

ỨNG DỤNG ROBOT TRONG VIỆC VẬN HÀNH VÀ BẢO TRÌ HỆ THỐNG TỦ PHÂN PHỐI ĐIỆN

ROBOTIC APPLICATION FOR OPERATION AND MAINTENANCE OF ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEMS

Nguyễn Nhựt Duy, Dương Thị Vân Anh, Nguyễn Anh Dũng,
Nguyễn Anh Hào, Phạm Hùng Anh

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 21143044@student.hcmute.edu.vn;

anhdtv@hcmute.edu.vn;

21143045@student.hcmute.edu.vn;

21143343@student.hcmute.edu.vn;

phamhunganh@cdnpy.edu.vn.

TÓM TẮT

Trong bối cảnh phát triển khoa học kỹ thuật và trí tuệ nhân tạo, việc ứng dụng robot thay thế con người trong nhiều lĩnh vực đang trở thành xu hướng tại các quốc gia phát triển. Bài báo này tập trung nghiên cứu, tính toán và thiết kế mô hình robot có khả năng kiểm tra, giám sát và phát hiện sự cố tại tủ phân phối điện trong nhà máy. Robot được thiết kế với cơ cấu di chuyển trên đường ray, tích hợp camera, cảm biến và xi lanh điện để quan sát, đo đạc khu vực tủ điện. Nghiên cứu xuất phát từ nhu cầu thực tiễn trong doanh nghiệp, nhằm nâng cao an toàn lao động, giảm rủi ro cho con người và cải thiện hiệu quả công tác bảo trì hệ thống phân phối điện công nghiệp.

Từ khóa: Robot; Robot dẫn hướng theo ray; Vận hành và bảo trì; Tủ điện phân phối; Tự động hóa công nghiệp; Phát hiện sự cố.

ABSTRACT

With the rapid advancement of science, technology, and artificial intelligence, the deployment of robots in industrial applications has become an emerging trend. This paper presents the conceptual design of a rail-guided robotic system integrated with a camera, sensors, and an electric actuator for monitoring, measurement, and fault detection in electrical distribution cabinets within manufacturing facilities. The proposed approach addresses practical industrial demands by enhancing workplace safety, mitigating human risks, and improving the efficiency and reliability of electrical maintenance operations.

Keywords: Robotics; Rail-guided robot; Operation and maintenance; Electrical distribution cabinet; Industrial automation; Fault detection.



❖ GIỚI THIỆU

Ở các nước phát triển, robot được sử dụng phổ biến trong nhiều lĩnh vực như trong sản xuất, y tế, dịch vụ. Góp phần đem lại nhiều lợi ích to lớn cho đời sống con người. Tại Việt Nam, việc phát triển robot vẫn còn mới mẻ và chưa phát triển mạnh. Ngày nay, tại các nhà máy công nghiệp lớn không ngừng được mở rộng và đòi hỏi các thiết bị, máy móc phải được vận hành liên tục và đảm bảo sự ổn định. Cho nên việc giám sát và bảo trì tủ phân phối điện đóng vai trò lớn trong việc vận hành nhà máy. Ngoài ra, các công việc bảo trì tủ điện phân phối thường được kiểm tra trực tiếp từ con người. Điều này gây nguy cơ tiềm ẩn về vấn đề điện giật, cháy nổ ảnh hưởng đến con người. Robot vận hành và bảo trì tủ phân phối điện ở các nước phát triển đã được sử dụng trong các nhà máy công nghiệp và đem lại hiệu quả cao. Tuy nhiên đối với nước ta thì robot này vẫn chưa được áp dụng nhiều trong các nhà máy. Nắm bắt được xu hướng và tình hình trên, nhóm đã tiến hành nghiên cứu thiết kế mô hình robot vận hành và bảo trì tủ phân phối điện với kết cấu đơn giản và tối ưu chi phí, góp phần phát triển cho ngành công nghiệp nước ta.

(*) Thực trạng và thách thức

Trong các hệ thống điện công nghiệp và tòa nhà, tủ phân phối điện đóng vai trò then chốt trong việc cung cấp và bảo vệ dòng điện. Tuy nhiên, hiện nay việc vận hành và bảo trì vẫn chủ yếu dựa vào con người, tiềm ẩn nhiều rủi ro như điện giật, cháy nổ, hoặc gián đoạn hệ thống [1]. Các sự cố thường gặp bao gồm quá nhiệt tại điểm đấu nối, hỏng hóc thiết bị đóng cắt, và suy giảm hiệu suất do bụi, độ ẩm hoặc lão hóa vật liệu [2].

