

APPLICATION OF ULTRA-WIDEBAND TECHNOLOGY IN THE DESIGN AND FABRICATION OF AN AUTONOMOUS OBJECT-FOLLOWING VEHICLE

Tran Xuan Trong*, Le Thi Thu Huyen

TNU- University of Information and Communication Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 04/7/2025 Revised: 21/11/2025 Published: 25/11/2025	Nowadays, robots and autonomous vehicles play a significant role in both daily life and industrial production. In many cases, these vehicles are required to automatically follow a predefined object or person. This paper presents the design of an autonomous vehicle capable of real-time object tracking using ultra-wideband radio technology combined with the polar coordinate method. The system consists of three ultra-wideband transceivers: two mounted on the vehicle acting as reference points (called Anchor nodes), and one attached to the target object (called the Tag node). Based on the polar coordinate system, the onboard positioning system determines the Tag's location, and the drive system then guides the vehicle toward the target. Experimental evaluations demonstrate that the vehicle can accurately track and follow the object in real time. The results also indicate that when the vehicle moves at speeds below 4 km/h, the tracking path deviation remains within 20 cm. With the achieved specifications, the design is suitable for integration into target-following control systems for robots and autonomous vehicles used in civilian applications.
KEYWORDS Autonomous vehicle Navigation Polar coordinates Design Ultra-wideband	

ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ SÓNG SIÊU CAO TẦN BẰNG THÔNG RỘNG TRONG THIẾT KẾ, CHẾ TẠO XE TỰ HÀNH BẮM THEO ĐỐI TƯỢNG

Trần Xuân Trọng*, Lê Thị Thu Huyền

Trường Đại học Công nghệ Thông tin và Truyền thông – ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 04/7/2025 Ngày hoàn thiện: 21/11/2025 Ngày đăng: 25/11/2025	Ngày nay, robot và các phương tiện tự hành có vai trò quan trọng trong cuộc sống cũng như sản xuất. Trong nhiều trường hợp, đòi hỏi phương tiện phải có khả năng tự động di chuyển bám theo một đối tượng hoặc con người cho trước. Trong bài báo này, nhóm tác giả thiết kế xe tự hành tự động bám theo đối tượng sử dụng sóng siêu cao tần bằng thông rộng kết hợp với phương pháp tọa độ cực. Hệ thống gồm 3 bộ thu phát sóng siêu cao tần bằng thông rộng. 2 bộ gắn trên xe được dùng làm các điểm mốc gọi là các nút Anchor và 1 bộ thu phát được gắn trên đối tượng cần bám theo gọi là nút Tag. Dựa vào hệ tọa độ cực, hệ thống định vị trên xe xác định được vị trí nút Tag, sau đó, bộ dẫn động sẽ điều khiển xe di chuyển đến vị trí của đối tượng. Qua đánh giá thực nghiệm, xe tự hành có khả năng định vị và di chuyển bám đối tượng liên tục trong thời gian thực. Đồng thời kết quả cũng cho thấy, khi phương tiện di chuyển với tốc độ dưới 4 km/h, khoảng sai lệch quỹ đạo của phương tiện bám đối tượng được chỉ định với sai lệch dưới 20 cm. Với các thông số đạt được, thiết kế phù hợp để ứng dụng vào hệ thống điều khiển bám đối tượng cho robot và xe tự hành dùng trong dân dụng.
TỪ KHÓA Xe tự hành Dẫn đường Tọa độ cực Thiết kế Siêu cao tần bằng thông rộng	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.13176>

* Corresponding author. Email: txtrong@ictu.edu.vn

1. Giới thiệu

Trong bối cảnh phát triển mạnh mẽ của công nghệ tự động hóa và robot di động, các hệ thống xe tự hành bám theo đối tượng đang ngày càng được quan tâm và ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như logistics, giám sát an ninh, hỗ trợ chăm sóc y tế và robot đồng hành [1]. Khác với các phương tiện tự hành di chuyển theo lộ trình cố định, xe tự hành bám theo đối tượng đòi hỏi khả năng xác định vị trí và di chuyển liên tục theo một mục tiêu đang chuyển động, với quỹ đạo không xác định trước và thay đổi liên tục theo thời gian thực [2].

