



DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR MEASURING RAIL GEOMETRIC PARAMETERS

Nguyen Duc Tam¹, Pham Van Ky², Mai Tien Chinh², Vo Thien Linh^{1*}, Le Manh Tuan¹, Dao Thanh Toan³

¹Campus in Ho Chi Minh City, University of Transport and Communications, No. 450-451 Le Van Viet Street, Tang Nhon Phu Ward, Ho Chi Minh City, Vietnam

²Faculty of Civil Engineering, University of Transport and Communications, No.3 Cau Giay Street, Lang Ward, Hanoi, Vietnam

³Department of Electronic Engineering, University of Transport and Communications, No.3 Cau Giay Street, Lang Ward, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 02/06/2025

Revised: 05/07/2025

Accepted: 10/08/2025

Published online: 15/08/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.6.4>

* Corresponding author

Email: linhvt_ph@utc.edu.vn; Tel: +84 907001184

Abstract. Currently, railways constitute a significant portion of the transportation infrastructure and are a crucial transport service in Vietnam. The application of effective railway maintenance measures is essential to ensure operational safety and continuity. Safety inspection measures on the tracks have been a focus of research by scientists in recent times. The aim of this study is to develop an automated system for inspecting, measuring, and alerting deviations in rail profiles within the Vietnamese railway system. The system utilizes capacitive sensors and IMU sensors to measure vertical profiles, rail gauges, and leveling. By integrating advanced sensor technology, the system aims to enhance the accuracy and efficiency of rail maintenance, ensuring safety and reliability in railway operations. The proposed method includes real-time data collection and processing, allowing for timely detection and alerts for rail profile deviations that exceed regulatory limits. The experimental results demonstrate the system's effectiveness in identifying and alerting deviations, achieving comparable accuracy and reducing execution time by four times compared to traditional methods, thereby contributing to improved maintenance operations and operational safety within Vietnam's railway network.

Keywords: arduino, imu sensor, rail profile, non-destructive testing, railway track.



THIẾT KẾ VÀ PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG ĐO TỰ ĐỘNG THAM SỐ HÌNH HỌC ĐƯỜNG RAY

Nguyễn Đức Tâm¹, Phạm Văn Ký², Mai Tiến Chinh², Võ Thiện Linh^{1*}, Lê Mạnh Tuấn¹, Đào Thanh Toán³

¹Phân hiệu tại Thành phố Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông vận tải, 450-451 Đường Lê Văn Việt, Phường Tăng Nhơn Phú, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Khoa Công trình, Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Phường Láng, TP. Hà Nội, Việt Nam

³Bộ môn Kỹ thuật điện tử, Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Phường Láng, TP. Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 02/06/2025

Ngày nhận bài sửa: 05/07/2025

Ngày chấp nhận đăng: 10/08/2025

Ngày xuất bản Online: 15/08/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.6.4>

* Tác giả liên hệ

Email: linhvt_ph@utc.edu.vn; Tel: +84 907001184

Tóm tắt. Hiện nay, đường sắt là thành phần quan trọng trong hạ tầng giao thông và vận tải Việt Nam. Việc áp dụng các biện pháp tốt để bảo trì mạng lưới đường sắt nhằm đảm bảo an toàn và liên tục trong vận hành là rất cần thiết. Các biện pháp kiểm tra an toàn trên đường ray đã được quan tâm nghiên cứu trong thời gian qua. Mục đích của nghiên cứu này là phát triển một hệ thống tự động kiểm tra, đo đạc và cảnh báo sai lệch về các biên dạng ray trong hệ thống đường sắt Việt Nam. Nghiên cứu này đề xuất kết hợp cảm biến điện dung và cảm biến IMU để đo biên dạng thẳng đứng, cự ly ray và thủy bình ray. Hệ thống hướng đến mục tiêu nâng cao độ chính xác và hiệu quả, đảm bảo an toàn và độ tin cậy trong hoạt động đường sắt. Quá trình thực hiện bao gồm thu thập và xử lý dữ liệu theo thời gian thực, cho phép phát hiện và cảnh báo kịp thời các vị trí sai lệch biên dạng ray vượt ngưỡng quy định. Kết quả thử nghiệm chứng minh tính hiệu quả của hệ thống, đạt độ chính xác tương đương và thời gian thực hiện giảm bốn lần so với phương pháp truyền thống, góp phần cải thiện các hoạt động bảo trì và an toàn vận hành trong mạng lưới đường sắt Việt Nam.

Từ khóa: arduino, cảm biến imu, biên dạng ray, kiểm tra không phá hủy, đường ray

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Những năm gần đây, sự ra đời của các công nghệ cảm biến được áp dụng trong quản lý đường sắt đã có bước phát triển nhảy vọt. Công nghệ đường sắt chạy trên ray vẫn đang là loại hình đường sắt được sử dụng phổ biến nhất trên thế giới hiện nay do tính an toàn và chi phí đầu tư thấp. Chính vì vậy, các hoạt động bảo trì và an toàn vận hành trong mạng lưới đường sắt trên ray là rất quan trọng. Các hệ thống phát hiện truyền thống dựa trên các thiết bị cơ học tiếp xúc với đường ray. Các phương pháp tiếp cận tiên tiến dựa trên quét laser và phân tích hình ảnh.

Trên thế giới, một số loại công nghệ cảm biến đã được sử dụng để giám sát đường ray, chẳng hạn như: công nghệ laser [1], camera [2, 3] và cảm biến quán tính (gia tốc kế, con quay hồi chuyển, v.v.) [4], cảm biến siêu âm [5, 6]. Một số công nghệ này có thể được sử dụng cùng nhau hoặc riêng biệt, tùy thuộc vào mục đích chính của việc giám sát [7]. Cảm biến quang học laser thường được coi là đắt tiền và chúng có thể liên quan đến chi phí bảo trì cao. Hệ thống dựa trên camera, chủ yếu tập trung vào các đoạn ray cụ thể, chẳng hạn như đầu ray, trong khi phân tích độ nhạy phụ thuộc vị trí lắp đặt camera và chúng yêu cầu các phần mềm xử lý hình ảnh đắt tiền. Cảm biến quán tính đã được sử dụng rộng rãi do giá thành thấp và hiệu quả của chúng. Cảm biến quán tính có thể được lắp trên trục xe lửa, toa xe hoặc bên trong toa xe và các phản ứng được đo liên tục.

