

PHÁT TRIỂN TAY KẸP CÓ ĐIỀU KHIỂN PHẢN HỒI LỰC CHO ROBOT

DEVELOPMENT OF A GRIPPER WITH FORCE FEEDBACK CONTROL FOR ROBOTS

Lê Đình Nam¹, Dương Văn Lạc^{1,*},
Bùi Tiến Sơn²

DOI: <http://doi.org/10.57001/huinh5804.2024.292>

TÓM TẮT

Hầu hết các tay kẹp robot hiện nay thường thiếu khả năng cảm nhận lực tiếp xúc. Trong khi để đạt được các nhiệm vụ cầm nắm tự động và thao tác khéo léo với các vật đa dạng đòi hỏi phải có sự tương tác với môi trường, khả năng này có thể được hiện thông qua việc tích hợp cảm biến vào tay kẹp của robot. Bài báo này giới thiệu tay gấp robot hai ngón có khả năng ước lượng lực kẹp tác dụng lên vật thể để điều khiển lực kẹp. Bộ kẹp gồm hai ngón tay song song được dẫn động bằng động cơ servo và mômen kẹp được ước tính và điều khiển một cách hiệu quả bằng cách sử dụng cảm biến dòng điện. Hiệu suất của hệ thống điều khiển phản hồi lực này được thực nghiệm bằng cách gấp các vật thể có độ cứng và hình dạng khác nhau. Kết quả thực nghiệm chỉ ra rằng hệ thống được đề xuất có thể thao tác hiệu quả với các loại vật thể khác nhau (dễ vỡ, cứng và mềm) trong môi trường công nghiệp bằng cách điều khiển chính xác lực kẹp.

Từ khóa: Tay kẹp; tay kẹp điện; điều khiển phản hồi lực.

ABSTRACT

Most robot grippers currently lack the ability to sense the contact force. Achieving autonomous grasping and dexterous manipulation tasks with objects necessitates active interaction with the environment, a capability that can be realized through the integration of sensory feedback into robot tools. This paper introduces a two-finger robot gripper capable of measuring grasp force exerted on objects and adjusting its grasp force. The parallel gripper is actuated by servo motor, and contact torque is effectively estimated and controlled using a simple, low-cost load current sensor. The performance of this force feedback control system is investigated by grasping various objects with different stiffness and shapes. Experimental results indicate that the proposed system can manipulate different types of objects (fragile, rigid, and soft) in an industrial environment by precisely controlling the applied contact force.

Keywords: Gripper; electric gripper; force feedback control.

¹Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

²Phòng Khoa học và Công nghệ, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: lac.duongvan@hust.edu.vn

Ngày nhận bài: 25/4/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/6/2024

Ngày chấp nhận đăng: 27/9/2024

KÝ HIỆU

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa	K_t		Hằng số động cơ
m	kg	Khối lượng vật kẹp	I	A	Cường độ dòng điện
g	m/s^2	Gia tốc trọng trường	M	Nm	Momen xoắn của động cơ
μ		Hệ số ma sát của má kẹp	F_G	N	Lực kẹp tác dụng lên ngón tay
a	m/ph	Gia tốc của tay kẹp	V_B	m/s	Vận tốc của điểm B