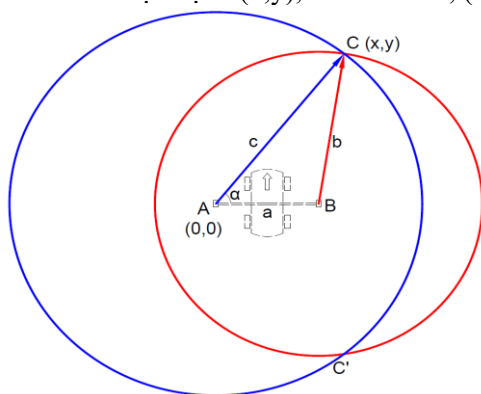
Để hiện thực hóa điều này, các xe tự hành cần có hệ thống dẫn đường, điều hướng tự động. Tuy nhiên các giải pháp định vị, dẫn đường phổ biến bộc lộ một số hạn chế. GPS gặp khó khăn trong việc dẫn đường trong môi trường kín có mái che và độ chính xác không cao (sai số định vị trên 1 m) [3], IPS (Indoor Positioning System) đòi hỏi triển khai phức tạp [4]. Vạch kẻ đường hoặc cáp từ trường lại làm giảm tính linh hoạt của phương tiện [5]. Trong khi đó, các phương pháp hiện đại như sử dụng camera kết hợp với thị giác máy tính làm chi phí của hệ thống tăng cao, dễ bị nhiễu trong môi trường phức tạp (ánh sáng, vật cản...), khó mở rộng với nhiều xe [6].

Trước những thách thức trên, nhóm tác giả lựa chọn ứng dụng công nghệ sóng siêu cao tần băng thông rộng (Ultra-Wideband – UWB) để thiết kế và chế tạo một hệ thống xe tự hành bám theo đối tượng với độ chính xác cao, giá thành rẻ và có tính ổn định trong nhiều điều kiện hoạt động. UWB là công nghệ định vị không dây thế hệ mới, sử dụng sóng xung tần số rất cao (khoảng 3,1 đến 10,6 GHz) để gửi thông tin trong dải băng thông cực rộng. Quá trình này không cần điều chế cao tần như các hệ thống truyền dẫn dùng công nghệ sóng RF (Radio Frequency) thông thường. Công nghệ này cho phép đo khoảng cách với sai số chỉ vài centimet, chống nhiễu tốt và phù hợp cho các ứng dụng trong nhà lẫn ngoài trời [7]. Kết hợp với mô hình điều khiển dựa trên tọa độ cực (Polar Coordinator) [8], hệ thống xe tự hành được thiết kế có khả năng liên tục xác định vị trí của mục tiêu và tự điều hướng để bám sát đối tượng một cách hiệu quả.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Hệ thống dẫn đường bám đối tượng sử dụng sóng siêu cao tần băng thông rộng

Để phương tiện tự hành có thể di chuyển bám theo đối tượng thì một trong các yêu cầu quan trọng nhất là tại một thời điểm bất kỳ, hệ thống định vị, dẫn đường của xe phải xác định được vị trí của đối tượng là duy nhất trong không gian [9]. Áp dụng phương pháp tọa độ cực [8], tọa độ điểm C bất kỳ trong mặt phẳng có thể xác định dựa vào tọa độ biết trước của 2 điểm cố định là A và B. Giả sử C có tọa độ là (x,y), theo Hình 1, (x, y) có thể xác định theo phương trình (3) và (4).



Hình 1. Phương pháp tọa độ cực xác định tọa độ đối tượng dựa vào 2 điểm mốc

$$\cos \alpha = \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac} \quad (1)$$

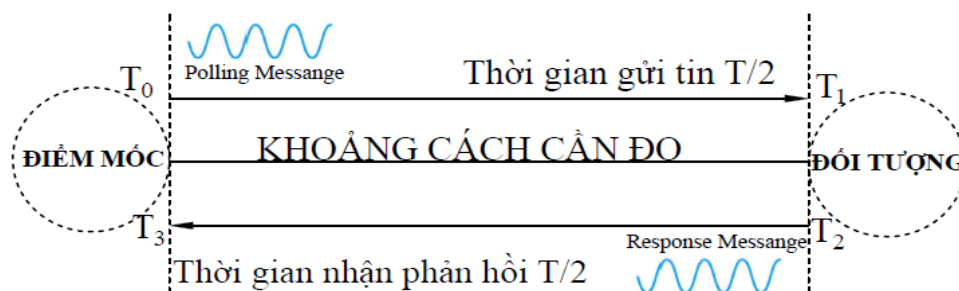
$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha} \quad (2)$$