Hiện nay, phương pháp đo tham số hình học đường ray bằng thủ công là một trong những phương pháp kiểm tra đường ray phổ biến nhất tại các đơn vị quản lý đường sắt trong nước như minh họa tại hình 1. Thiết bị đo thước thủy bình tập trung chủ yếu vào phân cơ học, chưa có hệ thống tự động hỗ trợ. Phương pháp này tốn công sức, mất nhiều thời gian, chủ quan và một số lỗi có thể bị bỏ sót.



Hình 1. Thiết bị đo thủ công (hình ảnh chụp bởi nhóm nghiên cứu).

Năm 2023, Cục Đường Sắt Việt Nam đã ban hành một dự thảo tiêu chuẩn Việt Nam: “Ứng dụng đường sắt – Đường ray – Kiểm tra ray bằng phương pháp không phá hủy” - Mã số: TC 2239, tiến độ xin lấy ý kiến đến 25/9/2024. Dự thảo đưa ra các tiêu chuẩn của các phương pháp không phá hủy trong đường sắt như: Kiểm tra trực quan, Kiểm tra hình ảnh tự động, Phương pháp siêu âm, Kiểm tra bằng dòng điện xoáy, Thử nghiệm hạt từ tính, Thử nghiệm thẩm thấu, Kiểm tra sóng. Dự thảo nhằm hướng đến số hóa trong ngành đường sắt Việt Nam. Hiện nay, dự thảo này đã được ban hành chính thức dưới bộ tiêu chuẩn TCVN 14205 [8]. Bên cạnh đó, cũng đã có một số đề tài nghiên cứu về việc áp dụng các công nghệ cảm biến trong quản lý và bảo trì đường sắt trên ray [9, 10]. Các nghiên cứu này sử dụng cảm biến siêu âm với độ chính xác thấp.

Với mục tiêu đưa công nghệ vào phục vụ sự phát triển bền vững của ngành đường sắt Việt Nam, việc xây dựng một hệ thống tự động nhằm đo đạc, kiểm tra và cảnh báo độ sai lệch hình học của đường ray trên tuyến đường sắt quốc gia là hết sức cần thiết. Hệ thống này không chỉ góp phần nâng cao độ an toàn khi vận hành, mà còn giúp tiết kiệm chi phí và giảm thiểu sức lao động trong công tác bảo trì. Trong bối cảnh nhiều đề án phát triển đường sắt đô thị hiện đại

đang được triển khai tại hai đô thị lớn là Hà Nội và TP. Hồ Chí Minh, nghiên cứu này hứa hẹn mang lại hiệu quả vận hành cao hơn, đồng thời hỗ trợ các cơ quan quản lý trong việc thu thập và thông kê dữ liệu một cách chính xác và kịp thời. Quá trình xây dựng hệ thống có nhiều vấn đề cần được giải quyết do các tác động của môi trường làm việc, quá trình đo động, sai số cho phép nhỏ, sự đa dạng thiết bị và cảm biến. Chúng tôi lựa chọn phương pháp đo tiếp xúc thông qua các cảm biến điện dung và cảm biến IMU để xác định về độ sai lệch hình học đường ray. Quá trình thực hiện bao gồm thu thập dữ liệu cảm biến thông qua kit Arduino Nano 33 BLE và một phần mềm giao tiếp thiết bị trên máy tính để xử lý dữ liệu. Giao diện phần mềm cho phép cài đặt thông số, quan sát đồ thị biên dạng, sai số và tín hiệu cảnh báo. Kết quả thử nghiệm chứng minh tính hiệu quả của hệ thống trong việc xác định và cảnh báo độ lệch so với phương pháp đo truyền thống.

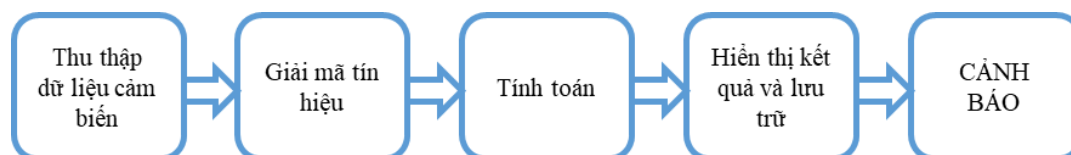
Bố cục bài báo này được trình bày như sau: Phần 1 giới thiệu tổng quan tình hình nghiên cứu; Phần 2 chúng tôi miêu tả tổng quan mô hình hệ thống, thiết kế phân cứng cơ khí và mạch điện: sơ đồ thiết kế, lắp đặt hệ thống. Phần 3 là phần xây dựng hệ thống: đề xuất phương pháp, phương pháp tính toán đo đạc; Phần 4 trình bày kết quả thử nghiệm, hoàn thiện thiết bị và đánh giá kết quả. Cuối cùng, chúng tôi kết luận bài báo trong Phần 5.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

2.1. Sơ đồ khối và nguyên lý hoạt động của hệ thống

Trong phần này, chúng tôi phân tích mô hình hệ thống đo tham số hình học đường ray và trình bày phương pháp đo được đề xuất.

Yêu cầu của bài toán cần thiết kế hệ thống với phạm vi đáp ứng là đo 2 tham số: cự ly ray và thủy bình ray cho đường sắt quốc gia Việt Nam.



Hình 2. Sơ đồ khối hoạt động của hệ thống.

Quá trình vận hành của hệ thống được mô tả trong sơ đồ khối Hình 2 và hệ thống đo tham số Hình 3 như sau: Hệ thống được đặt vào đường ray sau đó cần hiệu chỉnh cảm biến về vị trí giá trị 0; tiến hành di chuyển thiết bị (xe đẩy) dọc đường ray.

