

THIẾT KẾ ROBOT BỐC XẾP KHO ĐẶC CHỦNG DÙNG TAY GIÃN DÀI VÀ BĂNG TẢI MÔ-ĐUN

DESIGN OF A PICK-AND-PLACE ROBOT FOR SPECIALIZED WAREHOUSES
USING TELESCOPIC ARM AND MODULAR CONVEYOR

Phan Hoàng Long^{1,2,3}, Nguyễn Huy Hùng⁴, Dương Văn Tú^{1,2,3}, Nguyễn Tấn Tiến^{1,2,3}

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

²DCSELab, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

³Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

⁴Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Sài Gòn

Email: nttien@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày quá trình thiết kế robot bốc xếp cho nhà kho đặc chủng, nơi có yêu cầu cao về an toàn và tính cơ động. Hệ thống bao gồm cánh tay giãn dài dạng ống lồng và băng tải mô-đun liên động, cho phép triển khai linh hoạt trong không gian chật hẹp của kho. Quá trình thiết kế được thực hiện dựa trên yêu cầu thực tế về kích thước, tải trọng thùng hàng và giới hạn hoạt động. Kết cấu cánh tay được mô phỏng bằng MATLAB và SolidWorks để đánh giá độ biến dạng khi chịu tải. Kết quả cho thấy thiết kế đáp ứng tốt yêu cầu về tầm với, độ cứng và trọng lượng tổng thể. Băng tải mô-đun sử dụng con lăn tích hợp động cơ, được thiết kế theo nguyên lý đồng tốc cơ khí, cho phép tháo lắp và vận chuyển dễ dàng giữa các kho.

Từ khóa: Robot bốc xếp; Nhà kho đặc chủng; Cánh tay giãn dài; Băng tải mô-đun.

ABSTRACT

This paper presents the design of a pick-and-place robot for specialized warehouses where safety and mobility are critical. The system features a telescopic arm and modular conveyor units, enabling flexible deployment in constrained environments. The design process is based on practical requirements for crate dimensions, payload, and operational range. The telescopic arm is simulated using MATLAB and SolidWorks to evaluate deflection under load. Results show that the design meets the requirements for reach, stiffness, and overall weight. The modular conveyor uses motorized rollers and a mechanical synchronization mechanism, allowing easy disassembly and transport between warehouses.

Keywords: Pick-and-place robot; Specialized warehouse; Telescopic arm; Modular conveyor.

1. TỔNG QUAN

Trong các nhà kho đặc chủng như kho quân khí, hóa chất nguy hiểm hoặc vật tư dễ cháy nổ, yêu cầu về an toàn, độ chính xác và khả năng cơ động trong quá trình xếp dỡ luôn ở mức rất cao. Việc thao tác thủ công với các thùng hàng nặng, trong không gian chật hẹp và không có kệ giá tiêu chuẩn, tiềm ẩn rủi ro lớn cho người vận hành. Ngoài ra, nhiều kho có bố trí cố định, ít lối ra vào, khiến việc triển khai thiết bị tự động gặp nhiều trở ngại.

Trong bối cảnh đó, giải pháp robot bốc xếp bán tự động đang được quan tâm nghiên cứu như một hướng tiếp cận linh hoạt và an toàn hơn. Một số nghiên cứu gần đây đã đề xuất cấu trúc robot dạng khung gantry hoặc tay giăng dài cho môi trường kho hẹp [3], [4], [5]. Tuy nhiên, phần lớn các công trình này tập trung vào mô phỏng cơ học hoặc ứng dụng dân dụng, trong khi các yêu cầu đặc thù của kho đặc chủng – như khả năng tháo lắp nhanh, môi trường hạn chế tia lửa, và vận hành an toàn – vẫn chưa được khai thác đầy đủ. Các giải pháp truyền động tuyến tính kiểu ống lồng (telescopic) hoặc băng tải mô-đun đồng bộ hóa bằng cơ khí cũng chưa được tích hợp thành hệ thống hoàn chỉnh.

Bài báo này đề xuất một giải pháp tích hợp gồm robot bốc xếp sử dụng cánh tay giăng dài tuyến tính kiểu ống lồng và băng tải mô-đun cơ khí, hướng đến khả năng triển khai nhanh, vận chuyển linh hoạt và phù hợp với điều kiện đặc thù của kho đặc chủng. Quá trình thiết kế tập trung vào hai bài toán kỹ thuật chính:

- (1) Thiết kế băng tải mô-đun sử dụng con lăn tích hợp động cơ và cơ cấu đồng tốc cưỡng bức;
- (2) Thiết kế cánh tay robot có thể giăng dài, thu gọn, đáp ứng yêu cầu về tầm với, độ cứng và khả năng chịu tải.