$$x = c \cdot \cos \alpha \quad (3)$$

$$y = c \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

Trong đó: α là góc tạo bởi hai đoạn thẳng AC và AB, a là độ dài đoạn AB, b là độ dài đoạn BC, c là độ dài AC. A và B cố định nên độ dài a biết trước, ngược lại khoảng cách b , c phải xác định gián tiếp thông qua việc đo thời gian truyền sóng (ToF) của sóng siêu cao tần băng thông rộng [4].

Để ứng dụng UWB vào đo khoảng cách, một bộ thu phát sóng UWB gắn trên đối tượng cần định vị và một bộ thu phát gắn vào điểm mốc. Khi đó, khoảng cách tương đối giữa đối tượng định vị và xe tự hành thông qua thời gian truyền sóng TOF (Time of Flight) [4], [10] như Hình 2.



Hình 2. Đo khoảng cách dựa theo thời gian truyền sóng (TOF)

Mặc dù vị trí của đối tượng và xe liên tục thay đổi trong quá trình di chuyển, nhưng nhờ UWB truyền tín hiệu với vận tốc ánh sáng và bộ thu phát lấy mẫu rất nhanh (hàng trăm lần mỗi giây) [11], nên khi đối tượng di chuyển chậm, khoảng cách từ điểm mốc đến đối tượng vẫn có thể được tính theo công thức (8).

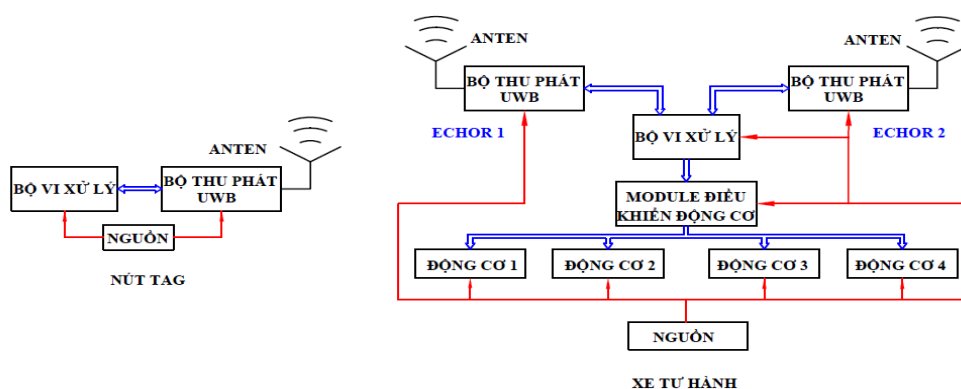
$$T_{XL} = T_2 - T_1 \quad (5) \quad T = T_{QV} - T_{XL} \quad (7)$$

$$T_{QV} = T_3 - T_0 \quad (6) \quad \text{Khoảng cách cần đo} = C \times T/2 \quad (8)$$

Trong đó: T_0 , T_2 là thời điểm gửi bản tin; T_1 , T_3 là thời điểm nhận bản tin. T_{XL} là thời gian xử lý nội bộ của bộ thu phát UWB. T_{QV} là thời gian quay vòng, tính từ khi bộ thu phát ở điểm mốc gửi bản tin đến khi nó nhận được bản tin phản hồi từ đối tượng. T là thời gian thực tế di chuyển của sóng khi bản tin được gửi đi theo 2 chiều. C là vận tốc truyền sóng điện từ xấp xỉ vận tốc ánh sáng [4], [10].