- Khối thu thập dữ liệu cảm biến: Khi xe đẩy di chuyển trên đường ray, cụm bánh xe thứ nhất ③ sẽ dịch chuyển ngang theo sự biến đổi cự ly đường, khi đó cảm biến điện dung thứ nhất ⑦ sẽ xác định sự thay đổi cự ly này. Cụm bánh xe thứ hai ④ và cụm bánh xe thứ ba ⑤ lăn và tì lên một bên ray còn lại, cảm biến điện dung thứ hai ⑧ sẽ dịch chuyển theo phương đứng tùy theo độ gò ghề của đỉnh ray và xác định được đường tên giữa cụm bánh xe thứ hai ④ và cụm bánh xe thứ ba ⑤. Thông qua cảm biến IMU ⑥ sẽ xác định được góc nghiêng ngang của dầm ngang.

- Khối giải mã tín hiệu: Từ các giá trị đo của cảm biến điện dung thứ hai ⑧ và cảm biến IMU ⑥ hệ thống xử lý trung tâm sẽ giải mã khung truyền dữ liệu nhận được và quy đổi sang giá trị đo lường theo khoảng cách.

- Khối tính toán: hệ thống xử lý trung tâm sẽ dựa vào các giá trị đã giải mã để tính toán được giá trị thực tế ngoài hiện trường bao gồm tính toán độ sai lệch cự ly ray dựa trên phương

pháp tính toán được trình bày trong mục a) phần 3.1 và thủy bình ray dựa trên phương pháp tính toán được trình bày trong mục b) phần 3.1.

- Khôi cảnh báo: Hệ thống sẽ đưa ra tín hiệu cảnh báo kịp thời các vị trí độ lệch biên dạng ray vượt quy định trong phần 3.3.

2.2. Hệ thống cơ khí

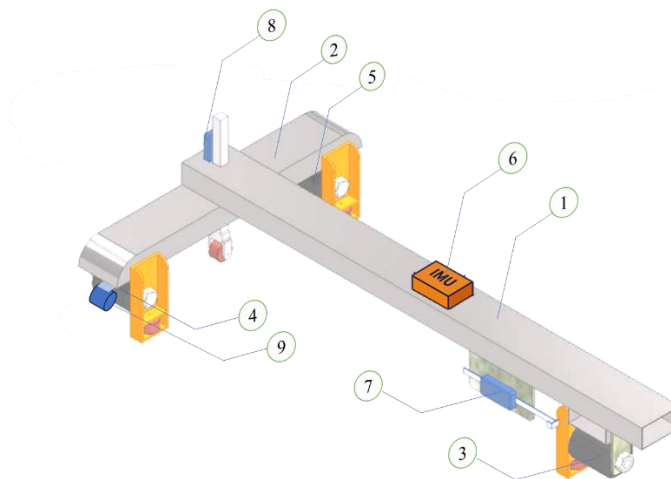
Trước tiên, chúng tôi thiết kế phần cơ khí hệ thống đo tham số hình học đường ray có dạng một xe đẩy, có thể di chuyển trên đường ray dựa trên hệ thống bánh xe dạng con lăn. Cơ cấu có thể tháo lắp nhanh chỉ với một công nhân thực hiện. Xe đẩy được cấu tạo từ các bộ phận như Hình 3:

+ Dầm ngang ① được chế tạo từ thép hộp hoặc nhôm định hình dùng để liên kết cụm bánh xe thứ nhất với dầm dọc ②.

+ Dầm dọc ② được chế tạo từ thép hộp hoặc nhôm định hình. Trên dầm dọc ② bố trí 2 cụm bánh xe thứ hai ④ và thứ ba ⑤ ở hai đầu.

+ Cụm bánh xe thứ nhất ③ bao gồm 2 bánh xe, bánh xe trụ tròn $\varnothing 80$ mm lăn trên mặt đỉnh ray, bánh xe trụ tròn $\varnothing 50$ mm tỳ vào má ray và nằm dưới đỉnh ray 16 mm. Hai bánh xe được liên kết với hệ thống ray trượt đặt phía trong lòng dầm ngang ①. Khi xe đẩy chuyển động trên đường ray thì cụm bánh xe thứ nhất dịch chuyển theo phương ngang tương ứng với sự thay đổi của cự ly ray, độ dịch chuyển này là $(0 \div 30)$ mm.

+ Cụm bánh xe thứ hai ④ và cụm bánh xe thứ ba ⑤ bao gồm 2 bánh xe, bánh xe trụ tròn $\varnothing 80$ mm lăn trên mặt đỉnh ray, bánh xe trụ tròn $\varnothing 50$ mm tỳ vào má ray và nằm dưới đỉnh ray 16mm. Cụm bánh xe thứ hai ④ và cụm bánh xe thứ ba ⑤ được lắp cố định tại 2 đầu dầm dọc.



Hình 3. Minh họa hệ thống đo tham số hình học đường ray bao gồm xe đẩy và hệ thống các cảm biến gắn trên xe đẩy.

2.3. Hệ thống cảm biến và điều khiển

Phần thiết bị cảm biến và bo mạch điều khiển được lắp đặt trên xe đẩy tại vị trí phù hợp nhất để có thể thu được dữ liệu chính xác như Hình 3:

+ Cảm biến IMU ⑥ được tích hợp trên bo mạch Arduino Nano 33 BLE, được đặt trên dầm ngang và dùng để đo góc nghiêng ngang của dầm ngang và nghiêng dọc của dầm dọc.

+ Cảm biến điện dung thứ nhất (7) được lắp cố định phía dưới dầm ngang, một đầu tì vào cụm bánh xe thứ nhất. Cảm biến điện dung thứ nhất (7) đo độ dịch chuyển ngang của cụm bánh xe thứ nhất.

