trên hệ thống tại điểm đo thứ i trên trục tương ứng (ví dụ: $\hat{x}_i$);

k_i : Tọa độ tham chiếu tại điểm đo thứ i trên trục tương ứng (ví dụ: x_i);

RMSE theo mặt phẳng ngang (x, y) và RMSE theo ba chiều (x, y, z) được tính lần lượt theo các công thức sau:

$$RMSE_{xy} = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} \quad (10)$$

$$RMSE_{3D} = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2 + RMSE_z^2} \quad (11)$$

Tương tự, SD theo từng trục tham chiếu, theo mặt phẳng (x, y) và SD theo ba chiều (x, y, z) được tính lần lượt theo các công thức sau:

$$SD_k = \sqrt{\frac{1}{500} \sum_{i=1}^{500} (e_{k,i} - \bar{e}_k)^2} \quad (12)$$

Trong đó:

SD_k : Độ lệch chuẩn tính riêng trên một trục (x, y hoặc z);

$e_{k,i}$: Sai số đo được tại phép đo thứ i trên trục k ;

$\bar{e}_k$: Sai số trung bình của toàn bộ 500 mẫu dữ liệu trên trục k .

$$SD_{xy} = \sqrt{SD_x^2 + SD_y^2} \quad (13)$$

$$SD_{3D} = \sqrt{SD_x^2 + SD_y^2 + SD_z^2} \quad (14)$$

Ở thí nghiệm động, sai số theo thời gian thực được tính qua sai số mặt phẳng (x, y) và sai số trục z như sau:

$$E_{3D} = \sqrt{e_{xy}^2 + e_z^2} \quad (15)$$

Trong đó:

E_{3D} : Khoảng cách sai số tuyệt đối trong không gian ba chiều thực tế;

e_{xy} : Sai số trên mặt phẳng 2D;

e_z : Sai số theo trục z .

Sai số mặt phẳng (x, y) được xác định bằng khoảng cách ngắn nhất giữa vị trí Tag và các đoạn thẳng trên quỹ đạo tham chiếu, được tính qua công thức sau:

$$e_{xy} = \frac{|(y_2 - y_1)x_0 - (x_2 - x_1)y_0 + x_2y_1 - y_2x_1|}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (16)$$

Trong đó:

e_{xy} : Sai số điều hướng trên mặt phẳng 2D;

x_0, y_0 : Tọa độ thực tế của Tag trên mặt phẳng ngang tại thời điểm đo;

x_1, y_1 : Tọa độ của điểm mốc thứ nhất trên đoạn quỹ đạo tham chiếu;

x_2, y_2 : Tọa độ của điểm mốc thứ hai trên đoạn quỹ đạo tham chiếu.

Sai số trục z (chiều cao) được tính qua công thức:

$$e_z = |z_0 - Z_{ref}| \quad (17)$$

Trong đó:

e_z : Sai số duy trì độ cao (theo trục Z);

z_0 : Độ cao đo thực tế của Tag tại thời điểm xét;

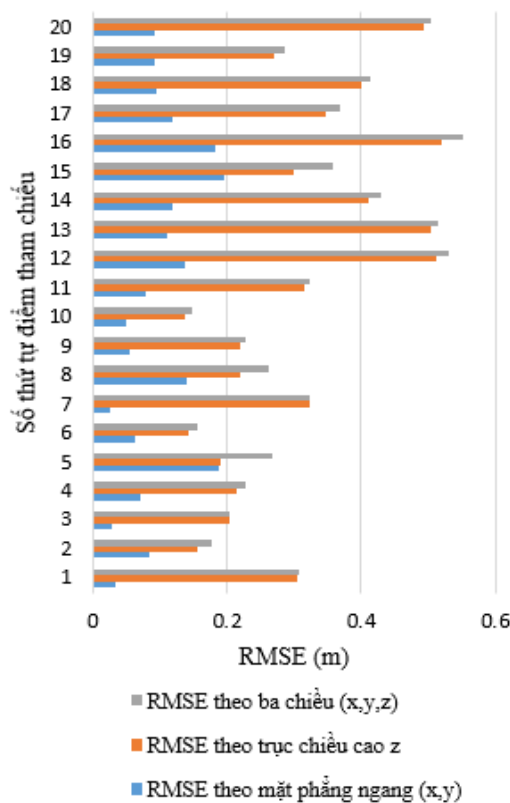
Z_{ref} : Độ cao mục tiêu được thiết lập cho quỹ đạo.

