

HỆ THỐNG THEO DÕI VỊ TRÍ MÁY BAY KHÔNG NGƯỜI LÁI TRONG NHÀ SỬ DỤNG CÔNG NGHỆ UWB

INDOOR DRONE LOCATION TRACKING SYSTEM USING UWB TECHNOLOGY

Lê Quang Ngọc

Bộ môn Quản lý và Kỹ thuật Bảo trì, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia
Thành phố Hồ Chí Minh

Email: lngoc@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đề xuất và phát triển hệ thống định vị drone trong nhà dựa trên công nghệ Ultra-Wideband (UWB), gồm hai điểm neo UWB cố định và một thẻ gắn trên drone, vị trí được xác định bằng phương pháp đo thời gian truyền sóng (Time of Flight) và giải thuật lượng giác kết hợp bình phương tối thiểu. Thí nghiệm được tiến hành trong không gian 10×10 m, với quỹ đạo bay theo đường zigzag. Kết quả cho thấy sai số tuyệt đối trung bình (MAE) đạt 0.19 m và sai số bình phương trung bình (MSE) đạt 0.038 m^2 , thấp hơn 30 cm tại hầu hết các vị trí. Hệ thống có khả năng phân biệt chính xác các vị trí gần nhau và hoạt động ổn định trong môi trường có tín hiệu GPS hạn chế. Nghiên cứu khẳng định tính khả thi của UWB trong việc theo dõi drone trong nhà, đồng thời mở ra hướng tích hợp với các cảm biến khác để nâng cao độ chính xác trong các ứng dụng thực tiễn.

Từ khóa: UWB; Định vị trong nhà; Drone; Theo dõi vị trí.

ABSTRACT

This study proposes and develops an indoor drone localization system based on Ultra-Wideband (UWB) technology that includes of two fixed anchors and a tag mounted on the drone. Drone position estimation obtained through Time-of-Flight measurement and a trigonometric approach combined with the least squares method. Experiments conducted in a 10×10 m area with zigzag flight trajectories. The results show that the mean absolute error (MAE) reaches 0.19 m, and the mean squared error (MSE) 0.038 m^2 , with positioning errors kept below 30 cm in most cases. The system demonstrates the ability to accurately distinguish closely spaced positions and operates stably in environments with limited GPS signals. The study confirms the feasibility of UWB for indoor drone tracking and opens the potential for integration with other sensors to enhance accuracy in practical applications.

Keywords: UWB; Indoor localization; Drone; Position tracking.



1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, công nghệ máy bay không người lái (drone) đã phát triển nhanh và ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau [1], [2]. Drone được sử dụng trong quân sự [3], trong nông nghiệp chính xác [4], giám sát môi trường [5], kiểm tra cơ sở hạ tầng [6], vận chuyển hàng hóa [7], cứu trợ và cứu hộ trong thiên tai [8]. Một trong những yêu cầu cốt lõi để khai thác tối đa tiềm năng của drone với khả năng định vị và điều khiển chính xác trong không gian, đặc biệt là trong các môi trường phức tạp như trong nhà, nơi tín hiệu định vị toàn cầu (GPS) không còn hiệu quả.

Để đáp ứng nhu cầu định vị, nhiều phương pháp đã được nghiên cứu như GPS [9], Wi-Fi [10], BLE [11] và Visual SLAM [12]. GPS có độ chính xác cao ngoài trời nhưng không hiệu quả trong nhà; Wi-Fi và BLE chi phí thấp nhưng sai số lớn; còn Visual SLAM đạt độ chính xác tốt nhưng phức tạp và phụ thuộc điều kiện ánh sáng. Trong bối cảnh đó [13], UWB nổi bật nhờ khả năng đo khoảng cách chính xác ở mức cm, song vẫn hạn chế về phạm vi hoạt động, chi phí và cần triển khai hệ thống anchor.

Trong nghiên cứu này tập trung vào việc ứng dụng UWB cho bài toán định vị drone trong không gian hai chiều (2D) với cấu hình chỉ gồm hai anchor. Mục tiêu là kiểm chứng tính khả thi và hiệu quả của UWB khi sử dụng trong môi trường trong nhà, nơi mà các giải pháp định vị truyền thống thường gặp nhiều hạn chế.