+ Cảm biến điện dung thứ hai (8) được lắp 1 đầu cố định trong ống vuông 21x21 mm, đầu còn lại được gắn bánh xe trụ tròn Ø50 mm và luôn tì lên mặt đỉnh ray. Khi xe đẩy di chuyển trên đường ray thì thanh trượt của Cảm biến điện dung thứ hai (8) sẽ dịch chuyển lên xuống (-15 ÷ +15) mm. Cảm biến điện dung thứ hai (8) này đo đường tên của cụm bánh xe thứ hai (4) và cụm bánh xe thứ ba (5).

+ Bộ mã hóa vòng quay (Encoder) đóng vai trò là một công-tơ-mét để xác định khoảng cách lấy mẫu. Encoder được lắp trên dầm dọc và tì vào cụm bánh xe thứ hai (4).

3. XÂY DỰNG HỆ THỐNG

3.1. Xây dựng phương pháp tính toán

a) Phương pháp tính toán đo độ sai lệch cự ly ray:

Nguyên lý: Quy ước cách đo cự ly ray như hình 4. Do cụm bánh xe thứ hai (4) và cụm bánh xe thứ ba (5) cố định trên dầm dọc và cụm bánh xe thứ nhất (3) có thể dịch chuyển dọc theo dầm ngang nhờ cơ cấu lò xo nên khi cự ly đường ray thay đổi thì cụm bánh xe thứ nhất sẽ dịch chuyển theo độ thay đổi của của đường ray. Lúc này cảm biến thứ nhất (7) sẽ đọc được độ lệch cự ly của đường ray.

Thông qua cảm biến điện dung thứ nhất (7), chúng tôi đo được thông số ΔS :

- Cự ly ray thực tế (hiện trường) được xác định theo công thức (1):

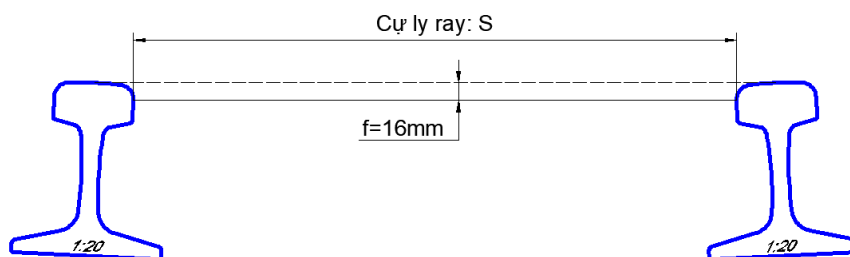
$$S_{HT} = S_0 + \Delta S \quad (1)$$

Trong đó: S_{HT} là cự ly ray thực tế; S_0 là khổ đường; ΔS là giá trị đọc trên cảm biến thứ nhất (7) (ΔS được cài đặt giá trị mốc tại vị trí tiêu chuẩn S_0 : $\Delta S = "0"$, ΔS có giá trị âm hoặc dương tương ứng khi lòng đường hẹp hơn S_0 hoặc rộng hơn S_0);

- Sai số cự ly ray được xác định theo công thức:

$$\Delta S = S_{HT} - S_{KH} \quad (2)$$

Trong đó: S_{KH} là cự ly ray kế hoạch (giá trị này lấy theo quy định của ngành đường sắt Việt Nam);

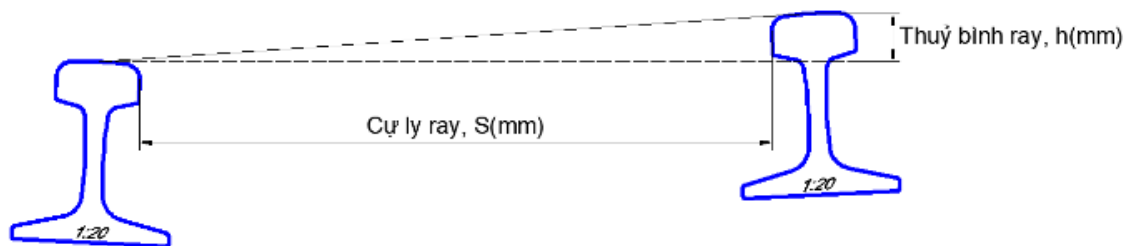


Hình 4. Quy ước cách đo cự ly ray.

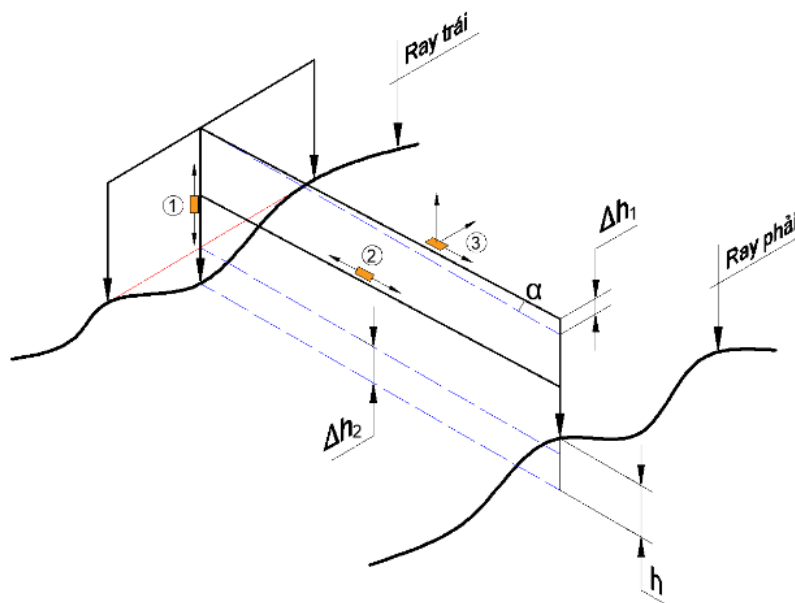
b) Phương pháp tính toán đo thủy bình ray:

Nguyên lý: Thủy bình ray là sự chênh lệch cao độ giữa hai ray bao gồm hai thành phần (Hình 5 và Hình 6): Thành phần thứ nhất Δh_1 là chênh lệch do độ nghiêng ngang của dầm ngang

với góc nghiêng là α , và thành phần thứ hai Δh_2 là chênh lệch cao độ giữa ray trái với đường dây cung tạo bởi cụm bánh xe thứ hai (4) và thứ ba (5).