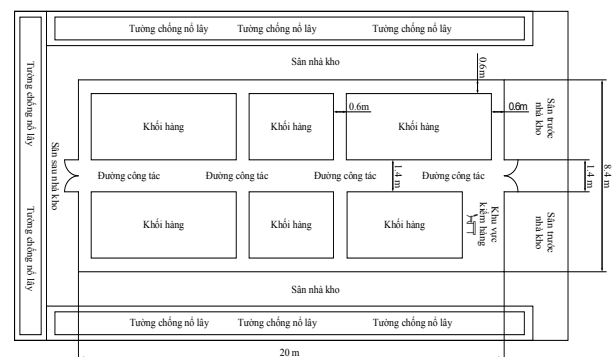
2. CẤU HÌNH HỆ THỐNG VÀ YÊU CẦU THIẾT KẾ

2.1. Cấu hình hệ thống

Hệ thống robot bốc xếp được thiết kế gồm ba cụm chức năng chính (Hình 1):

- (1) Cụm robot bốc xếp: Di chuyển dọc theo trục kho, thực hiện thao tác nâng – giăng – gấp nhằm lấy hoặc đặt thùng hàng lên khối xếp.
- (2) Băng tải mô-đun: Vận chuyển thùng hàng giữa cửa kho và vị trí bốc xếp; cấu trúc dạng lắp ghép để triển khai nhanh và cơ động.
- (3) Bộ điều khiển trung tâm: Điều phối hoạt động, đồng bộ hóa các cụm chức năng, và cho phép thao tác bán tự động.

Cấu trúc nhà kho đặc chủng được khảo sát có chiều dài ~20 m, chiều rộng ~6 m, chiều cao trần dưới 3 m và chỉ có 2 cửa ra vào đối diện nhau. Hàng hóa là các thùng gỗ kín, kích thước từ $0,4 \times 0,3 \times 0,3\text{m}$ đến $0,6 \times 0,5 \times 0,5\text{m}$, khối lượng tối đa 45 kg, được xếp trực tiếp theo khối, không có kệ.



Hình 1. Cấu trúc tổng thể hệ thống robot bốc xếp kho đặc chủng

2.2. Yêu cầu thiết kế

Dựa trên khảo sát và đặc thù vận hành thực tế, hệ thống cần thỏa mãn các yêu cầu sau: 

- Tầm với: Cánh tay robot phải đạt tầm vươn tối thiểu 2,2m tính từ trục giữa, để với tới các hàng ngoài cùng của khối xếp.

- Khả năng thu gọn: Chiều dài thu gọn của cánh tay không vượt quá 0,8m để đảm bảo gọn nhẹ và cơ động.

- Tải trọng nâng: Tối thiểu 45kg cho mỗi thao tác gấp hoặc đặt thùng.

- Băng tải: Có thể tháo lắp từng mô-đun, chiều dài mỗi mô-đun khoảng 1,5m; khi ghép nối đảm bảo chiều dài tổng thể ≥ 18 m.

- Cơ động và tháo lắp nhanh: Toàn hệ thống có thể lắp đặt trong vòng <30 phút bởi 2 người vận hành.

- An toàn: Thiết kế phù hợp môi trường phòng nổ (nhiệt độ <50°C, không phát sinh tia lửa, kết cấu kín).

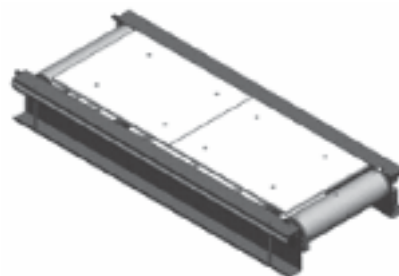
3. THIẾT KẾ BĂNG TẢI MÔ-ĐUN

3.1. Cấu trúc và nguyên lý hoạt động

Băng tải được chia thành các mô-đun độc lập, mỗi mô-đun có chiều dài khoảng 1,5m, cho phép tháo lắp nhanh và vận chuyển dễ dàng giữa các kho. Khi ghép nối liên tiếp, hệ thống có thể đạt chiều dài tổng thể lên đến $18 \div 20$ m để phục vụ toàn bộ chiều sâu kho.



