

IPWSEP - NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP ĐỊNH VỊ TRONG NHÀ SỬ DỤNG CẢM BIẾN ĐEO TRONG TRƯỜNG HỢP KHẨN CẤP

IPWSEP - INVESTIGATION OF AN INDOOR POSITIONING SYSTEM
BASED ON WEARABLE SENSORS FOR EMERGENCY RESPONSE

Đào Tô Hiệu^{1,2}, Trần Đức Nghĩa³, Bùi Việt Hoàn¹,
Dương Chính Cường¹, Vũ Hoàng Diệu¹, Trần Đức Tân^{1*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2026.043>

TÓM TẮT

Định vị trong nhà trong các tình huống khẩn cấp là một thách thức lớn, đặc biệt với lính cứu hỏa hoạt động trong môi trường nhiều khói, nhiệt độ cao và không có tín hiệu GPS. Nghiên cứu này trình bày một phương pháp định vị trong nhà trên mặt phẳng 2D theo thời gian thực, sử dụng cảm biến đeo. Một thiết bị đeo tại vùng eo sẽ nhận dạng hành động, phát hiện bước chân và xác định hướng di chuyển. Tiếp theo, hai thiết bị gắn ở cổ bàn chân được tích hợp công nghệ băng thông siêu rộng để đo khoảng cách giữa hai chân, từ đó ước lượng độ dài bước chân. Hệ thống thiết bị đeo trao đổi thông qua mạng Bluetooth năng lượng thấp. Kết quả thực nghiệm cho thấy sai số định vị trung bình nhỏ hơn 0,6m, sai số trung bình tuyệt đối trong ước lượng bước chân dưới 3,86cm. Phương pháp phù hợp với các chuỗi bước đi liên tục có sự thay đổi về độ dài bước và chuyển động không đồng đều của lính cứu hỏa.

Từ khóa: Định vị trong nhà, lính cứu hỏa, UWB, gia tốc, cảm biến đeo.

ABSTRACT

Indoor positioning in emergency environments remains a critical yet unresolved challenge, particularly for firefighters operating in smoke-filled or GPS-denied areas. This study investigates an 2D-Indoor Positioning System method using wearable sensors designed for emergency response applications. The proposed system employs a waist-mounted device integrating an accelerometer to recognize actions, estimate step events, and determine movement direction in real time. Additionally, two ankle-mounted modules communicate with the waist unit via Bluetooth Low Energy and incorporate Ultra-Wideband technology to measure inter-foot distances for step-length estimation. Experimental results demonstrate that the system achieves a positioning error of less than 0,6m, with a mean absolute error of step-length estimation under 3,86cm. The method shows robust performance in continuous walking sequences involving variable stride lengths and non-uniform motion patterns, which are typical in emergency operations. The method is suitable for continuous walking sequences with varying stride lengths and irregular movements of firefighters.

Keywords: Indoor positioning system, firefighter, UWB, accelerometer, wearable sensor.

¹Khoa Điện - Điện tử, Trường Kỹ thuật, Đại học Phenikaa

²Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

³Viện Công nghệ thông tin, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

*Email: tan.tranduc@phenikaa-uni.edu.vn

Ngày nhận bài: 28/10/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 08/12/2025

Ngày chấp nhận đăng: 30/3/2026

1. GIỚI THIỆU

Quá trình đô thị hóa diễn ra nhanh chóng đang đặt ra những thách thức đáng kể đối với an toàn xây dựng và phòng cháy chữa cháy [1] trên toàn thế giới. Theo World

Urbanization Prospects 2018 khoảng 55% dân số toàn cầu sinh sống tại các khu vực đô thị vào năm 2018 và con số này được dự đoán sẽ đạt gần 68% vào năm 2050. Song song đó, sự gia tăng nhanh chóng của các công trình xây

dụng nhưng thiếu sự giám sát trong quá trình thi công, dẫn đến nhiều công trình kém chất lượng, không đảm bảo an toàn cho con người [2]. Cùng với đó, sự xuống cấp dần theo thời gian của các hệ thống cứu hộ và phòng cháy chữa cháy đã gây ra những hậu quả nghiêm trọng khi sự cố bất ngờ xảy ra [3].

Các vụ cháy quy mô lớn và phức tạp tiềm ẩn nhiều rủi ro, nguy hiểm cho lính cứu hỏa trong quá trình tìm kiếm và cứu nạn [4]. Họ thường xuyên phải đối mặt với nhiệt độ cao [5], khói độc [6], và nguy cơ sụp đổ kết cấu [7]. Môi trường trong nhà thường có tầm nhìn hạn chế [8] và nhiều âm thanh hỗn tạp [9]. Trong bối cảnh hoả hoạn, bản thân lính cứu hỏa có thể trở thành nạn nhân và cần được sự trợ giúp kịp thời.

Một thách thức lớn mà lính cứu hỏa phải đối mặt là sự thiếu hụt các công cụ và giải pháp hỗ trợ trong công việc [10]. Việc ứng dụng khoa học và công nghệ góp phần quan trọng trong việc nâng cao an toàn cho lính cứu hỏa [11]. Có ba hướng tiếp cận chính, bao gồm: i) Cải thiện trang bị bảo hộ [12]; ii) Giám sát tâm lý chiến sĩ trong môi trường căng thẳng [13]; iii) Phát triển hệ thống giám sát tình trạng hoạt động, truyền thông tin hiện trạng chiến sĩ tại hiện trường để hỗ trợ người chỉ huy ra quyết định [14]. Trong đó, duy trì thông tin liên lạc liên tục giữa sở chỉ huy và lực lượng tuyến đầu đóng vai trò then chốt cho phối hợp tác chiến hiệu quả [15].

