

THIẾT KẾ VÀ MÔ PHỎNG ĐẦU ĐỘT LINH HOẠT GẮN ROBOT CHO GIA CÔNG CẢN Ô TÔ

DESIGN AND SIMULATION OF A ROBOT-MOUNTED FLEXIBLE PUNCHING
END-EFFECTOR FOR AUTOMOTIVE BUMPERS

Nguyễn Anh Dũng

Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội

Email: dung.nguyenanh@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu thiết kế và mô phỏng một đầu đột linh hoạt gắn robot phục vụ gia công lỗ cảm biến trên cản ô tô. Trên cơ sở phân tích yêu cầu công nghệ của cản trước và cản sau, nhóm tác giả đề xuất cấu hình đầu đột gồm cụm thay dụng cụ nhanh, khung chịu lực dạng chữ C, xi lanh tăng áp, cụm dẫn hướng và cụm chày-cối đột. Từ các thông số đầu vào của nguyên công, lực đột sơ bộ được xác định để lựa chọn cụm chấp hành phù hợp. Mô hình 3D của đầu đột được xây dựng và tích hợp với robot trong môi trường RobotStudio để mô phỏng chuỗi thao tác lấy đầu đột, di chuyển tới vị trí trung gian và thực hiện nguyên công đột. Kết quả cho thấy phương án đề xuất có tính khả thi về mặt kết cấu và tích hợp, là cơ sở cho các nghiên cứu thực nghiệm tiếp theo.

Từ khóa: Đầu đột robot; Cản ô tô; Tool changer; RobotStudio; Đột lỗ cảm biến.

ABSTRACT

This paper presents the design and simulation of a flexible robot-mounted punching end-effector for sensor-hole processing on automotive bumpers. Based on the technological requirements of front and rear bumpers, the proposed structure includes a tool changer, a C-frame, a booster cylinder, a guiding mechanism, and a punch-die assembly. The required punching force is preliminarily determined from process parameters and used for actuator selection. A 3D model of the end-effector is developed and integrated with an industrial robot in RobotStudio to simulate the sequence of tool pickup, movement to an intermediate position, and punching. The results indicate that the proposed solution is feasible in terms of both structural design and integrated operation, providing a basis for further experimental validation.

Keywords: Robot punching end-effector; Automotive bumper; Tool changer; RobotStudio; Sensor-hole punching.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong ngành công nghiệp ô tô, yêu cầu tự động hóa không chỉ giới hạn ở các công đoạn hàn, sơn và lắp ráp mà còn mở rộng sang các nguyên công phụ trợ có ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng và tính ổn định của sản phẩm [1]. Đối với căn trước và căn sau ô tô, các lỗ lắp cảm biến là những đặc trưng công nghệ đòi hỏi độ chính xác vị trí, tính lặp lại và khả năng tích hợp trong dây chuyền tự động.

Trong các cell gia công bumper hiện nay, nguyên công đột lỗ thường được bố trí cùng với các công đoạn lắp ghép hoặc hàn giá đỡ trong một hệ thống tự động sử dụng robot 6 trục, đồ gá chuyên dụng và vùng lưu trữ đầu công tác [2]. Trong cấu trúc đó, đầu đột gắn robot là một phân hệ quan trọng vì nó ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng tiếp cận vùng gia công, chất lượng lỗ đột và mức độ tương thích với bố trí tổng thể của thiết bị.

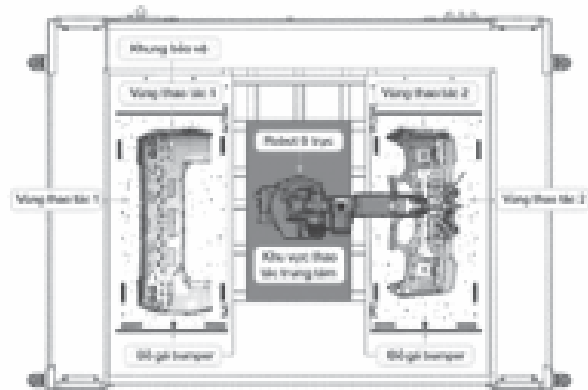
Thực tế công nghệ cho thấy các yêu cầu đột lỗ trên căn trước và căn sau không hoàn toàn giống nhau. Sự khác biệt về đường kính lỗ, độ cong bề mặt và góc tiếp cận dẫn tới việc đầu đột không thể chỉ được xem như một cơ cấu tạo lực đơn thuần, mà cần được nghiên cứu như một đầu công tác linh hoạt có khả năng thích nghi với nhiều cấu hình sản phẩm và điều kiện bố trí khác nhau [3].