a. Khi hoạt động



b. Khi gấp gọn

Hình 2. Cấu trúc mô-đun băng tải

Mỗi mô-đun sử dụng con lăn truyền động tích hợp động cơ điện (drum motor) đặt bên trong trục, giúp giảm không gian lắp đặt, tăng độ bền và hạn chế hư hỏng do bụi hoặc độ ẩm. Một mô-đun tiêu chuẩn bao gồm:

- Hai trục tang trống (con lăn truyền động);
- Khung nhôm chữ C gia công mỏng nhẹ;
- Tấm đỡ nhựa kỹ thuật ma sát thấp (vật liệu Igus);
- Cặp bánh răng đồng tốc gắn hai đầu mô-đun để cường bức đồng tốc khi ghép nối.

3.2. Tính toán thiết kế cơ bản

Các thông số thiết kế được xác định như sau:

- Khối lượng thùng lớn nhất: 45kg;
- Tốc độ băng tải yêu cầu: 12m/phút;
- Chiều rộng băng tải hữu dụng: 0,6m;
- Thời gian làm việc liên tục: 30phút/chu kỳ.

Từ đó, vận tốc quay của tang trống được tính theo công thức:

$$v = \pi n D \rightarrow n = \frac{v}{\pi D}$$

Chọn đường kính tang trống $D = 60$ mm,

ta được: $n \sim 64$ vòng/phút.

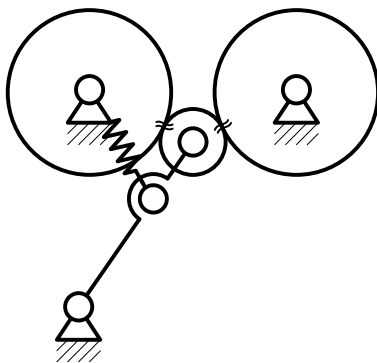
Công suất cần thiết cho một mô-đun được xác định dựa trên lực kéo và hiệu suất:

$$P = \frac{Fv}{\eta}$$

Với: μ – Hệ số ma sát, $\mu \approx 0$; F – Lực kéo, $F \approx 130\text{N}$; η – Hiệu suất hệ thống, $\eta \approx 0,8$, ta tính được $P \approx 10\text{W}$. Chọn động cơ BLDC công suất 25W là phù hợp, có dự phòng an toàn cao.

3.3. Cơ cấu đồng tốc giữa các mô-đun

Các mô-đun được thiết kế liên kết qua cặp bánh răng đồng tốc ba bánh (Hình 3), giúp cường bức đồng bộ tốc độ quay giữa các mô-đun mà không cần điều khiển điện tử phức tạp. Khi không sử dụng, cặp bánh răng này có thể gập xuống để gọn gàng.



Hình 3. Cơ cấu truyền đồng tốc ba bánh răng giữa hai mô-đun

3.4. Mô phỏng và kiểm chứng kết cấu

Mô hình mô-đun được dựng trong SolidWorks và kiểm tra biến dạng khi tải trọng 60kg (gồm thùng hàng và hệ số an toàn 1, 3).



Hình 4. Kết quả mô phỏng biến dạng khung mô-đun khi chịu tải

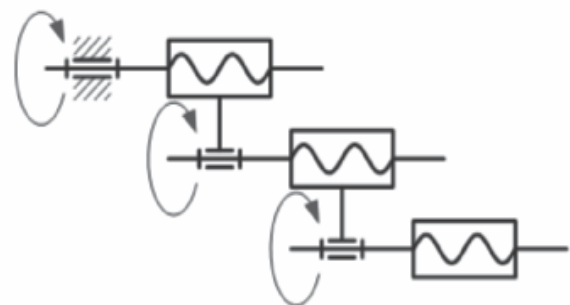
Kết quả mô phỏng cho thấy:

- Ứng suất tập trung chủ yếu tại chân đỡ và khớp nối giữa trục – khung;
- Độ võng nhỏ hơn 2mm, trong giới hạn cho phép;
- Khả năng tháo lắp và gập gọn dễ dàng nhờ thiết kế chân gập.

