

BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



ĐÀO TÔ HIỆU

**NGHIÊN CỨU CÁC PHƯƠNG PHÁP NHẬN DẠNG HÀNH
ĐỘNG VÀ ĐỊNH VỊ TRONG NHÀ HỖ TRỢ TÌM KIẾM
CỨU NẠN TRONG CÁC TÌNH HUỐNG KHẨN CẤP**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ
KỸ THUẬT ĐIỆN, ĐIỆN TỬ VÀ VIỄN THÔNG**

ĐÀO TÔ HIỆU

2026

Hà Nội - 2026

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ

ĐÀO TÔ HIỆU

**NGHIÊN CỨU CÁC PHƯƠNG PHÁP NHẬN DẠNG HÀNH
ĐỘNG VÀ ĐỊNH VỊ TRONG NHÀ HỖ TRỢ TÌM KIẾM CỨU
NẠN TRONG CÁC TÌNH HUỐNG KHẨN CẤP**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ
KỸ THUẬT ĐIỆN, ĐIỆN TỬ VÀ VIỄN THÔNG

Ngành: Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa

Mã số: 9 52 02 16

Xác nhận của Học viện
Khoa học và Công nghệ

PHÓ GIÁM ĐỐC



Nguyễn Thị Trung

Người hướng dẫn 1
(Ký, ghi rõ họ tên)

GS. TS. Trần Đức Tân

Người hướng dẫn 2
(Ký, ghi rõ họ tên)

TS. Trần Đức Nghĩa

Hà Nội - 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận án: “*Nghiên cứu các phương pháp nhận dạng hành động và định vị trong nhà hỗ trợ tìm kiếm cứu nạn trong các tình huống khẩn cấp*” là công trình nghiên cứu của bản thân dưới sự hướng dẫn khoa học của tập thể hướng dẫn. Luận án sử dụng thông tin trích dẫn từ nhiều nguồn tham khảo khác nhau và các thông tin trích dẫn được ghi rõ nguồn gốc. Các kết quả nghiên cứu của tôi được công bố chung với các tác giả khác đã được sự nhất trí của đồng tác giả khi đưa vào luận án. Các số liệu, kết quả được trình bày trong luận án là hoàn toàn trung thực và chưa từng được công bố trong bất kỳ một công trình nào khác ngoài các công trình công bố của tác giả. Luận án được hoàn thành trong thời gian tôi làm nghiên cứu sinh tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Hà Nội, ngày 22 tháng 05 năm 2026

Tác giả luận án



ĐÀO TÔ HIỆU

LỜI CẢM ƠN

Luận án này được hoàn thành với sự nỗ lực không ngừng của tác giả dưới sự giúp đỡ các thầy giáo hướng dẫn, bạn bè và người thân. Đầu tiên, tác giả xin bày tỏ sự tri ân tới các thầy GS.TS. Trần Đức Tân và TS. Trần Đức Nghĩa đã hướng dẫn tận tình hướng dẫn và truyền đạt kinh nghiệm cho tác giả.

Tiếp theo, tác giả xin gửi lời cảm ơn tới Ban lãnh đạo, Phòng Đào tạo và các Phòng chức năng của Học viện Khoa học và Công nghệ đã tạo điều kiện để tác giả hoàn thành công trình của mình. Tác giả trân trọng biết ơn Ban lãnh đạo Đại học Phenikaa, Trường Kỹ thuật Phenikaa và các đồng nghiệp Khoa Điện Điện tử nơi tác giả công tác đã ủng hộ và hỗ trợ để luận án được hoàn thành.

Cuối cùng, tác giả xin gửi tới gia đình, bạn bè, người thân lời cảm ơn chân thành nhất vì đã đồng hành cùng tác giả trong suốt thời gian qua.

Hà Nội, ngày 22 tháng 05 năm 2026

Tác giả luận án



Đào Tô Hiệu

MỤC LỤC

DANH MỤC HÌNH ẢNH	IV
DANH MỤC BẢNG BIỂU	VI
DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT.	VII
DANH MỤC KÝ HIỆU	XI
MỞ ĐẦU	1
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU	6
1.1. Tổng quan nhận dạng hành động người.	6
1.1.1. Bài toán nhận dạng hành động người	9
1.1.2. Nhận dạng hành động người sử dụng thiết bị đeo	10
1.1.3. Nghiên cứu về hành động của lính cứu hoả	12
1.1.4. Ứng dụng học máy trên thiết bị biên	14
1.1.4.1. Các phương pháp học máy nhẹ	14
1.1.4.2. Kỹ thuật nhúng học máy nhẹ trên vi điều khiển	15
1.2. Tổng quan định vị trong nhà trong tình huống khẩn cấp. . . 17	
1.2.1. IPS dựa trên sự thiết lập trước về cơ sở hạ tầng	18
1.2.2. IPS không dựa trên sự thiết lập trước về cơ sở hạ tầng.	20
1.2.3. Hệ thống định vị kết hợp	23
1.3. Các phương pháp đánh giá	26
1.4. Khoảng trống nghiên cứu	27
1.5. Định hướng nghiên cứu	28
1.6. Kết luận chương 1	30
CHƯƠNG 2. HỆ THỐNG NHẬN DẠNG HÀNH ĐỘNG CHO	
LÍNH CỨU HOẢ	32
2.1. Mô hình hệ thống RFAR	32
2.1.1. Kiến trúc hệ thống RFAR	33
2.1.2. Tập dữ liệu	35
2.1.2.1. Quy trình thu thập dữ liệu	36
2.1.2.2. Tập dữ liệu riêng tư.	36
2.1.2.3. Tập dữ liệu công khai	39
2.1.3. Xử lý dữ liệu	41
2.1.3.1. Vấn đề nhiễu cảm biến và điểm đặt góc của thiết bị	41
2.1.3.2. Phân đoạn dữ liệu.	41
2.1.3.3. Quy trình xử lý dữ liệu dựa trên phát hiện điểm bất thường. . . 43	
2.1.4. Trích chọn đặc trưng	46

2.1.5. Quy trình gán nhãn	48
2.1.6. Triển khai mô hình rừng ngẫu nhiên trên vi điều khiển.	49
2.2. Thực nghiệm và kết quả.	51
2.2.1. Kết quả thực nghiệm trên dữ liệu riêng tư	51
2.2.2. Kết quả nhận dạng trên các tập dữ liệu công khai	55
2.2.2.1. <i>Đánh giá trên tập SFDLA</i>	55
2.2.2.2. <i>Đánh giá trên tập MobiFall</i>	56
2.2.2.3. <i>Đánh giá trên tập UniMiB</i>	57
2.3. Triển khai thiết bị và đánh giá thực nghiệm	58
2.3.1. Hiệu chỉnh cảm biến.	58
2.3.1.1. <i>Hiệu chỉnh sai số cảm biến</i>	58
2.3.1.2. <i>Hiệu chỉnh vị trí đặt cảm biến</i>	59
2.3.2. Thực nghiệm với các tình nguyện viên	60
2.3.3. Thời gian suy luận, độ trễ và độ phức tạp tính toán	62
2.3.4. Các hành động quan trọng bị nhầm lẫn	63
2.3.5. Hiệu năng mô hình đề xuất	63
2.3.6. Cửa sổ trượt và tần số lấy mẫu.	66
2.3.7. Tối ưu hóa đặc trưng	68
2.4. Kết luận chương 2	69
CHƯƠNG 3. PHƯƠNG PHÁP ĐỊNH VỊ TRONG NHÀ SỬ DỤNG THIẾT BỊ ĐEO	71
3.1. Giải pháp theo dõi vị trí cho lính cứu hoả	71
3.1.1. Mô hình hệ thống	71
3.1.2. Các bước xử lý và triển khai	73
3.1.3. Hiệu chỉnh UWB	74
3.1.3.1. <i>Xử lý đa đường</i>	74
3.1.3.2. <i>Đồng bộ thời gian và kiểm tra độ trôi đồng hồ</i>	75
3.1.4. Phương pháp xác định khoảng cách di chuyển	75
3.1.4.1. <i>Tập dữ liệu</i>	75
3.1.4.2. <i>Tính toán khoảng cách di chuyển</i>	75
3.1.5. Giải thuật xác định hướng di chuyển	81
3.1.5.1. <i>Tập dữ liệu về góc di chuyển</i>	82
3.1.5.2. <i>Phân đoạn dữ liệu và tính toán đặc trưng góc di chuyển</i> . . .	82
3.1.5.3. <i>Mô hình phân loại góc di chuyển</i>	83
3.1.6. Giải thuật tính toán độ cao và xác định tầng	85
3.1.7. Mô hình hóa IPS dùng phương pháp Quaternion.	88

3.1.8. Bản đồ số hoá hiển thị thông tin toà nhà	90
3.2. Kết quả và đánh giá	91
3.2.1. Kịch bản thử nghiệm	91
3.2.1.1. Kiểm chứng độ ổn định của thuật toán đo khoảng cách bước	92
3.2.1.2. Kiểm chứng giải thuật xác định hướng và quỹ đạo di chuyển	92
3.2.1.3. Thử nghiệm định vị 3D và lọc nhiễu độ cao	93
3.2.2. Theo dõi vị trí và hiển thị trên bản đồ số hóa	93
3.2.2.1. Đánh giá sai lệch về quỹ đạo di chuyển	93
3.2.2.2. Độ chính xác trong xác định tầng của toà nhà	98
3.2.3. Đánh giá tiêu thụ năng lượng và thời gian hoạt động.	101
3.2.3.1. Năng lượng tiêu thụ	101
3.2.3.2. Ước tính thời gian hoạt động	102
3.2.4. Đánh giá ảnh hưởng của điều kiện môi trường.	103
3.2.5. Đánh giá độ trễ và khả năng đáp ứng thời gian thực của hệ thống	104
3.2.6. So sánh với với nghiên cứu liên quan	104
3.2.6.1. Mức độ phụ thuộc vào cơ sở hạ tầng	105
3.2.6.2. Độ tin cậy của hệ thống	105
3.2.6.3. Độ phức tạp tính toán và khả năng triển khai thực tế	106
3.3. Kết luận chương 3	106
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	107
CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN	111
TÀI LIỆU THAM KHẢO	112
PHỤ LỤC 1: GIẤY CHẤP THUẬN CỦA HỘI ĐỒNG ĐẠO ĐỨC PHENIKAA	121
PHỤ LỤC 2: SƠ ĐỒ NGUYÊN LÝ	123
PHỤ LỤC 3: THIẾT BỊ ĐEO BẢN THỬ NGHIỆM	124

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1.1: Mô hình tổng quát của hệ thống nhận dạng hành động người và các phương pháp học máy trên dữ liệu từ cảm biến đeo.	9
Hình 1.2: Lĩnh cứu hoả thả các thẻ RFID để tạo các điểm mốc điện tử hỗ trợ truyền thông và định vị trong toà nhà cháy ¹	21
Hình 1.3: Cấu hình hệ thống cảm biến IMU ¹ gắn trên ủng của lính cứu hoả và sơ đồ truyền dữ liệu qua liên kết vô tuyến 2.4 GHz	22
Hình 1.4: Kiến trúc hệ thống định vị lai kết hợp Breadcrumb, PDR cho lính cứu hoả ¹	25
Hình 2.1: Hệ thống RFAR được thiết kế giúp người chỉ huy có thể giám sát các hoạt động của lính cứu hoả theo thời gian thực.	33
Hình 2.2: Sơ đồ khối chức năng phần cứng và luồng dữ liệu hoạt động của hệ thống RFAR.	34
Hình 2.3: Sự thay đổi tín hiệu tương ứng với từng hành động.	38
Hình 2.4: Biểu đồ phân bố dữ liệu trên trục x của 11 hành động.	40
Hình 2.5: Lưu đồ của quy trình phát hiện bất thường và xử lý dữ liệu (a), dữ liệu gia tốc 3 trục mô tả khi tình nguyện viên di chuyển rồi ngã (b), và xử lý dữ liệu phát hiện bất thường (c).	43
Hình 2.6: Độ quan trọng của các đặc trưng trích xuất từ gia tốc.	46
Hình 2.7: Tối ưu siêu tham số cho mô hình học máy	50
Hình 2.8: $F1_{mi}$ và kích thước mô hình: (a) RF, (b) LBM, (c) DT, (d) XGB, (e) GBDT, và (f) SVM thay đổi trong quá trình điều chỉnh siêu tham số.	52
Hình 2.9: Ma trận nhầm lẫn tổng hợp các kết quả nhận dạng trên (a) tập dữ liệu riêng tư, (b) thử nghiệm với dữ liệu thời gian thực trên tình nguyện viên, (c) SFDLA, (d) MobiFall, và (e) UniMiB.	54
Hình 2.10: Thử nghiệm quá trình mô phỏng diễn tập khi xảy ra sự cố khẩn cấp.	61
Hình 2.11: Chỉ số $F1_{mi}$ của các mô hình khi thay đổi của F_s và của số trượt.	67
Hình 3.1: Mô hình hệ thống theo dõi vị trí trong nhà cho lính cứu hoả.	71
Hình 3.2: Tổng quan các giai đoạn triển khai của hệ thống IPS đề xuất.	73
Hình 3.3: Quy trình phân đoạn tín hiệu khi thực hiện các sải bước: (a) dữ liệu gia tốc ba trục gốc; (b) tín hiệu đã lọc và các đoạn sải chân được trích.	76
Hình 3.4: Cặp cửa sổ trượt được ghép vào 2 đầu tín hiệu có kích thước tương đương 20-25 mẫu.	77
Hình 3.5: Tính toán khoảng cách di chuyển dựa trên công nghệ UWB.	79

Hình 3.6: Bộ đếm bước được tích hợp để xác định thời điểm bước và hợp nhất với dữ liệu UWB nhằm loại bỏ các bước chân giả.	81
Hình 3.7: Khi tình nguyện viên thay đổi hướng di chuyển, dữ liệu có xu hướng dao động mạnh dọc theo trục thẳng đứng.	83
Hình 3.8: Lưu đồ DT với 5 tầng có thể nhận dạng góc xoay với độ chính xác cao.	84
Hình 3.9: Sơ đồ triển khai giải thuật bù sai số trôi theo nhiệt độ cho áp suất	85
Hình 3.10: Sự kết hợp áp suất khí quyển theo độ cao (a) và xác định bước dựa trên gia tốc (b) để nhận biết sự thay đổi tầng.	87
Hình 3.11: Thông tin mặt cắt ngang bản đồ của toà nhà A4 Đại học Phenikaa được trực quan hoá trên bản đồ số.	90
Hình 3.12: Thực nghiệm toàn diện về tính toán vị trí thời gian thực và mô tả quỹ đạo di chuyển khi các tình nguyện viên sử dụng cảm biến đeo trên người tại toà nhà A4 Đại học Phenikaa.	93
Hình 3.13: Quỹ đạo di chuyển của các tình nguyện viên được đánh dấu theo kịch bản xác định trước.	94
Hình 3.14: Thời gian hoạt động ở các chế độ vận hành	102

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1: Tổng quan về nhận dạng hành động người dùng thiết bị đeo. . .	7
Bảng 2.1: Cấu hình phần cứng và nền tảng thực nghiệm.	35
Bảng 2.2: Mô tả các hành động của lính cứu hoả trong bộ dữ liệu riêng. .	37
Bảng 2.3: So sánh các hệ thống phát hiện té ngã theo thời gian phát hiện tối thiểu, tần số và đặc trưng.	44
Bảng 2.4: Thông tin các đặc trưng được sử dụng sau khi tối ưu hóa	47
Bảng 2.5: Cấu hình các siêu tham số của các mô hình nhận dạng trên tập dữ liệu riêng tư.	51
Bảng 2.6: Các chỉ số đánh giá đạt được khi trên (a) tập dữ liệu riêng và (b) thực nghiệm diễn tập.	55
Bảng 2.7: So sánh hiệu năng mô hình RF trên các tập dữ liệu công khai .	56
Bảng 2.8: Tổng hợp các kịch bản thử nghiệm và quy định thực hiện	60
Bảng 2.9: Kết quả đo lường hiệu năng hệ thống qua 3 thực nghiệm.	62
Bảng 2.10: So sánh hiệu suất nhận dạng của mô hình đề xuất trên tập UniMiB-SHAR.	64
Bảng 2.11: So sánh các mô hình phát hiện ngã cho lính cứu hoả.	65
Bảng 2.12: So sánh mô hình nhận dạng ngã đề xuất với các mô hình trước đây áp dụng trên hai tập dữ liệu (a) SFDLA và (b) MobiFall.	65
Bảng 2.13: So sánh hiệu quả của các đặc trưng qua mức độ quan trọng trên tập dữ liệu riêng.	68
Bảng 3.1: Cấu hình phần cứng của thiết bị đeo.	72
Bảng 3.2: Thống kê số cửa sổ dữ liệu theo góc quay trong tập huấn luyện và kiểm thử.	82
Bảng 3.3: Tổng hợp điều kiện môi trường và kịch bản thử nghiệm mô phỏng.	92
Bảng 3.4: Ước tính khoảng cách di chuyển và thống kê sai số tích lũy . . .	95
Bảng 3.5: So sánh một số phương pháp định vị nhân viên cứu hộ trong nhà trong các tình huống khẩn cấp	96
Bảng 3.6: Thử nghiệm xác định tầng 1 (T1) và tầng 7 (T7), toà nhà A4, DH Phenikaa khi sự thay đổi nhiệt độ được tạo ra trong lúc tình nguyện viên đang hoạt động ở 1 tầng cố định.	99
Bảng 3.7: Di chuyển các tầng trong toà nhà A4 trong điều kiện nhiệt độ thường ($T_{meas} = 30^{\circ}\text{C}$).	100
Bảng 3.8: Thử nghiệm xác định tầng trong nhà tình nguyện viên di chuyển ở cầu thang với việc mô phỏng nhiễu nhiệt độ từ đám cháy.	101
Bảng 3.9: Dòng tiêu thụ trung bình của các trạng thái hoạt động	101

DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT

Viết tắt	Ý nghĩa tiếng Anh	Ý nghĩa tiếng Việt
ADLs	Activities of Daily Living	Các hoạt động sinh hoạt thường ngày
BD	Bending	Khom lưng, uốn cong cơ thể
BDP	Bending-pickup	Đứng thẳng rồi khom lưng khi nhặt đồ vật rồi đứng thẳng
BLE	Bluetooth low energy	Bluetooth năng lượng thấp
CH	Coughing-sneezing	Đứng tại chỗ và ho
CNN	Convolutional neural network	Mạng nơ-ron tích chập
CO	Carbon Monoxide	
CSI	Channel State Information	Thông tin trạng thái kênh truyền
CR	Crawling	Bò thấp
DCT	Discrete cosine transform	Biến đổi Cosin rời rạc
DL	Deep learning	Học sâu
DT	Decision tree	Cây quyết định
DS	Downstair	Xuống cầu thang bộ
FA	Falling	Ngã
FAB	FallingBack	Té ngã ngược từ tư thế đứng
FAF	FallingForw	Té ngã về phía trước từ tư thế đứng
FAPs	FallingWithPS	Té ngã có chống đỡ, bảo vệ để giảm thiểu tác động
FAR	Firefighter activity recognition	Nhận dạng hành động của lính cứu hỏa
FART	FallingRight	Té ngã sang phải từ tư thế đứng
FASC	FallingBackSC	Té ngã ngược khi cố ngồi xuống ghế
FOL	Forward-lying	Ngã về phía trước từ tư thế đứng và dùng tay chống đỡ
FKL	Front-knees-lying	Ngã sấp từ tư thế đứng và chạm đầu gối rồi nằm

(Còn tiếp ở trang sau)

(Tiếp theo DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT)

Viết tắt	Ý nghĩa tiếng Anh	Ý nghĩa tiếng Việt
FN	False negative	Số lần mô hình dự đoán sai các hành động không diễn ra
FP	False positive	Số lần mô hình dự đoán sai các hành động đã diễn ra
GBDT	Gradient boosting decision tree	Cây quyết định tăng cường độ dốc
GNSS	Global Navigation Satellite System	Global Navigation Satellite System
HAR	Human activity recognition	Nhận dạng hành động người
HIPS	Hybrid indoor positioning system	Hệ thống định vị trong nhà kết hợp
HOS	HittingObstacle	Té ngã có va chạm với vật cản trước khi tiếp xúc với mặt đất
IMU	Inertial measurement Unit	Cảm biến quán tính
INS	Inertial navigation system	Hệ thống dẫn đường quán tính
IPS	Indoor positioning system	Hệ thống định vị trong nhà
JO	Jogging	Chạy bộ
JU	Jumping	Nhảy liên tục
KF	Kalman filter	Bộ lọc Kalman
KNN	K-nearest neighbor	K láng giềng gần
K-folds	K-fold cross-validation	Xác thực chéo ngẫu nhiên trên K phần dữ liệu
LSTM	Long Short-Term Memory	
MAE	Mean Absolute Error	Sai số tuyệt đối trung bình
MCU	Microcontroller unit	Vi điều khiển
MSE	Mean Squared Error	sai số bình phương trung bình
ZLF	Zero phase low pass filter	bộ lọc thông thấp không trễ pha
LBM	Light gradient boosting machine	Máy tăng cường độ dốc nhẹ (dựa trên cây quyết định)
LY	Lying	Nằm
ML	Machine learning	Học máy
NCS	PhD Student	Nghiên cứu sinh

(Còn tiếp ở trang sau)

(Tiếp theo DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT)

Viết tắt	Ý nghĩa tiếng Anh	Ý nghĩa tiếng Việt
PDR	Pedestrian dead reckoning	Ước lượng vị trí người đi bộ dựa trên thông tin quán tính
RF	Random forest	Rừng ngẫu nhiên
RFAR	Real-time Firefighter Activity Recognition	Nhận dạng hành động lính cứu hỏa
RFY	Radio frequency	Radio frequency
RFID	Radio frequency identification	Nhận dạng qua tần số vô tuyến
RU	Running	Chạy tốc độ vừa phải tương tự JO
SC	Syncope	Ngất xỉu, mất ý thức rồi té ngã
SDL	Sideward-lying	Ngã nghiêng từ tư thế đứng, gập chân rồi nằm
SI	Sitting	Ngồi
SL	Slithering	Bò trườn
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping	Simultaneous Localization and Mapping
SQ	Squatting	Từ đứng sang ngồi xổm rồi đứng
ST	Standing	Đứng
STS	StandingUpFS	Từ tư thế ngồi trên ghế rồi đứng dậy
STL	StandingUpFL	Từ tư thế đứng nằm xuống giường
SFDLA	Simulated Falls and Daily Living Activities	Tập dữ liệu gồm về ngã và các hoạt động thường ngày
SVM	Support vector machine	Máy vector hỗ trợ
TIPS	Transformer based IPS	
TP	True positive	Số lần mô hình dự đoán các hành động đã diễn ra
TN	True negative	Số lần mô hình dự đoán đúng các hành động không diễn ra
UWB	Ultra-wideband	Băng thông siêu rộng

(Còn tiếp ở trang sau)

(Tiếp theo DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT)

Viết tắt	Ý nghĩa tiếng Anh	Ý nghĩa tiếng Việt
UniMib-shar	University of Milano Bicocca Smartphone-based Human Activity Recognition dataset	
US	Upstair	Lên cầu thang bộ
WA	Walking	Đi bộ
WS	Walkstoop	Đi khom lưng
XGB	Extreme gradient boosting	Thuật toán tăng cường độ dốc cực hạn
ZUPT	Zero velocity update	Phương pháp hiệu chỉnh vận tốc bằng giả định tốc độ bằng không

(Kết thúc DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT)

DANH MỤC KÝ HIỆU

Ký hiệu	Ý nghĩa
γ	Phạm vi của tín hiệu
AIx	Điểm bất thường
sma	Tổng bình phương độ lớn tín hiệu
max	Giá trị lớn nhất
min	Giá trị nhỏ nhất
κ	Độ nhọn của tín hiệu
$autoc$	Độ tương quan giữa các trục tín hiệu
hc	Căn bậc hai của tỷ lệ giữa phương sai đạo hàm bậc nhất và phương sai tín hiệu
ε	Năng lượng của tín hiệu
mad	Độ lệch tuyệt đối trung bình
σ	Độ lệch chuẩn
μ	Trung bình
aac	Độ thay đổi biên độ trung bình
ς	Độ lệch chuẩn hóa (skewness) của tín hiệu
$mead$	Độ lệch tuyệt đối theo trung vị
$\bar{s}[n]$	Tập hợp tín hiệu gia tốc ban đầu trên từng trục x, y, z
$\bar{a}_x[n]$	Gia tốc ban đầu trên trục x
$\bar{a}_y[n]$	Gia tốc ban đầu trên trục y
$\bar{a}_z[n]$	Gia tốc ban đầu trên trục z
$\bar{a}_x[i]$	Gia tốc sau hiệu chuẩn trên trục x
$\bar{a}_y[i]$	Gia tốc sau hiệu chuẩn trên trục y
$\bar{a}_z[i]$	Gia tốc sau hiệu chuẩn trên trục z
$a[i]$	Trung bình của tín hiệu gia tốc 3 trục
$\bar{N}$	Độ dài tín hiệu thô ($\bar{s}[n]$) trên miền thời gian
$a_k[n]$	Giá trị tín hiệu gia tốc sau khi giảm tốc độ lấy mẫu trên trục k tại vị trí thứ n
N	Độ dài tín hiệu $s[n]$ trên miền thời gian sau tiền xử lý
$\bar{a}_k[2n-1]$	Tín hiệu gia tốc trên trục k tại vị trí lẻ
$\bar{a}_k[2n]$	Tín hiệu gia tốc trên trục k tại vị trí chẵn
F_s	Tần số lấy mẫu

(Còn tiếp ở trang sau)

(Tiếp theo DANH MỤC KÝ HIỆU)

Ký hiệu	Ý nghĩa
$W_j[n]$	Tín hiệu gia tốc trên cửa sổ (quan sát) thứ j sau khi phân đoạn tín hiệu $s[n]$ thành các đoạn chứa các điểm tín hiệu ở khoảng vị trí $[n_i, n_{i+1}]$
$feat_j$	Vector đặc trưng được trích chọn trên cửa sổ $W_j[n]$
$\mathcal{D}$	Tập dữ liệu
L_j	Nhãn của vector đặc trưng trích chọn trên cửa sổ $W_j[n]$
$\hat{L}_j$	Nhãn được dự đoán bởi mô hình học máy của vector đặc trưng $feat_j$ trên cửa sổ thứ $W_j[n]$
$M, \Delta t$	Độ dài của tín hiệu trên mỗi cửa sổ tương ứng với tập hợp các điểm tín hiệu khoảng $[n_i, n_{i+1}]$
$N_{\delta t}$	Số lượng cửa sổ có được sau khi phân đoạn tín hiệu $s[n]$
$\Delta s[n]$	Tín hiệu phản ánh mức biến thiên tức thời của tín hiệu gia tốc quanh giá trị trung bình trên 3 trục x, y và z
ΔW	Thời gian tối thiểu để xác định điểm bất thường
k_D	Tập mã hóa các nhãn từ 0, 1, 2, ... 10 tương ứng các hành động WA, ST, LY, SI, JO, WA, CR, SL, FA, DS, US
clf	Mô hình học máy đạt được sau khi huấn luyện trên tập dữ liệu
$n_estimators$	Siêu tham số phản ánh số lượng cây quyết định của các thuật học máy như XGB, GBDT, RF, LBM
max_depth	Siêu tham số phản ánh độ sâu tối đa của cây quyết định
C_acc	Tham số phạt cho các điểm bị phân loại sai
sen	Độ chính xác
spe	Độ nhạy
pre	Độ đặc hiệu
$F1_{mi}$	Độ chính xác dự đoán đúng
$F1_{ma}$	Điểm $F1$ trung bình vi mô
$score_{val}$	Điểm $F1$ trung bình vĩ mô
$Score_{CV}$	Điểm $F1_{mi}$ đạt được khi thực hiện tìm kiếm siêu tham số trên cùng bộ siêu tham số
$best_score$	Điểm trung bình dựa trên $F1_{mi}$ khi thực hiện xác thực chéo ngẫu nhiên k-fold trên cùng bộ siêu tham số
	Điểm $F1_{mi}$ cao nhất mô hình đạt được khi dự đoán trên tập kiểm thử

(Còn tiếp ở trang sau)

(Tiếp theo DANH MỤC KÝ HIỆU)

Ký hiệu	Ý nghĩa
$best_param$	Các tham số tối ưu đạt được mô hình sau khi huấn luyện
ε_0	Độ lệch cài đặt tối đa giữa $score_{val}$ và $Score_{CV}$
GM	Trung bình nhân giữa độ nhạy và độ đặc hiệu
I_{total}	Dòng tiêu thụ trung bình tổng hợp
T_{hours}	Thời gian hoạt động thực (giờ)
η	Hiệu suất chuyển đổi nguồn
$C_{battery}$	Dung lượng danh định của pin (mAh)
$H_k(z)$	Hàm truyền tín hiệu áp dụng cho bộ lọc LPZ
G_k	Hệ số chuẩn hóa biên độ
Q_k	Hệ số chất lượng
$y_{fwd}[i]$	Chuỗi tín hiệu sau lọc giai đoạn 1 (lọc thuận)
$y_{rev}[i]$	Chuỗi tín hiệu đảo ngược lần 1 của $y_{fwd}[i]$
$\tilde{y}_{back}[i]$	Chuỗi tín hiệu sau lọc giai đoạn 2 (lọc ngược)
$\delta P[k]$	Sai số bù cho áp suất theo nhiệt độ
$P[k]$	Áp suất bù
$P_{raw}[k]$	Áp suất ban đầu đọc từ cảm biến
$T_{meas}[k]$	nhiệt độ môi trường ảnh hưởng đến cảm biến áp suất
T_{ref}	Nhiệt độ tham chiếu trung bình tại thời điểm đo
H_k	Độ cao tương đối so với mức nước biển dựa trên áp suất $P_{raw}[k]$
H_k^*	Độ cao tính toán sau khi xử lý ảnh hưởng bởi nhiệt độ
h_{F_k}	Tập hợp độ cao các tầng trong tòa nhà giám sát
F_k	Tầng thứ k trong tòa nhà giám sát
C_{seq}	số bước khi di chuyển ở cầu thang
α_k	Góc di chuyển
$f_{DT}(feat_k)$	Hàm dự đoán góc di chuyển sử dụng DT
ΔF_k	Sự thay đổi (tăng/giảm) tầng trong tòa nhà

(Kết thúc DANH MỤC KÝ HIỆU)

MỞ ĐẦU

1. TÍNH CẤP THIẾT

Quá trình đô thị hóa diễn ra nhanh chóng đặt ra những thách thức đáng kể đối với an toàn xây dựng và phòng cháy chữa cháy [1] trên toàn thế giới. Theo báo cáo World Urbanization Prospects 2018 Revision¹, khoảng 55% dân số toàn cầu sinh sống tại khu vực đô thị vào năm 2018, và con số này dự báo sẽ đạt gần 68% vào năm 2050. Song song với đó, sự gia tăng nhanh chóng của các dự án xây dựng nhưng thiếu giám sát chặt chẽ trong quá trình thi công, dẫn đến sự xuất hiện của nhiều công trình kém chất lượng, khó đảm bảo an toàn cho con người. Sự xuống cấp dần theo thời gian của hệ thống cứu nạn và phòng cháy chữa cháy có thể gây ra hậu quả nghiêm trọng [2] khi xảy ra sự cố.

Các vụ cháy quy mô lớn và phức tạp đã làm gia tăng rủi ro mất an toàn đối với lính cứu hỏa trong quá trình tìm kiếm và cứu nạn. Họ thường xuyên phải đối mặt với nhiệt độ cao [3], khói độc hại [4], cũng như nguy cơ sập đổ công trình [5]. Bên cạnh đó, họ phải làm việc trong môi trường có tầm nhìn hạn chế [6] và điều kiện thính giác bị suy giảm [7]. Trong bối cảnh hỏa hoạn, bản thân lính cứu hỏa có thể trở thành nạn nhân và cần được sự trợ giúp kịp thời.

Tại Hoa Kỳ, tổng cộng có 23075 nhân viên cứu hộ bị thương theo báo cáo về thương vong của lính cứu hỏa trong giai đoạn 2018–2020². Trong số này, 87% ca chấn thương xảy ra tại các vụ cháy công trình, với nguy cơ chấn thương vĩnh viễn cao gấp mười lần so với cháy ngoài công trình. Thống kê của hiệp hội phòng cháy chữa cháy Hoa Kỳ³ (NFPA) ước tính có 63175 ca chấn thương, với 89 trường hợp tử vong khi đang làm nhiệm vụ trong năm 2023. Các hoạt động chữa cháy gây ra rủi ro cao nhất, chiếm khoảng 18875 trường hợp.

Theo thông cáo báo chí⁴ từ cổng thông tin điện tử Bộ công an về tình hình cháy nổ các năm 2023, 2024 và 2025, cả nước ghi nhận 4112 vụ cháy năm 2024. Hậu quả làm 100 người thiệt mạng và 89 người bị thương; thiệt hại về tài sản ước tính đạt khoảng 657.45 tỷ đồng. Trong số đó, có 48 vụ cháy lớn và 51 vụ gây thiệt hại nghiêm trọng về người, khiến 99 người tử vong và 89 người bị thương. So sánh với cùng kỳ năm 2023, số vụ cháy tăng 562 vụ, tương đương 15.83% (4112 so với 3550 vụ). Số người tử vong giảm 50 người (tương đương giảm 33.33%, từ 150 xuống còn 100), và số người bị thương giảm 25 người (giảm 21.93%, từ 114 xuống còn 89). Tuy nhiên, thiệt hại về tài sản tăng đáng kể, tăng

¹<https://www.un.org/development/desa/en/news/population/> (Accessed: 12:00 12/08/2025)

²<https://www.usfa.fema.gov/statistics/> (Accessed: 12:00 12/08/2025).

³<https://www.nfpa.org/> (Accessed: 12:00 12/08/2025).

⁴<https://canhsatpccc.gov.vn/vi/news/thong-cao-bao-chi> (Accessed: 12:00 12/08/2025).

248.09 tỷ đồng, tương ứng 60.6% (657.45 so với 409.36 tỷ đồng). Thống kê cho thấy các vụ cháy, nổ tại Việt Nam trong những năm gần đây chủ yếu tập trung tại khu vực thành thị, đặc biệt ở các địa phương có tốc độ phát triển kinh tế và đô thị hóa nhanh, với mật độ cao của các cơ sở sản xuất, kinh doanh. Trong năm 2024, khu vực thành thị ghi nhận 2455 vụ cháy, chiếm 59.7% tổng số vụ trên toàn quốc. Xét theo loại hình công trình, số vụ cháy chủ yếu xảy ra tại nhà dân và nhà ở kết hợp kinh doanh, với 1708 vụ, tương ứng 41.58%.

Tình trạng cháy nổ tại các công trình nhà ở có kết hợp kinh doanh tiếp tục diễn biến phức tạp. Vào đêm ngày 12/09/2023, vụ cháy nghiêm trọng tại một chung cư mini 9 tầng thuộc phường Khương Đình, quận Thanh Xuân, Hà Nội, đã cướp đi sinh mạng của 56 người và làm 37 người khác bị thương. Gần đây, vụ hỏa hoạn đặc biệt nghiêm trọng xảy ra vào rạng sáng ngày 24/05/2024 trên đường Trung Kính, phường Trung Hòa, quận Cầu Giấy, khiến 14 người thiệt mạng. Tiếp đó, vào đêm ngày 18/12/2024, một vụ cháy tại quán cà phê “Hát cho nhau nghe” trên đường Phạm Văn Đồng, phường Cổ Nhuế 2, quận Bắc Từ Liêm đã khiến 11 người tử vong; điểm cháy được xác định là một ngôi nhà cao tầng treo biển hiệu cơ sở kinh doanh.

Những thách thức lớn mà lính cứu hỏa phải đối mặt là sự thiếu hụt các công cụ chuyên dụng hỗ trợ trong công việc [8,9]. Việc ứng dụng khoa học và công nghệ góp phần quan trọng trong việc nâng cao an toàn cho lính cứu hỏa. Có ba hướng tiếp cận chính, bao gồm: i> Cải thiện trang bị bảo hộ [10]; ii> Giám sát tâm lý chiến sĩ trong môi trường căng thẳng [11]; 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 [12]. 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 [13]. Đồng thời, đó là yếu tố then chốt để người chỉ huy có phản ứng kịp thời, giúp giảm thiểu rủi ro [14].

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 [15]. 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 [16]. Bởi vậy, 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.

Để rút ngắn thời gian cứu hộ, cứu nạn và hạn chế thấp nhất rủi ro cho lính cứu hỏa đang làm nhiệm vụ, việc xây dựng một hệ thống hỗ trợ cho các chiến sĩ cứu hỏa khi làm nhiệm vụ trong nhà là cần thiết. Do đó, nghiên cứu sinh (NCS)

lựa chọn nghiên cứu đề tài "*Nghiên cứu các phương pháp nhận dạng hành động và định vị trong nhà hỗ trợ tìm kiếm cứu nạn trong các tình huống khẩn cấp*". Đây là chủ đề nghiên cứu có ý nghĩa thực tiễn và giá trị khoa học, với mục tiêu ứng dụng các kỹ thuật học máy và xử lý tín hiệu tiên tiến để phân tích dữ liệu cảm biến (gia tốc, hướng di chuyển, trạng thái chuyển động...) và ứng dụng các thuật toán phù hợp trên thiết bị đeo, có khả năng xử lý theo thời gian thực. Nghiên cứu hướng đến việc cung cấp thông tin hoạt động và vị trí chiến sĩ tới chỉ huy bên ngoài. Do đó, luận án tập trung vào việc nâng cao khả năng nhận dạng hành động (Human Activity Recognition-HAR) dành cho lính cứu hỏa. Thông tin này khi kết hợp với thông tin vị trí sẽ giúp cung cấp dữ liệu khách quan và liên tục, nhằm hỗ trợ chỉ huy ra quyết định kịp thời khi có tai nạn xảy ra với những người cứu hộ.

2. MỤC TIÊU NGHIÊN CỨU

- Xây dựng thuật toán ứng dụng cho hệ thống nhận dạng hành động theo thời gian thực cho lính cứu hỏa. Thuật toán này có thể triển khai trên thiết bị đeo tích hợp cảm biến quán tính và vi điều khiển bị giới hạn hiệu năng, giúp tiết kiệm năng lượng, giảm độ trễ phản hồi và phù hợp với một số hành động đặc thù của lính cứu hỏa.
- Xây dựng mô hình theo dõi vị trí được triển khai trên thiết bị đeo cho nhân viên cứu nạn cứu hộ bên trong tòa nhà và các công trình dựa trên các kỹ thuật học máy và xử lý tín hiệu tiên tiến.

Để giải quyết các vấn đề trên, luận án tập trung nghiên cứu các công trình liên quan và đề xuất các cảm biến phù hợp để tích hợp vào hệ thống. Quy trình hiệu chỉnh phù hợp được áp dụng. Dữ liệu thu được từ các cảm biến được xử lý để phân biệt trạng thái, phát hiện tình huống bị thương cũng như ước lượng hướng rẽ, thời điểm rẽ, số bước và chiều dài bước. Dựa trên bản đồ thiết kế tòa nhà, các thuật toán đề xuất được kết hợp với dữ liệu hành động, vị trí, cho phép theo dõi tình trạng của lính cứu hỏa trong tòa nhà.

3. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

- Nghiên cứu tập trung vào việc lựa chọn vi điều khiển, thiết bị thu phát sử dụng băng thông siêu rộng (Ultra Wideband - UWB) và các loại cảm biến như cảm quán tính, cảm biến áp suất để xây dựng thiết bị đeo chi phí thấp.
- Nghiên cứu các kỹ thuật học máy và xử lý tín hiệu nhằm đánh giá ưu nhược điểm của chúng trong việc xử lý và phân loại tín hiệu y sinh cũng như trạng thái hoạt động của lính cứu hỏa.

- Nghiên cứu các kỹ thuật phân tích và kết hợp tín hiệu phù hợp, từ đó xác định vị trí dựa trên các tham số góc di chuyển, độ cao, khoảng cách đã di chuyển.
- Các giải thuật được đề xuất sẽ được kiểm chứng trên các bộ dữ liệu công khai và bộ dữ liệu tự xây dựng, sau đó cải tiến để tăng cường độ chính xác của hệ thống.

4. ĐỐI TƯỢNG, PHẠM VI NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu tập trung vào theo dõi trạng thái hoạt động và vị trí trong nhà đối với lực lượng cứu hoả. Các giải thuật được đề xuất hướng tới hệ thống độc lập, không phụ thuộc vào các hạ tầng được thiết lập trước. Các thông tin về vị trí ước tính và trạng thái hiện tại của lính cứu hoả được truyền đến chỉ huy dựa trên thông tin bản đồ thiết kế của tòa nhà đã được cung cấp.

5. ĐÓNG GÓP CỦA NGHIÊN CỨU

- Đề xuất thuật toán tích hợp của sổ trượt thông minh với cơ chế phát hiện chuyển đổi hành động, nhằm tối ưu phân đoạn tín hiệu và nâng cao chất lượng đặc trưng đầu vào. Thuật toán được ứng dụng xây dựng hệ thống nhận dạng hành động thời gian thực, tối ưu cho môi trường hoạt động đặc thù của lính cứu hoả, với mục tiêu cải thiện độ chính xác và tốc độ phản hồi của hệ thống giám sát tự động.
- Đề xuất giải thuật xác định bước chân di chuyển có độ phức tạp tính toán thấp, dựa trên sự kết hợp dữ liệu từ cảm biến quán tính và băng thông siêu rộng. Giải thuật này nhằm xây dựng một mô hình ước lượng chuyển động người đi bộ hiệu quả, hỗ trợ cải thiện độ chính xác và ổn định của hệ thống định vị và theo dõi vị trí người trong nhà.

6. CẤU TRÚC CỦA LUẬN ÁN

Luận án bao gồm phần **MỞ ĐẦU** trình bày tính cấp thiết, mục tiêu, đối tượng, phạm vi và nội dung nghiên cứu của luận án. Tiếp theo, luận án trình bày 3 chương chính với nội dung như sau:

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU, trình bày tổng thể các nghiên cứu về HAR sử dụng cảm biến đeo cũng như các phương pháp đánh giá hiệu năng của các giải thuật, mô hình đề xuất.

CHƯƠNG 2: HỆ THỐNG NHẬN DẠNG HÀNH ĐỘNG CHO LÍNH CỨU HOẢ, nghiên cứu một số hành động đặc thù của lính cứu hoả và tập trung vào việc tối ưu giải thuật phát hiện ngã nguy hiểm. Từ đó, tốc độ xử lý được cải thiện và các hành động chuyển tiếp được phân biệt tốt hơn.

CHƯƠNG 3: PHƯƠNG PHÁP ĐỊNH VỊ TRONG NHÀ SỬ DỤNG THIẾT BỊ ĐEO, đề xuất giải thuật theo dõi vị trí của lính cứu hoả dựa trên việc xác định hướng di chuyển dựa trên cảm biến vận tốc góc và khoảng cách di chuyển dựa trên thiết bị đeo tại hai chân được tích hợp công nghệ UWB.

Phần **KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ**, trình bày tóm lược kết quả đạt được của luận án, thảo luận ưu nhược điểm và hướng phát triển trong tương lai.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

Lính cứu hoả đóng vai trò quan trọng trong xã hội, họ là những người hùng thầm lặng, sẵn sàng xả thân cứu hộ, cứu nạn khi có sự cố thiên tai lũ lụt, hoả hoạn. Chương này sẽ trình bày tổng quan các kỹ thuật nhận dạng hành động và theo dõi vị trí trong nhà ứng dụng hỗ trợ cho lính cứu hoả. Từ những khoảng trống nghiên cứu, NCS đưa ra định hướng nghiên cứu của luận án.

1.1. Tổng quan nhận dạng hành động người

Nhận dạng hành động đã thu hút được nhiều sự quan tâm nhờ khả năng ghi nhận hành vi con người dựa trên dữ liệu cảm biến và các ứng dụng đa dạng trong chăm sóc sức khỏe [17], công nghiệp [18], thể thao [19] và tìm kiếm, cứu nạn [12]. HAR hiện nay chủ yếu được tiếp cận theo hai hướng: thị giác máy tính [20] và tín hiệu từ cảm biến đeo được [21]. Tuy nhiên, nghiên cứu [22] đã chỉ ra các hạn chế lớn của phương pháp nhận dạng hành động dựa trên thị giác gồm nhạy cảm với điều kiện môi trường, yêu cầu xử lý dữ liệu phức tạp, và vấn đề quyền riêng tư do việc ghi hình liên tục. Ngược lại, cảm biến đeo được được đánh giá cao nhờ những ưu điểm nổi bật như kích thước nhỏ gọn, chi phí thấp, và khả năng phát hiện nhanh chóng các thay đổi về động học [23–26].

Bảng 1.1 trình bày tổng quan về các nghiên cứu gần đây về HAR, sử dụng thiết bị đeo được tích hợp cảm biến gia tốc. Cảm biến gia tốc được đánh giá cao nhờ những ưu điểm nổi bật như kích thước nhỏ gọn, chi phí thấp và khả năng phát hiện nhanh các thay đổi động học [23], đặc biệt hữu ích trong các ứng dụng đòi hỏi phản hồi thời gian thực như phát hiện té ngã hoặc nhận dạng hành động người [25]. Thông tin thu được từ cảm biến gia tốc có thể bị ảnh hưởng bởi rung động không mong muốn do chuyển động ngoài ý muốn hoặc nhiễu từ môi trường [26]. Hiệu quả của nhận dạng hành động phụ thuộc đáng kể vào vị trí đặt cảm biến trên cơ thể [27]. Các thiết bị tích hợp cảm biến gia tốc thường được đặt tại các vị trí như eo [17,21], cổ tay [28], hoặc đùi [9] để thu thập dữ liệu hành động. Nhiều nghiên cứu đã kết hợp dữ liệu từ cảm biến gia tốc với các cảm biến khác như con quay hồi chuyển [24], cảm biến khí carbon monoxide [22], hoặc cảm biến quán tính 9 trục [29] nhằm nâng cao khả năng phát hiện các chuyển động phức tạp. Ngoài ra, cảm biến điện cơ (EMG) [30] cũng đã được sử dụng để thu nhận tín hiệu cơ bắp khi lính cứu hoả tham gia bài kiểm tra thể lực.

Bảng 1.1: Tổng quan về nhận dạng hành động người dùng thiết bị đeo.

Năm	Thông tin dữ liệu	Đối tượng	Phương pháp
2025	Gia tốc; WISDM (20 Hz), PAMAP2 (33.33 Hz), UniMiB (50 Hz), UCI (50 Hz); vị trí: túi trước	Người, hành động	HARMamba [31]
2024	Gia tốc; UniMiB (50 Hz), WISDM (20 Hz), UCI (50 Hz); vị trí: túi trước	Người, hành động	CLS-CNN-ResNest [32]
2024	Gia tốc; 50 Hz; 16 tình nguyện viên; vị trí: thắt lưng; 5 hành động	Người, hành động	DT, GBDT, SVM, RF, KNN [24]
2024	Cảm biến kết hợp; 100 Hz; 18 tình nguyện viên; vị trí: cánh tay, bắp tay, bắp chân; 8 hành động	Lính cứu hoả, hành động	Học máy lai [30]
2023	Gia tốc; Opportuni (30 Hz), UniMiB (50 Hz), UR Fall (256 Hz), UCI (50 Hz); vị trí: túi trước	Người, hành động	CNN-DCT, ResNet-DCT [33]
2023	Gia tốc; 50 Hz; 14 tình nguyện viên; vị trí: thắt lưng; 4 hành động	Người cao tuổi, hành động	GBDT, SVM, RF, KNN [21]
2022	Gia tốc, CO; 100 Hz; 8 tình nguyện viên; vị trí: thắt lưng; 2 hành động	Lính cứu hoả, ngã	Phát hiện ngã [22]
2021	Cảm biến 9 trục, 15 Hz; 10 tình nguyện viên; vị trí: ngực, khuỷu tay, thắt lưng, đùi, mắt cá; 2 hành động	Lính cứu hoả, ngã	LSTM [29]
2020	Gia tốc; 50 Hz; 21 tình nguyện viên; vị trí: cổ tay; 6 hành động	Người, hành động	GBDT, RF, KNN, SVM [28]
2019	Cảm biến 9 trục, CO; áp kế; 100 Hz; 6 tình nguyện viên; vị trí: túi quần trước; 2 hành động	Lính cứu hoả, ngã	Phát hiện ngã [9]

(Còn tiếp ở trang sau)

(Tiếp theo Bảng 1.1)

Năm	Thông tin tập dữ liệu	Đối tượng	Phương pháp
2019	Gia tốc; 50 Hz; 16 tình nguyện viên; vị trí: thắt lưng; 2 hành động	Người cao tuổi, ngã	Phát hiện ngã [17]
2018	Gia tốc, con quay hồi chuyển; 50 Hz; 30 tình nguyện viên; vị trí: cổ tay; 6 hành động	Người, hành động	Mô hình phân cấp [34]
2016	Tần số vô tuyến gắn trên cơ thể, Doppler; 20 Hz; vị trí: ngực, trán, cổ tay phải, mắt cá phải; 7 hành động	Lính cứu hoả, hành động	SVM [35]
2009	Gia tốc; 64 Hz; 20 tình nguyện viên; vị trí: mắt cá, đùi; 8 hành động	Người, hành động	KNN [36]

(Kết thúc Bảng 1.1)

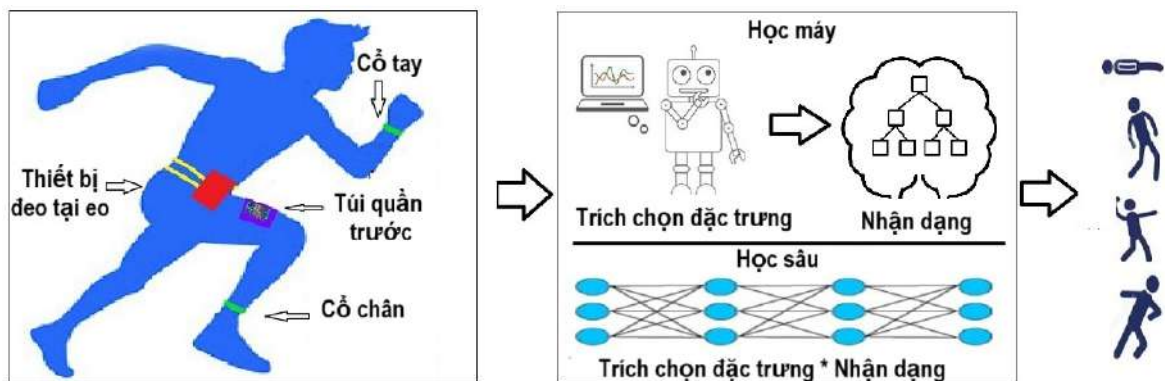
Nhận dạng hành động dựa trên cảm biến gia tốc thường được ứng dụng trong giám sát sức khỏe [17, 21, 24, 33, 34, 37, 38], nhưng nó cũng có tiềm năng trong việc theo dõi hành động theo thời gian thực và phát hiện nguy hiểm với lính cứu hoả [29]. Hầu hết các nghiên cứu chủ yếu tập trung vào việc phân biệt các tình huống té ngã [9, 29, 30], nhưng ít chú ý đến các hành động đặc thù của lính cứu hoả [29, 30] như bò hoặc trườn. Những hành động này thường được thực hiện bởi lính cứu hoả trong môi trường khắc nghiệt với nhiệt độ cao, khói dày đặc và không gian chật hẹp [39]. Những yếu tố này khiến việc nhận dạng trở nên khó khăn.

Các thách thức chính bắt nguồn từ sự tương đồng về tư thế, khó kiểm soát dữ liệu cảm biến và sự chuyển đổi liên tục theo thời gian. Những nghiên cứu gần đây đã áp dụng học sâu (Deep Learning - DL) [30, 33, 40, 41] nhằm cải thiện độ chính xác trong nhận dạng. Các phương pháp này thường yêu cầu tài nguyên tính toán lớn, gây khó khăn khi triển khai trên các vi điều khiển vốn hạn chế về bộ nhớ, tốc độ xử lý và dung lượng năng lượng. Tiêu thụ năng lượng cao làm giảm thời gian hoạt động, buộc phải dùng pin lớn hơn, từ đó hạn chế thiết kế các thiết bị đeo nhỏ gọn cho lính cứu hoả. Để khắc phục vấn đề này, việc áp dụng các mô hình học máy (machine learning - ML) nhẹ có thể triển khai trực tiếp trên vi điều khiển là một giải pháp khả thi, giúp tối ưu tài nguyên đồng thời duy trì sự cân bằng giữa độ chính xác, tốc độ xử lý và hiệu quả năng lượng.

1.1.1. Bài toán nhận dạng hành động người

Nghiên cứu về HAR ngày càng thu hút sự quan tâm nhờ khả năng ứng dụng thực tế cao trong các hệ thống như theo dõi tình trạng vận động thể thao [42], giám sát và phòng ngừa tình trạng lười vận động ở con người [43]. Những thiết bị này thường được đeo trong quá trình điều trị để theo dõi tiến trình thực hiện các hoạt động hằng ngày. Bên cạnh đó, người khỏe mạnh cũng có thể sử dụng các thiết bị đeo để theo dõi chu trình vận động thể thao, giám sát thói quen sinh hoạt và xác định mức tiêu thụ năng lượng cho từng hoạt động.

Vị trí gắn cảm biến (Hình 1.1) ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất của mô hình nhận dạng và độ chính xác bị ảnh hưởng bởi vị trí đeo trên cơ thể, tùy thuộc vào loại hoạt động cần giám sát. Nghiên cứu [44] đã kết hợp nhiều cảm biến ở các vị trí khác nhau nhằm tăng lượng thông tin thu thập về hoạt động của con người. Tuy nhiên, việc mang quá nhiều thiết bị đeo trên cơ thể có thể gây bất tiện và khó chịu cho người dùng.



Hình 1.1: Mô hình tổng quát của hệ thống nhận dạng hành động người và các phương pháp học máy trên dữ liệu từ cảm biến đeo.

Hiệu suất của mô hình nhận dạng được cải thiện đáng kể khi ML được áp dụng để nhận dạng hành động của con người [24]. Các nghiên cứu hướng đến ứng dụng HAR theo thời gian thực thường quan tâm đến việc triển khai mô hình ML trên thiết bị nhúng như vi điều khiển. Tuy nhiên các bộ điều khiển tích hợp trong thiết bị thường có công suất thấp và bị hạn chế về bộ nhớ cũng như tốc độ xử lý. Việc lựa chọn thuật toán học máy có thể nhúng được trên vi điều khiển là một thách thức lớn. Do hệ thống nhúng được thiết kế cho các mục đích cụ thể, nên tài nguyên còn lại để triển khai mô hình học máy là rất ít [21]. Bên cạnh đó, các mô hình ML cần được tối ưu hóa và biên dịch sang ngôn ngữ C/C++ trước khi nhúng vào vi điều khiển [45]. Các mô hình ML (Hình 1.1) hoạt động dựa trên kinh nghiệm, quan sát và dữ liệu trong quá khứ để dự đoán,

nhận dạng hành động tương ứng, thay vì chỉ tuân theo các quy tắc được lập trình sẵn.

Nhìn chung, lĩnh vực học máy bao gồm bốn hướng tiếp cận chính, gồm: i> học có giám sát [24]; ii> học không giám sát [46]; iii> học tăng cường [47]; và học bán giám sát [48]. Trong bài toán HAR sử dụng cảm biến đeo, thuật toán học có giám sát sẽ dự đoán nhãn (hành động) từ dữ liệu mô tả mới dựa trên mối tương quan giữa nhãn đó và dữ liệu mô tả đã biết trước. Về mặt toán học, một tập dữ liệu đầu $\mathcal{D}$ vào có dạng $\bar{s}[n] = (\bar{a}_x[n], \bar{a}_y[n], \bar{a}_z[n])$ và một tập nhãn L có dạng $\{L_0, L_1, L_2, \dots, L_k\}$. Trong đó, $\bar{s}[n]$ là chuỗi dữ liệu mô tả dữ liệu cho nhãn L_j với $j = 1, 2, \dots, k$. Các cặp dữ liệu có dạng $(\bar{s}[n], L_j)$ được chia thành hai tập: tập huấn luyện ($\mathcal{D}_{train}$) và tập kiểm tra ($\mathcal{D}_{test}$). Trên $\mathcal{D}_{train}$, một hàm tương quan f được tính toán để ánh xạ các phần tử của tập $\mathcal{D}$ sang phần tử tương ứng trong tập L . Từ đó, khi có dữ liệu mới $\hat{s}[n]$, hàm tương quan f sẽ dự đoán nhãn $\hat{L}_j$ tương ứng theo công thức $\hat{L}_j = f(\hat{s}[n])$. Tuy nhiên, hàm này không tồn tại trong thực tế, do đó hàm f cần được xây dựng đủ tốt để đạt hiệu suất phân loại tối ưu sao cho $\hat{L}_j \approx f(\hat{s}[n])$. Việc xây dựng một mô hình HAR bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố, bao gồm chất lượng của dữ liệu mô tả hành động, kích thước của cửa sổ dữ liệu, các đặc trưng tính toán, các mô hình ML được áp dụng và độ phức tạp của các hành động.

1.1.2. Nhận dạng hành động người sử dụng thiết bị đeo

Dân số tăng nhanh và sự già hóa dân số đã dẫn đến nhu cầu ngày càng cao về chăm sóc sức khỏe cho người cao tuổi [37, 38]. Các nghiên cứu về HAR cung cấp dữ liệu đầu vào quan trọng cho các hệ thống cảnh báo, hỗ trợ việc phát hiện sớm các vấn đề sức khỏe [17, 21, 24]. Để đáp ứng yêu cầu giám sát liên tục và ít xâm lấn, các thiết bị đeo được sử dụng rộng rãi nhờ khả năng thu thập dữ liệu chuyển động theo thời gian thực với chi phí thấp [21, 24]. Sự phát triển của trí tuệ nhân tạo đã giúp nâng cao hơn nữa khả năng phân tích tự động dữ liệu HAR, trong đó ML [45] và DL [41, 49] là hai khía cạnh chính.

Học máy truyền thống được ứng dụng rộng rãi trong HAR nhờ sự đơn giản, khả năng triển khai trên các thiết bị đeo công suất thấp, cũng như khả năng cân bằng giữa chi phí, hiệu quả năng lượng và hiệu suất nhận dạng [21, 24]. Hong và nhóm nghiên cứu [21] triển khai một hệ thống tích hợp các thành phần như cảm biến gia tốc, vi điều khiển công suất thấp nhúng mô hình rừng ngẫu nhiên (Random Forest - RF). Hệ thống này đạt độ chính xác 99.2% trong việc nhận dạng bốn trạng thái cơ bản: đứng (Standing - ST), ngồi (Sitting - SI), chạy bộ (Jogging - JO) và đi bộ (Walking - WA).

Lu và nhóm nghiên cứu [28] đề xuất một phương pháp HAR sử dụng cảm biến gia tốc với độ chính xác 93%. Họ tiến hành trích xuất 6 loại đặc trưng cơ bản trên các cửa sổ có kích thước 5 giây và kết hợp đánh giá trên các mô hình cây quyết định tăng cường độ dốc (Gradient boosting decision tree - GBDT), RF, K láng giềng gần (K-Nearest Neighbor - KNN), và máy vector hỗ trợ (Support Vector Machine - SVM). Khác với họ, Wang và nhóm nghiên cứu [34] áp dụng cửa sổ 2.56 giây, độ chồng lấp 50% và sử dụng cấu trúc phân loại dạng cây phân cấp. Các mô hình RF và SVM được áp dụng tại mỗi nút với đặc trưng được tối ưu hóa, độ chính xác đạt 90.4% trên tập dữ liệu chứa thông tin cảm biến gia tốc và con quay hồi chuyển.

Ngoài các đặc trưng miền thời gian, các đặc trưng miền tần số cũng đã được khai thác để nâng cao hiệu suất phân loại. Preece và nhóm nghiên cứu [50] đã so sánh 14 loại đặc trưng cho tín hiệu cảm biến gia tốc trong miền thời gian, miền tần số từ cảm biến gắn ở mắt cá chân. Đồng thời, họ sử dụng cửa sổ thời gian có kích thước 2 giây với độ chồng lấp 50% và áp dụng mô hình KNN. Hiệu quả nhận dạng 8 hoạt động đã đạt độ chính xác tối đa 94% với các đặc trưng tín hiệu sau khi biến đổi Fourier nhanh.

DL đã chứng minh được hiệu quả vượt trội trong HAR nhờ khả năng tự động học đặc trưng từ tín hiệu cảm biến và mô hình hóa các mẫu hoạt động phức tạp [40]. Trong nghiên cứu [51], cơ chế Triple Cross-Domain Attention được đề xuất trên tín hiệu cảm biến, thời gian và kênh để cải thiện hiệu suất HAR trên mạng nơ-ron tích chập (Convolutional Neural Network - CNN) và mạng dư (ResNet). Phương pháp này đã nâng cao độ chính xác thêm 0.96–1.47% trên bộ dữ liệu UniMiB-SHAR mà không làm tăng số lượng tham số. Xu và nhóm nghiên cứu [33] đã đề xuất cơ chế chú ý kênh (channel attention) dựa trên biến đổi cosin rời rạc (Discrete Cosine Transform - DCT) trong miền tần số để cải thiện hiệu suất mô hình trong các tác vụ HAR. Bằng cách khai thác đặc trưng các thành phần tần số, phương pháp này cho phép mô hình ResNet học được nhiều đặc trưng thông tin hơn của từng hoạt động và đạt độ chính xác 79.51%, so với 76.38% của mô hình gốc. Qin và nhóm nghiên cứu [32] đã đề xuất chiến lược học cộng tác kết hợp CNN và ResNest (CLS-CNN-ResNest), cho phép điều chỉnh đồng thời độ rộng mạng và độ phân giải đầu vào, từ đó cân bằng giữa độ chính xác và độ phức tạp tính toán. Mô hình này đạt độ chính xác 99.12% trên tập dữ liệu WISDM, 97.64% trên UCI-HAR và 78.91% trên UniMiB-SHAR, đồng thời hỗ trợ suy luận trực tiếp trên thiết bị mà không cần huấn luyện lại nhờ cơ chế chia sẻ trọng số giữa các mạng con. Ở một hướng tiếp cận khác, Li và nhóm nghiên cứu [41] tập trung vào môi trường nhà thông minh với nhiều

người dùng và các cảm biến môi trường phân tán. Mô hình HAR đề xuất CNN dựa trên sự phân tích mức độ đóng góp của cảm biến và ma trận khoảng cách không gian nhằm nâng cao độ chính xác nhận dạng và giảm nhiễu do các hoạt động chồng chéo. Thí nghiệm trên bộ dữ liệu CASAS¹ cho thấy mô hình đạt độ chính xác từ 86.68–97.08%, đồng thời giảm đáng kể thời gian xử lý so với mô hình mạng bộ nhớ dài hạn ngắn hạn (Long Short Term Memory - LSTM).

Học sâu mang lại độ chính xác cao nhưng yêu cầu tài nguyên tính toán lớn nên khó triển khai trên các thiết bị nhúng bị giới hạn tài nguyên. Đặc biệt các ứng dụng HAR theo thời gian thực trên các nền tảng vi điều khiển công suất thấp, học máy truyền thống được xem là lựa chọn thực tế hơn nhờ sự đơn giản, chi phí thấp và khả năng triển khai hiệu quả.

1.1.3. Nghiên cứu về hành động của lính cứu hoả

Khác với hành động của người già thường diễn ra chậm, nhận dạng hành động cho lính cứu hoả (FAR) hướng đến xử lý những hành động với cường độ cao và thay đổi liên tục [29,30]. Một số nghiên cứu về FAR [9,11,35,52] hướng đến mục tiêu nâng cao an toàn và hiệu quả, thông qua việc giám sát hành động thể chất, phát hiện bất thường và cung cấp thông tin thời gian thực trong các tình huống khẩn cấp.

Tại Việt Nam, hệ thống hỗ trợ lính cứu hoả khác áp dụng cho đa cảm biến kết hợp được Thành và nhóm nghiên cứu phát triển [9] nhằm phát hiện té ngã, giám sát tình trạng sức khỏe chiến sĩ sau ngã và tình hình môi trường xung quanh. Thuật toán phát hiện té ngã kết hợp dữ liệu về gia tốc, tư thế và độ cao, đạt độ chính xác 100% trên tập dữ liệu riêng tư và 97.9% trên tập dữ liệu công khai. Hệ thống giám sát nồng độ khí CO và phát cảnh báo khi vượt quá 33 ppm, đồng thời sử dụng dữ liệu áp suất khí quyển để phân biệt giữa té ngã thực sự và việc sử dụng thang máy.

Tương tự, Định và nhóm nghiên cứu [22] đã phát triển một hệ thống hỗ trợ thời gian thực cho lính cứu hoả, sử dụng cảm biến gia tốc và cảm biến Carbon Monoxide (CO) để phát hiện té ngã và giám sát nồng độ CO. Cảm biến gia tốc lấy mẫu ở tần số 100 Hz để nhận dạng các trạng thái hoạt động, gồm té ngã (FA), ST và WA. Cảm biến CO được sử dụng đo nồng độ khí với tần số lấy mẫu 10 Hz để phát hiện ngạt khí độc khi nồng độ khí này vượt quá 35 ppm. Hệ thống sẽ gửi cảnh báo đến người giám sát thông qua thiết bị tích hợp GSM/GPRS. Kết quả cho thấy độ chính xác phát hiện té ngã đạt 93%, độ nhạy 96.5%, và hiệu suất tổng thể 99.4% trên tập dữ liệu công khai SFDLA.

¹<https://www.kaggle.com/datasets/aakshigarg/cases-dataset>

Trong luận án [53], Thành đã xây dựng một hệ thống giám sát thời gian thực tích hợp đa cảm biến (IMU, áp kế và MQ7) nhằm nhận dạng các sự cố té ngã cũng như trạng thái mất khả năng vận động của lính cứu hoả. Kết quả nghiên cứu cho thấy hệ thống đạt độ chính xác 100% trong các thử nghiệm thực tế và 97.96% trên các tập dữ liệu công khai. Trong đề tài khoa học cấp thành phố, Thành và nhóm nghiên cứu [54] mở rộng và phát triển hệ thống cho phép giám sát và truyền tin qua mạng Lora và gửi thông tin hệ thống phần mềm trung tâm qua Wifi/4G.

Tại Trung Quốc, Geng và nhóm nghiên cứu [35] đã đề xuất một phương pháp nhận dạng hành động của lính cứu hoả dựa trên tín hiệu tần số vô tuyến (Radio Frequency - RFY) thu được từ các cảm biến đeo. Họ sử dụng SVM với nhân Gaussian để nhận dạng 7 hành động: ST, WA, JO, nằm (Lying - LY), bò thấp (Crawling - CR), đi lên cầu thang (Upstairs - US) và đi xuống cầu thang (Downstairs - DS). Hệ thống đạt độ chính xác trung bình 88.7%, trong đó các hành động tĩnh như ST và LY được phân loại chính xác hơn, trong khi các hành động chuyển động như JO, US, DS lại dễ bị phân loại nhầm do đặc trưng RFY khá giống nhau. Nghiên cứu này cũng chỉ ra việc đặt cảm biến ở cổ tay và mắt cá chân cho kết quả tốt hơn với các hành động chuyển động. Tuy nhiên, việc sử dụng của sổ thời gian 10 giây đã làm giảm khả năng phản ứng với những hành động nhanh, phức tạp của lính cứu hoả và có thể tăng nhiều khi xử lý.

Cùng với hướng phát hiện ngã, Chai và nhóm nghiên cứu [29] đã phát triển một hệ thống thông minh phát hiện té ngã cho lính cứu hoả, tích hợp cảm biến vào trang phục bảo hộ cá nhân tại năm vị trí trên cơ thể. Hệ thống sử dụng kỹ thuật hợp nhất cảm biến và một mạng nơ-ron hồi tiếp với ba lớp LSTM để nhận dạng các sự kiện té ngã và những hành động tương tự té ngã. Hệ thống đạt độ chính xác 94.1%, độ nhạy 92.25%, và độ đặc hiệu 94.59%, trong đó cảm biến đặt ở ngực cho kết quả tốt và đóng vai trò quan trọng trong nâng cao hiệu quả phát hiện nguy hiểm.

Cũng theo cách tiếp cận tích hợp cảm biến đeo vào quần áo, Chai và nhóm nghiên cứu [30] khảo sát, đánh giá hiệu quả các bài tập huấn luyện thể lực của lính cứu hoả bằng cách đánh giá mức tiêu thụ oxy sau ít nhất 20 lần kiểm tra. Kết quả cho thấy một số người tham gia có dấu hiệu mệt mỏi hoặc thể trạng chưa đạt tối ưu, thể hiện qua xu hướng chọn ST thay vì ngồi (Sitting - SI) trong các khoảng thời gian tạm nghỉ. Tuy nhiên, các quy trình huấn luyện này được thiết kế trong môi trường có kiểm soát và có thể chưa phản ánh đầy đủ sự phức tạp cũng như tính khó lường của các tình huống khẩn cấp thực tế.