4.2. Kết quả thí nghiệm

Hình 9 cho thấy trong môi trường ít vật cản (vị trí từ 1 đến 10), hệ thống đạt được độ chính xác tốt với RMSE theo ba chiều (x, y, z) duy trì từ 0,1m đến 0,3m. Tuy nhiên, ở các vị trí trong môi trường nhiều vật cản (từ 11 đến 20), RMSE theo ba chiều (x, y, z) tăng lên mức từ 0,3m đến 0,5m. Hệ thống đạt được độ chính xác dưới 0,2m ở tất cả các vị trí khi chỉ xét đến tọa độ của hai trục x, y (mặt phẳng ngang). Phần lớn các điểm ở môi trường ít vật cản có thể đạt được mức RMSE mặt phẳng ngang dưới 0,1m.

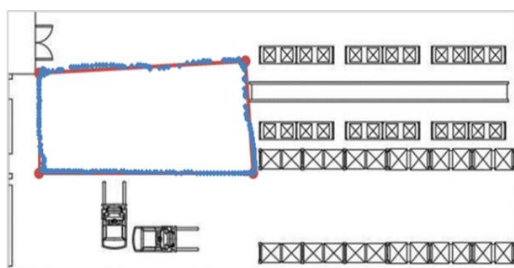
Kết quả về độ phân tán (Hình 10) cho thấy ở các vị trí trong môi trường ít vật cản, hệ thống cho thấy độ ổn định cao với SD tối đa không vượt quá 0,1m và dưới 0,03m ở đa số các điểm. Phần lớn các điểm ở môi trường nhiều vật cản cũng duy trì mức SD dưới 0,1m, tuy nhiên vẫn có thể nhận thấy mức SD cao hơn nhiều so với môi trường ít vật cản, lên tới trên 0,1m ở một số vị trí. Kết quả thí nghiệm cũng cho thấy độ ổn định tốt của hệ thống trên mặt phẳng ngang, khi sai số trên mặt phẳng ngang (x, y) luôn duy trì dưới 0,06m.

Tuy nhiên, kết quả từ cả hai Hình 9 và 10 đều cho thấy trục z (chiều cao) là thành phần sai số lớn nhất và



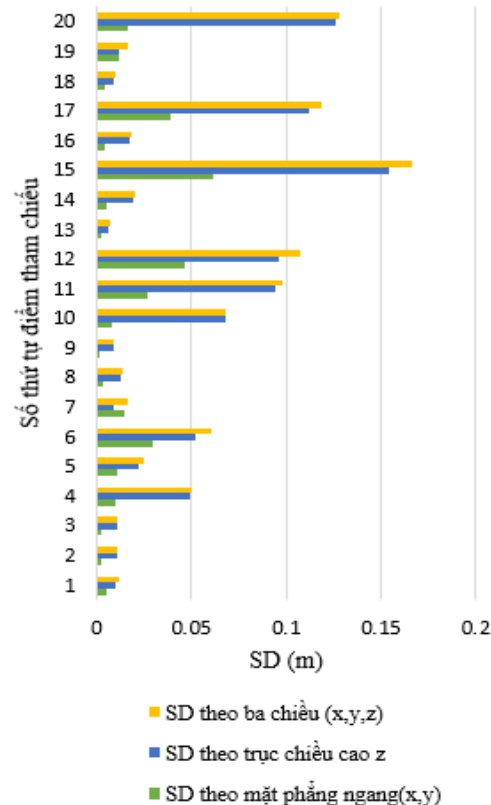
Hình 9. Kết quả RMSE của thí nghiệm tĩnh

thiếu ổn định nhất trong toàn hệ thống. Giá trị RMSE theo trục z thường xuyên tiệm cận với RMSE theo ba chiều (x, y, z) tại đa số các điểm tham chiếu, cho thấy sai số chiều cao chiếm ưu thế so với sai số mặt phẳng ngang (x, y) . Độ lệch chuẩn (SD) theo trục z dao động từ dưới 0,05m đến 0,15m, cao hơn đáng kể so với SD trên mặt phẳng ngang vốn luôn duy trì dưới 0,07m.



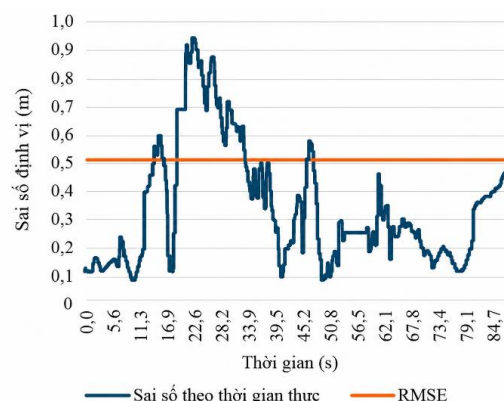
Hình 11. So sánh quỹ đạo của Tag ghi nhận trên hệ thống so với đường tham chiếu 1

Nguyên nhân dẫn đến độ chính xác thấp theo trục z có thể xuất phát từ cách bố trí các Anchor. Do điều kiện thí nghiệm trong kho hàng không có nhiều điểm có thể gắn Anchor, nhóm nghiên cứu chỉ có thể phân bố các Anchor tại hai mức độ cao cố định (0m và 4,2m), trong khi tọa độ x và y trải đều trên diện tích