Một thách thức lớn là việc kiểm tra định

kỳ thường mang tính thủ công, tốn nhiều thời gian và khó phát hiện kịp thời các hư hỏng tiềm ẩn [3]. Ngoài ra, xu hướng phụ tải ngày càng tăng, cùng với yêu cầu vận hành liên tục 24/7, khiến công tác bảo trì thủ công trở nên kém hiệu quả và rủi ro cao [4]. Do đó, cần giải pháp tự động hóa việc vận hành nhằm nâng cao độ an toàn, tin cậy và tối ưu chi phí.

(*) Giải pháp và mục tiêu nghiên cứu

Một trong những giải pháp khả thi là ứng dụng robot di động tích hợp hệ thống camera và cảm biến, có khả năng giám sát môi trường và phát hiện bất thường trong tủ điện. Robot có thể thực hiện các nhiệm vụ như đo nhiệt độ – độ ẩm, phát hiện điểm nóng bằng cảm biến hồng ngoại, giám sát tình trạng hoạt động của thiết bị đóng cắt, và cảnh báo sớm sự cố [5].

Mục tiêu nghiên cứu tập trung vào:

- Thiết kế robot giám sát có khả năng vận hành trong môi trường tủ phân phối điện;
- Tích hợp IoT để truyền dữ liệu giám sát theo thời gian thực, phục vụ cho việc phân tích và dự báo hỏng hóc;
- Nâng cao độ chính xác giám sát, giảm thiểu rủi ro cho con người, đồng thời tối ưu hóa chi phí vận hành và bảo trì [6].

1. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

1.1. Thiết kế mô hình và nguyên lý hoạt động

Mô hình có 3 phần chính: thanh ray di chuyển, phần thân trên và phần thân dưới robot. Mô hình được tính toán và thiết kế để đảm bảo robot di chuyển được trên thanh ray mà không

bị rung lắc. Ngoài ra, mô hình được thiết kế phù hợp với chiều cao của các tủ điện trong nhà máy.

Thanh ray có dạng đoạn thẳng được làm bằng hai đoạn sắt ống Ø27mm được liên kết lại với nhau bằng các thanh sắt vuông 10×10mm bằng các mối hàn. Kích thước đường ray 1400×150mm.

Robot di chuyển trên thanh ray nhờ hệ thống bánh xe chữ V, gồm hai bánh chính dẫn động và bốn bánh phụ giữ ổn định. Động cơ bước truyền động qua bánh răng côn và bộ đai đến trục bánh chính, tạo chuyển động chính xác và êm. Thân robot tích hợp cảm biến, camera và còi – đèn cảnh báo để giám sát nhiệt độ - độ ẩm môi trường, các điểm nóng trong tủ điện và phát hiện sự cố.

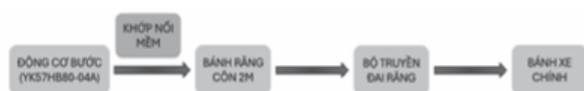


Hình 1. Sơ đồ khối nguyên lý hoạt động của robot

1.2. Các thiết bị chính

1.2.1. Khối động cơ và truyền động

Bộ truyền động của robot gồm: Động cơ bước, bánh răng côn, bộ truyền đai, bánh xe di chuyển chính.

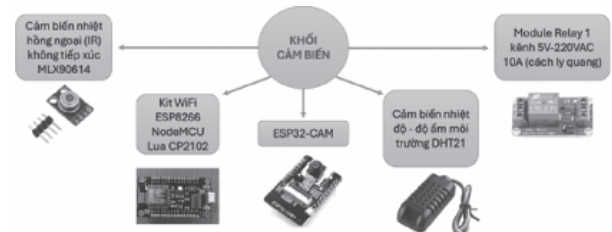


Hình 2. Sơ đồ khối truyền động của robot

1.2.2. Khối cảm biến

Robot thực hiện các tác vụ gồm: Camera

giám sát, đo nhiệt độ - độ ẩm môi trường, đo nhiệt độ bên trong tủ.



Hình 3. Các cảm biến trên robot

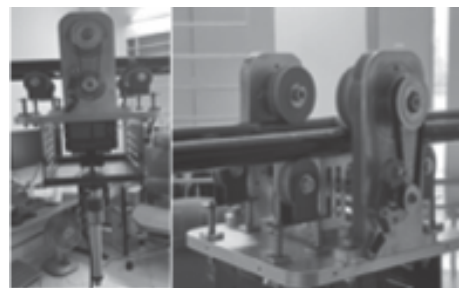
1.2.3. Các thiết bị khác

Ngoài các cơ cấu truyền động và cảm biến, robot còn được tích hợp thêm các thiết bị thực hiện các tác vụ hiển thị, cảnh báo,...