Nhìn chung, phần lớn các nghiên cứu sử dụng cảm biến đeo cho lính cứu hoả,

thường quan tâm việc phát hiện té ngã. Hơn nữa, hiện có rất ít bộ dữ liệu công khai để nghiên cứu và phân tích các hành động của họ. Do đó, NCS đã xây một bộ dữ liệu toàn diện về hành vi của lính cứu hỏa, bao gồm cả té ngã, để phục vụ đánh giá hệ thống RFAR đề xuất. Bên cạnh đó, mô hình này được triển khai trên thiết bị biên bị giới hạn hiệu năng nhưng có thể nhận dạng mười một hành động cơ bản của lính cứu hỏa trong các nhiệm vụ tìm kiếm và cứu nạn. Các nghiên cứu hiện nay còn nhiều hạn chế, như chỉ nhận dạng được một số hành động nhất định [9, 22, 29, 35] và thiếu khả năng xử lý thời gian thực.

Hệ thống được đề xuất sử dụng thuật toán RF được nhúng trên một vi điều khiển tiêu thụ năng lượng thấp để xử lý dữ liệu gia tốc thu thập từ cảm biến gắn ở eo. Nghiên cứu tập trung phát triển hệ thống RFAR để nhận dạng các hành động đặc thù thường diễn ra trong nhiệm vụ của lính cứu hỏa, bao gồm bò trườn (Slithering - SL), CR, đi bộ với tư thế khom lưng (Walkstoop - WS) và FA. Mục tiêu là cung cấp một giải pháp có độ chính xác cao đồng thời tối ưu về kích thước, trọng lượng và mức tiêu thụ năng lượng.

1.1.4. Ứng dụng học máy trên thiết bị biên

1.1.4.1. Các phương pháp học máy nhẹ

Việc triển khai các thuật toán HAR trên các thiết bị đeo của lính cứu hỏa đặt ra những thách thức nghiêm trọng về tài nguyên phần cứng [45, 55–58]. Các vi điều khiển (Microcontroller unit - MCU) thường được sử dụng trong các thiết bị đeo tích hợp cảm biến có dung lượng bộ nhớ (SRAM/Flash) hạn chế và tốc độ xử lý thấp để đảm bảo tiết kiệm năng lượng. Do đó, luận án ưu tiên lựa chọn các phương pháp học máy nhẹ, ví dụ như cây quyết định (Decision Tree - DT) và RF cho các bài toán phân loại và hồi quy. DT có ưu điểm vượt trội về tốc độ suy luận nhờ cấu trúc điều kiện đơn giản (if-else), cho phép chuyển đổi dễ dàng sang mã nguồn C/C++ để nhúng trực tiếp vào vi điều khiển. Trong khi đó, RF là một phương pháp học tập hợp (Ensemble Learning) dạng đóng bao (Bagging), giúp cải thiện đáng kể độ chính xác và tính ổn định so với một cây quyết định đơn lẻ bằng cách tổng hợp kết quả từ nhiều cây thành phần, giảm thiểu sai số phương sai mà không làm tăng quá nhiều độ trễ tính toán.

Mặc dù các thuật toán như KNN, SVM, hoặc các phương pháp tăng cường độ dốc như XGBoost, GBDT mang lại hiệu quả cao trong nhiều bài toán khoa học dữ liệu, chúng lại bộc lộ nhiều hạn chế khi áp dụng cho bài toán HAR trên vi điều khiển năng lượng thấp. Đối với KNN, đây là thuật toán học lười, yêu cầu lưu trữ toàn bộ tập dữ liệu huấn luyện trên bộ nhớ RAM và thực hiện tính

toán khoảng cách với mọi điểm dữ liệu mỗi khi cần dự đoán. Điều này tạo ra gánh nặng bộ nhớ và độ trễ suy luận lớn, không khả thi cho các ứng dụng thời gian thực trên MCU. Tương tự, SVM với các hàm nhân (kernel function) phi tuyến tính đòi hỏi khối lượng tính toán dấu phẩy động lớn, gây tiêu tốn năng lượng nhanh chóng, ảnh hưởng đến thời gian hoạt động của thiết bị cứu hộ.

Các mô hình như XGBoost hay GBDT hoạt động dựa trên việc xây dựng các cây tuần tự nhằm sửa lỗi cho các cây trước đó thường dẫn đến các mô hình có độ phức tạp cao. Trong bối cảnh dữ liệu cảm biến quán tính (Inertial measurement Unit - IMU) thường chứa nhiều nhiễu ngẫu nhiên do rung động cơ học hoặc sai số đo lường, các thuật toán Boosting rất dễ gặp phải hiện tượng quá khớp (overfitting) do mô hình học cả các nhiễu của dữ liệu huấn luyện và ít quan tâm quy luật tổng quát. Ngược lại, RF xây dựng các cây một cách độc lập và ngẫu nhiên hóa đặc trưng, giúp thuật toán có khả năng chống lại hiện tượng quá khớp tốt hơn trong môi trường dữ liệu nhiễu. Do đó, xét trên sự cân bằng giữa độ chính xác, khả năng chống nhiễu và hiệu quả sử dụng tài nguyên tính toán, DT và RF là những lựa chọn phù hợp để triển khai hệ thống giám sát an toàn cho lính cứu hỏa trong luận án này.

1.1.4.2. Kỹ thuật nhúng học máy nhẹ trên vi điều khiển

Các thuật toán học máy thường được thực hiện trên các ngôn ngữ bậc cao như Python với sự hỗ trợ của các thư viện mạnh mẽ như Scikit-learn, TensorFlow hoặc PyTorch. Để nhúng mô hình đã huấn luyện vào hệ thống nhúng, cần có các công cụ trung gian giúp biên dịch mô hình sang ngôn ngữ C/C++ tiêu chuẩn. Tuy nhiên gánh nặng tài nguyên do vi điều khiển phải dành một phần đáng kể bộ nhớ Flash và RAM để chứa thư viện trình thông dịch và các toán tử, gây lãng phí đối với các bài toán nhận dạng nên nó ít phù hợp với việc xử lý dữ liệu theo thời gian thực trên phần cứng hạn chế tài nguyên, đồng thời hao tổn năng lượng duy trì.

Để tối ưu hóa tài nguyên tính toán, các thuật toán học máy truyền thống như DT, RF hay XGBoost... được áp dụng để phù hợp với việc xử lý dữ liệu thời gian thực trên vi điều khiển. Các thư viện nhằm biến đổi hàm dự báo $f(x)$ từ môi trường Python (Scikit-learn) thành một hàm $f_C(x)$ thuần C/C++ như m2cgen, emlearn, micromlgen.

- **m2cgen:** Chuyển đổi các mô hình hồi quy và phân loại thành các hàm C chứa các cấu trúc điều kiện lồng nhau hoặc các biểu thức toán học tường minh. Mã sinh ra không phụ thuộc vào bất kỳ thư viện bên thứ ba nào,

giúp việc tích hợp vào firmware trở nên đơn giản.

- **emlearn:** Được tối ưu hóa đặc biệt cho vi điều khiển 8-bit đến 32-bit. Thay vì sinh ra hàng ngàn dòng lệnh if-else gây tốn bộ nhớ chương trình, emlearn biểu diễn mô hình dưới dạng các mảng dữ liệu (data arrays) nhỏ gọn và sử dụng một hàm thực thi (inference engine) tối giản để duyệt qua các mảng này.
- **micromlgen:** Đây là một thư viện mã nguồn mở được thiết kế tối ưu cho hệ sinh thái vi điều khiển, tập trung vào việc hỗ trợ các thuật toán như SVM, DT, RF, XGboost... Ưu điểm nổi bật của "micromlgen" là khả năng tạo ra các tệp tiêu đề (.h) khép kín, không yêu cầu liên kết với bất kỳ thư viện thời gian thực thi (runtime library) bên ngoài nào. Điều này giúp đơn giản hóa tối đa quá trình tích hợp vào firmware và giảm thiểu kích thước bộ nhớ chương trình, đặc biệt hiệu quả khi triển khai các thuật toán phân loại phi tuyến tính nhẹ.

Khi mô hình học máy được chuyển đổi sang mã nguồn C, toàn bộ cấu trúc logic và tham số của mô hình được ánh xạ thành các cấu trúc dữ liệu tĩnh. Quá trình suy luận (inference) trên vi điều khiển là việc tính toán một hàm $f(x)$ đã được rời rạc hóa. Đối với các mô hình cây quyết định (DT) hoặc rừng ngẫu nhiên (RF), hàm này được thực hiện thông qua việc duyệt một cây nhị phân. Mỗi nút trong cây thực chất là một phép so sánh logic thực thi trực tiếp trên thanh ghi của MCU. Tại mỗi nút nội bộ j , vi điều khiển thực hiện hàm quyết định nhị phân:

$$Addr_next = \begin{cases} Addr_{left} & \text{nếu } feat_j \leq \tau* \\ Addr_{right} & \text{nếu } feat_j > \tau* \end{cases} \quad (1.1)$$

trong đó, $feat_j$ là giá trị đặc trưng thứ j trích xuất từ cảm biến IMU, được lưu trong RAM; $\tau*$ là ngưỡng quyết định được xác định từ quá trình huấn luyện, lưu dưới dạng hằng số trong Flash; $Addr_{left}, Addr_{right}$ là địa chỉ bộ nhớ của nút kế tiếp (nút con) trong cấu trúc cây.

Khi thực thi trên vi điều khiển, con trỏ lệnh sẽ nhảy trực tiếp đến địa chỉ bộ nhớ tương ứng với kết quả của phép so sánh. Quá trình nhảy địa chỉ lặp lại cho đến khi con trỏ lệnh trở đến vùng nhớ của nút quyết định dự báo. Tại đây, vi điều khiển không thực hiện so sánh nữa mà truy xuất giá trị dự báo:

$$\hat{L}_b = \text{Dự đoán}(Addr_{leaf}), \quad (1.2)$$

trong đó, $\hat{L}_b$ là kết quả dự báo của cây thứ b ; $Value(Addr_{leaf})$ giá trị trọng số hoặc nhãn lớp được lưu tại địa chỉ đó. Đối với mô hình RF, vi điều khiển thực hiện tích lũy kết quả từ b cây:

$$\hat{L}_j = \text{Tỷ lệ dự đoán cao nhất} \{ \hat{L}_1, \hat{L}_2, \dots, \hat{L}_b \} \quad (1.3)$$

1.2. Tổng quan định vị trong nhà trong tình huống khẩn cấp

Việc xác định chính xác vị trí và tình trạng của từng chiến sĩ trong quá trình tác nghiệp đóng vai trò thiết yếu đối với người chỉ huy trong việc đưa ra các quyết định chiến thuật kịp thời và hiệu quả [59]. Trong điều kiện khắc nghiệt của đám cháy, lính cứu hoả có thể dễ dàng bị mất phương hướng. Điều này không chỉ gây áp lực tâm lý lớn mà còn tiềm ẩn nguy cơ nghiêm trọng đến an toàn tính mạng của họ [60]. Do đó, hệ thống định vị trong nhà (IPS) cho lính cứu hoả theo thời gian thực là một trong những nhiệm vụ có ý nghĩa đặc biệt quan trọng trong các hoạt động chữa cháy và tìm kiếm cứu nạn [14].

Định vị vệ tinh toàn cầu (Global Navigation Satellite System - GNSS) [61] là công nghệ phổ biến và đáng tin cậy trong các ứng dụng theo dõi vị trí ngoài trời. Tuy nhiên với môi trường trong nhà, GNSS bị mất đường ngắm tín hiệu (line-of-sight), hiện tượng phản xạ đa đường (multipath), và suy hao tín hiệu do vật liệu xây dựng. Những điều này dẫn đến kết quả định vị không chính xác, không ổn định, hoặc hoàn toàn không khả dụng. Do đó, GNSS không phải là lựa chọn phù hợp áp dụng cho lực lượng cứu hoả.

Trong thực tế, việc xác định tình trạng và thông tin hiện tại của lính cứu hoả chủ yếu dựa trên trao đổi thông tin qua giọng nói bằng bộ đàm [62]. Đây là hình thức được sử dụng phổ biến trong các hệ thống truyền thông khẩn cấp, như tiêu chuẩn P25¹. Theo phương pháp này, các chiến sĩ báo cáo vị trí tương đối của mình (ví dụ: “gần cầu thang” hoặc “gần cửa sổ”) cho chỉ huy bên ngoài một cách định kỳ. Tuy nhiên, trong bối cảnh hỗn loạn của hiện trường cháy, phương pháp này dễ bị gián đoạn, đặc biệt khi lính cứu hoả di chuyển đến các tầng cao hoặc khu vực tầng hầm, nơi tín hiệu vô tuyến bị suy giảm nghiêm trọng, khiến việc thông tin vị trí khó khả thi. Điều này đặt ra yêu cầu cấp thiết về một IPS đáng tin cậy nhằm đảm bảo an toàn cho lực lượng cứu hộ.

Định vị lính cứu hoả trong môi trường hoả hoạn là một bài toán đặc thù, với hai đặc điểm quan trọng. Thứ nhất, môi trường triển khai khắc nghiệt và có nhiều ràng buộc thực tế, bao gồm: thiếu nguồn cung cấp điện ổn định, ánh sáng

¹https://www.motorolasolutions.com/en_us/products/two-way-radios/project-25-radios/portable-radios.html (Accessed: 14:00 12/08/2025)

kém, hiện diện của khói và khí độc, và nhiệt độ môi trường cao. Thứ hai, so với các ứng dụng hướng đến chăm sóc sức khỏe cho người già, nhiệm vụ cứu nạn cứu hộ đặt ra các yêu cầu khắt khe hơn: tiêu thụ năng lượng thấp và duy trì hoạt động liên tục trong thời gian dài, tuy nhiên cũng cần đảm bảo trọng lượng và kích thước thiết bị phù hợp tạo cảm giác thoải mái khi mang trên người; lính cứu hỏa thường mang theo nhiều trang bị chuyên dụng như phòng độc, bình dưỡng khí, quần áo bảo hộ... nên thiết bị hỗ trợ cần có thiết kế tối giản và không gây cản trở; sự tập trung của chiến sĩ phải dành trọn vẹn cho nhiệm vụ cứu hộ, do đó thiết bị cần hoạt động một cách tự động; và thông tin về vị trí của chiến sĩ cần được cung cấp đồng thời cho đồng đội và người chỉ huy bên ngoài toà nhà.

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 [63]; (ii) không yêu cầu thiết lập trước các điều kiện [64]; (iii) Sự kết hợp giữa dữ liệu từ các cảm biến đeo với các công nghệ truyền thông.

1.2.1. IPS dựa trên sự thiết lập trước về cơ sở hạ tầng

Các phương pháp định vị trong nhà dựa trên hạ tầng sẵn có [65–68] yêu cầu triển khai trước các điểm neo tín hiệu hoặc các thiết bị định vị cố định trong môi trường hoạt động. Mặc dù có thể cung cấp độ chính xác cao trong điều kiện bình thường, tuy nhiên các hệ thống này thường không khả thi trong bối cảnh xảy ra cháy, do khó duy trì tính toàn vẹn cấu trúc khi chịu ảnh hưởng của nhiệt độ cao và va đập mạnh tại hiện trường. Hệ thống có nguy cơ mất tính khả dụng vì nhiều thiết bị định vị có thể bị hư hỏng hoặc phá hủy hoàn toàn trong các tình huống khẩn cấp. Các nghiên cứu theo hướng này thường tích hợp dữ liệu từ thiết bị đeo trên người với dữ liệu thu được từ các thiết bị thông tin đã được lắp đặt tại các vị trí cụ thể trong toà nhà, hoặc từ các thiết bị cần được triển khai thủ công trước khi tiến hành định vị. Các giải pháp được đề xuất hướng đến mạng cảm biến không dây, trong đó các công nghệ phổ biến bao gồm Wi-Fi [69], Bluetooth [66], mạng cảm biến di động tạm thời (Breadcrumb) [62], và nhận dạng qua tần số vô tuyến (Radio Frequency Identification-RFID) [66, 70].

Điểm chung của các giải pháp này dựa trên tín hiệu truyền thông vô tuyến để xác định vị trí của đối tượng trong không gian. Đặc điểm chung của các hệ thống này là phụ thuộc hoàn toàn vào các tín hiệu không dây (Wi-Fi, UWB, hoặc Zigbee) nhằm thu thập các tham số đầu vào phục vụ cho việc tính toán vị trí [69] trình bày việc thiết kế và đánh giá hiệu năng của một hệ thống IPS dựa trên giao thức Wi-Fi Round Trip Time, sử dụng các thiết bị thương mại

sẵn có như điện thoại Google Pixel 2 và điểm truy cập WILD fit2 mà không cần phần cứng đồng bộ thời gian chuyên biệt. Sau khi phân tích hiệu năng trên các băng thông khác nhau, nhóm tác giả đã chọn băng thông 40 MHz là cấu hình tối ưu để cân bằng giữa độ ổn định và phạm vi hoạt động. Phương pháp định vị ba bước mới đã được đề xuất để khắc phục sai số đo lường và vấn đề không có điểm giao cắt trong phép đo tam giác: (i) quy trình khử sai số hệ thống; (ii) phép đo tam giác dựa trên phân cụm (clustering-based Trilateration - CBT) được hỗ trợ bởi kỹ thuật tạo vòng tròn đồng tâm có trọng số (weighted concentric circle generation - WCCG); và (iii) quỹ đạo chuyển động được tối ưu hóa bởi bộ lọc Kalman. Kết quả thực nghiệm cho thấy giải pháp CbT và WCCG này đạt độ chính xác ± 1.2 mét đối với định vị tĩnh và ± 1.3 mét đối với theo dõi chuyển động, chứng tỏ khả năng chịu lỗi tốt hơn phương pháp bình phương tối thiểu (least square) truyền thống và có độ lệch chuẩn tiệm cận với giới hạn Cramer-Rao. Tuy nhiên, hạn chế lớn của nghiên cứu này là các thực nghiệm chủ yếu được tiến hành trong điều kiện tầm nhìn thẳng lý tưởng mà chưa đánh giá đầy đủ tác động của vật cản. Đồng thời, hệ thống hiện tại chỉ giới hạn ở định vị 2D và phụ thuộc hoàn toàn vào các thiết bị phần cứng hỗ trợ giao thức IEEE 802.11mc, ảnh hưởng bởi cấu hình các dòng thiết bị di động hiện nay.

Trong khi nghiên cứu trước tập trung vào giải pháp hình học truyền thống (phép đo tam giác) dựa trên thời gian truyền tín hiệu, nghiên cứu [63] đề xuất TIPS (transformer based IPS) theo một hướng tiếp cận dựa trên mô hình học sâu để xử lý tín hiệu Wi-Fi nhằm khắc phục hạn chế của hiệu ứng suy hao đa đường trong môi trường phi tuyến. Thay vì cố gắng tính toán khoảng cách vật lý và xử lý sai số giao cắt, TIPS chuyển đổi bài toán định vị thành bài toán xử lý ngôn ngữ tự nhiên. Cụ thể, nghiên cứu đã ứng dụng cơ chế tự chú ý (self-attention) của kiến trúc mạng nơ-ron transformer kết hợp với việc trích xuất đồng các đặc trưng phụ thuộc không gian và thời gian phức tạp của tín hiệu gồm thời thông tin trạng thái kênh (Channel State Information - CSI) và góc đến (DoA). Kết quả thực nghiệm mô phỏng định vị trên phần mềm mô phỏng SDR cho thấy phương pháp này đạt độ chính xác cao xấp xỉ 20 cm. Nhược điểm của phương pháp này là sự phức tạp trong triển khai phần cứng thực tế, đòi hỏi sử dụng các thiết bị chuyên dụng chi phí cao như Universal Software Radio Peripheral và ăng-ten thay vì các bộ phát Wi-Fi thông thường để có thể ước lượng DoA. Bên cạnh đó, hệ thống yêu cầu quy trình đồng bộ pha phức tạp giữa các kênh thu và phụ thuộc vào giai đoạn thu thập dữ liệu ngoại tuyến.

Nhìn chung, các giải pháp định vị trong nhà dựa trên các điều kiện thiết lập sẵn có thể đạt độ chính xác cao trong môi trường kiểm soát, song chúng bộc lộ

nhiều hạn chế khi triển khai trong điều kiện thực tế [59,71]. Sự phụ thuộc vào cơ sở hạ tầng vật lý khiến hệ thống dễ bị ảnh hưởng và mất khả năng hoạt động khi môi trường thay đổi đột ngột. Bên cạnh đó, các công nghệ này đòi hỏi quá trình triển khai và hiệu chuẩn ban đầu chính xác, đồng thời phụ thuộc chủ yếu vào khả năng duy trì hoạt động của hạ tầng truyền thông. Do đó, khả năng duy trì hoạt động trong môi trường cháy nổ thực tế còn rất hạn chế.

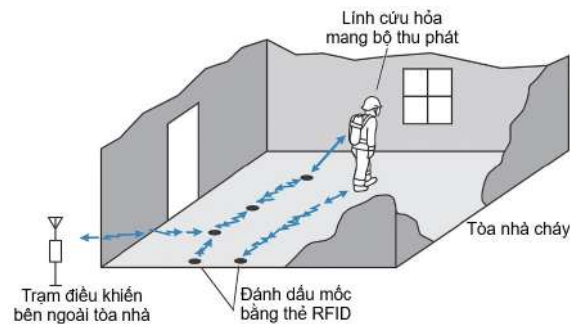
1.2.2. IPS không dựa trên sự thiết lập trước về cơ sở hạ tầng

Hướng nghiên cứu về định vị trong nhà không phụ thuộc vào các điều kiện thiết lập trước tập trung vào việc khai thác các thiết bị mang theo người hoặc gắn trực tiếp trên cơ thể người dùng nhằm thu thập dữ liệu cảm biến và truyền thông tin định vị tới các hệ thống xử lý bên ngoài [59,72]. Các hệ thống này có vai trò quan trọng trong việc duy trì khả năng theo dõi vị trí người dùng trong thời gian thực, đặc biệt trong các môi trường không có sẵn cơ sở hạ tầng hỗ trợ định vị. Nhờ đó, hướng tiếp cận này phù hợp cho các ứng dụng như hỗ trợ cứu hộ trong toà nhà cháy, giám sát nhân viên làm việc trong môi trường nguy hiểm, hoặc nhận dạng hành động dựa trên cảm biến đeo người.

Dựa trên nguồn dữ liệu cảm biến, các hệ thống định vị trong nhà không phụ thuộc hạ tầng có thể được phân loại thành hai nhóm chính: i> hệ thống dựa trên cảm nhận tín hiệu từ môi trường bên ngoài như camera ảnh nhiệt, camera hồng ngoại [73], cảm biến đo khoảng cách bằng ánh sáng (LiDAR) [74]; ii> hệ thống dựa trên cảm nhận chuyển động nội tại cơ thể người sử dụng [9,22]. Các hệ thống này cho phép nhận biết chính xác cấu trúc và đặc điểm không gian, tuy nhiên độ tin cậy của chúng có thể bị ảnh hưởng bởi điều kiện môi trường như vật cản, ánh sáng hoặc nhiễu tín hiệu, đòi hỏi quá trình hiệu chuẩn và kiểm chứng trong môi trường thực tế để đảm bảo độ chính xác và ổn định của phép đo định vị. Với nhóm thứ hai, thông tin vị trí được ước lượng từ chuyển động của chính người mang thiết bị. Các cảm biến điển hình bao gồm gia tốc kế, con quay hồi chuyển và từ kế, thường được tích hợp trong IMU [22,75]. Các hệ thống sẽ theo dõi quỹ đạo di chuyển thông qua việc thu thập và phân tích các giá trị gia tốc và vận tốc góc để xác định vị trí tương đối của người dùng trong thời gian thực mà không cần dựa vào hạ tầng sẵn có.

Trong các tình huống khẩn cấp như cháy nổ, đặc biệt trong môi trường có nhiệt độ cao, tầm nhìn hạn chế và khói dày đặc, các hệ thống định vị sử dụng cảm biến cảm nhận tín hiệu từ môi trường bên ngoài khó cung cấp thông tin vị trí một cách ổn định và đáng tin cậy [62]. Nguyên nhân là do các điều kiện vật lý khắc nghiệt này làm suy giảm hoặc biến đổi đặc tính truyền tín hiệu của

các cảm biến. Ví dụ, tốc độ lan truyền sóng âm có thể thay đổi khoảng 1% cho mỗi 5.7°C , khiến các phép đo khoảng cách bằng cảm biến siêu âm dễ bị sai lệch trong môi trường có nhiệt độ biến động mạnh hoặc không khí không đồng nhất. Tương tự, các hệ thống thị giác như camera ảnh nhiệt hoặc camera hồng ngoại có thể mất khả năng phân tích chính xác khi mật độ khói cao, độ tương phản thấp, hoặc ánh sáng cục bộ từ ngọn lửa gây nhiễu [73]. Những yếu tố này làm giảm đáng kể độ chính xác và độ ổn định của phép đo, khiến các phương pháp định vị dựa trên cảm nhận môi trường trở nên kém hiệu quả và khó ứng dụng trong bối cảnh cháy lớn hoặc điều kiện khẩn cấp có nhiều nhiễu môi trường.



Hình 1.2: Lính cứu hỏa thả các thẻ RFID để tạo các điểm mốc điện tử hỗ trợ truyền thông và định vị trong tòa nhà cháy¹

Nghiên cứu được sở hữu bởi NASA [76] đã đề xuất một hệ thống liên lạc không dây sử dụng công nghệ RFID kết hợp với phần mềm xử lý tín hiệu, nhằm thiết lập các kênh truyền thông tin giữa lực lượng cứu hỏa bên trong tòa nhà và trạm chỉ huy bên ngoài. Hình 1.2 minh họa phương pháp định vị dựa trên RFID cho lính cứu hỏa trong tòa nhà đang cháy. Hệ thống bao gồm trạm điều khiển, bộ thu-phát di động và các thẻ RFID được bố trí tại các vị trí chiến lược để tạo thành đánh dấu, hỗ trợ dẫn đường và duy trì kết nối. Các thẻ RFID sẽ được lính cứu hỏa thả tại nhiều vị trí khác nhau khi di chuyển trong tòa nhà đang cháy. Những thẻ này sẽ đóng vai trò như các điểm mốc dẫn đường, được thiết bị thu-phát RFID do lính cứu hỏa mang theo truy vấn và ghi nhận. Ngoài ra, các thẻ RFID này còn có khả năng truyền dữ liệu cảm biến và thông tin vị trí về trạm điều khiển bên ngoài tòa nhà. Mỗi thẻ có thể tích hợp cảm biến môi trường và giao tiếp theo chuỗi dự phòng với bộ thu-phát.

Hệ thống theo dõi vị trí dựa trên dữ liệu thu nhận từ các cảm biến chuyển động gắn trên người nhân viên cứu hộ (Inertial navigation system - INS) được nhiều nghiên cứu về ứng dụng triển khai trong tình huống khẩn cấp [9, 22, 75, 77]. Nhờ hoạt động hoàn toàn độc lập với hạ tầng bên ngoài, hệ thống định vị theo

¹Hình 1.2 được tham khảo từ nghiên cứu [76].



Hình 1.3: Cấu hình hệ thống cảm biến IMU¹ gắn trên ủng của lính cứu hoả và sơ đồ truyền dữ liệu qua liên kết vô tuyến 2.4 GHz

hướng này ít chịu ảnh hưởng bởi khói, nhiệt độ cao hoặc điều kiện ánh sáng phức tạp, qua đó duy trì khả năng theo dõi chuyển động liên tục và ổn định ngay cả trong không gian kín hoặc tầm nhìn bị che khuất. Dữ liệu quán tính cung cấp chuỗi quan sát có độ tin cậy cao về trạng thái động học của người dùng, tạo nền tảng cho việc tích hợp đa cảm biến hoặc áp dụng các thuật toán hiệu chỉnh sai số theo thời gian. Stephan Bosch [78] đã nghiên cứu giải pháp theo dõi an toàn cho lính cứu hoả trong môi trường trong nhà và ngoài trời thông qua kỹ thuật ước lượng vị trí người đi bộ (Pedestrian Dead Reckoning - PDR) dựa trên chuyển động của đôi ủng gắn module IMU ProMove-mini (Hình 1.3).

Các cảm biến la bàn và áp suất khí quyển tích hợp trong thiết bị được sử dụng để giảm sai số trong việc ước lượng hướng di chuyển và độ cao tương ứng. Dữ liệu được thu thập từ nhiều thành viên trong đội cứu hoả trong quá trình diễn tập, được lưu trữ trên từng module IMU và truyền về qua liên kết vô tuyến 2.4 GHz tới một thiết bị gateway, thiết bị này được điều khiển bởi một máy tính xách tay. Để cải thiện độ chính xác định vị, Bosch tích hợp thêm cảm biến la bàn điện tử và cảm biến áp suất khí quyển nhằm hiệu chỉnh sai số phương hướng và độ cao. Tuy nhiên, các cảm biến này vẫn chịu ảnh hưởng của môi trường hoạt động: la bàn bị nhiễu từ do cấu kiện kim loại hoặc vật thể có từ tính, trong khi cảm biến áp suất bị ảnh hưởng bởi nhiệt độ, dòng khí và biến thiên áp lực trong không gian kín. Ngoài cấu hình phần cứng, nghiên cứu còn đề xuất thuật toán phát hiện đỉnh đa giai đoạn (multi-stage peak detection) để phân biệt giữa bước đi thông thường và hành động đậm mạnh, qua đó giảm sai số tích lũy quãng

¹Hình 1.3 được tham khảo từ nghiên cứu [78]

đường so với phương pháp phát hiện đỉnh dựa trên ngưỡng cố định. Tuy nhiên, mức độ phức tạp tính toán cao và yêu cầu bộ nhớ lớn của thuật toán này làm tăng độ trễ xử lý, đặt ra thách thức trong việc duy trì cân bằng giữa độ chính xác và khả năng hoạt động thời gian thực của hệ thống định vị quán tính trong môi trường cứu hộ có điều kiện khắc nghiệt.

Một số nghiên cứu đã đơn giản hoá bài toán PDR bằng các ước lượng quãng đường di chuyển dựa trên tính toán độ dài bước chân tương đối [75] hoặc giả thuyết độ dài bước theo dải tốc độ tương ứng [79]. Từ đó, khoảng cách di chuyển có thể xác định bằng cách nhân số bước đếm được với độ dài bước với giả định các bước đều nhau. Tuy nhiên, việc lựa chọn một giá trị độ dài bước phù hợp là một bài toán không đơn giản, bởi độ dài bước thay đổi tùy vào vận tốc di chuyển, trạng thái mệt mỏi, điều kiện môi trường (ví dụ: mặt phẳng hay cầu thang), thậm chí khác biệt giữa từng cá nhân [80]. Khi áp dụng một giá trị trung bình cho tất cả các trường hợp, phương pháp này dễ dẫn đến sai số tích lũy đáng kể trong ước lượng vị trí.

Nhìn chung, IMU thường là thành phần cốt lõi trong các hệ thống định vị mà không cần thiết lập trước [9, 22, 77], giúp ghi nhận và cung cấp thông tin về chuyển động thông qua việc tích hợp nhiều loại cảm biến khác nhau. Tuy nhiên, trong điều kiện làm việc khắc nghiệt với nhiệt độ cao, khói dày đặc và từ trường phức tạp, một số cảm biến trong IMU gặp phải những giới hạn đáng kể về độ chính xác và độ ổn định. Chẳng hạn, la bàn điện tử dễ bị nhiễu từ mạnh khi hoạt động gần các cấu kiện kim loại hoặc vật liệu có từ tính, khiến việc xác định hướng di chuyển trở nên không đáng tin cậy [60].

1.2.3. Hệ thống định vị kết hợp

Để khắc phục những hạn chế còn tồn tại trong cả hai hướng định vị trên, hệ thống định vị kết hợp (Hybrid indoor positioning system - HIPS) như một hướng tiếp cận hài hòa và có tiềm năng cao [81, 82]. Cách tiếp cận này kết hợp đồng thời dữ liệu từ các cảm biến cảm nhận trạng thái nội tại của cơ thể và các cảm biến cảm nhận tín hiệu từ môi trường bên ngoài, nhằm khai thác ưu điểm của từng loại cảm biến và bù trừ hạn chế cho nhau. Nhờ đó, hệ thống có thể nâng cao cả độ chính xác lẫn độ tin cậy trong việc theo dõi vị trí của nhân viên cứu hộ, đặc biệt trong những tình huống khẩn cấp có điều kiện môi trường phức tạp. Kiến trúc của hệ thống định vị kết hợp thường gồm một hay nhiều hệ thống nhỏ. Mỗi hệ thống con có thể kết hợp giữa IMU với camera hoặc RFID hoạt động độc lập để ước lượng vị trí theo nguyên lý riêng của nó [82]. Vị trí ước lượng được xác thực bởi thuật toán hợp nhất dữ liệu nhằm tối ưu hóa vị trí

ước tính cuối cùng. Thuật toán hợp nhất thường gán trọng số khác nhau cho từng nguồn dữ liệu, dựa trên độ tin cậy hoặc sai số thống kê của từng cảm biến, từ đó giảm thiểu sai số tổng thể và tăng tính ổn định của phép định vị. So với hệ thống định vị chỉ dựa trên IMU, điểm khác biệt quan trọng của HIPS là mỗi hệ thống con có khả năng cung cấp các ước lượng vị trí liên tục, cho phép hệ thống duy trì khả năng định vị ngay cả khi một cảm biến tạm thời bị suy giảm hoặc mất tín hiệu.

Theo hướng ứng dụng cho lính cứu hỏa, nghiên cứu [62] thuộc chương trình nghiên cứu hợp tác của Cục Cứu hỏa, Bộ Công an Trung Quốc, đã trình bày một giải pháp HIPS được kết hợp giữa phương pháp PDR và hệ thống Breadcrumb. Hình 1.4 minh họa một hệ thống có khả năng tự động thả các nút Breadcrumb dọc đường đi. Các nút này hình thành mạng cảm biến không dây chuyển tiếp dữ liệu và đo khoảng cách tương đối giữa các nút. Chuỗi dữ liệu di chuyển được truyền qua Zigbee về trạm gốc. Thuật toán PDR xử lý thông tin từ INS gắn ở giày để ước lượng dịch chuyển. Bên cạnh đó, thuật toán (Zero velocity update - ZUPT) được sử dụng để hiệu chỉnh vận tốc về 0 tại khoảnh khắc chân đứng yên, giảm sai số tích lũy. Nghiên cứu đã đề xuất thuật toán cho phép tính toán vị trí và sai số theo thời gian thực với độ phức tạp thấp, đồng thời xử lý các thay đổi trong mạng như thêm, bớt hoặc di chuyển nút. Tiếp theo, Breadcrumb vừa truyền dữ liệu (dấu hiệu sinh tồn, âm thanh, hình ảnh, vị trí) vừa đo khoảng cách tương đối tới các nút khác bằng chỉ báo cường độ tín hiệu đã nhận (Received Signal Strength Indicator - RSSI). Kết quả cho thấy sai số trung bình khoảng 5.6 m và sai số lớn nhất 10.9 m (tương ứng 1.4–2.7% tổng quãng đường). Giải pháp này có ưu điểm là tự động, không phụ thuộc hạ tầng có sẵn, đảm bảo liên lạc ổn định và định vị chính xác trong môi trường khắc nghiệt. Tuy vậy, hệ thống vẫn chịu ảnh hưởng bởi nước và nhiệt khi sử dụng sóng 2.4 GHz, nâng cao độ bền thiết bị và tối ưu thuật toán để đạt độ chính xác cao hơn trong thực tế. Mặc dù một số lỗi lệch của cảm biến trong INS gắn trên chân có thể được ước tính bằng cách cập nhật tốc độ bằng không khi chân đứng yên, nhưng lỗi về vị trí và hướng của INS gắn trên chân vẫn không thể quan sát được và tăng lên mà không có giới hạn. Hơn nữa, ảnh hưởng từ các chuyển động mạnh mẽ đến các IMU gắn trên chân có thể gây ra các lỗi khó kiểm soát và phát sinh các sai số.

Với cách tiếp cận tương tự, nghiên cứu [81] giới thiệu một hệ thống HIPS được phát triển trong khuôn khổ dự án châu Âu REFIRE nhằm hỗ trợ định vị cho lực lượng cứu hộ trong môi trường khẩn cấp. Hệ thống kết hợp giữa cảm

¹Hình 1.4 được tham khảo từ nghiên cứu [62]



Hình 1.4: Kiến trúc hệ thống định vị lai kết hợp Breadcrumb, PDR cho lính cứu hoả¹.

biến quán tính gắn ở thắt lưng và đầu đọc RFID để ước lượng và hiệu chỉnh vị trí người dùng theo mô hình dự đoán – hiệu chỉnh. Trong đó, thuật toán PDR sử dụng dữ liệu từ IMU để ước lượng chuyển động, còn RFID cung cấp thông tin vị trí từ các thẻ gắn cố định trong môi trường (đèn thoát hiểm hoặc biển báo), giúp hiệu chỉnh sai lệch tích lũy của PDR. Các thí nghiệm tĩnh và động được thực hiện trong môi trường thực tế cho thấy hệ thống đạt độ chính xác mức phòng, sai số giảm từ hơn 16 m (khi chỉ dùng PDR) xuống còn khoảng 2.6–4 m khi kết hợp RFID, ngay cả khi chỉ có số lượng thẻ RFID hạn chế. Ưu điểm nổi bật của HIPS là thiết kế nhẹ, bền, không phụ thuộc vào hạ tầng truyền thông, dễ tích hợp vào trang phục cứu hoả, đồng thời giảm sai lệch tích lũy của cảm biến quán tính nhờ cơ chế hiệu chỉnh thông minh. Tuy nhiên, hệ thống vẫn có một số hạn chế: độ chính xác phụ thuộc vào số lượng và vị trí bố trí thẻ RFID, khả năng nhận dạng bị ảnh hưởng bởi kim loại hoặc nhiễu điện từ, và hướng di chuyển chưa được hiệu chỉnh hoàn toàn, gây sai lệch theo thời gian.

Nhìn chung, các hệ thống HIPS được xem là một hướng tiếp cận đầy hứa hẹn nhờ khả năng kết hợp ưu điểm của cả INS và cảm biến các tác động bên ngoài. Tuy nhiên, việc triển khai các hệ thống này trên diện rộng gặp rào cản lớn về

mặt chi phí, khả năng bảo trì, và tính bền vững trong môi trường nhiệt độ cao. Thêm vào đó, trong điều kiện ánh sáng yếu và tầm nhìn hạn chế do khói dày đặc, lính cứu hoả có thể vô tình tác động làm hỏng các thiết bị này nếu thiết bị được đặt tại khu vực thấp hoặc nền không ổn định. Những nguyên nhân này có thể gây gián đoạn mạng truyền thông và ảnh hưởng đến hệ thống theo dõi.

1.3. Các phương pháp đánh giá

- Độ chính xác (acc) [21] biểu thị tỷ lệ giữa số lượng dự đoán đúng so với tổng số dự đoán.

$$acc = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (1.4)$$

- Độ nhạy (sen) [24] thể hiện khả năng của mô hình trong việc phát hiện chính xác các hành động thực sự xảy ra.

$$sen = \frac{TP}{TP + FN} \quad (1.5)$$

- Độ đặc hiệu (spe) [24] cho biết khả năng của mô hình trong việc xác định chính xác các hành động không xảy ra.

$$spe = \frac{TN}{TN + FP} \quad (1.6)$$

- Tỷ lệ dự đoán đúng (pre) [83] biểu thị tỷ lệ các hành động được dự đoán đúng với thực tế trên tổng số hành động được dự đoán là xảy ra.

$$pre = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1.7)$$

- Điểm F1-micro ($F1_{mi}$) [24] đặc biệt phù hợp cho các tập dữ liệu mất cân bằng, trong khi điểm F1-macro ($F1_{ma}$) [21] đánh giá hiệu suất dự đoán trung bình trên tất cả các hành động.

$$F1 = \frac{2 \times pre \times sen}{pre + sen} \quad (1.8)$$

$$F1_{mi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{2 \times pre_i \times sen_i}{pre_i + sen_i} \quad (1.9)$$

$$F1_{ma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F1_i \quad (1.10)$$

Trong các công thức 1.4-1.9: TP (true positive) là số lần mô hình dự đoán đúng rằng một hành động thực sự đang xảy ra; FP (false positive) là số lần mô hình dự đoán sai rằng một hành động đang xảy ra trong khi thực tế không phải vậy; TN (true negative) là số lần mô hình dự đoán đúng rằng một hành động không xảy ra; FN (false negative) là số lần mô hình dự đoán sai rằng một hành động không xảy ra trong khi thực tế nó đang xảy ra; n là số lượng hành động.

- Xác thực chéo K-fold: Tập dữ liệu $\mathcal{D}$ được chia thành k phần (fold) $\mathcal{D}_1, \mathcal{D}_2, \dots, \mathcal{D}_k$. Trong nghiên cứu này, giá trị $k = 5$ được sử dụng.
- + Với mỗi phần $\mathcal{D}_k$: huấn luyện mô hình với các tham số đã được tối ưu (trình bày trong Bảng 2.5) trên tập huấn luyện $\mathcal{D}_{train}^{(k)} = \mathcal{D} \setminus \mathcal{D}_k$.
- + Tính giá trị $F1_{mi}^k$ trên mỗi phần dữ liệu $\mathcal{D}_k$.
- + Hiệu suất tổng thể được xác định bởi: $Score_{CV} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k F1_{mi}^k$.
- Sai số tuyệt đối trung bình (Mean Absolute Error - MAE) và sai số bình phương trung bình (Mean Squared Error - MSE) [79]:

$$MAE = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K |y_i - \hat{y}_i| \quad (1.11)$$

$$MSE = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1.12)$$

$$MAE\% = \frac{MAE}{\bar{y}} \times 100\% \quad (1.13)$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (|y_i - \hat{y}_i| - MAE)^2}, \quad (1.14)$$

$$SD\% = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \left(\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{|y_i|} \times 100\% - \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \left(\frac{|y_j - \hat{y}_j|}{|y_j|} \times 100\% \right) \right)^2} \quad (1.15)$$

1.4. Khoảng trống nghiên cứu

Mặc dù lĩnh vực công nghệ hỗ trợ cứu nạn và giám sát hành động người đã đạt được nhiều tiến bộ đáng kể, việc áp dụng thực tiễn các hệ thống này vẫn đối mặt với những thách thức kỹ thuật chưa được giải quyết triệt để. Đặc biệt

là trong môi trường hoạt động khắc nghiệt như hoả hoạn và cháy nổ trong nhà. Do đó, các khoảng trống nghiên cứu về HAR bao gồm:

- **Các nghiên cứu HAR chưa quan tâm đến việc xử lý nhận dạng tại các điểm chuyển tiếp hành động.** Các mô hình HAR hiện nay chủ yếu tập trung vào việc tối ưu hóa độ chính xác cho các trạng thái hành động tĩnh hoặc tuần hoàn (đi bộ, chạy, nằm). Việc sử dụng kỹ thuật cửa sổ trượt (sliding window) với kích thước cố định có thể bị nhầm lẫn giữa các hành động. Trong điều kiện cứu hoả, các hành động thay đổi liên tục và đột ngột (đang chạy dừng lại để bò, hoặc trườn qua khe hẹp). Việc cải tiến phương pháp xử lý tín hiệu cho phép nhận biết thời điểm chuyển tiếp hành động giúp tỷ lệ nhận dạng nhầm và nâng cao chất lượng mô hình nhận dạng.
- **Sự hạn chế của các mô hình ước lượng độ dài bước chân đối với các bước chân di chuyển ngẫu nhiên về khoảng cách bước.** các hệ thống PDR dựa trên tương quan hình thể cố định khó áp dụng cho lính cứu hoả bởi sự di chuyển của họ mang tính phi tuyến cao (bước ngắn, bò trườn, di chuyển khom lưng, thay đổi tốc độ đột ngột để tránh vật cản)... Do đó, cần có một phương pháp ước lượng bước chân có khả năng tự thích nghi với việc di chuyển phi tuyến mà vẫn đảm bảo tính ổn định của thuật toán trên các vi điều khiển có tài nguyên hạn chế.
- **Xu hướng nghiên cứu về áp dụng công nghệ UWB hiện nay thiên về hướng không tiếp xúc, ít tối ưu hóa cho sử dụng thiết bị đeo.** Phần lớn các nghiên cứu hiện đại khai thác UWB như một loại radar để phát hiện sự hiện diện hoặc cử chỉ của con người thông qua sự thay đổi kênh truyền vô tuyến mà ít quan tâm đến việc tích hợp trên thiết bị đeo. Các nghiên cứu về UWB kết hợp với thiết bị đeo kết hợp cảm biến quán tính cho IPS vẫn còn hạn chế, đặc biệt là trong việc xây dựng các kiến trúc HIPS cho theo dõi vị trí khi xảy ra trường hợp khẩn cấp.

1.5. Định hướng nghiên cứu

Việc phát hiện và đánh giá thương tích của lính cứu hoả trong quá trình làm nhiệm vụ vẫn đang đối mặt với nhiều thách thức khoa học và kỹ thuật. Các hệ thống hiện có chưa dự đoán được nhiều trạng thái hoạt động của lính cứu hoả theo thời gian thực cũng như chưa thể phân loại hiệu quả các hành động đặc trưng trong quá trình tác nghiệp, vốn là những yếu tố quan trọng để đánh giá tình trạng an toàn của cá nhân. Trọng tâm của luận án giải quyết bài toán định

vị và giám sát hành động lính cứu hoả dựa trên thiết bị đeo, hoạt động theo thời gian thực và tài nguyên bộ xử lý hạn chế.

Bài toán nhận dạng hành động người cho lính cứu hoả đối mặt với thách thức lớn về độ tin cậy của phép đo trong môi trường nhiễu động mạnh. Hiện trạng thiếu hụt các kỹ thuật xử lý tín hiệu đo lường có khả năng xử lý các trạng thái khi con người thay đổi hành động đột ngột là thách thức lớn. Về mặt đo lường, các cảm biến IMU cung cấp các chuỗi dữ liệu có đặc tính không dừng, các nhiễu đo có thể tồn tại cùng tín hiệu quan trọng. Do đó, nghiên cứu tập trung vào việc phát triển các giải thuật xử lý tín hiệu, nhằm thích nghi với các hành động đặc thù được mô tả dựa trên cảm biến gia tốc, giúp tối ưu hóa chất lượng thông tin cho mô hình HAR với đối tượng là lính cứu hoả hoạt động trong toà nhà.

Tiếp theo, nghiên cứu tập trung vào việc tối ưu hóa việc kết hợp đa cảm biến (gia tốc, con quay hồi chuyển, áp suất, UWB) để xây dựng hệ thống theo dõi vị trí trong nhà cho lính cứu hoả. Hệ thống này không yêu cầu cơ sở hạ tầng lắp đặt sẵn, nhằm phục vụ cảnh báo vị trí và tình trạng hiện tại của lính cứu hoả trong tình huống khẩn cấp. Do đó, luận án tập trung vào việc nghiên cứu đề xuất thuật toán tăng cường độ chính xác trong việc đếm bước chân; giải thuật xác định chiều dài bước với độ chính xác cao, phát hiện thời điểm và hướng rẽ, cũng như ước lượng vị trí theo phương thẳng đứng. Việc kết hợp đồng bộ các thông tin này hình thành nền tảng cho hệ thống định vị quán tính có độ chính xác cao, góp phần cải thiện hiệu quả giám sát và đảm bảo an toàn cho lực lượng cứu hộ trong môi trường khẩn cấp.

Để tập trung giải quyết các bài toán cốt lõi về độ chính xác và tính thời gian thực trong điều kiện tài nguyên hạn chế, luận án xác lập các giới hạn nghiên cứu cụ thể như sau:

- Nghiên cứu tập trung vào 11 hành động đặc thù của lính cứu hoả trong quá trình tác nghiệp. Đối với bài toán phát hiện ngã, luận án chỉ tập trung vào các trường hợp ngã nguy hiểm kết thúc là nằm.
- Quá trình di chuyển của lính cứu hoả được giả định hoàn thành ít nhất một bước chân cho các hành động tịnh tiến (đi bộ, chạy, bò, trườn)... Lính cứu hoả cần thực hiện việc xoay hướng cơ thể trước khi bắt đầu di chuyển tịnh tiến, giúp đơn giản hóa bài toán.
- Để giảm thiểu ảnh hưởng của nhiễu từ trường trong môi trường nhiễu cấu trúc sắt thép (như toà nhà cháy), hệ thống giới hạn hướng di chuyển được trong 8 hướng chính và được ước lượng dựa trên vận tốc góc (Gyroscope).
- Luận án tập trung vào bài toán theo dõi vị trí đơn lẻ với trọng tâm là xây

dựng mô hình kết hợp dữ liệu để giải quyết ba bài toán thành phần: ước lượng quãng đường di chuyển, xác định cao độ/tầng nhà và ước lượng góc hướng. Việc đi lùi hoặc chuyển hướng đột ngột trong quá trình di chuyển được hạn chế.

- Do đặc thù nghề nghiệp, đối tượng nghiên cứu được giới hạn 100% là nam giới, có hình thể và sức khỏe phù hợp với các quy định hiện hành của nhà nước về tiêu chuẩn lính cứu hoả [9, 22, 53]. Bên cạnh đó, Thiết bị đeo được giả định đặt dưới lớp trang phục bảo hộ và chỉ hoạt động trong giới hạn chịu đựng nhiệt độ sinh lý của con người.
- Luận án tập trung vào kịch bản khẩn cấp khi các hệ thống hỗ trợ tòa nhà (thang máy, hệ thống cứu nạn cố định) gần như bị tê liệt. Tuy nhiên, hệ thống cần biết trước cơ sở dữ liệu về bản đồ tòa nhà, sơ đồ lối đi và thông tin thiết kế kiến trúc để phục vụ việc ánh xạ vị trí và hiệu chỉnh quỹ đạo.

1.6. Kết luận chương 1

Chương 1 đã tổng quan hiện trạng nghiên cứu về nhận dạng hành động (HAR) và định vị trong nhà (IPS), qua đó làm rõ những thách thức kỹ thuật cốt lõi khi triển khai trong môi trường cứu hộ khẩn cấp cho lính cứu hoả. Phân tích cho thấy các hệ thống dựa trên thị giác máy tính hay hạ tầng sẵn có thường không hiệu quả trong điều kiện hoả hoạn, trong khi các phương pháp định vị quán tính PDR vẫn đối mặt với sai số tích lũy nghiêm trọng và sự nhiễu loạn từ trường do môi trường sắt thép. Đặc biệt, việc thiếu hụt các bộ dữ liệu đặc thù cho lính cứu hoả và sự khó khăn khi triển khai các mô hình tính toán phức tạp trên các vi điều khiển giới hạn tài nguyên chính là những khoảng trống nghiên cứu cấp thiết cần giải quyết.

Do đó, luận án xác định trọng tâm nghiên cứu là xây dựng quy trình xử lý tín hiệu thích nghi và kết hợp đa cảm biến (IMU, áp suất, UWB) nhằm tối ưu hóa chất lượng thông tin cho hệ thống hỗ trợ lính cứu hoả. Dữ liệu hoạt động của lính cứu hoả cùng với thông tin vị trí sẽ cung cấp những thông tin quan trọng cho người chỉ huy trong công tác điều phối nhân lực, cảnh báo nguy hiểm và hỗ trợ tìm kiếm cứu nạn. Trong môi trường hoả hoạn, các giải pháp IPS dựa trên hạ tầng sẵn có (Wi-Fi, Bluetooth) thường mất tác dụng do. Hướng tiếp cận định vị quán tính không phụ thuộc hạ tầng là khả thi nhưng đang đối mặt với vấn đề sai số trôi tích lũy và sự không ổn định của cảm biến từ trường trong môi trường kết cấu kim loại phức tạp. Bởi vậy, mô hình đề xuất cần hạn chế ảnh hưởng bởi từ trường cũng như các khoảng cách bước biến động của lính cứu

hoả. Những định hướng này hướng đến mục tiêu thiết lập một hệ thống giám sát tự hành thời gian thực với phần cứng hạn chế về tài nguyên, tiêu thụ năng lượng thấp và phù hợp trong việc theo dõi vị trí cũng như trạng thái an toàn của lính cứu hoả trong nhà.

CHƯƠNG 2. HỆ THỐNG NHẬN DẠNG HÀNH ĐỘNG CHO LÍNH CỨU HOẢ

Như đã trình bày ở chương 1, việc giám sát các hoạt động cứu nạn cứu hộ của lính cứu hoả là rất cần thiết, giúp cung cấp thông tin để người chỉ huy có phương án hỗ trợ khi có sự cố khẩn cấp xảy ra với chính các chiến sĩ thực hiện nhiệm vụ. Chương 2 đề xuất một hệ thống nhận dạng hành động lính cứu hoả theo thời gian thực (Real-time Firefighter Activity Recognition - RFAR) cho 11 hành động, bao gồm: đi bộ (WA), đứng (ST), nằm (LY), ngồi (SI), chạy bộ (JO), đi khom lưng (WS), bò thấp (CR), trườn (SL), ngã (FA), đi xuống cầu thang (DS) và đi lên cầu thang (US).

Thách thức chính của nghiên cứu là nhận dạng nhiều loại hành động khác nhau, bao gồm các hành động phức tạp và các chuyển tiếp liên tục như CR, SL, WS và FA, chỉ sử dụng dữ liệu thời gian thực, đồng thời tối ưu tham số để triển khai mô hình RF trên vi điều khiển có giới hạn về hiệu năng. Phần lớn các nghiên cứu HAR hiện nay xử lý dữ liệu đồng nhất và liên tục, bỏ qua các sự kiện chuyển đổi đột ngột giữa các trạng thái hành động. Hạn chế này làm giảm khả năng ứng dụng thực tế, đặc biệt trong môi trường nguy hiểm cần phản ứng nhanh trong các hoạt động tìm kiếm và cứu nạn. Để khắc phục vấn đề này, nghiên cứu đã phát triển một quy trình xử lý dữ liệu mới, kết hợp kỹ thuật của sỏ trượt với kỹ thuật phát hiện chỉ số bất thường (AIx). Trong các thực nghiệm với các dữ liệu thời gian thực, phương pháp này đạt điểm F1 hơn 96%. Để kiểm chứng, phương pháp được thử nghiệm trên ba bộ dữ liệu công khai, đạt điểm F1 là 96.6% trên tập ¹MobiFall [84], 96.6% trên tập ²SFDLA [85] và 78.2% trên tập ³UniMiB-SHAR [86]. Đây là những bộ dữ liệu được phép sử dụng trong nhiều nghiên cứu về HAR giúp nghiên cứu đánh giá khách quan mô hình đề xuất. Một đóng góp quan trọng khác của nghiên cứu là phát triển một bộ dữ liệu chuyên biệt, phản ánh đầy đủ hơn các hoạt động đặc thù của lính cứu hoả.

2.1. Mô hình hệ thống RFAR

Nghiên cứu hướng đến phát triển một hệ thống phù hợp triển khai trên vi điều khiển công suất thấp, nhằm xử lý dữ liệu thời gian thực. Quy trình phát triển bao gồm mô hình hóa hệ thống chi tiết, thu thập dữ liệu, trích xuất đặc trưng, và huấn luyện mô hình. Giai đoạn mô hình hóa xác định cấu trúc và chức năng của hệ thống, trong khi việc thu thập dữ liệu trong điều kiện thực tế giúp

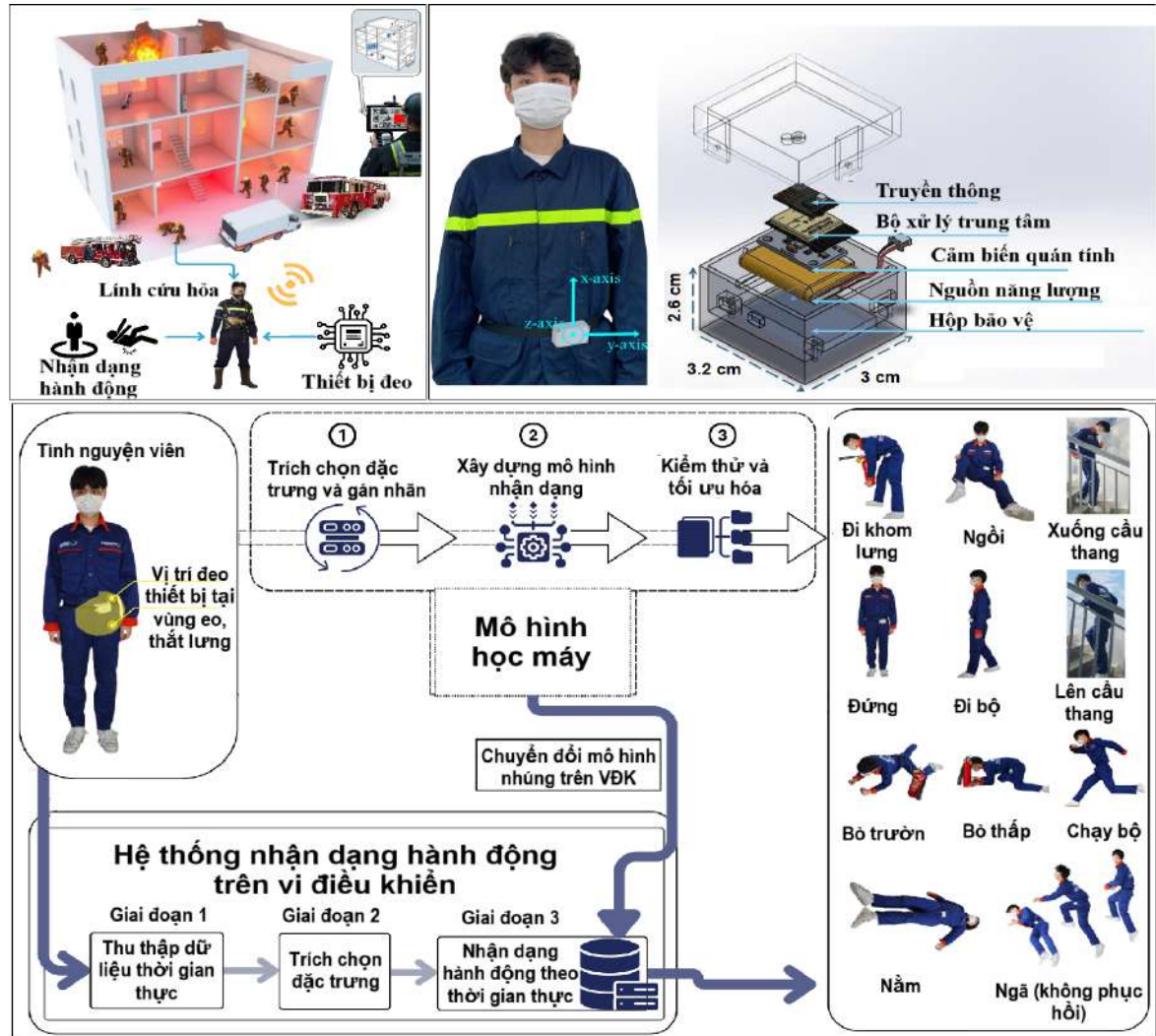
¹<https://www.kaggle.com/datasets/kmkntation/mobifall-dataset-v20>

²<https://kilyos.ee.bilkent.edu.tr/~billur/>

³<https://www.kaggle.com/datasets/alirezacman/unimib-shar>

đảm bảo độ tin cậy và tính đại diện của dữ liệu. Các đặc trưng quan trọng được trích xuất nhằm tối ưu hóa hiệu suất nhận dạng trước khi tiến hành huấn luyện mô hình để đạt độ chính xác cao.

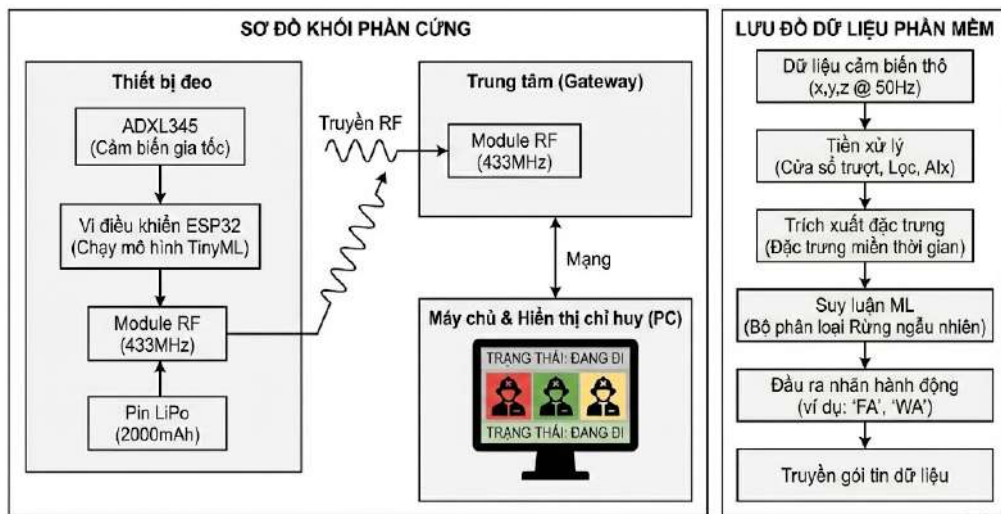
2.1.1. Kiến trúc hệ thống RFAR



Hình 2.1: Hệ thống RFAR được thiết kế giúp người chỉ huy có thể giám sát các hoạt động của lính cứu hỏa theo thời gian thực.

Hệ thống đề xuất có khả năng nhận dạng nhiều loại hành động khác nhau, bao gồm WA, ST, LY, SI, JO, WS, CR, SL, FA, DS và US. Hình 2.1 minh họa kiến trúc tổng thể và quy trình hoạt động của hệ thống nhận dạng hành động lính cứu hỏa (Firefighter Activity Recognition - FAR) được đề xuất. Hệ thống này được thiết kế nhằm giám sát và hỗ trợ người chỉ huy trong việc theo dõi trạng thái tác nghiệp của từng thành viên trong đội. Để đảm bảo khả năng giám sát liên tục và phản hồi theo thời gian thực, kiến trúc hệ thống RFAR được thiết kế bao gồm thiết bị đeo tại biên và trung tâm giám sát như minh

họa tại Hình 2.2. Mỗi lính cứu hoả được trang bị một thiết bị đeo nhỏ gọn gắn tại thắt lưng, đóng vai trò là nút xử lý biên với phần cứng bao gồm cảm biến gia tốc ADXL345, vi điều khiển ESP32 và nguồn pin LiPo 2000 mAh. Thay vì truyền tải dữ liệu thô dễ gây độ trễ, thiết bị thực thi thuật toán học máy để nhận dạng hành động theo thời gian thực, sau đó chỉ gửi kết quả qua sóng RF 433MHz đến trạm trung chuyển (Gateway). Cơ chế xử lý tại biên này không chỉ giúp tiết kiệm năng lượng và băng thông mà còn đảm bảo người chỉ huy nhận được thông tin trạng thái trực quan, tức thời để đưa ra các quyết định ứng cứu khẩn cấp chính xác.



Hình 2.2: Sơ đồ khối chức năng phần cứng và luồng dữ liệu hoạt động của hệ thống RFAR.

Bên cạnh đó, luồng dữ liệu phần mềm được thiết kế nhằm tối ưu hóa tài nguyên tính toán trên vi điều khiển. Quy trình bắt đầu bằng việc thu thập dữ liệu gia tốc thô với tần số 100 Hz, sau đó trải qua giai đoạn tiền xử lý bao gồm kỹ thuật cửa sổ trượt, lọc nhiễu và tính toán chỉ số bất thường (AIx) để phát hiện sớm các sự kiện đột biến. Các đặc trưng miền thời gian quan trọng tiếp tục được trích xuất từ các cửa sổ tín hiệu và đưa vào mô hình học máy RF đã được huấn luyện trước để nhận dạng hành động; kết quả nhãn hành động cuối cùng được đóng gói và truyền đi, hoàn tất chu trình xử lý với độ chính xác và tốc độ đáp ứng cao. Cấu hình phần cứng của hệ thống được trình bày trong Bảng 2.1. Thiết bị trung tâm được kết nối với cơ sở dữ liệu và hệ thống hiển thị thông tin trạng thái của lính cứu hoả dựa trên thông tin nhận được từ thiết bị đeo của mỗi lính cứu hoả. Mỗi thiết bị đeo được gán mã định danh riêng biệt và hệ thống có khả năng mở rộng lên nhiều thiết bị đeo để truyền đến thiết bị trung tâm kết nối với người chỉ huy.

Bảng 2.1: Cấu hình phần cứng và nền tảng thực nghiệm.

Module	Thành phần	Đặc điểm kỹ thuật
Thiết bị đeo	ADXL345	Cảm biến gia tốc
	¹ ESP32	520 KB RAM, 448 KB ROM, 4 MB flash
	Thẻ nhớ	2 GB
	Truyền thông	433 MHz; 8000 meters; 2.4 Kbps
	Pin	Li-ion, 2000 mAh
Thiết bị trung tâm	Truyền thông	433 MHz; 8000 meters; 2.4 Kbps
	ESP32	520KB RAM, 448KB ROM, 4 MB flash
	Năng lượng	Nguồn 12 VDC —2A
Máy chủ	Bộ xử lý trung tâm	Intel Xeon Silver 4310; 2.1 GHz speed
	RAM	16 GB RDIMM
	Ổ cứng	2TB HDD NLSAS
	Phần mềm	Visual studio code
	Hệ điều hành	Windows server 2019
	Giao thức	giao thức truyền thông qua tin nhắn hàng đợi (MQTT)

¹ <https://www.espressif.com/>

Hệ thống hoạt động qua ba giai đoạn chính: (1) thu thập dữ liệu thời gian thực theo cửa sổ trượt, (2) trích xuất đặc trưng và (3) nhận dạng hành động. Các đặc trưng được trích xuất được sử dụng để huấn luyện mô hình ML, sau đó được tối ưu hóa và triển khai lên vi điều khiển tích hợp trong thiết bị. Hệ thống này cho phép phát hiện và báo cáo nhanh các hành động quan trọng, hỗ trợ người chỉ huy trong việc giám sát và điều phối hoạt động của đội cứu hỏa trong môi trường nguy hiểm. Với thiết kế nhỏ gọn và không bị ảnh hưởng bởi nhiều môi trường, hệ thống đặc biệt phù hợp để triển khai tại các công trình bị hư hại, nơi không thể lắp đặt hệ thống cố định, và vẫn có thể hoạt động ổn định trong điều kiện cháy nổ.

2.1.2. Tập dữ liệu

Nghiên cứu này sử dụng bốn bộ dữ liệu về hành động của con người, bao gồm một bộ dữ liệu riêng tập trung vào các hành động đặc thù của lính cứu hỏa và ba bộ dữ liệu công khai chứa các hành động tương tự của con người.

2.1.2.1. Quy trình thu thập dữ liệu

Nghiên cứu sử dụng quy trình thu thập có kiểm soát, trong đó mỗi hành động được thực hiện riêng biệt theo các kịch bản được xác định trước. Sau khi hoàn thành từng hành động và thu thập đủ dữ liệu, người tham gia mới chuyển sang hoạt động tiếp theo. Mỗi tệp dữ liệu được gán nhãn ngay tại thời điểm ghi nhận và lưu trữ trong các thư mục tương ứng với từng loại hoạt động nhằm bảo đảm tính chính xác của nhãn dữ liệu. Các hoạt động do tình nguyện viên thực hiện được hai giám sát viên quan sát trực tiếp và tiến hành gán nhãn thủ công. Những hành động này được thực hiện tự nhiên trong các kịch bản mô phỏng gần với điều kiện thực tế.

2.1.2.2. Tập dữ liệu riêng tư

Bộ dữ liệu hành động của lính cứu hỏa được thu thập từ 20 tình nguyện viên nam, có thể trạng khỏe mạnh và đồng đều, độ tuổi từ 22 đến 35, chiều cao từ 1.6 – 1.8 m và cân nặng từ 60 – 80 kg. Các tình nguyện viên này được lựa chọn, trong đó không có tình nguyện viên là nữ giới nhằm đảm bảo tính đồng nhất về đặc điểm thể chất. Dữ liệu được thu thập với tần số lấy mẫu (F_s) là 100 Hz, bao gồm tín hiệu gia tốc ba trục được ghi nhận theo đơn vị g ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$), trong quá trình thực hành diễn tập mô phỏng cứu hộ và chữa cháy thực tế.

Do các hành động của lính cứu hỏa diễn ra nhanh và phức tạp nên dữ liệu được lấy mẫu với tần số 100 Hz để đảm bảo thông tin quan trọng trong quá trình xây dựng bộ dữ liệu. Mô tả chi tiết và số lượng mẫu của từng hành động trong bộ dữ liệu riêng được trình bày trong Bảng 2.2. Mỗi hành động được thực hiện liên tục trong ít nhất 3 phút, ngoại trừ hành động FA (ngã). Hành động ngã được thực hiện riêng biệt trong khoảng 3 – 5 giây với các kiểu ngã nguy hiểm có thể dẫn đến sự mất ý thức, nằm bất động. Dữ liệu được lưu trữ trên thẻ nhớ micro SD, sau khi thu thập bởi thiết bị gắn tại vùng thắt lưng–hông của người tham gia để đảm bảo độ chính xác và tính ổn định của tín hiệu. Tổng thời gian thu thập dữ liệu đạt 371 phút, với kích thước bộ dữ liệu hơn 100 MB. Bộ dữ liệu được chia sẻ trên cơ sở dữ liệu nghiên cứu IEEE dataport¹.