2. NGUYÊN LÝ VÀ CÔNG NGHỆ SỬ DỤNG

Nguyên lý hoạt động của UWB dựa trên

khả năng truyền và thu các xung vô tuyến có băng thông siêu rộng (>500 MHz). Bằng cách đo chính xác thời gian truyền sóng (Time of Flight – ToF), hệ thống có thể xác định khoảng cách giữa thiết bị gắn trên drone (UWB tag) và các điểm neo cố định (UWB anchors).

Trong mô hình nghiên cứu này, hệ thống chỉ sử dụng hai anchor để đo đạc, nhằm đánh giá độ chính xác của công nghệ UWB khi số lượng điểm tham chiếu hạn chế. Khi đó, vị trí của drone không được xác định tuyệt đối trong không gian 3D như các hệ thống có ≥ 4 anchor, mà chủ yếu được tính toán khoảng cách tương đối và sự thay đổi vị trí theo trục tọa độ được thiết lập. Kết quả này cho phép kiểm chứng khả năng đo khoảng cách và đánh giá sai số định vị trong các kịch bản tối giản.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Mô tả phần cứng

Drone nghiên cứu được thiết kế dưới dạng quadcopter, khung chữ X, với các thành phần chính như Hình 1. Khung của Drone được thiết kế bằng khung nhựa và càng đáp bằng carbon fiber chắc chắn, nhẹ, có khả năng chịu tải tốt để mang theo các cảm biến và module phụ trợ. Nguồn pin LiPo 6 cell dung lượng 5200 mAh, đảm bảo thời gian bay thực nghiệm từ 12-15 phút. Một UWB tag được gắn lên thân drone.



Hình 1. Cấu tạo hệ thống máy bay không người lái sử dụng UWB

3.2. Giải thuật định vị

Để xác định vị trí của x và y của UWB tag trong ko gian 2D, chúng tôi sử dụng phương pháp lượng giác. Để đơn giản hóa bài toán, ta đặt hệ tọa độ anchor 1 nằm ở gốc tọa độ $(0,0)$, anchor 2 nằm trên trục x của hệ tọa độ cách gốc tọa độ một khoảng d , nên có tọa độ $(d,0)$. Tọa độ của tag UWB cần tìm là (x_T, y_T) . Hình 2 thể hiện vị trí của tag và các anchor UWB trong không gian hai chiều.



Hình 2. Sơ đồ bố trí vị trí của các UWB anchor và UWB tag

Áp dụng định lý Pythagoras cho cả hai tam giác vuông tưởng tượng được tạo bởi tag và hai anchor:

Từ anchor 1:

$$x_T^2 + y_T^2 = d_1^2 \quad (1)$$

Từ anchor 2:

$$(x_T - d)^2 + y_T^2 = d_2^2 \quad (2)$$

Khai triển phương trình 2:

$$x_T^2 - 2x_T d + d^2 + y_T^2 = d_2^2 \quad (3)$$

Thay phương trình (1) vào phương trình (3), ta có:

$$d_1^2 - 2x_T d + d^2 = d_2^2 \quad (4)$$

Giải phương trình (4), ta xác định được vị trí x của UWB tag:

$$x_T = -\frac{(d_2^2 - d_1^2 - d^2)}{2d} \quad (5)$$

Sau khi đã có x_T , ta chỉ cần thay giá trị này vào phương trình (1) để tìm y_T . Ta chỉ lấy nghiệm dương của y_T theo hình 2:

$$y_T = \sqrt{d_1^2 - x_T^2} \quad (6)$$

Trong thực tế, do tồn tại nhiễu và sai số trong các phép đo khoảng cách d_1, d_2 , hệ phương trình xác định vị trí đôi khi không có nghiệm chính xác. Để khắc phục, nghiệm gần đúng của vị trí (x,y) được ước lượng bằng phương pháp bình phương tối thiểu (Least Squares), tức là tìm nghiệm sao cho sai số bình phương giữa khoảng cách đo và khoảng cách tính toán từ tọa độ (x,y) là nhỏ nhất:

$$\min_{x,y} \sum_{i=1}^2 \left(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - d_i \right)^2 \quad (7)$$

