

THIẾT KẾ VÀ PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG ROBOT GANTRY XYZ CHO ỨNG DỤNG MÁY BƠM KEO VÀ PHỦ LỚP BẢO VỆ PCB

DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN XYZ GANTRY ROBOT SYSTEM FOR PRECISION PCB CONFORMAL COATING APPLICATIONS

Nguyễn Đức Anh, Thái Minh Quân, Đỗ Đình Tiến,
Nguyễn Công Hồng Phong, Nguyễn Đức Nam*

Trường Kỹ thuật Phenikaa, Đại học Phenikaa

*Email: nam.nguyenduc@phenikaa-uni.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày quá trình thiết kế, mô phỏng, chế tạo và đánh giá một hệ thống máy phủ keo bảo vệ dựa trên cấu trúc robot gantry XYZ cho các ứng dụng bôi keo/phủ màng mỏng (conformal coating) trong công nghiệp. Hệ thống được xây dựng trên cơ sở mô hình lý thuyết động học robot, mô phỏng bằng công cụ MATLAB Simscape, thiết kế cơ khí chính xác sử dụng cơ cấu truyền động vít me bi tiêu chuẩn kết hợp với động cơ servo để đảm bảo độ ổn định cao trong quá trình vận hành. Bộ điều khiển PLC Mitsubishi Q-series cùng module điều khiển vị trí trong công nghiệp được triển khai để thực hiện điều khiển chuyển động đa trục thông qua phương pháp phát xung và nội suy quỹ đạo. Mô hình được kiểm chứng thông qua cả mô phỏng và thực nghiệm, trong đó các chỉ tiêu đánh giá bao gồm độ lặp lại vị trí, sai số góc giữa các trục và sai số bám quỹ đạo. Kết quả đo kiểm cho thấy hệ thống đạt độ lặp lại dưới $10\text{ }\mu\text{m}$, sai số góc X-Y nhỏ ($\approx 0.049^\circ$) và sai số bám quỹ đạo nằm trong giới hạn cho phép của các ứng dụng công nghiệp cần độ chính xác cao. Kết quả nghiên cứu khẳng định tính khả thi của giải pháp trong việc nâng cao độ chính xác, hiệu suất sản xuất, tích hợp hệ thống, đồng thời tạo nền tảng cho các nghiên cứu phát triển tiếp theo về điều khiển thông minh và tối ưu hóa hệ thống có kiến trúc tương tự.

Từ khóa: Robot; Gantry; Robot bơm keo; Robot công nghiệp; Matlab simscape.

ABSTRACT

This study presents the design, simulation, fabrication, and evaluation of a protective coating system based on an XYZ gantry robot architecture for industrial adhesive dispensing and thin-film conformal coating applications. The system is developed on the basis of robot kinematic modeling and is simulated using the MATLAB Simscape environment. A precision mechanical structure is designed employing standard ball screw transmission mechanisms combined with servo motors to ensure high stability during operation. A Mitsubishi Q-series PLC, together with industrial motion control modules, is implemented to perform multi-axis motion control using pulse output and trajectory interpolation methods. The system is validated through both simulation and experimental studies, where key performance metrics include positional repeatability, angular error between axes, and trajectory tracking error. Experimental results indicate that the system achieves a repeatability

of approximately 10 μm , a small X–Y angular error ($\approx 0.049^\circ$), and trajectory tracking errors within acceptable limits for high-precision industrial applications. The findings confirm the feasibility of the proposed solution in enhancing accuracy, production efficiency, and system integration, while also providing a foundation for future research on intelligent control and optimization of similar robotic architectures.

Keywords: Robotics; Gantry robot; Industrial robot; MATLAB simscape.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong các dây chuyền sản xuất công nghiệp hiện đại, đặc biệt trong lĩnh vực điện tử, các vật liệu keo phủ mạch (conformal coating) như silicone, epoxy và polyurethane được sử dụng rộng rãi nhằm bảo vệ linh kiện khỏi độ ẩm, bụi bẩn và tác động môi trường. Tuy nhiên, các loại keo này thường chứa các hợp chất hóa học có khả năng gây kích ứng da, ảnh hưởng đến hệ hô hấp và tiềm ẩn nguy cơ độc hại khi con người tiếp xúc trực tiếp trong quá trình thao tác. Bên cạnh đó, phương pháp bôi keo thủ công hoặc bán tự động không chỉ tiềm ẩn rủi ro về an toàn lao động mà còn có năng suất thấp, khó đảm bảo độ đồng đều và độ chính xác khi phủ keo theo các biên dạng phức tạp.