Trong nghiên cứu này, quá trình tối ưu tham số cho mô hình RF được thực hiện trên bộ dữ liệu riêng, trong khi các mô hình ML như DT), GBDT, SVM, máy tăng cường độ dốc nhẹ (Light gradient boosting machine - LBM) và tăng cường độ dốc cực hạn (Extreme gradient boosting - XGB) được sử dụng để đánh giá khách quan quá trình tối ưu hóa.

¹<https://dx.doi.org/10.21227/9w3p-v638>

Bảng 2.2: Mô tả các hành động của lính cứu hoả trong bộ dữ liệu riêng.

Hành động	Mô tả	Số mẫu
WA	Di chuyển ở tư thế đứng thẳng, luôn giữ ít nhất một chân tiếp xúc với mặt đất.	123,932
ST	Duy trì tư thế đứng thẳng mà không có chuyển động.	56,016
LY	Nằm trên bề mặt phẳng với lưng tiếp xúc hoàn toàn với mặt đất.	82,516
SI	Tư thế nghỉ ngơi, trong đó mông và bàn chân cùng tiếp xúc với mặt đất.	63,013
JO	Trạng thái di chuyển nhanh với các bước chạy, tại mỗi thời điểm chỉ có tối đa một chân chạm đất.	90,783
WS	Đi chậm trong tư thế khom hoặc cúi người.	83,242
CR	Di chuyển về phía trước bằng tay và đầu gối, giữ thân người hơi nhấc khỏi mặt đất.	82,669
SL	Di chuyển sát mặt đất bằng tay và đầu gối, giữ cơ thể song song với mặt đất.	90,340
FA	Mất thăng bằng đột ngột dẫn đến tiếp xúc với mặt đất.	129,815
DS	Đi xuống cầu thang bằng chân với tốc độ vừa phải.	151,448
US	Đi lên cầu thang bằng chân với tốc độ vừa phải.	157,882

Hình 2.3 cho thấy mỗi hành động đều có đặc trưng tín hiệu riêng biệt, mang đến những thách thức cụ thể cho hệ thống nhận dạng. Với hành động JO, tín hiệu gia tốc có biên độ lớn và nhịp điệu ổn định, giúp hệ thống nhận dạng tương đối hiệu quả; tuy nhiên, tốc độ nhảy không ổn định có thể làm giảm độ chính xác. Hành động WS tạo ra tín hiệu có biên độ thấp và dao động không đều giữa các trục, đôi khi dễ nhầm với hành động WA nếu động tác cúi người không rõ ràng. Trong khi đó, CR tạo ra tín hiệu biên độ thấp và ít khác biệt giữa các trục, yêu cầu hệ thống phải xử lý tốt các chuyển động chậm. Hành động SL là thách thức lớn do tín hiệu không ổn định và có biên độ rất thấp, dễ bị nhầm

lẫn với trạng thái đứng yên hoặc di chuyển chậm.



Hình 2.3: Sự thay đổi tín hiệu tương ứng với từng hành động.

Đối với hành động FA, tín hiệu gia tốc thể hiện sự tăng đột ngột và giảm nhanh trên tất cả các trục, giúp nhận dạng khá chính xác trong điều kiện bình thường; tuy nhiên, các cú ngã nhẹ hoặc ngã kết hợp với chuyển động khác lại khó phân biệt hơn. Hai hành động DS và US có tín hiệu đặc trưng với nhịp điệu và biên độ thay đổi không đều theo trục thẳng đứng; trong đó, DS thường dễ nhận dạng hơn do biên độ gia tốc lớn hơn khi chân tiếp xúc mặt đất, trong khi US đôi khi bị nhầm với bước nhanh hoặc nhảy nhẹ.

Mặc dù bộ dữ liệu có sự mất cân bằng về số lượng mẫu giữa các loại hành động, nhưng sự ảnh hưởng đến hiệu suất nhận dạng là không đáng kể. Các hành động tĩnh như ST (112027 mẫu), LY (165027 mẫu) và SI (126022 mẫu) tạo ra tín hiệu rõ ràng, ít dao động và dễ phân biệt, giúp mô hình học máy nhận dạng hiệu quả ngay cả khi số mẫu tương đối ít. Ngược lại, các hành động động như WA (247860 mẫu), JO (181563 mẫu), US (315749 mẫu) và DS (302884 mẫu)

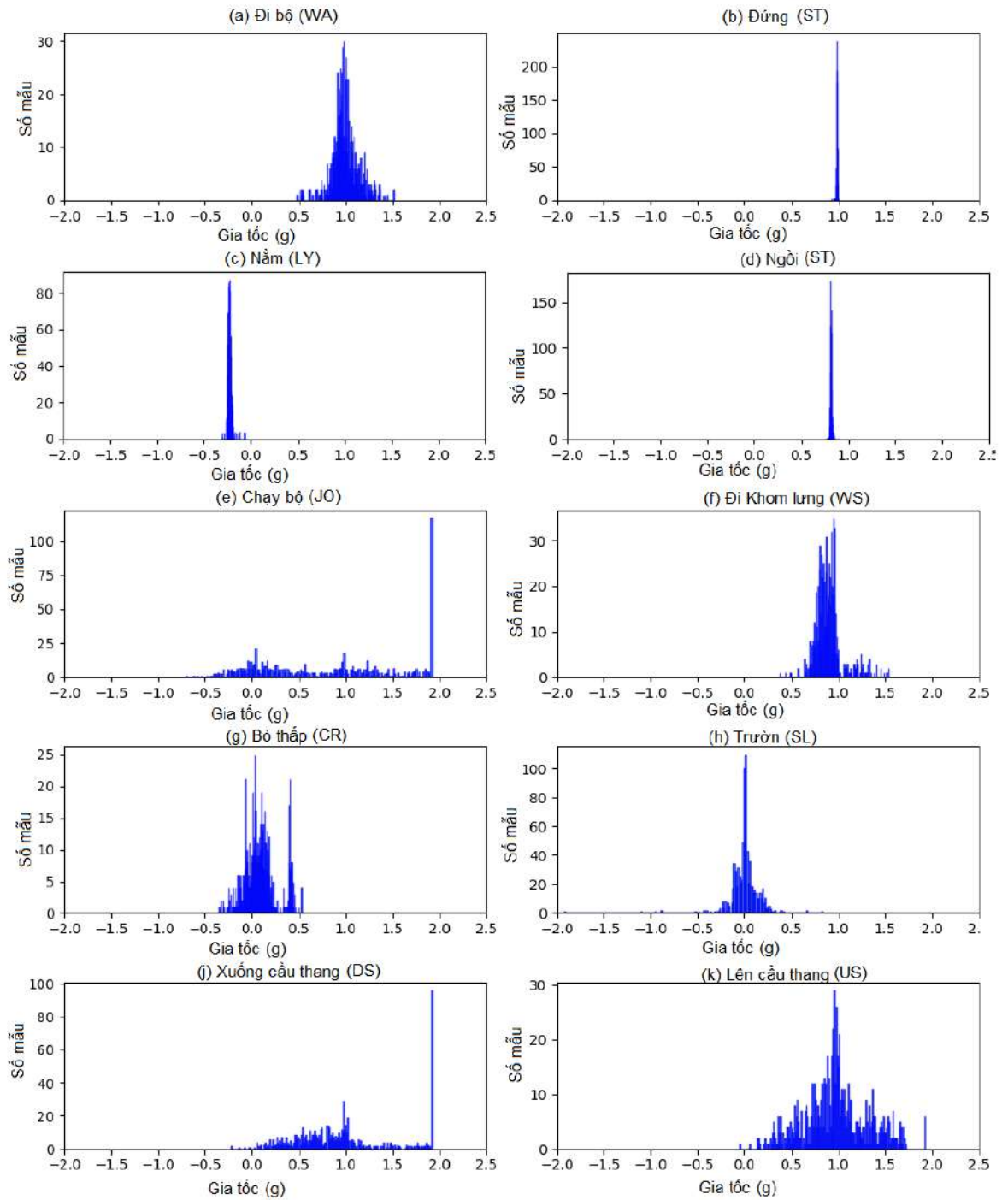
có tín hiệu phức tạp và biến thiên lớn, đòi hỏi nhiều mẫu hơn để mô hình học được đặc trưng quan trọng. Các hành động khác như FA (259386 mẫu) và SL (180851 mẫu) cũng được phân bổ số lượng mẫu hợp lý để đảm bảo độ chính xác khi nhận dạng. Do đó, sự mất cân bằng trong bộ dữ liệu phản ánh thực tế về số lượng mẫu cần thiết cho từng loại hành động, giúp mô hình học máy học hiệu quả hơn mà không làm suy giảm đáng kể hiệu suất tổng thể.

Hình 2.4 biểu diễn sự phân bố dữ liệu gia tốc các hành động theo trục x. WA cho thấy tín hiệu dao động trong khoảng từ -1 g đến 1.5 g , thể hiện sự chuyển động đều đặn và lặp lại. Các hành động ST và SI thể hiện tín hiệu ổn định quanh giá trị 0 g , ít biến động đáng kể. LY hiển thị đường tín hiệu gần như phẳng ở mức khoảng -0.5 g , biểu thị trạng thái tĩnh. JO tạo ra dao động mạnh hơn, trong khoảng từ -2 g đến 2 g , cho thấy mức gia tốc cao hơn so với WA. CR thể hiện dao động từ -1.5 đến 1.5 g , trong khi US và DS cho thấy biên độ dao động tương tự nhau. SL có dao động trong khoảng từ -1 đến 1 g , với mức biến thiên thấp hơn so với CR. Ngược lại, FA thể hiện dao động bất thường với các giảm đột ngột xuống mức -2 g , cho thấy sự thay đổi mất kiểm soát.

Nhìn chung, dữ liệu gia tốc thể hiện rõ sự khác biệt về biên độ, cũng như tần suất dao động giữa các hành động. Các hành động tĩnh như ST, SI và LY tạo ra tín hiệu ổn định gần 0 g , cho thấy ít hoặc không có chuyển động. Ngược lại, các hành động động như WA, JO, CR, US và DS thể hiện dao động lặp lại với biên độ trong khoảng từ -2 g đến 2 g , phản ánh chuyển động đều và có nhịp điệu. Các hành động bất quy tắc như SL và FA nổi bật với tín hiệu bất đối xứng, không đồng nhất và có sự biến đổi đột ngột, đặc biệt là ở FA, nơi các giảm gia tốc đột ngột biểu hiện chuyển động mất kiểm soát. Dữ liệu này cho thấy mức độ phức tạp khác nhau giữa các hành động, trong đó các hành động ở trạng thái tĩnh dễ phân loại hơn. Các hành động ở trạng thái di chuyển đòi hỏi phân tích có chiều sâu do có sự trùng lặp về hình thái tín hiệu và độ biến thiên cao giữa các trục.

2.1.2.3. Tập dữ liệu công khai

Trong nghiên cứu này, một cách tiếp cận mới được áp dụng, trong đó hành động ngã được xem như một dạng hành vi thay vì chỉ là một sự kiện đơn lẻ. Cách tiếp cận này khác với các nghiên cứu trước đây [12, 17, 38], vốn thường phân tách riêng biệt giữa bài toán nhận dạng hành động và phát hiện ngã. Do đó, ba bộ dữ liệu công khai — ¹MobiFall [84], ²SFDLA [85], và ³UniMiB-SHAR [86] chứa các hành động tương tự đã được sử dụng để so sánh, nhằm đảm bảo tính



Hình 2.4: Biểu đồ phân bố dữ liệu trên trục x của 11 hành động.

đa dạng và khách quan cho nghiên cứu.

¹<https://www.kaggle.com/datasets/kmknation/mobifall-dataset-v20>

²<https://kilyos.ee.bilkent.edu.tr/~billur/>

³<https://www.kaggle.com/datasets/alirezacman/unimib-shar>

2.1.3. Xử lý dữ liệu

2.1.3.1. Vấn đề nhiễu cảm biến và điểm đặt gốc của thiết bị

Tín hiệu thu nhận từ cảm biến gia tốc là một tổ hợp phức tạp bao gồm gia tốc động học thực và các thành phần nhiễu. Cụ thể, tín hiệu thô $\bar{s}_{raw}[n] = (\bar{a}_x[n], \bar{a}_y[n], \bar{a}_z[n])$ tại thời điểm mẫu n được mô tả như sau:

$$s_{raw}[n] = \mathbf{M}^* \cdot s_{true}[n] + \mathbf{a}_{offset} + \eta[n], \quad (2.1)$$

trong đó: $s_{true}[n]$ là vector gia tốc động học thực tế do người sử dụng; $\mathbf{M}^*$ là ma trận hệ số tỉ lệ; $\mathbf{a}_{offset}$ là vector sai số lệch điểm 0; η là nhiễu ngẫu nhiên phát sinh từ rung động cơ học và nhiễu điện tử trong mạch tích hợp.

Khi sử dụng thiết bị đeo, tính tổng quát của mô hình bị ảnh hưởng bởi sự lệch trục giữa cảm biến $\{S\}$ và cơ thể tình nguyện viên $\{B\}$. Do đặc điểm hình thể của mỗi người như thể trạng béo thường làm thiết bị nghiêng về phía trước, trong khi người gầy làm thiết bị nghiêng theo độ dốc hông, hoặc sự sai lệch do dây đai. Điều này dẫn đến thành phần gia tốc trọng trường bị phân bổ nhầm sang các trục còn lại. Do đó, khi triển khai thực tế, cảm biến cần được hiệu chỉnh về điểm đặt gốc ban đầu giúp thuật toán đề xuất hoạt động ổn định trên các tình nguyện viên và ít bị ảnh hưởng bởi góc nghiêng của thiết bị cảm biến.

Bên cạnh đó, thời điểm linh cứu hoả thay đổi trạng thái đột ngột (ví dụ: từ chạy bộ sang bò thấp), tín hiệu gia tốc xuất hiện các biến thiên phi tuyến và xuất hiện tín hiệu bất thường trong thời gian ngắn. Việc phát hiện sự thay đổi này giúp hệ thống hạn chế sự nhầm lẫn giữa chuyển đổi các hành động với các hành động di chuyển. Ngoài ra, hành động ngã có đặc tính vật lý là một cú va chạm đột ngột. Nếu sử dụng cửa sổ trượt thông thường, đỉnh va chạm có xác suất nhất định xuất hiện ở biên của hai cửa sổ kế tiếp. Việc lấy điểm bất thường làm tâm giúp xác định được quá trình ngã: mất thăng bằng $\rightarrow$ va chạm $\rightarrow$ trạng thái sau ngã vào một khung dữ liệu. Điều này giúp cải thiện chất lượng đặc trưng lựa chọn, từ đó giảm thiểu các báo động giả do hành động di chuyển mạnh gây ra như chuyển từ đứng sang bò trườn hoặc đang ngồi thì bật dậy di chuyển...

2.1.3.2. Phân đoạn dữ liệu

Giả thuyết mỗi hành động được mô tả bởi tín hiệu $\bar{s}[n] = (\bar{a}_x[n], \bar{a}_y[n], \bar{a}_z[n])$, trong đó $\bar{N}$ là độ dài của chuỗi tín hiệu $\bar{s}[n]$ và $n \in [1, \bar{N}]$. Ở đây, $\bar{a}_x[n]$, $\bar{a}_y[n]$ và $\bar{a}_z[n]$ lần lượt là chuỗi tín hiệu theo thời gian trên các trục x , y và z . Chuỗi tín

hiệu $\bar{s}[n]$ này được ghi lại bởi cảm biến gia tốc gắn tại vị trí thắt lưng của lính cứu hoả trong quá trình thực hiện các hành động.

Tần số lấy mẫu đóng vai trò quan trọng trong thiết kế hệ thống HAR. Đối với các thiết bị đeo dành cho người cao tuổi, tần số lấy mẫu thấp giúp tiết kiệm năng lượng và phù hợp với đặc điểm chuyển động chậm của người già. Ngược lại, các hành động có tốc độ nhanh đòi hỏi tần số lấy mẫu cao hơn, trong khoảng 20 – 100 Hz, nhằm thu nhận dữ liệu chi tiết hơn [21, 24, 52]. Việc lựa chọn tần số lấy mẫu phù hợp giúp đạt được sự cân bằng giữa độ chính xác nhận dạng, tốc độ phản hồi và giới hạn phần cứng. Tuy nhiên, xử lý dữ liệu ở tần số cao yêu cầu nhiều năng lượng và tài nguyên tính toán hơn.

Trong nghiên cứu này, tần số lấy mẫu được giảm xuống còn 50 Hz nhằm tối ưu hóa hiệu quả xử lý trong khi vẫn duy trì chất lượng tín hiệu cần thiết. Ở mức 50 Hz, tín hiệu vẫn đảm bảo mô tả chính xác các hành động có cường độ cao như chạy, bò hoặc ngã mà không bị mất thông tin do hiện tượng lấy mẫu thiếu. Đồng thời, tần số này giúp giảm lượng dữ liệu cần xử lý, từ đó rút ngắn thời gian phản hồi và tiết kiệm năng lượng cho vi điều khiển và mô-đun truyền thông không dây. Điều này đặc biệt quan trọng trong bối cảnh của lính cứu hoả, khi hệ thống phải hoạt động liên tục trong môi trường có nhiệt độ cao, nhiều khói và giới hạn về năng lượng pin, nhưng vẫn phải đảm bảo tính ổn định và khả năng phản hồi theo thời gian thực để hỗ trợ chỉ huy trong quá trình tác nghiệp. Để đạt được điều đó, bộ lọc trung bình được áp dụng, trong đó tín hiệu sau khi giảm tần số là chuỗi các giá trị trung bình của hai mẫu liên tiếp. Với mỗi trục $k \in x, y, z$, tín hiệu sau khi lọc có dạng $s[n]$ được giảm tần số như sau:

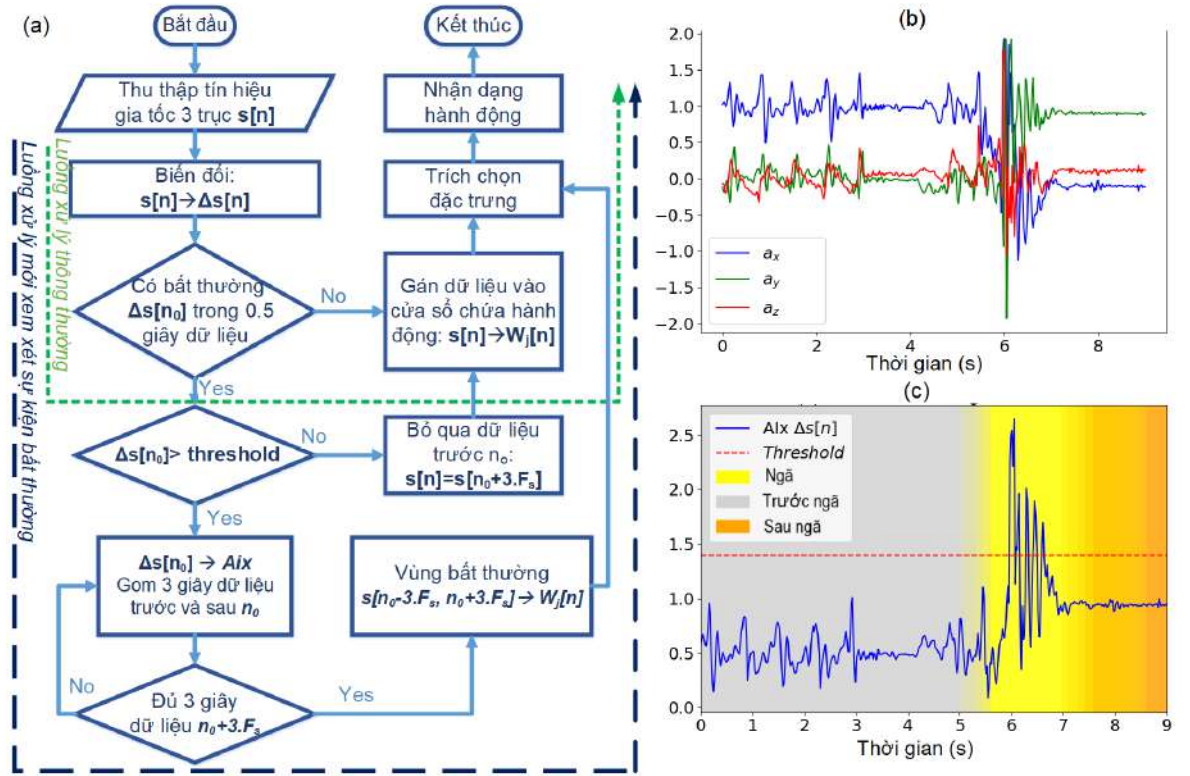
$$a_k[n] = \frac{\bar{a}_k[2n-1] + \bar{a}_k[2n]}{2}, \quad n \in [1, N] \quad (2.2)$$

ở đây, k biểu thị cho các trục x, y và z . Tín hiệu $s[n]$ có kích thước $N = \bar{N}/2$ với $\bar{N}$ là kích thước của tín hiệu gốc. Tần số lấy mẫu F_s của tín hiệu $s[n]$ là 50 Hz, và được áp dụng nhất quán trong toàn bộ nghiên cứu này.

Tiếp theo, chuỗi tín hiệu liên tục $s[n]$ được phân đoạn thành các cửa sổ thời gian có kích thước bằng nhau. Một số nghiên cứu sử dụng kích thước cửa sổ như 10 giây [21], 8 giây [24] tuy nhiên những cửa sổ này có thời gian tương đối dài, có thể gây ra độ trễ trong phản hồi thời gian thực và làm trộn lẫn nhiều hành động trong cùng một cửa sổ. Các nghiên cứu trước đây về phát hiện ngã dành cho lính cứu hoả [9, 22] và cho người bình thường [33, 87, 88] cũng đã sử dụng cửa sổ với kích thước 3 giây để đạt được sự cân bằng giữa khả năng phản hồi và độ chính xác nhận dạng.

Việc phân đoạn này được thực hiện bằng cách chia tổng thời lượng của tín hiệu đã ghi lại thành các cửa sổ thời gian ($W_j[n]$) có kích thước $\Delta t = 3$ giây. Mỗi $W_j[n]$ chứa M mẫu của $a_x[n]$, $a_y[n]$ và $a_z[n]$, tương ứng với khoảng thời gian $[n_i, n_{i+1}]$, trong đó n_i là thời điểm bắt đầu của cửa sổ thứ j và n_{i+1} là thời điểm kết thúc, đồng thời đánh dấu điểm bắt đầu của cửa sổ kế tiếp. Thời lượng của mỗi cửa sổ thời gian được xác định bởi công thức $\Delta t = n_{i+1} - n_i$. Giả sử tín hiệu được phân đoạn thành $N_{\delta t}$ cửa sổ, khi đó bên trong mỗi cửa sổ $W_j[n]$, dữ liệu từ cảm biến gia tốc được biểu diễn như sau: $W_j[n] = (a_x[n], a_y[n], a_z[n])$, $n \in [n_i, n_{i+1}]$, $j \in [1, N_{\delta t}]$. Tất cả dữ liệu hành động sau khi phân đoạn được chia thành tập huấn luyện và tập kiểm thử với tỷ lệ 60/40.

2.1.3.3. Quy trình xử lý dữ liệu dựa trên phát hiện điểm bất thường



Hình 2.5: Lưu đồ của quy trình phát hiện bất thường và xử lý dữ liệu (a), dữ liệu gia tốc 3 trục mô tả khi tình nguyện viên di chuyển rồi ngã (b), và xử lý dữ liệu phát hiện bất thường (c).

Cửa sổ thời gian được sử dụng để phân đoạn tín hiệu của các hành động lặp lại trong nghiên cứu này. Tuy nhiên, hành động té ngã được phân đoạn riêng biệt dựa trên việc phát hiện các giá trị bất thường khi tồn tại giá trị vượt quá ngưỡng, để tạo ra vùng tín hiệu chứa hành động này. Hình 2.5-a minh họa quy trình mới được đề xuất cho việc phát hiện bất thường trong xử lý dữ liệu. Luồng

xử lý khác biệt được tô màu xanh lá, thể hiện tương ứng quy trình xử lý mới. Ngược lại, các mũi tên màu xanh dương mô tả quy trình thông thường đã được sử dụng trước đây. Cách tiếp cận này giúp tăng cường khả năng phát hiện sự thay đổi về hành động và nhận dạng té ngã được cải thiện độ chính xác. Một điểm nổi bật trong quy trình phát hiện là cách tạo các cửa sổ dữ liệu khi sự kiện té ngã xảy ra. Cụ thể, thay vì sử dụng cửa sổ trượt cố định, hệ thống tạo ra một cửa sổ dữ liệu chuyên biệt bao gồm vùng bất thường ($s[n_0 - 3 \cdot F_s, n_0 + 3 \cdot F_s]$) xung quanh thời điểm té ngã được phát hiện n_0 . Cách tiếp cận này tập trung vào vùng tín hiệu quan trọng, cải thiện hiệu suất nhận dạng chuyển động và tăng hiệu quả phát hiện té ngã so với các phương pháp xử lý dữ liệu thông thường. Phương pháp phát hiện bất thường được thực hiện thông qua các bước sau:

Bảng 2.3: So sánh các hệ thống phát hiện té ngã theo thời gian phát hiện tối thiểu, tần số và đặc trưng.

Công trình	Thời gian	Tần số	Mô tả
Nghiên cứu này	Quyết định: 3 giây; phát hiện: 0.5 giây	50 Hz	dữ liệu 3 giây trước và 3 giây sau điểm bất thường thời điểm bất thường, kết hợp rừng ngẫu nhiên, coi ngã như 1 hành động
Thành và nhóm nghiên cứu [9]	Quyết định: 3 giây; phát hiện: 0.5 giây	100 Hz	Phát hiện té ngã nhanh chóng bằng cách sử dụng nhiều cảm biến gồm gia tốc, vận tốc góc và áp suất. Chưa kiểm chứng ảnh hưởng nhiễu nhiệt đến bộ cảm biến.
Định và nhóm nghiên cứu [22]	Quyết định: 3 giây; phát hiện: 0.5 giây	100 Hz	Sử dụng cảm biến gia tốc, có thể nhầm lẫn khi lính cứu hỏa chuyển sang tư thế bò trườn.
Chai và nhóm nghiên cứu [29]	Quyết định: 1 giây	15 Hz	Sử dụng học sâu có độ phức tạp cao với gia tốc, vận tốc góc và từ trường; ít phù hợp ứng dụng thời gian thực, tốn năng lượng và có thể bị nhiễu bởi môi trường từ tính, mô hình dễ bị báo động giả

Bước 1: Phát hiện chỉ số bất thường. Chỉ số bất thường (AIx) biểu thị sự thay đổi đột ngột trong tín hiệu gia tốc kế $s[n]$ tại một thời điểm cụ thể. Trong nghiên cứu này, AIx được sử dụng để xác định thời điểm lính cứu hỏa bị té ngã và chạm đất. Để tính toán AIx , tín hiệu gia tốc kế $s[n]$ được chuyển đổi thành chuỗi biến thiên $\Delta s[n]$, thể hiện độ lệch tổng hợp của ba thành phần

gia tốc ($a_x[n], a_y[n], a_z[n]$) so với giá trị trung bình của chúng trong một cửa sổ thời gian nhỏ xác định ΔW . Thành và nhóm nghiên cứu [17] đã chỉ ra rằng thời gian tối thiểu của giai đoạn rơi tự do, tính từ lúc bắt đầu ngã cho đến khi cơ thể chạm đất lần đầu, xấp xỉ 0.34 giây. Ngoài ra, hầu hết các nghiên cứu trong Bảng 2.3 đặt thời gian tối thiểu để phát hiện té ngã $\Delta W = 0.5$ giây, tương ứng với khoảng thời gian mà tín hiệu gia tốc xuất hiện các biến thiên đột ngột đặc trưng (AIx) cho quá trình mất thăng bằng và va chạm với mặt đất. Khoảng thời gian này đảm bảo hệ thống có thể phát hiện sự kiện té ngã gần như ngay lập tức sau khi xảy ra, đáp ứng yêu cầu phản hồi thời gian thực trong các tình huống khẩn cấp. Tuy nhiên, để đảm bảo độ tin cậy của kết quả và tránh các phát hiện sai do nhiễu hoặc chuyển động mạnh bất thường (ví dụ: cú ngồi xuống nhanh hoặc cú va chạm nhẹ), hệ thống cần một giai đoạn đánh giá bổ sung. Do đó, thời gian ra quyết định cuối cùng được đặt là 3 giây, cho phép bộ xử lý xác minh lại đặc trưng tín hiệu, đối chiếu với các hành động liên kế trong cửa sổ thời gian, và loại bỏ các trường hợp nhiễu hoặc tín hiệu giả. Cách tiếp cận này giúp cân bằng giữa tốc độ phản ứng nhanh và độ chính xác cao trong phát hiện té ngã của lính cứu hỏa trong môi trường thực tế. Quá trình biến đổi tín hiệu và phát hiện các vùng tương ứng với các giai đoạn liên quan đến té ngã dựa trên chỉ số bất thường được minh họa trong Hình 2.5-b và Hình 2.5-c.

$$\Delta s[n] = \sqrt{\sum_{k \in \{x,y,z\}} \left(a_k[n] - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N a_k[n] \right)^2} \quad (2.3)$$

AIx được phát hiện nếu $\Delta s[n_0]$ tại thời điểm n_0 được xác định vượt qua *threshold*.

$$AIx = \begin{cases} \Delta s[n_0], & \text{nếu } \Delta s[n_0] > \text{threshold} = 1.8g, \\ 0, & \text{trường hợp khác.} \end{cases} \quad (2.4)$$

ở đây, *threshold* là ngưỡng giá trị được đề xuất trong nghiên cứu [9] về phát hiện ngã cho lính cứu hỏa.

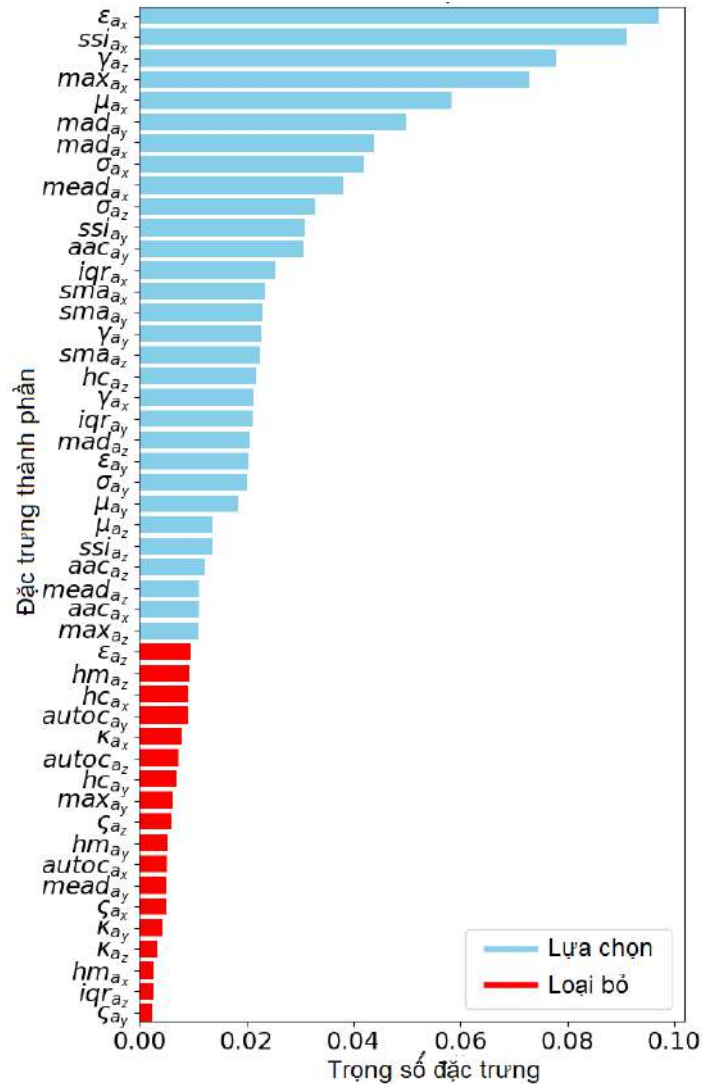
Bước 2: Thu thập dữ liệu xung quanh chỉ số bất thường.

Sau khi phát hiện điểm bất thường tại thời điểm n_0 từ tín hiệu gia tốc kể, dữ liệu bổ sung được thu thập trước và sau sự kiện này $W_j[n]$ với $n \in [n_0 - 3 \cdot F_s, n_0 + 3 \cdot F_s]$.

Bước 3: Xử lý dữ liệu đã thu thập. Dữ liệu được thu thập trong cửa sổ thời gian này được sử dụng để phân tích và xác định mức độ nghiêm trọng của sự kiện té ngã. Quá trình phân tích nhằm hạn chế tình trạng nhận dạng nhầm

ngã có phục hồi (Hình 2.5-c).

2.1.4. Trích chọn đặc trưng



Hình 2.6: Độ quan trọng của các đặc trưng trích xuất từ gia tốc.

Việc trích xuất đặc trưng đóng vai trò thiết yếu trong quá trình nhận dạng hành động [21, 24, 89]. Trong nghiên cứu của Chai và nhóm nghiên cứu [30], hệ thống FAR được sử dụng để đánh giá hiệu quả của quá trình huấn luyện và các bài tập thể lực cho lính cứu hỏa, đạt độ chính xác trên 90%. Họ đã nghiên cứu 654 đặc trưng được trích xuất từ tín hiệu điện cơ bề mặt, dữ liệu gia tốc kế và con quay hồi chuyển phục vụ cho bài toán nhận dạng hành động trong hoạt động cứu hỏa (bao gồm 25 loại đặc trưng miền thời gian và 6 loại đặc trưng miền tần số).

Để tối ưu hóa việc tính toán, nghiên cứu này chỉ xem xét 16 loại đặc trưng miền thời gian, có độ phức tạp thấp cho dữ liệu gia tốc. Do đó, các loại đặc

Bảng 2.4: Thông tin các đặc trưng được sử dụng sau khi tối ưu hóa

Loại đặc trưng	Trục	Công thức	
Năng lượng	x, y	$\varepsilon_{a_k} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{n=1}^M a_k^2[n]}$	(2.5)
Độ lệch tuyệt đối trung bình	x, y, z	$\text{mad}_{a_k} = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M a_k[n] - \mu_{a_k} $	(2.6)
Tổng độ lớn tín hiệu	x, y, z	$\text{sma}_{a_k} = \sum_{n=1}^M a_k[n] $	(2.7)
Giá trị trung bình	x, y, z	$\mu_{a_k} = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M a_k[n]$	(2.8)
Độ lệch chuẩn	x, y, z	$\sigma_{a_k} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{n=1}^M (a_k[n] - \mu_{a_k})^2}$	(2.9)
Tích phân bình phương	x, y, z	$\text{ssi}_{a_k} = \sum_{n=1}^M a_k[n]^2$	(2.10)
Thay đổi biên độ trung bình	x, y, z	$\text{aac}_{a_k} = \frac{1}{M-1} \sum_{n=1}^{M-1} a_k[n+1] - a_k[n] $	(2.11)
Giá trị cực đại	x, z	$\text{max}_{a_k} = \max(a_k[n])$	(2.12)
Độ lệch tuyệt đối trung vị	x, z	$\text{mead}_{a_k} = \text{median}(a_k[n] - \text{median}(a_k))$	(2.13)
Khoảng tứ phân vị	x, y	$\text{iqr}_{a_k} = Q_3(a_k[n]) - Q_1(a_k[n])$	(2.14)
Độ phức tạp	z	$\text{hc}_{a_k} = \frac{\text{hm}_{\Delta a_k}}{\text{hm}_{a_k}}$ với $\text{hm}_{a_k} = \sqrt{\frac{\frac{1}{M-1} \sum_{n=1}^{M-1} (a_k[n+1] - a_k[n])^2}{\frac{1}{M} \sum_{n=1}^M (a_k[n] - \mu_{a_k})^2}}$	(2.15)
Khoảng giá trị	x, y, z	$\gamma_{a_k} = \max(a_k[n]) - \min(a_k[n])$	(2.16)

trung này được đề xuất bởi Chai và nhóm nghiên cứu [30], bao gồm: năng lượng (ε), độ lệch tuyệt đối trung bình (mad), tổng độ lớn tín hiệu (sma), giá trị trung bình (μ), độ lệch chuẩn (σ), tích phân bình phương đơn giản (ssi), thay đổi biên độ trung bình (aac), giá trị cực đại (max), khoảng tứ phân vị (iqr), độ linh động (hm), độ lệch tuyệt đối trung vị (mead), khoảng giá trị (γ), độ lệch (ς), độ nhọn (κ), độ tương quan (autoc), và độ phức tạp (hc).

Với dữ liệu gia tốc 3 trục, tổng số đặc trưng thành phần có thể lên đến 48 và

cần được chọn lọc để giảm độ phức tạp tính toán. Để giảm số lượng đặc trưng và tối ưu hóa hiệu suất của mô hình nhận dạng, các đặc trưng có tầm quan trọng thấp được loại bỏ nhằm giảm độ phức tạp của mô hình mà vẫn duy trì độ chính xác. Một nghiên cứu [89] đã đề xuất phương pháp cải tiến cho RF bằng cách loại bỏ dần các đặc trưng kém quan trọng. Phương pháp này giúp nhận diện và loại bỏ các đặc trưng không liên quan trong quá trình huấn luyện mô hình, từ đó cải thiện độ chính xác phân loại. Tương tự, nghiên cứu [90] đề xuất sử dụng độ lệch chuẩn của giá trị thông tin thu được (information gain) của từng đặc trưng làm ngưỡng. Các đặc trưng có giá trị bằng hoặc cao hơn ngưỡng này được giữ lại, trong khi các đặc trưng thấp hơn sẽ bị loại bỏ. Trong Hình 2.6, điểm quan trọng của các đặc trưng có độ lệch chuẩn là khoảng 0.02. Do đó, ngưỡng 0.01 (bằng một nửa độ lệch chuẩn) được áp dụng để loại bỏ các đặc trưng có tầm quan trọng thấp, giúp giảm đáng kể số lượng đặc trưng mà vẫn duy trì hiệu suất mô hình. Từ tập hợp ban đầu gồm 16 loại đặc trưng miền thời gian, nghiên cứu đã loại bỏ các chỉ số kém hiệu quả và giữ lại 12 loại đặc trưng phù hợp. Kết quả quá trình tối ưu hóa này đã xác định được 30 đặc trưng thành phần quan trọng nhất trên từng trục tín hiệu, như được trình bày tại Bảng 2.4.

2.1.5. Quy trình gán nhãn

Quy trình gán nhãn dữ liệu bao gồm việc phân đoạn dữ liệu gia tốc kế thành các cửa sổ và gán nhãn tương ứng với từng hành động cụ thể của lính cứu hỏa. Mỗi hành động được thực hiện một cách tự nhiên bởi các tình nguyện viên trong các kịch bản mô phỏng được thiết kế sao cho gần giống với điều kiện thực tế. Các hành động này được quan sát trực tiếp và gán nhãn thủ công bởi hai người giám sát để đảm bảo độ chính xác của quá trình chú thích. Các bước thực hiện như sau:

Bước 1: Có 11 hành động (WA, ST, LY, SI, JO, WA, CR, SL, FA, DS, US), mỗi hành động tương ứng với một nhãn duy nhất từ 0 đến 10.

Bước 2: Phân đoạn và gán nhãn tuần tự.

Bộ dữ liệu được xử lý tuần tự cho từng hành động. Đối với hành động k_D ($k_D = 0, 1, \dots, 10$), dữ liệu được phân đoạn thành $N_{\delta t}$ cửa sổ thời gian và gán nhãn trước khi chuyển sang hành động tiếp theo.

Bước 3: Gán nhãn.

Đối với mỗi cửa sổ $W_j[n]$ tương ứng hành động k_D được gán nhãn là $L_j = k_D$. Sau khi gán nhãn cho tất cả các cửa sổ của hành động k_D , quá trình tiếp tục với hành động $k_D + 1$, trong đó nhãn mới được gán là $L_j = k_D + 1$. Do đó, tập dữ liệu bao gồm các cặp cửa sổ và các nhãn tương ứng được ký hiệu

là $\{(W_1[n], L_1), (W_2[n], L_2), \dots, (W_{N_{\delta t}}[n], L_{N_{\delta t}})\}$. Cách tiếp cận này đảm bảo rằng mỗi cửa sổ $W_j[n]$ được liên kết với một hành động duy nhất và được gán một nhãn duy nhất L_j .

2.1.6. Triển khai mô hình rừng ngẫu nhiên trên vi điều khiển

Giả sử tập dữ liệu $\mathcal{D} = \{(feat_j, L_j)\}_{j=1}^{N_{\delta t}}$, trong đó:

- $L_j \in \{1, 2, \dots, 11\}$ là nhãn đầu ra của $feat_j$, với 11 nhãn tương ứng cho các hành động khác nhau.
- **Siêu tham số:** mô hình bao gồm $n_estimators$ cây quyết định, được ký hiệu là $T_1, T_2, \dots, T_{n_estimators}$, trong đó mỗi cây bị giới hạn độ sâu tối đa là max_depth . Mỗi cây quyết định được xây dựng từ một tập con khác nhau của dữ liệu huấn luyện $\mathcal{D}$ bằng kỹ thuật lấy mẫu bootstrap. Tiếp theo, mỗi cây T_e được huấn luyện trên một tập con $\mathcal{D}_e \subset \mathcal{D}$ và thực hiện dự đoán cho các đầu vào cụ thể.
- **Dự đoán:** Với một vector đặc trưng đầu vào $feat_j \in \mathcal{D}$, mỗi cây trong rừng thực hiện một dự đoán:

$$T_e(feat_j) \in \{1, 2, \dots, 11\}, \quad e = 1, 2, \dots, n_estimators.$$

trong đó $T_e(feat_j)$ là nhãn dự đoán của cây thứ e .

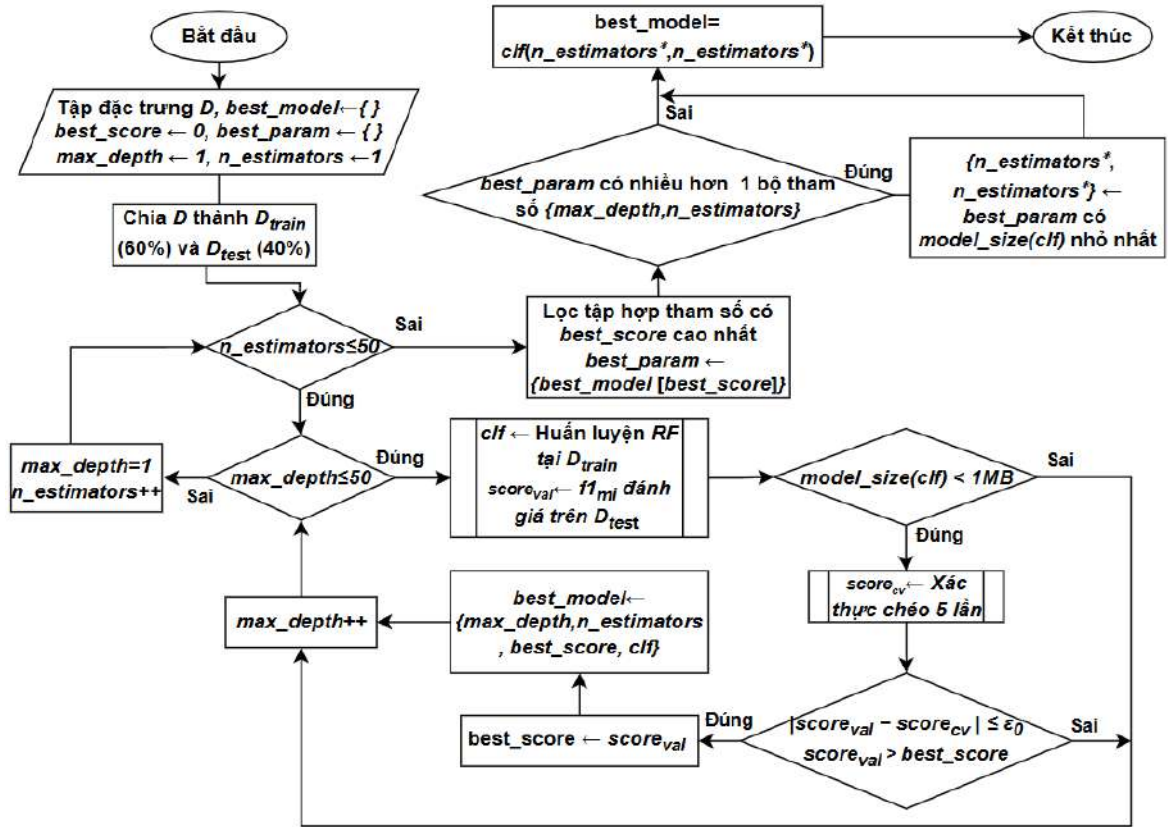
- **Dự đoán cuối cùng:** Nhãn dự đoán cuối cùng được xác định bằng phương pháp bỏ phiếu đa số từ kết quả dự đoán của tất cả các cây.

$$\hat{L}_j = \text{Voting}(T_1(feat_j), T_2(feat_j), \dots, T_{n_estimators}(feat_j)).$$

RF với các tham số tối ưu là một giải pháp phù hợp nhờ kích thước nhỏ gọn và độ trễ suy luận thấp [21, 24]. Bên cạnh đó, bộ nhớ RAM trên vi điều khiển thường bị giới hạn, do phải đồng thời hỗ trợ xử lý dữ liệu theo thời gian thực và các hoạt động ở cấp hệ thống, trong khi bộ nhớ flash lại được sử dụng cho firmware, bộ đệm cảm biến và dữ liệu mô hình tính toán [56]. Do đó, dung lượng khả dụng để triển khai TinyML bị hạn chế [91], và các nghiên cứu gần đây [55, 57, 58] thường triển khai mô hình trên các vi điều khiển có dung lượng bộ nhớ khoảng 1 MB.

Hình 2.7 mô tả quá trình tinh chỉnh siêu tham số¹ (hyperparameter tuning) cho mô hình RF, dựa trên chỉ số F1-score micro ($F1_{mi}$) và ràng buộc kích thước

¹<https://github.com/HieuSSALAB/FireFighter> (Accessed: 12:00 10/10/2025)



Hình 2.7: Tối ưu siêu tham số cho mô hình học máy

mô hình không được vượt quá 1 MB. Để đáp ứng yêu cầu tối ưu mô hình cho việc triển khai trên các vi điều khiển có giới hạn bộ nhớ, hai siêu tham số chính $n_estimators$ và max_depth được khảo sát trong khoảng từ 1 – 50. Với mỗi tổ hợp tham số, mô hình được đánh giá dựa trên $F1_{mi}$ và kích thước mô hình. Hai tham số này có ảnh hưởng đáng kể đến cả kích thước mô hình và độ chính xác nhận dạng [92,93]. Việc lựa chọn cấu hình tối ưu đảm bảo mô hình vẫn nhỏ gọn nhưng duy trì hiệu suất nhận dạng tốt. Quy trình tinh chỉnh siêu tham số tương tự cũng được áp dụng cho tất cả các mô hình học máy trong Bảng 2.5, sử dụng cùng dữ liệu huấn luyện và được đánh giá trên cùng tập dữ liệu kiểm thử.

Để bảo đảm các giới hạn về bộ nhớ và khả năng tính toán của phần cứng được quản lý một cách hiệu quả, chi tiết quá trình triển khai nhúng mô hình RF vào vi điều khiển như sau:

- **Chuyển đổi và tạo thư viện mô hình:**

- Nhập thư viện chuyển đổi mô hình trên môi trường python: `from micromlgen import port.`
- Chuyển đổi mô hình đã huấn luyện (clf) sang mã C: `model_code = port(clf).`

- Lưu mô hình đã chuyển đổi thành tệp tiêu đề (header file):

```
with open("random_forest.h", "w") as file:
    file.write(model_code)
```

- **Tích hợp mô hình:**

- Nhúng tệp tiêu đề `random_forest.h` vào firmware của vi điều khiển:

```
#include "random_forest.h".
```
- Khởi tạo mô hình RF trong vi điều khiển bằng lệnh:

```
Eloquent::ml::port::RF rf;
```

- **Triển khai và thực thi:**

- Với mỗi vectơ đặc trưng đầu vào ($feat_j$): $\hat{L}_j = \text{rf.predict}(feat_j)$;

2.2. Thực nghiệm và kết quả

2.2.1. Kết quả thực nghiệm trên dữ liệu riêng tư

Bảng 2.5 trình bày các cặp tham số tối ưu nhằm đạt được giá trị $F1_{mi}$ cao, đồng thời đảm bảo kích thước bộ nhớ của mô hình nhận dạng nằm trong giới hạn dưới 1 MB. Các mô hình này được triển khai bằng thư viện scikit-learn để duy trì tính nhất quán trong suốt quá trình huấn luyện và đánh giá.

Bảng 2.5: Cấu hình các siêu tham số của các mô hình nhận dạng trên tập dữ liệu riêng tư.

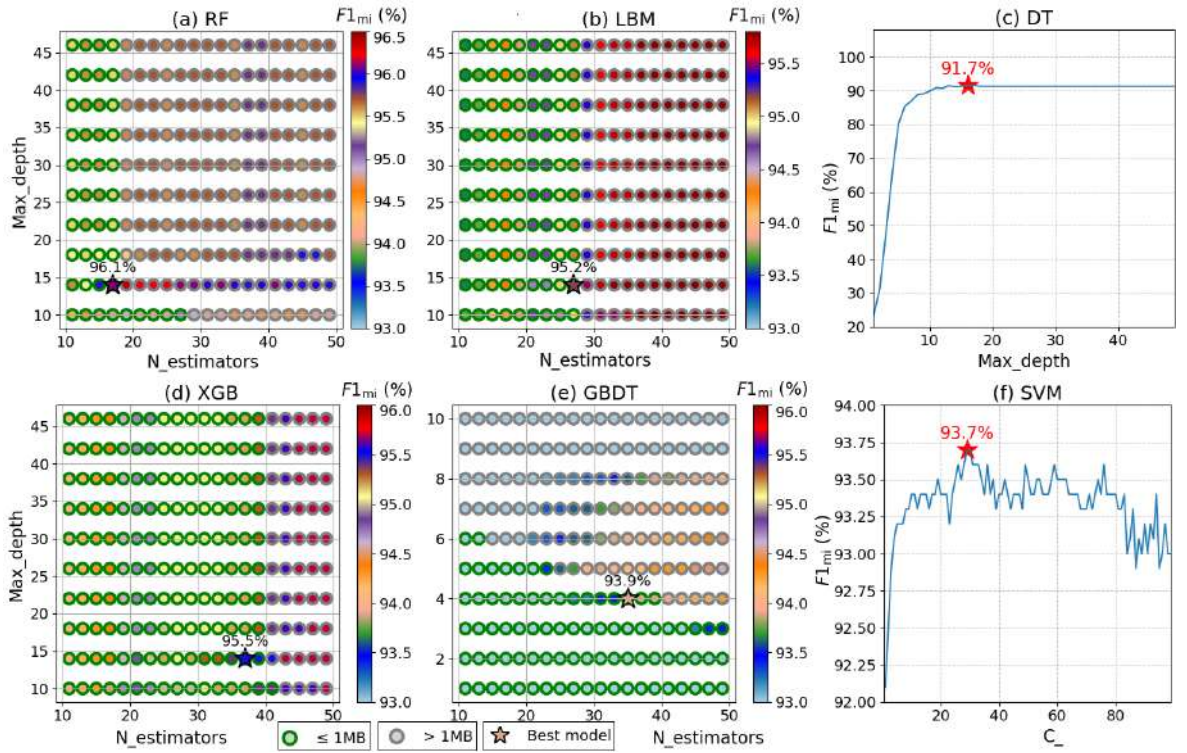
Mô hình	Siêu tham số	<i>acc</i>	<i>sen</i>	<i>spe</i>	<i>pre</i>	$F1_{mi}$	$F1_{ma}$	Kích thước	Huấn luyện	Kiểm tra
RF	$n_estimators = 17$, $max_depth = 14$	99.3	97.0	99.6	97.1	96.1	97.0	0.921709	0.093589	0.010951
XGB	$n_estimators = 37$, $max_depth = 14$	99.2	96.4	99.5	96.6	95.5	96.5	0.938040	0.083459	0.047790
DT	$max_depth = 16$	98.5	93.3	99.1	93.6	91.7	93.5	0.056939	0.026039	0.009996
GBDT	$n_estimators = 35$, $max_depth = 4$	98.8	94.5	99.3	94.9	93.4	94.7	0.967428	21.003737	0.014934
SVM	$C_ = 29$	98.9	94.8	99.4	94.6	93.7	94.7	0.247342	21.748170	0.019596
LBM	$n_estimators = 46$, $max_depth = 22$	99.1	96.1	99.5	96.4	95.2	96.2	0.966480	0.226004	0.007965

¹ $C_$ là Tham số điều chỉnh mức phạt cho SVM.

² Đơn vị: % cho *acc*, *sen*, *spe*, *pre*, $F1_{mi}$, $F1_{ma}$; thời gian huấn luyện/kiểm tra: giây; kích thước mô hình: MB

Như thể hiện trong Hình 2.8, các tham số của từng thuật toán cần được giới hạn hợp lý để đảm bảo mô hình ML có kích thước dưới 1 MB. Mô hình XGB (Hình 2.8-d) phù hợp hơn với dải cấu hình rộng, trong đó max_depth : 1 – 50 và

$n_estimators$: 1 – 40, tiếp theo là GBDT (Hình 2.8-e) sử dụng $n_estimators$: 1 – 50 và max_depth nhỏ hơn 10. Ngược lại, RF (Hình 2.8-a) và LBM (Hình 2.8-b) có phạm vi điều chỉnh tham số nhỏ hơn để đáp ứng ràng buộc về bộ nhớ. Với các tham số tối ưu tìm được, RF, XGB và LBM đạt được giá trị $F1_{mi}$ trên 95%, cao hơn so với các mô hình còn lại. DT (Hình 2.8-c) và SVM (Hình 2.8-f) có độ phức tạp thấp, gọn nhẹ hơn trong giới hạn kích thước đều nhỏ hơn 1 MB, nhưng điểm $F1_{mi}$ chỉ đạt hơn 93%, kém so với RF (96.1%), XGB (95.5%) và LBM (95.2%).



Hình 2.8: $F1_{mi}$ và kích thước mô hình: (a) RF, (b) LBM, (c) DT, (d) XGB, (e) GBDT, và (f) SVM thay đổi trong quá trình điều chỉnh siêu tham số.

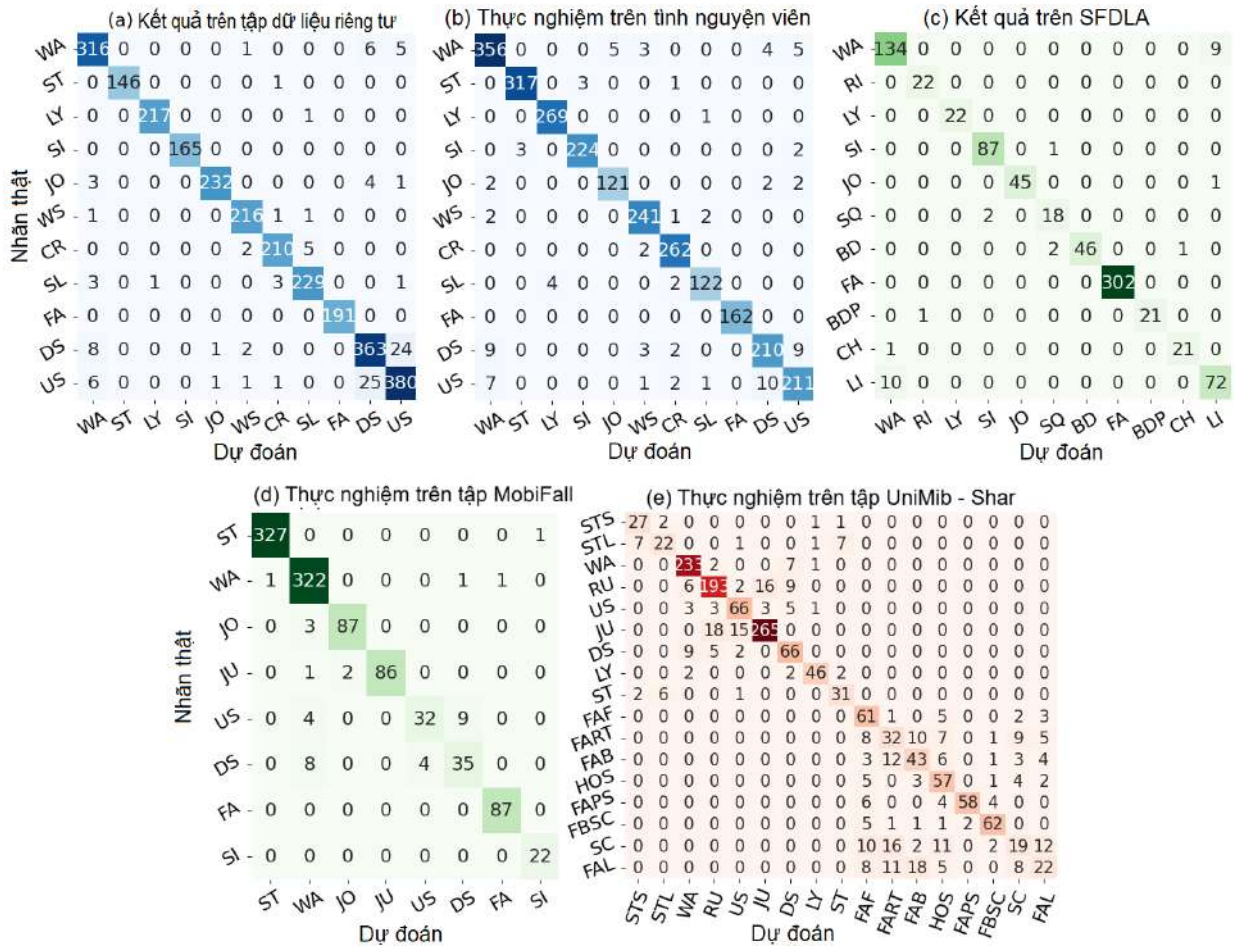
Dưới các ràng buộc về bộ nhớ, mô hình RF thể hiện sự cân bằng tốt giữa độ chính xác cao, kích thước mô hình và tốc độ xử lý. Với $n_estimators = 17$ và $max_depth = 14$, mô hình chỉ chiếm 0.921709 MB nhưng đạt được $acc = 99.3\%$ và trên 96% ở tất cả các chỉ số còn lại. Ngoài ra, RF còn có tốc độ xử lý nhanh, với thời gian huấn luyện là 0.093589 s trên 4171 cửa sổ dữ liệu (huấn luyện) và thời gian suy luận là 0.010951 s trên 2774 cửa sổ (kiểm thử), tương ứng khoảng $3.95 \mu s$ cho mỗi lần dự đoán. So sánh với các mô hình khác như XGB ($n_estimators = 37$, $max_depth = 14$, 0.939840 MB) và LBM ($n_estimators = 46$, $max_depth = 22$, 0.966480 MB), các mô hình này đạt độ chính xác tương đương trên 99% nhưng yêu cầu nhiều cây hơn và thời gian huấn luyện dài hơn (XGB: 0.803459 s, LBM: 0.226004 s). Mặc dù DT đạt thời gian suy luận ngắn nhất (0.000996 s) với kích

thước mô hình nhỏ (0.056939 MB), nhưng $F1_{mi}$ chỉ duy trì ở mức trên 91%.

Hình 2.9-a minh họa ma trận nhầm lẫn trên tập dữ liệu riêng. Mô hình RF đã nhận dạng đúng hầu hết các hành động, chẳng hạn như WA (316/321), ST (146/148), LY (217/219), SI (165/166) và JO (232/235), phản ánh khả năng phân tách rõ ràng trong các mẫu tín hiệu của chúng. Tuy nhiên, vẫn xuất hiện một số nhầm lẫn đáng kể giữa các hành động di chuyển có đặc điểm tương tự. Cụ thể, 24 mẫu DS bị phân loại nhầm thành US, và 5 mẫu WA bị phân loại nhầm thành US. Những sai lệch này có thể xuất phát từ sự chồng chéo của đặc trưng chuyển động trong quá trình thay đổi độ cao hoặc chuyển tư thế, khi các mẫu gia tốc có dạng tương tự nhau. Chẳng hạn, $DS \leftrightarrow US$ và $WS \leftrightarrow WA$ liên quan đến các hành động có kiểu dáng bước đi tương đồng nhưng khác nhau về cường độ hoặc hướng di chuyển. Các hành động CR và SL nhìn chung được nhận dạng chính xác, tuy nhiên vẫn có một chút nhầm lẫn với các hành động có tốc độ thấp hoặc mang tính chuyển tiếp như WS và LY. Nguyên nhân có thể là do biến thiên tín hiệu hoặc độ dài cửa sổ dữ liệu ngắn. Ngược lại, các tư thế tĩnh như ST và LY được nhận dạng với độ chính xác cao do có ít biến thiên trong cùng một lớp. Hầu hết các lỗi phân loại xảy ra giữa các cặp hành động có mẫu chuyển động tương tự nhau.

Bảng 2.6 tóm tắt các chỉ số đánh giá hiệu suất của mô hình đề xuất khi nhận dạng 11 hành động, được đánh giá dựa trên tập dữ liệu riêng và các thí nghiệm thời gian thực. Trên tập dữ liệu riêng (Bảng 2.6-a), các hành động được nhận dạng với hiệu suất cao và ổn định qua các chỉ số đánh giá, chỉ có sai khác nhỏ giữa các hành động. Các hành động khác như LY, SL, JO, CR và WA cũng đạt giá trị cao, với hầu hết các chỉ số vượt quá 95%. Ngược lại, US và DS cho kết quả tương đối thấp hơn; cụ thể, US đạt $sen = 91.8\%$ và $F1 = 92.1\%$, trong khi DS đạt $sen = 91.3\%$ và $F1 = 91.2\%$. Tuy nhiên, các chỉ số acc và spe của chúng vẫn duy trì trên 97%.

So sánh chi tiết giữa các mô hình sau khi điều chỉnh siêu tham số được trình bày trong Bảng 2.5. Mô hình RF đạt giá trị cao trên tất cả các chỉ số đánh giá, với acc đạt 99.3% và các chỉ số sen , spe , pre , $F1_{mi}$, $F1_{ma}$ đều xấp xỉ 97%. Về chỉ số acc , các mô hình đều đạt trên 99%, cho thấy các đặc trưng được trích xuất có khả năng phân biệt rõ ràng giữa các hành động. Xét theo sen , mô hình RF ghi nhận giá trị cao nhất (97 – 97.2%), tiếp theo là XGB và LBM (khoảng 96.6%). Hai mô hình DT và SVM có sen thấp hơn một chút (95.4 – 95.9%), điều này có thể ảnh hưởng đến khả năng phát hiện các hành động ít đặc trưng hơn. Về spe , các mô hình đều đạt mức cao trong khoảng 99.4% đến 99.6%, cho thấy khả năng loại bỏ chính xác các trường hợp âm tính. Đối với pre , RF đạt 97.1%, trong khi



Hình 2.9: Ma trận nhầm lẫn tổng hợp các kết quả nhận dạng trên (a) tập dữ liệu riêng tư, (b) thử nghiệm với dữ liệu thời gian thực trên tình nguyện viên, (c) SFDLA, (d) MobiFall, và (e) UniMiB.

XGB và LBM duy trì kết quả tương đương ở mức 96.6%. DT và SVM đạt *pre* trong khoảng (95.4–95.5%), cho thấy tỷ lệ dương tính giả cao hơn một chút.

Nhìn chung, tất cả các mô hình đều thể hiện hiệu suất ổn định trên các điều kiện đánh giá khác nhau, được phản ánh qua kết quả nhất quán trên mọi chỉ số. RF duy trì điểm số cân bằng hơn các mô hình còn lại, trong khi XGB và LBM cũng đạt kết quả ổn định và tương đương. Mặc dù DT, GBDT và SVM cho các chỉ số thấp hơn tương đối, nhưng kết quả của chúng khá đồng đều, không có biến động đáng kể. Sự ổn định trong cả hai phương thức đánh giá cho thấy các mô hình có khả năng tổng quát hóa tốt, không xuất hiện dấu hiệu quá khớp (overfitting).

Bảng 2.6: Các chỉ số đánh giá đạt được khi trên (a) tập dữ liệu riêng và (b) thực nghiệm diễn tập.

Dữ liệu	Hành động	acc (%)	sen (%)	spe (%)	pre (%)	$F1$ (%)
(a) Dữ liệu riêng tư	WA	98.8	96.3	99.1	93.8	95.0
	ST	100	99.3	100	100	99.7
	LY	99.9	99.5	100	99.5	99.5
	SI	99.6	100	99.8	100	100
	JO	99.6	96.7	99.9	99.1	97.9
	WS	99.7	98.6	99.6	97.3	98.0
	CR	99.5	96.8	99.8	97.2	97.0
	SL	99.5	96.6	99.7	97.0	96.8
	FA	100	100	100	100	100
	DS	97.5	91.2	98.5	91.2	91.2
	US	97.7	91.8	98.7	92.5	92.1
Tổng thể		99.2 ± 0.9	96.9 ± 3.0	99.5 ± 0.6	96.8 ± 3.2	96.7 ± 2.6
(b) Diễn tập	WA	98.6	95.4	99.1	94.7	95.1
	ST	99.7	98.8	99.9	99.1	98.9
	LY	99.8	99.6	99.8	98.5	99.1
	SI	99.7	97.8	99.9	98.7	98.2
	JO	99.6	95.3	99.8	96.0	95.7
	WS	99.5	98.0	99.6	96.4	97.2
	CR	99.6	99.2	99.7	97.0	98.1
	SL	99.6	95.3	99.8	96.8	96.1
	FA	99.5	99.6	99.7	99.6	99.5
	DS	98.5	90.1	99.3	92.9	91.5
	US	98.5	90.9	99.2	92.1	91.5
Tổng thể		99.2 ± 0.5	96.2 ± 3.4	99.6 ± 0.3	96.5 ± 2.3	96.4 ± 2.7

2.2.2. Kết quả nhận dạng trên các tập dữ liệu công khai

2.2.2.1. Đánh giá trên tập SFDLA

Đối với tập dữ liệu SFDLA, dữ liệu thu thập từ các người tham gia là nữ đã bị loại bỏ. Điều này được thực hiện tương tự với dữ liệu cảm biến từ các vị trí như đầu, cổ tay phải, đùi phải và ngực do các dữ liệu này không phù hợp hướng xây dựng mô hình nhận dạng cho thiết bị đeo tại eo. Sau quá trình lọc, tín hiệu từ cảm biến gắn ở thắt lưng được chia thành các cửa sổ 3 giây.

Hình 2.9-c trình bày ma trận nhầm lẫn trên tập dữ liệu SFDLA. Mô hình RF đạt độ chính xác cao trên hầu hết các lớp hành động. Các hành động như RI, LY và FA được phân loại chính xác trong tập kiểm thử hiện tại. Các hành động khác, bao gồm SI (87/88), JO (45/46), SQ (squatting) (18/20), BD (bending) (46/49), BDP (bending-pickup), và CH (coughing-sneezing) (21/22), cũng đạt

tỷ lệ nhận dạng cao.

WA và LI, vốn có đặc trưng chuyển động tương tự nhau, đôi khi bị nhầm lẫn lẫn nhau. Cụ thể, 9 mẫu WA bị dự đoán thành LI, và 10 mẫu LI bị dự đoán thành WA. Sự nhầm lẫn hai chiều này cho thấy hai hành động có các đặc điểm chuyển động tương đồng. Sự khác biệt của 2 hành động này có thể do kích thước các cửa sổ quan sát ngắn hoặc ngữ cảnh thu thập dữ liệu khác biệt. Một số ít lỗi nhận dạng cũng xuất hiện ở các lớp khác, ví dụ: 01 mẫu BD bị dự đoán thành CH, có thể do tư thế cúi người ngắn tương tự xuất hiện ở cả hai hành động trong một số khoảng thời gian.

Hiệu suất tổng thể của mô hình đề xuất trên tập dữ liệu SFDLA đạt được khá tốt (Bảng 2.7), với $acc = 99.4\%$, $sen = 95.7\%$, $spe = 99.6\%$, $pre = 95.9\%$, và $F1_{mi} = 96.6\%$. Các kết quả này cho thấy hầu hết các hành động đều được phát hiện chính xác, tỷ lệ dự đoán nhầm thấp. Đồng thời, sự cân bằng giữa độ nhạy và độ chính xác được duy trì giữa các hành động.