Từ yêu cầu đó, bài báo tập trung nghiên cứu thiết kế và mô phỏng một đầu đột linh hoạt gắn robot, định hướng ứng dụng cho cell gia công lỗ cảm biến trên căn ô tô. Mục tiêu của nghiên cứu là phân tích các ràng buộc công nghệ của phân hệ đột trong cell bumper, đề xuất cấu hình cơ khí cho đầu đột, tính toán sơ bộ lực đột và đánh giá tính khả thi tích hợp thông qua mô hình 3D và mô phỏng robot.

2. THIẾT KẾ VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cơ sở công nghệ của cell gia công bumper

Cell gia công bumper trong nghiên cứu này được định hướng theo mô hình tích hợp robot 6 trục, hai vùng thao tác, các module đồ gá cho căn trước và căn sau, cùng khu vực thao tác trung tâm của robot. Trong cấu trúc đó, robot thực hiện vai trò mang đầu công tác tới từng vùng làm việc, trong khi các trạm hai bên đảm nhiệm chức năng gá đặt và định vị sản phẩm.



Hình 1. Sơ đồ bố trí mặt bằng của cell gia công bumper.

Sơ đồ trong Hình 1 được sử dụng để xác định các ràng buộc không gian của đầu đột robot, bao gồm vùng thao tác, khả năng tiếp cận bumper và yêu cầu tránh giao thoa với đồ gá cũng như các phần tử công nghệ lân cận.

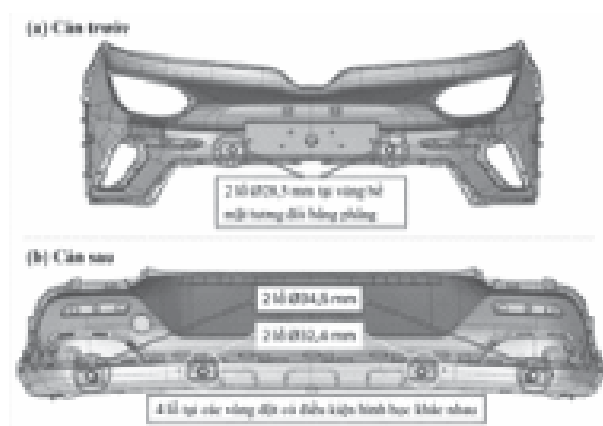
Về yêu cầu công nghệ, căn trước và căn sau có sự khác nhau về số lượng lỗ, đường kính lỗ và điều kiện hình học vùng đột. Vì vậy, đầu đột cần được xem xét theo hướng linh hoạt thay vì chỉ tối ưu cho một cấu hình sản phẩm duy nhất.



Bảng 1. So sánh yêu cầu công nghệ giữa cần trước và cần sau.

Hạng mục	Cần trước	Cần sau
Số lỗ cảm biến	2 lỗ	4 lỗ
Đường kính lỗ	Ø28,5 mm	Ø34,5 mm; Ø32,4 mm
Điều kiện vùng đột	Tương đối phẳng	Độ cong/góc tiếp cận khác nhau
Số punching unit	1	3
Yêu cầu đổi tool	Có	Có

Bảng 1 cho thấy sự khác biệt giữa cần trước và cần sau về số lượng lỗ, kích thước lỗ và điều kiện vùng đột. Đây là cơ sở để lựa chọn đầu đột theo hướng có khả năng thay đổi cụm chày-cối và thích nghi với nhiều điều kiện tiếp cận khác nhau.



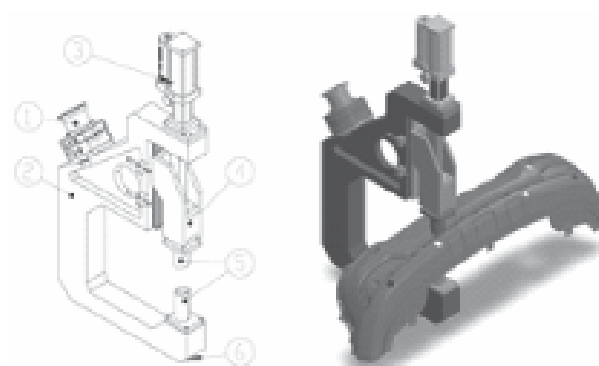
Hình 2. Yêu cầu punching của bumper: (a) cần trước; (b) cần sau.

Hình 2 cho thấy cần trước có điều kiện vùng đột thuận lợi hơn, trong khi cần sau đòi hỏi đầu đột làm việc với nhiều vị trí lỗ có kích thước khác nhau và điều kiện hình học phức tạp hơn. Đây là cơ sở quan trọng cho việc đề xuất cấu hình đầu đột linh hoạt trong nghiên cứu này.

2.2. Cấu hình đầu đột đề xuất

Trên cơ sở các yêu cầu công nghệ nêu trên, đầu đột robot được đề xuất với các cụm chính gồm: cụm thay dụng cụ nhanh, khung chịu lực dạng chữ C, xi lanh tăng áp, cụm dẫn hướng và cụm chày-cối đột. Cấu hình này được lựa chọn nhằm đồng thời đáp ứng các yêu cầu về độ cứng vững, khả năng truyền lực và tính thuận lợi khi tích hợp với robot.