3.3. Phương pháp đánh giá

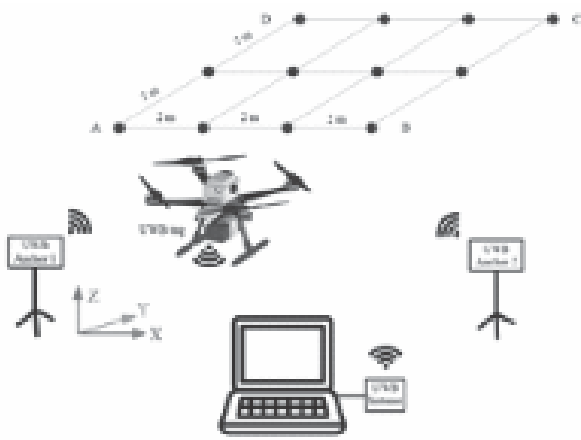
Trong nghiên cứu này, độ chính xác định vị của hệ thống UWB được đánh giá theo bố trí thí nghiệm ở Hình 3, với hai anchor đặt tại góc khu vực thí nghiệm (cao 1 m, cách nhau 10 m). UWB tag được gắn gần trọng tâm drone để giảm ảnh hưởng rung lắc. Tại mỗi nút lưới, drone giữ ổn định 60 giây để thu thập ít nhất 600 mẫu ở tần số 10 Hz. Dữ liệu sau đó được xử lý để tính MAE và MSE, trong đó MAE ở phương trình (8) phản ánh sai số trung bình còn MSE ở phương trình (9) nhạy hơn với sai số lớn, giúp đánh giá toàn diện độ chính xác hệ thống:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[|x_{UWB,i} - x_{True,i}| + |y_{UWB,i} - y_{True,i}| \right] \quad (8)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x_{UWB,i} - x_{True,i}]^2 + [y_{UWB,i} - y_{True,i}]^2 \quad (9)$$

Trong đó:

- N: Tổng số điểm dữ liệu.
- (x_{UWB}, i, y_{UWB}, i) : Tọa độ đo được từ hệ thống UWB.
- $(x_{True}, i, y_{True}, i)$: Tọa độ thực tế.



Hình 3. Mô hình đánh giá độ chính xác của UWB tag được gắn trên drone

4. THỰC NGHIỆM VÀ KẾT QUẢ

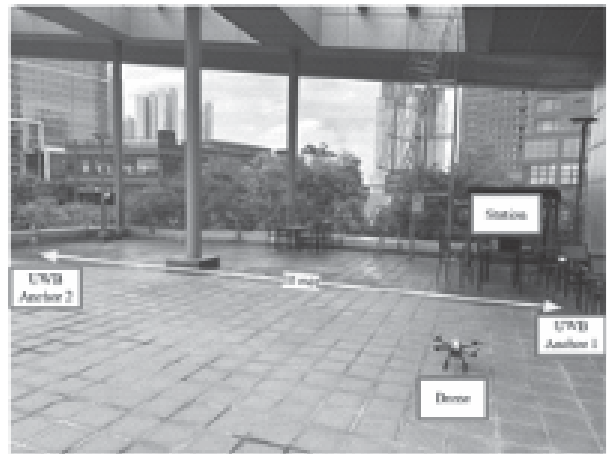
Phần này trình bày chi tiết về quy trình thí nghiệm định vị drone sử dụng công nghệ UWB (Ultra-Wideband). Mục tiêu của thí nghiệm là đo và ghi lại vị trí của một UWB tag được gắn trên drone trong một không gian xác định.

4.1. Bố trí thí nghiệm

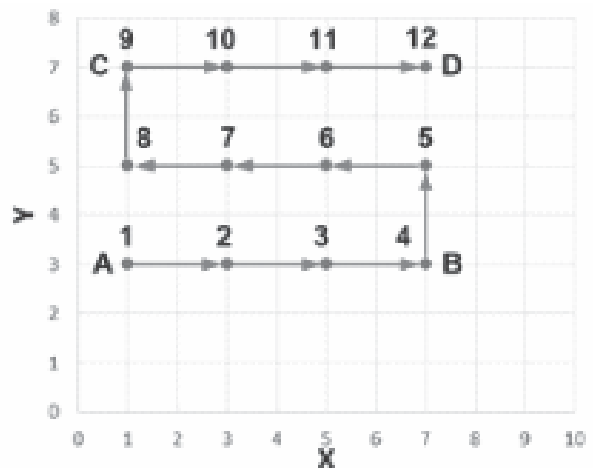
Mô hình thí nghiệm bao gồm một hệ thống định vị với hai UWB anchor được đặt cố định, cách nhau một khoảng 10 mét. Để đo vị trí ban đầu của drone, chúng tôi sử dụng tọa độ tuyệt đối trong hệ thống UWB. Vị trí khởi đầu của drone, được ký hiệu là điểm A, được xác định tại tọa độ $(x = 1 \text{ m}, y = 3 \text{ m})$ so với hệ trục tọa độ của hệ thống UWB.