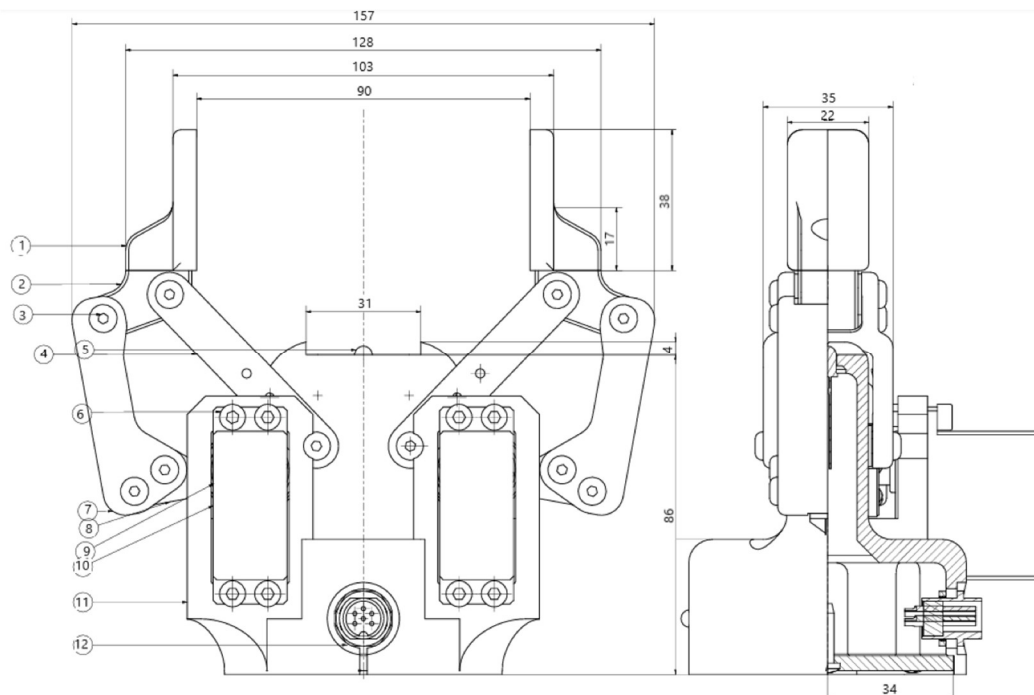
1. GIỚI THIỆU

Ngày nay, việc thiết kế và phát triển một cơ cấu kẹp điện giá rẻ và đáng tin cậy trong công nghiệp là rất cần thiết, vì phần lớn những kiểu tay hiện tại (ví dụ: tay kẹp khí nén) chỉ gấp được những vật cứng do thiếu khả năng phản hồi lực. Lĩnh vực robot đang phát triển theo hướng tương tác và cộng tác thông minh với con người và môi trường xung quanh, khả năng gấp và thao tác trên các vật thể có độ cứng và hình dạng khác nhau và đặt biệt là dễ vỡ là rất cần thiết. Hiện tại có một số sản phẩm thương mại cho tay kẹp robot như OnRobot, Robotiq [1], tuy nhiên các sản phẩm này thường có giá thành rất cao trên 5000\$. Chủ đề kiểm soát lực kẹp cho tay gấp được rất nhiều nhà nghiên cứu trong những năm gần đây, năm 2022 đã có hơn 1000 nghiên cứu để cập đến chủ đề "gripper control" [2]. Một số nghiên cứu sử dụng cảm biến xúc giác được gắn trên bề mặt ngón tay kẹp như [3, 4] để cảm nhận chính xác chiều và độ lớn của lực tác động nhưng có nhược điểm là chế tạo khó và giá thành cao. Một số nghiên cứu về thiết kế tay kẹp giá rẻ như [5-7] có sử dụng cảm biến lực gắn trên ngón tay kẹp hoặc cảm biến dòng điện nhưng đều là những nghiên cứu trong phòng thí nghiệm với khoảng kẹp nhỏ, không thông dụng, cũng chưa hướng đến phục vụ mục đích công nghiệp khi chưa đề cập đến kết nối thông qua chuẩn truyền thông công nghiệp và thiết lập một giao diện người dùng.

Nhận thấy tính cấp bách và tính ứng dụng cao, mục tiêu của nghiên cứu là phát triển mô hình tay kẹp điện phản hồi lực. Bài báo sẽ tập trung vào thiết kế mô hình tay kẹp có khoảng kẹp thông dụng, xây dựng bộ điều khiển lực với độ ổn định cao. Giao diện người dùng tiện lợi với đồ thị hiển thị phản hồi lực. Hơn nữa tay kẹp có thể liên kết với các cánh tay robot trên thị trường với chuẩn truyền thông công nghiệp Modbus RTU.