Hình 5. Quy ước cách đo thủy bình ray.



Hình 6. Hình vẽ minh họa cách xác định thủy bình ray.

Tiến hành đo các thông số chênh lệch cao độ giữa hai ray bằng cách sử dụng phương pháp đo góc nghiêng với cảm biến IMU, sử dụng kit Arduino Nano 33 BLE có tích hợp cảm biến IMU- LSM9DS1, có khả năng đo 9 thông số: 3 trục góc quay (Gyro), 3 trục gia tốc hướng (Accelerometer) và 3 trục từ trường (Magnetometer) với đầu ra dữ liệu 16 bit. Để tính toán góc nghiêng từ các thông số của IMU, ta có thể sử dụng các công thức toán học sau đây. Giả sử các giá trị gia tốc theo ba trục là a_x , a_y , và a_z :

$$\text{Góc nghiêng theo trục X: } X = \arctan\left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}}\right) \quad (3)$$

$$\text{Góc nghiêng theo trục Y: } Y = \arctan\left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}\right) \quad (4)$$

Kết quả sẽ được tính bằng radian, ta có thể chuyển đổi sang độ bằng cách nhân với $(180/\pi)$.

+ Thủy bình ray thực tế (hiện trường) được xác định theo công thức:

$$h = \Delta h_1 + \Delta h_2 \quad (5)$$

$$h = \alpha \cdot S_{HT} + \Delta h_2 \quad (6)$$

Trong đó: α (rad) là góc nghiêng ngang của dầm ngang, tham số này được xác định thông qua cảm biến IMU (trục X); Δh_2 là đường tên của dây cung tạo bởi cụm bánh xe thứ hai 4 và thứ ba 5, tham số này được xác định thông qua giá trị đo được của cảm biến điện dung thứ hai (8);

- Sai số thủy bình ray được xác định theo công thức:

$$\Delta h = h_{HT} - h_{KH} \quad (7)$$

Trong đó: h_{KH} là thủy bình ray kế hoạch (giá trị này lấy theo quy định của ngành đường sắt Việt Nam).

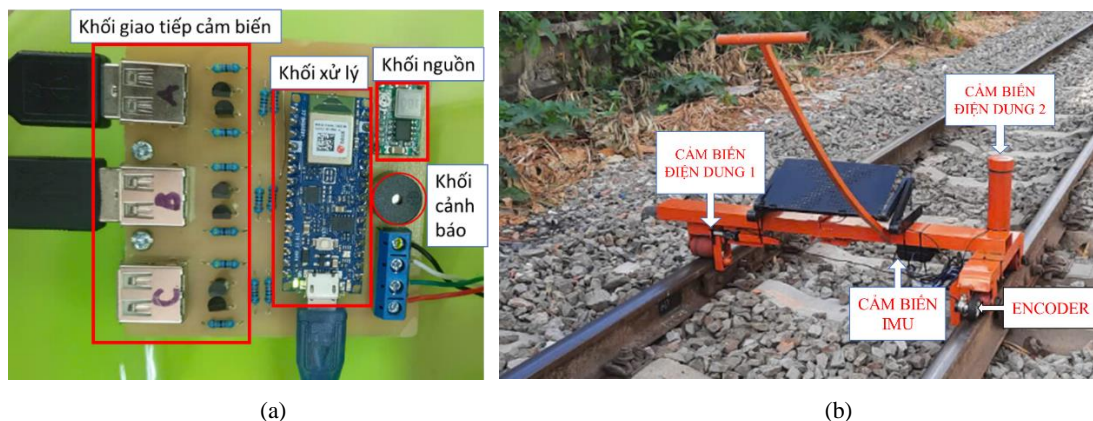
3.2. Phương pháp đo của hệ thống

Để đo cự ly giữa hai ray, chúng tôi sử dụng thước cặp kỹ thuật số hoạt động theo nguyên lý cảm biến điện dung. Đây là một thiết bị đo khoảng cách có độ chính xác cao, được ứng dụng phổ biến trong các lĩnh vực sản xuất, kỹ thuật và nghiên cứu. Thước cặp này hoạt động dựa trên sự thay đổi điện dung giữa các điện cực khi bộ đọc di chuyển dọc theo thanh đo. Cấu trúc của hệ thống gồm một thanh đo chứa các dải điện cực xen kẽ và một đầu cảm biến ghi nhận sự biến thiên điện dung do chuyển động cơ học khi điều chỉnh hàm kẹp. Sự thay đổi điện dung này được xử lý bởi bộ mã hóa tuyến tính, chính là cảm biến điện dung tích hợp trong thước cặp, có nhiệm vụ ghi nhận sự dịch chuyển tương đối giữa đầu đọc và thang đo, sau đó chuyển đổi thành tín hiệu điện. Tín hiệu này tiếp tục được chuyển sang dạng kỹ thuật số thông qua bộ chuyển đổi tương tự-số (ADC). Để thu thập và xử lý dữ liệu đo được, chúng tôi thiết kế một mạch giao tiếp truyền dữ liệu đến vi điều khiển Arduino Nano 33 BLE [11], phục vụ cho quá trình phân tích và hiển thị. Phương pháp này mang lại khả năng đo lường chính xác, phản hồi nhanh và độ tin cậy cao, phù hợp với các ứng dụng giám sát và kiểm tra hình học ray. Thước cặp sử dụng có phạm vi đo từ 0-150mm và độ chính xác là $\pm 0,2$ mm.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật thước cặp kỹ thuật số.