Bảng 2.7: So sánh hiệu năng mô hình RF trên các tập dữ liệu công khai

Tập dữ liệu	Kích thước (MB)	acc (%)	sen (%)	spe (%)	pre (%)	$F1_{mi}$ (%)
SFDLA	0.750984	99.4	95.7	99.6	95.9	96.6
MobiFall	0.429473	99.2	92.2	99.5	94.2	96.6
UniMiB	0.975449	97.4	72.6	98.6	72.2	78.2

2.2.2.2. Đánh giá trên tập MobiFall

Tập MobiFall bao gồm: bốn loại hành động ngã Forward-lying (FOL), Front-knees-lying (FKL), Back-sitting-chair (BSC) và Sideward-lying (SDL); cùng với chín hoạt động hằng ngày: ST, WA, JO, Jumping (JU), US, DS, SI, Car-step in (CSI) và Car-step out (CSO). Nghiên cứu này tập trung vào các đối tượng nam thực hiện nhiệm vụ cứu hộ trong toà nhà đang cháy. Do đó, một số hành động như BSC, CSI và CSO bị loại khỏi quá trình phân tích. Dữ liệu thu từ các tình nguyện viên nữ cũng không được xem xét.

Hiệu suất nhận dạng trên tập dữ liệu MobiFall được minh họa trong Hình 2.9-d, với các chỉ số đánh giá chi tiết được tóm tắt trong Bảng 2.7. Mô hình RF nhận dạng hầu hết các hành động với độ chính xác cao, như ST (327/328), WA (322/325), JO (87/90), JU (86/89), SI (22/22) và FA (87/87). Kết quả này phù hợp với các kết quả đạt được trên tập SFDLA, với ST và WA cũng cho độ chính xác cao.

Tuy nhiên, tỷ lệ nhận dạng giảm đối với các hành động có tư thế tương tự, như US (32/45) và DS (35/47). Các hành động này liên quan đến di chuyển trên cầu thang, có đặc điểm chuyển động chi dưới tương đồng với WA và JU. Sự nhầm lẫn có thể bắt nguồn từ các mẫu gia tốc chồng lấp trong quá trình leo hoặc xuống cầu thang. Ngoài ra, cũng xuất hiện các lỗi phân loại giữa US và DS, cho thấy các hành động liên quan đến thay đổi độ cao vẫn khó phân biệt khi chỉ sử dụng dữ liệu quán tính.

Hầu hết các hành động đều được phát hiện chính xác và các trường hợp nhận dạng sai được hạn chế. Tuy nhiên, việc phân biệt các hành động liên quan đến cầu thang vẫn còn nhiều thách thức. Mô hình RF đạt được $acc = 99.2\%$, $sen = 92.2\%$, $spe = 99.5\%$, $pre = 94.2\%$, và $F1_{mi} = 96.6\%$. Tổng thể, mô hình được đề xuất với các tham số tối ưu đã đạt được sự cân bằng tốt trên tập dữ liệu MobiFall.

2.2.2.3. Đánh giá trên tập UniMiB

Đối với tập dữ liệu UniMi, 17 hành động (AF17) được xem xét, bao gồm StandingUpFS (STS), StandingUpFL (STL), WA, Running (RU), US, JU, DS, LyingDownFS (LY), SittingDown (SI), FallingForw (FAF), FallingRight (FART), FallingBack (FAB), HittingObstacle (HOS), FallingWithPS (FAPS), FallingBackSC (FASC), Syncope (SC) và FallingLeft (FAL). Một thách thức lớn của tập dữ liệu này là điện thoại thông minh được đặt trong túi trước và hướng của nó thay đổi đáng kể giữa các lần thu thập dữ liệu, bao gồm cả các trường hợp thiết bị bị đảo ngược hoặc xoay, khiến việc HAR trở nên khó khăn hơn. Do đó, các hành động đã được tiền xử lý và ánh xạ về một hướng chung khi các hoạt động tương tự bắt đầu.

Các hành động này được chia thành hai nhóm chính: (1) các hoạt động sinh hoạt hàng ngày bình thường (Activities of Daily Living - ADLs), bao gồm STS, STL, WA, RU, US, JU, DS, LY và ST; và (2) nhóm các hoạt động liên quan đến ngã. Kết quả nhận dạng trên tập dữ liệu UniMiB được trình bày trong Hình 2.9-e, và các chỉ số đánh giá tương ứng được thể hiện trong Bảng 2.7. Một số hành động đạt độ chính xác nhận dạng cao, chẳng hạn như WA với 233/242 (96.3%), LY với 46/52 (88.5%), và RU với 193/229 (84.2%). Ngoài ra, các hành động chuyển tiếp như STS (27/31, 87.1%), US (66/80, 82.5%), và DS (66/82, 80.5%) cũng được nhận dạng tốt. STL là hành động khó phân loại nhất, chỉ đạt 22/38 (57.9%). Hầu hết các mẫu STL bị phân loại nhầm thành STS hoặc ST, vốn có tư thế bắt đầu hoặc kết thúc tương tự.

Ngược lại, nhóm các hành động liên quan đến ngã, bao gồm 8 lớp với tổng cộng 879 cửa sổ dữ liệu, cho thấy hiệu suất nhận dạng thấp, chỉ có 431 cửa sổ được nhận dạng chính xác. Các hành động ngã chủ yếu bị nhầm lẫn với nhau. Một số hành động như FAF (61/72, 84.7%), FAPS (58/72, 80.6%), và FBSC (62/78, 79.5%) có độ chính xác nhận dạng tương đối tốt. Tuy nhiên, các hành động khác như FART (32/79, 40.5%), FAL (22/76, 28.9%), và đặc biệt là SC (19/85, 22.4%) cho thấy độ chính xác nhận dạng thấp. Các hành động ngã này tạo ra các biến thiên gia tốc tương tự tại thời điểm va chạm, làm giảm khả năng phân tách của mô hình.

Với *sen* và *pre* chỉ đạt 71 – 72% và $F1_{mi}$ là 78.2%, mô hình gặp khó khăn trong việc nhận dạng các loại ngã khác nhau (Bảng 2.7). Khi triển khai thực nghiệm trên các tập dữ liệu SFDLA và MobiFall, mô hình đề xuất đạt tỷ lệ nhận dạng cao trên hầu hết các hành động. Trong đó, UniMiB đặt ra nhiều thách thức hơn do số lượng lớn các lớp ngã và sự tương đồng giữa chúng. Tuy nhiên, mô hình được đề xuất vẫn có khả năng phân biệt chính xác giữa các hoạt động ADLs và các hành động liên quan đến ngã, mà không nhầm lẫn các hành động ngã thành ADLs. Điều này thể hiện hiệu suất cao của mô hình đề xuất trong việc nhận dạng chính xác các trạng thái nguy hiểm như ngã.

2.3. Triển khai thiết bị và đánh giá thực nghiệm

2.3.1. Hiệu chỉnh cảm biến

Để đảm bảo tính chính xác của hệ thống dùng cảm biến quán tính, quy trình hiệu chỉnh được thực hiện qua hai giai đoạn: hiệu chỉnh sai số cảm biến (nhiều) và hiệu chỉnh góc đặt điểm gốc ban đầu của thiết bị đeo.

2.3.1.1. Hiệu chỉnh sai số cảm biến

- Hiệu chỉnh độ trôi (Bias) cho con quay hồi chuyển: Cảm biến được giữ ở trạng thái hoàn toàn đứng yên trong 60 giây. Tín hiệu đầu ra trung bình trong khoảng thời gian này được ghi nhận là sai số bias tĩnh (ω_{bias}). Trong quá trình hoạt động, giá trị này sẽ được trừ trực tiếp vào tín hiệu đo được để loại bỏ thành phần trôi góc tích lũy theo thời gian: $\omega_t = \omega_{raw} - \omega_{bias}$.
- Hiệu chỉnh sai số điểm 0 cho gia tốc kế: Thiết bị được đặt cố định trên mặt phẳng thẳng bằng chuẩn. Thực hiện thu thập 1000 mẫu dữ liệu ở trạng thái tĩnh. Giá trị trung bình của các mẫu này được tính toán để xác định độ

lệch (offset) trên ba trục x, y, z . Giá trị gia tốc thực tế $a_{calib} = a_{raw} - a_{offset}$.

$$\mathbf{a}_{offset} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s[n] \quad (2.17)$$

Sau hiệu chỉnh, sai số gia tốc tĩnh giảm xuống dưới $0.02g$ và độ trôi góc trung bình giảm đáng kể, giúp ổn định dữ liệu đầu vào.

2.3.1.2. Hiệu chỉnh vị trí đặt cảm biến

Với thiết bị đeo, góc đặt của cảm biến trên cơ thể lính cứu hoả có khác biệt về thể hình (người gầy, người béo) hoặc sai số ngẫu nhiên trong quá trình thao tác. Điều này dẫn đến sự sai lệch về điểm đặt giữa thiết bị ($\{S\}$) và cơ thể (Body Frame - $\{B\}$). Để đảm bảo tính chính xác của phép đo và khả năng tổng quát của thuật toán, luận án đề xuất quy trình xác định điểm gốc và hiệu chỉnh góc đặt ban đầu dựa trên nguyên lý Gram-Schmidt, để thiết lập ma trận xoay R , đưa dữ liệu về hệ trục tọa độ tiêu chuẩn.

Khi lính cứu hoả đứng yên tại thời điểm bắt đầu ($n = 1 \dots K$), thiết bị chỉ chịu tác động của gia tốc trọng trường. Vector trọng lực đo được của cảm biến ($\vec{g}_s$) được xác định bằng giá trị trung bình của K mẫu ($K = 10$):

$$\vec{g}_s = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k \mathbf{a}_{calib}[n] = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k \begin{bmatrix} a_x[n] \\ a_y[n] \\ a_z[n] \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

với vector đơn vị hướng theo trọng lực là $\hat{g} = \frac{\vec{g}_s}{\|\vec{g}_s\|}$.

Hệ quy chiếu ứng với thân người được xác định theo hướng thẳng đứng so với mặt đất. Cụ thể, trục y ($\hat{y}_b = -\hat{g}$) hướng thẳng đứng ngược chiều trọng lực, trục x ($\hat{x}_b$) và trục z ($\hat{z}_b$) nằm trên mặt phẳng ngang song song với mặt đất. Vector $\vec{x}_{ref} = [1, 0, 0]^T$ được sử dụng để xác định mặt phẳng vuông góc. Nếu $|\hat{y}_b \cdot \vec{x}_{ref}| > 0.9$, ta chọn $\vec{x}_{ref} = [0, 1, 0]^T$. Các trục còn lại xác định như sau:

$$\hat{z}_b = \frac{\hat{y}_b \times \vec{x}_{ref}}{\|\hat{y}_b \times \vec{x}_{ref}\|}, \quad (2.19)$$

$$\hat{x}_b = \hat{z}_b \times \hat{y}_b \quad (2.20)$$

Ma trận xoay R chuyển đổi từ hệ quy chiếu dựa trên góc đặt ban đầu của cảm biến sang hệ gắn với cơ thể tình nguyện viên như sau:

$$R = [\hat{x}_b \quad \hat{y}_b \quad \hat{z}_b]^T \quad (2.21)$$

Tín hiệu gia tốc sau khi hiệu chỉnh để làm đầu vào cho mô hình nhận dạng như sau:

$$s[n] \leftarrow s_{body}[n] = R \cdot \mathbf{a}_{calib}[n] \quad (2.22)$$

Toàn bộ gia tốc trọng trường được cô lập trên trục y_b . Các trục x_b và z_b lúc này chỉ chứa các thành phần gia tốc động do lính cứu hoả di chuyển, giúp các đặc trưng như SMA (Signal Magnitude Area) phản ánh tốt hơn chuyển động và hạn chế nhiễu không mong muốn.

2.3.2. Thực nghiệm với các tình nguyện viên

Bảng 2.8: Tổng hợp các kịch bản thử nghiệm và quy định thực hiện

Thử nghiệm	Hành động	Mô tả	Quy trình thực hiện
Di chuyển	WA, JO, WS	- Địa điểm: Hành lang dài và sân tập. - Điều kiện: Di chuyển với tốc độ tự nhiên. Thực hiện chuyển đổi giữa chạy (khi tiếp cận) và đi khom (có khối).	Tối thiểu 2 lần cho mỗi phiên thử nghiệm để thu thập đủ biến thiên đáng đi.
Tìm kiếm trong phòng	CR, SL, SI, ST	- Địa điểm: Phòng kín có bố trí vật cản. - Điều kiện: TNV thực hiện bò/trườn qua chướng ngại vật trong không gian hẹp và đứng/ngồi nghỉ xen kẽ.	Đứng → Bò → Trườn → Ngồi → Đứng.
Di chuyển cầu thang	US, DS	- Địa điểm: Cầu thang bộ nhà cao tầng. - Điều kiện: Di chuyển liên tục qua tối thiểu 3 tầng lầu.	Duy trì tốc độ ổn định, không dừng lại giữa chừng.
Sự cố tai nạn	FA, LY	- Địa điểm: Trên đệm bảo hộ hoặc sàn tập. - Điều kiện: Thực hiện các kiểu ngã nguy hiểm.	Duy trì nằm bất động trong ít nhất 3 giây sau mỗi lần ngã.

Để đánh giá tính ổn định của hệ thống trong điều kiện vận hành thực tế, các thử nghiệm được thiết kế dựa trên các kịch bản mô phỏng quy trình cứu nạn tiêu chuẩn. Dữ liệu được ghi nhận trong quá trình thực hiện chuỗi hành động liên tục, thay vì các hành động rời rạc, nhằm kiểm tra khả năng phân loại của mô hình tại các điểm chuyển tiếp hành động. Các hành động được chia thành 4 loại thử nghiệm như trong Bảng 2.8, tương ứng với các giai đoạn khác nhau của một nhiệm vụ cứu hộ.

Trong quá trình diễn tập cứu hộ cứu nạn, các tình nguyện viên đã thực hiện các hành động trong nhiều điều kiện khác nhau và lặp lại mỗi hành động nhiều lần (Hình 2.10). Kết quả nhận dạng được trình bày trong Hình 2.9-b, cùng với

các chỉ số đánh giá được tóm tắt trong Bảng 2.6-b. Ngoài ra, một video minh họa¹ được thực hiện để trình bày khả năng nhận dạng thời gian thực của mô hình được đề xuất sau khi triển khai trên vi điều khiển. Một số hành động có thể xuất hiện độ trễ hiển thị nhẹ do lỗi truyền và nhận tín hiệu.



Hình 2.10: Thực nghiệm quá trình mô phỏng diễn tập khi xảy ra sự cố khẩn cấp.

Hiệu suất nhận dạng thời gian thực trong quá trình diễn tập được trình bày trong Bảng 2.6 và Hình 2.9-b. Mô hình đề xuất đạt $acc = 99.4\%$, $sen = 96.4\%$, $spe = 99.6\%$, $pre = 96.6\%$, và $F1 = 96.2\%$. Hành động FA được nhận dạng chính xác cao trong 162 cửa sổ dữ liệu, đạt trên 99%. Các hành động như ST (317/320), LY (269/270), SI (224/229), WS (241/246), JO (121/127), CR (262/264) và SL (122/128) cũng đạt độ chính xác cao. Tất cả các chỉ số đều trên 95%. Ngược lại, WA có 17 trường hợp phân loại sai, chủ yếu bị nhầm với JO, WS, DS hoặc US. DS và US cũng có lần lượt 23 và 21 dự đoán sai. Cụ thể, 23/233 DS và 21/232 US bị nhận dạng nhầm. Đáng chú ý, DS và US ghi nhận các chỉ số sen , pre và $F1$ chỉ trên 90%. Sự suy giảm hiệu suất đối với WA, DS và US có thể bắt nguồn từ sự tương đồng về tư thế giữa các hành động này, gây khó khăn cho việc phân loại chính xác trong thời gian thực khi sử dụng cửa sổ ngắn. Tuy nhiên, số lượng lỗi phân loại tương đối nhỏ và vẫn được xem là chấp nhận được. Các hành động chuyển tư thế và hành động tĩnh được nhận dạng ổn định.

Nhìn chung, mô hình nhúng chạy trên vi điều khiển đạt được kết quả tương tự với mô hình được kiểm thử trên tập dữ liệu riêng. Cả hai mô hình có sự chênh lệch nhỏ các chỉ số acc , sen , spe , pre , và $F1_{mi}$ khoảng 1%. Cụ thể, mô hình được kiểm thử trên tập dữ liệu riêng đạt $acc = 99.3\%$ và $F1_{mi} = 96.1\%$, trong khi thí nghiệm thời gian thực đạt $acc = 99.4\%$ và $F1_{mi} = 96.2\%$. Sự khác biệt nhỏ cũng được ghi nhận ở các chỉ số sen (95.9% và 96.4%) và pre (96.4% và 96.6%). Sự khác biệt không đáng kể giữa các thử nghiệm cho thấy hiệu suất nhận dạng của mô hình đề xuất ổn định khi mô hình được áp dụng trong điều kiện thực tế. Kết quả này có được là nhờ việc sử dụng thuật toán phát hiện bất thường, giúp mô

¹<https://youtu.be/S4hAzgEo-NA> (Accessed: 14:00 12/12/2025)

hình đề xuất xử lý hiệu quả hơn các giai đoạn chuyển tư thế, từ đó giảm nhiều trong chuỗi hành động thực tế. Ngoài ra, việc tuyển chọn các tình nguyện viên có thể trạng cân đối tương tự lính cứu hoả, giúp giảm thiểu đáng kể sự thay đổi về hướng của cảm biến trong quá trình thu thập dữ liệu.

2.3.3. Thời gian suy luận, độ trễ và độ phức tạp tính toán

Trong nghiên cứu này, kích thước bước (bước trượt của cửa sổ) bằng với khoảng thời gian giữa hai quan sát liên tiếp, quyết định thời gian giữa các lần nhận dạng. Trong điều kiện bình thường, kích thước bước được đặt bằng kích thước cửa sổ (3 giây), do đó việc nhận dạng được thực hiện sau mỗi 3 giây nhằm giảm thiểu mức tiêu thụ năng lượng. Khi giá trị AIx vượt quá ngưỡng được xác định trước, kích thước bước được giảm xuống còn 0.5 giây để tăng tần suất nhận dạng, trong khi kích thước cửa sổ vẫn giữ nguyên ở mức 3 giây.

Bảng 2.9: Kết quả đo lường hiệu năng hệ thống qua 3 thực nghiệm.

Thông số đo lường	Đơn vị	Lần 1	Lần 2	Lần 3	Thống kê ($\mu \pm \sigma$)
Thời gian thu thập dữ liệu	μs	2980004	2980000	2980003	2980002 ± 2
Số phép tính trích xuất đặc trưng	–	84507	84507	84507	–
Thời gian trích xuất đặc trưng	μs	8858	8858	8860	8859 ± 1.2
Thời gian suy luận	μs	733	737	738	736 ± 2.6

Bảng 2.9 thống kê thời gian thực tế và thời gian tính toán trên vi điều khiển cho từng giai đoạn xử lý, bao gồm thu thập dữ liệu, trích xuất đặc trưng và nhận dạng. Với thiết bị đeo tích hợp vi điều khiển ESP32 và cảm biến gia tốc ADXL345, thời gian từ khi bắt đầu thu thập dữ liệu đến khi kết thúc và nhận dạng hành động được đánh giá khả năng nhận dạng theo thời gian thực. Trong quá trình hoạt động, cảm biến gia tốc lấy mẫu dữ liệu ba trục ở tần số 50 Hz và hệ thống thu thập 450 mẫu (150 mẫu/trục) trong mỗi cửa sổ 3 giây. Sau khi hoàn tất việc thu thập dữ liệu, quá trình trích chọn đặc trưng được thực hiện với khoảng 84507 dòng lệnh trong thời gian khoảng 8858 μs . Mô hình được đề xuất, với 140838 dòng lệnh thực thi, hoàn thành quá trình suy luận trong khoảng 733 – 738 μs . Sau bước nhận dạng, kết quả được truyền qua chuẩn giao tiếp ngoại vi nối tiếp (serial peripheral interface) ở tần số 10 MHz, chỉ mất khoảng 1.6 μs và có thể bỏ qua.

Mô hình được đề xuất này được triển khai trực tiếp trên các vi điều khiển có giới hạn về hiệu năng. Nó được cấu tạo bởi dạng mô hình RF với 17 cây quyết định, mỗi cây có độ sâu tối đa là 14, và có kích thước biên dịch khoảng 0.92 MB. Mô hình này có độ trễ nhận dạng khoảng 9.561 – 9.596 ms trên vi điều khiển

ESP32, tốt hơn so với các nghiên cứu liên quan [24, 55, 56, 58, 94] về các ứng dụng TinyML trên vi điều khiển.

2.3.4. Các hành động quan trọng bị nhầm lẫn

Trong bối cảnh cứu hộ cứu nạn, không phải tất cả các lỗi nhận dạng đều có mức độ rủi ro như nhau. Việc phân loại nhầm giữa các hành động bình thường (ví dụ: WA và JO) ảnh hưởng không đáng kể trong việc ước lượng mức độ vận động. Tuy nhiên, sự nhầm lẫn liên quan đến các trạng thái nguy hiểm (FA và LY) mang lại hậu quả nghiêm trọng hơn nhiều, có thể dẫn đến việc bỏ sót cảnh báo cứu hộ hoặc kích hoạt báo động giả gây nhiễu loạn chỉ huy. Phân tích sâu ma trận nhầm lẫn trên tập dữ liệu riêng (Hình 2.9-a) cho thấy mô hình RF đề xuất đã kiểm soát rất tốt các rủi ro này. Cụ thể:

- **Trường hợp bỏ sót tai nạn:** Đây là trường hợp nguy hiểm nhất khi lính cứu hỏa bị ngã (FA) nhưng hệ thống lại nhận diện là hành động khác. Kết quả thực nghiệm cho thấy tỷ lệ này bằng 0% (các mẫu FA được nhận dạng đúng). Điều này đạt được nhờ cơ chế phát hiện chỉ số bất thường (AIx) hoạt động như một lớp lọc ưu tiên, giúp phát hiện các tín hiệu đột biến của cú ngã trước khi đưa vào bộ phân loại hành động thông thường.
- **Nhầm lẫn hành động LY:** Trong ngữ cảnh cứu nạn, việc cảnh báo nhầm (ngghi ngờ chiến sĩ nằm bất động) là cần thiết. Hệ thống có thể tự động phát hiện báo động giả khi họ tiếp tục di chuyển. Hành động nằm thường là chỉ dấu của chấn thương hoặc kiệt sức sau ngã. Mô hình đạt độ chính xác rất cao (99.5%) với hành động này. Các nhầm lẫn nhỏ với hành động SL được xem là chấp nhận được trong giới hạn an toàn của hệ thống giám sát thời gian thực, đảm bảo không bỏ sót các tình huống nguy hiểm.

Việc giảm thiểu tối đa các nhầm lẫn nguy hiểm giúp đảm bảo tính tin cậy của hệ thống đề xuất và mọi cảnh báo gửi về trung tâm chỉ huy đều có độ chính xác cao, hỗ trợ cho người chỉ huy xem xét ra quyết định ứng cứu kịp thời.

2.3.5. Hiệu năng mô hình đề xuất

Bảng 2.10 so sánh phương pháp được đề xuất với các nghiên cứu trước đây trên tập dữ liệu UniMiB-SHAR, dựa trên hai nhóm hành động: (a) AF17 và (b) AF2. Đối với AF17, mô hình được đề xuất đạt $acc = 97.4\%$ và $F1_{mi} = 78.2\%$, thấp hơn so với CNN-DCT [33] ($acc = 97.6\%$, $F1_{mi} = 79.7\%$) nhưng cao hơn so với CNN-TSFDU-LW [87] ($acc = 97.2\%$, $F1_{mi} = 78.6\%$). Mô hình CNN-DCT có khả năng học các đặc trưng trong miền tần số, trong khi CNN-TSFDU-LW

sử dụng khối tách đặc trưng không gian–thời gian (Temporal Spatial Feature Decoupling Uni- TSFDU) để tách riêng các đặc trưng quan trọng nhằm giảm độ phức tạp tính toán. Cả hai phương pháp đều thể hiện khả năng mạnh trong việc trích xuất đặc trưng tín hiệu của từng hành động. Tuy nhiên, sự khác biệt về độ chính xác giữa mô hình được đề xuất và hai mô hình trên là tương đối nhỏ. Mô hình đề xuất đạt được kết quả nhận dạng tốt nhờ quá trình tiền xử lý cẩn thận, giúp chuẩn hóa tín hiệu đầu vào về cùng một hệ quy chiếu. Ví dụ, các tín hiệu tương ứng với các hành động như STS, RU, WA và FA được căn chỉnh về cùng một hướng biểu thị tư thế đứng thẳng.

Bảng 2.10: So sánh hiệu suất nhận dạng của mô hình đề xuất trên tập UniMiB-SHAR.

Dữ liệu	Nghiên cứu	Acc (%)	$F1_{mi}$ (%)
(a) AF17	Mô hình đề xuất	97.4	78.2
	Xu [33]	97.6	79.7
	Teng [87]	97.2	78.6
(b) AF2	Mô hình đề xuất	100	100
	Al-qaness [95]	99.95	–
	Kanjilal [96]	99.82	98.86
	Iloga [97]	98.85	–

Mô hình được đề xuất cho thấy hiệu suất nhận dạng tốt và ổn định trên tập dữ liệu riêng, với cả hai chỉ số acc và $F1_{mi}$ đều vượt quá 96%. Đối với các tập dữ liệu công khai, MobiFall và SFDLA đạt kết quả tương đương ($F1_{mi} = 96.6\%$). Tuy nhiên, UniMiB cho kết quả thấp hơn đáng kể, với $F1_{mi} = 78.2\%$. Nguyên nhân chủ yếu xuất phát từ tính ngẫu nhiên trong định hướng của thiết bị khi thu thập dữ liệu UniMiB. Việc điện thoại được đặt tự do với nhiều góc độ khác nhau dẫn đến sự không đồng nhất về hệ trục tọa độ cảm biến, gây ra biến thiên lớn trong tín hiệu đầu vào và làm gia tăng đáng kể độ phức tạp cho quá trình phân lớp. Ngoài ra, thuật toán được đề xuất đặc biệt phù hợp cho việc nhận dạng các hành động đặc thù của lính cứu hỏa, vốn đòi hỏi thay đổi tư thế thường xuyên và có thể bao gồm cả hành động ngã. Tuy nhiên, khả năng phân biệt chi tiết giữa các loại ngã cụ thể vẫn còn hạn chế. Hơn nữa, độ ổn định của thiết bị ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất nhận dạng.

Nếu coi các hoạt động sinh hoạt hằng ngày thông thường như các trường hợp không ngã, phương pháp đề xuất có khả năng nhận dạng hành động FA đạt 100% ở các chỉ số sen , spe , acc , và GM ($GM = \sqrt{spe \times sen}$). Bảng 2.11 trình bày sự so sánh giữa phương pháp nhận dạng ngã được đề xuất và các nghiên cứu

Bảng 2.11: So sánh các mô hình phát hiện ngã cho lính cứu hoả.

Nghiên cứu	<i>sen</i> (%)	<i>spe</i> (%)	<i>acc</i> (%)	<i>GM</i> (%)
Mô hình đề xuất	100	100	100	100
Định và nhóm nghiên cứu [22]	100	98.88	99.49	99.40
Chai và nhóm nghiên cứu [29]	92.25	94.59	94.10	93.40
Thành và nhóm nghiên cứu [9]	95.89	100	97.96	95.24

trước đây. Kết quả cho thấy phương pháp này thể hiện sự cải thiện rõ rệt. Ví dụ, Thành và nhóm nghiên cứu [9] đề xuất phương pháp phát hiện ngã rất tốt với *sen* đạt 95.89%, *spe* đạt 100%, *acc* đạt 97.96%, và *GM* đạt 95.24%. Ngoài ra, kết quả từ nghiên cứu [22] cho thấy *sen* đạt 95.89%, *spe* đạt 100%, *GM* đạt 99.4% và *acc* đạt 99.49%. Mô hình đề xuất thể hiện tính vượt trội nhờ đạt được sự cân bằng tốt hơn giữa khả năng phát hiện chính xác các trường hợp ngã và giảm thiểu cảnh báo sai. Các phương pháp được đề xuất trong các nghiên cứu [9, 22] có điểm hạn chế chung là dựa vào ngưỡng tín hiệu cố định, yêu cầu hiệu chỉnh thủ công và khó thích ứng với các cá nhân có hình thể khác nhau. Trong khi đó, Chai [29] đạt hiệu suất thấp hơn với *sen* 92.25%, *spe* 94.59%, *acc* 94.1%, và *GM* là 93.4%. Nguyên nhân chính được cho là do vị trí đặt cảm biến ở ngực, làm tăng khả năng nhầm lẫn giữa các hành động FA và WS. Hạn chế này đã được khắc phục hiệu quả trong nghiên cứu này thông qua cơ chế phát hiện bất thường, giúp giảm các tín hiệu ngã giả trong quá trình chuyển tư thế hoặc thay đổi hành động

Bảng 2.12: So sánh mô hình nhận dạng ngã đề xuất với các mô hình trước đây áp dụng trên hai tập dữ liệu (a) SFDLA và (b) MobiFall.

Tập dữ liệu	Nghiên cứu	<i>sen</i> (%)	<i>spe</i> (%)	<i>acc</i> (%)	<i>GM</i> (%)
(a) SFDLA	Mô hình đề xuất	100	100	100	100
	Thành và nhóm nghiên cứu [22]	95.89	100	97.96	97.92
	Thành và nhóm nghiên cứu [9]	93.33	91.67	92.50	92.50
(b) MobiFall	Mô hình đề xuất	100	100	100	100
	Yi và nhóm nghiên cứu [37]	100	100	100	100
	Zhang và nhóm nghiên cứu [98]	100	–	99.65	–
	Thành và nhóm nghiên cứu [22]	100	98.88	99.49	99.44

Bảng 2.12 trình bày so sánh giữa mô hình phát hiện ngã được đề xuất và các phương pháp hiện có trên hai tập dữ liệu SFDLA và MobiFall. Mô hình đề xuất đạt kết quả nhận dạng ổn định trên cả ba tập dữ liệu MobiFall, SFDLA và UniMiB. Trên tập dữ liệu MobiFall, mô hình đề xuất đạt 100% ở các chỉ số *sen*, *spe*, *acc*, và *GM*, vượt trội so với các nghiên cứu trước đây như Zhang [98],

chỉ đạt 100% ở *sen*. Mặc dù cả mô hình được đề xuất và mô hình của Yi đều đạt *acc* bằng 100%, mô hình của Yi sử dụng 36 đặc trưng và kiến trúc LSTM phức tạp, tiêu tốn nhiều tài nguyên hơn đáng kể. Do đó, phương pháp được đề xuất mang lại giải pháp đơn giản và hiệu quả hơn cho các ứng dụng thực tế.

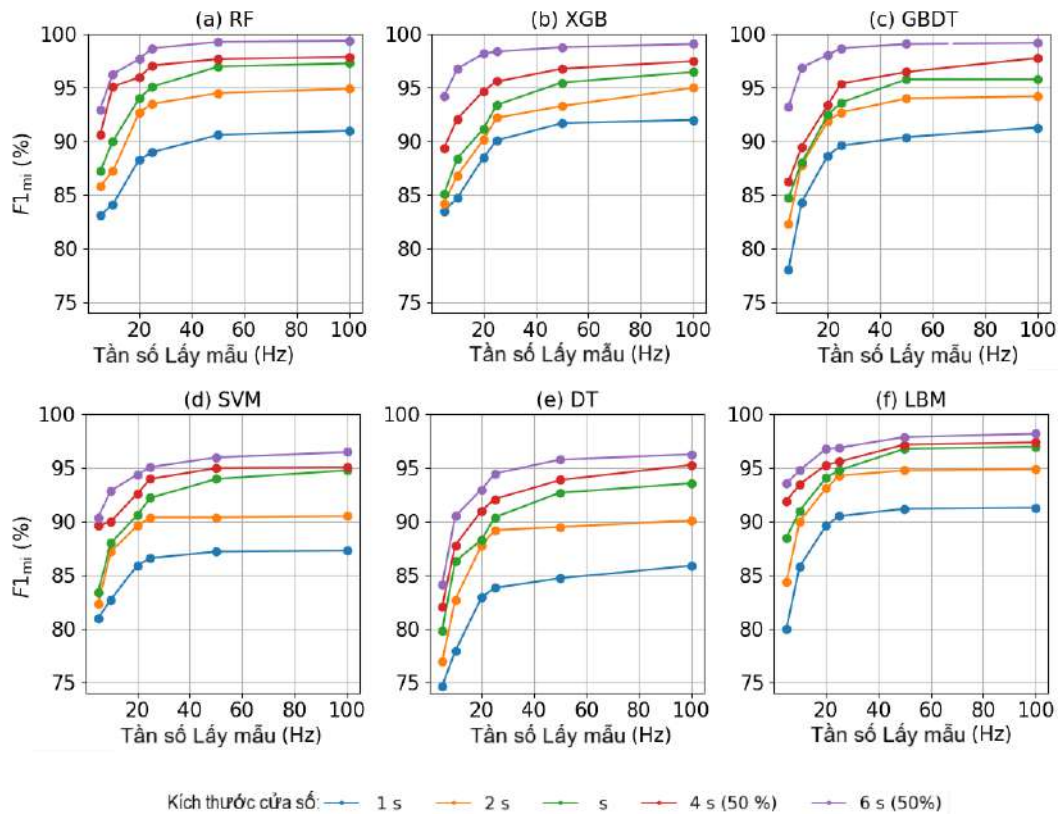
Trên tập dữ liệu SFDLA, mô hình được đề xuất cũng duy trì hiệu suất tối đa với tất cả các chỉ số đều đạt 100%, cao hơn nghiên cứu của Định [22] với *acc* đạt 97.96% và *GM* đạt 97.92%, và Thành [9] với *sen* chỉ đạt 93.33%. Sự khác biệt trong kết quả giữa hai tập dữ liệu công khai này được cho là do vị trí đặt thiết bị thu thập dữ liệu. Trong tập dữ liệu MobiFall, thiết bị được sử dụng để thu thập dữ liệu là điện thoại thông minh đặt trong túi gần thắt lưng, trong khi ở tập dữ liệu SFDLA, thiết bị được cố định chắc chắn tại vị trí thắt lưng. Điều này khiến dữ liệu SFDLA ít nhiễu hơn so với MobiFall.

Đối với AF2 (Bảng 2.10-b), phương pháp được đề xuất đạt độ chính xác nhận dạng trên 99% cho các hành động ngã nguy hiểm, nhất quán với kết quả trên các tập dữ liệu khác như SFDLA và MobiFall. Nhìn chung, các mô hình như CNN-PCNN [95], 1D-CNN [96], và mô hình Hidden Markov [97] cũng đạt độ chính xác rất cao cho các hành động ngã (trên 98%). Tuy nhiên, mô hình được đề xuất vẫn duy trì độ chính xác đáng tin cậy đồng thời tránh được việc nhầm lẫn giữa các hành động ngã và các hoạt động sinh hoạt hằng ngày (ADLs). Các mô hình này đã thể hiện khả năng mạnh mẽ trong phát hiện ngã và nhận dạng hành động, đặc biệt trong việc tự động trích xuất các đặc trưng phân biệt từ dữ liệu cảm biến gốc. Tuy nhiên, mô hình đề xuất kết hợp một quy trình xử lý giúp cải thiện độ chính xác phát hiện ngã bằng cách giảm thiểu các lỗi phân loại gây ra bởi các chuyển động trung gian hoặc mơ hồ có dạng tương tự hành động ngã trong quá trình nhận dạng hoạt động hằng ngày.

2.3.6. Cửa sổ trượt và tần số lấy mẫu

Việc lựa chọn kích thước cửa sổ và tần số lấy mẫu F_s có ảnh hưởng lớn đến quá trình trích xuất đặc trưng và tối ưu hóa hiệu suất của mô hình ML. Ảnh hưởng này đến điểm $F1_{mi}$ được minh họa trong Hình 2.11, trong đó sáu mô hình được đánh giá trên cùng một tập dữ liệu riêng. Kết quả thực nghiệm cho thấy cửa sổ 6 giây (chồng lấp 50%) khi được áp dụng cho các mô hình mang lại hiệu quả tốt và ổn định trên toàn dải tần F_s từ 20 đến 100 Hz. Các mô hình sử dụng tập đặc trưng được đề xuất đạt điểm $F1_{mi}$ trên 95% khi hoạt động ở tần số lấy mẫu từ 50 – 100 Hz với kích thước cửa sổ trong khoảng 3 – 6 giây. Mặc dù hiệu suất nhận dạng cao khi xử lý với dữ liệu lấy mẫu ở tần số 50 Hz, nhưng việc tăng tần số lấy mẫu lên 100 Hz chỉ mang lại cải thiện nhỏ, không đáng kể,

trong khi lượng tài nguyên và năng lượng tiêu thụ tăng thêm. Ví dụ, các mô hình RF, LBM, GBDT, DT, SVM và XGB chỉ tăng khoảng 0.2 – 0.3% khi thay đổi từ 50 – 100 Hz, nhưng hiệu suất nhận dạng tối đa vẫn chưa đạt được hoàn toàn. Cửa sổ 6 giây cho hiệu suất cao, với điểm $F1_{mi}$ trên 99% (ví dụ GBDT và LBM); tuy nhiên, khi giảm cửa sổ xuống 3 giây, hiệu suất giảm khoảng 2 – 3%, và nếu rút ngắn xuống 1 giây thì mức giảm mạnh lên đến 15%.



Hình 2.11: Chỉ số $F1_{mi}$ của các mô hình khi thay đổi của F_s và cửa sổ trượt.

Mặc dù cửa sổ 6 giây đạt điểm $F1_{mi}$ trên 99%, nhưng nó gây khó khăn trong việc nhận dạng các hành động của lính cứu hỏa. Nguyên nhân nếu cửa sổ kéo dài thì có thể nhiều hành động xảy ra liên tiếp trong cùng một lần quan sát. Ngược lại, các cửa sổ ngắn hơn như 1 giây và 2 giây cho thấy sự suy giảm hiệu suất đáng kể. Cửa sổ 3 giây thể hiện sự cân bằng hợp lý trong thực tế. Mặc dù điểm $F1_{mi}$ của nó thấp hơn khoảng 2 – 3% so với cửa sổ 6 giây, nhưng nó giúp giảm đáng kể vấn đề trùng lặp nhiều hành động trong cùng một lần quan sát, đồng thời giảm yêu cầu về tài nguyên khi triển khai thực tế. Bên cạnh đó, tần số lấy mẫu F_s 50 Hz cho thấy sự phù hợp so với 100 Hz trong việc giảm mức tiêu thụ năng lượng nhưng nó vẫn cho phép hệ thống đạt độ chính xác trên 95%.

2.3.7. Tối ưu hóa đặc trưng

Việc lựa chọn các đặc trưng dựa trên mức độ quan trọng của chúng đã giúp giảm bớt số lượng đặc trưng [89,90], độ phức tạp tính toán [21], và kích thước mô hình. Đồng thời, mô hình đề xuất vẫn duy trì hiệu suất cao [24]. Trong nghiên cứu này, sự kết hợp của 12 loại đặc trưng dựa trên mức độ quan trọng mang lại cái nhìn toàn diện về sự dao động và biến thiên của tín hiệu khi các hành động diễn ra, góp phần nâng cao đáng kể độ chính xác trong nhận dạng hành động. Tương tự, các nghiên cứu trước đây cũng chỉ ra rằng việc lựa chọn đặc trưng có ảnh hưởng đáng kể đến độ chính xác của các mô hình nhận dạng [28,30,34].

Bảng 2.13: So sánh hiệu quả của các đặc trưng qua mức độ quan trọng trên tập dữ liệu riêng.

Thay đổi đặc trưng	Loại đặc trưng	$F1_{mi}$ (%)
Đề xuất	12	96.1
Loại bỏ năng lượng	11	93.4 (↓2.7)
Loại bỏ độ lệch tuyệt đối trung bình	11	93.5 (↓2.6)
Loại bỏ tổng độ lớn tín hiệu	11	93.3 (↓2.8)
Loại bỏ thay đổi biên độ trung bình	11	93.0 (↓3.1)
Loại bỏ tích phân bình phương	11	93.8 (↓2.3)
Loại bỏ giá trị trung bình	11	92.6 (↓3.5)
Loại bỏ độ lệch chuẩn	11	93.0 (↓3.1)
Loại bỏ giá trị cực đại	11	93.0 (↓3.1)
Loại bỏ khoảng tứ phân vị	11	93.6 (↓2.5)
Loại bỏ độ phức tạp Hjorth	11	93.0 (↓3.1)
Loại bỏ độ lệch tuyệt đối trung vị	11	93.8 (↓2.3)
Loại bỏ khoảng giá trị (range)	11	93.2 (↓2.9)
Chai và nhóm nghiên cứu [30] đề xuất 20 đặc trưng miền thời gian và 6 đặc trưng miền tần số	26	95.6 (↓0.6)
Wang và nhóm nghiên cứu [34] đề xuất 12 đặc trưng miền thời gian và 4 đặc trưng miền tần số	16	92.9 (↓3.2)
Vì và nhóm nghiên cứu [24] đề xuất độ lệch tuyệt đối trung bình, độ lệch chuẩn, khoảng tứ phân vị, khoảng giá trị và năng lượng	5	85.7 (↓10.4)
Hong và nhóm nghiên cứu [21] đề xuất giá trị trung bình, độ lệch chuẩn, trung vị, khoảng giá trị và năng lượng	5	83.1 (↓13)

Bảng 2.13 so sánh hiệu suất $F1_{mi}$ khi thay đổi tập đặc trưng được đề xuất. Việc điều chỉnh số lượng đặc trưng so với tập đặc trưng ban đầu dẫn đến hiệu

suất kém hơn. Khi sử dụng đầy đủ 12 loại đặc trưng được đề xuất, mô hình đạt $F1_{mi} = 96.1\%$, là giá trị cao nhất trong tất cả các trường hợp. Khi loại bỏ từng loại đặc trưng riêng lẻ, giá trị $F1_{mi}$ có xu hướng giảm, cho thấy mỗi đặc trưng đều đóng góp vào hiệu suất nhận dạng. Đặc biệt, việc loại bỏ các đặc trưng như năng lượng, độ lệch tuyệt đối trung bình hoặc tổng độ lớn tín hiệu làm giảm đáng kể hiệu suất, với $F1_{mi}$ lần lượt giảm xuống còn 93.4%, 93.5%, và 93.3%. Đối với các tập đặc trưng có số lượng lớn hơn, chẳng hạn theo nghiên cứu của Chai [30] gồm 26 loại đặc trưng, đạt $F1_{mi} = 95.6\%$, trong khi tập của Wang gồm 16 loại đặc trưng [34] chỉ đạt 92.9%. Ngược lại, các tập đặc trưng có ít đặc trưng hơn trong nghiên cứu [21, 24], cho hiệu suất thấp hơn với $F1_{mi}$ lần lượt là 85.7% và 83.1%. Do đó, tập đặc trưng đề xuất mang lại sự cân bằng tốt giữa số lượng đặc trưng và hiệu suất nhận dạng.

Nhìn chung, tập đặc trưng được đề xuất đạt được sự cân bằng giữa hiệu suất phân loại và độ phức tạp tính toán, giúp nó phù hợp với các yêu cầu cụ thể của việc nhận dạng hành động của lính cứu hỏa. Trong khi một số đặc trưng bị loại bỏ sẽ giúp tăng tốc độ xử lý, giảm độ phức tạp tính toán, nhưng chúng khó có thể bù đắp được sự mất mát thông tin quan trọng. Trong bối cảnh các nhiệm vụ cứu hộ kéo dài, việc tăng số lượng đặc trưng sẽ làm tăng thời gian tính toán, ảnh hưởng tiêu cực đến hiệu suất nhận dạng khi xử lý dữ liệu thời gian thực, trong khi mức cải thiện về độ chính xác là không đáng kể, thậm chí có thể giảm xuống.

2.4. Kết luận chương 2

Chương 2 đã trình bày một hệ thống RFAR hướng đến nhận dạng hành động lính cứu hỏa theo thời gian thực dựa trên cảm biến gia tốc tại eo và vi điều khiển bị giới hạn về hiệu năng. Để giúp người chỉ huy có thể theo dõi trạng thái hiện tại các chiến sĩ để kịp thời hỗ trợ khi họ gặp nạn, luận án giải quyết các vấn đề: (i) Xây dựng bộ dữ liệu mới gồm 11 loại hành động chuyên biệt của lính cứu hỏa, khắc phục sự thiếu hụt dữ liệu trong lĩnh vực nghiên cứu này; (ii) Đề xuất thuật toán phát hiện chỉ số bất thường (AIx) kết hợp cửa sổ thời gian linh hoạt, giúp nâng cao độ chính xác nhận dạng ngã nguy hiểm và giảm thiểu báo động giả tại các điểm chuyển tiếp hành động; và (iii) Kiểm chứng hiệu năng hoạt động của hệ thống trong điều kiện thực nghiệm với điểm $F1_{mi}$ đạt trên 96% và độ trễ suy luận dưới 10 ms, nhằm chứng minh tính ứng dụng của hệ thống đề xuất.

Nội dung của chương 2 được công bố trong 3 công trình [CT1], [CT2] và [CT3]. Trong đó, công trình [CT1] đề xuất phương thức triển khai mô hình

HAR đơn giản trên vi điều khiển công suất thấp với các hành động cơ bản. Tiếp theo, công trình [CT2] đã nghiên cứu phát triển một quy trình xử lý tín hiệu tối ưu cho các vi điều khiển có hiệu năng trung bình. Hệ thống sử dụng dữ liệu cảm biến gia tốc kết hợp với mô hình RF để nhận dạng hành động cơ bản. Quy trình xử lý được thiết kế nhẹ, đảm bảo khả năng triển khai trên các thiết bị nhúng hạn chế tài nguyên mà vẫn duy trì độ chính xác cao. Tổng hợp các giải thuật đề xuất, công trình [CT3] đã mở rộng hệ thống nhận dạng 11 hành động đặc thù của lính cứu hỏa. Mô hình được tối ưu hóa cho xử lý thời gian thực, triển khai trên vi điều khiển tiêu thụ năng lượng thấp, thông qua huấn luyện mô hình RFAR trên tập dữ liệu 11 hành động do tác giả xây dựng. Ngoài ra, thiết bị đeo được thiết kế nhỏ gọn (dưới 200 g), hoạt động ổn định đến 24 giờ, và cho độ chính xác cao trên 95% khi thực nghiệm với các bộ dữ liệu công khai như SFDLA, MobiFall và UniMiB-SHAR.

Tuy nhiên, hệ thống hiện tại mới chỉ là một phần nhỏ của hệ thống định vị tổng thể và chưa tích hợp tính năng quan trọng như theo dõi vị trí. Việc bổ sung tính năng này sẽ giúp nâng cao khả năng sử dụng và hỗ trợ truyền thông tin kịp thời đến chỉ huy.

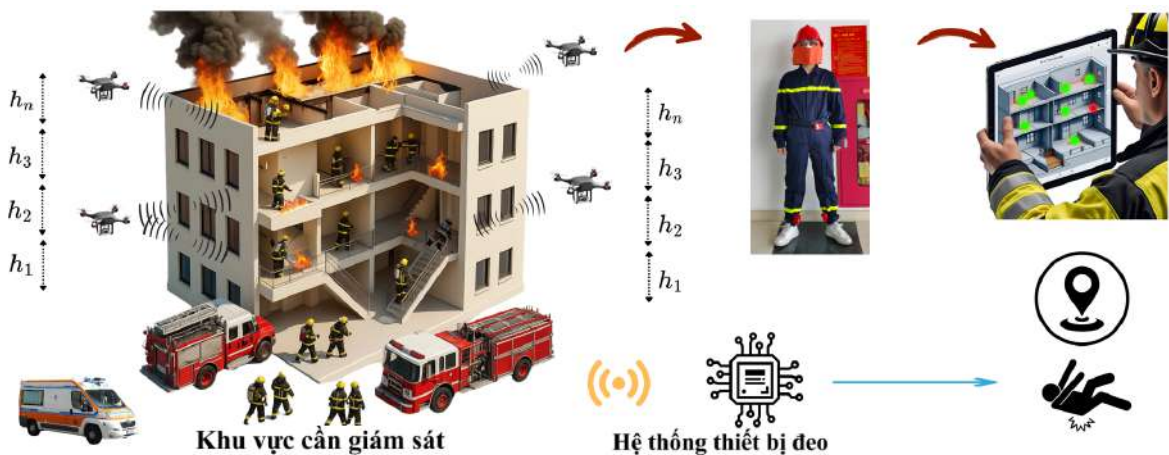
CHƯƠNG 3. PHƯƠNG PHÁP ĐỊNH VỊ TRONG NHÀ SỬ DỤNG THIẾT BỊ ĐEO

Như đã trình bày ở chương 2, dữ liệu về hoạt động của lính cứu hoả cần kết hợp với dữ liệu vị trí để cung cấp thông tin cho người chỉ huy. Ở chương 3, các vấn đề để xây dựng một hệ thống theo dõi vị trí khi người lính cứu hoả làm việc trong toà nhà sẽ được trình bày.

3.1. Giải pháp theo dõi vị trí cho lính cứu hoả

3.1.1. Mô hình hệ thống

Nghiên cứu phát triển một hệ thống theo dõi vị trí dựa trên hệ thống thiết bị đeo và máy bay không người lái (Unmanned Aerial Vehicle - UAV). Hình 3.1 đưa ra cái nhìn toàn cảnh về hệ thống lai sử dụng công nghệ UWB và kỹ thuật theo dõi vị trí 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 sử dụng công nghệ băng thông siêu rộng (UWB). Các thiết bị đeo có thiết kế nhỏ gọn với kích thước $4.8 \times 4.5 \times 4 \text{ cm}^3$, được bố trí tại vùng eo và cổ 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 3.7 V - 2000 mAh.



Hình 3.1: Mô hình hệ thống theo dõi vị trí trong nhà cho lính cứu hoả.

Nhằm xây dựng một giải pháp giúp hiệu chỉnh 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 hoả khi họ di chuyển ngoài hành lang. Mỗi mặt toà nhà sẽ có ít nhất 2 UAV bay với

độ cao và khoảng cách đến toà nhà cố định làm nhiệm vụ truyền nhận tín hiệu trung gian giữa lính cứu hoả và người chỉ huy. Các UAV này liên tục phát tín hiệu UWB vào bên trong toà nhà. Khi lính cứu hoả di chuyển đến các khu vực gần cửa sổ, ban công hoặc hành lang mở, thiết bị đeo sẽ nhận tín hiệu từ UAV để xác định vị trí tương đối. 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 chỉnh lại vị trí và giảm thiểu sai số tích lũy.

Bảng 3.1: Cấu hình phần cứng của thiết bị đeo.

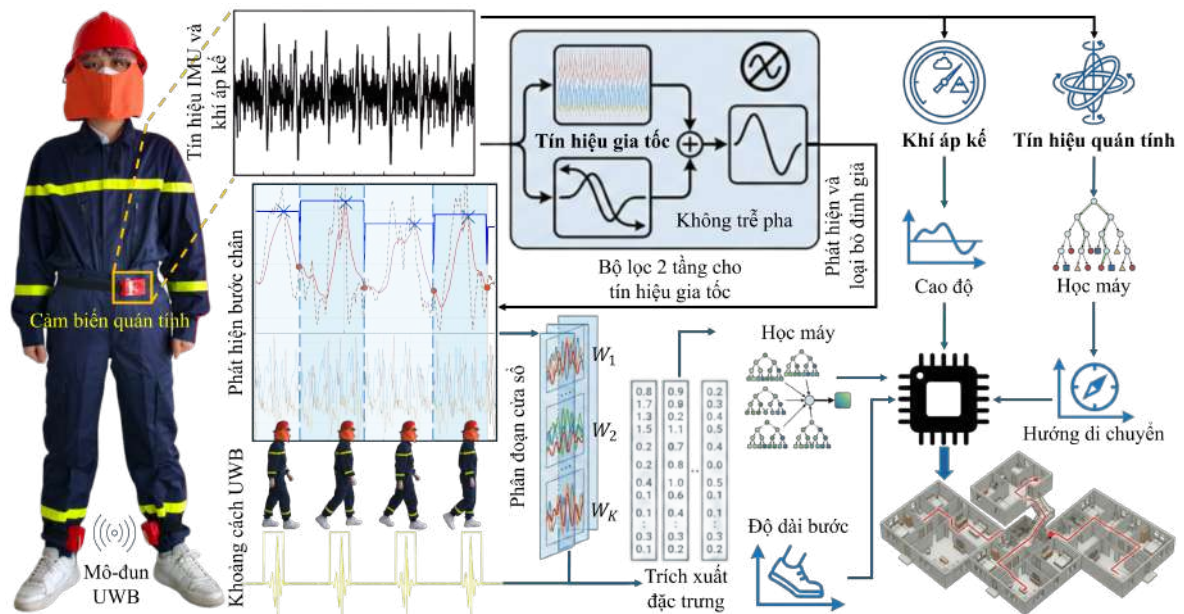
Module	Thành phần	Đặc điểm kỹ thuật
Thiết bị đeo tại chân	ADXL345	Cảm biến gia tốc 3 trục
	ITG3200	Cảm biến con quay hồi chuyển 3 trục
	DW1000	Module truyền thông và định vị UWB
	ESP32	520 KB RAM, 448 KB ROM, 4 MB flash
	Bluetooth LE	Bluetooth năng lượng thấp 2.4 GHz
	Giao tiếp Type-C	Nạp chương trình và sạc pin
	Thẻ nhớ	2 GB
	Truyền thông	433 MHz; 8 km; 2.4 Kbps
	Pin	Li-ion, 2000 mAh

Nghiên cứu này thiết kế hệ thống thiết bị đeo tại chân (Bảng 3.1) dựa trên vi điều khiển ESP32 giao tiếp module UWB qua SPI. Cảm biến IMU 9 trục và cảm biến áp suất giao tiếp vi điều khiển qua giao thức I2C. Vi điều khiển kiểm soát quá trình truyền/nhận dữ liệu thời gian thực và module UWB đảm nhiệm đo thời gian lan truyền tín hiệu (ToF) để tính khoảng cách.

Bộ điều khiển thiết lập kênh giao tiếp vật lý bao gồm: kênh 5 tương ứng với dải tần 6.5 GHz, tốc độ truyền dữ liệu 6.8 Mbps, tần số xung 64 MHz, và độ dài tiền tố (preamble length) 256 symbol. ESP32 thiết lập module hoạt động ở chế độ Tag-Anchor, với địa chỉ định danh có dạng “7D:00:22:EA:82:60:3B:9C”. Ở chế độ này, Tag chủ động khởi tạo quá trình đo khoảng cách hai chiều (Two-Way Ranging – TWR) với các Anchor cố định trong mạng. Quá trình đo dựa trên việc trao đổi tuần tự ba gói tin giữa Tag và Anchor: gói Poll, gói Response, và gói Final. Dựa vào mốc thời gian phát – nhận của các gói tin này, bộ điều khiển tự động tính toán thời gian lan truyền tín hiệu ToF, từ đó suy ra khoảng cách thực giữa hai thiết bị.

3.1.2. Các bước xử lý và triển khai

Quy trình vận hành và luân chuyển dữ liệu của hệ thống được thiết kế đảm bảo tính liên tục từ khâu thu thập tại hiện trường đến khâu giám sát tại sở chỉ huy. Cụ thể, Hình 3.2 mô tả quá trình được khởi tạo tại lớp cảm biến, nơi các thiết bị IMU và khí áp kế liên tục ghi nhận các thông số chuyển động và môi trường với tần số thực tế. Dữ liệu thô sau đó được chuyển sang giai đoạn xử lý tại biên, tại đây vi điều khiển thực hiện tính toán ba tham số vận động cốt lõi: chiều dài bước chân từ tín hiệu UWB tại cổ chân, hướng di chuyển từ cảm biến quán tính và độ cao tầng từ cảm biến khí áp. Các tham số này tiếp tục được hợp nhất nhằm tái lập quỹ đạo di chuyển ước tính (PDR) với độ chính xác cao. Cuối cùng, gói tin chứa tọa độ vị trí đã xử lý, được tích hợp cùng thông tin trạng thái sức khỏe và hành động, sẽ được đóng gói và truyền đến người chỉ huy. Tín hiệu này được tiếp nhận và chuyển tiếp bởi các nút mạng trung gian (hệ thống UAV hoặc các trạm thu phát lân cận) về máy tính trung tâm, cho phép người chỉ huy cập nhật hiện trạng của lính cứu hỏa theo thời gian thực.



Hình 3.2: Tổng quan các giai đoạn triển khai của hệ thống IPS đề xuất.

Nghiên cứu này hướng đến phát triển một hệ thống định vị IPS hoạt động thời gian thực, dựa trên kỹ thuật ước lượng vị trí người đi bộ. 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 toà nhà.

Giai đoạn khởi đầu tập trung vào việc thu nhận và làm sạch tín hiệu thô từ các cảm biến đeo trên người. Tín hiệu gia tốc thu được từ cảm biến quán tính

tại thắt lưng được đưa qua bộ lọc hai tầng, để triệt tiêu nhiễu và các thành phần tần số không mong muốn. Đặc biệt, việc áp dụng bộ lọc không trễ pha giúp bảo toàn đặc tính thời điểm của các xung lực, từ đó hỗ trợ thuật toán phát hiện và loại bỏ các đỉnh giả một cách chính xác. Kết quả của giai đoạn này là một chuỗi tín hiệu sạch, sẵn sàng cho việc nhận diện các pha vận động của bước chân.

Tiếp theo, tín hiệu được chia thành các cửa sổ dữ liệu rời rạc tương ứng với từng sải bước, đồng thời kết hợp song song với dữ liệu khoảng cách đo được từ module UWB gắn tại hai cổ chân. Trong các cửa sổ này, hệ thống sẽ ước tính chính xác độ dài sải bước thực tế, thay vì chỉ sử dụng các hằng số giả định như các phương pháp truyền thống.

Giai đoạn cuối cùng là hợp nhất đa cảm biến để tái lập vị trí trong không gian ba chiều. Song song với việc tính toán độ dài bước, dữ liệu áp suất khí quyển được xử lý kết hợp giải thuật RFAR và đếm bước để ước tính tầng trong toà nhà. Bên cạnh đó, tín hiệu vận tốc góc được qua mô hình cây quyết định để ước tính hướng di chuyển tức thời. Tất cả các tham số này gồm độ dài bước, hướng và cao độ được tập hợp tại bộ vi xử lý trung tâm để cập nhật tọa độ liên tục. Kết quả cuối cùng là một quỹ đạo di chuyển chi tiết được ánh xạ trực tiếp lên bản đồ số của toà nhà, cho phép trung tâm chỉ huy giám sát vị trí lính cứu hoả theo thời gian thực một cách chặt chẽ.

3.1.3. Hiệu chỉnh UWB

3.1.3.1. Xử lý đa đường

Công nghệ UWB có độ phân giải cao, tuy nhiên sai số đo khoảng cách vẫn xuất hiện do độ trễ ăng-ten và hiện tượng đa đường trong môi trường hẹp. Nghiên cứu tiến hành hiệu chỉnh như sau:

- Tổng độ trễ truyền dẫn tín hiệu từ vi mạch ra ăng-ten (TX/RX Antenna Delay) là nguyên nhân chính gây ra sai số tịnh tiến (offset) trong phép đo khoảng cách. Để xác định tham số này, hai thiết bị (Anchor và Tag) được đặt cách nhau một khoảng cách tham chiếu chuẩn là 1m. Giá trị độ trễ trong cấu hình phần cứng được tinh chỉnh thực nghiệm tăng/giảm cho đến khi khoảng cách đo được trên vi điều khiển trùng khớp với khoảng cách tham chiếu thực tế.
- Hiệu chỉnh trong điều kiện có vật cản: Để đánh giá và bù trừ sai số do vật cản (cơ thể người, tường), một kịch bản kiểm định được thiết lập: Đo LOS (Line-of-Sight): Đo khoảng cách trong điều kiện không vật cản ở các mốc 0.5 m, 1 m, 2 m. Đo NLOS (Non-Line-of-Sight): Đặt vật cản (tấm kim loại

hoặc người đứng chắn) giữa hai module. Kết quả: Thực nghiệm cho thấy trong điều kiện NLOS, khoảng cách đo được thường lớn hơn thực tế do tín hiệu đi vòng (phản xạ). Hệ thống áp dụng bộ lọc trung bình trượt với cửa sổ 10 mẫu để làm trơn dữ liệu và loại bỏ các giá trị đột biến gây ra bởi hiệu ứng đa đường tức thời.

3.1.3.2. Đồng bộ thời gian và kiểm tra độ trôi đồng hồ

Sự sai lệch thời gian giữa các thiết bị sẽ ảnh hưởng đến quá trình hợp nhất dữ liệu. Do đó, hệ thống sử dụng giao thức bắt tay (handshake) qua BLE khi khởi động. Thiết bị trung tâm gửi gói tin lệnh chứa dấu thời gian (t_0). Các thiết bị con khi nhận lệnh sẽ đồng bộ lại bộ đếm thời gian nội bộ. Thử nghiệm hoạt động liên tục trong 30 phút cho thấy độ lệch thời gian giữa các module nằm trong phạm vi cho phép ($< 1\text{ ms}$), nhỏ hơn chu kỳ lấy mẫu (20 ms tương ứng với tần số 50 Hz), đảm bảo tính toàn vẹn của dữ liệu khi hợp nhất.

3.1.4. Phương pháp xác định khoảng cách di chuyển

3.1.4.1. Tập dữ liệu

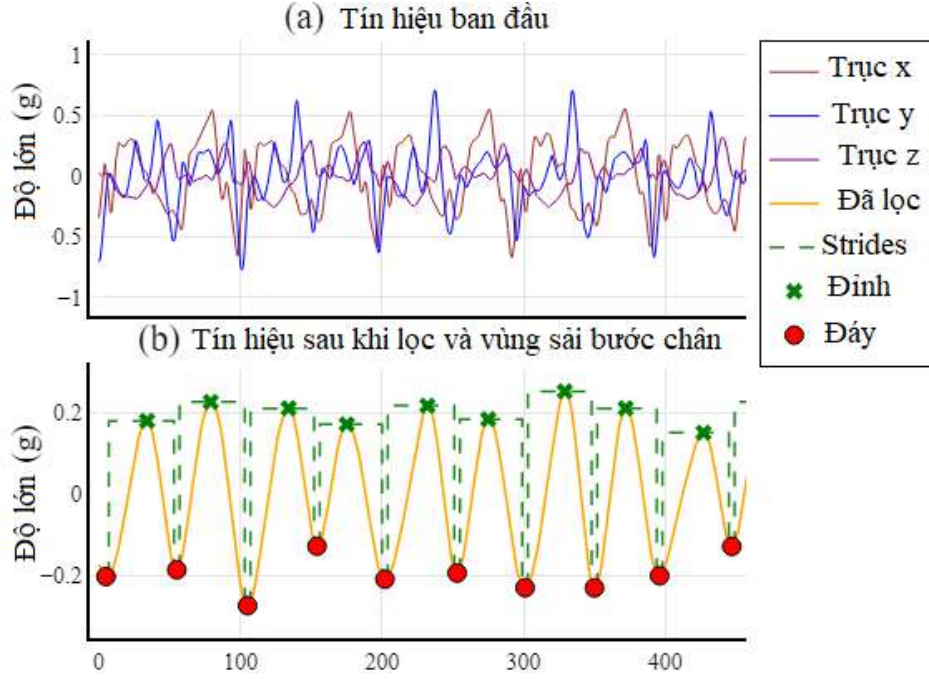
Một bộ dữ liệu về độ dài sải chân¹ đã được thu thập từ các tình nguyện viên tại Đại học Phenikaa, bao gồm 10 sinh viên nam có đặc điểm thể chất tương đồng với lính cứu hỏa. Mỗi người tham gia đeo ba thiết bị đeo tương tự và giao tiếp thông qua BLE. Hình 3.1 minh họa thiết lập hệ thống, trong đó các thiết bị gắn tại cổ chân liên tục tính toán khoảng cách giữa hai bước chân và truyền dữ liệu về một thiết bị trung tâm đeo tại thắt lưng để xử lý. Các tình nguyện viên đã di chuyển trên cùng một quãng đường theo các lộ trình được đánh dấu với độ dài bước chân dao động từ 50 cm đến 70 cm, ở cả tốc độ chậm và nhanh. Dữ liệu thu thập được bao gồm gia tốc ba trục, con quay hồi chuyển, từ trường ba trục, áp suất khí quyển và khoảng cách sải chân (100 Hz). Bộ dữ liệu này có kích thước xấp xỉ 215 MB, chứa 64556 bước chân tương ứng với 32278 sải chân, với tổng quãng đường đi bộ khoảng 38 km.

3.1.4.2. Tính toán khoảng cách di chuyển

Quá trình tiền xử lý tín hiệu được thực hiện để chuyển đổi dữ liệu gia tốc ban đầu giúp giảm nhiễu (Hình 3.3-a) và nâng cao độ chính xác trong việc nhận diện các pha chuyển động. Nghiên cứu áp dụng quy trình lọc hai tầng: i/ tầng 1 bao gồm chuyển đổi tín hiệu thô và giảm nhiễu sử dụng bộ lọc thông thấp

¹<https://doi.org/10.21227/emvz-3t63> (Accessed: 12:00 12/12/2025).

không trễ pha (Zero Phase Low-pass Filter - ZLF); ii/ tầng 2 tập trung vào việc loại bỏ đỉnh giả và phát hiện các vùng tín hiệu tương ứng với mỗi sải chân được thực hiện.



Hình 3.3: Quy trình phân đoạn tín hiệu khi thực hiện các sải bước: (a) dữ liệu gia tốc ba trục gốc; (b) tín hiệu đã lọc và các đoạn sải chân được trích.

Tầng 1 - bộ lọc thông thấp không trễ pha

Các tín hiệu gia tốc ba trục $\{a_x[i], a_y[i], a_z[i]\}$ với kích thước N , được chuyển đổi thành một chuỗi độ lớn $a[i]$ bằng cách tính toán độ lớn theo phương trình 3.1 theo đơn vị g ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$).

$$a[i] = \sqrt{a_x[i]^2 + a_y[i]^2 + a_z[i]^2} \quad (3.1)$$

Nghiên cứu áp dụng bộ lọc ZLF gồm hai giai đoạn, trong đó $k \in \{1, 2\}$ biểu thị 2 giai đoạn lọc, $a[n]$ đại diện cho đầu ra đã lọc tương ứng với tín hiệu đầu vào $a[i]$. Hàm truyền tổng quát được thiết lập theo phương trình 3.2:

$$H_k(z) = \frac{b_{0k} + b_{1k}z^{-1} + b_{2k}z^{-2}}{1 + a_{1k}z^{-1} + a_{2k}z^{-2}}, \quad (3.2)$$

các hệ số $\{b_{0k}, b_{1k}, b_{2k}\}$ và $\{a_{1k}, a_{2k}\}$ được tính toán dựa trên tần số cắt f_c , tần số lấy mẫu f_s , hệ số G_k và Q_k , cụ thể:

- $G_k = \left[1 + \frac{1}{Q_k}\eta + \eta^2\right]^{-1}$ với $\eta = \cot(\pi \cdot \frac{f_c}{f_s})$.
- Hệ số cho mỗi giai đoạn lọc: $Q_k = \frac{1}{2 \cos(\frac{(2k-1)\pi}{8})}$. Theo đó, $Q_1 = \frac{1}{2 \cos(22.5^\circ)} \approx$

0.5411961 giúp làm mượt tín hiệu tại tầng 1, trong khi $Q_2 = \frac{1}{2\cos(67.5^\circ)} \approx 1.306563$ điều chỉnh độ dốc tín hiệu sau khi lọc.

- $b_{0k} = b_{2k} = G_k$, $b_{1k} = 2G_k$.
- $a_{1k} = 2(1 - \eta^2)G_k$, $a_{2k} = \left(1 - \frac{1}{Q_k}\eta + \eta^2\right)G_k$.

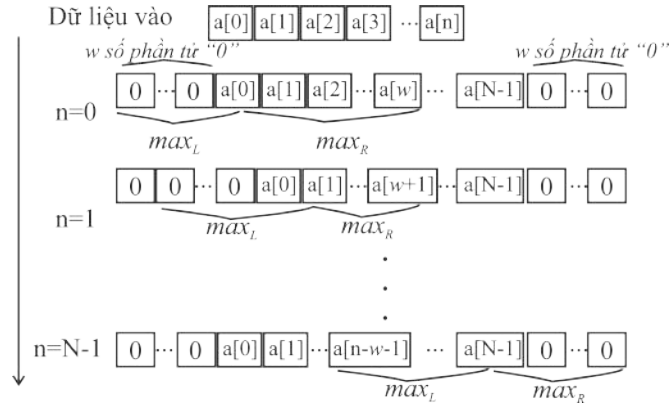
Tại giai đoạn 1, mỗi giá trị lọc thuận $y_{fwd}[i]$ được tính toán từ giá trị đầu vào $a[i]$ thông qua hai bước:

- Bước 1: $out_1[i] = b_{01}a[i] + b_{11}a[i-1] + b_{21}a[i-2] - a_{11}out_1[i-1] - a_{21}out_1[i-2]$.
- Bước 2: $y_{fwd}[i] = b_{02}out_1[i] + b_{12}out_1[i-1] + b_{22}out_1[i-2] - a_{12}y_{fwd}[i-1] - a_{22}y_{fwd}[i-2]$.