Trong thực tế, các hệ thống bơm keo công nghiệp hiện nay còn bị giới hạn bởi kích thước vùng làm việc (khổ bơm), gây khó khăn khi xử lý các sản phẩm có kích thước lớn mà vẫn duy trì độ chính xác. Đồng thời, quy trình điều khiển của nhiều thiết bị trên thị trường chủ yếu dựa trên phương pháp “dạy – nhớ” (teaching), thiếu tính linh hoạt và khó tối ưu hóa khi thay đổi sản phẩm hoặc biên dạng bơm keo. Điều này dẫn đến nhu cầu cấp thiết trong việc xây dựng một hệ thống có khả năng mô hình hóa vật lý kết hợp với mô phỏng số, cho phép đồng bộ dữ liệu giữa thiết kế và vận hành, thử nghiệm các phương án bơm keo trước khi triển khai thực tế, từ đó giảm chi phí và thời gian phát triển hệ thống.

Do đó, việc nghiên cứu và phát triển một hệ thống robot gantry phục vụ bôi keo với khả năng điều khiển vị trí chính xác, kích thước vùng làm việc lớn để đáp ứng nhu cầu về các thiết bị chuyên dụng, điều khiển linh hoạt và tích hợp mô phỏng – thực nghiệm là cần thiết nhằm nâng cao hiệu quả sản xuất và khả năng ứng dụng trong công nghiệp.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

Các nhà nghiên cứu tại Việt Nam thường tập trung vào giải pháp robot để ứng dụng trong một lĩnh vực hoặc giải quyết bài toán kỹ thuật. Trần Thanh Tùng và cộng sự [1] công bố công trình nghiên cứu về giải pháp Robot dạng gantry với mục tiêu: (i) Thiết kế và phân tích robot gantry cho các ứng dụng gắp và đặt (pick and place): Nghiên cứu trình bày việc thiết kế, phát triển và xác nhận hiệu suất của một robot gantry XYZ trọng lượng nhẹ, (ii) Tối ưu hóa hệ thống: Nhóm tác giả tập trung vào việc tối ưu hóa cấp hệ thống cho các nhiệm vụ công nghiệp đòi hỏi lực thấp nhưng có độ lặp lại cao, với chiến lược thiết kế tiết kiệm chi phí, và (iii) Mục đích triển khai: Hệ thống này được thiết kế để có thể triển khai nhanh chóng trong các kịch bản giáo dục, nghiên cứu và tự động hóa tại các doanh nghiệp vừa và nhỏ (SME), giúp lấp đầy khoảng cách giữa các nguyên mẫu chi phí thấp và các giải pháp thương mại đắt tiền (Hình 1.a). Tác giả Nguyễn Anh Tuấn, Phạm Hồng Phúc [2] công bố kết quả nghiên cứu về điều khiển phản hồi vị trí kích hoạt tịnh tiến cho cơ cấu chấp hành tịnh tiến (Linear actuator).

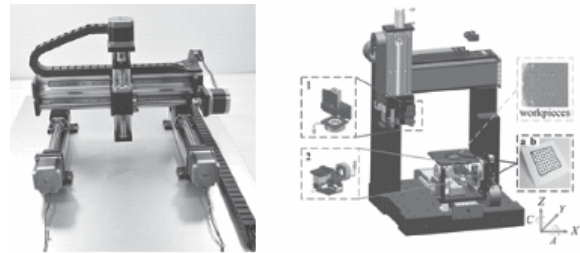
Nhóm tác giả sử dụng kết hợp hiệu ứng tĩnh điện và áp điện (PZT) để tạo chuyển động vi bước (nm), hành trình lớn và lực đẩy đủ để điều khiển vị trí tuyến tính. Việc ứng dụng nguyên lý điều khiển, truyền thông còn được ứng dụng trong nghiên cứu khoa học ở lĩnh vực sinh học, vật liệu. Tác giả Nguyen và cộng sự [3] phát triển hệ thống bơm vi lượng chất lỏng với độ chính xác 10 nl và độ chính xác bơm là 0.3%.