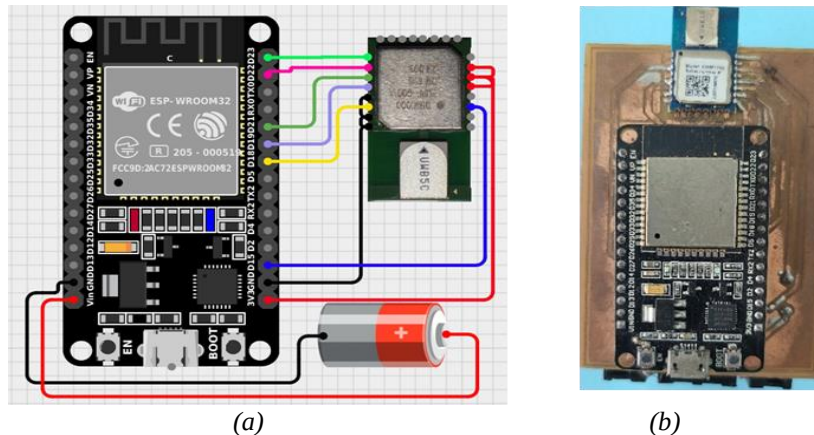
2.2. Thiết kế và chế tạo xe tự hành

Căn cứ vào phương pháp định vị theo hệ tọa độ cực, toàn bộ hệ thống cần có 3 bộ thu phát sóng UWB. Trong đó một bộ được gắn với đối tượng cần bám theo gọi là nút Tag, hai bộ còn lại được gắn trên xe tự hành (gọi là nút Anchor) [12]. Hai nút Anchor này gửi thông tin vị trí đối tượng về cho bộ vi xử lý trên xe. Bộ xử lý sau đó tính toán và điều khiển chuyển động của bốn động cơ bánh xe thông qua module điều khiển động cơ. Cấu trúc tổng thể của hệ thống được thể hiện ở Hình 3.



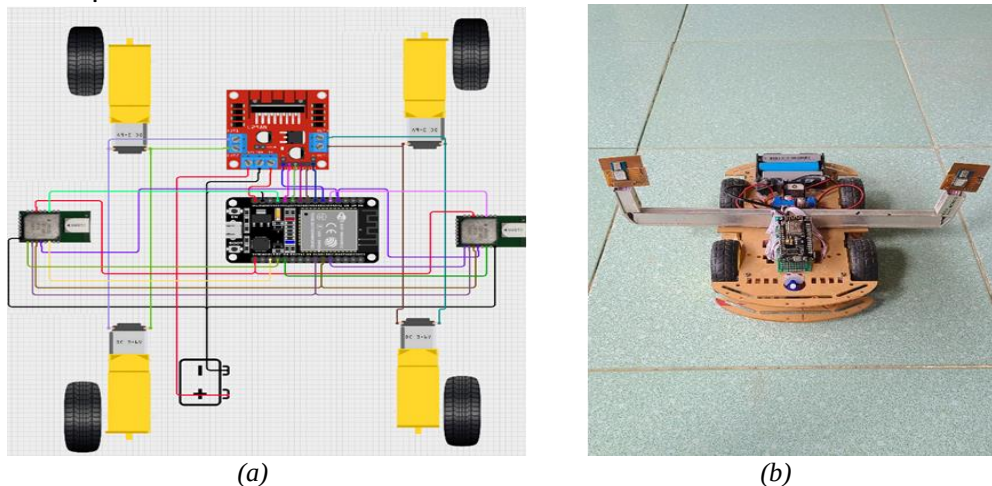
Hình 3. Cấu trúc cơ bản của hệ thống

Trong thiết kế nút Tag, tác giả lựa chọn module DWM1000 làm bộ thu phát UWB. Module này tích hợp sẵn anten của hãng Decawave [11], có giá thành phù hợp, phổ biến trên thị trường. DWM1000 được kết nối với bo mạch ESP32 [12] tích hợp sẵn các cổng I/O làm bộ vi xử lý. ESP32 có ưu điểm là sử dụng nguồn điện 5V và mức điện áp tín hiệu 3,3V phù hợp đấu nối trực tiếp với DWM100. Ngoài ra ESP còn tích hợp sẵn bộ thu phát WIFI [13], bộ này có thể phục vụ quá trình mở rộng và phát triển đề tài về sau. Sơ đồ đấu nối và sản phẩm nút Tag được thể hiện như Hình 4.