Hình 10. Kết quả SD của thí nghiệm tĩnh

15x30 m của kho. Sự phân bố hạn chế theo chiều đứng dẫn đến chỉ số GDOP (Geometric Dilution of Precision) theo trục z không thuận lợi như theo mặt phẳng ngang (x, y) . Bên cạnh đó, tình trạng NLOS (Non-Line-of-Sight) ảnh hưởng lớn đến các Anchor treo cao vì tín hiệu phải xuyên qua kệ hàng nhiều tầng, kiện hàng và thiết bị trong khi trục x, y vẫn còn nhiều Anchor ở mặt đất bù trừ.

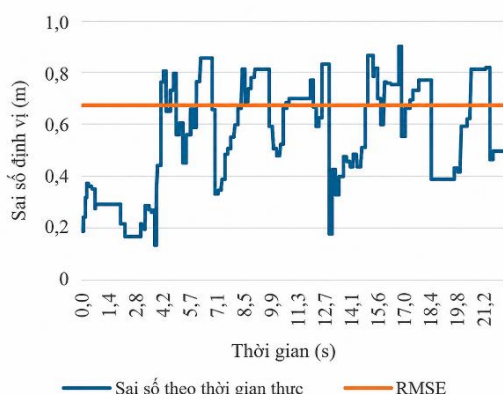


Hình 12. Kết quả thí nghiệm động đường tham chiếu 1

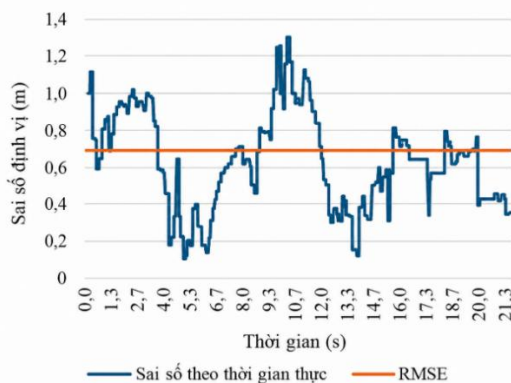
Kết quả thí nghiệm động ở môi trường ít vật cản cho thấy độ chính xác ở mức dưới 1m, với RMSE vào khoảng 0,5m, được thể hiện ở Hình 12. Tuy nhiên độ

chính xác và độ ổn định của hệ thống giảm khi Tag đến gần khu vực nhiều vật cản hơn, thể hiện ở Hình 11 khi xuất hiện các khoảng trống trên quỹ đạo Tag so với đường tham chiếu.

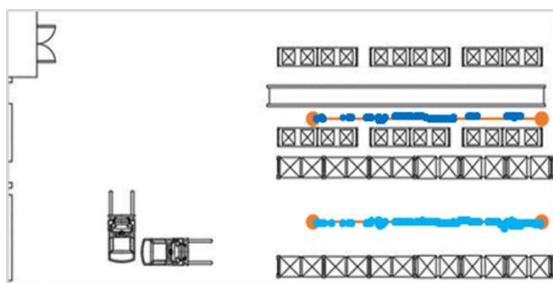
Ở môi trường nhiều vật cản hơn, sai số của hệ thống tăng lên đáng kể, thể hiện trong Hình 13 và 14. Ở đường tham chiếu 2, RMSE ở mức 0,67m, với sai số theo thời gian thực biến động liên tục, thường xuyên chạm ngưỡng 0,8m. Ở đường tham chiếu 3 với kệ hàng và dải băng chuyền, sai số vượt ngưỡng 1m, cao nhất lên tới 1,2m, RMSE đạt 0,72m.



Hình 13. Kết quả thí nghiệm động đường tham chiếu 2



Hình 14. Kết quả thí nghiệm động đường tham chiếu 3



Hình 15. So sánh quỹ đạo của Tag với đường tham chiếu 2 (xanh nhạt) và 3 (xanh đậm)

Đồng thời, tình trạng Tag mất kết nối với các

Anchor xảy ra thường xuyên hơn ở môi trường nhiều vật cản (Hình 15), đặc biệt ở đường tham chiếu 3 khi xuất hiện nhiều khoảng trống rõ rệt trên đường đi của Tag so với đường tham chiếu.