Lĩnh vực Robot trên thế giới đang phát triển nhanh chóng với nhiều ứng dụng. Trong công nghiệp điện tử, nhu cầu về ứng dụng tự động hóa đang thu hút được sự quan tâm trong các doanh nghiệp vừa và nhỏ (SME) thông qua giải pháp về điều khiển và thị giác máy tính [4-6]. T. Meressi [4] xây dựng mô hình điều khiển cho robot gantry 3DOF áp dụng kỹ thuật điều khiển trượt (Sliding Mode). Ứng dụng của robot gantry còn được nâng cấp trong lĩnh vực y sinh, hóa học và vật liệu để cung cấp giải pháp bơm chất lỏng siêu chính xác [5, 6] (hình 1.b).

Mặc dù các nghiên cứu trong và ngoài nước đã đạt được nhiều kết quả trong thiết kế robot gantry và hệ thống điều khiển chính xác, vẫn tồn tại một số hạn chế đáng chú ý. Trước hết, các nghiên cứu tại Việt Nam chủ yếu tập trung vào thiết kế và triển khai các hệ thống robot phục vụ các bài toán cụ thể, nhưng còn thiếu sự tích hợp đồng bộ giữa mô hình hóa, mô phỏng và thực nghiệm trên cùng một nền tảng. Trong khi đó, các nghiên cứu quốc tế đã phát triển các phương pháp điều khiển và hiệu chuẩn nâng cao, tuy nhiên, phần lớn tập trung vào các hệ thống có chi phí cao hoặc yêu cầu hạ tầng phức tạp, gây khó khăn cho việc triển khai trong các môi trường sản xuất vừa và nhỏ.

Do đó, vẫn còn thiếu các nghiên cứu phát triển một hệ thống robot gantry bơm keo có chi phí hợp lý, khả năng mở rộng không gian làm việc, tích hợp mô hình hóa – mô phỏng – thực nghiệm và cho phép đánh giá hiệu năng

một cách toàn diện. Đây chính là khoảng trống mà nghiên cứu này hướng tới giải quyết.



Hình 1. (a) Mô hình robot gantry được phát triển [1], (b) Mô hình máy bơm vi lượng 5 trục [5]

3. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHẠM VI NGHIÊN CỨU

Đối tượng nghiên cứu là hệ thống robot gantry XYZ phục vụ cho bài toán bơm chất lỏng tự động theo biên dạng trong công nghiệp, đặc biệt là bôi lớp phủ mạch (conformal coating) để bảo vệ linh kiện và mạch điện. Cụ thể, nghiên cứu tập trung vào cấu trúc cơ khí của hệ thống robot, bao gồm các trục chuyển động tuyến tính sử dụng cơ cấu truyền động vít me bi kết hợp với động cơ servo nhằm đảm bảo độ chính xác và độ cứng vững. Bên cạnh đó, đối tượng nghiên cứu còn bao gồm mô hình động học của hệ robot Descartes, phương pháp điều khiển chuyển động đa trục sử dụng PLC công nghiệp và module điều khiển vị trí, cũng như quá trình nội suy quỹ đạo để thực hiện các đường quỹ đạo phức tạp. Thông qua đó, nghiên cứu hướng đến việc xây dựng một mô hình tích hợp giữa thiết kế cơ khí, điều khiển và mô phỏng nhằm phục vụ đánh giá và tối ưu hóa hiệu năng của hệ thống tự động. Các phương pháp đo thực nghiệm được tiến hành nhằm đánh giá độ lặp lại, sai số bám quỹ đạo và độ ổn định của hệ thống. Nghiên cứu chưa xem xét các thuật toán điều khiển nâng cao, tối ưu quỹ đạo, cũng như chưa tích hợp các công nghệ như thị giác máy và trí tuệ nhân tạo.

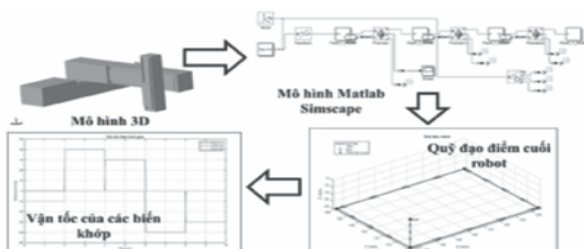
Mục tiêu của nghiên cứu là thiết kế, chế tạo và xây dựng hệ thống robot gantry XYZ

phục vụ bài toán điều khiển đầu phun/bơm tự động theo quỹ đạo 2D, đảm bảo độ chính xác và độ ổn định trong vận hành. Nghiên cứu hướng tới việc xây dựng mô hình động học và mô phỏng trên nền tảng MATLAB/Simscape, đồng thời phát triển hệ điều khiển sử dụng PLC để thực hiện điều khiển chuyển động đa trục và nội suy quỹ đạo. Bên cạnh đó, đề tài tập trung đánh giá hiệu năng hệ thống thông qua các bài đo cơ khí chính xác, nhằm làm cơ sở cho các ứng dụng trong công nghiệp và phát triển các hệ thống có cấu trúc tương tự trong thực tế.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Mô hình hóa