4.2. Quy trình di chuyển của drone

Drone thực hiện lộ trình bay zigzag như minh họa ở Hình 5. Từ điểm A, drone di chuyển ngang sang phải theo từng bước 2 m, dừng 1 phút ở mỗi vị trí để ghi dữ liệu. Sau đó, tại điểm B, drone dịch chuyển 2 m theo phương dọc rồi tiếp tục di chuyển ngang sang trái theo cùng cách. Đến điểm D, drone lại tiến thêm 2 m theo phương dọc và cuối cùng bay ngang sang phải đến điểm C, lặp lại quy trình dừng và ghi dữ liệu tại mỗi vị trí.



Hình 4. Mô hình thí nghiệm để đo vị trí của drone ở môi trường trong nhà



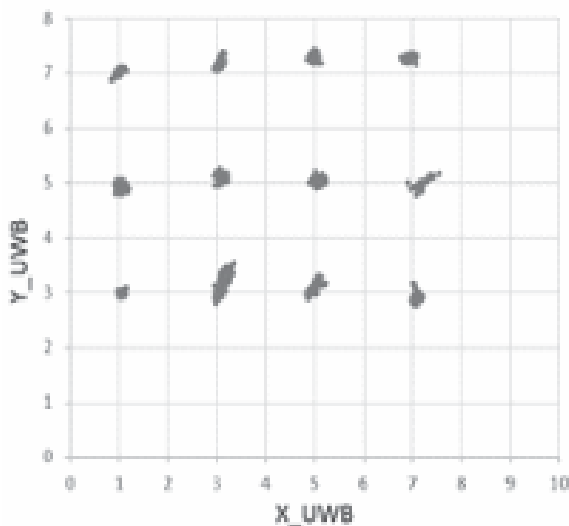
Hình 5. Mô hình thí nghiệm để đo vị trí của drone ở môi trường trong nhà

4.3. Kết quả thí nghiệm

Bảng 1 trình bày giá trị MAE và MSE tại 12 vị trí lưới trong khu vực khảo sát. Có thể thấy sai số tuyệt đối trung bình (MAE) dao động từ 0.08 m đến 0.29 m, trong khi MSE tương ứng nằm trong khoảng 0.005-0.077 m². Giá trị trung bình toàn hệ thống đạt MAE = 0.19 m và MSE = 0.038 m², chứng tỏ độ chính xác định vị UWB ổn định ở mức dưới 0.2 m.

Một số vị trí có sai số thấp đáng kể, như (1,3) với MAE = 0.08 m, cho thấy điều kiện đo tại khu vực này ít chịu ảnh hưởng của nhiễu tín hiệu. Ngược lại, các vị trí như (3,3), (5,7) và (7,7) có MAE lớn hơn (0.25-0.29 m), nhiều khả năng do bố trí anchor chưa tối ưu.

Nhìn chung, hệ thống UWB thể hiện khả năng phân biệt chính xác các vị trí cách nhau chỉ khoảng 1 m, vượt xa giới hạn của GPS standalone (1-3 m). Điều này khẳng định UWB hoàn toàn khả thi cho các ứng dụng theo dõi vị trí trong không gian hẹp, chẳng hạn giám sát chuyển động phương tiện hoặc robot trong kho bãi và nhà xưởng.



Hình 6. Vị trí của UWB tag gắn trên drone khi bay

Bảng 1. Sai số phép đo của UWB theo phương pháp MAE, MSE

Vị trí (X,Y) [m]	MAE [m]	MSE [m ²]
(1,3)	0.08	0.005
(3,3)	0.27	0.061
(5,3)	0.22	0.034
(7,3)	0.16	0.015
(1,5)	0.19	0.07
(3,5)	0.21	0.026
(5,5)	0.1	0.007
(7,5)	0.14	0.056
(1,7)	0.2	0.03
(3,7)	0.18	0.023
(5,7)	0.29	0.07
(7,7)	0.25	0.077
Trung bình	0.19	0.038