Hình 4. Nút Tag, (a) sơ đồ kết nối, (b) mạch chế tạo

Tương tự như nút Tag, trong quá trình thiết kế, chế tạo xe tự hành, để đảm bảo tính tương thích và đồng nhất cho các thiết bị, nhóm tác giả cũng sử dụng 2 module DWM1000 làm bộ thu phát sóng UWB của Anchor 1 và Anchor 2 trên xe. Bộ mạch ESP32 làm bộ vi xử lý chung cho các Anchor và bộ điều khiển động cơ L298N. Các thiết bị được kết nối như Hình 5a. Mạch sau chế tạo thể hiện trên Hình 5b.



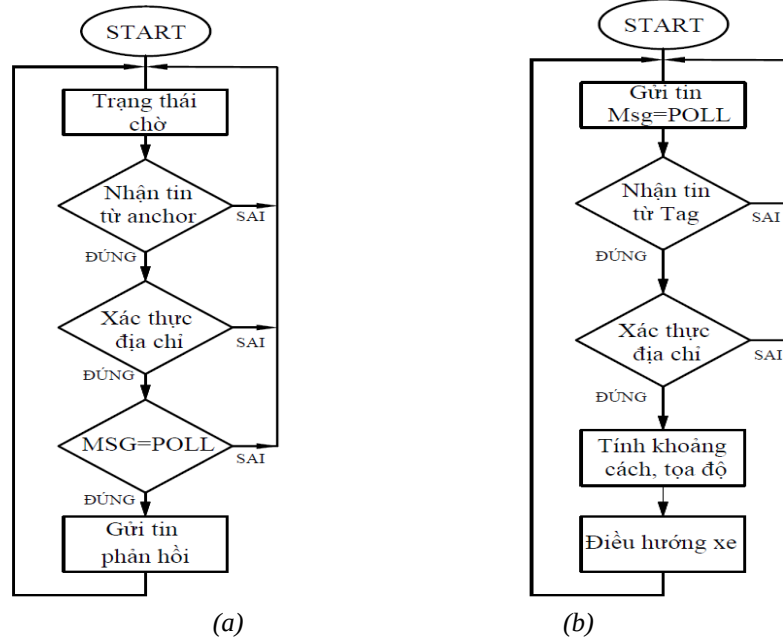
Hình 5. Xe tự hành bám đối tượng, (a) Mạch nguyên lý và (b) ảnh chụp

Tuy nhiên, khi chỉ dùng 2 nút Anchor để đo khoảng cách đến nút Tag, hệ thống định vị xuất hiện thêm điểm C' (Hình 1) đối xứng với C qua trục AB, điểm này có thể gây nhầm lẫn trong quá trình định vị và điều khiển chuyển động. Vì vậy khi chế tạo xe tự hành, nhóm tác giả đã sử dụng tấm kim loại gắn phía sau bộ thu phát DWM1000 để giảm cường độ tín hiệu [11] và dùng chương trình loại bỏ các kết quả đo có cường độ tín hiệu sóng thấp. Phương án này mặc dù làm xe chỉ phát hiện và bám theo các đối tượng nằm trong phạm vi 180 độ phía trước xe nhưng nó giúp giảm độ phức tạp và chi phí chế tạo so với phương pháp Triangle [12].

Căn cứ vào chức năng của nút Tag và xe tự hành, chương trình phần mềm của hệ thống theo lưu đồ thuật toán ở Hình 6 được nạp vào các bộ vi điều khiển. Trong đó: Nút Tag được lập trình theo lưu đồ thuật toán ở Hình 6(a). Tag luôn ở trạng thái chờ và lắng nghe tín hiệu từ các nút Anchor. Khi nhận được bản tin gửi từ một Anchor, hệ thống tiến hành xác thực địa chỉ và kiểm tra nội dung bản tin. Nếu bản tin có định dạng hợp lệ (Msg = POLL) và địa chỉ phù hợp, thì Tag sẽ gửi bản tin phản hồi về cho Anchor.

Nút Anchor và xe tự hành hoạt động theo thuật toán ở Hình 6(b). Vi điều khiển trên xe định kỳ thực hiện gửi bản tin POLL đến Tag. Khi nhận được phản hồi từ Tag, nó sẽ xác thực địa chỉ

của bản tin phản hồi, sau đó tính toán thời gian lan truyền (Time of Flight) để suy ra khoảng cách và tọa độ của Tag. Từ dữ liệu định vị này, bộ điều khiển trung tâm sẽ tính toán lệnh điều hướng và điều khiển xe tự hành di chuyển theo vị trí của Tag trong thời gian thực.