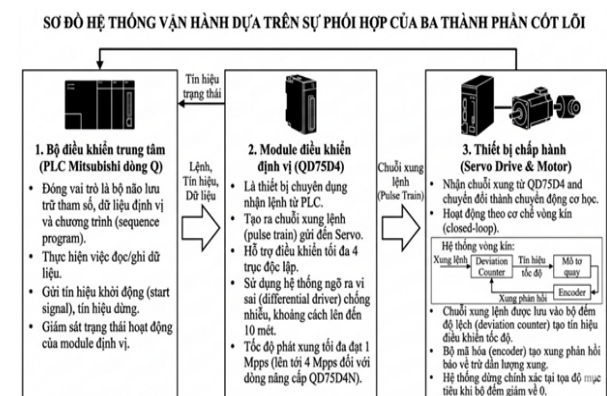
Các sản phẩm/giải pháp tương tự trên thị trường hiện nay thường dựa trên cấu trúc các trục tuyến tính – hay còn gọi là robot gantry. Robot dạng gantry có mô hình động học tương đối đơn giản do cấu trúc chỉ bao gồm các chuyển động tịnh tiến và không chứa các khớp quay. Trong nghiên cứu này, phương pháp Denavit–Hartenberg (D–H) được áp dụng để xây dựng và phân tích mô hình động học thuận và động học ngược của hệ thống. Dựa trên các tham số thu được, mô hình 3D của robot được xây dựng và tích hợp vào môi trường MATLAB Simscape nhằm phục vụ mô phỏng chuyển động. Một quỹ đạo điển hình được thiết lập để đánh giá hệ thống là chuyển động của điểm cuối theo biên dạng hình chữ nhật, như thể hiện trong Hình 2.



Hình 2. (a) Mô hình robot theo quy tắc D-H, (b) Mô hình bài toán động lực học

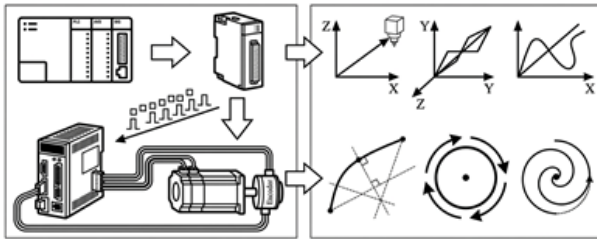
4.2. Mô hình điều khiển

Hệ thống điều khiển được thiết lập dựa trên sự phối hợp của ba thành phần cốt lõi: (1) Bộ điều khiển trung tâm - PLC Mitsubishi Q-series, (2) Module điều khiển vị trí (QD75D4), và (3) Cơ cấu chấp hành. Mỗi quan hệ giữa các thành phần được mô tả tại hình 3. Trong đó, module điều khiển vị trí QD75D4 cho phép triển khai điều khiển vị trí/tốc độ/vận tốc thông qua cấu hình chuẩn phát xung. Để đáp ứng yêu cầu di chuyển theo các quỹ đạo hình học phức tạp trong không gian, hệ thống sử dụng chức năng điều khiển nội suy. Chức năng này cho phép module QD75D4 xuất xung đồng bộ ra nhiều trục cùng lúc. Cơ chế hoạt động dựa trên việc phân định một “trục tham chiếu” (reference axis) và các “trục nội suy” (interpolation axis) chạy bám theo. Tốc độ vận hành có thể được chỉ định theo tốc độ tổng hợp vector (composite speed) của toàn quỹ đạo hoặc áp đặt theo tốc độ của trục tham chiếu.