Xác định vị trí của lính cứu hỏa gặp nạn giúp người chỉ huy chủ động phương án cứu hộ và phân bổ nguồn lực hợp lý, tránh sự tìm kiếm trùng lặp không đáng có [16]. Tuy nhiên, các phương thức liên lạc truyền thống như bộ đàm hai chiều thường chỉ cung cấp thông tin rời rạc và thiếu khả năng theo dõi trạng thái theo thời gian thực của từng cá nhân [17]. Điều này gây cản trở đáng kể đến quá trình phối hợp cứu hộ, đặc biệt trong các tình huống không thể xác định được vị trí hoặc tình trạng của lính cứu hỏa khi họ bất tỉnh hoặc mất khả năng di chuyển [18]. Sự thiếu hụt thông tin về tình trạng và vị trí thực tế của từng lính cứu hỏa tạo ra thách thức lớn đối với công tác chỉ huy và phối hợp cứu hộ [19]. Để định vị trong nhà, có ba hướng tiếp cận chính: (i) Dựa trên các điều kiện đã được thiết lập để theo dõi và xác định vị trí [20]; (ii) Dựa trên dữ liệu quán tính (Inertial Measurement Unit - IMU), không yêu cầu thiết lập trước các điều kiện [21]; (iii) Sự kết hợp giữa khai thác đồng thời dữ liệu từ các cảm biến đeo với các công nghệ cần thiết lập trước [22].

Trong đó, phương pháp dựa trên các điều kiện thiết lập sẵn thường sử dụng các công nghệ định vị không dây như Wi-Fi, Bluetooth, hay Ultra-Wideband (UWB) để xác

định vị trí của đối tượng trong môi trường trong nhà. Nghiên cứu [23] cho thấy phương pháp định vị dựa trên Wi-Fi có thể đạt độ chính xác cao khi tận dụng cường độ tín hiệu thu được (RSSI) bằng cách sử dụng bề mặt đặc biệt được tạo từ siêu vật liệu (metamaterial) có khả năng thay đổi cách phản xạ sóng vô tuyến. Tuy nhiên, Wi-Fi vẫn bị giới hạn bởi khả năng xuyên thấu và chịu ảnh hưởng mạnh từ nhiễu đa đường (multipath interference). Công nghệ UWB thể hiện ưu thế vượt trội về độ chính xác và khả năng xuyên vật cản, giúp định vị hiệu quả trong các môi trường khắc nghiệt [24]. Nhiều nghiên cứu đã tập trung vào việc nâng cao hiệu suất của hệ thống định vị UWB bằng cách áp dụng các kỹ thuật khác nhau. Chẳng hạn, bản đồ sai số thích ứng dựa trên bộ lọc Particle được đề xuất trong giúp cải thiện độ chính xác dựa trên dữ liệu đo thực nghiệm. Trong [25], phương pháp định vị Mixture Monte-Carlo được sử dụng để ước lượng vị trí robot dựa trên UWB, trong khi nghiên cứu [26] khai thác các phép đo góc không kết hợp (non-coherent angular measurements) với một trạm mốc (anchor) duy nhất để xác định vị trí. Tuy nhiên, các phương pháp này vẫn chịu ảnh hưởng của nhiễu phản xạ, khúc xạ và che khuất trong điều kiện không có đường truyền thẳng (NLoS), dẫn đến sai số định vị đáng kể.

Với hướng tiếp cận dựa trên dữ liệu quán tính, nghiên cứu [27] đã triển khai định vị trong nhà (Indoor Positioning System-IPS) dựa trên IMU gắn ở bàn chân để ước lượng quỹ đạo di chuyển của người dùng với kỹ thuật Pedestrian Dead Reckoning (PDR). Thuật toán kết hợp kỹ thuật Zero Velocity Update (ZUPT) để hiệu chỉnh sai số khi bàn chân chạm đất, cùng với Zero Angular Rate Update (ZARU) để giảm trôi góc quay, và bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) để ước lượng chính xác vị trí và hướng di chuyển. Kết quả đạt sai số trung bình khoảng 0,88m (tương đương 0,2 - 1,73% quãng đường). Nghiên cứu [28] đã tiến hành kiểm chứng hệ thống gồm 2 IMU gắn ở 2 chân trong các thử nghiệm đi bộ trong nhà có quãng đường từ vài trăm mét đến hơn 1km. Kết quả cho thấy việc áp dụng ràng buộc khoảng cách giữa hai bàn chân giúp giảm sai số vị trí xuống dưới 1% tổng quãng đường di chuyển, trong khi hệ thống chỉ dùng một IMU có thể vượt quá 2%. Ngoài ra, khi mở rộng sang mô hình định vị hợp tác (cooperative localization) giữa nhiều người, sai số định vị tổng thể giảm thêm khoảng 30%, chứng minh tính hiệu quả của việc khai thác tương quan không gian giữa các cảm biến quán tính để bù sai số trôi trong định vị quán tính độc lập. Cùng vị trí đặt cảm biến tại chân, nghiên cứu [29] tập trung giải quyết vấn đề trôi hướng (heading drift) trong hệ thống PDR. Theo nghiên cứu này, độ rộng băng tần

của cảm biến (sensor bandwidth) ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác của phép đo góc quay, từ đó gây sai lệch hướng di chuyển theo thời gian. Để khắc phục, mô hình hiệu chỉnh sai số góc quay được đề xuất dựa trên phân tích đáp ứng tần số của cảm biến, qua đó tối ưu tham số lọc và giảm sai lệch hướng trong quá trình ước lượng quỹ đạo. Kết quả cho thấy mô hình đề xuất giúp độ lệch hướng tích lũy giảm hơn 40% so với hệ thống PDR thông thường. Với việc đặt IMU lên ngực, nghiên cứu [30] đã áp dụng mô hình hồi quy tuyến tính (linear regression) để ước lượng chiều dài bước, từ đó tính toán quãng dịch chuyển của người dùng. Để nâng cao độ chính xác của phép định vị, hệ thống được kết hợp thuật toán map-matching dựa trên lọc hạt (particle filtering) nhằm hiệu chỉnh vị trí và hướng di chuyển, đồng thời tích hợp cảm biến khí áp kế (barometer) để xác định cao độ, hỗ trợ định vị 3D trong các tòa nhà nhiều tầng. Kết quả thử nghiệm cho thấy hệ thống đạt sai số trung bình 5,2m sau quãng đường 800m. Nhìn chung với dữ liệu quán tính, việc sai số tích lũy là khó tránh khỏi và càng khó kiểm soát nếu dáng đi người sử dụng biến đổi bất thường như bước ngắn, bước dài.