Hình 6. Lưu đồ thuật toán định vị, (a) Nút Tag và (b) Xe tự hành

Trong quá trình bám theo đối tượng, sai số từ thiết bị đo và sự dịch chuyển của mục tiêu khiến tọa độ gửi về xe thay đổi sau mỗi lần đo. Nếu tần số lấy mẫu quá cao, xe phải điều hướng liên tục điều này khiến xe phản ứng quá nhạy với từng dao động nhỏ trong dữ liệu vị trí, dẫn đến hiện tượng rung giật hoặc chuyển động thiếu ổn định của xe. Để khắc phục, thuật toán điều khiển đã áp dụng bộ lọc trung bình trượt để tính trung bình trên 20 mẫu đo ($N = 20$) với chu kỳ lấy mẫu $T_s = 10$ ms nhằm làm mượt tín hiệu đầu vào và giảm tác động của sai số tức thời. Tuy nhiên phương án này gây ra trễ điều khiển T_{TR} [14] với:

$$T_{TR} = \frac{N-1}{2} T_s = \frac{20-1}{2} \cdot 10 = 95(\text{ms}) \quad (9)$$

3. Kết quả và bàn luận

Để kiểm tra đánh giá hoạt động của hệ thống, nhóm tác giả tiến hành làm thực nghiệm với thiết bị trên mặt phẳng nền xi măng. Theo kịch bản, đối tượng cần bám theo là một người trưởng thành mang theo nút Tag di chuyển liên tục với tốc độ 4 km/h (1,1 m/s) theo quỹ đạo là hình chữ nhật. Hình chữ nhật có độ dài các cạnh là 4 m x 5 m. Sau mỗi giây, vị trí của xe sẽ được đánh dấu, khi hoàn thành toàn bộ quãng đường tọa độ của 36 vị trí được đánh dấu và đối sánh với quỹ đạo di chuyển thực của đối tượng. Kết quả được thể hiện theo dạng số liệu trên Bảng 1 hoặc dạng đồ họa như Hình 7.

Qua thực nghiệm và đồ thị đối sánh cho thấy rằng xe tự hành có thể di chuyển ổn định, bám theo được đối tượng định trước trong toàn bộ quá trình di chuyển theo thời gian thực. Ngoài ra xe cũng thể hiện khả năng linh hoạt khi đổi hướng theo người dẫn đường tại các khúc cua gấp với góc 90 độ.

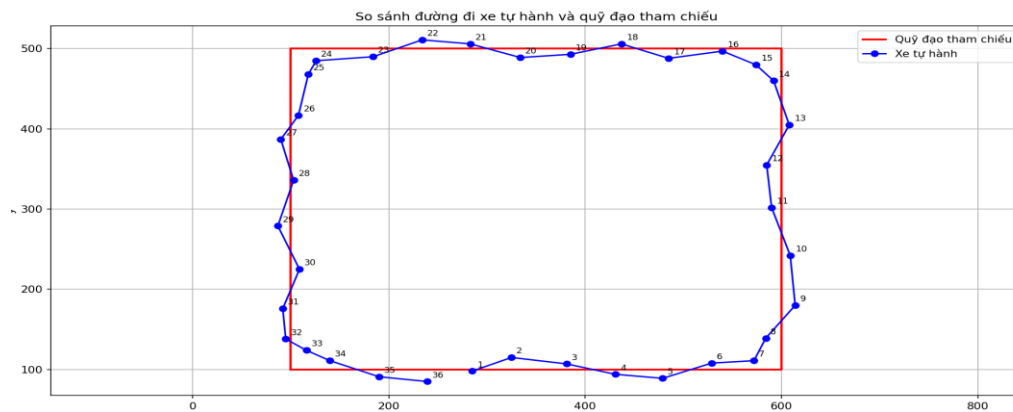
Thêm vào đó, nhóm tác giả cũng sử dụng phương pháp đánh giá sai số CTE (Cross-Track Error – Sai số lệch quỹ đạo ngang) để đánh giá sai số bám quỹ đạo tham chiếu của phương tiện tự hành [15], [16]. Với:

$$CTE = \frac{P.x_0 + Q.y_0 + K}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (10)$$