Hình 3. Nguyên lý hoạt động của hệ thống điều khiển

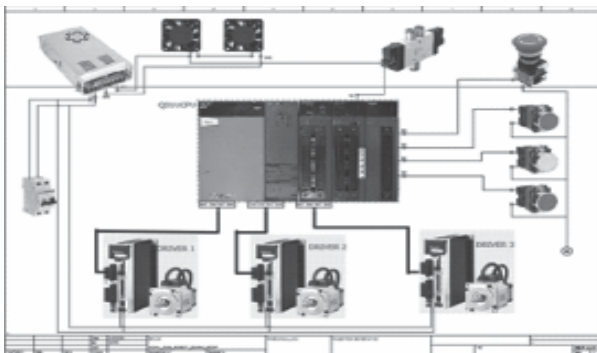
Hệ thống được lập trình để điều khiển nội suy theo các quỹ đạo chính như: (1) nội suy đường thẳng (Linear Interpolation Control); 4 trục cùng lúc; (2) nội suy hình tròn/cung tròn (Circular Interpolation Control); phối hợp 2 trục để vẽ biên dạng 2D hình tròn/cung tròn (Hình 3).



Hình 4. Quy trình điều khiển nội suy theo quỹ đạo 2D

4.3. Hệ thống điều khiển

Hệ thống tủ điện được thiết kế và lắp đặt hoàn chỉnh, đáp ứng yêu cầu vận hành thực tế (Hình 5) và tuân thủ các tiêu chuẩn công nghiệp như IEC 60204-1, IEC 61439 và ISO 12100. Dây dẫn được bố trí theo quy ước màu, thiết bị được đánh số rõ ràng theo sơ đồ đấu nối. Tủ điện được tích hợp các giải pháp bảo vệ và phân vùng chức năng hợp lý, đảm bảo an toàn, độ tin cậy và thuận tiện trong vận hành. PLC Mitsubishi Q-Series đóng vai trò điều khiển trung tâm của hệ thống.



Hình 5. Sơ đồ hệ thống điện

4.4. Chế tạo và đánh giá sai lệch điều khiển và mô hình mô phỏng

Kết cấu cơ khí của robot được chế tạo bằng phương pháp gia công CNC với vật liệu nhôm A6061 nhằm đảm bảo độ cứng vững và độ chính xác gia công. Sản phẩm sau khi hoàn thiện và lắp ráp được mô tả tại Hình 6. Hệ thống

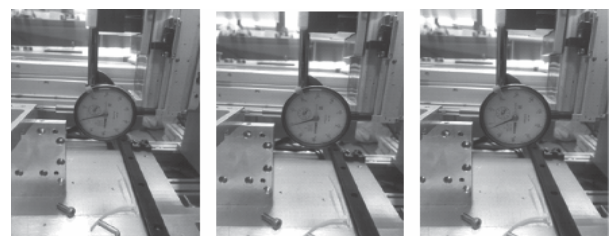
được tiến hành thử nghiệm điều khiển thực tế, bám theo các quỹ đạo của mạch PCB thử nghiệm. Kết quả cho thấy quỹ đạo chuyển động và hành vi của hệ thống trong thực nghiệm có sự phù hợp cao với mô hình mô phỏng, chứng minh tính đúng đắn của phương pháp mô hình hóa và thiết kế. Sai số định vị của robot được xác định trong khoảng ± 0.5 mm trong mặt phẳng, cho thấy hệ thống đạt được độ chính xác cao và đáp ứng tốt yêu cầu của các bài toán chuyển động theo quỹ đạo phẳng. Video demo kết quả có thể xem tại [7].



Hình 6. Mô hình chế tạo và thử nghiệm điều khiển vị trí thực hiện yêu cầu điều khiển nội suy mặt phẳng

4.5. Chế tạo và đánh giá sai lệch

Độ chính xác điều khiển của robot được đánh giá thông qua phương pháp thực nghiệm. Một đồng hồ so Mitutoyo với độ phân giải 10 μ m được sử dụng để đo sai lệch phép đo điều khiển. Robot được lập trình thực hiện lặp lại 10 lần cùng một quỹ đạo nhằm đánh giá độ lặp lại của hệ thống. Sai lệch vị trí trong mỗi lần thực hiện được ghi nhận và phân tích để xác định mức độ chính xác (Hình 7).



Hình 7. Hình ảnh mô tả quy trình đo tại 3 điểm xác định sai lệch vị trí vuông góc

Một khối căn chuẩn được gia công chính xác bằng phương pháp CNC với kích thước 200×200 được sử dụng để đo độ lệch cực đại $\Delta Y_{\max, x}$. Thực hiện quy trình rà và lấy vị trí tại 10 điểm dọc theo cạnh X của khối căn tham chiếu, hệ thống được vận hành chạy dọc

theo trục Y để ghi nhận sai lệch góc giữa hai trục tọa độ. Kết quả đo lường này phản ánh độ chính xác của quá trình lắp ráp khung cơ khí. Góc lệch được tính từ tỷ lệ $\Delta Y/L$. Độ lệch cực đại $\Delta Y_{\max, x}$ đo được 170 μm và góc lệch vuông góc đạt 0.049° (Bảng 1).