5. Kết luận

Bài báo này trình bày quy trình thiết kế và xây dựng một hệ thống định vị trong nhà dựa trên công nghệ băng thông siêu rộng (UWB), đạt được độ chính xác ở mức decimet trong quá trình thử nghiệm thực tế tại môi trường nhà kho. Hệ thống cho thấy độ ổn định cao trên mặt phẳng ngang (x, y) với giá trị RMSE dao động từ 0,15m đến 0,3m. Tuy nhiên, một số thách thức về hiệu suất đã được ghi nhận trong điều kiện không có đường truyền thẳng (NLOS) và theo trục thẳng đứng (z), khi sai số vượt quá 0,5m. Bên cạnh đó, việc phụ thuộc vào broker đám mây như HiveMQ có thể gây ra độ trễ, trong khi việc chuyển sang broker cục bộ như Mosquitto có thể mang lại hiệu suất thời gian thực đáng tin cậy hơn, đặc biệt trong các kịch bản điện toán biên, nơi yêu cầu độ trễ thấp là yếu tố quan trọng.

Để giải quyết những hạn chế này và nâng cao độ chính xác, các nghiên cứu trong tương lai sẽ tập trung vào việc mở rộng thử nghiệm nhằm đánh giá độ trễ của hệ thống, đồng thời tích hợp thêm các cảm biến đo lường quán tính (IMU) để đảm bảo tính liên tục của định vị khi tín hiệu UWB tạm thời bị che khuất bởi các vật cản môi trường. Hàm phân phối tích lũy (CDF) cũng sẽ được nghiên cứu trong các công trình tiếp theo nhằm đánh giá sai số định vị một cách toàn diện hơn. Ngoài ra, việc tối ưu hóa hình học tương đối của các Anchor thông qua phân tích GDOP và nghiên cứu các chiến lược tiết kiệm năng lượng cũng sẽ được triển khai, nhằm xây dựng một giải pháp định vị trong nhà hoàn chỉnh và hiệu quả hơn.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: SV25-26.84.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Vaccari, L., Coruzzolo, A. M., Lolli, F. & Sellitto, M. A. (2024), *Indoor Positioning Systems in Logistics: A Review*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
 Doi: 10.3390/logistics8040126.
- [2] *Chiếm gần 98% tổng số doanh nghiệp, doanh nghiệp nhỏ và vừa đang ở đâu trong nền kinh tế (2025)*, Retrieved from <https://baodautu.vn/chiem-gan-98-tong-so-doanh-nghiep-doanh-nghiep-nho-va-vua-dang-o-dau-trong-nen-kinh-te-d249574.html>.

- [3] Huang, C. H., Lee, L. H., Ho, C. C., Wu, L. L. & Lai, Z. H. (2015), *Real-time RFID indoor positioning system based on kalman-filter drift removal and heron-bilateration location estimation*, IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol.64(3), pp.728-739.
 Doi: 10.1109/TIM.2014.2347691.
- [4] Alarifi, A. et al. (2016), *Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances*, MDPI AG.
 Doi: 10.3390/s16050707.
- [5] Gnaś, D. et al. (2024), *Enhanced Indoor Positioning System Using Ultra-Wideband Technology and Machine Learning Algorithms for Energy-Efficient Warehouse Management*, Energies (Basel)., Vol.17(16).
 Doi: 10.3390/en17164125
- [6] Tian, Q., K. I. K. Wang & Salcic, Z. (2019), *A Low-Cost INS and UWB Fusion Pedestrian Tracking System*, IEEE Sens. J., Vol.19(10), pp.3733-3740.
 Doi: 10.1109/JSEN.2019.2894714.
- [7] Zhang, X., Tan, Y. C., Tai, V. C. & Hao, Y. (2024), *Indoor positioning system for warehouse environment: A scoping review*, Journal of Mechanical Engineering and Sciences, pp.10350-10381.
 Doi: 10.15282/jmes.18.4.2024.9.0815.
- [8] Elsanhoury, M. et al. (2022), *Precision Positioning for Smart Logistics Using Ultra-Wideband Technology-Based Indoor Navigation: A Review*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.,
 Doi: 10.1109/ACCESS.2022.3169267.
- [9] Che, F., Ahmed, Q. Z., Lazaridis, P. I., Sureephong, P. & Alade, T. (2023), *Indoor Positioning System (IPS) Using Ultra-Wide Bandwidth (UWB) - For Industrial Internet of Things (IIoT)*, Sensors, Vol.23(12).
 Doi: 10.3390/s23125710.
- [10] Silvia, Z., Martina, C., Fabio, S. & Alessandro, P. (2018), *Ultra Wide Band Indoor Positioning System: analysis and testing of an IPS technology*, IFAC-PapersOnLine, Vol.51(11).
 Doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.292.
- [11] Motroni, A., Buffi, A. & Nepa, P. (2021), *Forklift tracking: Industry 4.0 implementation in large-scale warehouses through uwb sensor fusion*, Applied Sciences (Switzerland), Vol.11(22).
 Doi: 10.3390/app112210607.

Ngày nhận bài:	09/04/2026
Ngày nhận bản sửa:	10/05/2026
Ngày duyệt đăng:	17/05/2026