Hãng sản xuất	MOORE & WRIGHT
Model	MW110-15DPC
Xuất xứ	ANH
Phạm vi đo	0 – 150 mm
Độ chính xác	$\pm 0,2$ mm
Độ hiển thị	0,01 mm
Kích thước ngàm chính	40 mm
Kích thước ngàm phụ	16,5 mm

Để đo thủy bình ray, chúng tôi sử dụng phương pháp đo góc nghiêng với cảm biến IMU. Chúng tôi sử dụng bo mạch Arduino Nano 33 BLE có tích hợp cảm biến IMU- LSM9DS1, có khả năng đo 9 thông số: 3 trục Góc quay (Gyro), 3 trục gia tốc hướng (Accelerometer) và 3 trục từ trường (Magnetometer) với đầu ra dữ liệu 16 bit [12]. Sơ đồ mạch gồm 4 khối chính trong Hình 7(a): Khối cấp nguồn, khối điều khiển trung tâm là Arduino, khối chuyển đổi tín hiệu cảm biến đầu vào, và khối phát âm thanh cảnh báo. Vị trí lắp đặt thiết bị cảm biến trong thực tế Hình 7(b).



Hình 7. (a) Bố trí linh kiện trên bo mạch và (b) Hệ thống hoàn thiện.

3.3. Các trường hợp cảnh báo của hệ thống

- Cảnh báo 1: sai lệch cự ly 2 ray. Hệ thống sẽ cảnh báo sai lệch cự ly ray khi một trong các điều kiện xảy ra vượt ra phạm vi cho phép, cụ thể:

+ Trường hợp 1: Giá trị sai lệch cự ly đường ray vượt quá giới hạn cho phép:

$$\Delta S > [\Delta S] \quad (8)$$

Trong đó: $[\Delta S]$ là độ sai lệch cự ly ray cho phép;

+ Trường hợp 2: Độ biến đổi cự ly ray vượt quá giá trị cho phép:

$$i_s > [i_s] \quad (9)$$

Trong đó: i_s là độ biến đổi cự ly ray; $[i_s]$ là độ biến đổi cự ly ray cho phép;

Giá trị $[i_s]$ phụ thuộc vào vận tốc V và được quy định trong TCCS 07:2022/VNRA [13], cụ thể như sau:

+ Khi $60 < V \leq 90$ Km thì $[i_s] = 1,0\%$

+ Khi $60 < V \leq 60$ Km thì $[i_s] = 2,0\%$

+ Khi $V \leq 30$ Km thì $[i_s] = 2,5\%$

- Cảnh báo 2: sai lệch thuỷ bình ray. Hệ thống sẽ cảnh báo sai lệch thuỷ bình ray khi một trong các điều kiện xảy ra, cụ thể:

+ Trường hợp 1: Giá trị thuỷ bình ray vượt quá giới hạn cho phép:

$$\Delta h > [\Delta h] \quad (10)$$

Trong đó: $[\Delta h]$ là độ sai lệch cự ly ray cho phép;

+ Trường hợp 2: Độ biến đổi thuỷ bình ray vượt quá giá trị cho phép:

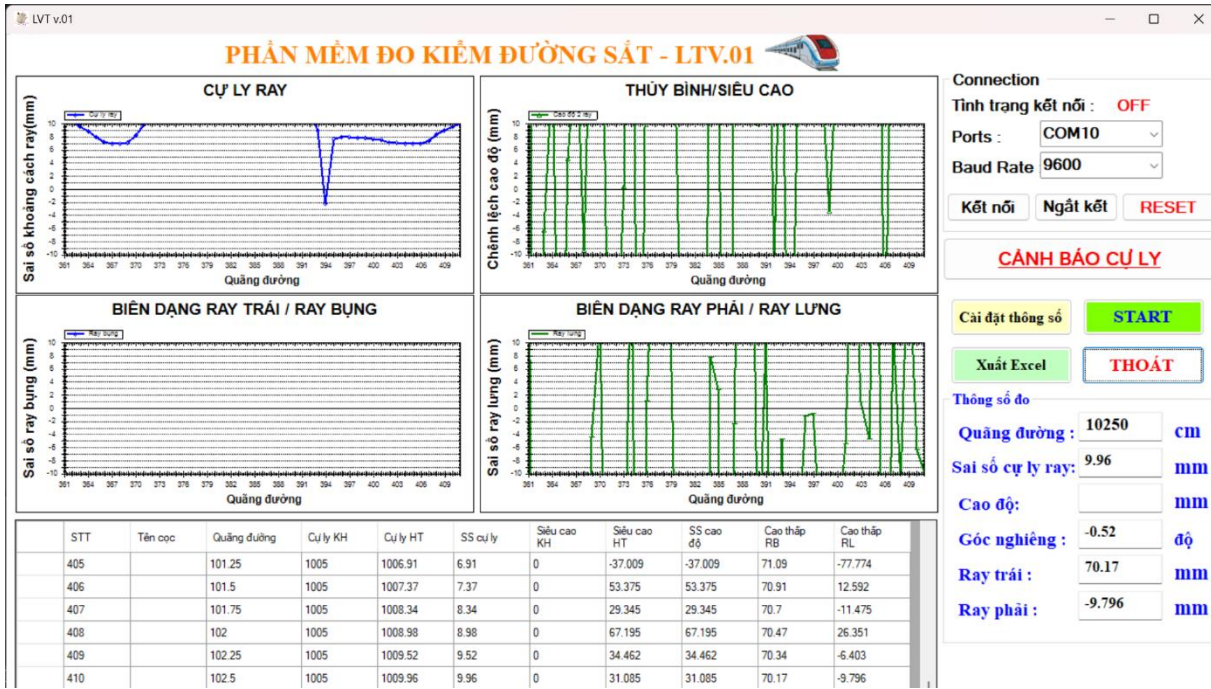
$$i_h > [i_h] \quad (11)$$

Trong đó: i_h là độ biến đổi thuỷ bình ray; $[i_h]$ là độ biến đổi thuỷ bình ray cho phép.

Giá trị $[i_h]$ phụ thuộc vào vận tốc V và được quy định trong TCCS 07:2022/VNRA [13], cụ thể như sau:

- + Khi $60 < V \leq 90$ Km thì $[i_h] = 1,0\%$
- + Khi $60 < V \leq 60$ Km thì $[i_h] = 2,0\%$
- + Khi $V \leq 30$ Km thì $[i_h] = 2,5\%$

3.4. Giao diện phần mềm



Hình 8. Giao diện hệ thống thử nghiệm. Dấu “.” trên giao diện phần mềm trong ảnh tương đương với dấu “,” trong biểu diễn số tiếng Việt.