Bảng 1. Giá trị đo sai số vị trí

STT	Quãng đường dọc trục Y (mm)	Sai lệch vị trí dọc trục Y ($\Delta Y - \text{mm}$)	Tỷ lệ $\Delta Y/Y$	Góc lệch vuông góc (độ)
1	20	0.01	0.0005	0.029
2	40	0.03	0.00075	0.043
3	60	0.05	0.00083	0.048
4	80	0.06	0.00075	0.043
5	100	0.08	0.0008	0.046
6	120	0.1	0.00083	0.048
7	140	0.12	0.00086	0.049
8	160	0.13	0.00081	0.047
9	180	0.15	0.00083	0.048
10	200	0.17	0.00085	0.049

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã trình bày quá trình thiết kế, mô phỏng, chế tạo và đánh giá một hệ thống robot gantry XYZ phục vụ cho ứng dụng bơm keo và phủ lớp bảo vệ mạch điện tử trong công nghiệp. Hệ thống được xây dựng dựa trên mô hình động học của robot Descartes, kết hợp với mô phỏng trong môi trường MATLAB Simscape nhằm kiểm chứng hành vi chuyển động trước khi triển khai thực tế. Cấu trúc cơ khí sử dụng cơ cấu truyền động vít me bi kết hợp với động cơ servo đã đảm bảo độ cứng vững và độ ổn định trong quá trình vận hành, trong khi hệ điều khiển PLC Mitsubishi Q-series cho phép thực hiện điều khiển chuyển động đa trục với khả năng nội suy quỹ đạo

chính xác. Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống đạt được độ lặp lại vị trí khoảng 10 μm , sai số góc giữa các trục nhỏ ($\approx 0.049^\circ$) và sai số bám quỹ đạo nằm trong giới hạn cho phép đối với các ứng dụng công nghiệp yêu cầu độ chính xác cao. Sự tương đồng giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm khẳng định tính đúng đắn của mô hình và phương pháp thiết kế. Tuy nhiên, nghiên cứu hiện tại chưa xem xét các yếu tố như sai số động lực học, tối ưu hóa quỹ đạo và các thuật toán điều khiển nâng cao. Trong các nghiên cứu tiếp theo, nhóm tác giả định hướng phát triển các phương pháp điều khiển thông minh, tích hợp thị giác máy và trí tuệ nhân tạo nhằm nâng cao hơn nữa độ chính xác, khả năng thích ứng và hiệu quả vận hành của hệ thống trong các môi trường sản xuất thực tế. ❖

Ngày nhận bài: 08/4/2026

Ngày phản biện: 23/4/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Tran Thanh Tung, Nguyen Thi Anh, Nguyen Xuan Quynh, Tran Vu Minh, “*Design and analysis of a gantry robot for pick and place applications*”. Journal of the Technical University of Gabrovo 71 (2025) 19-24.
- [2]. Nguyễn Anh Tuấn, Phạm Hồng Phúc, “*Điều khiển phản hồi vị trí kích hoạt tịnh tiến ứng dụng cho vi bơm kiểu Xi lanh*”. Tạp chí Khoa học và Công nghệ 116 (2017), 020-025.
- [3]. Nguyen Duc-Nam, Nguyen Van-Tuan, Vu Van-Son, “*Development of a network-based ultra-precision fluidic micro-pump system*”. 2023 3rd International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME).
- [4]. Tesfay Meressi, “*Modeling and Control of a Three-Dimensional Gantry Robot*”. 37th IEEE Conference on Decision and Control, 1988.
- [5]. Ruizhou Wang et al, “*Design and Vision-based Calibration of a Five-axis Precision Dispensing Machine*”. Micromachines, 2026, 17, 53.
- [6]. Xianxing Tang, Haibo Zhou, Lei Kuang, “*Geometric error self-calibration method of five-axis dispensing machine based on the product of exponential formula*”. Measurement, 231 (2024) 114561.
- [7]. Video kết quả thực nghiệm: <https://www.youtube.com/shorts/sfkEdydZwrE>