Hướng tiếp cận kết hợp IMU với các công nghệ truyền thông cho phép tận dụng ưu điểm của cả hai nguồn dữ liệu, gồm UWB cung cấp thông tin vị trí tuyệt đối chính xác và IMU cung cấp dữ liệu gia tốc, vận tốc và góc quay liên tục. Trong nghiên cứu [31], phương pháp hợp nhất cảm biến chặt chẽ (tightly coupled fusion) được sử dụng để kết hợp dữ liệu UWB và IMU, giúp ước lượng chính xác hơn vị trí và hướng so với hệ thống hoạt động độc lập. Nghiên cứu [32] đề xuất thuật toán định vị và theo dõi thời gian thực dựa trên hợp nhất cảm biến mạnh (robust fusion) giữa UWB và IMU, cho độ chính xác cao về vận tốc và độ cao. Các mô hình EKF và Unscented Kalman Filter (UKF) cũng được sử dụng trong [33] để hợp nhất dữ liệu UWB-IMU, mang lại độ chính xác cao trong môi trường IoT. Tương tự với nghiên cứu [34], UWB và IMU được kết hợp với mô hình cơ sinh học (biomechanical model) để theo dõi vị trí và tư thế chuyển động dựa trên thuật toán ghi nhận chuyển động (motion capture). Tuy nhiên, các hệ thống này vẫn khó khả thi trong trường hợp cháy nổ, mất điện xảy ra do các công nghệ không dây vẫn cần sự thiết lập trước trong nhà.

Nghiên cứu này đề xuất một mô hình định vị trong nhà với cách tiếp cận mới, trong đó hai thiết bị gắn ở hai cổ chân được tích hợp IMU và UWB nhằm ước lượng chính xác khoảng cách di chuyển của người dùng. Bên cạnh đó, một IMU kết hợp với cảm biến áp suất được gắn tại vị trí thắt lưng để nhận dạng hướng di chuyển và phát hiện

bước chân. Nhờ cấu hình này, mô hình có khả năng nhận dạng bước di chuyển với độ chính xác cao, đồng thời giảm thiểu sai số tích lũy thường gặp khi chỉ sử dụng dữ liệu quán tính.

Những đóng góp chính của nghiên cứu gồm:

+ Đề xuất mô hình hợp nhất dữ liệu IMU và UWB từ các cảm biến đeo trên cơ thể người dùng, giúp giảm đáng kể sai số trôi của hệ thống định vị dựa hoàn toàn vào IMU.

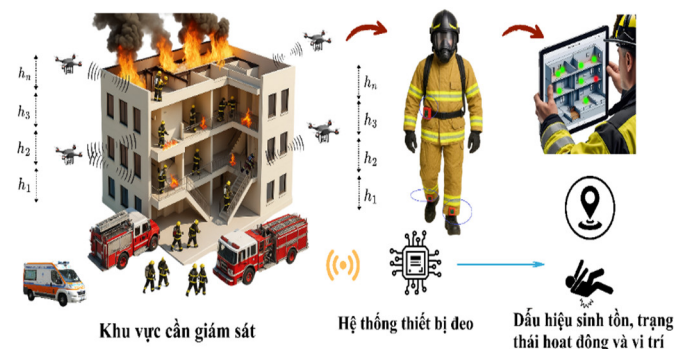
+ Đề xuất giải pháp phát hiện thời điểm bắt đầu và kết thúc của bước chân, cho phép ước lượng độ dài bước chính xác ngay cả trong các trường hợp di chuyển không đều như bước ngắn hoặc bước dài.

+ Xây dựng thuật toán nhận dạng hướng di chuyển dựa trên dữ liệu từ cảm biến con quay hồi chuyển (gyroscope), giới hạn hướng chuyển động trong 8 hướng chính, góp phần nâng cao độ ổn định và tính tin cậy của hệ thống IPS.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Tổng quan hệ thống theo dõi vị trí

Nghiên cứu phát triển một hệ thống theo dõi vị trí dựa trên hệ thống thiết bị đeo. Hình 1 đưa ra cái nhìn toàn cảnh về hệ thống kết hợp công nghệ UWB và kỹ thuật PDR. Hệ thống bao gồm các thiết bị đeo tích hợp gồm IMU 9 trục (gia tốc kế ADXL345, con quay hồi chuyển ITG3200, từ kế hmc5883L), khí áp kế MS-5837, module DW3000. Các thiết bị đeo có thiết kế nhỏ gọn với kích thước 4,8cm x 4,5cm x 4cm được bố trí tại vùng eo và bàn chân nhằm thu thập dữ liệu chuyển động của cơ thể trong các trạng thái vận động khác nhau, thông tin độ cao, khoảng cách di chuyển và hướng di chuyển. Nguồn năng lượng cho hệ thống được cung cấp bởi pin Lithium 3,7V - 2000mAh.



Hình 1. Hệ thống đề xuất theo dõi vị trí cho lính cứu hỏa

Nhằm xây dựng một giải pháp giúp hiệu chuẩn lỗi sai số tích lũy của các hệ thống PDR, hệ thống UAV gắn thiết bị tích hợp công nghệ UWB được tích hợp module DW3000 giúp người chỉ huy có thể theo dõi những người

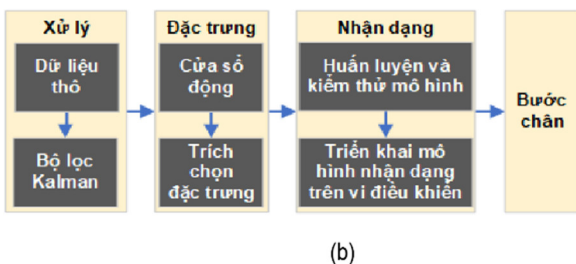
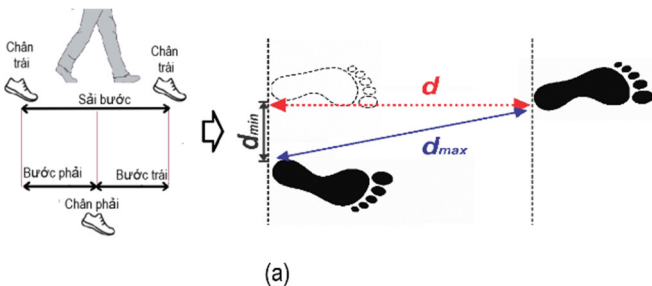
lính cứu hỏa khi họ di chuyển ngoài hành lang. Mỗi mặt tòa nhà sẽ có ít nhất 2 UAV bay với độ cao và khoảng cách đến tòa nhà cố định làm nhiệm vụ truyền nhận tín hiệu trung gian giữa lính cứu hỏa và người chỉ huy. Mỗi khi người lính cứu hỏa di chuyển vào hoặc ra khỏi căn phòng thì thông tin đó sẽ làm căn cứ hiệu chuẩn lại vị trí. Do đó nghiên cứu này hướng đến theo dõi vị trí theo hướng tiếp cận hệ thống lai, các vị trí tại cửa phòng hướng ra hành lang sẽ là căn cứ để hệ thống tự hiệu chuẩn lại vị trí và giảm thiểu sai số tích lũy.