Hình 8 là giao diện giám sát hệ thống thử nghiệm, bao gồm: Phần kết nối cổng truyền thông thiết bị; Bảng hiển thị các thông số đo được; Đồ thị thời gian thực các giá trị cự ly ray và thủy bình; Bảng biểu các thông số theo lý trình; Các nút điều khiển. Để thuận tiện cho người dùng trong việc tiến hành phân tích dữ liệu lặp đi lặp lại, phần mềm cung cấp định dạng CSV cho dữ liệu thu thập được, có thể mở bằng các công cụ như Excel để phân tích so sánh nhiều bộ dữ liệu.

4. THỬ NGHIỆM HIỆN TRƯỜNG VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

Trong phần này, chúng tôi tiến hành đo thử nghiệm trên một đoạn đường sắt quốc gia Việt Nam (tuyến đường sắt Hà Nội – Tp.Hồ Chí Minh, Hình 9 và Hình 10), đoạn đường ray có chiều dài 280,25m (Km1713+038,33 đến Km1713+318,58).

Bảng 2. Bảng thông số kỹ thuật của đoạn đường sắt từ Km1713+038,33 đến Km1713+318,58.

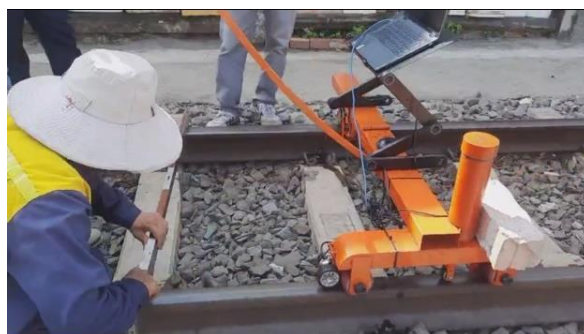
STT	Tham số	Giá trị
1	Khổ đường, S_0	1000mm
2	Lý trình điểm đầu	Km1713+068,33
3	Lý trình điểm cuối	Km1713+248,58
4	Bán kính đường cong, R	500m
5	Chiều dài đường cong hòa hoãn 1	30m
6	Chiều dài đường cong hòa hoãn 2	30m
7	Góc chuyển hướng	28°39'55"
8	Tốc độ lớn nhất, V_{max}	60 km/h
9	Loại ray	P43

STT	Tham số	Giá trị
1	Khổ đường, S_0	1000mm
10	Tà vẹt	Bê tông DƯL liền khối
11	Siêu cao, h	40mm
12	Gia khoan, K	5mm

Hiện trường các trường hợp thử nghiệm Hình 9.



Hình 9. (a) Trường hợp hướng Hà Nội – TP. HCM và (b) Trường hợp hướng TP. HCM - Hà Nội.



Hình 10. Kiểm tra đối chiếu khi có cảnh báo.

Quá trình thử nghiệm được tiến hành theo quy trình sau: Đầu tiên, chúng tôi cho hệ thống di chuyển theo 2 hướng Hà Nội – TP. HCM và TP. HCM – Hà Nội, dữ liệu thu thập được phân tích, tính toán và so sánh với giá trị sai số cho phép theo quy định (TCCS 07:2022/VNRA). Tiếp theo, chúng tôi tiến hành kiểm tra đối chứng tại các vị trí hệ thống cảnh báo độ sai lệch đường ray vượt quá giá trị cho phép và kiểm tra xác suất tại 10 vị trí khác so với phương pháp đo thủ công truyền thống.

Do hạn chế kinh phí, chúng tôi chưa có điều kiện đối chứng với thiết bị thương mại chuyên dụng tiên tiến. Tuy nhiên, chúng tôi đã tiến hành đo đối chứng ngoài hiện trường với phương pháp đo thủ công đang được thực hiện tại đơn vị quản lý Đường sắt, kết quả đo được thể hiện tại Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả đo đối chứng ngoài hiện trường.

Stt	Vị trí đo	Cự ly ray (mm)		Thủy bình ray (mm)	
		Đo thủ công	Đo bằng Hệ thống trong nghiên cứu này	Đo thủ công	Đo bằng Hệ thống trong nghiên cứu này
1	NĐ	1001	1001,4	0	0,3
2	NĐ + 10m	1000	1000,2	14	13,8
3	TĐ	1006	1005,8	39	39,4

4	TĐ + 50m	1005	1005,3	40	40,6
5	TĐ + 100m	1006	1005,7	41	40,8
6	TĐ + 150m	1007	1006,6	38	37,6
7	TC	1005	1005,2	40	40,5
8	TC + 10m	1002	1001,8	26	26
9	NC	1000	1000,2	0	0,3

Kết quả thực nghiệm thấy rằng: hệ thống có tốc độ đo nhanh, độ chính xác cao, phân tích và xử lý thời gian thực, đầu ra báo cáo đa dạng và vận hành phần mềm dễ dàng.

- Hệ thống cảnh báo và kết quả đo hoàn toàn chính xác khi đối chứng với phương pháp đo thủ công truyền thống. Cụ thể, sai số tuyệt đối trung bình cự ly ray là 0,27 mm và sai số tuyệt đối trung bình thủy bình ray là 0,33 mm. Cả hai thông số đều có sai số nhỏ hơn 0,5 mm đảm bảo phù hợp với yêu cầu kỹ thuật theo tiêu chuẩn TCCS 04:2014/VNRA [14], qua đó cho thấy hệ thống đạt độ chính xác cao, có thể tin cậy để ứng dụng trong kiểm tra, bảo trì hình học ray trong thực tế.

- Thời gian hệ thống của chúng tôi đo lường mất khoảng 15 phút ít hơn so với phương pháp đo thủ công truyền thống khoảng 60 phút (trên toàn đường cong).