4. THIẾT KẾ CÁNH TAY GIÃN DÀI

4.1. Yêu cầu và nguyên lý hoạt động

Cánh tay giãn dài là thành phần then chốt trong hệ thống robot, đảm nhiệm việc mở rộng tầm với từ vị trí thân chính ra các khối hàng sâu bên trong kho. Theo yêu cầu thiết kế, cánh tay cần đạt tầm vươn tối thiểu 2,2m và có khả năng thu gọn còn 0,8m, đồng thời mang tải trọng thùng hàng lên đến 45kg.



Hình 5. Nguyên lý hoạt động của cánh tay giãn dài dạng ống lồng

Cấu trúc được chọn là ống lồng dạng tuyến tính (telescopic linear actuator), sử dụng truyền động bằng trục vít me và chuyển động tuyến tính thông qua hệ thanh trượt - con trượt có ma sát thấp. Hệ thống không yêu cầu đồng thời mở rộng toàn bộ các tầng, cho phép điều khiển chính xác vị trí đầu công tác mà không làm tăng khối lượng và độ phức tạp cơ khí.

4.2. Cấu trúc và vật liệu

Cánh tay gồm 5 khung hộp kim loại lồng vào nhau, với tiết diện hình vuông rỗng (kích thước cạnh giảm dần), làm bằng nhôm 6061-T6 để đảm bảo độ bền và khối lượng nhẹ. Kết cấu điển hình:

- Khung ngoài cùng (khung gốc) được gắn cố định vào cụm nâng hạ;
- Mỗi khung bên trong được dẫn động bằng vít me bi riêng, gắn trên con trượt tuyến tính;
- Ray trượt làm bằng thép tôi, gắn dọc theo trục các khung;
- Giới hạn chuyển động được kiểm soát bằng cảm biến hành trình.

Chiều dài phủ lấp giữa các khung được thiết kế tối ưu để đảm bảo độ cứng và giảm biến dạng khi chịu lực ngoài.

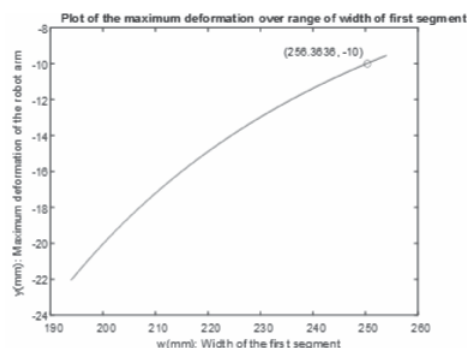
4.3. Phân tích độ cứng và mô phỏng biến dạng

Để đảm bảo độ cứng của cánh tay khi tải trọng tối đa, mô hình tính toán được thiết lập giả định cánh tay là một dầm công xôn nhiều đoạn có tiết diện thay đổi. Phương trình biến dạng được thiết lập theo tích phân mô-men uốn:

$$\delta_{max} = \sum_{i=1}^3 \frac{FL_i^3}{3EI_i}$$

Với: F – Tải trọng ($45\text{kg} \times 9.81\text{m/s}^2$); E – Mô đun đàn hồi của nhôm; I_i – Mô-men quán tính tiết diện khung thứ i ; L_i – Chiều dài đoạn khung thứ i .

Mô phỏng được thực hiện trên MATLAB để xác định mối quan hệ giữa độ cứng và kích thước khung. Sau đó, mô hình được kiểm chứng bằng SolidWorks Simulation để đánh giá ứng suất và độ võng dưới tải trọng.



a. Độ biến dạng với giá trị $a = 200 \div 260\text{mm}$



b. Độ biến dạng với giá trị $a = 260\text{mm}$



c. Độ biến dạng với giá trị $a = 265\text{mm}$



d. Độ biến dạng với giá trị $a = 270\text{mm}$

Hình 6. Kết quả mô phỏng biến dạng cánh tay giãn dài bằng MATLAB và SolidWorks

Kết quả cho thấy độ biến dạng lớn nhất nằm trong giới hạn cho phép ($<8\text{mm}$), tập trung tại vùng đầu khung trong cùng. Các thông số thiết kế cuối cùng được chọn:

- Số tầng ống lồng: 5;
- Khung lớn nhất: $80 \times 80\text{mm}$;
- Chiều dài tổng thể mở rộng: $2,2\text{m}$;
- Độ võng cực đại khi tải: $\sim 6,7\text{mm}$;
- Tổng khối lượng cánh tay: $\sim 11,5\text{kg}$.