Hệ thống tập trung vào ba nhiệm vụ chính: (i) ước lượng chính xác chiều dài bước chân, (ii) phân loại hướng di chuyển, và (iii) ước tính vị trí theo tầng dựa trên dữ liệu thiết kế tòa nhà kết hợp với cảm biến độ cao. Ngoài ra, hệ thống được tối ưu để đảm bảo khả năng vận hành ổn định trên nền tảng nhúng có tài nguyên hạn chế, đáp ứng yêu cầu thực tế trong môi trường cứu hộ phức tạp.

2.2. Thuật toán phát hiện và xác định bước chân

2.2.1. Tập dữ liệu

Việc đếm bước có thể được thực hiện bằng cách đếm các bước (step) hoặc sải bước chân (stride), qua đó có thể sử dụng để tính toán quãng đường di chuyển và xác định chính xác vị trí của một người. Hình 2a minh họa cách tính khoảng cách bước (d) dựa trên khoảng cách liên chi (d_{max}) và độ rộng bước (d_{min}).



Hình 2. Khoảng cách di chuyển: (a) Cách tính dài bước; (b) Quy trình xác định bước chân

Nghiên cứu này sử dụng một tập dữ liệu công khai StrideLengthEstimation về hoạt động đi bộ. Tập dữ liệu này bao gồm khoảng 16177 bước chân được lấy mẫu tại tần số 100Hz. Để giảm độ phức tạp tính toán, dữ liệu được giảm về tần số 50Hz thông qua tiền xử lý đơn giản với mỗi

mẫu sau khi giảm tần số sẽ có giá trị bằng trung bình cộng của 2 mẫu liền kề trước khi giảm. Hình 2b minh họa quá trình phát hiện bước từ dữ liệu thời gian thực được thực hiện qua các bước sau (chuyển đổi dữ liệu, lọc nhiễu bằng bộ lọc Kalman, phát hiện các đoạn thời gian chứa bước, trích xuất đặc trưng và nhận dạng bước chân).

2.2.2. Tiền xử lý

Các tín hiệu gia tốc ba trục $acc[i] = \{acc_x[i], acc_y[i], acc_z[i]\}$ được chuyển đổi thành chuỗi giá độ lớn ($SR_{acc}[i]$) bằng cách tính độ lớn của vectơ gia tốc ba trục theo công thức (1) với đơn vị là g ($g = 9,8m / s^2$).

$$SR_{acc}[i] = \sqrt{acc_x^2[i] + acc_y^2[i] + acc_z^2[i]} - 1 \tag{1}$$

Triển khai bộ lọc Kalman với x_i là giá trị dự đoán của $SR_{acc}[i]$, $P[i]$ là ma trận hiệp phương sai của sai số ước tính, $K[i]$ là hệ số Kalman, R là độ lệch chuẩn của nhiễu đo lường và Q là độ lệch chuẩn của nhiễu quá trình. Sau nhiều thử nghiệm chúng tôi đã lựa chọn tham $R = 0,1$ và $Q = 0,001$. Quá trình triển khai bộ lọc như sau:

Bước 1: Khởi tạo $P[0] = 1$ tương ứng với giá trị ban đầu $x_0 = SR_{acc}[0]$.

Bước 2: Dự đoán $x_i = x_{i-1}$ $P[i] = P[i-1] + Q$.

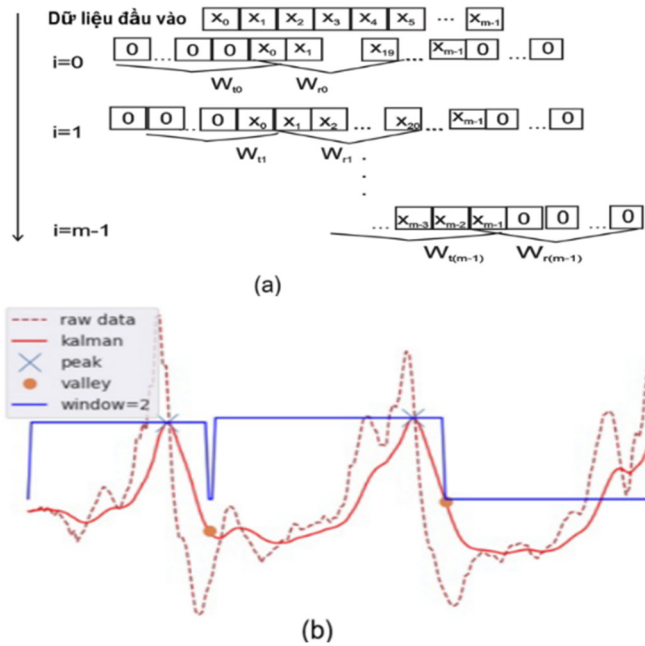
Bước 3: Cập nhật $K[i] = \frac{P[i]}{P[i] + R}$;
 $x_i = x_i + K[i] \times (SR_{acc}[i] - x_i)$; $P[i] = (1 - K[i]) \times P[i]$

2.2.3. Xác định vùng tín hiệu bước chân

Các đỉnh giả sinh ra do nhiễu bước sẽ gây ảnh hưởng lớn đến độ chính xác của kết quả phát hiện bước chân. Trong nghiên cứu này, các đỉnh thật được xác định bằng cách kẹp một cặp cửa sổ trượt có cùng kích thước ở bên trái và bên phải của chuỗi tín hiệu (hình 3a). Nghiên cứu [35] chỉ ra thời gian trung bình của một bước đi trong khoảng 0,34 - 0,45 giây. Do đó, hai cửa sổ này có cùng kích thước 0,5 giây được sử dụng để xác định các giá trị lớn nhất ở cả bên trái và bên phải. Giá trị x_i là đỉnh thật nếu giá trị này không nhỏ hơn trung bình cộng giữa hai giá trị lớn nhất bên trái (w_l) và giá trị lớn nhất bên phải (w_r).