Tiếp theo, giai đoạn 2 giúp loại bỏ trễ pha. Chuỗi tín hiệu $y_{fwd}[i]$ được đảo ngược để thu được $y_{rev}[i]$ và sau đó được lọc lại một lần nữa:

- Đảo ngược lần đầu: $y_{rev}[i] = \tilde{y}_{fwd}[i] = y_{fwd}[N-1-i]$.
- Lọc ngược: Tín hiệu $y_{rev}[i]$ được xử lý tiếp thông qua hai bước tương tự như giai đoạn duyệt thuận để tạo ra chuỗi $y_{back}[i]$.
- Đảo ngược lần hai: $a[n] = \tilde{y}_{back}[i] = y_{back}[N-1-i]$.

Tầng 2 - loại bỏ cực trị giả và xác định vùng tín hiệu bước chân



Hình 3.4: Cặp cửa sổ trượt được ghép vào 2 đầu tín hiệu có kích thước tương đương 20-25 mẫu.

Tầng xử lý dữ liệu tiếp theo trong giai đoạn tiền xử lý được mô tả trong Thuật toán 1. Tầng này nhằm xác định các vùng tín hiệu đặc trưng cho chuyển động trong một bước chân, đồng thời loại bỏ cực trị có thể là bước giả. Các đỉnh giả sẽ gây ảnh hưởng lớn đến độ chính xác của kết quả phát hiện số bước chân trong nghiên cứu. Với phương pháp này, các đỉnh thật sẽ được xác định bằng cách sử dụng một cặp cửa sổ trượt có cùng kích thước ở cả 2 bên của điểm dữ

liệu (Hình 3.4). Một giá trị $a[n]$ được xác định là một đỉnh thật nếu nó vượt qua trung bình cộng của hai giá trị lớn nhất trong các cửa sổ lân cận trái và phải có kích thước w : $a[n] > \frac{\max(a[n-w:n-1]) + \max(a[n+1:n+w])}{2}$, đồng thời thoả mãn các ràng buộc về khoảng cách đỉnh tối thiểu (Δ_{th}) và chiều cao đỉnh tối thiểu (H_{min}).

Khi bước chân trở nên chậm hơn và kém ổn định, cơ chế cửa sổ trượt thích nghi thay vì cố định. Kích thước cửa sổ sẽ tự động điều chỉnh dựa trên tần số bước chân đo được ở các nhịp trước đó. Cụ thể, khi phát hiện tần số bước giảm (do mệt), cửa sổ sẽ tự động mở rộng độ rộng (thời gian) để đảm bảo thu nhận trọn vẹn chu kỳ bước chân, tránh việc bỏ sót tín hiệu hoặc tính toán sai thời điểm chạm đất. Hình 3.5 thể hiện sự bố trí thiết bị gắn ở cổ chân có nhiệm vụ tính toán liên tục khoảng cách giữa 2 bước chân và truyền về thiết bị trung tâm gắn tại eo để xử lý.

Thuật toán 1: Loại bỏ đỉnh giả và trích xuất cửa sổ chứa sai bước

Input: $a[n]$, khoảng tối thiểu giữa 2 đỉnh Δ_{th} , chiều cao tối thiểu H_{min} , kích thước cửa sổ w

Output: Tập cửa sổ chứa phân vùng tín hiệu của từng sai bước $\mathbf{W} = \{W_1, W_2, \dots, W_K\}$

Giai đoạn 1: phát hiện đỉnh thật thông qua các ràng buộc thời gian, khoảng cách và chiều cao đỉnh; Khởi tạo mảng dữ liệu chứa vị trí các đỉnh $P \leftarrow \emptyset$;

```
for  $n = w + 1$  to  $N - w$  do
     $max_L \leftarrow \max(a[n - w : n - 1])$ ;
     $max_R \leftarrow \max(a[n + 1 : n + w])$ ;
     $\tau_{peak} \leftarrow (max_L + max_R) / 2$ ;
    // Xác thực đỉnh
    if  $a[n] > \tau_{peak}$  and  $a[n] > H_{min}$  then
        if  $P = \emptyset$  or  $(n - last(P)) > \Delta_{th}$  then
             $P \leftarrow P \cup \{n\}$ ;
```

Giai đoạn 2: Loại bỏ cực trị giả thông qua xác định đáy 2 bên cực trị; các tập hợp chứa vị trí đáy bên trái và bên phải tương ứng $V_L \leftarrow \emptyset$, $V_R \leftarrow \emptyset$;

```
for  $i = 0$  to  $|P| - 1$  do
     $\mathcal{R}_L = [P_{i-1}, P_i]$ ,  $\mathcal{R}_R = [P_i, P_{i+1}]$ ;
    // Phát hiện đáy bên trái
     $v_L \leftarrow \arg \min_{j \in \mathcal{R}_L} a[j]$ ;
     $\tau_{vL} \leftarrow (\min(a[v_L - w : v_L - 1]) + \min(a[v_L + 1 : v_L + w])) / 2$ ;
    if  $a[v_L] < \tau_{vL}$  then
         $V_{L,i} \leftarrow v_L$ ;
    // Phát hiện đáy bên phải
     $v_R \leftarrow \arg \min_{j \in \mathcal{R}_R} a[j]$ ;
     $\tau_{vR} \leftarrow (\min(a[v_R - w : v_R - 1]) + \min(a[v_R + 1 : v_R + w])) / 2$ ;
    if  $a[v_R] < \tau_{vR}$  then
         $V_{R,i} \leftarrow v_R$ ;
```

Giai đoạn 3: Trích xuất vùng tín hiệu sai bước (window);

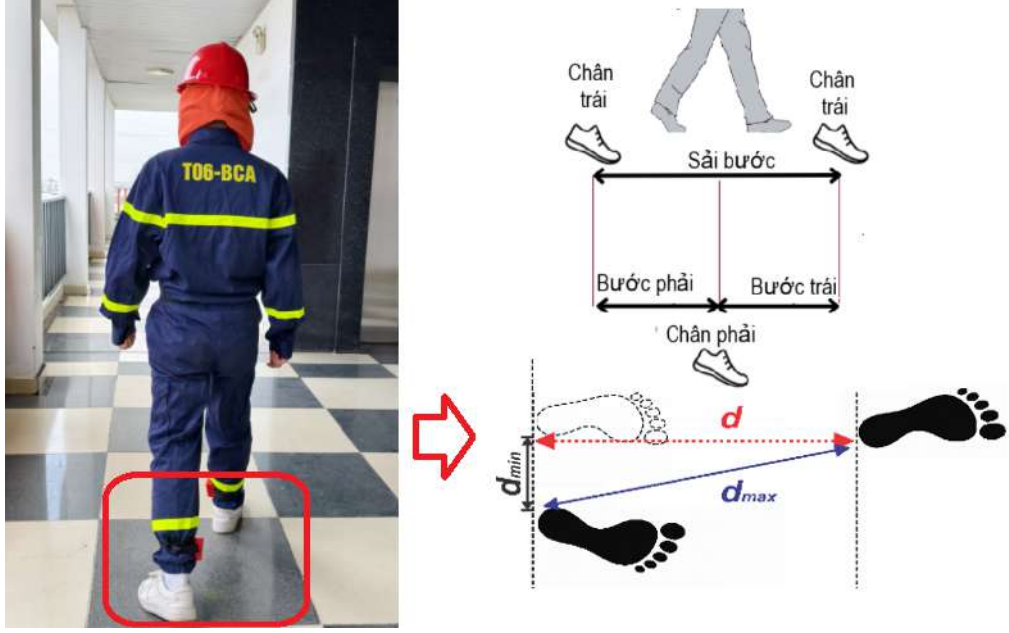
Khởi tạo $\mathbf{W} \leftarrow \emptyset$;

```
for  $i = 0$  to  $|P| - 1$  do
    // Đáy-Đỉnh-Đáy (VPV)
     $W_i \leftarrow a[V_{L,i} : V_{R,i}]$ ;
     $\mathbf{W} \leftarrow \mathbf{W} \cup \{W_i\}$ ;
```

return $\mathbf{W}$

Quy trình đo khoảng cách giữa Tag và Anchor dựa trên phương pháp **Two-Way Ranging (TWR)** với ba gói tin chính:

1. **Poll:** Tag phát tín hiệu yêu cầu đo đến Anchor và ghi lại thời điểm phát t_1 ;
2. **Response:** Anchor phản hồi lại yêu cầu tại thời điểm t_3 , sau khi nhận tín



Hình 3.5: Tính toán khoảng cách di chuyển dựa trên công nghệ UWB.

hiệu vào lúc t_2 ;

3. **Final:** Tag phát gói cuối cùng chứa thông tin thời gian để Anchor có thể hoàn tất phép tính.

Bộ điều khiển ESP32 sẽ lấy dữ liệu thời gian từ thanh ghi thời gian của module UWB và thực hiện phép tính thời gian lan truyền tín hiệu t_{ToF} như sau:

$$t_{ToF} = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2} \quad (3.3)$$

$$d_{Tag,Anchor} = c \times t_{ToF} \quad (3.4)$$

trong đó $c = 3 \times 10^8$ m/s là vận tốc ánh sáng trong không khí.

Toàn bộ phép đo và tính toán được thực hiện trực tiếp trên ESP32 bằng số thực `double`. Để đảm bảo tính ổn định, ESP32 thực hiện trung bình N lần đo liên tiếp trong một chu kỳ và áp dụng bộ lọc trung bình trượt:

$$\bar{d}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} d_{k-i} \quad (3.5)$$

Trong mô hình đề xuất, hệ thống sử dụng Anchor và Tag gắn trên lần lượt trên cổ chân của lính cứu hỏa. Tag hoạt động chủ động trong quá trình đo, khởi tạo phép đo hai chiều với Anchor để xác định khoảng cách thay đổi theo thời gian khi người di chuyển. Hình 3.5 biểu diễn cách xác định khoảng cách di

chuyển tương đương độ dài bước chân đơn lẻ. 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 $d_{\max}$. Hai trạng thái này tạo thành hình học của một tam giác, trong đó:

- Cạnh huyền là $d_{\max}$ (khoảng cách cực đại giữa hai chân).
- Cạnh đáy là $d_{\min}$ (khoảng cách khi hai chân song song).
- Cạnh vuông góc còn lại chính là **độ dài bước chân thực tế d** .

Áp dụng định lý Pythagoras, ta có:

$$d = \sqrt{d_{\max}^2 - d_{\min}^2} \quad (3.6)$$

Thuật toán 2 mô tả quy trình tính toán độ dài bước chân và quãng đường di chuyển dựa trên cấu hình Tag–Anchor gắn trên hai cổ chân. Trong cấu hình này, hai thiết bị đeo tích hợp UWB liên tục trao đổi các gói *Poll–Response–Final* để xác định khoảng cách tương đối d giữa hai chân theo thời gian thực.

Thuật toán 2: Thuật toán tính bước chân Tag–Anchor trên ESP32

Input: Các dấu thời gian t_1, t_2, t_3, t_4 thu được từ hai module UWB

Output: Tổng quãng đường d_{total} của đối tượng di chuyển

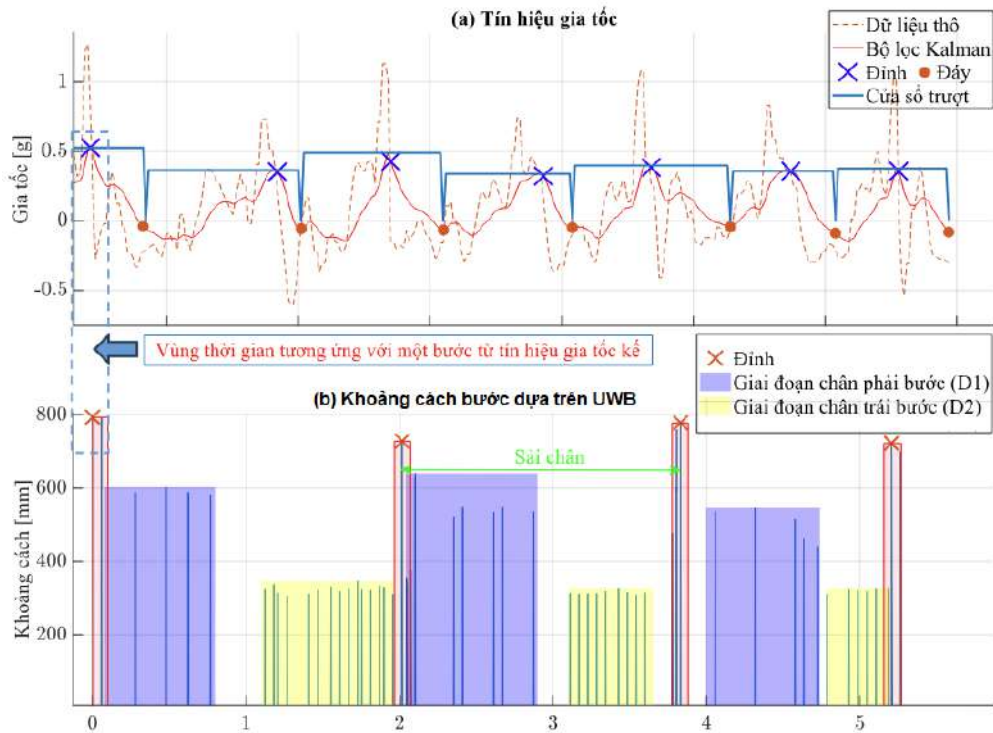
Khởi tạo: $d_{prev} = 0$, $d_{max} = 0$, $d_{min} = +\infty$, $d_{total} = 0$;

```

while (true) do
    // Bước 1: Đọc dấu thời gian từ UWB
    Đọc ( $t_1, t_2, t_3, t_4$ ) từ hai module Tag–Anchor;
    // Bước 2: Tính thời gian lan truyền
     $t_{prop} = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2.0}$ ;
    // Bước 3: Tính khoảng cách tức thời
     $d = c \times t_{prop}$ , với  $c$  là tốc độ ánh sáng;
    // Bước 4: Lọc nhiễu bằng trung bình trượt
     $d_{filtered} = \text{moving\_average}(d)$ ;
     $\Delta d = d_{filtered} - d_{prev}$ ;
     $d_{prev} = d_{filtered}$ ;
    // Bước 5: Phát hiện cực trị (đỉnh và đáy)
    if  $\Delta d < 0$  and  $\Delta d_{prev} > 0$  then
        |  $d_{max} = d_{filtered}$ ;
    end
    if  $\Delta d > 0$  and  $\Delta d_{prev} < 0$  then
        |  $d_{min} = d_{filtered}$ ;
        if  $d_{max} > 0$  and  $d_{min} > 0$  then
            // Bước 6: Tính độ dài bước chân bằng định lý Pythagore
             $d = \sqrt{d_{max}^2 - d_{min}^2}$ ;
             $d_{total} = d_{total} + d$ ;
             $d_{max} = 0$ ,  $d_{min} = +\infty$ ;
        end
    end
     $\Delta d_{prev} = \Delta d$ ;
    // Bước 7: Duy trì tần số lấy mẫu 50 Hz
    delay(20 ms);
end

```

Thuật toán này hoạt động dựa trên nguyên lý cửa sổ trượt và quét dữ liệu



Hình 3.6: Bộ đếm bước được tích hợp để xác định thời điểm bước và hợp nhất với dữ liệu UWB nhằm loại bỏ các bước chân giả.

theo thời gian thực. Nhờ đó, các vùng thời gian từ khi bắt đầu và kết thúc của 1 bước chân được xác định chính xác. Từ đó, thông tin sai bước ($d_{\max}$) dễ dàng được tính toán khi một bước được thực hiện xong. Khoảng cách khi 2 chân bước qua nhau ($d_{\min}$) dễ dàng phát hiện vì nó thường xuất hiện giữa 2 lần chân người chạm đất và miền giá trị lúc này là nhỏ nhất. Hình 3.6 minh họa việc sử dụng kết hợp dữ liệu gia tốc và dữ liệu khoảng cách tính toán được từ UWB. Cụ thể, khi chỉ dựa vào IMU để định vị, hệ thống dễ gặp phải sai số tích lũy do trôi dạt cảm biến và sai số từ mô hình chuyển đổi dữ liệu quán tính thành quãng đường di chuyển. Bằng cách này, các bước chân giả do nhiễu hoặc các dao động bất thường được loại bỏ, đồng thời các bước chân thực sự sẽ được nhận diện chính xác hơn.

3.1.5. Giải thuật xác định hướng di chuyển

Tính toán hướng di chuyển là một thành phần quan trọng trong hệ thống định vị của nhân viên cứu hộ, đặc biệt trong các môi trường khép kín nơi tín hiệu GPS bị che khuất. Dữ liệu từ cảm biến con quay hồi chuyển thường được sử dụng để xác định góc quay của người dùng thông qua phép tích phân theo thời gian. Tuy nhiên, phương pháp tích phân trực tiếp này dễ bị ảnh hưởng bởi sai số đo và nhiễu cảm biến, dẫn đến sai lệch tích lũy theo thời gian (angular

drift) — một vấn đề nghiêm trọng làm suy giảm độ chính xác của hệ thống định vị (INS/PDR).

Để khắc phục hạn chế trên, nghiên cứu này đề xuất một giải thuật dạng hướng di chuyển dựa trên mô hình DT. Giải thuật này được huấn luyện để phân loại hướng xoay của người dùng dựa trên tín hiệu con quay hồi chuyển ban đầu, thay vì thực hiện phép tích phân góc. Phương pháp này cho phép xác định hướng di chuyển tức thời thông qua đặc trưng hình thái của tín hiệu quay, từ đó loại bỏ hiện tượng trôi tích lũy theo thời gian.

3.1.5.1. Tập dữ liệu về góc di chuyển

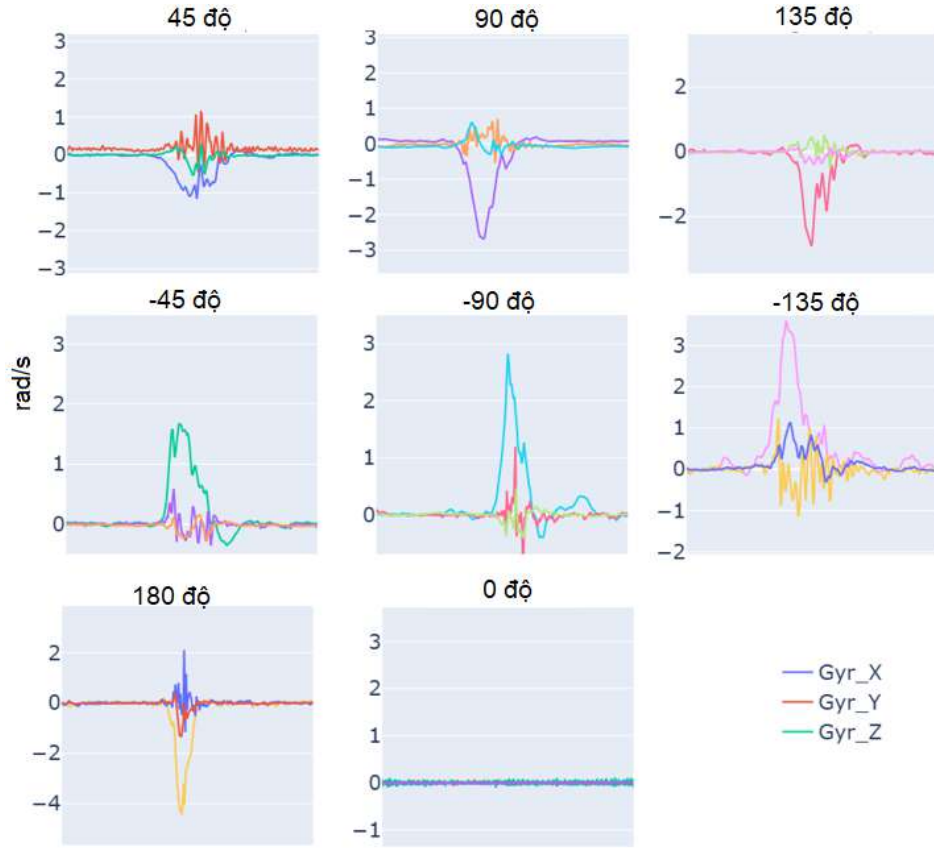
Nghiên cứu đã thu thập dữ liệu góc quay từ cảm biến con quay hồi chuyển với đơn vị là rad/s. Cảm biến được đặt sao cho vector trục x hướng xuống dưới cùng hướng với vector gia tốc trọng trường và, trục y song song với mặt phẳng chuyển động, trục z có hướng thẳng. Hình 3.7 minh họa tín hiệu cho tám hướng di chuyển rời rạc được định nghĩa bao gồm: đi thẳng (0°), rẽ trái và rẽ phải với các góc $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$, $\pm 135^\circ$, và xoay 180° . Khi người dùng thực hiện chuyển hướng, tín hiệu trên trục g_x của con quay hồi chuyển thể hiện sự biến thiên rõ rệt: giá trị g_x mang dấu âm trong trường hợp rẽ phải và dương trong trường hợp rẽ trái, trong khi biên độ biến thiên tăng tương ứng với độ lớn của góc quay.

3.1.5.2. Phân đoạn dữ liệu và tính toán đặc trưng góc di chuyển

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). Bảng 3.2 thống kê tập dữ liệu được xây dựng bằng cách xoay tổng cộng tám hướng để di chuyển khác nhau: 0° , $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$, $\pm 135^\circ$ và 180° với tần số lấy mẫu là 50 Hz.

Bảng 3.2: Thống kê số của số dữ liệu theo góc quay trong tập huấn luyện và kiểm thử.

Góc ($^\circ$)	Tập huấn luyện	Tập kiểm thử	Tổng số
0	815	348	1163
45	324	138	462
90	181	77	258
135	232	99	331
180	140	59	199
-135	115	48	163
-90	267	114	381
-45	136	58	194
Tổng số	2250	958	3209

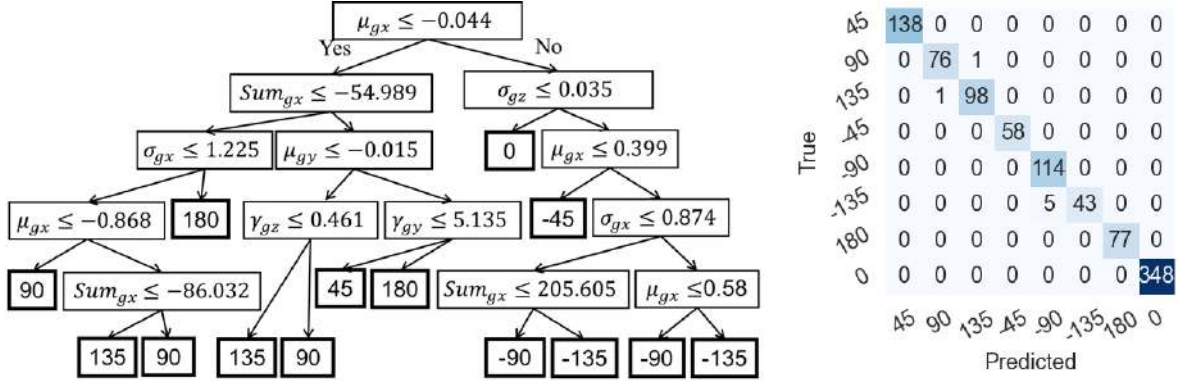


Hình 3.7: Khi tình nguyện viên thay đổi hướng di chuyển, dữ liệu có xu hướng dao động mạnh dọc theo trục thẳng đứng.

Nhờ việc khai thác mối quan hệ giữa dấu và biên độ biến thiên của tín hiệu con quay hồi chuyển với hướng quay, hệ thống có thể xác định hướng di chuyển mà không cần thực hiện phép tích phân góc. Sự khác biệt giữa các hướng di chuyển dựa trên sự tăng/giảm giá trị trên trục g_x phản ánh từ mức độ xoay người. Cụ thể, giá trị trung bình phản ánh chiều và mức độ lệch tổng thể của chuyển động, trong khi độ lệch chuẩn thể hiện cường độ dao động trong quá trình xoay. Sự khác biệt nhất quán giữa các lớp cho thấy các đặc trưng này đủ thông tin để mô hình học máy thực hiện phân loại hướng với độ chính xác cao mà không cần đến các đặc trưng phức tạp hơn. Do đó, nghiên cứu sử dụng tập đặc trưng gồm 9 thành phần được trích xuất từ tín hiệu con quay hồi chuyển trên ba trục x, y, z , bao gồm: giá trị trung bình (μ_{g_k}), độ lệch chuẩn (σ_{g_k}), tổng giá trị tín hiệu (sum_{g_k}) và dải giá trị (γ_{g_k}). Trong đó, $k \in \{x, y, z\}$.

3.1.5.3. Mô hình phân loại góc di chuyển

Các đặc trưng này sau khi được tính toán sẽ được hợp thành một vector đặc trưng làm đầu vào cho thuật toán DT. Các nhãn cho các hướng di chuyển được gán phục vụ quá trình huấn luyện và xây dựng mô hình để đạt được kết quả



Hình 3.8: Lưu đồ DT với 5 tầng có thể nhận dạng góc xoay với độ chính xác cao.

cao nhất. Mô hình đề xuất được sử dụng là cây quyết định (DT), giúp xây dựng một hàm f_{DT} biểu diễn mối tương quan giữa các hướng di chuyển và các đặc trưng tín hiệu vận tốc góc. Quá trình phân loại tại mỗi nút của cây thực chất là việc kiểm tra một điều kiện trên một đặc trưng cụ thể ($feat_j$).

Tại mỗi nút thứ n , thuật toán chọn một đặc trưng $feat_j$ và một ngưỡng τ_n để phân chia dữ liệu. Quy tắc rẽ nhánh tại nút thứ n được định nghĩa là:

$$\text{Next Node} = \begin{cases} \text{Left Child (L)}, & \text{nếu } feat_j \leq \tau_n \\ \text{Right Child (R)}, & \text{nếu } feat_j > \tau_n \end{cases}$$

Quá trình huấn luyện nhằm tìm kiếm các tham số phân chia tối ưu $\theta^* = \{(feat_j, \tau_n)\}$ tại mỗi nút n với ràng buộc độ sâu của cây $d \leq 5$ nhằm tối ưu hóa tài nguyên tính toán. Mô hình sau khi huấn luyện được đánh giá với tập dữ liệu kiểm tra. Kết quả là mô hình được lựa chọn sẽ được chuyển thành tập tin có dạng header và được biểu diễn như Hình 3.8.

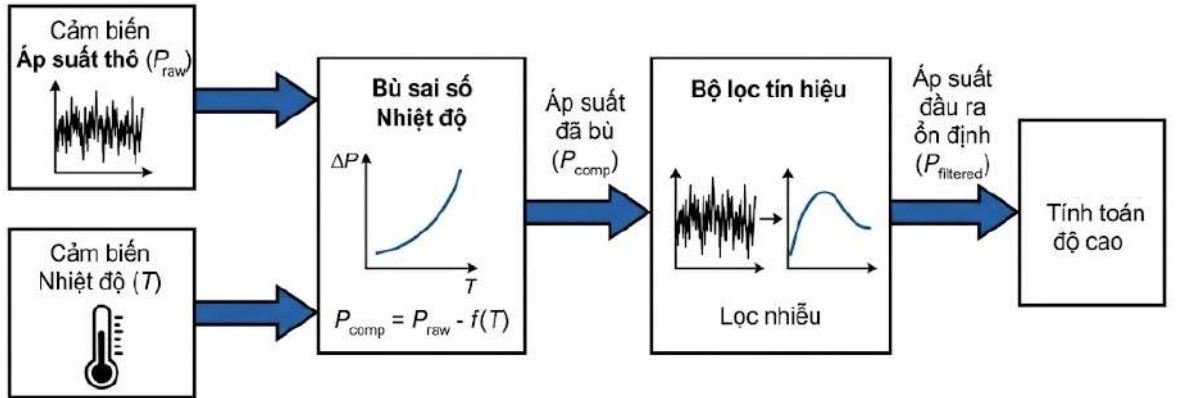
Ma trận nhầm lẫn lần thống kê các góc di chuyển cho thấy mô hình đạt được độ chính xác cao và ổn định trên hầu hết các lớp định hướng. Đặc biệt với góc di chuyển thẳng (0°) với số lượng mẫu lớn nhất (348 mẫu) được dự đoán chính xác, không nhầm lẫn sang các góc khác. Các góc chuyển động chính như 45° , -45° , -90° và 180° cũng ghi nhận hiệu suất nhận dạng tốt với tỉ lệ nhầm lẫn thấp. Sự nhầm lẫn nhẹ chỉ xuất hiện ở một vài trường hợp giữa các góc có sự tương đồng nhất định về hình thái tín hiệu quán tính, ví dụ như giữa 90° và 135° (nhầm 1 mẫu) hoặc giữa -90° và -135° (nhầm 5 mẫu). Nhìn chung, kết quả này chứng minh rằng việc sử dụng mô hình học máy (như cây quyết định đã mô tả) để phân loại hướng di chuyển tức thời thay vì tích phân góc truyền thống là một giải pháp cực kỳ hiệu quả, giúp loại bỏ hiện tượng trôi tích lũy và đảm bảo tính

tin cậy cao cho hệ thống định vị của lính cứu hoả

3.1.6. Giải thuật tính toán độ cao và xác định tầng

Trong hệ thống này, khí áp kế MS5837 tích hợp trên module gắn tại thất lưng đo sự thay đổi áp suất khí quyển để suy ra thay đổi về độ cao. Tuy nhiên, việc sử dụng cảm biến áp suất trong môi trường cấu hợ trong nhà phức tạp đặt ra nhiều thách thức. Ví dụ, các hệ thống tăng áp thường được lắp trong buồng thang bộ, hoặc nhiệt độ khắc nghiệt trong các tình huống cháy có thể gây ra sự dao động áp suất đáng kể [60]. Những yếu tố này dẫn đến nhiều lớn trong phép đo, làm sai lệch đáng kể kết quả ước lượng độ cao. Để khắc phục vấn đề này, nghiên cứu đề xuất áp dụng bộ lọc Kalman cho dữ liệu áp suất.

Để tích hợp mô hình bù nhiệt vào vi điều khiển với chi phí tính toán thấp, quá trình xử lý thông tin áp suất được thực hiện theo cơ chế thời gian thực rời rạc. Tại mỗi chu kỳ lấy mẫu t_k , thuật toán thực thi theo quy trình được minh họa tại Hình 3.9.



Hình 3.9: Sơ đồ triển khai giải thuật bù sai số trôi theo nhiệt độ cho áp suất

Dữ liệu áp suất ban đầu từ cảm biến ($P_{raw}[k]$) và nhiệt độ quanh cảm biến áp suất ($T_{meas}[k]$) được thu thập. Để giảm sai số, nhiệt độ được chuẩn hóa về mức chênh lệch so với nhiệt độ tham chiếu T_{ref} trung bình tại thời điểm đo:

$$\Delta T[k] = T_{meas}[k] - T_{ref} \quad (3.7)$$

Tiếp theo, nghiên cứu áp dụng lược đồ Horner để đưa ra công thức tính toán phần bù sai số $\delta P[k]$:

$$\delta P[k] = \Delta T[k] \times (k_1 + k_2 \times \Delta T[k]) \quad (3.8)$$

Áp suất bù $P[k]$ được cập nhật ngay liên tục với bộ lọc Kalman:

$$P[k] = P_{raw}[k] - \delta P[k] \quad (3.9)$$

Độ cao (H_k) tương đối của người lính cứu hoả được tính toán dựa trên áp suất khí quyển¹ qua công thức 3.10 [9] sau khi bù áp suất theo nhiệt độ.

$$H_k = 44330 \times \left(1 - \left(\frac{P[k]}{P_0} \right)^{\frac{1}{5.255}} \right), \quad (3.10)$$

trong đó P_0 là áp suất tiêu chuẩn tại mực nước biển ($P_0 = 1013.25$ hPa). Tuy nhiên, độ cao H_k này có thể bị sai số trôi theo thời gian. Do đó, độ cao tính toán (H_k^*) sẽ được sử dụng sau khi hiệu chỉnh bằng cách trừ đi tham số bù ($Bias_k$):

$$H_k^* = H_k - Bias_k \quad (3.11)$$

Để nâng cao độ tin cậy xác định tầng trong toà nhà, nghiên cứu đề xuất cơ chế hợp nhất thông tin giữa bản đồ tham chiếu, độ cao được tính toán và hiệu chỉnh (H_k^*), hành động người dùng (S_{RFAR}) và sự kiện bước chân. Các biến trạng thái đầu vào được định nghĩa như sau:

- Bản đồ độ cao (h_{F_k}): tập hợp độ cao cố định của các tầng, $h_{F_k} = \{h_1, h_2, \dots, h_N\}$, với h_{F_k} là độ cao của tầng thứ F_k .
- Độ cao xử lý (H_k^*): giá trị độ cao sau khi đã qua bước hiệu chỉnh Bias ở công thức 3.11.
- Hành động dự đoán (S_{RFAR}): trạng thái từ mô hình RFAR, với $S_{RFAR} \in \{US, DS, other\}$.

Tại mỗi thời điểm k , khi một bước chân được phát hiện, hệ thống kiểm tra trạng thái S_{RFAR} để quyết định phương thức cập nhật vị trí. Nếu $S_{RFAR} \in \{US, DS\}$, hệ thống kích hoạt cơ chế chuyển đổi (ΔF_k) linh hoạt từ chức năng ước tính khoảng cách di chuyển dựa trên UWB sang chức năng xác định tầng qua độ cao. Điều này giúp loại bỏ nhiễu đa đường khi họ di chuyển qua các bậc cầu thang.

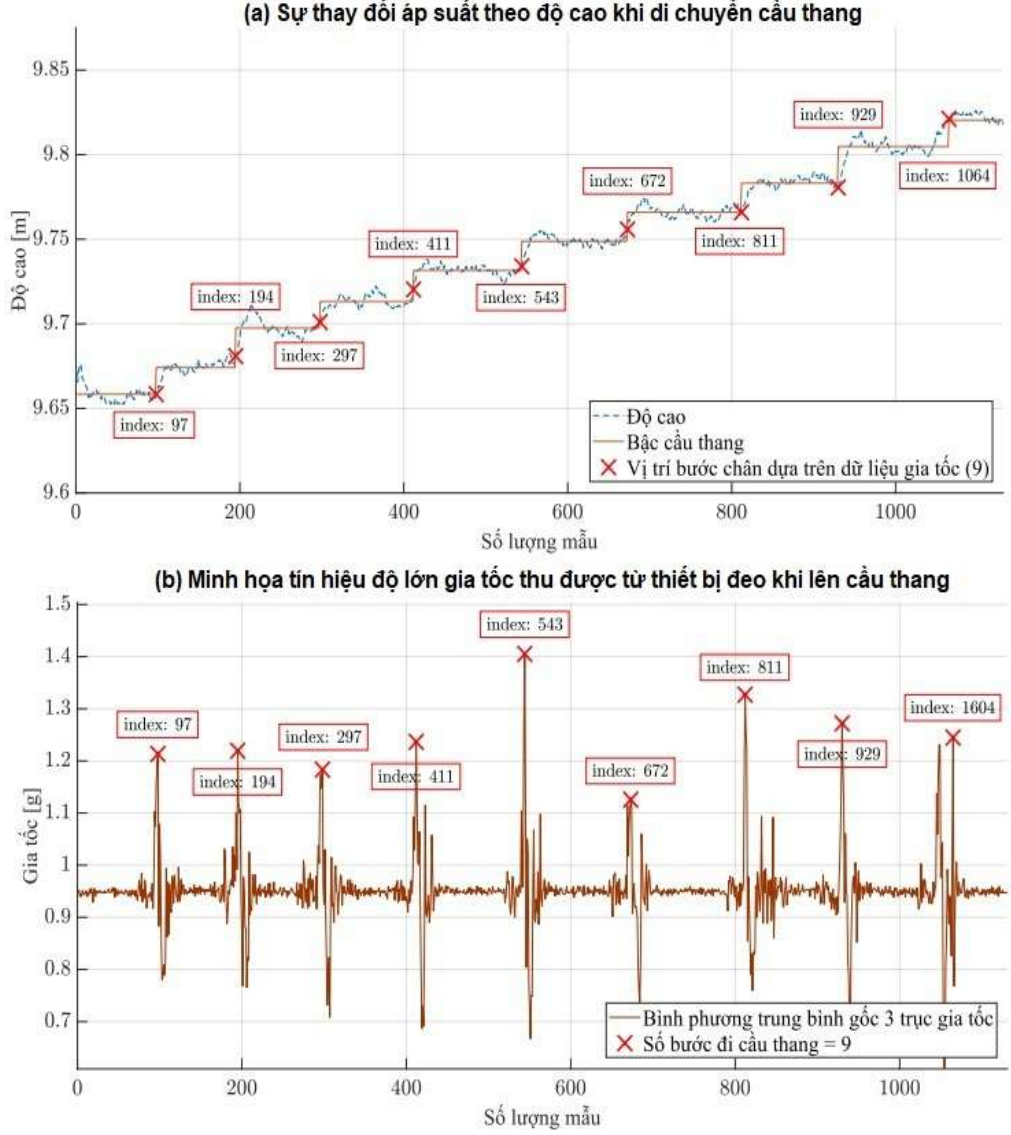
$$F_k \leftarrow F_k + \Delta F_k \quad \text{nếu } S_{RFAR} \in \{US, DS\}$$

Cụ thể, nếu người lính cứu hoả đang đi cầu thang, vị trí được cập nhật nhằm xác định việc thay đổi tầng. Hệ thống tiến hành xác định số bước di chuyển C_{seq} (Hình 3.10) khi đi cầu thang. Tham số này thay đổi khi hành động US hoặc DS

¹<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pressure-altitude> accessed 15/1/2026.

duy trì:

$$C_{seq} = \begin{cases} C_{seq} + 1 & \text{nếu } S_{RFAR}^{(k)} = S_{RFAR}^{(k-1)} \in \{US, DS\} \\ 0 & \end{cases} \quad (3.12)$$



Hình 3.10: Sự kết hợp áp suất khí quyển theo độ cao (a) và xác định bước dựa trên gia tốc (b) để nhận biết sự thay đổi tầng.

Tầng (F_k) chỉ thay đổi khi ba yếu tố sau xảy ra đồng thời: hành động S_{RFAR} , số bước chân tích lũy vượt ngưỡng tối thiểu ($\bar{\gamma}_{min}$), và áp suất (H_k^*) thay đổi vượt ngưỡng. Quy tắc cập nhật tầng được mô tả như sau:

$$\Delta F_k = \begin{cases} +1 & \text{nếu } (S_{RFAR} = US) \wedge (C_{seq} \geq \bar{\gamma}_{min}) \wedge (H_k^* - h_{F_{k-1}} \geq \delta_{th}) \\ -1 & \text{nếu } (S_{RFAR} = DS) \wedge (C_{seq} \geq \bar{\gamma}_{min}) \wedge (H_k^* - h_{F_{k-1}} \leq -\delta_{th}) \\ 0 & \text{khác,} \end{cases} \quad (3.13)$$

trong đó, δ_{th} là ngưỡng độ cao được thiết lập để tránh hiện tượng thay đổi trạng thái tầng liên tục do nhiễu đo lường, $\overline{\gamma}_{min}$ là số bước chân tối thiểu cần thiết để xác thực hành vi di chuyển giữa các tầng.

Trong trường hợp $S_{RFAR} = \text{khác}$, hệ thống kích hoạt cơ chế khóa vị trí tầng ($F_k = F_{k-1}$) và bù trừ sai số trôi áp suất. Nếu chênh lệch áp suất vẫn tục trôi (tăng hoặc giảm), hệ thống cập nhật tham số bù (bias):

$$Bias_{k+1} = Bias_k + \frac{T_s}{\tau + T_s} \cdot (H_k^* - h_{F_{k-1}}) \quad (3.14)$$

trong đó, T_s là chu kỳ lấy mẫu, τ là thời gian cần để điều chỉnh sự tốc độ thay đổi của sai số, $h_{F_{k-1}}$ là độ cao thực tế của tầng hiện tại tại thời điểm trước đó.

3.1.7. Mô hình hóa IPS dùng phương pháp Quaternion

Quá trình ước lượng vị trí đối tượng được thực hiện theo cơ chế cập nhật rời rạc tại mỗi sự kiện bước chân (stride-event). Hệ thống tiếp nhận vector đầu vào $\mathbf{u}_k$ tại thời điểm k gồm: độ dài bước chân d_k , góc/hướng di chuyển α_k , và độ cao H_k^* đã được tham chiếu với bản đồ toà nhà để hiển thị lên hệ tọa độ trong không gian 3D. Trong nghiên cứu này, hệ tọa độ được quy ước với mặt phẳng OXY song song với mặt sàn và trục OZ thẳng đứng.

Tại thời điểm k , hệ thống sử dụng dữ liệu đầu vào là $\mathbf{u}_k = [d_k, \alpha_k, H_k^*]^T$ để tính toán ra trạng thái mới $\mathbf{x}_k^* = [\mathbf{p}_k^T, \mathbf{q}_k^T]^T = [x_k, y_k, z_k, q_{0,k}, q_{1,k}, q_{2,k}, q_{3,k}]^T$. Góc hướng di chuyển α_k được xác định thông qua mô hình DT (f_{DT}) với đầu ra là một trong tám góc: $\alpha_k = f_{DT}(feat_k) \in \{0, \pm 45^\circ, \pm 90^\circ, \pm 135^\circ, 180^\circ\}$

Góc rời rạc α_k được biểu diễn dưới dạng một Quaternion $\mathbf{q}_k$ để biểu diễn tư thế di chuyển trong mặt phẳng OXY . Trong đó, $q_{1,k}$ mô tả độ nghiêng người sang trái hoặc phải; $q_{2,k}$ thể hiện độ cúi người về trước hoặc ngửa ra sau; và $q_{3,k}$ xác định hướng rẽ trái/phải trên bản đồ. Do trục quay tương ứng góc di chuyển là OZ nên các thành phần $q_{1,k}$ và $q_{2,k}$ coi như bằng 0. Cụ thể:

$$\mathbf{q}_k = \begin{bmatrix} q_{0,k} \\ q_{1,k} \\ q_{2,k} \\ q_{3,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\frac{\alpha_k}{2}) \\ 0 \\ 0 \\ \sin(\frac{\alpha_k}{2}) \end{bmatrix}$$

Với mỗi khoảng cách di chuyển d_k ở mỗi tầng cụ thể mà lính cứu hỏa đã thực hiện tại thời điểm k , hệ thống tính toán vị trí mới của họ bằng cách xác định thêm phần thay đổi tọa độ $(\Delta x, \Delta y)$ theo hai trục OX và OY được tính theo

công thức 3.15. Cụ thể:

$$\begin{aligned}\Delta x &= d_k \cdot \cos(\alpha_k) \\ \Delta y &= d_k \cdot \sin(\alpha_k)\end{aligned}\tag{3.15}$$

Do đó, trạng thái mới của hệ thống được cập nhật cụ thể như sau:

$$\begin{cases} x_k = x_{k-1} + d_k \cos(\alpha_k) \\ y_k = y_{k-1} + d_k \sin(\alpha_k) \\ z_k = H_k^* \\ q_{0,k} = \cos\left(\frac{\alpha_k}{2}\right) \\ q_{1,k} = 0 \\ q_{2,k} = 0 \\ q_{3,k} = \sin\left(\frac{\alpha_k}{2}\right) \end{cases}\tag{3.16}$$

Tiếp theo, hệ thống thực hiện phép ánh xạ sang bản đồ hiển thị để trực quan hóa lộ trình di chuyển. Gọi $\mathbf{m}_k = [px_k, py_k]^T$ là vector tọa độ điểm ảnh để hiển thị trên giao diện tại thời điểm k . Vị trí này được tính bằng cách lấy vị trí trước đó ($\mathbf{m}_{k-1}$) cộng thêm thông tin di chuyển và ma trận tỷ lệ $\mathbf{S}^*$:

$$\mathbf{m}_k = \mathbf{m}_{k-1} + \mathbf{S}^* \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}\tag{3.17}$$

trong đó, $\mathbf{S}^*$ là tỷ lệ chuyển đổi đơn vị đo thực tế sang đơn vị hiển thị trên bản đồ. Tại thời điểm bắt đầu ($k = 0$), tọa độ hiển thị được gán bằng tọa độ gốc $\mathbf{m}_{start} = p_{start} = [px_{start}, py_{start}]^T$. Để cập nhật vị trí trên bản đồ số, tọa độ điểm ảnh theo chiều ngang (px) và chiều dọc (py) được xác định như sau:

$$\begin{cases} px_k = px_{k-1} + s \cdot \Delta x \\ py_k = py_{k-1} + s \cdot \Delta y \end{cases}\tag{3.18}$$

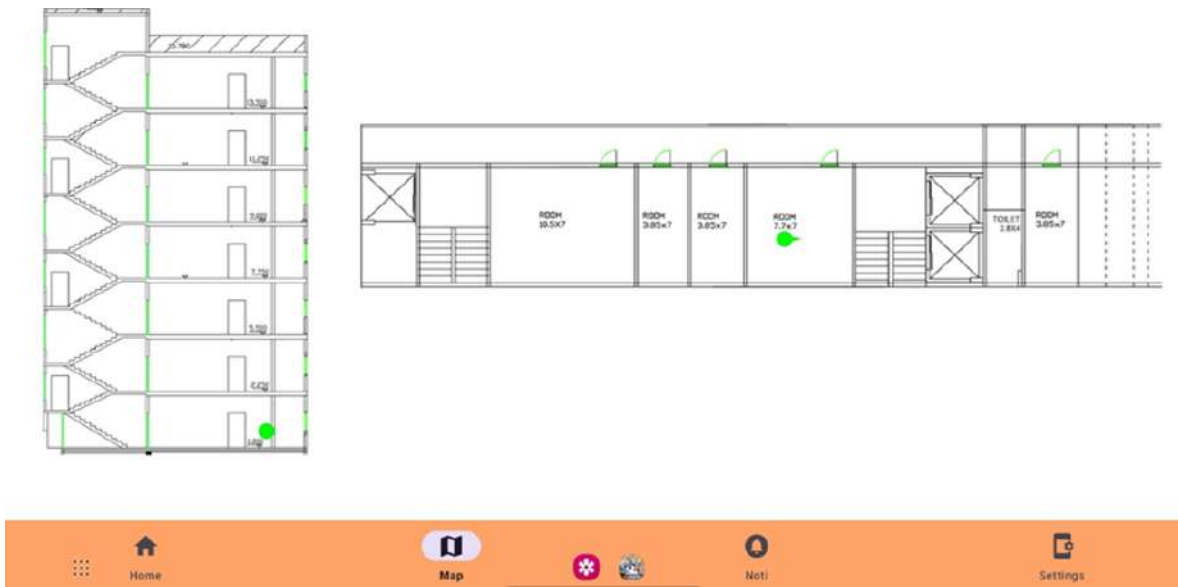
Việc thay đổi tầng F_k trong nhà giúp xác định độ cao H_k^* dựa trên ánh xạ thông tin bản đồ toà nhà kết hợp RFAR và đếm bước như đã trình bày tại mục 3.1.6. Gọi tập hợp cơ sở dữ liệu bản đồ của từng tầng trong toà nhà là $\bar{R} = \{Img_1, Img_2, \dots, Img_n\}$, trong đó Img_i là thông tin sơ đồ của tầng thứ i . Tại mỗi thời điểm k , số tầng F_k được xác định bằng cách đối chiếu H_k^* với các khoảng độ cao $\Psi(H_k^*)$ theo cơ sở dữ liệu mỗi của toà nhà:

$$F_k = \Psi(H_k^*) = i, \quad H_{floor}^{(i)} \leq H_k^* < H_{ceiling}^{(i)}\tag{3.19}$$

Khi số tầng F_k thay đổi so với thời điểm trước đó ($F_k \neq F_{k-1}$), hệ thống thay đổi màn hình hiển thị theo tầng tương ứng: $Layer_{active} = \text{MapImg}(F)$. Trong Hình 3.11, trạng thái an toàn của nhân viên cứu hộ được biểu diễn bằng một điểm đánh dấu theo màu sắc: màu xanh lá cây biểu thị trạng thái bình thường/an toàn, trong khi màu đỏ biểu thị cảnh báo hoặc tình trạng khẩn cấp. Vị trí của lính cứu hỏa trong bản đồ số ($P_{display}$) được cập nhật liên tục để hiển thị trực quan trên màn hình của chỉ huy: $P_{display} = \text{Render}(Layer_{active}, px_{new}, py_{new})$.

3.1.8. Bản đồ số hoá hiển thị thông tin toà nhà

Các thông tin quan trọng của lính cứu hỏa gồm hành động được nhận dạng và vị trí trong toà nhà được trực quan hóa trên bản đồ của toà nhà tại trạm chỉ huy để nắm bắt được tình hình và đưa ra các quyết định kịp thời, góp phần nâng cao hiệu quả và an toàn trong công tác cứu hỏa và tìm kiếm cứu nạn. Để có thể giám sát vị trí của lính cứu hỏa trong toà nhà, bản đồ cần được cung cấp để trực quan hoá cấu trúc, sơ đồ vị trí trong toà nhà giúp trạm chỉ huy có thể thuận tiện giám sát và điều hướng lính cứu hỏa. Tất cả các toà nhà đều cần thiết kế trước khi thi công, và có đầy đủ các thông số như chiều cao của toà nhà, chiều cao mỗi tầng, vị trí cầu thang bộ và thang máy... Đây là những thông tin hữu ích hỗ trợ cho việc tìm kiếm vị trí nạn nhân bên trong toà nhà.



Hình 3.11: Thông tin mặt cắt ngang bản đồ của toà nhà A4 Đại học Phenikaa được trực quan hoá trên bản đồ số.

Trên màn hình của trạm chỉ huy có thể hiển thị đồng thời mặt cắt dọc và mặt cắt ngang của toà nhà với tỷ lệ của bản đồ là tỷ lệ giữa khoảng cách trên bản đồ và khoảng cách thực tế. Mặt cắt dọc là hình chiếu của toà nhà theo một

mặt phẳng thẳng đứng, được sử dụng để minh họa chiều cao toà nhà, chiều cao tầng, thang máy và lối thoát hiểm (Hình 3.11). Mặt cắt ngang là mặt phẳng nằm ngang hiển thị bố cục của từng tầng, bao gồm cách bố trí các phòng, hành lang và các yếu tố nội thất khác. Giả sử tỷ lệ bản đồ là 1:2000 thì mỗi đơn vị đo lường trên bản đồ tương đương với 2000 mm trong thực tế của toà nhà hoặc công trình xây dựng.

Thiết kế phần mềm ứng dụng trong việc trực quan hóa hành động, trạng thái và vị trí của lính cứu hoả đóng vai trò vô cùng quan trọng trong công tác chỉ huy và quản lý tình huống khẩn cấp. Trực quan hóa cho phép trạm chỉ huy giám sát những thông tin đáng giá của từng lính cứu hoả trong thời gian thực, giúp chỉ huy nắm bắt tình hình một cách chính xác và kịp thời. Điều này tăng cường an toàn cho lính cứu hoả bằng cách phát hiện và ứng phó nhanh chóng với những tình huống nguy hiểm, như khi một lính cứu hoả bị mắc kẹt, ngã hoặc cần hỗ trợ y tế khẩn cấp. Ngoài ra, trực quan hóa giúp chỉ huy phân bổ lực lượng và tài nguyên hiệu quả hơn, đảm bảo lực lượng được điều động đến các khu vực cần thiết. Thông tin chi tiết về hành động và trạng thái của lính cứu hoả cung cấp dữ liệu quan trọng để đưa ra những quyết định chiến lược, nâng cao khả năng phối hợp giữa các đội cứu hoả và với trạm chỉ huy. Ứng dụng trực quan hóa cũng cải thiện hiệu suất nhiệm vụ của lính cứu hoả bằng cách cung cấp chỉ dẫn chính xác, lộ trình an toàn và khu vực cần tập trung nỗ lực.

3.2. Kết quả và đánh giá

3.2.1. Kịch bản thử nghiệm

Để đảm bảo tính tin cậy của hệ thống trong các tình huống khẩn cấp, nghiên cứu đã thiết lập các kịch bản thử nghiệm mô phỏng trong Bảng. 3.3, nhằm tái hiện các thách thức chính mà lính cứu hoả phải đối mặt, bao gồm: ước lượng khoảng cách trong điều kiện nhiễu, xác định hướng di chuyển phức tạp, và theo dõi vị trí. Đặc biệt, khác với các hệ thống định vị truyền thống phụ thuộc vào các trạm thu phát cố định (Anchors) lắp đặt trên tường, hệ thống đề xuất sử dụng cấu hình UWB gắn trên cơ thể (On-body UWB) tại hai vị trí cổ chân. Do đó, vị trí đặt Anchor trong các kịch bản thử nghiệm được xác định là vị trí tương đối giữa hai cổ chân trong quá trình di chuyển, giúp hệ thống hoạt động độc lập với hạ tầng toà nhà.

Bảng 3.3: Tổng hợp điều kiện môi trường và kịch bản thử nghiệm mô phỏng.

Yếu tố môi trường	Kịch bản mô phỏng trong luận án	Ghi chú kỹ thuật
Cấu hình Anchor & Vị trí thiết bị	Cấu hình gắn chân (Foot-mounted): - Thiết bị 1 (Anchor ảo): Cổ chân trái. - Thiết bị 2 (Tag): Cổ chân phải. - Khoảng cách đo: 0 – 1.5 m theo sải chân.	Hệ thống độc lập hạ tầng, không yêu cầu lắp Anchor lên tường. Kiểm tra khả năng đo khoảng cách ngắn (Short-range) để loại bỏ bước giả.
Vật cản & Suy hao tín hiệu (NLOS)	Mô phỏng vật cản tự thân và địa hình: - Vật cản: Chính cơ thể người dùng và cấu trúc cầu thang bê tông. - Địa hình: Hành lang hẹp (2m) và buồng thang bộ gây hiệu ứng đa đường (Multipath).	Đánh giá độ ổn định của UWB khi bị che khuất bởi cơ thể (Body Shadowing) trong các tư thế khó (bò, trườn).
Độ dày khối & Tâm nhìn	Mô phỏng hành vi vận động hạn chế: - Thực hiện các động tác: Bò thấp (CR), Trườn (SL), Di khom (WS). - Đeo mặt nạ mô phỏng để tái hiện sự vướng víu.	Sóng UWB xuyên khối tốt. Thử nghiệm tập trung vào nhận dạng đúng hành động di chuyển bất thường do khối gây ra.
Nhiệt độ & Áp suất	Điều kiện tiêu chuẩn: - Nhiệt độ môi trường: 25–30°C. - Áp suất: Tự nhiên, áp dụng bộ lọc Kalman để lọc nhiễu dao động.	Thiết bị có vỏ bảo vệ chịu nhiệt; xác định tầng trên khoảng giá trị áp suất kết hợp với phát hiện đi cầu thang.
Khu vực thử nghiệm	Toà nhà A4 - ĐH Phenikaa: - Diện tích: 104 m × 22.52 m. - Quảng đường: 101.5 m (tuyến tính và rẽ ngoặt).	Sử dụng bản đồ số hóa để đối chiếu sai số thực tế so với quỹ đạo tham chiếu.

3.2.1.1. Kiểm chứng độ ổn định của thuật toán đo khoảng cách bước

Môi trường thử nghiệm được thiết lập tại hành lang thông thường có kích thước giới hạn (chiều rộng 2 m), bao quanh bởi tường bê tông cốt thép thường gặp trong các lối thoát nạn. Đối tượng thử nghiệm thực hiện di chuyển tuyến tính để hệ thống thu thập dữ liệu sải bước biến thiên từ trạng thái đứng yên (d_{min}) đến sải bước cực đại (d_{max}). Nghiên cứu hướng đến đánh giá khả năng loại bỏ bước chân giả và sai số đo lường của giải pháp UWB hoạt động độc lập (không phụ thuộc Anchor gắn tường) so với phương pháp đếm bước truyền thống.

3.2.1.2. Kiểm chứng giải thuật xác định hướng và quỹ đạo di chuyển

Nội dung thử nghiệm này nhằm đánh giá hiệu quả của mô hình DT trong việc phân loại hướng rẽ và loại bỏ sai số trôi góc của cảm biến quán tính. Không gian thực nghiệm được giới hạn với tổng chiều dài 101.5 m, yêu cầu người thử nghiệm thực hiện trung bình 180-250 bước chân trong mỗi bài kiểm tra. Thay vì chỉ di

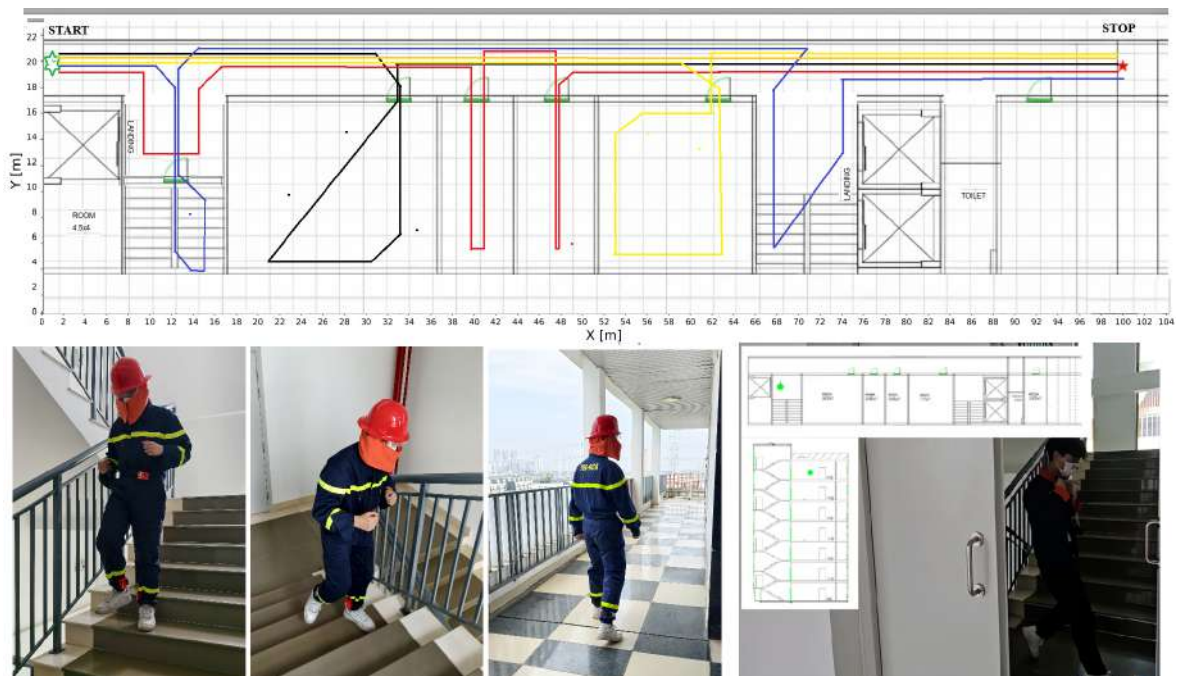
chuyển thẳng, nội dung thử nghiệm bao gồm các thao tác chuyển hướng đặc thù để mô phỏng hành vi tìm kiếm cứu nạn, bao gồm các góc rẽ: 0° , $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$, $\pm 135^\circ$ và đặc biệt là thao tác quay đầu 180° . Dữ liệu thu được sử dụng để so sánh đối chiếu giữa quỹ đạo ước tính và quỹ đạo tham chiếu trên bản đồ số hóa.

3.2.1.3. Thử nghiệm định vị 3D và lọc nhiễu độ cao

Bài toán xác định vị trí tầng khi người lính cứu hỏa phải di chuyển bằng cầu thang bộ được quan tâm, do khi cháy nổ hỏa hoạn thì thang máy đã bị vô hiệu hóa. Tại khu vực cầu thang bộ của toà nhà thử nghiệm, hệ thống thực hiện thu thập đồng thời dữ liệu áp suất từ khí áp kế và dữ liệu gia tốc từ IMU trong các hành động lên cầu thang và đi xuống. Thử nghiệm nhằm kiểm chứng khả năng của bộ lọc Kalman kết hợp với thuật toán nhận dạng hành động (HAR) trong việc phân biệt giữa sự thay đổi độ cao thực tế và các nhiễu động áp suất giả lập, đảm bảo độ chính xác của thông tin vị trí theo phương thẳng đứng.

3.2.2. Theo dõi vị trí và hiển thị trên bản đồ số hóa

3.2.2.1. Đánh giá sai lệch về quỹ đạo di chuyển



Hình 3.12: Thực nghiệm toàn diện về tính toán vị trí thời gian thực và mô tả quỹ đạo di chuyển khi các tình nguyện viên sử dụng cảm biến đeo trên người tại toà nhà A4 Đại học Phenikaa.

Trong nghiên cứu này, phương pháp ước tính quãng đường di chuyển được

thực hiện dựa trên sự kết hợp giữa bộ đếm bước và phép đo khoảng cách liên chi thông qua UWB. Hình ảnh mặt bằng số hóa (Hình 3.12) được sử dụng để thiết lập tuyến đường thực nghiệm với kích thước thực tế là 104 m chiều dài và 22.52 m chiều rộng. Môi trường thực nghiệm được thiết lập tại hành lang có chiều rộng hạn chế khoảng 2 m, bao quanh bởi các bức tường bê tông cốt thép đặc trưng và lối thoát hiểm khẩn cấp theo sơ đồ thiết. Các tình nguyện viên thực hiện chuyển động thẳng, cho phép hệ thống thu thập dữ liệu sai chân từ trạng thái đứng yên ($d_{\min}$) đến độ dài sai chân tối đa ($d_{\max}$).



Hình 3.13: Quỹ đạo di chuyển của các tình nguyện viên được đánh dấu theo kịch bản xác định trước.

Kết quả thực nghiệm được tổng hợp tại Bảng 3.4, hiệu năng của hệ thống IPS đề xuất được phân tích một cách chi tiết thông qua 05 quỹ đạo di chuyển có độ dài biến thiên từ 104 m đến 171 m như Hình 3.13. Quá trình thực nghiệm diễn ra với các thao tác chuyển hướng cụ thể và di chuyển tịnh tiến để mô phỏng hành trình tìm kiếm cứu nạn, bao gồm các góc quay 0° , $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$, $\pm 135^\circ$ và quay ngược lại 180° . Khoảng cách thực tế của các quỹ đạo dao động từ 104 m đến 171 m, trong khi giá trị ước tính tương ứng chỉ sai lệch rất nhỏ, với độ khác biệt nằm trong khoảng từ 0.46 m đến 1.22 m. Sai số khác biệt trung bình chỉ 0.818 m, cho thấy thuật toán ước tính quãng đường có sự sai lệch không đáng kể. Đặc biệt, các quỹ đạo có chiều dài lớn hơn như xanh dương (162 m) và đỏ (171 m) có sai lệch tuyệt đối cao hơn một chút, điều này phù hợp với đặc tính tích lũy sai số của các hệ thống định vị quán tính khi quãng đường di chuyển tăng.

Bảng 3.4: Ước tính khoảng cách di chuyển và thống kê sai số tích lũy

Phương pháp/quỹ đạo	Cam	Đen	Vàng	Xanh dương	Đỏ	Trung bình
Khoảng cách (m)	104	143	146	162	171	—
Ước tính (m)	103.54	142.37	145.2	160.78	170.02	—
Khác biệt (m)	0.46	0.63	0.8	1.22	0.98	0.818
MAE (cm)	0.523	0.521	0.506	0.645	0.676	0.574
MSE (cm ²)	0.753	0.678	0.776	0.977	1.011	0.839
SD%	0.583	0.539	0.774	0.881	0.631	0.682
MAE%	0.442	0.441	0.548	0.761	0.573	0.553

Xét theo các chỉ số thống kê sai số, giá trị MAE trung bình đạt 0.574 cm và MSE trung bình đạt 0.839 cm², cho thấy sai số vị trí theo từng bước là rất nhỏ. Các quỹ đạo cam, đen và vàng có MAE khá tương đồng (khoảng 0.50–0.52 cm), trong khi hai quỹ đạo dài hơn là xanh dương và đỏ có MAE cao hơn (0.645 cm và 0.676 cm). Xu hướng này phản ánh việc sai số có xu hướng tăng nhẹ theo chiều dài quỹ đạo do hiện tượng tích lũy sai số cảm biến và sai số ước lượng hướng di chuyển. Tuy nhiên, mức sai số vẫn duy trì ở mức thấp, chứng tỏ phương pháp xử lý tín hiệu và cơ chế hiệu chỉnh trong hệ thống hoạt động hiệu quả.

Các chỉ số sai số tương đối cũng củng cố nhận định trên. Độ lệch chuẩn tương đối (SD%) trung bình đạt 0.682%, trong khi MAE% trung bình chỉ ở mức 0.553%. Giá trị phần trăm sai số thấp trên tất cả các quỹ đạo cho thấy độ ổn định của hệ thống định vị trong các điều kiện di chuyển khác nhau. Ngay cả ở quỹ đạo có sai số tương đối lớn nhất (xanh dương), MAE% cũng chỉ đạt 0.761%, cho thấy mức sai lệch so với quãng đường thực vẫn rất nhỏ. Điều này chứng minh rằng phương pháp đề xuất có khả năng duy trì độ chính xác cao và ổn định khi áp dụng cho các quỹ đạo có chiều dài và hình dạng khác nhau.

Kết quả thống kê cho thấy hệ thống định vị có độ chính xác cao, sai số tích lũy thấp và tính ổn định tốt trên nhiều quỹ đạo thử nghiệm. Sai số tuyệt đối nhỏ hơn 1 m trên các quãng đường hơn 100–170 m và sai số tương đối dưới 1% là những chỉ số tích cực, cho thấy phương pháp xử lý tín hiệu và mô hình ước lượng được đề xuất có tiềm năng ứng dụng hiệu quả trong các hệ thống định vị trong nhà dành cho lực lượng cứu hộ hoặc lính cứu hỏa, nơi yêu cầu độ chính xác và độ tin cậy cao trong môi trường không có GPS.

Trong các nghiên cứu trước đây, việc ước tính quãng đường di chuyển thường dựa vào việc đếm số bước kết hợp với bảng tra thống kê độ dài bước tương ứng với từng mức tốc độ (chậm, trung bình, nhanh) [75, 79]. Phương pháp này giả định rằng độ dài bước chân là hằng số đối với mỗi người tại mỗi tốc độ, từ đó

nhân với số bước để tính quãng đường. Tuy nhiên, giả định này khó phản ánh chính xác chuyển động thực tế vì độ dài bước phụ thuộc vào nhiều yếu tố như thể trạng, dáng đi, tải trọng mang theo, trạng thái mệt mỏi hoặc đặc thù thao tác của lính cứu hỏa trong điều kiện khẩn cấp.

Nhằm khắc phục nhược điểm trên, nghiên cứu này đề xuất một phương pháp hợp nhất dữ liệu từ IMU và tính toán khoảng cách di chuyển hệ thống thiết bị đeo tích hợp công nghệ UWB, nhằm ước lượng chính xác quãng đường di chuyển theo thời gian thực. Cụ thể, bộ đếm bước sử dụng tín hiệu gia tốc từ IMU giúp xác định chính xác thời điểm diễn ra từng bước chân. Thông tin này đóng vai trò quan trọng cho thuật toán tính toán khoảng cách thật giữa 2 chân.

Bảng 3.5: So sánh một số phương pháp định vị nhân viên cứu hộ trong nhà trong các tình huống khẩn cấp

Nghiên cứu	Công nghệ	Phương pháp	Điều kiện thử nghiệm	Sai số và thách thức
Nghiên cứu này	IMU, UWB, khí áp kế (thắt lưng) và UWB (cổ chân)	- IMU đếm bước + sai chân từ UWB giữa các chân. - 8 lớp HAR và 8 lớp di chuyển. - Ước tính độ cao từ khí áp kế kết hợp IMU và HAR.	- Phát hiện bước và ước tính độ dài bước dựa trên thời điểm bước. - ML trên vi điều khiển cho HAR. - DT cho hướng di chuyển. - Bộ lọc Kalman.	- HAR 98.38%, hướng di chuyển 100%. - Lỗi định vị < 2 m. - Ổn định trong trạng thái đi bộ. - Sai số UWB do khó xác định thời điểm bước.
Yuan và nhóm nghiên cứu [60]	IMU 6-DoF (bàn chân)	- Tính khoảng cách và độ cao bằng gia tốc kế. - Xác định hướng bằng con quay hồi chuyển.	- Tích phân kép INS. - Tối ưu hóa rời rạc và ZUPT.	- Sai số tương đối < 1% (sai số tuyệt đối lên tới 2.5 m). - Độ trôi tích lũy theo thời gian. - Dáng đi thay đổi.
Cinaz và Kenn [74]	IMU 6-DoF và máy quét laser (gắn đầu)	- Định vị và lập bản đồ đồng thời (Simultaneous Localization and Mapping - SLAM). - Laser quét hiệu chỉnh theo hướng đầu (IMU). - Vận tốc bước giả định từ IMU.	- Biến đổi góc 3D thành mặt phẳng quét.	- 0.7 m trong phòng có vật cản. - 6 đến 12 m trong hành lang mở. - 18 m trong hành lang trống. - Phụ thuộc đặc trưng môi trường. - Lỗi do chuyển động đầu phức tạp.