Hình 4. Các tác vụ khác trên robot

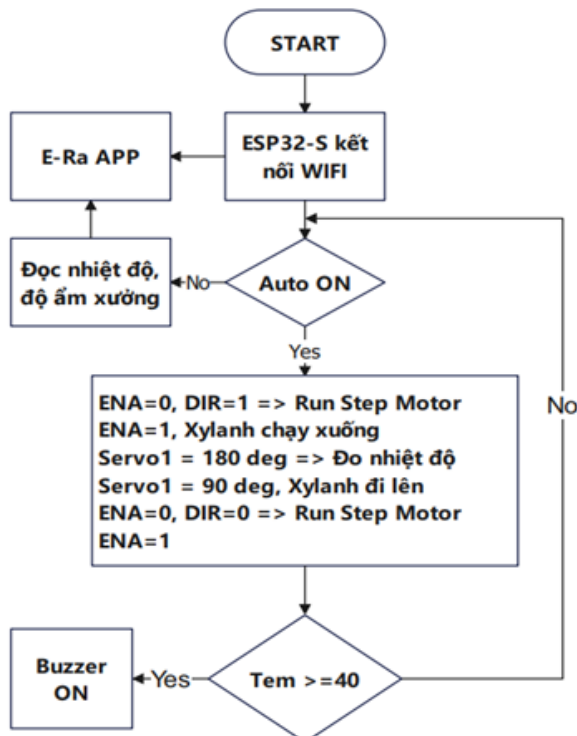
2. MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM



Hình 5. Lắp mô hình cơ khí



Hình 6. Tủ điện và mô hình robot thực tế



Hình 7. Sơ đồ thuật toán

3. THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ

3.1. Đặc điểm công nghệ

Robot khởi động tại vị trí xuất phát, di chuyển trên đường ray đến các tủ điện đã định sẵn. Tại mỗi vị trí, camera và cảm biến thực hiện quan sát, đo nhiệt độ – độ ẩm và quét hồng ngoại bên trong tủ.

Dữ liệu được truyền về máy chủ để giám sát. Nếu chỉ số vượt ngưỡng an toàn, robot phát cảnh báo bằng còi và đèn; ngược lại, robot tiếp tục di chuyển đến tủ kế tiếp và lặp lại quy trình.

3.2. Liên kết màn hình điều khiển và robot

Robot được điều khiển từ xa thông qua phần mềm E-Ra trên máy chủ từ phòng điều khiển bởi người vận hành hoặc trên điện thoại thông minh có cài đặt phần mềm E-Ra.



Hình 8. Giao diện trên máy chủ vận hành trên laptop và điện thoại

3.3. Thực nghiệm robot

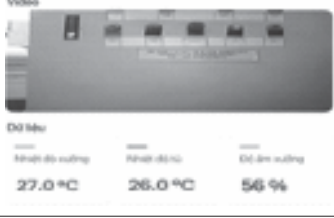
Quá trình thử nghiệm là quá trình kiểm chứng và để đánh giá tính ổn định, độ tin cậy và chế độ làm việc hợp lý robot vận hành. Yếu tố đầu vào, nhóm tác giả xây dựng dựa theo các tình huống mô phỏng sau: cho robot vận hành và mô phỏng đo chỉ số nhiệt độ - độ ẩm môi trường của tủ điện tại phòng PTN CAD/CAM CNC cơ bản 1 của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh với:

- Nhiệt độ phòng: 27°C;
- Nhiệt độ tủ điện: 25°C;
- Độ ẩm xương: 56%;
- Khoảng cách lý tưởng đo nhiệt độ của cảm biến theo nhà sản xuất là 15-30cm [8]. Nhóm lựa chọn khoảng cách robot cách mặt tủ 25cm để tiến hành thực nghiệm.

3.4. Kết quả thực nghiệm

Robot dừng lại trước vị trí cần đo kiểm, các cảm biến và camera tiến hành đo, quan sát, thu thập dữ liệu và gửi về máy chủ.