Phương pháp tìm đỉnh trả về một danh sách các giá trị đỉnh và vị trí của chúng. Tương tự với phương pháp tìm đáy, một đáy được xác định bên phải của đỉnh cao nhất, với giá trị trung bình của các giá trị nhỏ nhất ở hai bên giới hạn độ sâu của đáy tín hiệu. Hình 3b minh họa vùng tín hiệu từ đáy bên trái liền kề của đỉnh đến đáy liền kề

bên phải là vùng chứa bước chân. Từ đó mỗi vùng tín hiệu được xác định tương ứng với một phân đoạn (window).



Hình 3. Thuật toán tìm đỉnh dựa trên việc xác định giá trị lớn nhất 2 bên điểm tín hiệu

Quá trình chia dữ liệu huấn luyện/kiểm tra được minh họa trong hình 4a. Với mỗi window dựa trên quan sát đã biết trước, các window chứa bước chân được gán nhãn tương ứng là 1 (step) và 0 (non-step). Do đó, tập dữ liệu công khai được chia thành hai mục: 11324 bước chân (step) và 1597 dữ liệu không bước (non-step) theo tỷ lệ 2/1.

2.2.4. Xây dựng mô hình nhận dạng bước sử dụng cây quyết định

Trong nghiên cứu này, mô hình cây quyết định được áp dụng cho dữ liệu bước chân dựa trên các đặc trưng gồm độ lệch chuẩn (σ), trung bình (μ), phạm vi (γ) và năng lượng (ϵ).

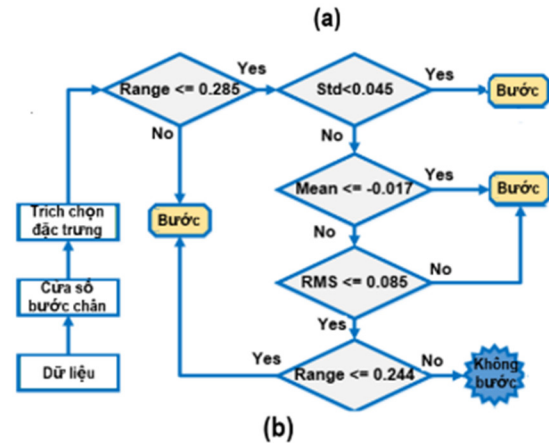
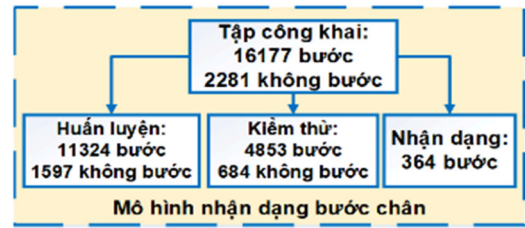
$$\mu = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} x_i \tag{2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} (x_i - \mu)^2} \tag{3}$$

$$\gamma = \max(x_i) - \min(x_i) \tag{4}$$

$$\epsilon = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} x_i^2 \tag{5}$$

Mô hình đề xuất được xây dựng trên thư viện scikit-learn và cấu hình độ sâu (max_depth=5). Kết quả, mô hình tương quan giữa đặc trưng và dự đoán bước được mô tả trong hình 4b.



Hình 4. Mô hình cây quyết định được xây dựng dựa trên tập dữ liệu công khai

2.2.5. Tính toán khoảng cách bước

Từ kết quả nhận dạng vùng bước chân, khoảng cách liên chi (d_{max}) được tính toán dựa trên quy trình đo khoảng cách đeo giữa thiết bị gắn ở cổ chân (Tag và Anchor). Thiết bị Tag gửi gói tin yêu cầu đo đến Anchor tại thời điểm t_1 . Thiết bị Anchor sẽ nhận tín hiệu vào lúc t_2 và phản hồi tại thời điểm t_3 ; cuối cùng, thiết bị Tag phát tín hiệu hoàn tất quá trình đo tại t_4 .

Dữ liệu thời gian từ thanh ghi thời gian của UWB và thực hiện phép tính thời gian lan truyền tín hiệu (t_{ToF}) như sau:

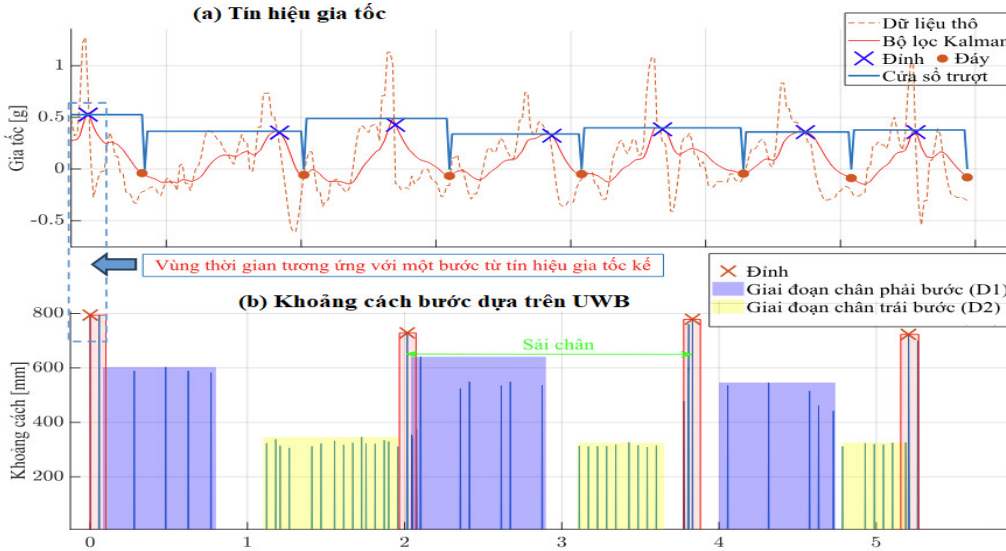
$$d_k = v_c \times t_{ToF} \tag{6}$$

với v_c là vận tốc lan truyền sóng trong không khí. Quá trình này được thực hiện trong nhiều lần đo liên tiếp để tính được $d_{max} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} d_k$.