Nghiên cứu này cho thấy hiệu quả của hệ thống trong việc xác định và cảnh báo độ lệch so với phương pháp truyền thống, đồng thời tiết kiệm thời gian và chi phí trong công tác đo kiểm định kỳ.

5. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã phát triển một hệ thống đo lường hình học đường ray và phần mềm có tính năng ghi, phân tích, đánh giá và cảnh báo kết quả đo. Hiệu suất của hệ thống đã được đánh giá thông qua đo đạc hiện trường trên đường sắt quốc gia Việt Nam, độ chính xác hoàn toàn đáp ứng yêu cầu cho công tác quản lý khai thác hiện nay, đặc biệt thời gian đo lường nhanh hơn khoảng 4 lần so với phương pháp đo thủ công truyền thống đồng thời tiết kiệm được nhân lực.

Khía cạnh quan trọng của việc xây dựng hệ thống này là giảm thiểu sai sót do yếu tố con người (có thể đọc kết quả hoặc nhập liệu thủ công sai) và đảm bảo tính minh bạch trong khai thác dữ liệu đường sắt. Thông qua việc triển khai thực nghiệm hệ thống, nhóm tác giả đã đạt được thành công trong việc đo đạc và cảnh báo sai số với độ chính xác đáp ứng yêu cầu bài toán và tốc độ xử lý nhanh. Kết quả của nghiên cứu này sẽ là tiền đề để ứng dụng trong thực tế tại các đơn vị quản lý, đồng thời giải quyết được một phần vấn đề số hóa trong ngành đường sắt Việt Nam. Trong tương lai, nhóm tác giả sẽ mở rộng nghiên cứu của mình để ứng dụng Internet of things vào hệ thống.

Nghiên cứu này góp phần giám sát cơ sở hạ tầng hiệu quả, tự động hóa và hướng đến đường sắt kỹ thuật số.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2025-PHII_DDT-002.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. S. Mario, et al., Review of laser scanning technologies and their applications for road and railway infrastructure monitoring, *Infrastructures*, 4 (2019) 58. <https://doi.org/10.3390/infrastructures4040058>
- [2]. Y. Wang et al., A full 3D reconstruction of rail tracks using a camera array, *Measurement*, 225

(2024) 114034. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.114034>

[3]. M. Guerrieri, G. Parla, C. Celauro, Digital image analysis technique for measuring railway track defects and ballast gradation, Measurement, 113 (2018) 137-147. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.08.040>

[4]. E.J. OBrien, P. Quirke, C. Bowe, D. Cantero, Determination of railway track longitudinal profile using measured inertial response of an in-service railway vehicle, Struct. Health Monit., 17 (2017) 1425–1440. <https://doi.org/10.1177/14759217177444>

[5]. J. Kašćak, J. Török, M. Töröková, Utilization of the Ultrasonic Diagnostic Method in Rail Status on a Defined Railway Section, TEM Journal, 10 (2021) 152-157. <https://doi.org/10.18421/TEM101-18>

[6]. F. Wu, et al. Internal defects detection method of the railway track based on generalization features cluster under ultrasonic images, Chinese Journal of Mechanical Engineering, 35 (2022) 59. <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00726-z>

[7]. A. Malekjafarian et al., Railway track monitoring using train measurements: An experimental case study, Applied Sciences, 9 (2019) 4859. <https://doi.org/10.3390/app9224859>

[8]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 14205-2:2024 – Ứng dụng đường sắt – Kiểm tra ray trên đường bằng phương pháp không phá hủy – Phần 2: Kiểm tra ray bằng dòng điện xoáy, <https://luatvietnam.vn/giao-thong/tieu-chuan-quoc-gia-tcvn-14205-2-2024-ung-dung-duong-sat-kiem-tra-ray-tren-duong-bang-phuong-phap-khong-pha-huy-phan-2-kiem-tra-ray-bang-dong-dien-xoay-394122-d3.html>, truy cập ngày 3 tháng 7, 2025.

[9]. Phát Nguyễn Tiên, et al., Nghiên cứu sử dụng sóng siêu âm trong theo dõi và giám sát ray hàn liền trong đường sắt, Hội nghị Khoa học trẻ Trường Đại học Xây dựng, Hà Nội, Việt Nam, (2019) 361-372.

[10]. Khúc Đăng Tùng, Nghiên cứu cảm biến giám sát chuyển dịch ngang sử dụng sóng siêu âm trong ray hàn liền đường sắt, Tạp chí Khoa học công nghệ, 6 (2021) 98-102.

[11]. A. Kurniawan, Arduino Nano 33 BLE Sense Board Development. In: IoT Projects with Arduino Nano 33 BLE Sense. Apress, Berkeley, CA, (2021) 21-74. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-6458-4_2

[12]. G. J. Aparna, C. Kamal, R. N. Motta, IMU based attitude estimation using adaptive complimentary filter, In: 2021 International Conference on Communication information and Computing Technology, (2021) 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICCICT50803.2021.9510153>

[13]. Cục Đường sắt Việt Nam, TCCS 07:2022/VNRA – Tiêu chuẩn cơ sở bảo trì công trình đường sắt thường (Bảo trì và nghiệm thu sản phẩm), http://vnra.gov.vn/van_ban_phap_luat?LoaiVanBan.MaMuc.keyword=09&filterAction=search&CoQuanBanHanh.MaDinhDanh=G04.18&id=66e414a5198f6b9f1666097e&menu=thong_tin_chung, truy cập ngày 3 tháng 7, 2025.

[14]. Cục Đường sắt Việt Nam, TCCS 04:2014/VNRA (được thay thế bởi TCCS 04:2022/VNRA) – Tiêu chuẩn cơ sở về vật tư, vật liệu, phụ kiện sử dụng trong công tác bảo trì công trình đường sắt, http://vnra.gov.vn/van_ban_phap_luat?LoaiVanBan.MaMuc.keyword=09&filterAction=search&id=66e411fe17fc347ac00a67b&menu=thong_tin_chung, truy cập ngày 3 tháng 7 năm 2025.