Bên cạnh đó, nhiều nghiên cứu trong lĩnh vực định vị lính cứu hỏa cũng khai thác các kỹ thuật cảm biến đeo không phụ thuộc hạ tầng để đảm bảo tính tự chủ và khả năng triển khai trong môi trường khẩn cấp. Bảng 3.5 so sánh mô hình đề xuất với mô hình định vị dựa trên SLAM với máy quét laser đeo đầu, và định vị lai IMU-RFID.

Yuan [60] đề xuất một hệ thống định vị độc lập hoàn toàn dựa trên IMU gắn ở bàn chân, kết hợp thuật toán phát hiện bước, ước lượng vận tốc và hiệu chỉnh bằng kỹ thuật ZUPT. Nhờ xác định chính xác thời điểm chân đứng yên, hệ thống có thể hạn chế sai số tích lũy khi tích phân vận tốc. Thử nghiệm thực tế với các tình huống đa dạng (đi bộ, chạy, leo cầu thang, địa hình đồ nát) cho thấy sai số tương đối thấp (khoảng $< 1\%$, sai số tuyệt đối lên đến 2.5 m) trên các hành trình ngắn và vừa. Tuy nhiên, khi kéo dài thời gian hoạt động, hệ thống vẫn gặp vấn đề với trôi tích lũy, đặc biệt trong điều kiện không có thông tin hiệu chỉnh từ bản đồ hay hạ tầng. Ngoài ra, hướng chuyển động dễ bị sai lệch nếu không có hỗ trợ từ cảm biến từ trường hoặc các mô hình bổ sung.

Cinaz và Kenn [74] với hệ thống HeadSLAM kết hợp IMU và máy quét laser gắn trên đầu nhằm thực hiện đồng thời định vị và lập bản đồ môi trường 2D thông qua thuật toán SLAM dựa trên bộ lọc hạt Rao-Blackwellized. Phương pháp này có ưu điểm lớn là không phụ thuộc vào bản đồ có sẵn hay hạ tầng định vị, đồng thời tận dụng kỹ thuật scan matching để tăng cường khả năng xác định vị trí trong thời gian thực. Tuy nhiên, sai số định vị tăng đáng kể trong môi trường hành lang đơn điệu hoặc không có vật cản đặc trưng, với độ lệch có thể lên đến 18 m (cụ thể 0.7 m trong phòng có vật cản, 6 đến 12 m trong hành lang mở, 18 m trong hành lang trống). Hạn chế chủ yếu nằm ở việc quét laser bị ảnh hưởng mạnh bởi hướng chuyển động đầu, chuyển động holonomic không ổn định, và không có cơ chế đóng vòng hiệu quả—điều vốn rất quan trọng trong các hành trình dài hoặc khép kín.

De Cillis [81] đề xuất hệ thống lai IMU-RFID với chiến lược hiệu chỉnh vị trí dựa trên thông tin định vị tích hợp trong thẻ RFID cài sẵn tại các vị trí chiến lược trong toà nhà. Với thiết kế bộ lọc Bayes hai pha: pha dự đoán dựa trên bước đi PDR từ dữ liệu quán tính và pha hiệu chỉnh dựa trên thông tin ngữ cảnh được trích xuất từ thẻ RFID gắn sẵn tại các vị trí chiến lược, hệ thống có thể duy trì sai số định vị dưới 2.6 m kể cả trong hành trình kéo dài, miễn là thẻ RFID không bị phá hủy hoặc mất tín hiệu và dưới 4 m chỉ với PDR. Tuy vậy, việc phụ thuộc vào các nút RFID khiến hệ thống dễ bị ảnh hưởng nếu thẻ bị hỏng, lắp sai hoặc không đủ mật độ phủ. Bên cạnh đó, không giống như cảm biến gắn ở bàn chân, IMU gắn thắt lưng không cho phép áp dụng các kỹ thuật ZUPT, từ đó làm tăng rủi ro tích lũy sai số khi di chuyển liên tục mà không có hiệu chỉnh.

So với các nghiên cứu trên, phương pháp đề xuất trong nghiên cứu này lựa chọn chiến lược hợp nhất IMU-UWB để trực tiếp đo khoảng cách giữa hai chân—qua đó tính toán độ dài bước trong thời gian thực thay vì dựa vào bảng

thống kê. Cách tiếp cận này không chỉ đảm bảo độ chính xác cao (< 2 m) trong hành trình tuyến tính mà còn cải thiện khả năng thích nghi với thay đổi tư thế, sai chân và trạng thái hoạt động của lính cứu hoả. Hệ thống cũng cho thấy khả năng triển khai thực tế cao nhờ kích thước mô hình nhỏ, dễ nhúng và không yêu cầu bất kỳ hạ tầng bên ngoài nào. Nhờ đó, phương pháp đề xuất đã khắc phục được hạn chế quan trọng của các nghiên cứu trước: hoặc chưa có biện pháp hiệu chỉnh sai số tích lũy theo thời gian (Yuan [60]), hoặc phụ thuộc vào môi trường (HeadSLAM [74], De Cillis [81]).

3.2.2.2. Độ chính xác trong xác định tầng của toà nhà

Đối với các trường hợp di chuyển phức tạp kết hợp giữa mặt phẳng và cầu thang, nghiên cứu áp dụng chiến lược phân tách bài toán dựa trên ngữ cảnh hoạt động để tối ưu hóa độ chính xác định vị. Cụ thể, trong quá trình di chuyển theo phương thẳng đứng (lên/xuống cầu thang), hệ thống không tập trung vào việc tính toán chi tiết chiều dài bước chân như trên mặt phẳng, mà ưu tiên xác định vị trí tầng. Thuật toán RFAR sẽ phát hiện trạng thái di chuyển cầu thang, kết hợp với dữ liệu áp suất khí quyển đã lọc nhiễu để ước lượng độ cao. Khi độ cao tích lũy tương ứng với chiều cao một tầng, vị trí của lính cứu hoả sẽ được tự động cập nhật sang mặt bằng tầng mới, giúp loại bỏ sự phụ thuộc vào sai số tích lũy của bộ đếm bước trong giai đoạn này. Bên cạnh đó, để giới hạn độ phức tạp của bài toán theo dõi quỹ đạo 2D và giảm thiểu sai số trôi hướng của cảm biến quán tính, mô hình di chuyển của lính cứu hoả được giả định luôn thay đổi hướng di chuyển trước khi bước. Chính vì vậy, các nội dung thực nghiệm tại mục này tập trung kiểm chứng độ chính xác của bộ đếm bước và phép đo khoảng cách liên chi UWB trên mặt phẳng ngang, coi đây là tham số nền tảng quyết định độ tin cậy của hệ thống trước khi tích hợp vào mô hình định vị 3D tổng thể.

Để kiểm chứng toàn diện hiệu năng của thuật toán đề xuất trong việc xác định vị trí tầng dưới tác động của môi trường hoả hoạn giả lập, nghiên cứu tiến hành thử nghiệm tại toà nhà A4 (ĐH Phenikaa) gồm 7 tầng và chiều cao tối thiểu mỗi tầng 3 m). Hệ thống được đánh giá thông qua 3 kịch bản thử nghiệm nhằm khảo sát độ chính xác của giải thuật xác định tầng và khả năng giải quyết vấn đề nhiễu áp suất do ảnh hưởng biến động nhiệt. Trong quá trình thực nghiệm, một thiết bị thổi nhiệt sẽ tác động ngẫu nhiên vào cảm biến áp suất MS5837 và quá trình thống kê các điều kiện thử nghiệm được trình bày trong các Bảng 3.6, 3.7, và 3.8.

Bảng 3.6 trình bày hoạt động của thuật toán bù áp suất theo nhiệt độ (δP) và cơ chế xác định tầng tại hai mốc độ cao khác nhau (tầng 1 và tầng 7). Khi nhiệt độ môi trường tăng từ 30°C lên 70°C, cảm biến áp suất ghi nhận sự thay đổi khí áp do biến động nhiệt cục bộ, dẫn đến sai số đo lường đáng kể. Cụ thể, tại tầng 7, dựa trên giá trị áp suất thu được khi nhiệt độ đạt 70°C, độ cao ban đầu (H_{raw}) bị trôi mạnh và tăng lên tới 39.7 m, sai lệch hơn 21 m so với độ cao thực tế.

Tuy nhiên, sau khi áp dụng thuật toán bù và hiệu chỉnh, độ cao ước tính (H_k^*) vẫn duy trì tính ổn định tốt. Tại tầng 1, sai số của H_k^* chỉ dao động dưới 0.4 m. Trong khi đó, tại tầng 7, giá trị H_k^* đạt 18.6 m và chênh 0.6 m so với thực tế. Kết quả này cho thấy mô hình đề xuất ít bị ảnh hưởng thuộc vào áp suất đo được từ cảm biến nhờ khả năng triệt tiêu hiệu quả nhiễu do nhiễu nhiệt. Điều này giúp hạn chế xảy ra hiện tượng chuyển tầng mất kiểm soát khi người dùng đứng yên hoặc di chuyển trong cùng một mặt sàn dưới điều kiện nhiệt độ biến động.

Bảng 3.6: Thử nghiệm xác định tầng 1 (T1) và tầng 7 (T7), toà nhà A4, ĐH Phenikaa khi sự thay đổi nhiệt độ được tạo ra trong lúc tình nguyện viên đang hoạt động ở 1 tầng cố định.

F_k	S_{RFAR}	T_{meas}	h_{F_k}	P_{raw}	H_{raw}	δP	$Bias_k$	H_k^*	ΔF_k
T1	ST	30	0.0	1013.25	0.0	0.00	0.0	0.0	0
T1	WA	50	0.0	1012.35	7.5	-0.55	7.3	0.2	0
T1	SI	70	0.0	1010.70	21.5	-1.45	21.1	0.4	0
T7	LY	30	18.0	1011.09	18.0	0.00	0.0	18.0	0
T7	WA	50	18.0	1010.19	25.6	-0.55	6.9	18.3	0
T7	ST	70	18.0	1008.54	39.7	-1.45	20.6	18.6	0

h_{F_k} , H_{raw} , $Bias_k$, và H_k^* đơn vị mét; P_{raw} và δP đơn vị hPa; T_{meas} đơn vị °C.

Giải thuật xác định chuyển tầng dựa trên sự hợp nhất dữ liệu: áp suất khí quyển, nhận dạng hành động (S_{RFAR}) và số bước chân tích lũy khi đi cầu thang (C_{seq}). Bảng 3.7 trình bày các kết quả thực nghiệm xác định tầng với điều kiện không có nhiễu nhiệt. Quan sát kết quả cho thấy giá trị áp suất ban đầu (P_{raw}) và độ cao ban đầu H_{raw} biến thiên phù hợp với hướng di chuyển theo chiều cao. Khi người dùng di chuyển từ T2 lên tầng T3, H_{raw} tăng từ 3.3 m lên 6.2 m tương ứng với chênh cao thực tế, và ngược lại giảm về 3.3 m khi di chuyển xuống. Hệ số bù $Bias_k$ duy trì giá trị nhỏ và ổn định (0.1–0.2 m), qua đó độ cao hiệu chỉnh H_k^* có thể bám sát độ cao thực tế của từng tầng. Sai số của H_k^* luôn nằm trong khoảng dưới 0.2 m, nhỏ hơn đáng kể so với chiều cao tối thiểu mỗi tầng là 3 m.

Bảng 3.7: Di chuyển các tầng trong toà nhà A4 trong điều kiện nhiệt độ thường ($T_{meas} = 30^\circ\text{C}$).

S_{RFAR}	h_{F_k}	P_{raw}	H_{raw} (m)	δP	C_{seq}	$Bias_k$	H_k^*	ΔF_k	F_k
US	$0 \rightarrow 3$	1012.85	3.3	0.0	22	-	3.2	+1	T1→T2
WA	3	1012.85	3.3	0.0	0	0.2	3.1	0	T2
US	$3 \rightarrow 6$	1012.50	6.2	0.0	23	-	6.0	+1	T2→T3
WA	6	1012.50	6.2	0.0	1	0.3	6.0	0	T3
DS	$6 \rightarrow 3$	1012.85	3.3	0.0	21	-	3.1	-1	T3→T2

h_{F_k} , H_{raw} , $Bias_k$, và H_k^* đơn vị mét; P_{raw} và δP đơn vị hPa; C_{seq} : Số bước đi cầu thang.

Số liệu thực nghiệm cho thấy sự tương quan chặt chẽ giữa các biến trạng thái, sự kiện thay đổi tầng ($\Delta F_k = \pm 1$) được xác định khi thoả mãn đồng thời điều kiện cần hành động leo cầu thang (US/DS) và điều kiện đủ là số bước chân C_{seq} vượt ngưỡng xác thực (trong thử nghiệm là 20 bước). Tại các thời điểm tình nguyện viên di chuyển ngang trên tầng (trạng thái *WA* tại T2), hệ thống đã nhận diện đúng việc chưa chuyển tầng và tự hiệu chỉnh độ cao $Bias_k = 0.2$, đồng thời cơ chế cập nhật tham số bù ($Bias_k$) được thực hiện. Do đó trong điều kiện thường, mô hình có khả năng xác định tốt vị trí tầng trong nhà và sai số khi xác định độ cao dưới 0.2 m.

Bảng 3.8 thống kê kết quả khi khảo sát khả năng thích nghi của hệ thống trong điều kiện phức tạp với biên độ nhiệt cao và hành trình di chuyển liên tục qua nhiều tầng. Trong thử nghiệm này, việc bù áp suất theo sự biến thiên nhiệt và cơ chế cập nhật tham số bù ($Bias_k$) linh hoạt đóng vai trò quyết định trong việc duy trì độ chính xác của ước lượng độ cao H_k^* . Tại các thời điểm nhiệt độ tăng đột biến mô phỏng đám cháy như tầng 2 (65°C) hay tầng 7 (70°C), dù độ cao ban đầu H_{raw} sai lệch lớn so với thực tế do ảnh hưởng tác động nhiệt độ lên cảm biến, thuật toán bù sai số δP kết hợp bộ lọc Kalman đã đưa giá trị H_k về ngưỡng tiệm cận thực tế, loại bỏ hiệu quả nhiễu nhiệt.

Độ tin cậy của hệ thống được củng cố nhờ sự kết hợp xử lý theo nhận dạng hành động: tham số $Bias_k$ được sử dụng trong suốt quá trình leo hoặc xuống thang (US/DS) để tránh các hiệu chỉnh sai lầm khi thiếu sự tham chiếu, và chỉ được tính toán cập nhật khi hệ thống phát hiện trạng thái khác như *WA*, *ST*... tại tầng cố định. Ví dụ tại tầng 6, khi phát hiện độ cao đo được là 16 m, lệch so với bản đồ tham chiếu là 15 m, hệ thống đã tự động hiệu chỉnh $Bias_k$ từ 0.4 lên 0.7. Sự điều chỉnh này giúp các phép đo tại tầng 7 và quá trình đi xuống sau đó bám sát độ cao thực tế, giúp định vị tầng (F_k) đạt độ chính xác cao.

Bảng 3.8: Thử nghiệm xác định tầng trong nhà tình nguyện viên di chuyển ở cầu thang với việc mô phỏng nhiễu nhiệt độ từ đám cháy.

S_{RFAR}	T_{meas}	h_{F_k}	P_{raw}	H_{raw}	δP	C_{seq}	H_k	$Bias_k$	H_k^*	ΔF_k	F_k
ST	32	0.0	1013.20	0.4	-0.05	0	0.4	0.4	0.0	0	T1
US	65	3.0	1011.00	18.9	-1.90	23	2.9	-	2.5	+1	T2
US	42	6.0	1011.85	11.8	-0.65	21	6.6	-	6.2	+1	T3
WA	42	6.0	1011.85	11.8	-0.65	0	6.6	0.4	6.2	0	T3
US	68	9.0	1010.00	27.3	-2.10	24	9.8	-	9.4	+1	T4
US	62	12.0	1010.00	27.3	-1.75	20	12.8	-	12.4	+1	T5
US	50	15.0	1010.25	25.1	-1.10	22	16.0	-	15.6	+1	T6
WA	50	15.0	1010.25	25.1	-1.10	0	16.0	0.7	15.3	0	T6
US	70	18.0	1008.70	38.3	-2.20	25	19.3	-	18.6	+1	T7
DS	65	15.0	1009.50	31.5	-1.90	22	15.8	-	15.1	-1	T6
DS	38	12.0	1011.30	16.4	-0.45	23	12.5	-	11.8	-1	T5

h_{F_k} , H_{raw} , $Bias_k$, H_k^* : mét; P_{raw} , δP : hPa; T_{meas} : °C.

3.2.3. Đánh giá tiêu thụ năng lượng và thời gian hoạt động

3.2.3.1. Năng lượng tiêu thụ

Bảng 3.9: Dòng tiêu thụ trung bình của các trạng thái hoạt động

Trạng thái	Mô tả tác vụ	Dòng tiêu thụ	Ghi chú
Chế độ chờ	Vì điều khiển hoạt động, Bluetooth chờ kết nối	~ 45 mA	Dòng điện nền của vi xử lý và mạch nguồn.
Thu thập dữ liệu	Đọc tín hiệu từ các cảm biến gia tốc, con quay hồi chuyển, áp suất	~ 55 mA	Tăng nhẹ do kích hoạt các giao tiếp ngoại vi (I2C/SPI).
Xử lý thuật toán	Tính toán đặc trưng và chạy mô hình Rừng ngẫu nhiên	~ 65 mA	Dòng điện đạt đỉnh khi CPU xử lý dữ liệu trong thời gian ngắn (~ 9.6 ms).
Truyền thông UWB	Phát và thu các gói tin tín hiệu định vị	~ 140 mA	Mức tiêu thụ năng lượng cao nhất, phụ thuộc vào tần suất phát tin.

Thực nghiệm đo dòng điện tiêu thụ (I_{state}) được thực hiện bằng cách sử dụng thiết bị đo dòng chuyên dụng kết nối nối tiếp với nguồn cấp cho thiết bị đeo. Kết quả đo đặc trưng bình trong 1 chu kỳ hoạt động được trình bày tại Bảng 3.9. Hệ thống được chia thành 04 trạng thái hoạt động chính để đánh giá mức độ tiêu hao năng lượng của từng tác vụ:

- Trạng thái chờ: vì điều khiển bật, kết nối Bluetooth duy trì, nhưng không thu thập dữ liệu cảm biến và không phát UWB.

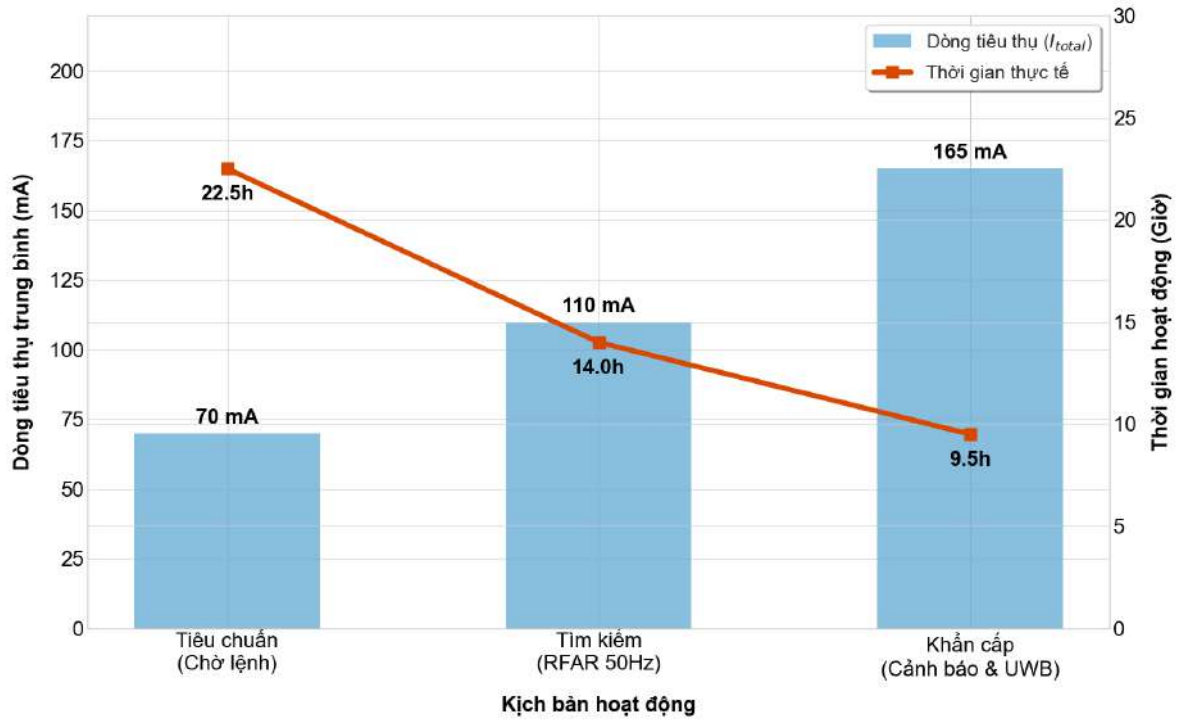
- Thu thập dữ liệu: đọc dữ liệu từ IMU và khí áp kế ở tần số 50 Hz.
- Suy luận mô hình: thực thi các giải thuật nhận dạng hành động và bước chân.
- Truyền nhận UWB: module DW3000 thực hiện quy trình truyền nhận để đo khoảng cách.

3.2.3.2. Ước tính thời gian hoạt động

Thời gian hoạt động thực tế (T_{hours}) được ước tính dựa trên dung lượng pin ($C_{battery}$) khả dụng sau khi trừ đi hệ số hao hụt hiệu suất chuyển đổi nguồn ($\eta \approx 0.85$) và dòng tiêu thụ trung bình tổng hợp (I_{total}) của từng kịch bản:

$$T_{hours} = \frac{C_{battery} \times \eta}{I_{total}} \quad (3.20)$$

Nghiên cứu thiết lập 03 thử nghiệm thực tế để kiểm chứng độ bền của pin: i> lính cứu hoả ở trạng thái chờ lệnh; ii> hoạt động tìm kiếm: lính cứu hoả đang di chuyển tìm kiếm, RFAR hoạt động liên tục với tần số 50 Hz; iii> cảnh báo khi phát hiện sự cố (ngã/bất động). Hệ thống truyền dữ liệu liên tục và phát tín hiệu định vị liên tục để đội cứu hộ xác định vị trí.



Hình 3.14: Thời gian hoạt động ở các chế độ vận hành

Thử nghiệm xả pin thực tế được thống kê trong Hình 3.14. Trong khi chế độ chờ duy trì dòng tiêu thụ ở mức thấp (~ 70 mA) giúp thiết bị hoạt động bền bỉ

hơn 22 giờ, thì việc kích hoạt các thuật toán nhận dạng RFAR và module truyền thông UWB liên tục trong 2 chế độ còn lại khiến năng lượng tiêu hao tăng đáng kể, lần lượt đạt mức trung bình 110 mA và 165 mA. Do đó, thiết bị có thể hoạt động liên tục trên 14 giờ ở chế độ tìm kiếm và khoảng 9.5 giờ trong điều kiện truyền tin liên tục cường độ cao. So với thời gian trung bình của một ca trực chiến đấu hoặc một nhiệm vụ cứu nạn 6-8 giờ, dung lượng pin 2000 mAh hoàn toàn đáp ứng được yêu cầu năng lượng của hệ thống, đặc biệt phù hợp và an toàn cho các tình huống khẩn cấp kéo dài. Việc tối ưu hóa thuật toán TinyML giúp giảm thời gian CPU hoạt động ở mức tải cao, đóng góp quan trọng vào việc tiết kiệm năng lượng tổng thể.

3.2.4. Đánh giá ảnh hưởng của điều kiện môi trường

Thiết bị đeo dành cho lính cứu hỏa thường hoạt động trong môi trường có nhiệt độ cao, độ ẩm lớn, va đập và khói dày đặc. Khi được đặt bên trong bộ quần áo bảo hộ, thiết bị được giảm thiểu ảnh hưởng từ môi trường do không tiếp xúc trực tiếp với ngọn lửa nhưng chịu ảnh hưởng từ nhiệt tích tụ và độ ẩm tăng cao. Theo nghiên cứu [99], ngưỡng nhiệt gây bỏng da của con người gây đau rất ở 44-50°C và bỏng ở nhiệt độ cao hơn. Trong khi đó, vỏ thiết bị đeo được thiết kế từ chất liệu PETG¹ (Polyethylene Terephthalate Glycol) nên nó có độ bền cao, chống tĩnh điện, chống thấm và kháng hóa chất tốt trong tầm nhiệt độ lên đến 70°C tại áp suất 0.455 MPa. Do đó, thiết bị đeo có khả năng hoạt động tốt trong khoảng nhiệt độ an toàn cho các hoạt động cứu hộ cứu nạn của lính cứu hỏa.

Mặc dù thiết bị không tiếp xúc trực tiếp với môi trường bên ngoài nhưng mồ hôi, hơi ẩm và mồ hôi bên trong quần áo bảo hộ vẫn có thể dẫn đến hiện tượng ngưng tụ ẩm bên trong thiết bị. Do đó, thiết bị được hướng đến thiết kế đạt chuẩn IP67 về khả năng kháng nước và kháng bụi như sau:

- Cấu trúc ghép vỏ dạng nắp – thân có rãnh gioăng liên tục, tránh các mặt phẳng ghép ngắgiăng t quăng.
- Sử dụng gioăng đàn hồi được nén với lực ổn định, đảm bảo duy trì độ kín ngay cả khi chịu rung động, va đập hoặc giãn nở nhiệt.
- Giảm thiểu số lượng lỗ xuyên vỏ (cổng sạc, nút bấm, vít) giúp giảm rủi ro ẩm xâm nhập qua các khe hở này.

Ngoài ra, hiện tượng ngưng tụ hơi nước bên trong thiết bị có thể xảy ra do sự chênh lệch nhiệt độ lớn giữa linh kiện phát nhiệt và môi trường bên ngoài.

¹https://after-support.flashforge.jp/uploads/datasheet/tds/PETG_ESD_TDS_EN.pdf (Accessed: 12/01/2026)

Do đó, giải pháp áp dụng lớp phủ bảo vệ (gốc Acrylic, Silicone hoặc Urethane) trực tiếp lên bo mạch in (PCB) sau khi hàn và lắp ráp linh kiện.

3.2.5. *Đánh giá độ trễ và khả năng đáp ứng thời gian thực của hệ thống*

Tính thời gian thực của hệ thống được phân tích dựa trên tổng thời gian xử lý (Δt_{total}):

$$\Delta t_{total} = T_{data} + T_{feat} + T_{infer} + T_{trans}, \quad (3.21)$$

trong đó, T_{data} là khoảng thời gian hoàn thành một bước chân để thu thập đủ dữ liệu quán tính và tính toán khoảng cách, T_{feat} là thời gian xử lý tín hiệu và trích xuất đặc trưng, T_{infer} là độ trễ dự đoán của mô hình (kích thước giới hạn là 1 MB), và T_{trans} là khoảng thời gian gói tin dữ liệu được gửi đi hoàn tất. Các giá trị độ trễ thành phần được xác định cụ thể như sau:

- T_{data} là thành phần chiếm tỷ trọng lớn nhất do phụ thuộc vào cửa sổ lấy mẫu (window size) để đảm bảo độ chính xác cho dữ liệu quán tính và di chuyển. Đối với hoạt động đi bộ thông thường, thời gian thực hiện một bước chân dao động trong khoảng: $0.34 \text{ s} \leq T_{data} \leq 0.5 \text{ s}$.
- T_{feat} được xác định dựa trên thời gian thực hiện các phép toán lọc nhiễu và tính toán vector đặc trưng đầu vào cho mô hình $T_{feat} < 10000 \mu\text{s} = 10 \text{ ms}$.
- T_{infer} cho RF với giới hạn kích thước 1 MB, được tối ưu hóa, độ trễ suy luận $T_{infer} \approx 1 \text{ ms}$.
- T_{trans} là thời gian đẩy gói tin kết quả sang module truyền thông là rất nhỏ $T_{trans} \approx 1.6 \mu\text{s} \approx 0.0016 \text{ ms}$

Do đó, thời gian trễ do việc xử lý tính toán và truyền tin $T_{feat} + T_{infer} + T_{trans} \approx 11 \text{ ms}$ chỉ chiếm khoảng 2% đến 3% tổng chu kỳ của một sải bước chân. Hệ thống có thể hoàn thành việc xử lý và truyền kết quả gần như tức thì ngay khi bước chân kết thúc.

3.2.6. *So sánh với với nghiên cứu liên quan*

Để làm rõ hiệu quả của mô hình đề xuất, luận án so sánh với ba nghiên cứu về IPS sử dụng Wi-Fi: hệ thống định vị dựa trên Transformer sử dụng Wi-Fi CSI (Channel State Information) và DoA của Zhang và nhóm nghiên cứu [63], hệ thống định vị Wi-Fi RTT (Round Trip Time) của Ma và nhóm nghiên cứu [69], và khung đánh giá định vị RF cho ứng cứu khẩn cấp của Li và nhóm nghiên

cứu [68]. Sự so sánh được thực hiện trên ba khía cạnh cốt lõi: mức độ phụ thuộc hạ tầng, độ ổn định trong môi trường biến động nhiệt/khói, và tối ưu hóa tài nguyên tính toán.

3.2.6.1. Mức độ phụ thuộc vào cơ sở hạ tầng

Các nghiên cứu [63, 68, 69] hướng đến xây dựng giải pháp dựa trên cơ sở hạ tầng có sẵn thu phát tín hiệu cố định. Cụ thể, TIPS [63] yêu cầu hệ thống điểm truy cập (Access Point - AP) để thu thập thông tin CSI, trong khi nghiên cứu [69] phụ thuộc vào các AP hỗ trợ chuẩn IEEE 802.11mc để đo khoảng cách khứ hồi (RTT). Li và nhóm nghiên cứu [68] đề xuất mạng lưới cảm biến vô tuyến gắn cố định trong tòa nhà. Hạn chế mang tính hệ thống của các phương pháp này là tính rủi ro cao trong sự cố hỏa hoạn. Khi nguồn điện bị ngắt hoặc các trạm thu phát bị phá hủy bởi nhiệt độ cao, hệ thống định vị sẽ bị vô hiệu hóa hoàn toàn. Khắc phục nhược điểm này, hệ thống đề xuất áp dụng kỹ thuật IPS tích hợp giải pháp sử dụng UWB đo khoảng cách sai phân và hệ thống IMU/khí áp kế ngay trên thiết bị đeo, giải pháp này loại bỏ sự phụ thuộc vào tín hiệu từ môi trường bên ngoài, đảm bảo tính sẵn sàng cao nhất cho lính cứu hỏa ngay cả khi hạ tầng cơ sở tòa nhà bị mất khả năng hoạt động. Tuy nhiên, Hệ thống đề xuất đòi hỏi phải có sơ đồ tòa nhà để thiết lập bản đồ 3D và kèm theo chi tiết kích thước cơ bản để hỗ trợ hiệu chỉnh độ chính xác của giải thuật xác định vị trí.

3.2.6.2. Độ tin cậy của hệ thống

Môi trường hỏa hoạn đặc trưng bởi sự thay đổi cấu trúc vật lý và biến động nhiệt độ, áp suất, gây ảnh hưởng lớn đến các phương pháp dựa trên đặc trưng tín hiệu vô tuyến. Phương pháp TIPS [63] coi quỹ đạo di chuyển như một chuỗi dữ liệu ngôn ngữ để xử lý bằng mô hình Transformer, nhưng mô hình này đòi hỏi dữ liệu huấn luyện khớp với môi trường cố định về hạ tầng; sự thay đổi hạ tầng do sập đổ hoặc mất điện sẽ làm sai lệch hoặc vô hiệu hóa mô hình truyền sóng. Tương tự, Li và nhóm nghiên cứu [68] chỉ ra tín hiệu vô tuyến bị suy hao mạnh và chịu nhiễu đa đường nghiêm trọng trong điều kiện vật cản phức tạp. Ngược lại, hệ thống đề xuất sử dụng UWB tầm ngắn giữa hai chân với cơ chế đo trực tiếp, giảm thiểu tối đa tác động của nhiễu đa đường so với Wi-Fi RTT tầm xa [69]. Đặc biệt, nghiên cứu này giải quyết bài toán định vị 3D trong môi trường nhiệt độ cao thông qua giải thuật bù sai số áp suất theo nhiệt kết hợp bộ lọc Kalman, một yếu tố then chốt giúp duy trì độ chính xác định vị tầng mà các nghiên cứu [63, 69] về định vị 2D chưa giải quyết triệt để.

3.2.6.3. Độ phức tạp tính toán và khả năng triển khai thực tế

Xét về tài nguyên và độ phức tạp, kiến trúc Transformer [63] đòi hỏi tài nguyên tính toán lớn, tạo gánh nặng về năng lượng và độ trễ khi triển khai trên các thiết bị nhúng đeo người. Phương pháp Wi-Fi RTT [69] tuy đạt độ chính xác mức cm nhưng yêu cầu phần cứng chuyên biệt hỗ trợ chuẩn 802.11mc ở cả hai đầu phát và thu, gây khó khăn cho việc áp dụng đại trà ngay lập tức. Trong khi đó, hệ thống đề xuất sử dụng thuật toán RF đã được tối ưu hóa cho vi điều khiển giới hạn hiệu năng. Kết quả thực nghiệm được thống kê trong Bảng 3.9 và Hình 3.14 cho thấy hệ thống đạt thời gian hoạt động liên tục trên 9 giờ và độ trễ xử lý thấp (dưới 11 ms). Điều này chứng minh sự cân bằng tốt giữa độ chính xác định vị, tiết kiệm năng lượng và khả năng triển khai thực tế so với các mô hình phức tạp trong các nghiên cứu [63, 69].

3.3. Kết luận chương 3

Chương 3 đã trình bày mô hình hỗ trợ các chiến sĩ cứu hoả trong quá trình làm nhiệm vụ. Hệ thống có khả năng định vị trong nhà khi xảy ra tình huống khẩn cấp nhờ hướng tiếp cận kết hợp giữa PDR và UWB. Nhờ đó, khi lính cứu hoả gặp nạn, thông tin về trạng thái trước và sau khi gặp nạn, kèm theo vị trí tương đối, sẽ được gửi đến người chỉ huy. Điều này vô cùng quan trọng, vì nó giúp người chỉ huy có thể điều phối lực lượng, thực hiện cứu hộ cứu nạn cho các đồng đội kịp thời và chính xác.

Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống hoạt động ổn định với sai số định vị dưới 1 m. Thời gian hoạt động thực tế của thiết bị đáp ứng tốt các yêu cầu về năng lượng trong các nhiệm vụ khẩn cấp kéo dài. Nội dung của chương này đã được công bố trong các công trình [CT4], [CT5] và [CT6]. Trong đó, công trình [CT4] trình bày giải thuật xác định bước chân di chuyển với độ phức tạp thấp, phù hợp cho xử lý dữ liệu thời gian thực. Công trình [CT5] đề xuất giải pháp xác định vị trí trên mặt phẳng 2D. Công trình [CT6] đề xuất mô hình theo dõi vị trí trong toà nhà dựa trên sơ đồ toà nhà và sự kết hợp đa cảm biến IMU-UWB và khí áp kế.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết luận chung.

Trong các tình huống khẩn cấp như cháy nổ hoặc sập đổ công trình, lực lượng cứu hỏa là những người đầu tiên tiếp cận hiện trường để cứu người và kiểm soát nguy hiểm. Tuy nhiên, chính họ lại phải hoạt động trong điều kiện khắc nghiệt, tầm nhìn hạn chế và môi trường nhiệt độ cao. Khi một chiến sĩ cứu hỏa gặp nạn hoặc mất liên lạc, việc xác định chính xác vị trí của họ để kịp thời ứng cứu trở nên vô cùng khó khăn. Trên thực tế, nhiều vụ tai nạn nghiêm trọng đã xảy ra không chỉ do điều kiện nguy hiểm mà còn vì thiếu thông tin về vị trí và trạng thái sinh tồn của nhân viên cứu hộ. Điều này cho thấy nhu cầu cấp thiết về một hệ thống hỗ trợ theo dõi và định vị trong nhà dành cho lính cứu hỏa, nhằm giúp người chỉ huy có thể nắm bắt tình trạng và vị trí của từng thành viên trong thời gian thực. Hệ thống như vậy không chỉ hỗ trợ công tác chỉ huy, phân bổ nhân lực cứu hộ mà còn đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo an toàn cho chính những người làm nhiệm vụ cứu người. Luận án đã tập trung giải quyết vấn đề cấp thiết về giám sát an toàn cho lính cứu hỏa trong môi trường hoạt động khắc nghiệt, nơi các hệ thống định vị vệ tinh không khả dụng. Nghiên cứu đã đề xuất và phát triển thành công một hệ thống tích hợp bao gồm nhận dạng hành động và định vị trong nhà, có khả năng hoạt động độc lập, không phụ thuộc vào cơ sở hạ tầng có sẵn. Hệ thống đóng vai trò thiết yếu trong việc cung cấp thông tin thời gian thực về trạng thái sinh tồn và vị trí của chiến sĩ cho người chỉ huy, góp phần giảm thiểu rủi ro thương vong trong công tác cứu nạn cứu hộ.

Điểm mới của luận án.

Luận án đã đề xuất thuật toán tích hợp cửa sổ trượt thông minh với cơ chế phát hiện chuyển đổi hành động nhằm tối ưu hóa việc phân đoạn tín hiệu và nâng cao chất lượng đặc trưng đầu vào. Từ đó xây dựng hệ thống nhận dạng hành động thời gian thực có độ chính xác và tốc độ phản hồi cao trong môi trường đặc thù của lính cứu hỏa. Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng đề xuất giải thuật xác định bước chân di chuyển có độ phức tạp tính toán thấp dựa trên sự kết hợp dữ liệu từ cảm biến quán tính và băng thông siêu rộng, giúp xây dựng mô hình ước lượng chuyển động người đi bộ hiệu quả để cải thiện tính ổn định và chính xác cho hệ thống định vị, theo dõi vị trí trong nhà.

Để thực hiện các nội dung này, luận án đã xây dựng một tập dữ liệu đầy đủ về các hành động đặc trưng của lính cứu hỏa, tạo nền tảng quan trọng cho các nghiên cứu sâu hơn về nhận dạng hoạt động con người. Từ đó, hệ thống RFAR được xây dựng với độ chính xác trên 96% và được kiểm chứng khả năng tổng

quát hóa trên 3 bộ dữ liệu công khai. Điểm nổi bật là hệ thống này kết hợp kỹ thuật cửa sổ trượt với phát hiện bất thường để cải thiện khả năng xử lý các thay đổi đột ngột và dịch chuyển thời gian của tín hiệu. Nhờ đó, vị trí và thời điểm bắt đầu của cửa sổ trượt được điều chỉnh phù hợp để ghi nhận trọn vẹn một hành động.

Đối với bài toán IPS trong không gian 3D, nghiên cứu đã tích hợp các cảm biến tự trị gồm IMU 9 trục, khí áp kế và công nghệ UWB. Trong bối cảnh các hệ thống IPS dựa trên cơ sở hạ tầng thường bị gián đoạn và không hoạt động đúng cách do hỏa hoạn hoặc va chạm vật lý, các phương pháp định vị sử dụng IMU phải đối mặt với hiện tượng trôi dạt, nghĩa là lỗi ước lượng vị trí tăng dần theo thời gian khi các lỗi đo lường tích lũy. Gia tốc kế cho phép nhận dạng hành động, trong khi con quay hồi chuyển xác định hướng di chuyển thông qua các mô hình học máy nhẹ và khí áp kế ước tính tầng. Đồng thời, quãng đường di chuyển được ước tính dựa trên sự kết hợp giữa bộ đếm bước và phép đo khoảng cách liên chi của UWB. Dữ liệu hợp nhất được áp dụng để giảm thiểu các bước chân giả và đảm bảo tính chính xác trong môi trường phức tạp. Đặc biệt, trong các trường hợp bước chân không đều, UWB vẫn đảm bảo được kết quả đo lường ổn định nhờ khả năng hoạt động tự trị và độ phân giải cao.

Kết quả thực nghiệm đã chứng minh tính hiệu quả của hệ thống. Cụ thể, mô hình ước tính độ dài bước đạt sai số tuyệt đối trung bình 5 cm và độ lệch chuẩn 4.36 cm trên mỗi bước. Mô hình nhận dạng hành động và hướng di chuyển đạt độ chính xác cao, trong khi sai số định vị tổng thể của hệ thống luôn duy trì dưới 2 m trong tất cả các thử nghiệm. Đáng chú ý, các thuật toán và mô hình đề xuất có chi phí tính toán thấp, thời gian trễ thấp, phù hợp để triển khai trên MCU có bộ nhớ và hiệu suất hạn chế, đáp ứng yêu cầu thời gian thực trong các ứng dụng cứu hộ.

Hạn chế.

Mặc dù hệ thống được đề xuất có nhiều ưu điểm, vẫn tồn tại một số hạn chế cần được khắc phục để nâng cao khả năng ứng dụng thực tế. Thứ nhất, hệ thống hiện có kích thước khá lớn do được lắp ráp thủ công, gây bất tiện khi triển khai ngoài hiện trường. Việc tối ưu hóa kích thước và thiết kế để dễ dàng tích hợp với các thiết bị hỗ trợ như quần áo hoặc dây đai là hết sức cần thiết. Một hạn chế khác là hệ thống được phát triển và đánh giá chủ yếu dựa trên dữ liệu thu từ các tình nguyện viên nam có thể trạng gần giống với lính cứu hỏa chuyên nghiệp. Do đó, có thể giảm khả năng thích ứng của mô hình đối với những đối tượng có đặc điểm hình thể khác biệt, chẳng hạn như nhân viên cứu hỏa nữ hoặc người có vóc dáng không điển hình.

Các thử nghiệm định vị 3D (xác định tầng) dựa vào khí áp kế đã sử dụng bộ lọc Kalman để giảm nhiễu, tuy nhiên trong đám cháy thực tế, sự biến động áp suất do nhiệt độ cực cao (hiệu ứng ống khói) có thể gây ra sai số lớn hơn mà mô hình hiện tại chưa mô phỏng hết được. Bên cạnh đó, hệ thống đề xuất cần có sơ đồ toà nhà và kích thước thiết kế cơ bản để hỗ trợ hiệu chỉnh độ chính xác của giải thuật xác định vị trí.

Hạn chế tiếp theo của luận án là mặc dù phần thử nghiệm khá phong phú, nhưng vẫn chưa phản ánh đầy đủ điều kiện thực tế. Bên cạnh đó, môi trường và kịch bản thu thập dữ liệu, thử nghiệm còn mang tính lý tưởng hóa. Trong các nghiên cứu tiếp theo, dữ liệu cần triển khai thu thập với sự tham gia của các lính cứu hỏa chuyên nghiệp đã được đào tạo bài bản, đồng thời thực hiện mô phỏng và so sánh với thực tế dựa trên các kết quả định lượng nhằm tăng tính chính xác và khả năng ứng dụng của hệ thống.

Cuối cùng, luận án chưa quan tâm đến tác động của độ trễ truyền thông từ thiết bị đeo của lính cứu hỏa đến thiết bị hiển thị của chỉ huy. Mặc dù thời gian tính toán tại biên đã được tối ưu hóa xuống mức thấp dưới 11 ms, nhưng quá trình truyền dẫn dữ liệu qua sóng vô tuyến trong môi trường toà nhà nhiều vật cản có thể phát sinh độ trễ ngẫu nhiên do suy hao tín hiệu, nhiễu đa đường hoặc hiện tượng mất gói tin. Điều này có thể tạo ra độ trễ khi hiển thị thông tin vị trí và hành động của lính cứu hỏa trên màn hình giám sát, gây ảnh hưởng đến khả năng ra quyết định chiến thuật tức thời của người chỉ huy trong các tình huống nguy cấp.

Kiến nghị và hướng phát triển.

Trong tương lai, để nâng cao tính ứng dụng và hoàn thiện sản phẩm, các hướng nghiên cứu tiếp theo được đề xuất bao gồm:

- Tối ưu hóa phần cứng bao gồm tối ưu hóa mạch tích hợp để thu nhỏ kích thước và trọng lượng thiết bị; nghiên cứu vỏ hộp chịu nhiệt và va đập chuyên dụng để đảm bảo độ bền trong môi trường hỏa hoạn thực tế.
- Mở rộng và đa dạng hóa dữ liệu từ nhiều nhóm đối tượng khác nhau để huấn luyện mô hình tốt hơn, nâng cao tính tổng quát hóa và độ chính xác cho mọi đối tượng người dùng.
- Nghiên cứu tích hợp giao thức truyền thông mạng lưới (Mesh) để hỗ trợ theo dõi đồng thời nhiều lính cứu hỏa, cho phép các thiết bị tương trợ nhau trong việc truyền tin về trạm chỉ huy khi tín hiệu bị suy hao.
- Phát triển hệ thống với các giải pháp phần mềm và phần cứng để tạo ra

một nền tảng phát hiện hệ thống cứu hộ toàn diện, kết nối liền mạch giữa các thiết bị đeo cá nhân và trung tâm chỉ huy hiện trường.

CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

[CT1] N. T. Thu, **D.-T. Dao***, B. Q. Bao, D. nghĩa Tran, P. V. Thanh, and D.-T. Tran, 2022, “Real-time wearable-device based activity recognition using machine learning methods,” *International Journal of Computing and Digital Systems*, vol. 12, no. 1, pp. 321–333, DOI: 10.12785/ijcds/120126 [**SCOPUS, Q3**].

[CT2] **D.-T. Dao**, H.-Y. Hoang, V.-N. Hoang, D.-T. Tran, and D.-N. Tran*, 2022, “Human activity recognition system for moderate performance microcontroller using accelerometer data and random forest algorithm, *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, vol. 9, no. 40, pp. 1–18, DOI: 10.4108/eetinis.v9i4.2571 [**SCOPUS, Q3**].

[CT3] **T.-H. Dao**, D.-N. Tran, V.-H. Bui, V. Son Nguyen, D. K. Hoa, P. V. Thanh, and D.-T. Tran, 2025, RFAR: A real-time firefighter activity recognition system using wearable accelerometer, *IEEE SENSORS JOURNAL*, vol. 25, no. 17, pp. 33674–33691, 2025, DOI: 10.1109/JSEN.2025.3593466 [**SCIE Q1**].

[CT4] **T.-H. Dao**, D.-N. Tran, Q.-T. Hoang, H.-D. Vu, D. T. Huy, and D.-T. Tran, 2023, Developing Real-time Automatic Step Detection On A Low-Cost, Performance-Constrained Microcontroller, *2023 IEEE Statistical Signal Processing Workshop*, pp. 150–154, DOI: 10.1109/SSP53291.2023.10207955 [**SCOPUS, Q4**].

[CT5] V.-H. Bui, D.-N. Tran, **T.-H. Dao***, T.-A. Le, V.-A. Tran, T.-C. Bui, and D.- T. Tran, 2025, Development of an Indoor Position Monitoring System for Rescue Personnel during Emergencies, *2025 8th International Conference on Multimedia Analysis and Pattern Recognition*, pp. 196–201, ISSN: 979-8-3315-5466-8, DOI: 10.1109/MAPR67746.2025.1113393 [**SCOPUS, Q4**].

[CT6] **T.-H. Dao**, D.-N. Tran, V.-H. Bui, H.-D. Vu, and D.-T. Tran, 2025, IPWSEP-Investigation of an indoor positioning system based on wearable sensors for emergency response, *Hanoi University of Industry Journal of Science and Technology*, vol. 61, pp. 1-11 [accepted].

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*, vol. 20, no. 9, pp. 17 003–17 017, 2023, doi: 10.3934/mbe.2023758.
- [2] A. A. Khan, M. A. Khan, K. Leung, X. Huang, M. Luo, and A. Usmani, “A review of critical fire event library for buildings and safety framework for smart firefighting,” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 83, p. 103412, 2022, doi: 10.1016/j.ijdr.2022.103412.
- [3] Y. Cheng, X. Cui, Z. Shao, C. Guo, J. Gao, P. Zhang, Y. Wu, C. Jiang, D. Wu, and X. Wang, “Impact of temperature on firefighter task performance and subjective workload in vr simulations,” *Fire Safety Journal*, vol. 153, p. 104384, 2025, doi: 10.1016/j.firesaf.2025.104384.
- [4] K. Stakes, J. M. Willi, R. Chaffer, D. Madrzykowski, and G. P. Horn, “Exposure risks and potential control measures for a fire behavior lab training structure: Part a—fire dynamics and thermal risk,” *Fire Technology*, vol. 59, no. 4, pp. 2089–2125, 2023, doi: 10.1007/s10694-023-01414-7.
- [5] M. Vishal and S. K. S, “A review on research of fire-induced progressive collapse on structures,” *Journal of Structural Fire Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 410–425, 07 2021, doi: 10.1108/JSFE-07-2020-0023.
- [6] J. T. Kahl, N. J. Anderson, G. Casner, V. Shuman, and T. J. Gardner, “Firefighter daytime visibility: trim properties and conspicuity,” *Fashion and Textiles*, vol. 6, no. 1, p. 18, 2019, doi: 10.1186/s40691-019-0173-5.
- [7] E. Koopmans, K. Cornish, T. M. Fyfe, K. Bailey, and C. A. Pelletier, “Health risks and mitigation strategies from occupational exposure to wildland fire: a scoping review,” *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, vol. 17, no. 1, p. 2, 2022, doi: 10.1186/s12995-021-00328-w.
- [8] L. Carmona, R. Pinheiro, J. Faria-Anjos, S. Namorado, and M. J. Chambel, “Lifestyle and well-being among portuguese firefighters,” *IgMin Research*, vol. 2, no. 2, pp. 59–65, 2024, doi: 10.61927/igmin146.
- [9] V. T. Pham, Q. B. Le, D. A. Nguyen, N. D. Dang, H. T. Huynh, and D. T. Tran, “Multi-sensor data fusion in a real-time support system for on-duty firefighters,” *Sensors*, vol. 19, no. 21, p. 4746, 2019, doi: 10.3390/s19214746.
- [10] K. Wakatsuki, R. Seita, N. Watanabe, S. Muramoto, Y. Kobayashi, and H. Morikawa, “Characterization of air gaps and their impact on the thermal insulation performance of multi-layer firefighter clothing,” *Fire Technology*, vol. 58, no. 4, pp. 1863–1887, July 2022, doi: 10.1007/s10694-022-01222-5.
- [11] D. E. Gonzalez, S. N. Lanham, S. E. Martin, R. E. Cleveland, T. E. Wilson, E. L. Langford, and M. G. Abel, “Firefighter health: A narrative review of occupational threats and countermeasures,” *Healthcare*, vol. 12, no. 4, p. 440, 2024, doi: 10.3390/healthcare12040440.
- [12] X. Chai, B.-G. Lee, M. Pike, R. Wu, D. Chieng, and W.-Y. Chung, “Pre-impact firefighter fall detection using machine learning on the edge,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 13, pp. 14 997–15 009, 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3279858.

- [13] C. B. Florian Rosing, Diana Boer and 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*, vol. 31, no. 2, pp. 200–213, 2022, doi: 10.1080/1359432X.2021.1948401.
- [14] P. Heydari, M. Babamiri, L. Tapak, R. Golmohammadi, and O. Kalatpour, "Weighing and prioritization of individual factors affecting the performance of industries firefighters," *Fire Safety Journal*, vol. 127, p. 103512, 2022, doi: 10.1016/j.firesaf.2021.103512.
- [15] R. M. S. Clifford, H. Engelbrecht, S. Jung, H. Oliver, M. Billingham, R. W. Lindeman, and S. Hoermann, "Aerial firefighter radio communication performance in a virtual training system: radio communication disruptions simulated in VR for air attack supervision," *The Visual Computer*, vol. 37, no. 1, pp. 63–76, 2021, doi: 10.1007/s00371-020-01816-6.
- [16] Y. Zhang and X. Huang, *Smart Safety Design for Firefighting, Evacuation, and Rescue*. Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 237–255, doi: 10.1007/978-3-031-48161-1_10.
- [17] P. V. Thanh, T. Duc-Tan, N. Dinh-Chinh, N. D. Anh, D. N. Dinh, S. El-Rabaie, and K. Sandrasegaran, "Development of a real-time, simple and high-accuracy fall detection system for elderly using 3-dof accelerometers," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 44, no. 4, pp. 3329–3342, 2019, doi: 10.1007/s13369-018-3496-4.
- [18] S. Mohsen, A. Elkaseer, and S. G. Scholz, "Industry 4.0-oriented deep learning models for human activity recognition," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 150 508–150 521, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3125733.
- [19] A. Nadeem, A. Jalal, and K. Kim, "Automatic human posture estimation for sport activity recognition with robust body parts detection and entropy markov model," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 80, no. 14, pp. 21 465–21 498, 2021, doi: 10.1007/s11042-021-10687-5.
- [20] L. M. Dang, K. Min, H. Wang, M. Jalil Piran, C. Hee Lee, and H. Moon, "Sensor-based and vision-based human activity recognition: A comprehensive survey," *Pattern Recognition*, vol. 108, p. 107561, 2020, doi: 10.1016/j.patcog.2020.107561.
- [21] N. T. T. Hong, G. L. Nguyen, N. Q. Huy, D. V. Manh, D.-N. Tran, and D.-T. Tran, "A low-cost real-time iot human activity recognition system based on wearable sensor and the supervised learning algorithms," *Measurement*, vol. 218, p. 113231, 2023, doi: 10.1016/j.measurement.2023.113231.
- [22] D. N. Dang, T. V. Pham, T. D. Tran, A. V. Tran, A. H. Nguyen, and A. D. Nguyen, "A simple and real-time support system for firefighters using low-cost 3-dof accelerometer and co sensor," *International Journal of Online and Biomedical Engineering*, vol. 18, no. 10, pp. 4–25, 2022, doi: 10.3991/ijoe.v18i10.26425.
- [23] M. Webber and R. F. Rojas, "Human activity recognition with accelerometer and gyroscope: A data fusion approach," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 15, pp. 16 979–16 989, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3079883.
- [24] M.-T. Vi, D.-N. Tran, V. T. Thuong, N. N. Linh, and D.-T. Tran, "Efficient real-time devices based on accelerometer using machine learning for har on low-performance microcontrollers," *Computers, Materials and Continua*, vol. 81, no. 1, pp. 1729–1756, 2024, doi: 10.32604/cmc.2024.055511.

- [25] I. Koo, Y. Park, M. Jeong, and C. Kim, "Contrastive accelerometer-gyroscope embedding model for human activity recognition," *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 1, pp. 506–513, 2023, doi: 10.1109/JSEN.2022.3222825.
- [26] G. Zine, B. Salah, and S. Salah, "New parameters for the capacitive to reduce its measurement error and power consumption," *Measurement: Energy*, vol. 3, p. 100018, 2024, doi: 10.1016/j.meane.2024.100018.
- [27] K. Doddabasappa and R. Vyas, "Statistical and machine learning-based recognition of coughing events using triaxial accelerometer sensor data from multiple wearable points," *IEEE Sensors Letters*, vol. 5, no. 6, pp. 1–4, 2021, doi: 10.1109/LSENS.2021.3074183.
- [28] J. Lu, X. Zheng, M. Sheng, J. Jin, and S. Yu, "Efficient human activity recognition using a single wearable sensor," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 11, pp. 11 137–11 146, 2020, doi: 10.1109/JIOT.2020.2995940.
- [29] X. Chai, R. Wu, M. Pike, H. Jin, W.-Y. Chung, and B.-G. Lee, "Smart wearables with sensor fusion for fall detection in firefighting," *Sensors*, vol. 21, no. 20, p. 6770, 2021, doi: 10.3390/s21206770.
- [30] X. Chai, B. G. Lee, C. Hu, M. Pike, D. Chieng, R. Wu, and W.-Y. Chung, "Iot-far: A multi-sensor fusion approach for iot-based firefighting activity recognition," *Information Fusion*, vol. 113, p. 102650, 2024, doi: 10.1016/j.inffus.2024.102650.
- [31] S. Li, T. Zhu, F. Duan, L. Chen, H. Ning, C. Nugent, and Y. Wan, "Harmamba: Efficient and lightweight wearable sensor human activity recognition based on bidirectional mamba," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 2373–2384, Feb 2025, doi: 10.1109/JIOT.2024.3463405.
- [32] L. Qin, L. Zhang, C. Li, C. Song, D. Cheng, S. Wang, H. Wu, and A. Song, "Towards better accuracy-efficiency trade-offs: Dynamic activity inference via collaborative learning from various width-resolution configurations," *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, vol. 5, no. 12, pp. 6723–6738, Dec 2024, doi: 10.1109/TAI.2024.3489532.
- [33] S. Xu, L. Zhang, Y. Tang, C. Han, H. Wu, and A. Song, "Channel attention for sensor-based activity recognition: Embedding features into all frequencies in dct domain," *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 35, no. 12, pp. 12 497–12 512, Dec 2023, doi: 10.1109/TKDE.2023.3277839.
- [34] A. Wang, G. Chen, X. Wu, L. Liu, N. An, and C.-Y. Chang, "Towards human activity recognition: A hierarchical feature selection framework," *Sensors*, vol. 18, no. 11, p. 3629, 2018, doi: 10.3390/s18113629.
- [35] Y. Geng, J. Chen, R. Fu, G. Bao, and K. Pahlavan, "Enlighten wearable physiological monitoring systems: On-body rf characteristics based human motion classification using a support vector machine," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 15, no. 3, pp. 656–671, 2016, doi: 10.1109/TMC.2015.2416186.
- [36] S. J. Preece, J. Y. Goulermas, L. P. J. Kenney, and D. Howard, "A comparison of feature extraction methods for the classification of dynamic activities from accelerometer data," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 56, no. 3, pp. 871–879, 2009, doi: 10.1109/TBME.2008.2006190.

- [37] M.-K. Yi, K. Han, and S. O. Hwang, "Fall detection of the elderly using denoising lstm-based convolutional variant autoencoder," *IEEE Sensors Journal*, vol. 24, no. 11, pp. 18 556–18 567, 2024, doi: 10.1109/JSEN.2024.3388478.
- [38] W. Tianhu, W. Baoqiang, S. Yunzhe, Z. Yang, L. Wenjie, Y. Keming, L. Xiaojie, and L. Yinsheng, "Accelerometer-based human fall detection using sparrow search algorithm and back propagation neural network," *Measurement*, vol. 204, p. 112104, 2022, doi: 10.1016/j.measurement.2022.112104.
- [39] N. N. Shah, O. A. Wackowski, S. A. Jahnke, J. Roy, B. S. Hollerbach, D. L. Edwards, A. J. Caban-Martinez, M. M. Calkins, E. Austin, T. M. Black, J. Awadalla, C. C. Grant, B. S. Kubiel, and J. M. Graber, "Firefighter- and fire department-level barriers and promoters of physical activity and fitness among volunteer firefighters: a qualitative study using semi-structured interviews," *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, vol. 66, no. 12, 2024, doi: 10.1097/JOM.0000000000003222.
- [40] K. Chen, D. Zhang, L. Yao, B. Guo, Z. Yu, and Y. Liu, "Deep learning for sensor-based human activity recognition: Overview, challenges, and opportunities," *ACM Comput. Surv.*, vol. 54, no. 4, May 2021, doi: 10.1145/3447744.
- [41] Y. Li, G. Yang, Z. Su, S. Li, and Y. Wang, "Human activity recognition based on multienvironment sensor data," *Information Fusion*, vol. 91, pp. 47–63, 2023, doi: 10.1016/j.inffus.2022.10.015.
- [42] J. Qi, P. Yang, M. Hanneghan, S. Tang, and B. Zhou, "A hybrid hierarchical framework for gym physical activity recognition and measurement using wearable sensors," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 1384–1393, 2019, doi: 10.1109/JIOT.2018.2846359.
- [43] P. Casale, O. Pujol, and P. Radeva, "Human activity recognition from accelerometer data using a wearable device," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 6669 LNCS, 2011, pp. 289–296, doi: 10.1007/978-3-642-21257-4_36.
- [44] A. Mannini, S. S. Intille, M. Rosenberger, A. M. Sabatini, and W. Haskell, "Activity recognition using a single accelerometer placed at the wrist or ankle," *Medicine and Science in Sports and Exercise*, vol. 45, no. 11, pp. 2193–2203, 2013, doi: 10.1249/MSS.0b013e31829736d6.
- [45] S. S. Saha, S. S. Sandha, and M. Srivastava, "Machine learning for microcontroller-class hardware: A review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 22, pp. 21 362–21 390, 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3210773.
- [46] K. K. Verma, B. M. Singh, and A. Dixit, "A review of supervised and unsupervised machine learning techniques for suspicious behavior recognition in intelligent surveillance system," *International Journal of Information Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 397–410, 2022, doi: 10.1007/s41870-019-00364-0.
- [47] J. Bassen, B. Balaji, M. Schaarschmidt, C. Thille, J. Painter, D. Zimmaro, A. Games, E. Fast, and J. C. Mitchell, "Reinforcement Learning for the Adaptive Scheduling of Educational Activities," in *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, 2020, pp. 1–12, doi: 10.1145/3313831.3376518.

- [48] H. Yu, Z. Chen, X. Zhang, X. Chen, F. Zhuang, H. Xiong, and X. Cheng, “Fedhar: Semi-supervised online learning for personalized federated human activity recognition,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 22, no. 6, pp. 3318–3332, 2023, doi: 10.1109/TMC.2021.3136853.
- [49] M. A. Khatun, M. A. Yousuf, S. Ahmed, M. Z. Uddin, S. A. Alyami, S. Al-Ashhab, H. F. Akhdar, A. Khan, A. Azad, and M. A. Moni, “Deep cnn-lstm with self-attention model for human activity recognition using wearable sensor,” *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, vol. 10, pp. 1–16, 2022, doi: 10.1109/JTEHM.2022.3177710.
- [50] S. J. Preece, J. Y. Goulermas, L. P. J. Kenney, and D. Howard, “A comparison of feature extraction methods for the classification of dynamic activities from accelerometer data,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 56, no. 3, pp. 871–879, 2009, doi: 10.1109/TBME.2008.2006190.
- [51] Y. Tang, L. Zhang, Q. Teng, F. Min, and A. Song, “Triple cross-domain attention on human activity recognition using wearable sensors,” *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, vol. 6, no. 5, pp. 1167–1176, Oct 2022, doi: 10.1109/TETCI.2021.3136642.
- [52] Y. Bu, W. Wu, X. Zeng, L. Koehl, and G. Tartare, “A wearable intelligent system for real time monitoring firefighter’s physiological state and predicting dangers,” in *International Conference on Communication Technology*, 2015, pp. 429–432, doi: 10.1109/ICCT.2015.7399874.
- [53] Phạm Văn Thành, “Development of real-time systems to detect and track on-duty injured firefighters using advanced signal processing techniques,” Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Công nghệ, 2021, <https://uet.vnu.edu.vn/thong-tin-luan-tien-si-cua-ncs-pham-van-thanh/>.
- [54] Phạm Văn Thành và đồng nghiệp, “Nghiên cứu xây dựng hệ thống giám sát, hỗ trợ chiến sỹ chữa cháy và cứu nạn, cứu hộ gặp sự cố khi thực hiện nhiệm vụ bên trong nhà, công trình,” Đại học PCCC, Đề tài cấp Thành phố Hà Nội Mã số: CT03/01-2023-3, 2025, <https://daihocpccc.bocongan.gov.vn/?p=208605>.
- [55] J. Lin, L. Zhu, W.-M. Chen, W.-C. Wang, and S. Han, “Tiny machine learning: Progress and futures,” *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 23, no. 3, pp. 8–34, 2023, doi: 10.1109/MCAS.2023.3302182.
- [56] A. Dharani, S. A. Kumar, and P. N. Patil, “Object detection at edge using tinyml models,” in *SN Computer Science*, vol. 5, no. 11. Springer, 2023, doi: 10.1007/s42979-023-02304-z.
- [57] P. Gairi, T. Palleja, and M. Tresanchez, “Environmental sound recognition on embedded devices using deep learning: a review,” *Artificial Intelligence Review*, vol. 58, no. 6, p. 163, March 2025, doi: 10.1007/s10462-025-11106-z.
- [58] Z. Huang, K. Zandberg, K. Schleiser, and E. Baccelli, “Riot-ml: toolkit for over-the-air secure updates and performance evaluation of tinyml models,” *Annals of Telecommunications*, vol. 80, no. 3, pp. 283–297, April 2025, doi: 10.1007/s12243-024-01041-5.
- [59] S. Kaiser, S. Sand, M. Linkiewicz, H. Meißner, D. Baumbach, and R. Berger, “An overall first responder tracking and coordination framework,” *IT Professional*, vol. 25, no. 6, pp. 38–44, 2023, doi: 10.1109/MITP.2023.3339449.

- [60] D.-P. Yuan, Z.-h. Li, and M. Li, “Research on indoor firefighter positioning based on inertial navigation,” in *Fire Science and Technology 2015*, K. Harada, K. Matsuyama, K. Himoto, Y. Nakamura, and K. Wakatsuki, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2017, pp. 473–483, doi: 10.1007/978-981-10-0376-9_48.
- [61] V.-H. Bui, D.-N. Tran, T.-H. Dao, Q.-T. Hoang, P. V. Kien, N. V. Thang, and D.-T. Tran, “Idrrs: Iot inertial device for real-time road surface classification and position estimation enhancement,” *Informatics and Automation*, vol. 25, no. 2, pp. 445–477, Apr. 2026, doi: 10.15622/ia.25.2.7.
- [62] J. Li, Z. Xie, X. Sun, J. Tang, H. Liu, and J. A. Stankovic, “An automatic and accurate localization system for firefighters,” in *2018 IEEE/ACM Third International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI)*, 2018, pp. 13–24, doi: 10.1109/IoTDI.2018.00012.
- [63] Z. Zhang, H. Du, S. Choi, and S. H. Cho, “Tips: Transformer based indoor positioning system using both csi and doa of wifi signal,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 111 363–111 376, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3215504.
- [64] M. S. B. Hossain, Z. Guo, and 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 Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 27, no. 6, pp. 2829–2840, 2023, doi: 10.1109/JBHI.2023.3262164.
- [65] D. Harmer, M. Russell, E. Frazer, T. Bauge, S. Ingram, N. Schmidt, B. Kull, A. Yarovoy, A. Nezirovic, L. Xia, V. Dizdarevic, and K. Witrisal, “Europcom: Emergency ultrawideband radio for positioning and communications,” in *2008 IEEE International Conference on Ultra-Wideband*, vol. 3, 2008, pp. 85–88, doi: 10.1109/ICUWB.2008.4653422.
- [66] S. R. Gandhi, A. Ganz, and G. Mullett, “Fireguide: Firefighter guide and tracker,” in *2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*, 2010, pp. 2037–2040, doi: 10.1109/IEMBS.2010.5626771.
- [67] S. K. Ghosh, S. Chakraborty, A. Jamthe, and D. P. Agrawal, “Comprehensive monitoring of firefighters by a wireless body area sensor network,” in *2013 Tenth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*, 2013, pp. 1–6, doi: 10.1109/WOCN.2013.6616245.
- [68] N. Li, B. Becerik-Gerber, L. Soibelman, and B. Krishnamachari, “Comparative assessment of an indoor localization framework for building emergency response,” *Automation in Construction*, vol. 57, pp. 42–54, 2015, doi: 10.1016/j.autcon.2015.04.004.
- [69] C. Ma, B. Wu, S. Poslad, and D. R. Selviah, “Wi-fi rtt ranging performance characterization and positioning system design,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 21, no. 2, pp. 740–756, 2022, doi: 10.1109/TMC.2020.3012563.
- [70] U. Rppel, K. Marcus Stbbe, and U. Zwinger, “Indoor navigation integration platform for firefighting purposes,” in *2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, 2010, pp. 1–6, doi: 10.1109/IPIN.2010.5647401.
- [71] J. Rantakokko, J. Rydell, P. Strmbck, P. Hndel, J. Callmer, D. Trnqvist, F. Gustafsson, M. Jobs, and M. Grudn, “Accurate and reliable soldier and first responder indoor positioning: multisensor systems and

- cooperative localization,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 18, no. 2, pp. 10–18, 2011, doi: 10.1109/MWC.2011.5751291.
- [72] D. Croce, L. Giarré, F. Pascucci, I. Tinnirello, G. E. Galieto, D. Garlisi, and A. Lo Valvo, “An indoor and outdoor navigation system for visually impaired people,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 170 406–170 418, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2955046.
 - [73] E. Emilsson and J. Rydell, “Chameleon on fire — thermal infrared indoor positioning,” in *2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium - PLANS 2014*, 2014, pp. 637–644, doi: 10.1109/PLANS.2014.6851426.
 - [74] B. Cinaz and H. Kenn, “Headslam - simultaneous localization and mapping with head-mounted inertial and laser range sensors,” in *2008 12th IEEE International Symposium on Wearable Computers*, 2008, pp. 3–10, doi: 10.1109/ISWC.2008.4911575.
 - [75] V. T. Pham, D. A. Nguyen, N. D. Dang, H. H. Pham, V. A. Tran, K. Sandrasegaran, and D.-T. Tran, “Highly accurate step counting at various walking states using low-cost inertial measurement unit support indoor positioning system,” *Sensors*, vol. 18, no. 10, 2018, doi: 10.3390/s18103186.
 - [76] C. Jorgensen, J. Schipper, and B. Betts, “Untethered voice command recognition system for hands-free control,” NASA Ames Research Center, NASA Tech Brief ARC-15487-1, May 2008, doi: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20090017545>.
 - [77] A. Poulouse, O. S. Eyobu, and D. S. Han, “An indoor position-estimation algorithm using smartphone imu sensor data,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 11 165–11 177, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2891942.
 - [78] S. Bosch, “Pushing the limits of inertial motion sensing,” PhD Thesis - Research UT, graduation UT, University of Twente, Netherlands, Sep. 2022, doi: 10.3990/1.9789036554350.
 - [79] N.-H. Ho, P. H. Truong, and G.-M. Jeong, “Step-detection and adaptive step-length estimation for pedestrian dead-reckoning at various walking speeds using a smartphone,” *Sensors*, vol. 16, no. 9, 2016, doi: 10.3390/s16091423.
 - [80] A. F. G. Gonçalves Ferreira, D. M. A. Fernandes, A. P. Catarino, and J. L. Monteiro, “Localization and positioning systems for emergency responders: A survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2836–2870, 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2703620.
 - [81] F. De Cillis, L. Faramondi, F. Inderst, S. Marsella, M. Marzoli, F. Pascucci, and R. Setola, “Hybrid indoor positioning system for first responders,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 50, no. 2, pp. 468–479, 2020, doi: 10.1109/TSMC.2017.2772821.
 - [82] N. Simon, J. Bordoy, F. Höflinger, J. Wendeberg, M. Schink, R. Tannhäuser, L. Reindl, and C. Schindelhauer, “Indoor localization system for emergency responders with ultra low-power radio landmarks,” in *2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, 2015, pp. 309–314, doi: 10.1109/I2MTC.2015.7151285.
 - [83] L. M. Kien, P. D. Thang, N. V. Thang, T.-M. Hoang, D. T. Duong, and T. H. Dao, “Road Surface Classification Using GY85 Sensor and RBF Kernel SVM,” in *Proceedings of the Fifth International Conference on Intelligent Systems and Networks*, T. D. L. Nguyen, S. Yu, A. Selamat, and D.-T.