Trong mỗi chu kỳ bước, khi hai chân gần nhau (tư thế chuẩn bị bước hoặc tiếp xúc đồng thời), khoảng cách nhỏ nhất là d_{min} ; khi bước hoàn thành chân trụ và chân bước tách tối đa, khoảng cách lớn nhất là d_{max} . Hình 2a minh họa quá trình tính độ dài bước dựa trên định lý Pythagoras. Ở đây, cạnh huyền là khoảng cách liên chi tương ứng d_{max} , cạnh đáy là khoảng cách khi hai chân song song cũng là d_{min} và cạnh còn lại là độ dài bước chân thực tế (d).

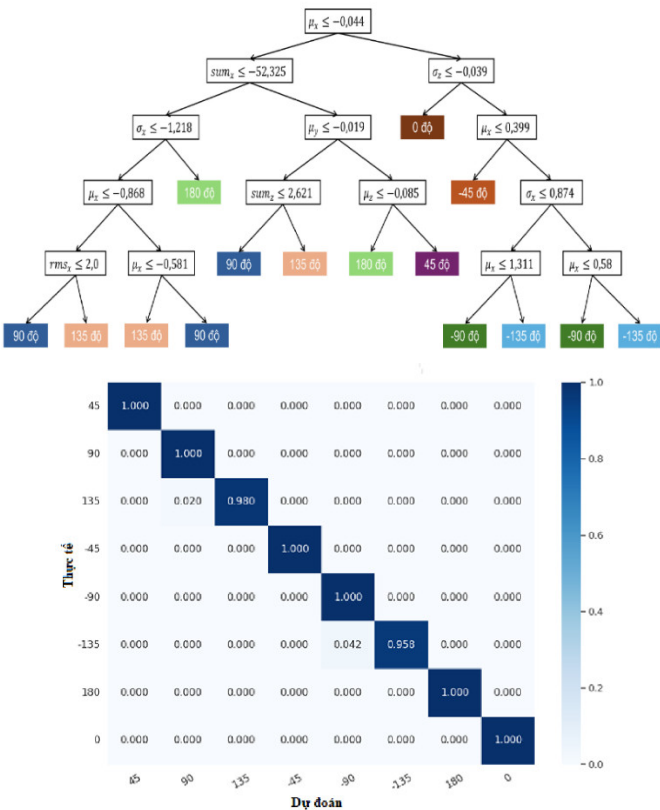
$$d = \sqrt{d_{\max}^2 - d_{\min}^2} \quad (7)$$

Hình 5 minh họa việc sử dụng kết hợp dữ liệu gia tốc và dữ liệu khoảng cách tính toán được từ UWB. Dữ liệu khoảng cách bước tính toán được từ UWB (hình 5b) được thực hiện trong khoảng thời gian xuất hiện vùng tín hiệu bước (hình 5a).



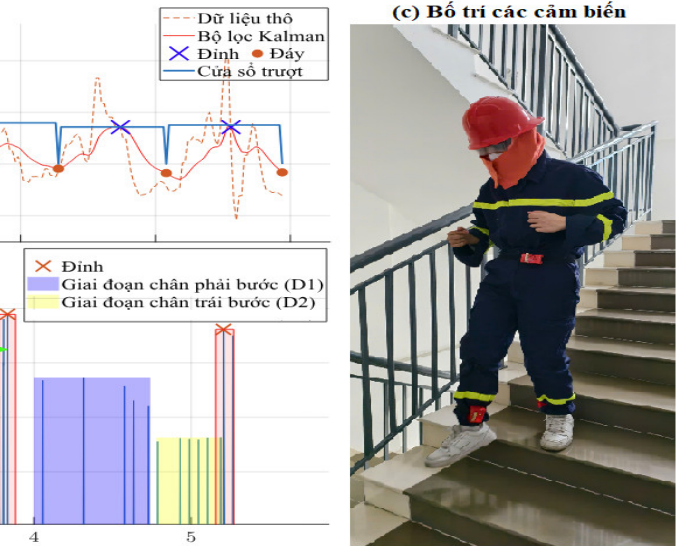
Hình 5. Thực nghiệm sử dụng thiết bị đo dựa trên sự kết hợp dữ liệu gia tốc và UWB nhằm loại bỏ các bước chân giả

2.3. Phương pháp xác hướng di chuyển



Hình 6. Giải thuật xác định hướng di chuyển dựa trên cây quyết định

Nghiên cứu đã thu thập dữ liệu góc quay từ cảm biến gyroscope với đơn vị là rad/s. Sau khi tiền xử lý, tập dữ liệu sẽ được chia thành các phân đoạn, mỗi đoạn chứa 150 điểm dữ liệu (tương đương 3 giây cho mỗi phân đoạn dữ liệu). Từ dữ liệu thu thập được, nghiên cứu tiếp tục sử dụng mô hình cây quyết định để xây dựng thuật toán xác định góc di chuyển (hình 6) dựa trên các đặc trưng: trung



bình (μ), tổng tín hiệu (sum), độ lệch chuẩn (σ), năng lượng (rms).

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Bảng 1. Khoảng cách đã di chuyển và chênh lệch thực tế

Thực nghiệm	1	2	3	4	5
Ước tính quãng đường (m)	101,02	100,88	101,11	100,98	100,79
Sai số (m)	0,48	0,62	0,39	0,52	0,71

Các thử nghiệm được thực hiện trong không gian tại tầng 7 tòa nhà A4, Đại học Phenikaa, gồm các hành lang có chiều rộng 2m và các phòng có diện tích tương đối bằng nhau. Mỗi lần thử nghiệm bao gồm quãng đường thực tế tương ứng là 101,5m sau khoảng 180 bước chân. Kết quả thực nghiệm cho thấy mô hình ước tính độ dài bước đạt sai số tuyệt đối trung bình 4,2cm trên mỗi bước, qua đó đảm bảo tính chính xác của phương pháp ước tính quãng đường di chuyển. Các thông số về quãng đường di chuyển, hướng di chuyển và vị trí từng tầng sẽ được truyền đến các bộ thu phát tín hiệu trung gian tích hợp trên UAV bên ngoài tòa nhà để truyền đến trung tâm chỉ huy và thông tin vị trí 3D.

Hình 5c mô tả quá trình thực nghiệm các thiết bị đo tại vị trí cổ chân và eo. Kết quả ước tính quãng đường di chuyển cho từng lần thử nghiệm được trình bày chi tiết trong bảng 1. Cụ thể, khoảng cách ước tính dao động từ 100,79m đến 102,39m, với sai số dao động từ 0,39m đến

0,71m. Đáng chú ý, sai số định vị tổng thể của hệ thống luôn duy trì dưới 0,6m trong tất cả các thử nghiệm và sai số trung bình chỉ 3,86cm. Điều này là một lợi thế quan trọng đối với các ứng dụng trong môi trường cứu hộ khẩn cấp trong nhà, nơi yêu cầu cao về tính chính xác và khả năng theo dõi liên tục.