5. ĐÁNH GIÁ VÀ KẾT LUẬN

5.1. Đánh giá hiệu quả thiết kế

Thông qua quá trình thiết kế và mô phỏng, hệ thống robot bốc xếp kho đặc chủng đã đáp ứng được các tiêu chí kỹ thuật chính sau:

- Khả năng triển khai linh hoạt: Hệ thống có thể tháo lắp nhanh, di chuyển giữa các nhà kho mà không cần phương tiện chuyên dụng.

- Độ tin cậy và an toàn: Băng tải và cánh tay robot đều được thiết kế có dự phòng tải trọng với hệ số an toàn $\geq 1,3$; kết cấu kín, phù hợp với môi trường có nguy cơ cháy nổ.

- Tính khả thi chế tạo: Cấu trúc sử dụng vật liệu phổ biến như nhôm định hình, thép hợp kim và các mô-đun điện cơ sẵn có, phù hợp sản xuất trong nước.

- Hiệu suất thao tác: Mô phỏng cho thấy robot có thể tiếp cận toàn bộ khối hàng với độ biến dạng thấp, hệ thống băng tải đảm bảo dòng chảy vật liệu liên tục và đồng bộ.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật chính của hệ thống

Thông số	Giá trị
Tầm với tối đa của cánh tay, m	2,2
Chiều dài thu gọn, m	0,8
Khối lượng nâng tối đa, kg	45
Độ võng cực đại khi tải, mm	$\approx 6,7$
Thời gian lắp 1 mô-đun băng tải, phút	< 5
Tổng chiều dài hệ băng tải, m	$18 \div 20$
Số người lắp đặt/vận hành, người	2

5.2. Kết luận

Bài báo đã trình bày một hướng tiếp cận thực tiễn trong việc thiết kế hệ thống robot bốc xếp dành cho nhà kho đặc chủng, tập trung vào hai thành phần quan trọng là băng tải mô-đun và cánh tay giãn dài. Cấu hình hệ thống cho phép thích ứng linh hoạt với các loại nhà kho có lối ra vào hạn chế, không sử dụng kệ và yêu cầu vận hành an toàn cao.

Thông qua mô phỏng số và phân tích kết cấu, nhóm nghiên cứu đã xác minh tính khả thi và độ bền của các thành phần chính. Thiết kế có tiềm năng ứng dụng trong thực tế, đặc biệt trong lĩnh vực kho hóa chất và các hệ thống kho lưu trữ nguy hiểm.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số TX2025-20b-01. Chúng tôi xin cảm ơn Phòng Thí nghiệm trọng điểm Điều khiển số và Kỹ thuật Hệ thống, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 08/7/2025

Ngày phản biện: 23/7/2025



Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Tấn Tiến, Dương Văn Tú, Nguyễn Huy Hùng, “*Thiết kế và điều khiển con lăn điện cho băng tải*”. Tạp chí Cơ khí Việt Nam, Số 295, tr. 45-49, 2022.
- [2]. Brian Kean, Gerhard Schwarz, Peter Thurnherr, “*IEC 60079-14: Electrical installation design, selection, and erection*”. IEEE Industry Applications Magazine, vol. 21, no. 3, pp. 12-19, 2015.
- [3]. A. Alavizadeh, H. D. Taghirad, “*Design and control of a new gantry-tau parallel manipulator*”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 6, pp. 3454-3462, 2016.
- [4]. J. Angeles, “*Fundamentals of robotic mechanical systems: Theory, methods, and algorithms*”, 4th ed.. Springer, 2014.
- [5]. Vũ Đình Tiến, Nguyễn Hữu Phú, “*Tính toán biến dạng của cánh tay robot kiểu dầm công xôn bằng phương pháp phần tử hữu hạn*”. Tạp chí Khoa học & Công nghệ, Đại học Bách khoa Hà Nội, Tập 57, Số 3, tr. 77-84, 2019.
- [6]. Nguyen Van Tu, Nguyen Huy Hung, Tran Quang Vinh, “*Mechanical design and simulation of a telescopic robot arm using MATLAB/Simulink*”. Journal of Automation and Control Engineering, vol. 9, no. 2, pp. 65-71, 2021.
- [7]. N. G. Tsagarakis, D. Caldwell, “*Development and control of a ‘soft-actuated’ exoskeleton for use in physiotherapy and training*”. Autonomous Robots, vol. 15, no. 1, pp. 21-33, 2003.