2. THIẾT KẾ TAY KẸP

Hình 1 là mô hình tay gấp song song được thiết kế và sử dụng cho nghiên cứu.



Hình 1. Mô hình tay kẹp

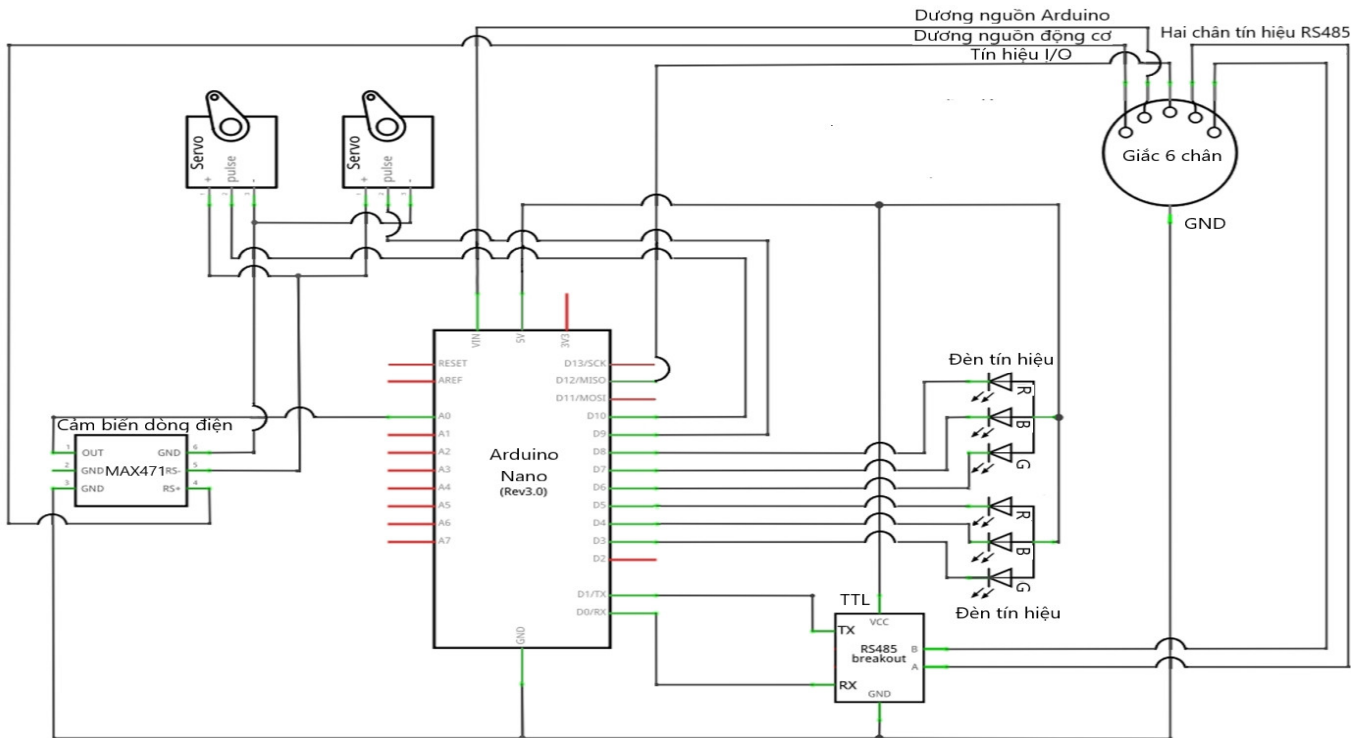
Mô hình thiết kế là mô hình tay kẹp song song với hai động cơ servo dẫn động cho hai ngón tay kẹp cơ cấu dạng bốn khâu bản lề hình bình hành. Các thành phần trong mô hình tay kẹp bao gồm:

1. Ngón tay kẹp
2. Khâu 3 trong cơ cấu 4 khâu bản lề
3. Khớp nối trong cơ cấu 4 khâu bản lề
4. Khâu 4 trong cơ cấu 4 khâu bản lề
5. Đèn LED RGB
6. Bu lông cố định động cơ
7. Khâu 2 trong cơ cấu 4 khâu bản lề
8. Khâu truyền động trong cơ cấu 4 khâu
9. Gá động cơ
10. Động cơ servo
11. Thân tay kẹp
12. Giắc kết nối 6 chân

Mô hình tay kẹp song song sử dụng có rất nhiều ưu điểm khi có cơ cấu vận hành đơn giản, khoảng kẹp rộng (khoảng kẹp là 0 - 90mm). Vì moment xoắn của động cơ truyền động tạo nên lực kẹp của ngón tay kẹp và moment xoắn của động cơ lại tỉ lệ với dòng điện tiêu thụ của động cơ. Do đó, bài báo này đã sử dụng cảm biến đo dòng điện và bộ điều khiển dòng điện để thực hiện điều khiển phản hồi lực cho tay kẹp. Cảm biến được sử dụng là cảm biến đo cường độ dòng điện Max471, có điện trở trong rất nhỏ (35mΩ) và dải đo dòng điện lên đến ±3A.

Max471 khuếch đại điện áp rơi qua điện trở shunt và trả về giá trị điện áp qua ngõ ra tương tự. Mô hình sử dụng mạch điều khiển Aduino Nano, cơ cấu chấp hành là động cơ servo EMAX ES6255 Tay gấp sẽ được kết nối với robot thông qua cổng truyền thông công nghiệp Modbus RTU thông qua mạch chuyển đổi giao tiếp UART TTL sang RS485.

Hình 2 thể hiện sơ đồ kết nối các phần tử điện của tay kẹp, với hai bóng led RGB biểu thị trạng thái của tay kẹp.



Hình 2. Sơ đồ kết nối các phần tử điện của tay kẹp

Tay kẹp sẽ nhận thông tin lực kẹp từ người dùng qua phương thức Modbus RTU, đây là một chuẩn truyền thông công nghiệp thông dụng, ưu điểm bởi tính ổn định, đơn giản, dễ sử dụng và miễn phí [8]. Thông qua giao diện người dùng trên Windows Forms (WinForm), trong quá trình kẹp tay kẹp sẽ luôn trả về giá trị phản hồi lực và trạng thái tay kẹp thông qua việc ghi và đọc các giá trị thanh ghi theo thời gian thực.

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

Ngón tay kẹp được thiết kế có kích thước như hình 3, các khâu truyền động cho ngón tay kẹp có dạng cơ cấu 4 khâu bản lề và những khâu đối diện có kích thước bằng nhau tạo thành hình bình hành, cơ cấu này giúp cho ngón tay kẹp luôn luôn có một hướng không đổi trong quá trình chuyển động.

Do độ mở lớn nhất của tay kẹp là 90mm, ta có khoảng cách giữa hai ngón tay kẹp tại một thời điểm t sẽ là:

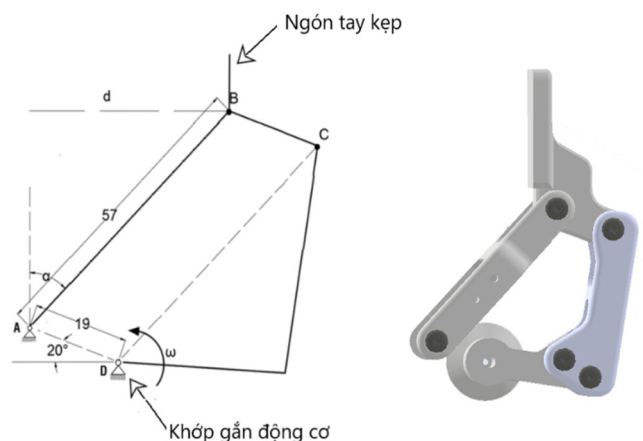
$$D_t = 90 - 2 \times 57. (\sin \frac{\pi}{4} - \sin \alpha) \tag{1}$$

Trong đó, α là góc quay động cơ tạo bởi tia AB và trục song song với bề mặt ngón tay kẹp.