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã đưa ra tính khả thi của ứng dụng công nghệ UWB cho định vị và theo dõi máy bay không người lái trong môi trường không có GPS. Với cấu hình tối giản chỉ hai anchor, hệ thống vẫn đạt được độ chính xác dưới 0.3 m, đủ để phục vụ nhiều ứng dụng thực tiễn. Kết quả mở ra tiềm năng tích hợp UWB với các cảm biến khác như IMU hay camera nhằm nâng cao hiệu suất định vị, nhằm định hướng nghiên cứu tiếp theo về tối ưu bố trí anchor để mở rộng sang môi trường 3D. Nhờ vậy, UWB có thể trở thành nền tảng quan trọng hỗ trợ điều khiển chính xác drone trong tình huống không có tín hiệu GPS. ❖

Ngày nhận bài: 26/8/2025

Ngày phản biện: 09/9/2025



Tài liệu tham khảo:

- [1]. N. Al-Iqubaydhi et al., “Deep learning for unmanned aerial vehicles detection: A review”. *Comput. Sci. Rev.*, vol. 51, p. 100614, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.cosrev.2023.100614.
- [2]. P. S. Agrawal, P. S. Jawarkar, K. M. Dhakate, K. M. Parthani, and A. S. Agnihotri, “Advancements and Challenges in Drone Technology: A Comprehensive Review”. In 2024 4th International Conference on Pervasive Computing and Social Networking (ICPCSN), Salem, India: IEEE, May 2024, pp. 638-644. doi: 10.1109/ICPCSN62568.2024.00106.
- [3]. M. Lee et al., “A Study on the Advancement of Intelligent Military Drones: Focusing on Reconnaissance Operations”. *IEEE Access*, vol. 12, pp. 55964-55975, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3390035.
- [4]. 3School of Electrical and Electronic Engineering, Universiti Sains Malaysia Engineering Campus, 14300 Nibong Tebal, Penang, Malaysia, M. H. M. Ghazali, A. Azmin, and W. Rahiman, “Drone Implementation in Precision Agriculture – A Survey”. *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, vol. 12, no. 4, pp. 67-77, Apr. 2022, doi: 10.46338/ijetae0422_10.
- [5]. H. A. Silva-Neto, D. Da Silva Sousa, L. C. Duarte, J. F. Da Silveira Petrucio, and W. K. T. Coltro, “Recent developments on aerial lab-on-a-drone platforms for remote environmental monitoring: A review”. *Anal. Chim. Acta*, vol. 1337, p. 343544, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.aca.2024.343544.
- [6]. N. Ejaz and S. Choudhury, “Computer vision in drone imagery for infrastructure management”. *Autom. Constr.*, vol. 163, p. 105418, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.autcon.2024.105418.
- [7]. O. Dukkanci, J. F. Campbell, and B. Y. Kara, “Facility location decisions for drone delivery: A literature review”. *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 316, no. 2, pp. 397-418, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.ejor.2023.10.036.
- [8]. V. G. Nair and J. M. D’Souza, “A Scoping Review on Unmanned Aerial Vehicles in Disaster Management: Challenges and Opportunities”.
- [9]. N. Rajiv Gandhi, D. Kumar, E. Arunkumar, S. Parameshwari, Mohd. Sadim, and R. R. Al-Fatlawy, “A Detailed Review Analysis of GPS used in Drone Technology and its Challenges”. In 2024 4th International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE), Greater Noida, India: IEEE, May 2024, pp. 363-367. doi: 10.1109/ICACITE60783.2024.10616508.
- [10]. H. Esmaeili Gorjan and V. P. Gil Jiménez, “Improving Indoor WiFi Localization by Using Machine Learning Techniques”. *Sensors*, vol. 24, no. 19, p. 6293, Sep. 2024, doi: 10.3390/s24196293.
- [11]. F. Milano et al., “BLE-Based Indoor Localization: Analysis of Some Solutions for Performance Improvement”. *Sensors*, vol. 24, no. 2, p. 376, Jan. 2024, doi: 10.3390/s24020376.
- [12]. L. Zhuang, X. Zhong, L. Xu, C. Tian, and W. Yu, “Visual SLAM for Unmanned Aerial Vehicles: Localization and Perception”. *Sensors*, vol. 24, no. 10, p. 2980, May 2024, doi: 10.3390/s24102980.
- [13]. A. Benouakta, F. Ferrero, L. Lizzi, and R. Staraj, “Advancements in Industrial RTLSS: A Technical Review of UWB Localization Devices Emphasizing Antennas for Enhanced Accuracy and Range”. *Electronics*, vol. 13, no. 4, p. 751, Feb. 2024, doi: 10.3390/electronics13040751.