- Tran, Eds. Singapore: Springer Nature Singapore, 2026, pp. 216–225, doi: 10.1007/978-981-95-1746-6_23.
- [84] R. Igual, C. Medrano, and I. Plaza, “A comparison of public datasets for acceleration-based fall detection,” *Medical Engineering & Physics*, vol. 37, no. 9, pp. 870–878, 2015, doi: 10.1016/j.medengphy.2015.06.009.
 - [85] A. T. Özdemir, “An analysis on sensor locations of the human body for wearable fall detection devices: Principles and practice,” *Sensors*, vol. 16, no. 8, p. 1161, 2016, doi: 10.3390/s16081161.
 - [86] D. Micucci, M. Mobilio, and P. Napoletano, “Unimib shar: A dataset for human activity recognition using acceleration data from smartphones,” *Applied Sciences*, vol. 7, no. 10, 2017, doi: 10.3390/app7101101.
 - [87] Q. Teng, W. Li, G. Hu, Y. Shu, and Y. Liu, “Innovative dual-decoupling cnn with layer-wise temporal-spatial attention for sensor-based human activity recognition,” *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 29, no. 2, pp. 1035–1048, Feb 2025, doi: 10.1109/JBHI.2024.3488528.
 - [88] M. F. Abdi, B. BabaAli, and S. Momeni, “An unsupervised statistical representation learning method for human activity recognition,” *Signal, Image and Video Processing*, vol. 18, no. 10, pp. 7041–7052, 2024, doi: 10.1007/s11760-024-03374-z.
 - [89] A. Paul, D. P. Mukherjee, P. Das, A. Gangopadhyay, A. R. Chintla, and S. Kundu, “Improved random forest for classification,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 27, no. 8, pp. 4012–4024, 2018, doi: 10.1109/TIP.2018.2834830.
 - [90] M. I. Prasetyowati, N. U. Maulidevi, and K. Surendro, “Determining threshold value on information gain feature selection to increase speed and prediction accuracy of random forest,” *Journal of Big Data*, vol. 8, no. 1, p. 84, 2021, doi: 10.1186/s40537-021-00472-4.
 - [91] Y. Abadade, A. Temouden, H. Bamoumen, N. Benamar, Y. Chtouki, and A. S. Hafid, “A comprehensive survey on tinyml,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 96 892–96 922, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3294111.
 - [92] A. Durap, “A comparative analysis of machine learning algorithms for predicting wave runup,” *Anthropocene Coasts*, vol. 6, no. 1, p. 17, 2023, doi: 10.1007/s44218-023-00033-7.
 - [93] N. S. Thomas and S. Kaliraj, “An improved and optimized random forest based approach to predict the software faults,” *SN Computer Science*, vol. 5, no. 5, p. 530, 2024, doi: 10.1007/s42979-024-02764-x.
 - [94] V. S. Marco, B. Taylor, Z. Wang, and Y. Elkhatib, “Optimizing deep learning inference on embedded systems through adaptive model selection,” *Association for Computing Machinery*, vol. 19, no. 1, Feb. 2020, doi: 10.1145/3371154.
 - [95] M. A. Al-qaness, A. Dahou, M. Abd Elaziz, and A. M. Helmi, “Human activity recognition and fall detection using convolutional neural network and transformer-based architecture,” *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 95, p. 106412, 2024, doi: 10.1016/j.bspc.2024.106412.
 - [96] R. Kanjilal and I. Uysal, “The future of human activity recognition: Deep learning or feature engineering?” *Neural Processing Letters*, vol. 53, no. 1, pp. 561–579, 2021, doi: 10.1007/s11063-020-10400-x.

- [97] S. Iloga, A. Bordat, J. Le Kernec, and O. Romain, “Human activity recognition based on acceleration data from smartphones using hmms,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 139 336–139 351, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3117336.
- [98] J. Zhang, Z. Li, Y. Liu, J. Li, H. Qiu, M. Li, G. Hou, and Z. Zhou, “An effective deep learning framework for fall detection: Model development and study design,” *J Med Internet Res*, vol. 26, p. e56750, 2024, doi: 10.2196/56750.
- [99] P. S. Yarmolenko, E. J. Moon, C. Landon, A. Manzoor, D. W. Hochman, B. L. Viglianti, and M. W. Dewhirst, “Thresholds for thermal damage to normal tissues: an update,” *International Journal of Hyperthermia*, vol. 27, no. 4, pp. 320–343, 2011, doi: 10.3109/02656736.2010.534527.

PHỤ LỤC 1: GIẤY CHẤP THUẬN CỦA HỘI ĐỒNG ĐẠO ĐỨC PHENIKAA

TRƯỜNG ĐẠI HỌC PHENIKAA
HỘI ĐỒNG ĐẠO ĐỨC TRONG
NGHIÊN CỨU Y SINH HỌC

QT.HĐĐĐ.01/BM.12
CỘNG HOÀ XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

Hà Nội, ngày 16 tháng 04 năm 2024

Số: 024.22/ĐHP-HĐĐĐ

GIẤY CHỨNG NHẬN Chấp thuận đề cương nghiên cứu

Căn cứ Quyết định 601/QĐ-ĐHP-TCNS ngày 28/09/2021 của Hiệu trưởng về việc thành lập Hội đồng đạo đức cơ sở Trường Đại học PHENIKAA;

Căn cứ Quyết định 626/QĐ-ĐHP-TCNS ngày 07/6/2022 của Hiệu trưởng về việc kiện toàn Hội đồng Đạo đức cấp cơ sở Trường Đại học PHENIKAA;

Căn cứ Quyết định số 476/QĐ- ĐHP-HĐĐĐ ngày 12/04/2023 của Hiệu trưởng Trường Đại học PHENIKAA về việc ban hành Quy chế tổ chức và hoạt động Hội đồng đạo đức trong nghiên cứu y sinh học cấp cơ sở tại Trường Đại học PHENIKAA;

Căn cứ Biên bản tổng hợp ý kiến ngày 12/04/2024 của tiểu ban xét duyệt vấn đề Đạo đức trong nghiên cứu y sinh học cấp cơ sở tại Trường Đại học PHENIKAA về việc xem xét đề cương nghiên cứu và hồ sơ hoàn thiện.

Hội đồng đạo đức trong nghiên cứu y sinh học cấp cơ sở tại Trường Đại học PHENIKAA:

1. Chấp thuận khía cạnh khoa học và đạo đức đối với nghiên cứu:

- 1.1. Mã nghiên cứu: ĐĐ.2024-01.22
- 1.2. Tên nghiên cứu: Hệ thống theo dõi sức khỏe người sử dụng thiết bị đeo và cảm biến tích hợp
- 1.3. Thời gian nghiên cứu: Từ tháng 10/2024 đến tháng 09/2025
- 1.4. Chủ nhiệm đề tài/Nghiên cứu viên chính: ThS. Đào Tô Hiệu
- 1.5. Đơn vị chủ trì: Trường Đại học Phenikaa
- 1.6. Cơ quan phối hợp chính:
- 1.7. Nhà tài trợ: không
- 1.8. Địa điểm triển khai nghiên cứu: Việt Nam
- 1.9. Người tham gia nghiên cứu: nhóm người muốn nghiên cứu đáng đi của họ độ tuổi: 18 - 80 tuổi; Sức khỏe tốt; Không bị dị ứng với dây đeo; Đồng ý tham gia nghiên cứu và mang thiết bị trên người trong thời gian quy định.
- 1.10. Dự kiến số lượng người tham gia nghiên cứu: 10 người
- 1.11. Thời gian thu thập số liệu: Từ 16/04/2024 đến tháng 06/2024

2. Cho phép sử dụng các tài liệu sau trong nghiên cứu nêu trên:

STT	Tài liệu	Phiên bản
1	Bộ dữ liệu và mô tả cấu trúc dữ liệu thu thập	Tiếng việt/tiếng anh

3. Ngày chấp thuận: 16/04/2024

4. Ngày báo cáo định kỳ tiếp theo:

5. Khuyến nghị của Hội đồng đạo đức đối với nghiên cứu (nếu có):

6. Nghiên cứu viên chính có trách nhiệm sau đây:

6.1. Tuân thủ đề cương nghiên cứu được phê duyệt và các tài liệu liên quan, các nguyên tắc Thực hành lâm sàng tốt, các quy định của pháp luật về đạo đức nghiên cứu.

6.2. Báo cáo Hội đồng đạo đức trong nghiên cứu y sinh học cấp cơ sở tại Trường Đại học PHENIKAA các biến cố bất lợi nghiêm trọng (SAE) và các phản ứng bất lợi ngoài dự kiến nghiêm trọng có liên quan đến sản phẩm nghiên cứu (SUSARs) theo đúng các hướng dẫn và quy định hiện hành.

6.3. Báo cáo Hội đồng đạo đức trong nghiên cứu y sinh học cấp cơ sở tại Trường Đại học PHENIKAA xem xét và chấp thuận những thay đổi.

6.4. Sai lệch hay chỉnh sửa đề cương nghiên cứu và mẫu chấp thuận tham gia nghiên cứu, các tài liệu cung cấp thông tin cho đối tượng tham gia nghiên cứu trước khi áp dụng trong nghiên cứu, trừ trường hợp rõ ràng cần thiết thay đổi để loại trừ nguy cơ trực tiếp cho đối tượng.

6.5. Báo cáo tiến độ triển khai nghiên cứu hàng năm cho Hội đồng đạo đức trong nghiên cứu y sinh học cấp cơ sở tại Trường Đại học PHENIKAA vào đúng ngày hoặc trước ngày quy định.

6.6. Báo cáo tiến độ triển khai nghiên cứu đột xuất khi có yêu cầu của Hội đồng đạo đức trong nghiên cứu y sinh học cấp cơ sở tại Trường Đại học PHENIKAA.

6.7. Thông báo về việc ngừng nghiên cứu, kết thúc nghiên cứu trước thời hạn hoàn thành dự kiến, lý do của việc kết thúc sớm;

6.8. Chuẩn bị cho khả năng tới kiểm tra điểm nghiên cứu của Hội đồng đạo đức trong nghiên cứu y sinh học cấp cơ sở tại Trường Đại học PHENIKAA.

Nơi nhận:

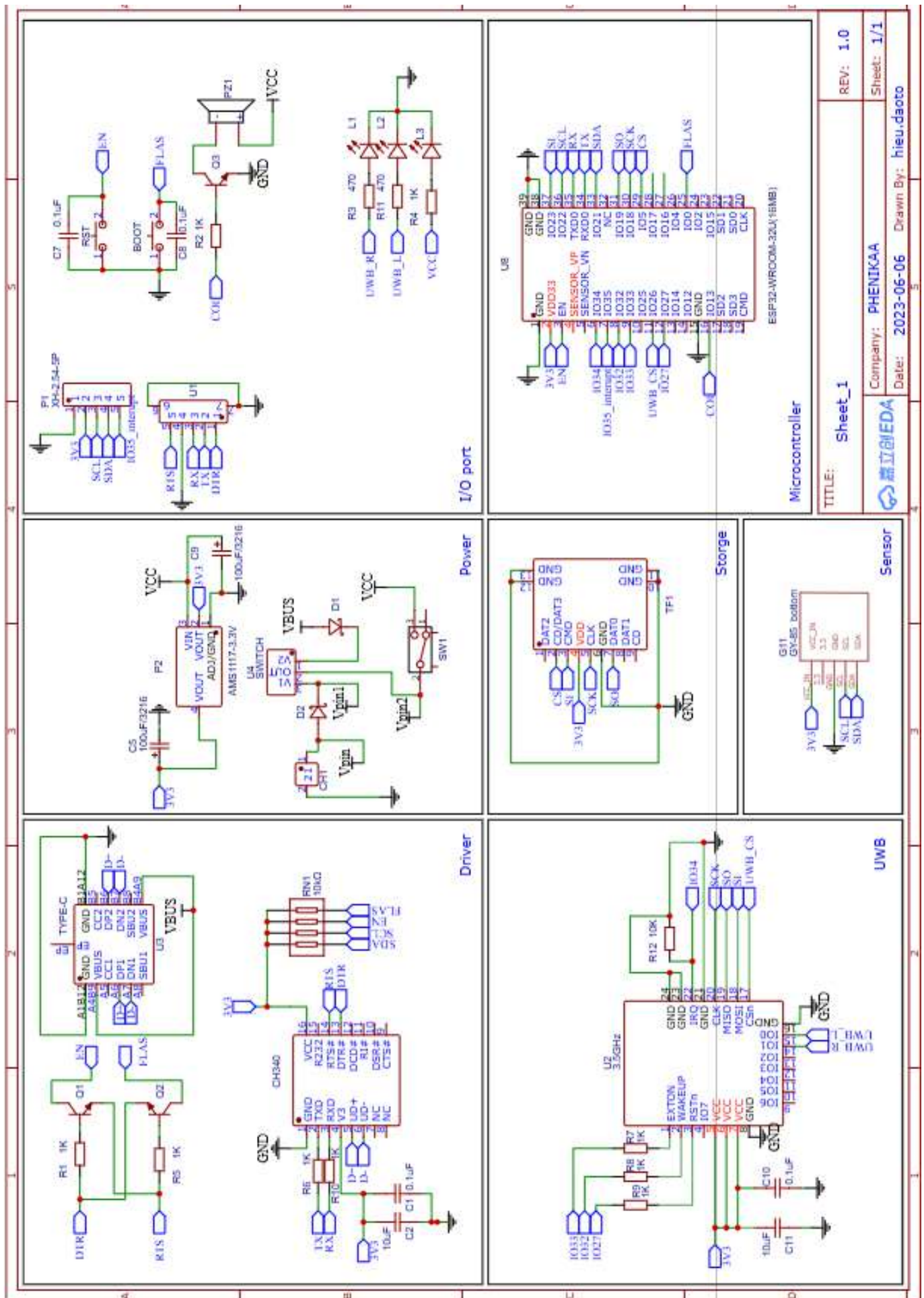
- Nghiên cứu viên chính (để thực hiện);
- Lưu: VP.HĐĐĐ

CHỦ TỊCH



GS.TS Cao Minh Châu

PHỤ LỤC 2: SƠ ĐỒ NGUYÊN LÝ



REV: 1.0

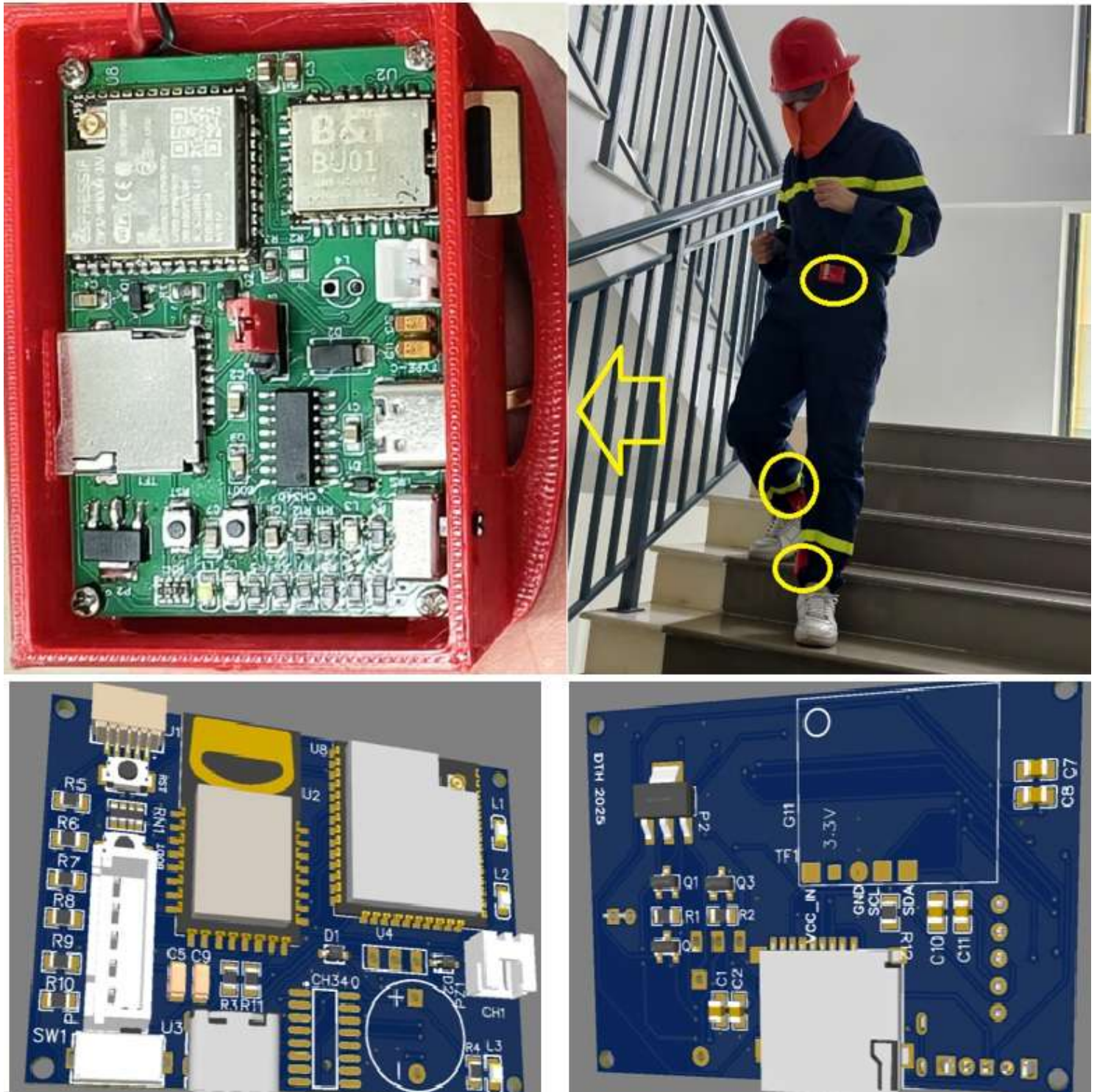
Sheet: 1/1

Sheet_1

Company: PHENIKAA

Date: 2023-06-06 Drawn By: hieu.daoto

PHỤ LỤC 3: THIẾT BỊ ĐEO BẢN THỬ NGHIỆM



Số: 231 /QĐ-HVKHCN

Hà Nội, ngày 30 tháng 3 năm 2026

QUYẾT ĐỊNH
Về việc thành lập Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện

GIÁM ĐỐC
HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ

Căn cứ Quyết định số 364/QĐ-VHL ngày 01/3/2025 của Chủ tịch Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam về việc ban hành Quy chế Tổ chức và hoạt động của Học viện Khoa học và Công nghệ;

Căn cứ Thông tư số 08/2017/TT-BGDĐT ngày 04/4/2017 của Bộ trưởng Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc ban hành Quy chế Tuyển sinh và Đào tạo trình độ Tiến sĩ;

Căn cứ Quyết định số 1948/QĐ-HVKHCN ngày 28/12/2018 của Giám đốc Học viện Khoa học và Công nghệ về việc ban hành Quy định đào tạo trình độ tiến sĩ tại Học viện Khoa học và Công nghệ;

Căn cứ Quyết định số 1119/QĐ-HVKHCN ngày 10/08/2021 của Giám đốc Học viện Khoa học và Công nghệ về việc công nhận nghiên cứu sinh đợt 2 năm 2021;

Căn cứ Quyết định số 778/QĐ-HVKHCN ngày 08/08/2025 của Giám đốc Học viện Khoa học và Công nghệ về việc gia hạn thời gian học tập lần 1 cho nghiên cứu sinh Đào Tô Hiệu;

Xét đề nghị của Trưởng phòng Đào tạo.

QUYẾT ĐỊNH:

Điều 1. Thành lập Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện cho nghiên cứu sinh Đào Tô Hiệu với đề tài:

Nghiên cứu các phương pháp nhận dạng hành động và định vị trong nhà hỗ trợ tìm kiếm cứu nạn trong các tình huống khẩn cấp

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa

Mã số: 9 52 02 16

Danh sách thành viên Hội đồng đánh giá luận án kèm theo Quyết định này.

Điều 2. Hội đồng có trách nhiệm đánh giá luận án tiến sĩ theo đúng quy chế hiện hành của Bộ Giáo dục và Đào tạo, của Học viện Khoa học và Công nghệ. Quyết định có hiệu lực tối đa 90 ngày kể từ ngày ký. Hội đồng tự giải thể sau khi hoàn thành nhiệm vụ.

Điều 3. Trưởng phòng Tổ chức - Hành chính, Trưởng phòng Đào tạo, Trưởng phòng Kế toán, các thành viên có tên trong danh sách Hội đồng và nghiên cứu sinh có tên tại Điều 1 chịu trách nhiệm thi hành Quyết định này. /.

Nơi nhận:

- Như Điều 3;
- Lưu hồ sơ NCS;
- Lưu: VT, ĐT.PQ.15.

GIÁM ĐỐC

GS. TS. Vũ Đình Lâm



**DANH SÁCH HỘI ĐỒNG ĐÁNH GIÁ LUẬN ÁN TIẾN SĨ
CẤP HỌC VIỆN**

(Kèm theo quyết định số 231/QĐ-HVKHCN ngày 30/3 /2026
của Giám đốc Học viện Khoa học và Công nghệ)

Cho luận án của nghiên cứu sinh: Đào Tô Hiệu

Đề tài: **Nghiên cứu các phương pháp nhận dạng hành động và định vị trong
nhà hỗ trợ tìm kiếm cứu nạn trong các tình huống khẩn cấp**

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa Mã số: 9 52 02 16

Người hướng dẫn 1: GS. TS. Trần Đức Tân, Đại học Phenikaa

Người hướng dẫn 2: TS. Trần Đức Nghĩa, Viện Công nghệ thông tin,
Viện Hàn lâm KHCN VN

TT	Họ và tên, học hàm, học vị	Ngành	Cơ quan công tác	Trách nhiệm trong Hội đồng
1	PGS.TS. Nguyễn Đức Dũng	Khoa học máy tính	Viện Công nghệ thông tin, Viện Hàn lâm KHCN VN	Chủ tịch
2	PGS.TS. Đào Quý Thịnh	Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa	Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách Khoa Hà Nội	Phản biện 1
3	PGS.TS. Lê Hải Châu	Kỹ thuật điện tử	Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông, Bộ Khoa học và Công nghệ	Phản biện 2
4	PGS.TS. Phạm Minh Nghĩa	Kỹ thuật điện tử	Học viện Kỹ thuật Quân sự, Bộ Quốc Phòng	Phản biện 3
5	TS. Bùi Thị Thanh Quyên	Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa	Viện Công nghệ thông tin, Viện Hàn lâm KHCN VN	Ủy viên - Thư ký
6	PGS.TS. Nguyễn Quang Vịnh	Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa	Viện Khoa học và Công nghệ Quân Sự, Bộ Quốc Phòng	Ủy viên
7	PGS.TS. Nguyễn Hữu Phát	Điện - điện tử	Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách Khoa Hà Nội	Ủy viên

Hội đồng gồm 07 thành viên./.

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

BẢN NHẬN XÉT LUẬN ÁN TIẾN SĨ CẤP HỌC VIỆN

Tên đề tài: Nghiên cứu các phương pháp nhận dạng hành động và định vị trong nhà hỗ trợ tìm kiếm cứu nạn trong các tình huống khẩn cấp

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa

Mã số: 9 52 02 16

Nghiên cứu sinh: Đào Tô Hiệu

Người hướng dẫn 1: GS.TS. Trần Đức Tân

Người hướng dẫn 2: TS. Trần Đức Nghĩa

Người nhận xét: Nguyễn Đức Dũng

Cơ quan công tác: Viện Công nghệ thông tin, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam

NỘI DUNG NHẬN XÉT

1. Tính cần thiết, thời sự, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài luận án

Đề tài nghiên cứu và đề xuất các giải pháp mới trong theo dõi và nhận dạng hành động nhằm nâng cao hiệu quả và độ an toàn của lính cứu hỏa trong quá trình tác nghiệp thông qua cảm biến đeo trên người. Luận án góp phần phát triển nền tảng khoa học về nhận dạng hành động (HAR) và định vị trong nhà (IPS) bằng việc kết hợp các kỹ thuật cảm biến, học máy và mô hình tối ưu. Kết quả của luận án có ý nghĩa khoa học và có thể ứng dụng trực tiếp vào hệ thống hỗ trợ chỉ huy cứu nạn thông minh, góp phần nâng cao năng lực và độ an toàn cho lực lượng PCCC.

2. Sự không trùng lặp của đề tài nghiên cứu so với các công trình, luận án đã công bố ở trong và ngoài nước; tính trung thực, rõ ràng và đầy đủ trong trích dẫn tài liệu tham khảo

Những nội dung và kết quả nghiên cứu chính của luận án là không trùng lặp với các công trình công bố trước đây. Các tài liệu đều được trích dẫn rõ ràng đầy đủ trong luận án.

3. Sự phù hợp giữa tên đề tài với nội dung, giữa nội dung với ngành và mã số

Tên đề tài luận án, nội dung, phương pháp và kết quả nghiên cứu phù hợp với chuyên ngành và mã số đào tạo.

4. Độ tin cậy và tính hiện đại của phương pháp đã sử dụng để nghiên cứu

Các kết quả đạt được là đáng tin cậy thông qua việc kết hợp xử lý tín hiệu, học máy và thực nghiệm trên cả dữ liệu tự xây dựng và dữ liệu công khai. Các phương pháp có tính hiện đại, phù hợp với xu hướng nghiên cứu hiện nay và đáp ứng tốt yêu cầu triển khai trên hệ thống nhúng, thiết bị đeo trong môi trường thực tế.

5. Kết quả nghiên cứu mới của tác giả

Luận án có hai đóng góp chính:

- ✓ Thuật toán tích hợp cửa sổ trượt thông minh với cơ chế phát hiện chuyển đổi hành động, nhằm tối ưu phân đoạn tín hiệu và nâng cao chất lượng đặc trưng đầu vào. Thuật toán được ứng dụng xây dựng hệ thống nhận dạng hành động thời gian thực, tối ưu cho môi trường hoạt động đặc thù của lính cứu hỏa, với mục tiêu cải thiện độ chính xác và tốc độ phản hồi của hệ thống giám sát tự động.
- ✓ Giải thuật xác định bước chân di chuyển có độ phức tạp tính toán thấp, dựa trên sự kết hợp dữ liệu từ cảm biến quán tính và băng thông siêu rộng. Giải thuật này nhằm xây dựng một mô hình ước lượng chuyển động người đi bộ hiệu quả, hỗ trợ cải thiện độ chính xác và ổn định của hệ thống định vị và theo dõi vị trí người trong nhà.

6. Ưu điểm và nhược điểm về nội dung, kết cấu và hình thức của luận án.

Ưu điểm:

- Luận án có ý nghĩa khoa học và thực tế cao. Những nội dung nghiên cứu chính và kết quả đạt được là cụ thể, có thể sử dụng làm cơ sở cho những nghiên cứu cải tiến tiếp theo cũng như trong phát triển ứng dụng thực tế.

- Luận án được trình bày tốt với cấu trúc hợp lý, nội dung rõ ràng, phân tích và lập luận chặt chẽ. Nghiên cứu thử nghiệm được tiến hành công phu, có hệ thống. Những hạn chế và hướng nghiên cứu tiếp theo cũng được nêu một cách rõ ràng, cụ thể.

Hạn chế hay những điểm có thể cân nhắc để sửa chữa, bổ sung:

- Ngoài những nghiên cứu hàn lâm liên quan, luận án nên phân tích tốt hơn các hệ thống và sản phẩm đã được triển khai và thương mại hóa thực tế trên thế giới để từ đó xác định được những hạn chế về khoa học và công nghệ của hệ thống được đề xuất trong môi trường công nghiệp và thương mại hóa sản phẩm.
- Trong số những hành động hay chỉ số về hiệu năng được nghiên cứu, luận án có thể tập trung phân tích sâu hơn vào những hành động quan trọng nhất đối với bài toán được đặt ra như bị ngã hay ví trí số tầng trong toàn nhà của lính cứu hỏa. Những yếu tố liên quan tới những vấn đề quan trọng nhất cũng cần được phân tích tốt hơn.
- Những từ khóa viết tắt nên được trình bày đầy đủ tiếng Anh trong lần đề cập tới đầu tiên.

7. Nội dung luận án đã được công bố trên tạp chí, kỷ yếu hội nghị khoa học nào và giá trị khoa học của các công trình đã công bố.

Các kết quả nghiên cứu của luận án đã được trích dẫn trung thực trong các công trình công bố. Trích dẫn tài liệu tham khảo được thực hiện một cách rõ ràng, đầy đủ và cập nhật.

8. Kết luận

- Luận án đáp ứng các yêu cầu với một luận án tiến sĩ.
- Bản tóm tắt luận án phản ánh trung thành nội dung cơ bản của luận án.
- Luận án có thể đưa ra bảo vệ cấp Học viện để nhận học vị tiến sĩ.

Hà nội, ngày 6 tháng 4 năm 2026

Người nhận xét



Nguyễn Đức Dũng

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

BẢN NHẬN XÉT PHẢN BIỆN LUẬN ÁN TIẾN SĨ CẤP HỌC VIỆN

Tên đề tài: Nghiên cứu các phương pháp nhận dạng hành động và định vị trong nhà hỗ trợ tìm kiếm cứu nạn trong các tình huống khẩn cấp

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa

Mã số: 9 52 02 16

Nghiên cứu sinh: Đào Tô Hiệu

Người hướng dẫn 1: GS.TS. Trần Đức Tân

Người hướng dẫn 2: TS. Trần Đức Nghĩa

Người phản biện: PGS. TS. Đào Quý Thịnh

Cơ quan công tác: Đại học Bách Khoa Hà Nội

NỘI DUNG NHẬN XÉT

1, Tính cần thiết, thời sự, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài luận án

Gần đây tình trạng nhân viên cứu hộ cứu nạn gặp tai nạn trong quá trình cứu hộ cứu nạn ngày càng tăng. Việc phát hiện các hành động bất thường của người cứu hộ cứu nạn và vị trí của họ sớm sẽ giúp giảm thiểu nguy cơ tổn thất về người. Nghiên cứu về lĩnh vực này của NCS có tính thời sự và thực tiễn cao.

Luận án đóng góp về mặt khoa học thông qua việc phát triển thuật toán nhận dạng hành động (HAR) và phát hiện hành vi bất thường (ngã) sử dụng các phương pháp xử lý tín hiệu, mô hình học máy và tối ưu mô hình.

Ngoài ra việc xây dựng phương pháp định vị người cứu nạn bằng UAV gắn thiết bị tích hợp công nghệ UWB cũng mang tính khoa học và thực tiễn cao.

2, Sự không trùng lặp của đề tài nghiên cứu so với các công trình, luận án đã công bố ở trong và ngoài nước; tính trung thực, rõ ràng và đầy đủ trong trích dẫn tài liệu tham khảo

Cho đến thời điểm hiện tại phản biện thấy luận án không trùng lặp với các công trình công bố trước đây. Các tài liệu đều được trích dẫn rõ ràng đầy đủ trong luận án.

3. Sự phù hợp giữa tên đề tài với nội dung, giữa nội dung với ngành và mã số

Tên đề tài luận án phù hợp với nội dung nghiên cứu và phản ánh đúng mục tiêu, phạm vi của đề tài.

Các hướng tiếp cận, phương pháp và kết quả nghiên cứu phù hợp với chuyên ngành Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa, mã số 9 52 02 16.

4. Độ tin cậy và tính hiện đại của phương pháp đã sử dụng để nghiên cứu

NCS có phương pháp nghiên cứu hợp lý từ tìm hiểu tổng quan về tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước, từ đó đưa ra phương án phù hợp. Các thuật toán được xây dựng bằng lý thuyết, kiểm nghiệm bằng thực nghiệm với các dữ liệu tự xây dựng và dữ liệu được công bố công khai. Điều này đảm bảo độ tin cậy của nghiên cứu.

Các phương pháp xử lý tín hiệu, học máy có tính hiện đại, định vị vị trí phù hợp với xu hướng nghiên cứu hiện nay và có tính cập nhật cao.

5. Kết quả nghiên cứu mới của tác giả

Luận án có ba đóng góp chính:

- ✓ Đề xuất thuật toán tích hợp cửa sổ trượt với cơ chế phát hiện chuyển đổi hành động, nhằm tối ưu phân đoạn tín hiệu và giảm số lượng đặc trưng đầu vào mà vẫn đảm bảo độ chính xác nhận dạng hành động đồng thời nâng cao tốc độ phản hồi của hệ thống giám sát tự động. Nhờ tối ưu hóa tham số, thuật toán học máy rừng ngẫu nhiên (RF) có thể triển khai với mô hình đã xây dựng trên các vi điều khiển có dung lượng bộ nhớ 1MB.
- ✓ Đề xuất giải thuật xác định các thông số giúp định vị vị trí như: độ dài bước chân di chuyển, hướng di chuyển, chiều cao tầng, dựa trên sự kết hợp dữ liệu từ các cảm biến và bộ lọc.
- ✓ Xây dựng bộ dữ liệu hành động của lính cứu hỏa với 11 loại hành động, bao gồm: Đi bộ, đứng, nằm, ngồi, chạy bộ, đi khom lưng, bò thấp, trườn, ngã, đi xuống cầu thang, đi lên cầu thang.

6. Ưu điểm và nhược điểm về nội dung, kết cấu và hình thức của luận án.

Luận án trình bày gần 120 trang, gồm 3 chương nội dung chính có các ưu nhược điểm cụ thể như sau:

Ưu điểm:

- Về hình thức: Luận án trình bày cẩn thận, các hình vẽ bảng biểu rõ ràng nhiều thông tin. Các tài liệu tham khảo được trình bày đúng chuẩn quốc tế và được trích dẫn đầy đủ.
- Về nội dung: Luận án trình bày logic từ tìm hiểu tổng quan các phương pháp nhận dạng hành động từ đó đề xuất phương pháp nhận dạng hành động và phương pháp xác định vị trí.
NCS Xây dựng bộ dữ liệu và kiểm nghiệm phương pháp nhận dạng hành động đã đề xuất qua bộ dữ liệu đã xây dựng và bộ dữ liệu công khai khác. Các kết quả là đáng tin cậy và đạt kết quả cơ bản tốt hơn so với các phương pháp trước đó.
Phương pháp định vị trong nhà đã đề xuất cũng được kiểm nghiệm với các kịch bản khác nhau của điều kiện môi trường. Các kết quả cũng rất đáng tin cậy và có chỉ số đánh giá tốt về độ chính xác, năng lượng tiêu thụ, tính thời gian thực.

Nhược điểm:

Về hình thức, trình bày:

- Xem xét lại việc trích dẫn là chỉ số nhỏ ở trên, hay dùng ngoặc vuông ở 1 số nội dung cho thống nhất.
- Không nên dùng dấu chấm “.” hiển thị phép nhân.
- Các câu văn hay dùng ở tiếng Anh không nên sử dụng ở văn viết tiếng Việt như: Định và cộng sự ..., Thành đã xây dựng ...

Về nội dung:

- Trong việc định vị người hỗ trợ cứu nạn cần làm rõ mấy vấn đề như sau:
 - Việc tính toán độ dài bước chân và khoảng cách di chuyển có được kiểm nghiệm độ chính xác hay không (Phần kết luận có nêu ra)? Ví dụ tình nguyện viên được yêu cầu bước qua 1 số điểm được đánh dấu sẵn? Nếu có cần có hình ảnh minh họa về việc này.
 - Các tình nguyện viên có hoạt động đồng thời hay không, cần làm rõ trong kịch bản? Và việc xử lý đồng thời các tín hiệu của các tình nguyện viên gửi về cũng nên được làm rõ và thảo luận thêm.

- Phần thiết bị đo lường định vị trí
 - NCS cần bổ sơ đồ nguyên lý hệ thống cùng với Bảng liệt kê các thiết bị chính được sử dụng kèm các thông số cơ bản.
 - Hình ảnh sản phẩm hoàn thiện.
- Đối với các hoạt động thí nghiệm, thực nghiệm liên quan tới con người (có giả lập té ngã) cần có mẫu đồng ý tham gia nghiên cứu kèm theo liệt kê các rủi ro có thể xảy ra.

Các sai sót và hạn chế nêu trên chủ yếu liên quan đến lập luận phương pháp, mức độ khái quát hóa và cách trình bày, phân tích số liệu, chưa ảnh hưởng đến tính đúng đắn cơ bản của hướng nghiên cứu.

7. Nội dung luận án đã được công bố trên tạp chí, kỷ yếu hội nghị khoa học nào và giá trị khoa học của các công trình đã công bố.

NCS đã có 6 công trình công bố: 03 Tạp chí quốc tế (02 Scopus Q3, 01 SCIE Q1), 02 Hội thảo quốc tế Scopus có xếp hạng và 01 tạp chí trong nước được HDGSNN công nhận.

Các kết quả nghiên cứu của luận án đã được trích dẫn trung thực trong các công trình công bố. Trích dẫn tài liệu tham khảo được thực hiện một cách rõ ràng, đầy đủ và cập nhật.

8. Kết luận

- Nội dung của Luận án đáp ứng đầy đủ yêu cầu đối với LATTS Ngành Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa.
- Bản tóm tắt luận án phản ánh trung thành nội dung cơ bản của luận án
- Phản biện đề nghị cho phép đưa Luận án ra bảo vệ cấp học viện để nhận học vị tiến sĩ.

Hà nội, ngày 15 tháng 4 năm 2026

Người phản biện



Đào Quý Thịnh

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

BẢN NHẬN XÉT PHẢN BIỆN LUẬN ÁN TIẾN SĨ CẤP HỌC VIỆN

Tên đề tài: Nghiên cứu các phương pháp nhận dạng hành động và định vị trong nhà hỗ trợ tìm kiếm cứu nạn trong các tình huống khẩn cấp

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa

Mã số: 9 52 02 16

Nghiên cứu sinh: Đào Tô Hiệu

Người hướng dẫn 1: GS.TS. Trần Đức Tân

Người hướng dẫn 2: TS. Trần Đức Nghĩa

Người phản biện: PGS.TS. Lê Hải Châu

Cơ quan công tác: Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

NỘI DUNG NHẬN XÉT

1, Tính cần thiết, thời sự, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài luận án

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh chóng và các vụ hỏa hoạn tại công trình phức tạp ngày càng gia tăng, lực lượng cứu hỏa thường xuyên phải tác nghiệp trong môi trường khắc nghiệt, nơi khói bụi dày đặc, nhiệt độ cao và tín hiệu định vị toàn cầu (GPS) bị vô hiệu hóa. Ở môi trường hỏa hoạn, tín hiệu GPS bị suy hao do cấu trúc bê tông, nhiệt độ cao và khói dày đặc khiến các phương tiện liên lạc truyền thống gần như tê liệt. Sự thiếu hụt thông tin liên tục và chính xác về vị trí cũng như trạng thái hoạt động của từng lính cứu hỏa không chỉ làm giảm hiệu quả phối hợp chỉ huy mà còn trực tiếp đe dọa đến an toàn tính mạng của chính những người làm nhiệm vụ cứu hộ. Do vậy, việc nghiên cứu các phương pháp lưu vết và định vị trong nhà phục vụ công tác trinh sát, cứu hộ - cứu nạn là vấn đề cấp thiết hiện nay, đặc biệt đối với môi trường cháy nổ, khói bụi và tín hiệu GPS bị triệt tiêu.

Với chủ đề “Nghiên cứu các phương pháp nhận dạng hành động và định vị trong nhà hỗ trợ tìm kiếm cứu nạn trong các tình huống khẩn cấp”, đề tài luận án là một hướng nghiên cứu có tính cấp thiết và ý nghĩa khoa học – thực tiễn cao. Đề tài luận án tập trung phát triển giải pháp thiết bị đeo tự trị, không phụ thuộc hạ tầng cố định, có khả năng nhận dạng đa dạng hành động đặc thù (bao gồm ngã, bò, trườn, đi khom) và ước lượng vị trí 3D của lực lượng cứu hỏa trong môi trường khẩn cấp trong nhà – nơi tín hiệu GPS bị vô hiệu và điều kiện tác nghiệp khắc nghiệt (nhiệt độ cao, khói dày, tầm nhìn hạn chế). Luận án giải quyết bài

toán đề ra thông qua việc kết hợp hai hướng tiếp cận: (1) nhận dạng hành động người (HAR) dựa trên cảm biến đeo, và (2) định vị trong nhà (IPS) bằng công nghệ cảm biến quán tính kết hợp UWB. Đây là hướng tiếp cận phù hợp với xu hướng nghiên cứu quốc tế hiện nay và có khả năng ứng dụng thực tiễn cao trong lực lượng phòng cháy chữa cháy Việt Nam.

2. Sự không trùng lặp của đề tài nghiên cứu so với các công trình, luận án đã công bố ở trong và ngoài nước; tính trung thực, rõ ràng và đầy đủ trong trích dẫn tài liệu tham khảo

Cho đến thời điểm nhận xét, đề tài nghiên cứu của nghiên cứu sinh (NCS) Đào Tô Hiệu cùng các nội dung khoa học đề xuất được trình bày trong luận án chưa thấy có sự trùng lặp với các công trình, luận văn và luận án đã công bố trong và ngoài nước khác.

Trong luận án, NCS Đào Tô Hiệu đã khảo sát, tổng hợp và sử dụng nhiều tài liệu nghiên cứu và sách tham khảo (99 tài liệu với 01 tài liệu tiếng Việt, 01 luận án TS và 97 tài liệu bằng tiếng Anh), đa số đều là từ các nguồn tạp chí và hội nghị khoa học có uy tín. Các tài liệu tham khảo này đều được trích dẫn tương đối đầy đủ, rõ ràng.

3. Sự phù hợp giữa tên đề tài với nội dung, giữa nội dung với ngành và mã số

Tên đề tài "Nghiên cứu các phương pháp nhận dạng hành động và định vị trong nhà hỗ trợ tìm kiếm cứu nạn trong các tình huống khẩn cấp" phản ánh đúng và đầy đủ nội dung nghiên cứu. Luận án tập trung vào hai nhiệm vụ cốt lõi được nêu trong tên: (1) nhận dạng hành động người (Chương 2) và (2) định vị trong nhà (Chương 3), với ứng dụng cụ thể là hỗ trợ lực lượng cứu hỏa trong các tình huống khẩn cấp. Không có sự lệch pha đáng kể giữa tên đề tài và nội dung triển khai.

Các hướng tiếp cận, phương pháp và kết quả nghiên cứu hoàn toàn phù hợp với chuyên ngành Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa, mã số 9 52 02 16. Luận án khai thác sâu các vấn đề về thu thập và xử lý tín hiệu cảm biến, điều khiển thiết bị nhúng theo thời gian thực, tích hợp mô hình học máy trên vi điều khiển, và xây dựng hệ thống tự động giám sát – cảnh báo – định vị. Tất cả đều là các vấn đề trọng tâm của ngành Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa trong bối cảnh phát triển của IoT và hệ thống nhúng thông minh.

4. Độ tin cậy và tính hiện đại của phương pháp đã sử dụng để nghiên cứu

Luận án vận dụng một quy trình nghiên cứu chặt chẽ, từ khảo sát lý thuyết nền tảng đến đề xuất mô hình giải pháp và đánh giá thực nghiệm. Các công cụ toán học được sử dụng nhất quán để mô hình hóa bài toán, trong đó các phương pháp xử lý tín hiệu số (lọc ZLF, phát hiện đỉnh thích nghi), học máy (Random Forest tối ưu cho TinyML) và hợp nhất cảm biến (IMU, UWB, khí áp kế) được lựa chọn có cơ sở khoa học vững chắc, phù hợp với xu hướng nghiên cứu hiện đại về điện toán biên và định vị lai. Việc tối ưu đặc trưng miền thời gian thông qua phân tích mức độ quan trọng và tinh chỉnh siêu tham số bằng xác thực chéo 5-fold thể hiện tính chuẩn mực về phương pháp luận. Độ tin cậy của kết quả được củng cố thông qua thực nghiệm đối sánh trên cả bộ dữ liệu tự xây dựng lẫn ba bộ dữ liệu công khai (SFDLA, MobiFall, UniMiB-SHAR). Mặc dù còn thiếu một số đánh giá định lượng so sánh trực tiếp với các giải pháp liên quan trong cùng điều kiện thực nghiệm, về tổng thể, các phương pháp được sử dụng có tính hiện đại, đảm bảo độ tin cậy và phổ biến trong lĩnh vực này.

5. Kết quả nghiên cứu mới của tác giả

Luận án có hai đóng góp chính:

- ✓ Đề xuất thuật toán tích hợp cửa sổ trượt thông minh với cơ chế phát hiện chuyển đổi hành động, nhằm tối ưu phân đoạn tín hiệu và nâng cao chất lượng đặc trưng đầu vào. Cốt lõi của đóng góp này là chỉ số bất thường Alx được kết hợp với cơ chế điều chỉnh linh hoạt vị trí và kích thước của sổ quan sát, từ đó xây dựng hệ thống nhận dạng hành động thời gian thực (RFAR) đạt F_1 -micro trên 96% cho 11 hành động đặc thù của lính cứu hỏa, với độ trễ suy luận dưới 10 ms trên vi điều khiển ESP32. Đặc biệt, tỷ lệ phát hiện ngã đạt 100% độ nhạy và độ đặc hiệu, vượt trội so với các phương pháp đối sánh.
- ✓ Đề xuất giải thuật xác định bước chân di chuyển có độ phức tạp tính toán thấp, dựa trên sự kết hợp dữ liệu từ cảm biến quán tính và UWB đo khoảng cách liên chi. Giải thuật đạt sai số tuyệt đối trung bình 5 cm và độ lệch chuẩn 4,36 cm trên mỗi bước, hỗ trợ xây dựng hệ thống IPS 3D với sai số định vị tổng thể dưới 2 m và khả năng xác định tầng chính xác cao ngay cả dưới tác động nhiễu nhiệt từ đám cháy giả lập.

Ngoài ra, việc xây dựng bộ dữ liệu riêng gồm 11 hành động đặc thù của lính cứu hỏa (bao gồm bò, trườn, đi khom lưng, ngã theo nhiều hướng...) là đóng

góp thực tiễn có giá trị cho cộng đồng nghiên cứu trong cùng lĩnh vực.

6. Ưu điểm và nhược điểm về nội dung, kết cấu và hình thức của luận án

Ưu điểm:

- *Cấu trúc logic và chặt chẽ:* Luận án có bố cục hợp lý, đi từ tổng quan, xác định vấn đề, đến đề xuất giải pháp cho hai bài toán con (HAR và IPS) và cuối cùng là kết luận. Tổng dung lượng luận án (không kể phần phụ lục, mục lục, danh mục bảng biểu, hình ảnh) là 109 trang nội dung chính, phản ánh sự cân đối giữa phần tổng quan (16 trang), hai chương chuyên sâu về HAR (38 trang) và IPS (35 trang), cùng phần tổng kết và tài liệu tham khảo. Nội dung chính và phân bố thời lượng cụ thể của các phần trong luận án như sau:
 - *Mở đầu (5 trang):* Trình bày tính cấp thiết của đề tài, mục tiêu, đối tượng, phạm vi nghiên cứu, các đóng góp chính và cấu trúc tổng thể của luận án.
 - *Chương 1 – Tổng quan nghiên cứu (25 trang):* Tổng hợp và phân tích các công trình liên quan về nhận dạng hành động người (HAR) sử dụng thiết bị đeo và các hệ thống định vị trong nhà (IPS) phục vụ cứu nạn. Chương này xác định khoảng trống nghiên cứu và định hướng phát triển của luận án.
 - *Chương 2 – Hệ thống nhận dạng hành động cho lĩnh vực cứu hộ (38 trang):* Đề xuất hệ thống RFAR nhận dạng thời gian thực 11 hành động đặc thù dựa trên cảm biến gia tốc tại eo và mô hình Random Forest nhúng trên vi điều khiển hạn chế tài nguyên. Trình bày chi tiết quy trình thu thập dữ liệu, tiền xử lý tín hiệu (bao gồm thuật toán phát hiện điểm bất thường AIX), trích xuất và tối ưu đặc trưng, cùng kết quả thực nghiệm trên dữ liệu riêng và ba bộ dữ liệu công khai.
 - *Chương 3 – Phương pháp định vị trong nhà sử dụng thiết bị đeo (36 trang):* Phát triển hệ thống định vị lai không phụ thuộc hạ tầng, tích hợp cảm biến quán tính (IMU), khí áp kế và công nghệ UWB liên chi để ước lượng quãng đường di chuyển, hướng đi và độ cao tầng. Chương này tập trung vào giải thuật ước lượng bước chân dựa trên

UWB, mô hình cây quyết định phân loại hướng di chuyển, thuật toán bù sai số áp suất theo nhiệt độ, cùng đánh giá thực nghiệm trên bản đồ số hóa.

- *Kết luận và Kiến nghị* (3 trang): Tóm tắt các kết quả đạt được, khẳng định đóng góp mới của luận án, nêu hạn chế và đề xuất hướng phát triển tiếp theo.
- *Trình bày rõ ràng, mạch lạc*: Nhìn chung, luận án có văn phong khoa học, sử dụng thuật ngữ chính xác. Các hình vẽ, bảng biểu được thiết kế trực quan, có tính minh họa cao (ví dụ: Hình 3.2, Hình 3.5, Hình 3.8, ...). Các thuật toán được trình bày dưới dạng pseudo-code, dễ hiểu và dễ triển khai.
- *Nội dung phong phú, tính ứng dụng cao và bài toán nghiên cứu rõ ràng*: Luận án giải quyết bài toán có ý nghĩa xã hội và thực tiễn thiết thực, đặc biệt trong bối cảnh tình hình cháy nổ tại Việt Nam và thế giới đang gia tăng. Hệ thống được thiết kế hướng đến triển khai thực tế, không phụ thuộc cơ sở hạ tầng, phù hợp với điều kiện môi trường khắc nghiệt của hỏa hoạn.
- *Hệ thống thực nghiệm cụ thể và có kiểm chứng nhiều chiều*: Kết quả được đánh giá trên cả dữ liệu tự thu thập (11 hành động lính cứu hỏa) và 3 bộ dữ liệu công khai chuẩn (SFDLA, MobiFall, UniMiB-SHAR), tăng tính khách quan và khả năng tổng quát hóa của kết quả. Hệ thống định vị IPS được thử nghiệm thực tế tại toà nhà A4, Đại học Phenikaa với 7 tầng.

Nhược điểm:

Mặc dù luận án có kết cấu hợp lý, đảm bảo tính khoa học và thể hiện rõ các kết quả đạt được, tuy nhiên, theo quan điểm cá nhân của người nhận xét, luận án còn một số nhược điểm và cần được hiệu chỉnh, sửa chữa một số nội dung để được hoàn thiện hơn. Cụ thể:

- NCS đã đưa ra một số giả định quan trọng để đơn giản hóa bài toán (mục 1.5 trang 28). Tuy nhiên, một số giả định có thể làm giảm tính tổng quát và khả năng ứng dụng thực tế của hệ thống. Cần làm rõ hơn tác động của các giả định này. Cụ thể:
 - *Hạn chế về phạm vi đánh giá hướng di chuyển*: Hệ thống giới hạn hướng di chuyển trong 8 hướng chính và ước lượng từ con quay hồi chuyển, tránh sử dụng từ kế do nhiễu từ trong môi trường kim loại.

Tuy nhiên, NCS chưa định lượng mức độ ảnh hưởng khi linh cứu hoà di chuyển theo hướng trung gian giữa hai trong số 8 hướng chuẩn, cũng như chưa đánh giá sai số tích lũy theo hướng di chuyển trong các kịch bản quỹ đạo phức tạp nhiều lần rẽ liên tiếp, ...

- *Giả định về đối tượng nghiên cứu là 100% nam giới*: Việc chỉ thu thập dữ liệu trên nam giới (dù có lý do khách quan từ đặc thù nghề nghiệp) cần có trích dẫn tài liệu làm sở cứ.
- Về mô hình định vị 3D và vai trò của UAV (Mục 3.1.1, Hình 3.1), NCS sử dụng UAV mang Anchor UWB để hiệu chỉnh vị trí tuyệt đối cho linh cứu hỏa ở gần cửa sổ/hành lang. Tuy nhiên, phần mô tả và thực nghiệm về cơ chế kết hợp này còn khá sơ lược. NCS cần giải thích rõ hơn về cơ chế hoạt động của UAV trong hệ thống? (Ví dụ: UAV bay ở độ cao và khoảng cách cố định bao nhiêu? Tần suất phát tín hiệu UWB là bao nhiêu? Thuật toán hợp nhất dữ liệu giữa vị trí tương đối từ PDR và vị trí tuyệt đối từ UWB (khi có tín hiệu) được thực hiện như thế nào?).
- Hiệu năng trên tập dữ liệu UniMiB-SHAR chưa đồng đều: F_1 -micro = 78,2% trên UniMiB (AF17) thấp hơn đáng kể so với 96,1% trên tập dữ liệu riêng và 96,6% trên SFDLA/MobiFall. Tuy NCS lý giải do sự không đồng nhất hệ trục tọa độ cảm biến khi thiết bị đặt tự do trong túi, nhưng chưa có giải pháp đề xuất để khắc phục vấn đề định hướng thiết bị tùy ý này trong thực tế triển khai. Điều này cũng cho thấy hệ thống khá nhạy cảm với sự sai lệch về góc đặt cảm biến.
- Một số sai lỗi chính tả, trình bày. Ví dụ: “Nghiên cứu này” sử dụng cho cả Bảng 2.3 và 3.4, Việt hoá hình vẽ (Hình 2.3), ...

7. Nội dung luận án đã được công bố trên tạp chí, kỷ yếu hội nghị khoa học nào và giá trị khoa học của các công trình đã công bố.

Như được trình bày trong nội dung luận án, các kết quả nghiên cứu và đề xuất của NCS được thể hiện qua các công trình công bố trên các tạp chí và hội nghị khoa học chuyên ngành trong nước và quốc tế có phân biện và về mặt học thuật đáp ứng yêu cầu đối với luận án tiến sĩ, thể hiện được sự phù hợp giữa nội dung và đề tài luận án cũng như chuyên ngành.

NCS Đào Tô Hiệu công bố tổng số 06 bài báo trên các tạp chí và hội nghị

khoa học có liên quan đến nội dung của luận án. Công trình [CT1] [SCOPUS, Q3] đặt nền tảng ban đầu cho hệ thống HAR trên vi điều khiển công suất thấp với các hành động cơ bản. [CT2] [SCOPUS, Q3] phát triển quy trình xử lý tín hiệu tối ưu cho vi điều khiển hiệu năng trung bình, sử dụng RF nhận dạng hành động cơ bản. [CT3] [SCIE Q1] đề xuất hệ thống RFAR hoàn chỉnh nhận dạng 11 hành động đặc thù của lính cứu hỏa, tích hợp cơ chế phát hiện AIx và cửa sổ trượt thông minh. Đây là công trình trọng tâm của luận án, được công bố trên IEEE Sensors Journal – tạp chí SCIE Q1 hàng đầu trong lĩnh vực, đây là minh chứng rõ ràng cho chất lượng và giá trị khoa học quốc tế của đóng góp chính trong luận án. Công trình [CT4] [SCOPUS, Q4] đề xuất giải thuật phát hiện bước chân thời gian thực trên MCU chi phí thấp, là nền tảng cho hệ thống IPS ở Chương 3. Công trình [CT5] [SCOPUS, Q4] trình bày hệ thống IPS 2D tích hợp đa cảm biến. Cuối cùng, công trình [CT6] trình bày hệ thống IPS 3D hoàn chỉnh kết hợp IMU-UWB-khí áp kế với bản đồ tòa nhà.

Trong số các công bố này, nghiên cứu sinh đứng tên đầu 04 bài với 02 bài trên tạp chí quốc tế ([CT2], [CT3]), 01 bài tạp chí trong nước ([CT6]) và 01 bài tại hội nghị khoa học quốc tế ([CT4]).

8. Kết luận

- Luận án đáp ứng các yêu cầu của một luận án tiến sĩ theo quy định hiện hành.
- Bản tóm tắt luận án phản ánh trung thành nội dung cơ bản của luận án.
- Luận án có thể được đưa ra bảo vệ cấp Học viện để nhận học vị tiến sĩ.

Hà nội, ngày 15 tháng 04 năm 2026

Người phản biện



Lê Hải Châu

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

BẢN NHẬN XÉT PHẢN BIỆN LUẬN ÁN TIẾN SĨ CẤP HỌC VIỆN

Tên đề tài: Nghiên cứu các phương pháp nhận dạng hành động và định vị trong nhà hỗ trợ tìm kiếm cứu nạn trong các tình huống khẩn cấp

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa

Mã số: 9 52 02 16

Nghiên cứu sinh: Đào Tô Hiệu

Người hướng dẫn 1: GS.TS. Trần Đức Tân

Người hướng dẫn 2: TS. Trần Đức Nghĩa

Người phản biện: PGS. TS Phạm Minh Nghĩa

Cơ quan công tác: Phòng Đào tạo/Học viện Kỹ thuật quân sự.

NỘI DUNG NHẬN XÉT

1, Tính cần thiết, thời sự, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài luận án

Ngày nay, các vụ cháy quy mô lớn và phức tạp ngày càng nhiều và đã làm gia tăng nguy cơ mất an toàn đối với lực lượng cứu nạn, cứu hộ trong quá trình tìm kiếm và dập đám cháy. Do đó việc nghiên cứu các giải pháp và chế tạo các thiết bị nhỏ gọn hỗ trợ cho lực lượng này khi làm nhiệm vụ trong nhà là cần thiết. Đây là một chủ đề nghiên cứu có ý nghĩa thực tiễn và giá trị khoa học cao, với mục tiêu ứng dụng các kỹ thuật xử lý tín hiệu tiên tiến để phân tích, xử lý dữ liệu đảm bảo được tính tức thời và độ chính xác cao. Kết quả của luận án sẽ góp phần giảm thiểu những rủi ro cho cán bộ, chiến sĩ trong quá trình làm nhiệm vụ cứu hỏa cũng như cung cấp thông tin kịp thời cho lực lượng ứng cứu bên ngoài về vị trí, tình trạng của lực lượng đang làm nhiệm vụ trong nhà. Các thông tin thu được từ hệ thống này sẽ giúp người chỉ huy ra quyết định kịp thời khi có rủi ro xảy ra đối với những cán bộ, chiến sĩ đang làm nhiệm vụ cứu hỏa trong nhà.

Đề tài tập trung vào một hướng nghiên cứu mới, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn sâu sắc trong lĩnh vực điều khiển – tự động hóa và an toàn công nghiệp. Việc nghiên cứu các phương pháp lưu vết và định vị trong nhà phục vụ công tác trinh sát, cứu hộ - cứu nạn là vấn đề cấp thiết hiện nay, đặc biệt đối với môi trường cháy nổ, khói bụi và tín hiệu GPS bị triệt tiêu.



Luận án góp phần phát triển nền tảng khoa học về nhận dạng hành động (HAR) và định vị trong nhà (IPS) bằng việc kết hợp các kỹ thuật cảm biến, học máy và mô hình tối ưu. Kết quả có thể ứng dụng trực tiếp vào hệ thống hỗ trợ chỉ huy cứu nạn thông minh, góp phần nâng cao năng lực và độ an toàn cho lực lượng PCCC.

2. Sự không trùng lặp của đề tài nghiên cứu so với các công trình, luận án đã công bố ở trong và ngoài nước; tính trung thực, rõ ràng và đầy đủ trong trích dẫn tài liệu tham khảo

Tên và nội dung nghiên cứu của đề tài không trùng lặp với các công trình, luận văn, luận án đã bảo vệ, công bố. Luận án có tính trung thực và rõ ràng; các tài liệu tham khảo được trích dẫn đầy đủ.

3. Sự phù hợp giữa tên đề tài với nội dung, giữa nội dung với ngành và mã số

Nội dung nghiên cứu của luận án phù hợp với tên đề tài, với ngành Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa cũng như mã số của ngành.

Các hướng tiếp cận, phương pháp và kết quả nghiên cứu phù hợp với chuyên ngành Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa, mã số 9 52 02 16.

4. Độ tin cậy và tính hiện đại của phương pháp đã sử dụng để nghiên cứu

Trong luận án, nghiên cứu sinh đã sử dụng kết hợp phương pháp nghiên cứu lý thuyết, tính toán giải tích, mô phỏng kết hợp với thực nghiệm. Các phương pháp nghiên cứu được lựa chọn có cơ sở khoa học rõ ràng, đảm bảo độ tin cậy thông qua việc kết hợp xử lý tín hiệu, học máy và thực nghiệm trên cả dữ liệu tự xây dựng và dữ liệu công khai. Các phương pháp có tính hiện đại, phù hợp với xu hướng nghiên cứu hiện nay và đáp ứng tốt yêu cầu triển khai trên hệ thống nhúng, thiết bị đeo trong môi trường thực tế.

5. Kết quả nghiên cứu mới của tác giả

Luận án có hai đóng góp chính:

- ✓ Đề xuất thuật toán tích hợp cửa sổ trượt thông minh với cơ chế phát hiện chuyển đổi hành động, nhằm tối ưu phân đoạn tín hiệu và nâng cao chất lượng đặc trưng đầu vào. Thuật toán được ứng dụng xây dựng hệ thống



nhận dạng hành động thời gian thực, tối ưu cho môi trường hoạt động đặc thù của lính cứu hỏa, với mục tiêu cải thiện độ chính xác và tốc độ phản hồi của hệ thống giám sát tự động.

- ✓ Đề xuất giải thuật xác định bước chân di chuyển có độ phức tạp tính toán thấp, dựa trên sự kết hợp dữ liệu từ cảm biến quán tính và băng thông siêu rộng. Giải thuật này nhằm xây dựng một mô hình ước lượng chuyển động người đi bộ hiệu quả, hỗ trợ cải thiện độ chính xác và ổn định của hệ thống định vị và theo dõi vị trí người trong nhà.

6. Ưu điểm và nhược điểm về nội dung, kết cấu và hình thức của luận án.

Ưu điểm:

Nội dung của luận án được trình bày trong 117 trang với 03 chương chính, phần mở đầu, kết luận, kiến nghị, tài liệu tham khảo.

Phần mở đầu, nghiên cứu sinh đã trình bày tính cấp thiết, mục tiêu, nội dung và các phương pháp nghiên cứu; ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án. Phần này được nghiên cứu sinh trình bày khá kỹ, cơ bản thể hiện được những kết quả chính và đóng góp của luận án. Tuy nhiên trong phần này nghiên cứu sinh nên bổ sung thêm về phương pháp nghiên cứu, trong đó nên đề cập đến các tập dữ liệu, cũng như các công cụ sử dụng trong luận án để đánh giá, kiểm chứng các thuật toán đề xuất.

Chương 1 Tổng quan nghiên cứu, trong 25 trang, nghiên cứu sinh đã trình bày tổng quan tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến nội dung luận án về nhận dạng hành động người. Trên cơ sở phân tích các ưu nhược điểm của các phương pháp trước đây NCS đề xuất định hướng nghiên cứu của luận.

Chương 2, Hệ thống nhận dạng hành động cho lính cứu hỏa, trình bày trong 37 trang. Trong chương này NCS trình bày mô hình hệ thống RFAR và phát triển một quy trình xử lý tín hiệu tối ưu cho các vi điều khiển có hiệu năng trung bình. Phương pháp đề xuất được đánh giá với tập dữ liệu thực nghiệm do NCS thu thập và trên tập dữ liệu công khai. Kết quả đã minh chứng được hiệu quả của phương pháp đề xuất của NCS.

Chương 3, Phương pháp định vị trong nhà sử dụng thiết bị đeo, 36 trang. Chương này NCS trình bày mô hình hỗ trợ các chiến sĩ cứu hỏa trong quá trình

làm nhiệm vụ. Kết quả thử nghiệm cho thấy độ ổn định và hiệu quả của hệ thống đề xuất.

Nhược điểm:

Bên cạnh những ưu điểm trên, trong luận án vẫn còn tồn tại một số vấn đề cần làm rõ, cụ thể như sau:

- NCS cần làm rõ kịch bản và quy trình xây dựng và thu thập tập dữ liệu thực nghiệm thực hiện tại Đại học Phennika và trường Đại học Phòng cháy chữa cháy.

- Các đề xuất của NCS tại chương 2 và chương 3 cần phải làm rõ nội dung nghiên cứu sinh đã đề xuất. Điều này giúp người đọc nhận dạng được các điểm mới của luận án so với các công trình đã công bố trước đây.

- NCS nên giải thích rõ tại sao các kết quả đánh giá trong chương 2 và chương 3 của luận án không có sự đối sánh với một số thuật toán và hệ thống trước đây. Đặc biệt là với các kết quả nghiên cứu của nhóm Phạm Văn Thành.

- Bổ sung một số tài liệu tham khảo của các tác giả trong nước có liên quan đến nội dung luận án;

- NCS cần biên tập chỉnh sửa lại một số lỗi chế bản.

Các sai sót và hạn chế nêu trên chủ yếu liên quan đến lập luận phương pháp, mức độ khái quát hóa và cách trình bày, phân tích số liệu, chưa ảnh hưởng đến tính đúng đắn cơ bản của hướng nghiên cứu.....

7. Nội dung luận án đã được công bố trên tạp chí, kỷ yếu hội nghị khoa học nào và giá trị khoa học của các công trình đã công bố.

Nghiên cứu sinh đã công bố được 6 công trình khoa học trên các Tạp chí và Hội nghị khoa học chuyên ngành có uy tín, bao gồm 01 bài trên tạp chí quốc tế thuộc danh mục SCI/SCIE (01 bài Q1), 03 bài trên tạp chí khoa học quốc tế có chỉ số Scopus, 01 báo cáo khoa học tại các Hội nghị khoa học quốc tế và 01 công trình công bố tại tạp chí khoa học trong nước. Tất cả các công bố này đều liên quan chặt chẽ với nội dung và phương pháp sử dụng trong luận án và được thực hiện trong thời gian khóa học. Các kết quả nghiên cứu của luận án đã được trích dẫn trung thực trong các công trình công bố.

8. Kết luận

Mặc dù vẫn còn một số hạn chế, tuy nhiên những hạn chế này chỉ mang tính kỹ thuật và không ảnh hưởng nhiều đến chất lượng luận án. Luận án “Nghiên cứu các phương pháp nhận dạng hành động và định vị trong nhà hỗ trợ tìm kiếm cứu nạn trong các tình huống khẩn cấp” là một công trình nghiên cứu nghiêm túc, có giá trị khoa học và thực tiễn cao. Bản tóm tắt luận án phản ánh trung thành nội dung cơ bản của luận án. Khối lượng nội dung, hàm lượng khoa học của luận án đáp ứng yêu cầu đối với một luận án tiến sĩ ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa. Người nhận xét đồng ý đề nghị luận án được đưa ra bảo vệ cấp Viện để nhận học vị tiến sĩ sau khi chỉnh sửa, bổ sung theo các nhận xét trên.