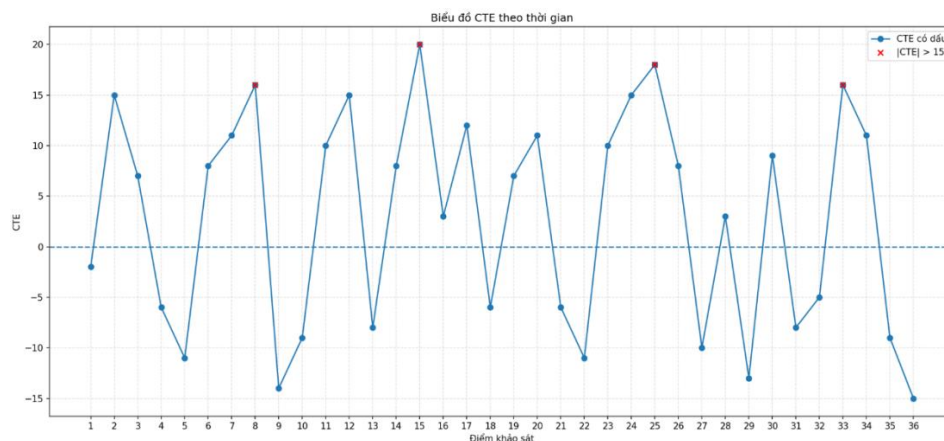
Trong đó: P, Q, K là hệ số của phương trình đường thẳng quỹ đạo tham chiếu $P.x + Q.y + K = 0$ và x_0, y_0 là tọa vị trí xe tại điểm khảo sát.

Bảng 1. Kết quả thực nghiệm vị trí xe tự hành theo thời gian thực

TT	x	y	TT	x	y	TT	x	y
1	285	98	13	608	405	25	118	468
2	325	115	14	592	460	26	108	417
3	381	107	15	574	480	27	90	387
4	431	94	16	540	497	28	103	336
5	479	89	17	485	488	29	87	279
6	529	108	18	437	506	30	109	225
7	572	111	19	385	493	31	92	176
8	584	139	20	334	489	32	95	138
9	614	180	21	283	506	33	116	124
10	609	242	22	234	511	34	140	111
11	590	302	23	184	490	35	190	91
12	585	355	24	126	485	36	239	85



Hình 7. Đồ họa đối sánh vị trí của xe tự hành với quỹ đạo tham chiếu



Hình 8. Đánh giá sai số lệch quỹ đạo ngang CTE (Cross-Track Error) của xe tự hành

Giá trị sai số được thể hiện dưới dạng đồ thị trong Hình 8. Đồ thị cho thấy, các điểm 8, 15, 25, 33 có sai lệch lớn xuất hiện khi đối tượng cần bám theo đổi hướng tại góc của 90 độ và giá trị sai lệch lớn nhất chỉ là 20 cm tại điểm 15.

Với kết quả thực nghiệm trên cho thấy rằng: Xe tự hành đáp ứng yêu cầu bám theo người dẫn đường đi bộ trong thời gian thực với sai số quỹ đạo ngang chỉ trong khoảng 2,5 cm - 20 cm. Thiết kế xe chỉ sử dụng 3 bộ thu phát DWM100 thay vì 4 hoặc 5 bộ theo phương pháp Triangle [11], giúp giảm chi phí chế tạo phương tiện. Ngoài ra, với khả năng địa chỉ hóa bộ thu phát của công

nghe UWB, giúp xe có thể nhận dạng, phân biệt thẻ Tag cần bám theo, tránh tình trạng nhầm lẫn mục tiêu trong môi trường có nhiều đối tượng di chuyển. Các đặc điểm quan trọng này giúp xe phù hợp cho các ứng dụng chở hàng hóa, hành lý theo người dẫn đường tại siêu thị, sân bay, kho hàng hoặc chở thuốc, đồ dùng theo nhân viên y tế, người bệnh.