Bảng 1. Tổng hợp kết quả thực nghiệm

Lần kiểm tra	Nhiệt độ xường (°C)	Nhiệt độ tủ (°C)	Độ ẩm xường (%)	Sai lệch (xường / tủ) (%)	Màn hình giá trị đo	Đánh giá
1	27.0	26.0	56	0.0 / 0.0		Đạt
2	27.0	26.0	55	0.0 / 0.0		Đạt
3	27.0	26.0	56	0.0 / 0.0		Đạt
4	26.9	26.0	56	0.1 / 0.0		Đạt
5	27.0	26.1	56	0.0 / 0.1		Đạt
6	27.0	26.0	57	0.0 / 0.0		Đạt



7	27.0	25.9	56	0.0 / 0.1		Đạt
8	27.0	26.0	56	0.0 / 0.0		Đạt
9	26.9	26.0	56	0.1 / 0.0		Đạt
10	27.0	26.0	55	0.0 / 0.0		Đạt

*Nhận xét số lần thử nghiệm các khoảng, ta được dữ liệu kết quả như sau:

- Kết quả đo ở khoảng cách 10cm so với mặt tủ: Sai lệch trung bình tại xưởng là 0.43 % và tủ là 0.46 % → Cảm biến có xu hướng đo cao hơn giá trị chuẩn nhẹ, nhưng sai lệch nhỏ hơn 0.5% nên vẫn đảm bảo độ chính xác và ổn định tốt trong điều kiện phòng điều hòa.

- Kết quả đo ở khoảng cách 25cm so với mặt tủ: Sai lệch giữa các lần đo đều 0.1%, cho thấy cảm biến hoạt động cực kỳ ổn định trong môi trường có điều hòa. Trung bình sai lệch của xưởng là 0.05% và tủ là 0.03% → Hệ thống đạt độ chính xác cao, sai số gần như không đáng kể, phù hợp cho ứng dụng giám sát nhiệt độ tủ điện.

- Kết quả đo ở khoảng cách 40cm so với mặt tủ: Sai lệch trung bình của xưởng là 0.43 % và của tủ là 0.46 % → Cảm biến có xu hướng đo thấp hơn thực tế một chút, nhưng vẫn trong giới hạn cho phép (0.5 %), chứng tỏ vẫn đảm bảo độ tin cậy khi sử dụng trong tủ điện có điều hòa ổn định.

- Kết quả thực nghiệm cảnh báo an ninh ở khoảng cách 25cm cho thấy: Số lần đạt yêu cầu: Có 4/10 lần (lần 1, 3, 6, 8) nằm hoàn toàn trong ngưỡng cho phép, hệ thống hoạt động ổn định; Số lần vượt ngưỡng so với mức đã cài đặt: Có 6/10 lần xuất hiện cảnh báo (2, 4, 5, 7, 9, 10); Số lần vượt ngưỡng so với mức đã cài đặt: Có 6/10 lần xuất hiện cảnh báo (2, 4, 5, 7, 9, 10).

→ Qua các lần thực nghiệm, hai cảm biến MLX90614 (đo nhiệt độ hồng ngoại) và DHT21 (đo nhiệt độ – độ ẩm môi trường) đều cho thấy độ ổn định và độ chính xác cao trong quá trình hoạt động.

Sai lệch trung bình giữa các lần đo chỉ nằm trong khoảng $\pm 0.5\%$, hoàn toàn không ảnh hưởng đến khả năng giám sát và cảnh báo nhiệt độ của hệ thống.

Trong điều kiện lắp đặt bên trong không gian hẹp của tủ điện, cảm biến hoạt động hiệu quả trong phạm vi 0-50 cm, với khoảng cách tối ưu 25cm. Ở khoảng cách này, tín hiệu đo ổn định, phản ánh chính xác sự thay đổi của nhiệt độ và độ ẩm bên trong tủ. Cho tín hiệu đo ổn định và tin cậy. Kết quả chứng minh hệ thống đáp ứng tốt yêu cầu giám sát tự động, giúp cảnh báo sớm và đảm bảo an toàn thiết bị điện.

Đặc biệt, khi tủ điện được bố trí trong phòng có điều hòa nhiệt độ ổn định ($26-27^{\circ}\text{C}$, độ ẩm 50-60%), sai lệch đo của cảm biến được giữ dưới $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, đáp ứng tốt yêu cầu về độ chính xác trong môi trường công nghiệp.

Các cảm biến và hệ thống cảnh báo an ninh đáp ứng tốt chức năng phát hiện giá trị vượt ngưỡng và phát cảnh báo an ninh.