Xác nhận chữ ký của người nhận xét
TL. GIÁM ĐỐC

TRƯỞNG PHÒNG ĐÀO TẠO



Đại tá Ngô Thành Long

Người nhận xét

PGS. TS Phạm Minh Nghĩa



ĐẢNG CỘNG SẢN VIỆT NAM

BẢN NHẬN XÉT LUẬN ÁN TIẾN SĨ CẤP HỌC VIỆN

Tên đề tài: *Nghiên cứu các phương pháp nhận dạng hành động và định vị trong nhà hỗ trợ tìm kiếm cứu nạn trong các tình huống khẩn cấp.*

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa

Mã số: 9 52 02 16

Nghiên cứu sinh: **Đào Tô Hiệu**

Người hướng dẫn 1: GS.TS. Trần Đức Tân

Người hướng dẫn 2: TS. Trần Đức Nghĩa

Người nhận xét: *TS. Bùi Thị Thanh Quyên*

Cơ quan công tác: Viện Công nghệ thông tin, Viện HL KH&CN VN

Nội dung nhận xét:

1. Tính cần thiết, thời sự, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài luận án.

Luận án tập trung vào bài toán nghiên cứu và phát triển hệ thống tích hợp nhằm nhận dạng, theo dõi trạng thái hoạt động và vị trí trong nhà của lính cứu hỏa, cung cấp thông tin để người chỉ huy có thể theo dõi, nắm bắt tình trạng và vị trí của từng lính cứu hỏa trong thời gian thực, góp phần giảm thiểu rủi ro tai nạn, thương vong trong công tác cứu hộ cứu nạn.

Hệ thống thích hợp triển khai trên các thiết bị đeo với vi điều khiển có tài nguyên hạn chế, giúp tiết kiệm năng lượng, giảm độ trễ phản hồi và phù hợp với một số hành động đặc thù của lính cứu hỏa.

Đây là những nghiên cứu thiết thực, có ý nghĩa khoa học và khả năng ứng dụng thực tiễn cao trong lĩnh vực nhận dạng hành động và vị trí của lính cứu hỏa, góp phần quan trọng trong việc nâng cao an toàn cho lính cứu hỏa trong các tình huống khẩn cấp khi thực hiện nhiệm vụ.

2. Sự không trùng lặp của đề tài nghiên cứu so với các công trình, luận án đã công bố ở trong và ngoài nước; tính trung thực, rõ ràng và đầy đủ trong các trích dẫn tài liệu tham khảo.

Hiện chưa thấy sự trùng lặp của đề tài nghiên cứu so với các công trình, luận án đã công bố ở trong và ngoài nước.

Số lượng tài liệu tham khảo trong luận án là 96. Trích dẫn tài liệu tham khảo được thực hiện một cách rõ ràng, đầy đủ và cập nhật. Các kết quả nghiên cứu của luận án đã được trích dẫn trung thực trong các công trình công bố.

3. Sự phù hợp giữa tên đề tài và nội dung, giữa nội dung với ngành và mã số.

Tên đề tài với nội dung, giữa nội dung với ngành và mã số là phù hợp.

4. *Độ tin cậy và tính hiện đại của phương pháp đã sử dụng để nghiên cứu.*

Các phương pháp đã sử dụng trong luận án để nghiên cứu có tính logic, hợp lý và khá tin cậy.

5. *Kết quả nghiên cứu mới của tác giả.*

Kết quả nghiên cứu mới của tác giả như sau:

1) Đề xuất thuật toán tích hợp cửa sổ trượt thông minh với cơ chế phát hiện chuyển đổi hành động, nhằm tối ưu phân đoạn tín hiệu và nâng cao chất lượng đặc trưng đầu vào, ứng dụng xây dựng hệ thống nhận dạng 11 hành động của lính cứu hỏa theo thời gian thực (RFAR).

2) Đề xuất phương pháp định vị trong nhà sử dụng giải thuật *ước lượng vị trí người đi bộ* PDR (Pedestrian dead reckoning) dựa trên dữ liệu từ cảm biến quán tính và UWB (Ultra-wideband) dành cho lính cứu hỏa sử dụng thiết bị đeo ở hai cổ chân.

Luận án cũng đã trình bày các kết quả đạt được, kiểm chứng trên các bộ dữ liệu và trong môi trường thử nghiệm; phân tích và so sánh với các kết quả nghiên cứu trước đó.

Đây là những đóng góp mới và giá trị cho bài toán xây dựng hệ thống hỗ trợ nhận dạng hành động và theo dõi vị trí trong nhà cho lính cứu hỏa khi có sự cố khẩn cấp, có thể áp dụng vào thực tiễn trong công tác hỗ trợ cứu nạn và giám sát an toàn cho lính cứu hỏa khi đang làm nhiệm vụ.

6. *Ưu điểm và nhược điểm về nội dung, kết cấu và hình thức của luận án.*

Luận án chia làm 03 chương trong đó:

Chương 1: Tổng quan nghiên cứu.

Chương 2: Hệ thống nhận dạng hành động cho lính cứu hỏa.

Chương 3: Phương pháp định vị trong nhà sử dụng thiết bị đeo.

Các đóng góp chính của luận án trình bày ở Chương 2, 3.

- Nhìn chung luận án là công trình khoa học nghiêm túc, có ý nghĩa khoa học và ứng dụng thực tiễn cao trong việc giám sát an toàn cho lính cứu hỏa trong quá trình làm nhiệm vụ. Các đề xuất của luận án được công bố trong các tạp chí/kỷ yếu hội thảo chuyên ngành có uy tín. Tóm tắt luận án phản ánh đầy đủ, trung thực các kết quả nghiên cứu của luận án.

- Bố cục, nội dung luận án về cơ bản hợp lý, logic. Mục tiêu, đối tượng, phạm vi nghiên cứu rõ ràng.

- Luận án viết khá tốt, lập luận chặt chẽ, các phần thử nghiệm/kiểm chứng và đánh giá chi tiết.

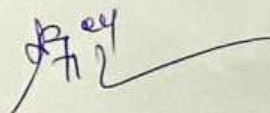
+ Tuy nhiên luận án vẫn có một vài lỗi mất chữ, đánh máy, ví dụ như: “..giao tiếp module UWB *giao* SPI” => “..giao tiếp module UWB *qua* SPI”; Dòng 9 từ dưới lên tr. 30; Dòng 1-2 từ dưới lên tr. 91 trùng lặp với dòng 1-2-3 từ dưới lên tr. 89; dòng 1 từ trên xuống tr.93; dòng 9 từ trên xuống tr. 101.

+ Nên sử dụng các từ/cụm từ nhất quán: ví dụ tr. 70, “ToF”, có chỗ viết “thời gian lan truyền tín hiệu”, có chỗ viết “thời gian bay tín hiệu”.

7. Nội dung luận án đã được công bố trên tạp chí, kỷ yếu hội nghị khoa học nào và giá trị khoa học của các công trình đã công bố.
- + Nghiên cứu sinh có **06** công trình khoa học có liên quan đến luận án, trong đó **01** công trình công bố trên tạp chí SCIE Q1 (*IEEE Sensors Journal*), **02** công trình công bố trên tạp chí SCOPUS Q3 (*EAI Endorsed Trans. on Industrial Networks and Intelligent Systems, Int. Journal of Computing and Digital Systems*), **02** công trình công bố ở hội thảo/hội nghị và **01** công trình công bố ở tạp chí trong nước.
 - + Số lượng công trình khá tốt và chất lượng. Các công trình công bố ở tạp chí/hội nghị chuyên ngành có uy tín và đáp ứng được yêu cầu đối với luận án Tiến sĩ.
8. Kết luận chung cần khẳng định mức độ đáp ứng các yêu cầu đối với một luận án tiến sĩ. Bản tóm tắt luận án phản ánh trung thành nội dung cơ bản của luận án hay không; luận án có thể đưa ra bảo vệ cấp Học viện để nhận học vị tiến sĩ được hay không.
- Luận án đã đáp ứng đầy đủ các yêu cầu đối với một luận án tiến sĩ chuyên ngành.
 - Bản tóm tắt luận án phản ánh trung thành nội dung cơ bản của luận án.
 - Luận án có thể được đưa ra bảo vệ cấp Học viện để nhận học vị tiến sĩ.

Hà Nội, ngày 16 tháng 4 năm 2026

Người nhận xét



Bùi Thị Thanh Quyên

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

BẢN NHẬN XÉT LUẬN ÁN TIẾN SĨ CẤP HỌC VIỆN

Tên đề tài: *Nghiên cứu các phương pháp nhận dạng hành động và định vị trong nhà hỗ trợ tìm kiếm cứu nạn trong các tình huống khẩn cấp.*

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa

Mã số: 9 52 02 16

Nghiên cứu sinh: Đào Tô Hiệu

Người nhận xét: PGS, TS Nguyễn Quang Vịnh

Cơ quan công tác: Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự

NỘI DUNG NHẬN XÉT

1. Tính cấp thiết, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài luận án.

Đề tài có tính cấp thiết cao trong bối cảnh yêu cầu xây dựng các hệ thống tìm kiếm cứu nạn thông minh hoạt động ổn định trong môi trường trong nhà phức tạp, nơi các phương pháp định vị và nhận dạng hành động hiện hữu còn hạn chế về độ chính xác, tính thích nghi và khả năng thời gian thực.

Về ý nghĩa khoa học, luận án phát triển các mô hình nhận dạng hành động – định vị tích hợp, đề xuất cấu trúc hệ thống tự động hóa dựa trên hợp nhất dữ liệu đa cảm biến, điều khiển nhận thức và trí tuệ nhân tạo, góp phần hoàn thiện cơ sở lý thuyết cho các hệ thống định vị – nhận dạng trong điều kiện bất định.

Về ý nghĩa thực tiễn, kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở phương pháp và kỹ thuật cho thiết kế, triển khai các hệ thống cứu nạn tự động, nâng cao độ tin cậy, hiệu quả vận hành và khả năng ứng dụng trong thực tế.

2. Sự không trùng lặp của đề tài nghiên cứu so với các công trình, luận văn, luận án đã công bố ở trong và ngoài nước.

Luận án của nghiên cứu sinh không trùng lặp với các công trình nghiên cứu trước đã được công bố trong và ngoài nước.

Trích dẫn tài liệu trung thực, tham khảo rõ ràng.

3. Sự phù hợp giữa tên đề tài với nội dung, giữa nội dung với chuyên ngành mã số chuyên ngành.

Tên đề tài phù hợp với nội dung đề tài.

Nội dung đề tài tương đối phù hợp với chuyên ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa (9.52.02.16).

4. Độ tin cậy và tính hiện đại của phương pháp đã sử dụng để nghiên cứu

Nghiên cứu sinh sử dụng phương pháp nghiên cứu lý thuyết kết hợp tổng hợp thuật toán, xác định tham số và đánh giá các kết quả qua thực tế là phương pháp hiện đại, rất tin cậy.

5. Kết quả nghiên cứu mới của tác giả

Luận án có các điểm mới sau:

- Đề xuất thuật toán tích hợp của số trượt thông minh với cơ chế phát hiện chuyển đổi hành động, nhằm tối ưu phân đoạn tín hiệu và nâng cao chất lượng đặc trưng đầu vào. Thuật toán được ứng dụng xây dựng hệ thống nhận dạng hành động thời gian thực, tối ưu cho môi trường hoạt động đặc thù của lính cứu hỏa, với mục tiêu cải thiện độ chính xác và tốc độ phản hồi của hệ thống giám sát tự động.

- Đề xuất giải thuật xác định bước chân đi chuyển có độ phức tạp tính toán thấp, dựa trên sự kết hợp dữ liệu từ cảm biến quán tính và băng thông siêu rộng. Giải thuật này nhằm xây dựng một mô hình ước lượng chuyển động người đi bộ hiệu quả, hỗ trợ cải thiện độ chính xác và ổn định của hệ thống định vị và theo dõi vị trí người trong nhà.

6. Ưu điểm và nhược điểm về nội dung, kết cấu và hình thức luận án.

Ưu điểm:

- Luận án trình bày logic, rõ ràng.
- Nội dung của luận án phù hợp với tiêu đề và chuyên ngành.

Hạn chế:

- Luận án có phần thử nghiệm rất phong phú, tuy nhiên chưa sát với thực tế, môi trường và kịch bản lấy dữ liệu, thử nghiệm quá lý tưởng. Cần phong phú hơn trong kịch bản mô phỏng để đánh giá kết quả một cách khách quan, sát thực tế.

Cần có các dữ liệu đầu vào đúng và đầy đủ, các kết quả mang tính định lượng khi mô phỏng và so sánh với thực tế.

- Một số đầu mục nên ngắn gọn, xúc tích, thể hiện rõ trọng tâm của mục cần giải quyết.

- Còn nhiều từ ngữ viết tắt trong quyền tóm tắt luận án mà không được chỉ dẫn, một số lỗi trích dẫn và in ấn. (Đã đánh dấu trong luận án và tóm tắt).

7. Nội dung luận án đã được công bố trên tạp chí, kỷ yếu hội nghị khoa học nào và giá trị khoa học của các công trình đã công bố.

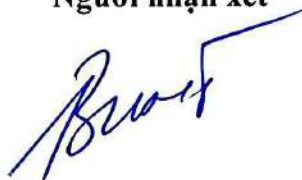
NCS đã đăng 06 bài báo trên các hội thảo, tạp chí trong nước và quốc tế. Các bài đều có trong nội dung luận án và được tính điểm cao trong Hội đồng chức danh giáo sư, phó giáo sư ngành Điện, Điện tử và Tự động hóa.

8. Kết luận chung

Luận án đáp ứng đầy đủ các yêu cầu của luận án Tiến sĩ kỹ thuật theo quy định của Bộ Giáo dục và Đào tạo, đề nghị cho nghiên cứu sinh Đào Tô Hiệu bảo vệ Luận án trước Hội đồng chấm đánh giá luận án cấp Học viện./.

Xác nhận cơ quan

Hà nội, Ngày 06 tháng 04 năm 2026
Người nhận xét



PGS. TS Nguyễn Quang Vịnh

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

BẢN NHẬN XÉT LUẬN ÁN TIẾN SĨ CẤP HỌC VIỆN

Tên đề tài: Nghiên cứu các phương pháp nhận dạng hành động và định vị trong nhà hỗ trợ tìm kiếm cứu nạn trong các tình huống khẩn cấp

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa

Mã số: 9 52 02 16

Nghiên cứu sinh: Đào Tô Hiệu

Người hướng dẫn 1: GS.TS. Trần Đức Tân

Người hướng dẫn 2: TS. Trần Đức Nghĩa

Người nhận xét: PGS.TS Nguyễn Hữu Phát

Cơ quan công tác: Trường Điện-Điện Tử, ĐHBKHN

NỘI DUNG NHẬN XÉT

1, Tính cần thiết, thời sự, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài luận án

Đề tài luận án có tính cấp thiết cao trong bối cảnh gia tăng các sự cố cháy nổ tại khu vực đô thị, đặt ra yêu cầu cấp bách về việc nâng cao hiệu quả và độ an toàn cho lực lượng cứu hộ, cứu nạn. Bài toán nhận dạng hành động và định vị trong nhà, đặc biệt trong môi trường không có GPS, nhiều khói bụi và nguy hiểm, là một hướng nghiên cứu mang tính thời sự và có ý nghĩa thực tiễn rõ rệt.

Về mặt khoa học, luận án đóng góp vào lĩnh vực nhận dạng hành động người (HAR) và hệ thống định vị trong nhà (IPS) thông qua việc kết hợp các kỹ thuật xử lý tín hiệu, học máy và cảm biến đeo. Về mặt thực tiễn, kết quả nghiên cứu có khả năng ứng dụng trực tiếp trong các hệ thống hỗ trợ chỉ huy cứu nạn thông minh, góp phần nâng cao hiệu quả điều phối và đảm bảo an toàn cho lực lượng phòng cháy chữa cháy.

2, Sự không trùng lặp của đề tài nghiên cứu so với các công trình, luận án đã công bố ở trong và ngoài nước; tính trung thực, rõ ràng và đầy đủ trong trích dẫn tài liệu tham khảo

Cho đến thời điểm hiện tại phản biện thấy luận án không trùng lặp với các công trình công bố trước đây. Các tài liệu đều được trích dẫn rõ ràng đầy đủ trong luận án.



3. Sự phù hợp giữa tên đề tài với nội dung, giữa nội dung với ngành và mã số

Tên đề tài phản ánh đúng nội dung nghiên cứu, mục tiêu và phạm vi của luận án. Nội dung nghiên cứu tập trung rõ ràng vào hai bài toán chính là nhận dạng hành động và định vị trong nhà.

Các phương pháp và kết quả nghiên cứu phù hợp với chuyên ngành Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa (mã số 9 52 02 16), đặc biệt trong hướng ứng dụng hệ thống nhúng, cảm biến và xử lý tín hiệu thông minh.

4. Độ tin cậy và tính hiện đại của phương pháp đã sử dụng để nghiên cứu

Các phương pháp nghiên cứu được lựa chọn có cơ sở khoa học rõ ràng, bao gồm:

- Xử lý tín hiệu từ cảm biến quán tính và áp suất
- Áp dụng các mô hình học máy (Random Forest, Decision Tree, v.v.)
- Kết hợp công nghệ UWB trong định vị

Luận án đã tiến hành thực nghiệm trên cả dữ liệu tự xây dựng và các bộ dữ liệu công khai, góp phần tăng độ tin cậy của kết quả. Các phương pháp có tính hiện đại và phù hợp với xu hướng triển khai trên hệ thống nhúng, thiết bị đeo trong môi trường thực tế.

5. Kết quả nghiên cứu mới của tác giả

Luận án có hai đóng góp chính:

- **Thứ nhất**, đề xuất thuật toán phân đoạn tín hiệu dựa trên cửa sổ trượt thông minh kết hợp cơ chế phát hiện chuyển đổi hành động, giúp nâng cao chất lượng đặc trưng đầu vào và cải thiện hiệu quả nhận dạng hành động theo thời gian thực.
- **Thứ hai**, đề xuất giải thuật xác định bước chân và quãng đường di chuyển có độ phức tạp thấp, kết hợp dữ liệu từ cảm biến quán tính và UWB, góp phần nâng cao độ chính xác và tính ổn định của hệ thống định vị trong nhà.

Các đóng góp này có ý nghĩa cả về lý thuyết và ứng dụng thực tiễn.

6. Ưu điểm và nhược điểm về nội dung, kết cấu và hình thức của luận án.

Ưu điểm:

- Lựa chọn đề tài có tính cấp thiết và giá trị ứng dụng cao
- Kết hợp tốt giữa lý thuyết và thực nghiệm
- Xây dựng được hệ thống hoàn chỉnh
- Có thử nghiệm thực tế với thiết bị đeo và môi trường mô phỏng
- Tối ưu hóa mô hình phù hợp với hệ thống nhúng (MCU)

Nhược điểm:

- Chưa có so sánh sâu với các phương pháp học sâu hiện đại (Transformer, TinyML mới)
- Quy mô dữ liệu thực nghiệm còn hạn chế, có thể ảnh hưởng đến khả năng tổng quát hóa
- Phân tích về độ bền vững của hệ thống trong điều kiện môi trường khắc nghiệt (nhiệt độ cao, nhiễu mạnh) còn chưa đầy đủ
- Một số phần trình bày còn dài dòng, có thể rút gọn và làm rõ hơn về mặt học thuật

Các hạn chế trên không làm ảnh hưởng đến giá trị cốt lõi của luận án nhưng cần được xem xét cải thiện.

7. Nội dung luận án đã được công bố trên tạp chí, kỷ yếu hội nghị khoa học nào và giá trị khoa học của các công trình đã công bố.

Các kết quả nghiên cứu của luận án đã được công bố trong các bài báo khoa học. Nội dung các công bố phản ánh trung thực kết quả nghiên cứu và có giá trị khoa học nhất định. Các công trình công bố góp phần khẳng định tính mới và độ tin cậy của luận án.

8. Kết luận

- Luận án đáp ứng yêu cầu của một luận án tiến sĩ về nội dung, phương pháp và đóng góp khoa học
- Bản tóm tắt luận án phản ánh trung thực nội dung chính của luận án
- Luận án đủ điều kiện để đưa ra bảo vệ cấp Học viện và đề nghị xem xét cấp học vị Tiến sĩ cho nghiên cứu sinh.

Hà nội, ngày 15 tháng 4 năm 2026

Người nhận xét



PGS.TS Nguyễn Hữu Phát

Hà Nội, ngày 14 tháng 05 năm 2026

**BIÊN BẢN CỦA
HỘI ĐỒNG ĐÁNH GIÁ LUẬN ÁN TIẾN SĨ CẤP HỌC VIỆN**

Căn cứ quyết định số 231/QĐ-HVKHCN ngày 30 tháng 03 năm 2026 của Giám đốc Học viện Khoa học và Công nghệ về việc thành lập Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện, Hội đồng đã họp vào hồi 9 giờ ngày 14 tháng 05 năm 2026 tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, số 18 đường Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, thành phố Hà Nội để đánh giá luận án tiến sĩ.

Họ và tên NCS: **Đào Tô Hiệu**

Tên đề tài luận án: “Nghiên cứu các phương pháp nhận dạng hành động và định vị trong nhà hỗ trợ tìm kiếm cứu nạn trong các tình huống khẩn cấp”

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa Mã số: 9 52 02 16

Người hướng dẫn 1: GS. TS. Trần Đức Tân

Người hướng dẫn 2: TS. Trần Đức Nghĩa

THAM DỰ BUỔI BẢO VỆ GỒM CÓ

- Đại diện cơ sở đào tạo:
 1. GS.TS. Vũ Đình Lãm – Giám đốc Học viện KH&CN.
- Đại diện Viện Công nghệ thông tin/Khoa Công nghệ thông tin và Viễn thông:
 1. PGS.TS. Nguyễn Long Giang, Phó Viện trưởng Viện CNTT, Phó trưởng khoa.
- Đại diện cơ quan chủ quản
 1. GS.TS. Nguyễn Văn Hiếu, Phó Giám đốc Đại học, Hiệu trưởng trường Kỹ thuật Phenikaa.
- Thành viên Hội đồng có mặt: 7/7 thành viên
 1. PGS.TS. Nguyễn Đức Dũng, Chủ tịch Hội đồng

2. PGS.TS. Đào Quý Thịnh, Phản biện 1
 3. PGS.TS. Lê Hải Châu, Phản biện 2
 4. PGS.TS. Phạm Minh Nghĩa, Phản biện 3
 5. TS. Bùi Thị Thanh Quyên, UV, Thư ký Hội đồng
 6. PGS.TS. Nguyễn Quang Vịnh, Ủy viên
 7. PGS.TS. Nguyễn Hữu Phát, Ủy viên
- Thành viên Hội đồng vắng mặt: 0
 - Đại diện tập thể cán bộ hướng dẫn:
 1. GS. TS. Trần Đức Tân
 2. TS. Trần Đức Nghĩa
 - Cùng tham dự buổi bảo vệ còn có nhiều cán bộ nghiên cứu khoa học trong và ngoài Học viện.

TIẾN TRÌNH BUỔI BẢO VỆ

1. *Đại diện cơ sở đào tạo*, cô Phạm Thị Như Quỳnh, tuyên bố lý do, giới thiệu đại biểu và đọc quyết định số 231/QĐ-HVKHCN ngày 30 tháng 03 năm 2026 của Giám đốc HVKHCN về việc thành lập Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện cho NCS Đào Tô Hiệu và đề nghị Chủ tịch Hội đồng điều khiển phiên họp.
2. Chủ tịch Hội đồng, PGS.TS. Nguyễn Đức Dũng, công bố danh sách thành viên có mặt là 07, thông qua chương trình buổi bảo vệ, đề nghị Thư ký thông báo các điều kiện chuẩn bị cho buổi bảo vệ và đọc lý lịch khoa học của NCS.
3. *Thư ký Hội đồng*, TS. Bùi Thị Thanh Quyên thông báo các điều kiện cho buổi bảo vệ
 - Đọc lý lịch khoa học của NCS Đào Tô Hiệu.
 - Đã nhận đủ 07 nhận xét của các phản biện và các thành viên HĐ.
 - Lịch bảo vệ của NCS đã được đăng trên Cổng thông tin điện tử Học viện Khoa học và Công nghệ ngày 20 tháng 04 năm 2026.
 - Các giấy tờ cần thiết khác.

NCS Đào Tô Hiệu có đủ các điều kiện về thủ tục để bảo vệ luận án trước Hội đồng đánh giá luận án cấp Học viện.
4. Các thành viên hội đồng và những người tham dự thông qua về lý lịch khoa học và quá trình đào tạo của nghiên cứu sinh.

5. Nghiên cứu sinh Đào Tô Hiệu trình bày nội dung luận án trong 30 phút trước Hội đồng. Báo cáo của NCS bao gồm các nội dung chính như sau:

- Giới thiệu
 - Khoảng trống nghiên cứu
 - Mục tiêu, đối tượng và nội dung nghiên cứu.
- Hệ thống nhận dạng hành động cho lính cứu hỏa (RFAR)
 - Mô hình hệ thống RFAR
 - Tập dữ liệu hành động của lính cứu hỏa
 - Xử lý dữ liệu, trích chọn đặc trưng
 - Mô hình nhận dạng và tìm tham số tối ưu
 - Kết quả tối ưu hóa tham số.
 - Kết quả nhận dạng trên dữ liệu riêng tư
 - Demo RFAR
 - Kết quả nhận dạng khi thực nghiệm
 - Xác thực trên dữ liệu công khai.
 - So sánh với các nghiên cứu trước.
- Phương pháp định vị trong nhà sử dụng cảm biến đeo
 - Phương pháp IPS sử dụng cảm biến đeo
 - Tổng quan mô hình đề xuất
 - Giải thuật phát hiện bước chân
 - Demo giải thuật phát hiện bước chân.
 - Đo khoảng cách di chuyển
 - Xác định góc di chuyển
 - Xác định tầng và cao độ
 - Demo định vị trong nhà
 - Kết quả mô hình theo dõi vị trí
 - Ước tính thời gian hoạt động
- Kết luận và kiến nghị
- Danh mục công trình công bố.

6. Các phản biện đọc bản nhận xét và đặt câu hỏi đánh giá luận án của NCS.
Đào Tô Hiệu

1) Phản biện 1, PGS.TS. Đào Quý Thịnh, đọc nhận xét đánh giá luận án và kết luận (có văn bản kèm theo).

- Luận án đóng góp về mặt khoa học thông qua việc phát triển thuật toán nhận dạng hành động HAR và phát hiện hành vi bất thường (ngã) sử dụng các phương pháp xử lý tín hiệu, mô hình học máy và tối ưu mô hình. Việc xây dựng phương pháp định vị người cứu nạn bằng UAV gắn thiết bị tích hợp công nghệ UWB cũng mang tính khoa học và thực tiễn cao.
- Nội dung và kết quả nghiên cứu phù hợp với tên đề tài và mã số chuyên ngành. Luận án có 03 đóng góp chính.

- Ưu/nhược điểm:

+ Ưu điểm: Về hình thức, luận án trình bày cẩn thận, các hình vẽ bảng biểu rõ ràng nhiều thông tin. Các tài liệu tham khảo được trình bày đúng chuẩn quốc tế và được trích dẫn đầy đủ.

- Về nội dung: Luận án trình bày logic từ tìm hiểu tổng quan các phương pháp nhận dạng hành động từ đó đề xuất phương pháp nhận dạng hành động và phương pháp xác định vị trí.
- NCS xây dựng bộ dữ liệu và kiểm nghiệm phương pháp nhận dạng hành động đã đề xuất qua bộ dữ liệu đã xây dựng và bộ dữ liệu công khai khác. Các kết quả là đáng tin cậy và đạt kết quả cơ bản tốt hơn so với các phương pháp trước đó.
- Phương pháp định vị trong nhà đã đề xuất cũng được kiểm nghiệm với các kịch bản khác nhau của điều kiện môi trường. Các kết quả cũng rất đáng tin cậy và có chỉ số đánh giá tốt về độ chính xác, năng lượng tiêu thụ, tính thời gian thực.

+ Nhược điểm:

- Về hình thức trình bày: Xem xét lại việc trích dẫn là chỉ số nhỏ ở trên, hay dùng ngoặc vuông ở 1 số nội dung cho thống nhất. Không nên dùng dấu chấm "." hiển thị phép nhân. Các câu văn hay dùng ở tiếng Anh không nên sử dụng ở văn viết tiếng Việt như: Định và cộng sự..., Thành đã xây dựng...
- Về nội dung: Trong việc định vị người hỗ trợ cứu nạn cần làm rõ mấy vấn đề như sau:
 - Việc tính toán độ dài bước chân và khoảng cách di chuyển có được kiểm nghiệm độ chính xác hay không (Phần kết luận có nêu ra)? Ví dụ tình nguyện viên được yêu cầu bước qua 1 số điểm được đánh dấu sẵn? Nếu có cần có hình ảnh minh họa về việc này.

- Các tình nguyện viên có hoạt động đồng thời hay không, cần làm rõ trong kịch bản? Và việc xử lý đồng thời các tín hiệu của các tình nguyện viên gửi về cũng nên được làm rõ và thảo luận thêm.
- Với phân thiết bị đo lường vị trí, NCS cần bổ sung sơ đồ nguyên lý hệ thống cùng với Bảng liệt kê các thiết bị chính được sử dụng kèm các thông số cơ bản. Hình ảnh sản phẩm hoàn thiện.
- Đối với các hoạt động thí nghiệm, thực nghiệm liên quan tới con người (có giả lập té ngã) cần có mẫu đồng ý tham gia nghiên cứu kèm theo liệt kê các rủi ro có thể xảy ra.

Các sai sót và hạn chế nêu trên chủ yếu liên quan đến lập luận phương pháp, mức độ khái quát hóa và cách trình bày, phân tích số liệu, chưa ảnh hưởng đến tính đúng đắn cơ bản của hướng nghiên cứu.

2) Phản biện 2, PGS.TS Lê Hải Châu, đọc nhận xét đánh giá luận án và kết luận (có văn bản kèm theo)

- Đề tài nghiên cứu có ý nghĩa khoa học và có khả năng ứng dụng thực tiễn cao trong lực lượng phòng cháy chữa cháy Việt Nam. Các kết quả nghiên cứu của NCS không trùng lặp so với công trình, luận án đã công bố ở trong và ngoài nước. Các tài liệu tham khảo về cơ bản phù hợp, cập nhật và đã được trích dẫn tương đối đầy đủ, rõ ràng.
 - Các phương pháp đã được sử dụng để nghiên cứu có tính hiện đại, đảm bảo độ tin cậy và phổ biến trong lĩnh vực này.
 - Luận án có 02 đóng góp chính:
 - + Đề xuất thuật toán tích hợp cửa sổ trượt thông minh với cơ chế phát hiện chuyển đổi hành động, nhằm tối ưu phân đoạn tín hiệu và nâng cao chất lượng đặc trưng đầu vào.
 - + Đề xuất giải thuật xác định bước chân di chuyển có độ phức tạp tính toán thấp dựa trên sự kết hợp dữ liệu từ cảm biến quán tính và UWB đo khoảng cách liên chỉ.
- Ngoài ra việc xây dựng bộ dữ liệu riêng gồm 11 hành động đặc thù của lính cứu hỏa (bao gồm bò, trườn, đi khom lưng, ngã theo nhiều hướng...) là đóng góp thực tiễn có giá trị cho cộng đồng nghiên cứu trong cùng lĩnh vực.
- Ưu nhược điểm của luận án:
 - + Ưu điểm:

- Cấu trúc logic và chặt chẽ: Luận án có bố cục hợp lý, đi từ tổng quan, xác định vấn đề, đến đề xuất giải pháp cho 02 bài toán con (HAR và IPS) và cuối cùng là kết luận.
- Trình bày rõ ràng, mạch lạc: Nhìn chung, luận án có văn phong khoa học, sử dụng thuật ngữ chính xác. Các hình vẽ, bảng biểu được thiết kế trực quan, có tính minh họa cao. Các thuật toán được trình bày dưới dạng pseudo-code, dễ hiểu và dễ triển khai.
- Nội dung phong phú, tính ứng dụng cao và bài toán nghiên cứu rõ ràng.
- Hệ thống thực nghiệm cụ thể và có thể kiểm chứng nhiều chiều.

+ Nhược điểm: Luận án vẫn còn một số nhược điểm và cần được hiệu chỉnh, sửa chữa một số nội dung để được hoàn thiện hơn. Cụ thể:

- NCS đã đưa ra một số giả định quan trọng để đơn giản hóa bài toán (mục 1.5 trang 28). Tuy nhiên, một số giả định có thể làm giảm tính tổng quát và khả năng ứng dụng thực tế của hệ thống. Cần làm rõ hơn tác động của các giả định này. Cụ thể:

+ *Hạn chế về phạm vi đánh giá hướng di chuyển*: Hệ thống giới hạn hướng di chuyển trong 8 hướng chính và ước lượng từ con quay hồi chuyển, tránh sử dụng từ kế do nhiễu từ trong môi trường kim loại. Tuy nhiên, NCS chưa định lượng mức độ ảnh hưởng khi lính cứu hỏa di chuyển theo hướng trung gian giữa hai trong số 8 hướng chuẩn, cũng như chưa đánh giá sai số tích lũy theo hướng di chuyển trong các kịch bản quỹ đạo phức tạp nhiều lần rẽ liên tiếp,...

+ *Giả định về đối tượng nghiên cứu là 100% nam giới*: Việc chỉ thu thập dữ liệu trên nam giới (dù có lý do khách quan từ đặc thù nghề nghiệp) cần có trích dẫn tài liệu làm sở cứ.

- Về mô hình định vị 3D và vai trò của UAV (Mục 3.1.1, Hình 3.1), NCS sử dụng UAV mang Anchor UWB để hiệu chỉnh vị trí tuyệt đối cho lính cứu hỏa ở gần cửa sổ/hành lang. Tuy nhiên, phần mô tả và thực nghiệm về cơ chế kết hợp này còn khá sơ lược. NCS cần giải thích rõ hơn về cơ chế hoạt động của UAV trong hệ thống? (Ví dụ UAV bay ở độ cao và khoảng cách cố định bao nhiêu? Tần suất phát tín hiệu UWB là bao nhiêu? Thuật toán hợp nhất dữ liệu giữa vị trí tương đối từ PDR và vị trí tuyệt đối từ UWB (khi có tín hiệu) được thực hiện như thế nào).
- Hiệu năng trên tập dữ liệu UniMiB-SHAR chưa đồng đều: $F_{1micro} = 78,2\%$ trên UniMiB (AF17) thấp hơn đáng kể so với $96,1\%$ trên tập

dữ liệu riêng và 96,6% trên SFDLA/MobiFall. Tuy NCS lý giải do sự không đồng nhất hệ trục tọa độ cảm biến khi thiết bị đặt tự do trong túi, nhưng chưa có giải pháp đề xuất khắc phục vấn đề định hướng thiết bị tùy ý này trong thực tế triển khai. Điều này cũng cho thấy hệ thống khá nhạy cảm với sự sai lệch về góc đặt cảm biến.

- Một số lỗi chính tả, trình bày. Ví dụ “Nghiên cứu này” sử dụng cho cả Bảng 2.3 và 3.4, Việt hóa hình vẽ (Hình 2.3)...

Câu hỏi:

- 1) Sai số tích lũy theo thời gian tối đa sẽ như thế nào?
- 2) Giới hạn mô hình DT 5 tầng có ảnh hưởng thế nào với sai số tích lũy?

3) Phản biện 3, PGS.TS. Phạm Minh Nghĩa, đọc nhận xét đánh giá luận án và kết luận (có văn bản kèm theo).

- Luận án góp phần phát triển nền tảng khoa học về nhận dạng hành động HAR và định vị trong nhà (IPS) bằng việc kết hợp các kỹ thuật cảm biến học máy và mô hình tối ưu. Kết quả có thể ứng dụng trực tiếp vào hệ thống hỗ trợ chỉ huy cứu nạn thông minh, góp phần nâng cao năng lực và độ an toàn cho lực lượng PCCC.
- LA có 02 đóng góp chính:
 - + Đề xuất thuật toán tích hợp cửa sổ trượt thông minh với cơ chế phát hiện chuyển đổi hành động, nhằm tối ưu phân đoạn tín hiệu và nâng cao chất lượng đặc trưng đầu vào. Thuật toán được ứng dụng xây dựng hệ thống nhận dạng hành động thời gian thực, tối ưu cho môi trường hoạt động đặc thù của lính cứu hỏa, với mục tiêu cải thiện độ chính xác và tốc độ phản hồi của hệ thống giám sát tự động.
 - + Đề xuất giải thuật xác định bước chân di chuyển có độ phức tạp tính toán thấp, dựa trên sự kết hợp dữ liệu từ cảm biến quán tính và băng thông siêu rộng.
- Ưu nhược điểm của luận án:
 - + Nội dung luận án được trình bày trong 117 trang với 03 chương chính, phần mở đầu, kết luận, kiến nghị, tài liệu tham khảo.
 - + Luận án vẫn còn tồn tại một số vấn đề cần làm rõ, cụ thể như sau:
 - NCS làm rõ kịch bản và quy trình xây dựng và thu thập tập dữ liệu thực nghiệm thực hiện tại Đại học Phennika và trường Đại học Phòng cháy chữa cháy.

- Các đề xuất của NCS tại chương 2 và 3 cần phải làm rõ nội dung NCS đã đề xuất. Điều này giúp người đọc nhận dạng được các điểm mới của luận án so với các công trình đã công bố trước đây.
- NCS nên giải thích rõ tại sao các kết quả đánh giá trong chương 2 và chương 3 của luận án không có sự đối sánh với một số thuật toán và hệ thống trước đây. Đặc biệt là với các kết quả nghiên cứu của nhóm Phạm Văn Thành.
- Bổ sung một số tài liệu tham khảo của các tác giả trong nước có liên quan đến nội dung luận án.
- NCS cần biên tập chỉnh sửa lại một số lỗi chế bản.

Các sai sót và hạn chế nêu trên chủ yếu liên quan đến lập luận phương pháp, mức độ khái quát hóa và cách trình bày, phân tích số liệu, chưa ảnh hưởng đến tính đúng đắn cơ bản của hướng nghiên cứu.

7. NCS Đào Tô Hiệu tiếp thu ý kiến nhận xét và trả lời các câu hỏi của phản biện:

- NCS ghi nhận và sẽ chỉnh sửa các lỗi về soạn thảo văn bản, rà soát, bổ sung thêm thông tin ví dụ như về hình ảnh sản phẩm,...
- NCS trả lời đầy đủ các câu hỏi của các phản biện.

8. Các thành viên khác trong Hội đồng đưa ra ý kiến nhận xét; Hội đồng và những người tham dự đặt câu hỏi

- **PGS. TS. Nguyễn Quang Vịnh**

- Đồng ý với các ý kiến của các thầy phản biện.
- Nội dung đề tài và kết quả nghiên cứu không trùng lặp với các công trình công bố trong và ngoài nước. Trích dẫn tài liệu tham khảo đều rõ ràng, đầy đủ và trung thực.
- Ưu nhược điểm của luận án:

+ Luận án trình bày logic, rõ ràng. Nội dung của luận án phù hợp với tiêu đề và chuyên ngành.

Hạn chế:

+ Luận án có phần thử nghiệm rất phong phú, tuy nhiên chưa sát với thực tế, môi trường và kịch bản lấy dữ liệu, thử nghiệm quá lý tưởng. Cần phong phú hơn trong kịch bản mô phỏng để đánh giá kết quả một cách khách quan, sát thực tế. Cần có các dữ liệu đầu vào đúng và đầy đủ, các kết quả mang tính định lượng khi mô phỏng và so sánh với thực tế.

+ Một số đầu mục nên ngắn gọn, xúc tích, thể hiện rõ trọng tâm của mục cần giải quyết.

+ Còn nhiều từ ngữ viết tắt trong quyền tóm tắt luận án mà không được chỉ dẫn, một số lỗi trích dẫn và in ấn (Đã đánh dấu trong luận án và tóm tắt).

- PGS.TS. Nguyễn Hữu Phát

- Luận án không trùng lặp với các công trình công bố trước đây. Các tài liệu đều được trích dẫn rõ ràng đầy đủ.

- Luận án có 02 đóng góp chính:

+ Đề xuất thuật toán phân đoạn tín hiệu dựa trên cửa sổ trượt thông minh kết hợp cơ chế phát hiện chuyển đổi hành động, giúp nâng cao chất lượng đặc trưng đầu vào và cải thiện hiệu quả nhận dạng hành động theo thời gian thực.

+ Đề xuất giải thuật xác định bước chân và quãng đường di chuyển có độ phức tạp thấp, kết hợp dữ liệu từ cảm biến quán tính và UWB, góp phần nâng cao độ chính xác và tính ổn định của hệ thống định vị trong nhà.

- Ưu nhược điểm của luận án

+ Lựa chọn đề tài có tính cấp thiết và giá trị ứng dụng cao; Kết hợp tốt giữa lý thuyết và thực nghiệm; Xây dựng được hệ thống hoàn chỉnh; Có thử nghiệm thực tế với thiết bị đeo và môi trường mô phỏng; Tối ưu hóa mô hình phù hợp với hệ thống nhúng.

+ Nhược điểm:

- Chưa có so sánh sâu với các phương pháp học sâu hiện đại (Transformer, TinyML mới).
- Quy mô dữ liệu thực nghiệm còn hạn chế, có thể ảnh hưởng đến khả năng tổng quát hóa.
- Phân tích về độ bền vững của hệ thống trong điều kiện môi trường khắc nghiệt (nhiệt độ cao, nhiễu mạnh) còn chưa đầy đủ.
- Một số phần trình bày còn dài dòng, có thể rút gọn và làm rõ hơn về mặt học thuật.

Các hạn chế trên không làm ảnh hưởng đến giá trị cốt lõi của luận án, nhưng cần được xem xét cải thiện.

- PGS. TS. Nguyễn Đức Dũng

- Đề tài luận án có ý nghĩa khoa học và thực tiễn. Phương pháp nghiên cứu có tính hiện đại, phù hợp với xu hướng nghiên cứu hiện nay và đáp ứng tốt yêu cầu triển khai trên hệ thống nhúng, thiết bị đeo trong môi trường thực tế.
- Hiện không thấy trùng lặp với đề tài và nội dung của các luận án khác và của những công trình đã công bố khác. Các tài liệu đều được trích dẫn rõ ràng, đầy đủ.
- Luận án được trình bày tốt với cấu trúc hợp lý, nội dung rõ ràng, phân tích và lập luận chặt chẽ.
- Hạn chế hay những điểm có thể cân nhắc để sửa chữa, bổ sung.
 - + Ngoài những nghiên cứu hàn lâm liên quan, luận án nên phân tích tốt hơn các hệ thống và sản phẩm đã được triển khai và thương mại hóa thực tế trên thế giới để từ đó xác định được những hạn chế về khoa học và công nghệ của hệ thống được đề xuất trong môi trường công nghiệp và thương mại hóa sản phẩm.
 - + Trong số những hành động hay chỉ số về hiệu năng được nghiên cứu, luận án có thể tập trung phân tích sâu hơn vào những hành động quan trọng nhất đối với bài toán được đặt ra như bị ngã hay vị trí số tầng trong tòa nhà của lính cứu hỏa. Những yếu tố liên quan tới những vấn đề quan trọng nhất cũng cần được phân tích tốt hơn.
 - + Những từ khóa viết tắt nên được trình bày đầy đủ tiếng Anh trong lần đề cập tới đầu tiên.

- **TS. Bùi Thị Thanh Quyên**

- Nghiên cứu sinh có **06** công trình khoa học có liên quan đến luận án. Số lượng công trình khá tốt và chất lượng. Các công trình công bố ở tạp chí/hội nghị chuyên ngành có uy tín và đáp ứng được yêu cầu đối với luận án Tiến sĩ.
- Luận án có 02 kết quả nghiên cứu mới:
 - 1) Đề xuất thuật toán tích hợp của số trượt thông minh với cơ chế phát hiện chuyển đổi hành động, nhằm tối ưu phân đoạn tín hiệu và nâng cao chất lượng đặc trưng đầu vào, ứng dụng xây dựng hệ thống nhận dạng 11 hành động của lính cứu hỏa theo thời gian thực (RFAR).
 - 2) Đề xuất phương pháp định vị trong nhà sử dụng giải thuật ước lượng vị trí người đi bộ PDR (Pedestrian dead reckoning) dựa trên dữ liệu từ cảm biến quán tính và UWB (Ultra-wideband) dành cho lính cứu hỏa sử dụng thiết bị đeo ở hai cổ chân.

Luận án cũng đã trình bày các kết quả đạt được, kiểm chứng trên các bộ dữ liệu và trong môi trường thử nghiệm; phân tích và so sánh với các kết quả nghiên cứu trước đó.

- Nhìn chung luận án là công trình khoa học nghiêm túc, có ý nghĩa khoa học và ứng dụng thực tiễn cao trong việc giám sát an toàn cho lĩnh vực cứu hỏa trong quá trình làm nhiệm vụ. Các đề xuất của luận án được công bố trong các tạp chí/kỷ yếu hội thảo chuyên ngành có uy tín. Tóm tắt luận án phản ánh đầy đủ, trung thực các kết quả nghiên cứu của luận án.
- Bố cục, nội dung luận án về cơ bản hợp lý, logic. Mục tiêu, đối tượng, phạm vi nghiên cứu rõ ràng.
- Luận án viết khá tốt, lập luận chặt chẽ, các phần thử nghiệm/kiểm chứng và đánh giá chi tiết.
- Tuy nhiên luận án vẫn có một vài lỗi mất chữ, đánh máy, ví dụ như: “..giao tiếp module UWB *giao* SPI” => “..giao tiếp module UWB *qua* SPI”; Dòng 9 từ dưới lên tr. 30; Dòng 1-2 từ dưới lên tr. 91 trùng lặp với dòng 1-2-3 từ dưới lên tr. 89; dòng 1 từ trên xuống tr.93; dòng 9 từ trên xuống tr. 101.
- Nên sử dụng các từ/cụm từ nhất quán: ví dụ tr. 70, “ToF”, có chỗ viết “thời gian lan truyền tín hiệu”, có chỗ viết “thời gian bay tín hiệu”.

9. NCS Đào Tô Hiệu tiếp thu ý kiến nhận xét của các thành viên của Hội đồng.

NCS trả lời các câu hỏi của các thành viên Hội đồng.

10.Đại diện tập thể hướng dẫn phát biểu ý kiến bằng văn bản.

NCS Đào Tô Hiệu làm việc nghiêm túc, rất cố gắng và nỗ lực để hoàn thành Luận án. Các kết quả luận án được đánh giá tốt, có giá trị thực tiễn.

11.Hội đồng tiến hành họp riêng để bầu ban kiểm phiếu, bỏ phiếu kín và thảo luận thông qua quyết nghị của Hội đồng

1) Bầu ban kiểm phiếu gồm:

- Trưởng ban: PGS.TS. Nguyễn Hữu Phát
- Ủy viên: PGS.TS. Nguyễn Quang Vịnh
- Ủy viên: TS. Bùi Thị Thanh Quyên

2) Bỏ phiếu kín và thảo luận thông qua Quyết nghị của Hội đồng.

- Trưởng ban kiểm phiếu, PGS.TS. Nguyễn Hữu Phát, công bố kết quả kiểm phiếu (có biên bản kiểm phiếu).

- Chủ tịch Hội đồng, PGS.TS Nguyễn Đức Dũng, thông qua Quyết nghị của Hội đồng (có văn bản kèm theo).

3) Tóm tắt nghị quyết của Hội đồng

3.1 Tính phù hợp của tên đề tài và sự không trùng lặp về nội dung luận án

- Tên đề tài, nội dung và kết quả nghiên cứu của luận án phù hợp với ngành đào tạo “Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa”, mã số 9 52 02 16.
- Nội dung của luận án không trùng lặp với các luận án đã bảo vệ và các kết quả nghiên cứu đã công bố trong và ngoài nước.
- Các tài liệu tham khảo của luận án có nội dung phù hợp và đã được trích dẫn trong luận án.

3.2 Các kết quả chính của luận án

Luận án tập trung vào bài toán nghiên cứu và phát triển hệ thống tích hợp nhằm nhận dạng, theo dõi trạng thái hoạt động và vị trí trong nhà của lính cứu hỏa. Kết quả nghiên cứu của Luận án có ý nghĩa khoa học, có tính thời sự và thực tiễn cao, cụ thể:

- 1) Đề xuất thuật toán tích hợp cửa sổ trượt thông minh với cơ chế phát hiện chuyển đổi hành động, nhằm tối ưu phân đoạn tín hiệu và nâng cao chất lượng đặc trưng đầu vào, ứng dụng xây dựng hệ thống nhận dạng 11 hành động của lính cứu hỏa theo thời gian thực (RFAR).
- 2) Đề xuất giải thuật xác định bước chân di chuyển có độ phức tạp tính toán thấp dựa trên dữ liệu từ cảm biến quán tính và UWB, góp phần nâng cao độ chính xác và tính ổn định của hệ thống định vị trong nhà.

3.3 Các điểm cần bổ sung chỉnh sửa trước khi nộp luận án cho Thư viện Quốc gia Việt Nam

NCS cần tiếp thu, rà soát, chỉnh sửa, bổ sung nội dung luận án theo ý kiến đóng góp trong bản nhận xét của các thành viên Hội đồng và Biên bản của Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện trước khi nộp luận án cho Thư viện Quốc gia Việt Nam.

3.4 Mức độ đáp ứng yêu cầu của luận án tiến sĩ về cả nội dung và hình thức

- Luận án của NCS Đào Tô Hiệu đáp ứng yêu cầu của luận án tiến sĩ ngành “Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa”, mã số “9 52 02 16” về nội dung và hình thức theo các qui chế hiện hành về đào tạo tiến sĩ của Bộ Giáo dục và Đào tạo, của Học viện Khoa học và Công nghệ.
- Đề nghị Học viện Khoa học và Công nghệ công nhận kết quả bảo vệ và cấp bằng tiến sĩ cho NCS Đào Tô Hiệu sau khi chỉnh sửa, bổ sung luận án theo các góp ý của Hội đồng.

12. Tổng kết

- Trưởng ban kiểm phiếu, PGS.TS. Nguyễn Hữu Phát, công bố kết quả bỏ phiếu đánh giá luận án.
- Chủ tịch Hội đồng, PGS.TS. Nguyễn Đức Dũng, đọc Quyết nghị của Hội đồng.
- Chủ tịch Hội đồng tuyên bố Hội đồng đã hoàn thành nhiệm vụ và trao lại quyền điều khiển cho Cơ sở đào tạo.
- Các đại biểu và NCS phát biểu ý kiến.
- Đại diện cơ sở đào tạo tuyên bố kết thúc buổi bảo vệ tiến sĩ.

Biên bản họp Hội đồng này được 7/7 ủy viên Hội đồng biểu quyết công khai thông qua.

Buổi họp Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện kết thúc vào lúc 11 giờ 30 phút, ngày 14 tháng 05 năm 2026.

Thư ký Hội đồng



TS. Bùi Thị Thanh Quyên

Chủ tịch Hội đồng



PGS.TS. Nguyễn Đức Dũng

**XÁC NHẬN CỦA CƠ SỞ ĐÀO TẠO
PHÓ GIÁM ĐỐC**



Nguyễn Thị Trung



Hà Nội, ngày 14 tháng 05 năm 2026

**QUYẾT NGHỊ CỦA
HỘI ĐỒNG ĐÁNH GIÁ LUẬN ÁN TIẾN SĨ CẤP HỌC VIỆN**

Căn cứ quyết định số 231/QĐ-HVKHCN ngày 30 tháng 03 năm 2026 của Giám đốc Học viện Khoa học và Công nghệ về việc thành lập Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện, Hội đồng đã họp vào hồi 09 giờ 00 ngày 14 tháng 05 năm 2026 tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, số 18 đường Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, thành phố Hà Nội để đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện.

Họ và tên NCS: **Đào Tô Hiệu**

Tên đề tài luận án: “Nghiên cứu các phương pháp nhận dạng hành động và định vị trong nhà hỗ trợ tìm kiếm cứu nạn trong các tình huống khẩn cấp”

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa Mã số: 9 52 02 16

Người hướng dẫn 1: GS.TS. Trần Đức Tân

Người hướng dẫn 2: TS. Trần Đức Nghĩa



**HỘI ĐỒNG ĐÁNH GIÁ LUẬN ÁN TIẾN SĨ CẤP HỌC VIỆN CỦA
NCS ĐÀO TÔ HIỆU KẾT LUẬN**

1. Tính phù hợp của tên đề tài và sự không trùng lặp về nội dung luận án

- Tên đề tài, nội dung và kết quả nghiên cứu của luận án phù hợp với ngành đào tạo “Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa”, mã số 9 52 02 16.
- Nội dung của luận án không trùng lặp với các luận án đã bảo vệ và các kết quả nghiên cứu đã công bố trong và ngoài nước.
- Các tài liệu tham khảo của luận án có nội dung phù hợp và đã được trích dẫn trong luận án.

2. Kết quả, ý nghĩa khoa học, thực tiễn của đề tài

Luận án tập trung vào bài toán nghiên cứu và phát triển hệ thống tích hợp nhằm nhận dạng, theo dõi trạng thái hoạt động và vị trí trong nhà của lính cứu hỏa. Kết quả nghiên cứu của Luận án có ý nghĩa khoa học, có tính thời sự và thực tiễn cao, cụ thể:

- 1) Đề xuất thuật toán tích hợp của sổ trượt thông minh với cơ chế phát hiện chuyển đổi hành động, nhằm tối ưu phân đoạn tín hiệu và nâng cao chất lượng

đặc trưng đầu vào, ứng dụng xây dựng hệ thống nhận dạng 11 hành động của lính cứu hỏa theo thời gian thực (RFAR).

- 2) Đề xuất giải thuật xác định bước chân di chuyển có độ phức tạp tính toán thấp dựa trên dữ liệu từ cảm biến quán tính và UWB, góp phần nâng cao độ chính xác và tính ổn định của hệ thống định vị trong nhà.

3. Những thiếu sót của luận án, vấn đề cần bổ sung, sửa chữa

- Làm rõ kịch bản thử nghiệm.
- NCS cần tiếp thu, rà soát, chỉnh sửa, bổ sung nội dung luận án theo ý kiến đóng góp trong bản nhận xét của các thành viên Hội đồng và Biên bản của Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện trước khi nộp luận án cho Thư viện Quốc gia Việt Nam.

4. Mức độ đáp ứng yêu cầu của luận án tiến sĩ về cả nội dung và hình thức theo các quy chế hiện hành về đào tạo tiến sĩ của Bộ Giáo dục và Đào tạo

Luận án của NCS Đào Tô Hiệu đáp ứng yêu cầu của luận án tiến sĩ ngành “Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa”, mã số “9 52 02 16” về nội dung và hình thức theo các quy chế hiện hành về đào tạo tiến sĩ của Bộ Giáo dục và Đào tạo, của Học viện Khoa học và Công nghệ.

Kết luận:

Kết quả bỏ phiếu đánh giá luận án của Hội đồng: 7/7 tán thành, trong đó có 04 phiếu Xuất sắc.

Hội đồng kết luận thông qua luận án, đề nghị Học viện Khoa học và Công nghệ công nhận kết quả bảo vệ và cấp bằng tiến sĩ cho NCS Đào Tô Hiệu.

Quyết nghị này được 7/7 thành viên Hội đồng biểu quyết công khai thông qua.

THƯ KÝ



TS. Bùi Thị Thanh Quyên

CHỦ TỊCH



PGS.TS. Nguyễn Đức Dũng

XÁC NHẬN CỦA CƠ SỞ ĐÀO TẠO
PHÓ GIÁM ĐỐC



Nguyễn Thị Trung

**BẢN GIẢI TRÌNH CHỈNH SỬA, BỔ SUNG LUẬN ÁN TIẾN SĨ
CẤP HỌC VIỆN**

Ngày 14 tháng 5 năm 2026, Học viện Khoa học và Công nghệ đã tổ chức đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện cho nghiên cứu sinh Đào Tô Hiệu theo Quyết định số 231/QĐ-HVKHCN ngày 30/03/2026 của Giám đốc Học viện.

Đề tài: Nghiên cứu các phương pháp nhận dạng hành động và định vị trong nhà hỗ trợ tìm kiếm cứu nạn trong các tình huống khẩn cấp

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa, Mã số: 9 52 02 16

Người hướng dẫn khoa học: GS.TS. Trần Đức Tân, TS. Trần Đức Nghĩa

Theo Biên bản của Hội đồng, NCS đã bổ sung và chỉnh sửa luận án các điểm sau đây:

STT	Nội dung đề nghị chỉnh sửa, bổ sung	Nội dung đã được chỉnh sửa, bổ sung (Ghi rõ số trang/chương/mục... đã được chỉnh sửa)
1	Những từ khóa viết tắt nên được trình bày đầy đủ tiếng Anh trong lần đề cập tới đầu tiên. Từ ngữ viết tắt trong quyền tóm tắt luận án mà cần được chỉ dẫn và sửa một số lỗi trích dẫn và in ấn	NCS xin tiếp thu và chỉnh sửa các nội dung trích dẫn, viết tắt tiếng anh trong DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT từ trang VIII đến trang XI của luận án. Đồng thời các từ viết tắt lần đầu tiên xuất hiện trong luận án đã được cập nhật.
2	Một số đầu mục nên ngắn gọn, súc tích, thể hiện rõ trọng tâm của mục cần giải quyết.	NCS xin tiếp thu và chỉnh sửa, bổ sung phương pháp hiệu chỉnh cảm biến và xác định điểm đặt ban đầu của cảm biến và thiết bị đeo tại mục 2.1.3.1 trang 39-41 của luận án; Các đề mục tại Chương I gồm 1.1.4.1, 1.1.4.2. Các đề mục tại chương II gồm 2.1.1, 2.1.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.5; Các đề mục tại chương III gồm 3.1.3.1, 3.1.3.2, 3.2.1.1, 3.2.1.2, 3.2.1.3.
3	Ngoài những nghiên cứu hàn lâm liên quan, luận án nên phân tích tốt hơn các hệ thống và sản phẩm đã được triển khai và thương mại hóa thực tế trên thế giới để từ đó xác định được những hạn chế về khoa học và công nghệ của hệ thống được đề xuất trong môi trường	NCS qua sự tìm hiểu các sản phẩm hỗ trợ liên quan thì hầu hết các sản phẩm thiết bị đeo còn đang ở dạng nghiên cứu và ít sản phẩm được thương mại hoá cho lính cứu hoả. Hiện các sản phẩm thương mại cho lính cứu hoả chủ yếu đến từ các loại áo bảo hộ như SUPER ARMOR, các



	công nghiệp và thương mại hóa sản phẩm.	dụng cụ như bình khí thở, mũ bảo hộ và bộ đàm liên lạc...
4	Trong số những hành động hay chỉ số về hiệu năng được nghiên cứu, luận án có thể tập trung phân tích sâu hơn vào những hành động quan trọng nhất đối với bài toán được đặt ra như bị ngã hay vị trí số tầng trong tòa nhà của lính cứu hỏa. Những yếu tố liên quan tới những vấn đề quan trọng nhất cũng cần được phân tích tốt hơn.	NCS xin tiếp thu và cập nhật chỉnh sửa bổ sung tại mục 2.3.4 Các hành động quan trọng bị nhầm lẫn trang 61-62; mục 3.2.2.2. Độ chính xác trong xác định tầng của toà nhà trang 95-97 của luận án.
5	- Luận án vẫn có một vài lỗi mất chữ, đánh máy, ví dụ như: “..giao tiếp module UWB giao SPI”. Nên sử dụng các từ/cụm từ nhất quán: ví dụ tr. 70, “ToF”, có chỗ viết “thời gian lan truyền tín hiệu”, có chỗ viết “thời gian bay tín hiệu”, viết hóa hình 2.3	NCS xin tiếp thu và cập nhật chỉnh sửa lỗi mất chữ “ <i>giao tiếp module UWB qua SPI</i> ” tại trang 95 của Luận án. Nội dung định nghĩa ToF là thời gian lan truyền tín hiệu cũng được đồng bộ trong bản cập nhật chỉnh sửa của luận án. Hình 2.3 đã được viết hoá tại trang 37 của Luận án.
6	Xem xét lại việc trích dẫn là chỉ số nhỏ ở trên, hay dùng ngoặc vuông ở 1 số nội dung cho thống nhất. Không nên dùng dấu chấm “.” hiển thị phép nhân.	NCS xin tiếp thu và chỉnh sửa thống nhất việc sử dụng dấu “x” cho phép nhân thay cho dấu “.”. Về trích dẫn, các chỉ số nhỏ dùng trích dẫn đường link web hoặc các tài liệu liên quan ở dạng footnote, các trích dẫn có dạng [1], [2]... đại diện cho các tài liệu tham khảo chính.
7	So sánh phương pháp học sâu hiện đại	NCS xin tiếp thu và đã bổ sung nội dung về các nghiên cứu liên quan có sử dụng học sâu hiện đại tại 2.3.5 trang 62-63.
8	Quy mô dữ liệu thực nghiệm còn hạn chế, có thể ảnh hưởng đến khả năng tổng quát hóa	NCS xin tiếp thu và bổ sung hạn chế của nghiên cứu tại mục Kết luận. Để đảm bảo tính tổng quát, mô hình được xác thực trên 3 tập dữ liệu công khai và đạt độ chính xác trên 95%.
9	Độ bền vững của hệ thống trong điều kiện môi trường khắc nghiệt (nhiệt độ cao, nhiễu mạnh) còn chưa đầy đủ	NCS xin tiếp thu và bổ sung thảo luận về tính bền vững của hệ thống trong điều kiện nhiễu ảnh hưởng đến khả năng xác định độ cao thông qua kết hợp thuật toán logic tầng, bản đồ toà nhà, khí áp kế và phát hiện di cầu thang bộ. Nội dung đã được cập nhật tại mục 3.2.1 trang 90-92 và mục 3.2.7 trang 103-105 luận án.

10	Luận án có phần thử nghiệm rất phong phú, tuy nhiên chưa sát với thực tế, môi trường và kịch bản lấy dữ liệu, thử nghiệm quá lý tưởng. Cần phong phú hơn trong kịch bản mô phỏng để đánh giá kết quả một cách khách quan, sát thực tế. Cần có các dữ liệu đầu vào đúng và đầy đủ, các kết quả mang tính định lượng khi mô phỏng và so sánh với thực tế	NCS xin tiếp thu và cập nhật chỉnh sửa mục tiêu, bài toán và phạm vi nghiên cứu tại mục 1.4 và 1.5 trang 27-30 của luận án; các phân tích xác thực kết quả tại mục 3.2.2.1 trang 92-94 của luận án. Trong phạm vi nghiên cứu, NCS tiến hành thử nghiệm trong môi trường giả lập có kiểm soát nhằm xác thực và đánh giá hiệu quả thuật toán đề xuất trong việc tối ưu hóa tài nguyên tính toán (bộ nhớ) và năng lượng tiêu thụ trong các giới hạn và phạm vi giả định đặt ra. Hạn chế này được NCS bổ sung tại mục Kết luận của luận án trang 106-107.
11	NCS làm rõ kịch bản và quy trình xây dựng và thu thập tập dữ liệu thực nghiệm.	NCS xin tiếp thu và cập nhật quy trình triển khai thu thập lấy mẫu dữ liệu hành động tại mục 2.1.2.1 trang 35 luận án
12	Các đề xuất của NCS tại chương 2 và 3 cần phải làm rõ nội dung NCS đã đề xuất về các điểm mới của luận án so với các công trình công bố trước đây.	NCS xin tiếp thu và chỉnh sửa các nội dung, bao gồm: đóng góp và tính mới trong phần giới thiệu luận án tại trang 4; phần Kết luận và kiến nghị tại trang 108; các giả định và ràng buộc bài toán nghiên cứu được chỉnh sửa làm rõ hơn trong phần Giới thiệu tại trang 3 của luận án và mục 1.5 trang 28, 29, 30 của luận án; phát biểu về khoảng trống nghiên cứu tại mục 1.4 trang 27, 28; kết luận của chương I tại mục 1.6 trang 30 của luận án.
13	NCS nên giải thích rõ tại sao các kết quả đánh giá trong chương 2 và chương 3 của luận án không có sự đối sánh với một số thuật toán và hệ thống trước đây	NCS xin tiếp thu và cập nhật nội dung so sánh với các công trình nghiên cứu trong nước liên quan tại mục 1.1.3 trang 12-13; mục 2.3.5 trang 62-64.
14	Hiệu năng trên tập dữ liệu UniMiB-SHAR chưa đồng đều: Flmicro = 78,2% trên UniMiB (AF17) thấp hơn đáng kể so với 96,1% trên tập dữ liệu riêng và 96,6% trên SFDLA/MobiFall. Tuy NCS lý giải do sự không đồng nhất hệ trục tọa độ cảm biến khi thiết bị đặt tự do trong túi, nhưng chưa có giải pháp đề xuất khắc phục vấn đề định	NCS xin tiếp thu và cập nhật hạn chế của nghiên cứu tại mục Kết luận. Bên cạnh đó, các nghiên cứu liên quan như [33, 37, 95, 96, 97] đang gặp phải vấn đề tương tự khi dữ liệu biến động không kiểm soát tuy nhiên mô hình được NCS đề xuất có độ phức tạp thấp hơn nhưng có độ chính xác gần như tương đương và đặc biệt hiệu quả với các hành ngã nguy hiểm, có

	hướng thiết bị tùy ý này trong thực tế triển khai. Điều này cũng cho thấy hệ thống khá nhạy cảm với sự sai lệch về góc đặt cảm biến	khả năng dẫn đến nguy cơ chấn thương.
15	Phần mô tả và thực nghiệm về cơ chế kết hợp này còn khá sơ lược. NCS cần giải thích rõ hơn về cơ chế hoạt động của UAV trong hệ thống.	NCS xin tiếp thu và cập nhật nội dung mô tả về UAV trong hệ thống tại mục 3.1.1. Với hệ thống đề xuất, UAV sẽ giữ ở độ cao và vị trí cố định để làm điểm neo tham chiếu và offset lại vị trí dựa trên các tính chất hình học về vị trí (Định lý Pitago).
16	Làm rõ việc chỉ thu thập dữ liệu trên nam giới cần trích dẫn tài liệu căn cứ	NCS xin tiếp thu và đã cập nhật các tài liệu có đề cập việc khảo sát thu thập dữ liệu của lính cứu hỏa và các nghiên cứu này cũng chỉ ra đối tượng chủ yếu là nam giới [9, 12, 17...].
17	Đối với các hoạt động thí nghiệm, thực nghiệm liên quan tới con người (có giả lập té ngã) cần có mẫu đồng ý tham gia nghiên cứu kèm theo liệt kê các rủi ro có thể xảy ra	NCS xin tiếp thu và cập nhật giấy chứng nhận chấp thuận nghiên cứu liên quan đến con người của Hội đồng Đạo đức Phenikaa tại phần Phụ lục trang 118-119 của luận án.
18	Với phần thiết bị đo lường vị trí, NCS cần bổ sung sơ đồ nguyên lý hệ thống cùng với Bảng liệt kê các thiết bị chính được sử dụng kèm các thông số cơ bản. Hình ảnh sản phẩm hoàn thiện	NCS xin tiếp thu và cập nhật bảng 3.1 trang 70 mô tả về các linh kiện chính sử dụng; Phụ lục 2 trang 120 mô tả sơ đồ nguyên lý ghép nối các thành phần cơ bản của thiết bị đeo. Phụ lục 3 trang 121 minh họa sản phẩm bản thử nghiệm.
19	Các tình nguyện viên có hoạt động đồng thời hay không, cần làm rõ trong kịch bản? Và việc xử lý đồng thời các tín hiệu của các tình nguyện viên gửi về cũng nên được làm rõ và thảo luận thêm	Trong phạm vi luận án, NCS thực hiện thu thập và giám sát lính cứu hỏa riêng lẻ. Trong tương lai, các nghiên cứu tiếp theo sẽ hướng đến việc giám sát theo mạng lưới và theo dõi nhiều lính cứu hỏa một lúc. Hạn chế này đã được NCS cập nhật tại mục Kết luận.
20	Việc tính toán độ dài bước chân và khoảng cách di chuyển có được kiểm nghiệm độ chính xác hay không? Cần có hình ảnh minh họa về việc này	NCS xin tiếp thu và bổ sung hình 3.13 trang 94 minh họa việc thu thập dữ liệu di chuyển dựa trên các vị trí được đánh dấu khi di chuyển theo quỹ đạo.
21	Bổ sung một số TLTK của các tác giả trong nước liên quan nội dung luận án.	NCS xin tiếp thu và đã cập nhật TLTK của các nghiên cứu liên quan của các tác giả trong nước

	Cần rà soát và khắc phục lỗi chính tả cùng những lỗi soạn thảo khác.	NCS đã kiểm tra cẩn thận toàn bộ luận án và chỉnh sửa các lỗi liên quan đến chính tả, soạn thảo và hình thức/trình bày.
--	--	---

Nghiên cứu sinh chân thành cảm ơn Quý thầy, cô trong Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện đã góp ý và tạo cơ hội cho NCS hoàn thiện luận án của mình.

Xin trân trọng cảm ơn./.

Hà Nội, ngày 20 tháng 5 năm 2026

TẬP THỂ HƯỚNG DẪN

NGHIÊN CỨU SINH

GS.TS. Trần Đức Tân

TS. Trần Đức Nghĩa

Đào Tô Hiệu

CHỦ TỊCH HỘI ĐỒNG

THƯ KÝ HỘI ĐỒNG

PGS.TS. Nguyễn Đức Dũng

Bùi Thị Thanh Quyên

**XÁC NHẬN CỦA HỌC VIỆN
KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ**

PHÓ GIÁM ĐỐC



Nguyễn Thị Trung



Lưu ý: Các chữ ký xác nhận cần gắn với nội dung trên cùng một trang giấy. Học viện sẽ không xác nhận nếu phần chữ ký tách rời với nội dung