4. Kết luận

Nội dung bài báo đã đề xuất thiết kế xe tự hành bám theo đối tượng, sử dụng công nghệ UWB và phương pháp tọa độ cực. Với khả năng đo khoảng cách chính xác và địa chỉ hóa bộ thu phát, công nghệ UWB không chỉ giúp phương tiện tự hành di chuyển, đổi hướng chính xác theo quỹ đạo của người dẫn đường mà còn giúp xe phân biệt, nhận dạng đúng thẻ Tag cần bám theo. Tuy nhiên, hệ thống vẫn có sai số nhất định so với quỹ đạo tham chiếu. Trong tương lai, nhóm tác giả dự định cải thiện hệ thống bằng cách tích hợp thuật toán điều khiển PID, áp dụng bộ lọc tín hiệu để giảm sai số, đồng thời trang bị thêm cảm biến và cơ cấu an toàn nhằm đảm bảo xe hoạt động ổn định trong môi trường đông người và phức tạp hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] M. J. Islam, J. Hong, and J. Sattar, "Person Following by Autonomous Robots: A Categorical Overview," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 38, no. 12, 2019, doi: [10.1177/0278364919881683](https://doi.org/10.1177/0278364919881683).
- [2] M.-F. R. Lee and K. H.-E. Lee, "Autonomous Target Tracking and Following Mobile Robot," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol. 36, no. 4, 2013, doi: [10.1080/02533839.2012.731863](https://doi.org/10.1080/02533839.2012.731863).
- [3] N. Kanabar, U. Doshi, S. Jha, and A. Bhargava, "Global Positioning System," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 6, no. 12, pp. 1-3, 2018.
- [4] D. Pan and Y. Yu, "Design of Indoor Position System Based on DWM1000 Modules," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 585, 5th Annual International Workshop on Materials Science and Engineering, May 17–18, 2019, Hunan, Changsha, China, doi: 10.1088/1757-899X/585/1/012067.
- [5] S. Shentu, Z. Gong, X. Liu, et al., "Hybrid Navigation System Based Autonomous Positioning and Path Planning for Mobile Robots," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 35, no. 109, 2022, doi: [10.1186/s10033-022-00775-4](https://doi.org/10.1186/s10033-022-00775-4).
- [6] M. Zhang, X. Liu, D. Xu, and Z. Cao, "Vision-Based Target-Following Guider for Mobile Robot," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 12, pp. 9360-9371, Dec. 2019, doi: 10.1109/TIE.2019.2893829.
- [7] A. Alarifi, A. M. Al-Salman, M. Alsaleh, and A. Alnafessah, "Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances," *Sensors*, vol. 16, no. 5, 2016, Art. no. 707, doi: [10.3390/s16050707](https://doi.org/10.3390/s16050707).
- [8] A. J. Kurdila and M. Zabrankin, *Advanced Engineering Mathematics with MATLAB*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2011.
- [9] M. Chen, "Recognition and Localization of Target Images for Robot Vision Navigation Control," *Journal of Robotics*, vol. 2022, March 2022, doi: [10.1155/2022/8565913](https://doi.org/10.1155/2022/8565913).
- [10] S. Gezici and H. V. Poor, "Position Estimation via Ultra-Wideband Signals," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, no. 4, pp. 70–84, Jul. 2005, doi: [10.1109/MSP.2005.149615](https://doi.org/10.1109/MSP.2005.149615).
- [11] Decawave Ltd., "DWM1000 Module Datasheet," version 1.8, Decawave Ltd., Dublin, Ireland, 2016. [Online]. Available: <https://www.qorvo.com/products/p/DWM1000>. [Accessed Jun. 18, 2025].
- [12] K. Bae, Y. Son, Y.-E. Song, and H. Jung, "Component-Wise Error Correction Method for UWB-Based Localization in Target-Following Mobile Robot," *Sensors*, vol. 22, no. 3, 2022, doi: [10.3390/s22031180](https://doi.org/10.3390/s22031180).
- [13] Espressif Systems, "ESP32 Series Datasheet," Version 4.9, Espressif Systems, Shanghai, China, 2025.
- [14] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2010.
- [15] A. A. Prokhorov, M. Rubanov, and V. Solodovnikov, "Autonomous Vehicle Path Tracking Based on Cross-Track Error Minimization," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 1123–1131, Mar. 2020, doi: 10.1109/TITS.2019.2903245.
- [16] A. M. Lekkas and T. I. Fossen, "Minimization of cross-track and along-track errors for path tracking of marine underactuated vehicles," in *Proc. European Control Conf. (ECC)*, 2014, pp. 1154–1161.