Bảng 2. So sánh mô hình đề xuất với các nghiên cứu trước đây

Công bố	Phương pháp	Cảm biến	Kết quả
Nghiên cứu này	PDR kết hợp UWB, giới hạn góc di chuyển, bước ngẫu nhiên (không đều) Mô hình cây quyết định	IMU 6 trục và UWB tại cổ chân và eo	Sai số quãng đường dưới 0,6m, sai số trung bình độ dài bước 3,86cm. Độ chính xác hướng di chuyển đạt 100% Không phụ thuộc vào tốc độ di chuyển Ứng dụng thời gian thực Không phụ thuộc vào nhiễu từ trường
Nghiên cứu [27]	PDR kết hợp ZUPT, ZAPT kế	IMU 9 trục tại bàn chân	Sai số quãng đường 0,88m, sai số trung bình độ dài bước 4,36cm. Phụ thuộc vào tốc độ di chuyển (đi nhanh, đi chậm) Chưa ứng dụng thời gian thực Phụ thuộc vào từ trường.
Nghiên cứu [30]	PDR kết hợp ZUPT, ZAPT	IMU 6 trục và áp kế tại ngực	Sai số quãng đường 5,2m Tính góc di chuyển dựa trên gia tốc và gyroscope nên bị trôi góc ở nhiệt độ cao Chưa ứng dụng thời gian thực. Suy giảm độ chính xác khi bước đi biến đổi

Mô hình trong nghiên cứu này nổi bật ở khả năng giảm sai số quãng đường xuống dưới 0,6m và độ chính xác hướng di chuyển đạt trên 98%, nhờ kết hợp PDR với UWB và mô hình cây quyết định. Bảng 2 so sánh các phương pháp PDR kết hợp các bộ lọc [27, 30] vẫn tồn tại giới hạn về trôi góc, sự phụ thuộc tốc độ di chuyển, và chưa đáp ứng thời gian thực. Hơn thế nữa việc ứng dụng từ trường hoặc vận tốc góc có thể gặp lỗi do ảnh hưởng của nhiệt độ hoặc nhiễu từ trường. Hệ thống đề xuất hoạt động thời gian thực, không bị ảnh hưởng bởi tốc độ di chuyển hay từ trường và phù hợp với ứng dụng trong tình huống khẩn cấp. Đặc biệt, mô hình đề xuất ít bị ảnh hưởng bởi điều kiện ánh sáng thay đổi và tốc độ di chuyển (bước nhanh bước chậm).

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã đề xuất một mô hình định vị trong nhà thời gian thực dành cho các tình huống khẩn cấp, đặc biệt là đối với lực lượng cứu hỏa. Bằng cách kết hợp dữ liệu từ các cảm biến đeo gồm IMU, UWB và mô hình cây quyết định, hệ thống đạt độ chính xác cao trong nhận dạng bước và hướng di chuyển, đồng thời giảm sai số định vị xuống dưới 0,6m trong môi trường thử nghiệm thực tế. Kết quả cho thấy phương pháp hợp nhất dữ liệu cảm biến đeo mang lại hiệu suất ổn định, không phụ thuộc vào từ trường hoặc tốc độ di chuyển, đồng thời đáp ứng yêu cầu hoạt động thời gian thực. Trong tương lai, nhóm nghiên cứu sẽ mở rộng mô hình sang định vị 3D đa tầng và mạng UAV hỗ trợ truyền dẫn dữ liệu để cải thiện độ tin cậy trong các tình huống thực địa.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. X. Qian, "Evaluation on sustainable development of fire safety management policies in smart cities based on big data," *Mathematical Biosciences and Engineering*, 20, 9, 17003-17017, 2023.
- [2]. M. A. Yamusa, et al., "Investigating the construction professionals' perspective on the new building safety act in the UK: A sentiment analysis of media data," *Saf Sci*, 189, 106900, 2025.
- [3]. A. A. Khan, M. A. Khan, K. Leung, X. Huang, M. Luo, A. Usmani, "A review of critical fire event library for buildings and safety framework for smart firefighting," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 83, 103412, 2022.
- [4]. M. Fialho, S. Nunes, C. A. Gamelas, "Risk Perception, Safety Behavior and Work Accidents: Assessment and Relations in a Sample of Portuguese Firefighters," *Fire Technol*, 60, 3529-3552, 2024.
- [5]. Y. Cheng, et al., "Impact of temperature on firefighter task performance and subjective workload in VR simulations," *Fire Saf J*, 153, 104384, 2025.
- [6]. K. Stakes, J. M. Willi, R. Chaffer, D. Madrzykowski, G. P. Horn, "Exposure Risks and Potential Control Measures for a Fire Behavior Lab Training Structure: Part A - Fire Dynamics and Thermal Risk," *Fire Technol*, 59, 4, 2089-2125, 2023.
- [7]. Vishal M., Satyanarayanan K.S., "A review on research of fire-induced progressive collapse on structures," *Journal of Structural Fire Engineering*, 12, 3, 410-425, 2021.
- [8]. J. T. Kahl, N. J. Anderson, G. Casner, V. Shuman, T. J. Gardner, "Firefighter daytime visibility: trim properties and conspicuity," *Fashion and Textiles*, 6, 1, 18, 2019.
- [9]. E. Koopmans, K. Cornish, T. M. Fyfe, K. Bailey, C. A. Pelletier, "Health risks and mitigation strategies from occupational exposure to wildland fire: A scoping review," *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 17, 1, 2, 2022.