4. KẾT LUẬN

Thực nghiệm cho thấy cảm biến hoàn toàn đáp ứng tiêu chuẩn sử dụng trong hệ thống giám sát tự động tủ điện, giúp nâng cao độ tin cậy, cảnh báo sớm sự cố nhiệt và đảm bảo an toàn thiết bị điện.

Nghiên cứu thiết kế mô hình robot vận hành và bảo trì ứng dụng trong phòng phân phối điện đã bước đầu hoàn thiện. Ngoài ra,

robot còn đáp ứng được các yêu cầu cơ bản đã đề ra như:

- Ứng dụng các phần mềm chuyên dụng như AutoCAD, Creo Parametric, Solidworks để xây dựng mô hình 3D, mô phỏng và tính toán kiểm bền tốc độ quay của động cơ, chọn thiết bị truyền động step, pully và xy lanh điện.

- Hệ thống cơ khí di chuyển trên thanh ray ổn định. Có khả năng tự động giám sát nhờ trang bị camera.

- Các cảm biến phát hiện điều bất thường từ tủ điện trong phòng phân phối điện, phòng chuyển mạch, phòng phân phối nhà máy điện và các tình huống về cảnh báo điện thông qua các thiết bị thông minh.

- Chế tạo, lắp ráp, vận hành và kiểm tra thực nghiệm robot, đạt được hiệu quả trong phạm vi 0-50 cm, tối ưu 15-30 cm, độ chính xác cao, phù hợp cho giám sát nhiệt độ – độ ẩm tủ điện trong môi trường công nghiệp có điều hòa ổn định.

- Mô hình này rất phù hợp trong việc đẩy mạnh số hóa: Là công nghệ cốt lõi thúc đẩy quá trình số hóa trong các ngành công nghiệp, tạo ra các hệ thống thông minh hơn và khả năng phản ứng nhanh với nhu cầu thay đổi môi trường trong công tác cảnh báo nhanh.

Qua thời gian nghiên cứu và thực hiện đề tài, nhóm đã thấy được tầm quan trọng của IoT trong nhiều khía cạnh cuộc sống hiện đại: Giúp tự động hóa các quy trình, từ quản lý sản xuất đến vận hành thông minh, giảm thiểu sự can thiệp của con người và tối ưu hóa nguồn lực.

Tuy nhiên, vẫn còn một số hạn chế trong quá trình thử nghiệm máy chẳng hạn như: 

Cơ cấu cơ khí sử dụng động cơ và bánh răng chỉ cho phép robot di chuyển qua lại trên đoạn thẳng. Nếu di chuyển trên đoạn thanh ray cong thì robot sẽ không di chuyển được. Để khắc phục hạn chế trên, việc sử dụng bộ vi sai thay thế cho cơ cấu truyền động bánh răng côn.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Dương Thị Vân Anh;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Nhật Duy, Nguyễn Anh Dũng, Nguyễn Anh Hào, Phạm Hùng Anh.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-333.❖

Ngày nhận bài: **26/9/2025**

Ngày phản biện: **09/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn A., Trần B. (2022), “*Ứng dụng công nghệ robot trong công tác bảo trì hệ thống điện*”. Tạp chí Khoa học và Công nghệ.
- [2]. IEC Standard 61439 (2020), “*Low-voltage switchgear and controlgear assemblies*”. International Electrotechnical Commission.
- [3]. Lê H. (2021), “*Quản lý vận hành hệ thống phân phối điện hiện đại*”. NXB. Bách Khoa.
- [4]. Li, X., et al. (2020), “*Challenges in power distribution system maintenance*”. IEEE Transactions on Power Delivery, 35(2): 654-662.
- [5]. Pham C., Le D., Tran E. (2023), “*Smart robotic maintenance in electrical distribution systems*”. Journal of Electrical Engineering Research.
- [6]. Chen, Y., et al. (2021), “*Mobile robots for intelligent inspection of electrical equipment*”. IEEE Access, 9: 12245-12257.
- [7]. Zhang, L., et al. (2019), “*IoT-enabled predictive maintenance for electrical cabinets*”. Journal of Industrial Information Integration, 15: 100-110.
- [8]. Datasheet chính thức Melexis của MLX90614.
- [9]. Wang, P. et al. (2022), “*Environment Understanding Algorithm for Substation Inspection Robot Based on Improved DeepLab V3+*”.
- [10]. ESP32 Series Datasheet (Espressif Systems).
- [11]. Egi Muhamad Rifki, Achmad Rizal, Ade Gafar Abdullah, and Asep Bayu Dani Nandiyanto, “*Optimization of Electrospinning Temperature Control System IoT-Based with DHT21*”.