Khung chịu lực dạng chữ C đóng vai trò là bộ phận mang tải chính của cơ cấu, tạo không gian công nghệ cho vùng chày - cối tiếp cận sản phẩm theo phương làm việc mong muốn. Cụm thay dụng cụ nhanh được bố trí tại đầu nối với robot nhằm tạo điều kiện thuận lợi cho việc thay đổi đầu công tác trong cell. Xi lanh tăng áp kết hợp với cụm dẫn hướng tạo ra và duy trì chuyển động đột theo phương thẳng đứng, trong khi cụm chày-cối thực hiện trực tiếp nguyên công tạo lỗ.



Hình 3. Cấu trúc và mô hình 3D của đầu đột robot đề xuất.

Hình 3(a) thể hiện rõ các bộ phận cấu thành cơ cấu đầu đột, trong khi Hình 3(b) cho thấy đầu đột trong trạng thái làm việc với bumper. Cặp hình này cho phép đánh giá đồng thời cả phương án bố trí kết cấu và khả năng tích hợp của đầu công tác với chi tiết gia công trong không gian làm việc thực tế.

Từ góc độ thiết kế, ưu điểm của cấu hình đề xuất là giữ được dạng kết cấu tương đối gọn, rõ chức năng và thuận lợi cho việc tích hợp với robot. Đồng thời, việc bố trí cụm thay dụng cụ nhanh tạo điều kiện phát triển theo hướng linh hoạt hơn khi thay đổi cấu hình đầu công tác trong các ứng dụng khác nhau.

2.3. Dữ liệu đầu vào và phương pháp tính toán

Các thông số đầu vào của nguyên công đột được xác định gồm chiều dày vật liệu, chu vi vòng cắt, áp suất khí nén đầu vào và hành trình xi lanh. Trên cơ sở đó, lực đột sơ bộ được xác định theo quan hệ giữa chu vi cắt, chiều dày vật liệu và ứng lực cắt của vật liệu [3].

Trong nghiên cứu này, lực đột yêu cầu được tính theo biểu thức:

$$F = k.L.s.\tau \quad (1)$$

Trong đó: k là hệ số xét đến điều kiện làm việc; L là chu vi vòng cắt; s là chiều dày vật liệu; τ là ứng lực cắt của vật liệu.

Sau khi xác định lực đột, diện tích piston cần thiết được tính theo:

$$A = F/p \quad (2)$$

Trong đó, p là áp suất làm việc của nguồn khí nén hoặc cụm tăng lực.

Đường kính xi lanh tính toán được xác định:

$$D = \sqrt{4A/\pi} \quad (3)$$

Các thông số đầu vào sử dụng trong tính toán được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Thông số đầu vào dùng cho tính toán lực đột.

Thông số	Ký hiệu	Giá trị
Chiều dày vật liệu	s	3,2 mm
Chu vi vòng cắt	L	90 mm
Áp suất đầu vào	p	6 bar
Hành trình xi lanh	L_{xl}	400 mm
Hệ số làm việc	k	1,1-1,3

Trong tính toán sơ bộ, ứng lực cắt của vật liệu được chọn theo dữ liệu công nghệ tương ứng với nguyên công đang xét.

Bảng 3. Kết quả tính toán sơ bộ cụm chấp hành đầu đột.

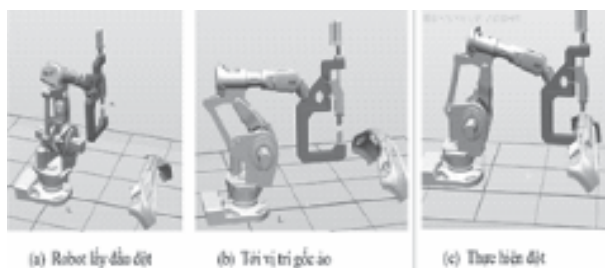
Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị
Lực đột yêu cầu	F	1728 N
Diện tích piston	A	2880 mm ²
Đường kính tính toán	D_{tt}	60,5 mm
Đường kính chọn	D_{ch}	63 mm

Kết quả trong Bảng 3 cho thấy lực đột yêu cầu đạt 1728 N, từ đó dẫn tới diện tích piston yêu cầu khoảng 2880 mm² và đường kính xi lanh tính toán khoảng 60,5 mm. Với yêu cầu dự trữ công nghệ và theo tiêu chuẩn chế tạo, phương án chọn xi lanh danh nghĩa 63 mm được xem là phù hợp ở mức sơ bộ đối với nguyên công đang xét.