- [10]. L. Carmona, R. Pinheiro, J. Faria-Anjos, S. Namorado, M. J. Chambel, "Lifestyle and Well-being among Portuguese Firefighters," *IgMin Research*, 2, 2, 59-65, 2024.
- [11]. T. H. Dao, et al., "RFAR: A Real-Time Firefighter Activity Recognition System Using Wearable Accelerometer," *IEEE Sens J*, 25, 17, 33674-33691, 2025.
- [12]. K. Wakatsuki, R. Seitani, N. Watanabe, S. Muramoto, Y. Kobayashi, H. Morikawa, "Characterization of Air Gaps and Their Impact on the Thermal Insulation Performance of Multi-layer Firefighter Clothing," *Fire Technol*, 58, 4, 1863-1887, 2022.
- [13]. D. E. Gonzalez, et al., "Firefighter Health: A Narrative Review of Occupational Threats and Countermeasures," *Healthcare*, 12, 4, 440, 2024.
- [14]. X. Chai, B.G. Lee, M. Pike, R. Wu, D. Chieng, W.Y. Chung, "Pre-Impact Firefighter Fall Detection Using Machine Learning on the Edge," *IEEE Sens J*, 23, 13, 14997-15009, 2023.
- [15]. C. B. Florian Rosing Diana Boer, T. Scheel, "The effectiveness of absence of humour in leadership in firefighting frontline communication: A reversal theory perspective," *European Journal of Work and Organizational Psychology*, 31, 2, 200-213, 2022.
- [16]. P. Heydari, M. Babamiri, L. Tapak, R. Golmohammadi, O. Kalatpour, "Weighing and prioritization of individual factors affecting the performance of industries firefighters," *Fire Saf J*, 127, 103512, 2022.
- [17]. R. M. S. Clifford, et al., "Aerial firefighter radio communication performance in a virtual training system: radio communication disruptions simulated in VR for Air Attack Supervision," *Vis Comput*, 37, 1, 63-76, 2021.
- [18]. Y. Zhang, X. Huang, "Smart Safety Design for Firefighting, Evacuation, and Rescue," in *Intelligent Building Fire Safety and Smart Firefighting*, Springer Nature Switzerland, 237-255, 2024.
- [19]. Y. Yu, L. Liu, Z. Chang, Y. Li, K. Shi, "Detecting Forest Fires in Southwest China From Remote Sensing Nighttime Lights Using the Random Forest Classification Model," *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*, 17, 10759-10769, 2024.
- [20]. Z. Zhang, H. Du, S. Choi, S. H. Cho, "TIPS: Transformer Based Indoor Positioning System Using Both CSI and DoA of WiFi Signal," *IEEE Access*, 10, 111363-111376, 2022.
- [21]. M. S. Bin Hossain, Z. Guo, H. Choi, "Estimation of Lower Extremity Joint Moments and 3D Ground Reaction Forces Using IMU Sensors in Multiple Walking Conditions: A Deep Learning Approach," *IEEE J Biomed Health Inform*, 27, 6, 2829-2840, 2023.
- [22]. J. Sun, et al., "HUID: DBN-based fingerprint localization and tracking system with hybrid UWB and IMU," *China Communications*, 20, 2, 139-154, 2023.
- [23]. H. Zhang, et al., "MetaRadar: Indoor Localization by Reconfigurable Metamaterials," *IEEE Trans Mob Comput*, 21, 8, 2895-2908, 2022.
- [24]. Y.Y. Chen, S.P. Huang, T.W. Wu, W.T. Tsai, C.Y. Liou, S.G. Mao, "UWB System for Indoor Positioning and Tracking With Arbitrary Target Orientation, Optimal Anchor Location, and Adaptive NLOS Mitigation," *IEEE Trans Veh Technol*, 69, 9, 9304-9314, 2020.
- [25]. S. Güler, M. Abdelkader, J. S. Shamma, "Peer-to-Peer Relative Localization of Aerial Robots With Ultrawideband Sensors," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 29, 5, 1981-1996, 2021.
- [26]. M. Rath, J. Kulmer, E. Leitinger, K. Witrals, "Single-Anchored Positioning: Multipath Processing With Non-Coherent Directional Measurements," *IEEE Access*, 8, 88115-88132, 2020.
- [27]. H. Guo, M. Uradzinski, H. Yin, M. Yu, "Indoor positioning based on foot-mounted IMU," *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 63, 3, 629-634, 2015.
- [28]. J.O. Nilsson, D. Zachariah, I. Skog, P. Händel, "Cooperative localization by dual foot-mounted inertial sensors and inter-agent ranging," *EURASIP J Adv Signal Process*, 1, 164, 2013.
- [29]. J.H. Lee, C.G. Park, "Mitigation of a Heading Drift in Pedestrian Dead-reckoning Caused by the Sensor Bandwidth," *Int J Control Autom Syst*, 19, 8, 2882-2890, 2021.
- [30]. C. Lu, H. Uchiyama, D. Thomas, A. Shimada, R.I. Taniguchi, "Indoor Positioning System Based on Chest-Mounted IMU," *Sensors*, 19, 2, 420, 2019.
- [31]. M. Kok, J.D. Hol, T.B. Schön, "Indoor Positioning Using Ultrawideband and Inertial Measurements," *IEEE Trans Veh Technol*, 64, 4, 1293-1303, 2015.
- [32]. P.K. Yoon, S. Zihajehzadeh, B.S. Kang, E.J. Park, "Robust Biomechanical Model-Based 3-D Indoor Localization and Tracking Method Using UWB and IMU," *IEEE Sens J*, 17, 4, 1084-1096, 2017.
- [33]. D. Feng, C. Wang, C. He, Y. Zhuang, X.G. Xia, "Kalman-Filter-Based Integration of IMU and UWB for High-Accuracy Indoor Positioning and Navigation," *IEEE Internet Things J*, 7, 4, 3133-3146, 2020.
- [34]. S. Zihajehzadeh, E.J. Park, "A Novel Biomechanical Model-Aided IMU/UWB Fusion for Magnetometer-Free Lower Body Motion Capture," *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst*, 47, 6, 927-938, 2017.
- [35]. V. T. Pham, et al., "Highly Accurate Step Counting at Various Walking States Using Low-Cost Inertial Measurement Unit Support Indoor Positioning System," *Sensors*, 18, 10, 2018.

AUTHORS INFORMATION

**To-Hieu Dao^{1,2}, Duc-Nghia Tran³, Viet-Hoan Bui¹,
Duong Chinh Cuong¹, Hoang-Dieu Vu¹, Duc-Tan Tran¹**

¹Faculty of Electrical and Electronic Engineering, School of Engineering, Phenikaa University, Vietnam

²Graduate University of Science and Technology, Vietnam Academy of Science and Technology, Vietnam

³Institute of Information Technology, Vietnam Academy of Science and Technology, Vietnam