Trong cấu hình đề xuất, lực đột được truyền từ xi lanh tăng áp qua cụm dẫn hướng tới chày, sau đó tác động lên vùng đột của bumper và truyền xuống cối. Cách bố trí này cho phép duy trì đường truyền lực tương đối trực tiếp, đồng thời thuận lợi cho việc kiểm soát chuyển động và tăng độ ổn định của vùng công tác. 

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

Kết quả mô phỏng cho thấy robot có thể thực hiện được chuỗi thao tác cơ bản với đầu đột, bao gồm lấy đầu đột từ vị trí chờ, di chuyển tới vị trí gốc ảo trước khi vào vùng làm việc và thực hiện nguyên công đột tại vị trí công nghệ trên bumper. Cách tiếp cận này phù hợp với các nghiên cứu về mô phỏng và lập trình ngoại tuyến robot trong cell sản xuất tự động [4].



Hình 4. Chuỗi thao tác mô phỏng của robot với đầu đột.

Hình 4 cho thấy đầu đột có thể được robot mang tới vùng gia công theo logic thao tác phù hợp với một cell tự động. Trong đó, vị trí gốc ảo đóng vai trò là trạng thái chuyển tiếp an toàn, giúp giảm nguy cơ giao thoa với đồ gá và sản phẩm trước khi robot tiếp cận vùng đột. Kết quả mô phỏng trong đồng thời cho thấy đầu đột có khả năng tiếp cận vùng gia công và duy trì được phương làm việc phù hợp của chày trong quá trình đột, tương tự các hệ thống gia công linh hoạt sử dụng robot đã được công bố [5].

Từ góc độ tích hợp, kết quả mô phỏng khẳng định rằng cấu hình đầu đột đề xuất không chỉ khả thi về mặt kết cấu mà còn phù hợp với tổ chức thao tác trong cell gia công bumper. Việc sử dụng cụm thay dụng cụ nhanh tạo điều kiện linh hoạt cho robot khi thay đổi đầu công tác, trong khi cấu hình khung chữ C hỗ trợ tiếp cận tốt hơn đối với các vùng đột có điều kiện hình học khác nhau giữa cản trước và cản sau. Điều này phù hợp với xu hướng phát triển các

hệ thống sản xuất linh hoạt và tái cấu hình trong công nghiệp hiện đại [6].

Tuy nhiên, nghiên cứu hiện mới dừng ở mức mô phỏng khả năng thao tác và tránh giao thoa. Các yếu tố như chu kỳ làm việc, chất lượng lỗ đột, độ chính xác vị trí và độ bền của cụm chấp hành cần được tiếp tục đánh giá bằng thực nghiệm trong các nghiên cứu tiếp theo.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã làm rõ các yêu cầu công nghệ đối với phân hệ đầu đột trong cell gia công cản ô tô, đặc biệt là sự khác biệt giữa cản trước và cản sau về cấu hình lỗ và điều kiện tiếp cận vùng đột.

Một đầu đột linh hoạt gắn robot đã được đề xuất và thiết kế theo hướng module, cho phép tích hợp với robot thông qua cụm thay dụng cụ nhanh và thích nghi với nhiều cấu hình sản phẩm khác nhau. Kết quả tính toán sơ bộ cho thấy phương án cụm chấp hành đáp ứng yêu cầu lực đột của nguyên công.

Kết quả mô phỏng cho thấy robot có thể thực hiện chuỗi thao tác công nghệ với đầu đột mà không xảy ra giao thoa, đồng thời đảm bảo khả năng tiếp cận vùng gia công. Điều này chứng minh tính khả thi của phương án tích hợp đầu đột như một phân hệ linh hoạt trong cell gia công bumper.

Nghiên cứu hiện mới dừng ở mức thiết kế và mô phỏng. Các nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào thử nghiệm thực tế, đánh giá chất lượng lỗ đột và tối ưu hóa cụm chấp hành nhằm nâng cao hiệu quả công nghệ của nguyên công. ❖

Ngày nhận bài: 10/4/2026

Ngày phản biện: 20/4/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. M. P. Groover, “*Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*”. Pearson, 2021.
- [2]. Y. Koren et al., “*Reconfigurable manufacturing systems*”. CIRP Annals, 48(2), 527-540, 1999.
- [3]. G. Papadopoulos et al., “*Multi-tool end-effector for robotic systems*”. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 128, 1675-1687, 2023.
- [4]. ABB, RobotStudio Operating Manual, ABB Robotics.
- [5]. Yin Guotao, Zhu Zhenghe, Gong Hu, Lu Zhenfeng, Yong Huashan, Liu Lei, He Wei, “*Flexible punching system using industrial robots for automotive panels*”. Robot. Comput.-Integr. Manuf., 52, 92-99, 2018.
- [6]. Y. Mori et al., “*Workspace adjustment using long end-effector*”. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2026.