Độ cao của vị trí ngón tay kẹp là:

$$H_t = 57. \cos \alpha \tag{2}$$

Các giá trị về khoảng cách và độ cao của hai ngón tay kẹp sẽ được ghi vào thanh ghi của chuẩn truyền thông Modbus RTU để xác định vị trí kẹp để gửi về cho cánh tay robot.



Hình 3. Sơ đồ động học ngón tay kẹp

Hình 3, 4 biểu thị các lực trong quá trình kẹp vật. Lực kẹp cần thiết ở mỗi ngón tay kẹp được xác định như sau:

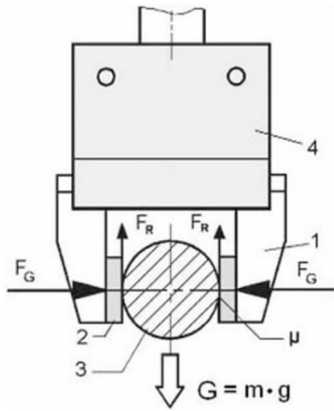
$$F_G = \frac{m.(g+a)}{2\mu} \tag{3}$$

Xem khối lượng các khâu trong cơ cấu ngón tay là không đáng kể, theo phương pháp công di chuyển khả dĩ:

$$M\omega = F_G V_B \cos(\vec{F}_G, \vec{V}_B) \tag{4}$$

$$M\omega = F_G \overline{AB}\omega \cos(\alpha) \tag{5}$$

$$M = 0,057F_G \cos(\alpha) \tag{6}$$

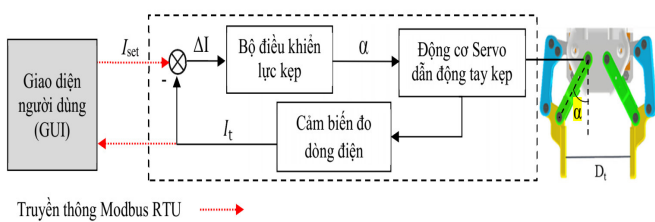


Hình 4. Phân tích lực kẹp của tay gấp song song

Cường độ dòng điện cần thiết để kẹp vật là:

$$I_{set} = \frac{M}{K_t} \propto F_G \tag{7}$$

Trong đó, K_t là hằng số tỷ lệ.



Hình 5. Sơ đồ hệ thống điều khiển tay kẹp

Sơ đồ hệ thống điều khiển được thể hiện ở Hình 5. Đầu vào của hệ thống là dòng điện đặt I_{set} hay dòng kẹp (tỷ lệ với lực kẹp F_G). Bằng cách sử dụng cảm biến đo dòng, bộ điều khiển có nhiệm vụ ổn định lực kẹp hay dòng điện kẹp trong khoảng $[I_{set} - e, I_{set} + e]$, hay hàm mục tiêu $|I_t - I_{set}| \leq e$, trong đó e là khoảng ổn định lực kẹp. Tín hiệu đầu ra của bộ điều khiển là góc quay α của động cơ dẫn động ngón tay kẹp điều khiển khoảng đóng/mở kẹp D_t (hình 5). Động cơ sử dụng là động cơ RC Servo (hệ thống truyền động điều khiển hồi tiếp vòng kín), các động cơ này nhận tín hiệu điều khiển là xung PWM (Pulse Width Modulation), trong đó giá trị góc quay α tỷ lệ với độ rộng xung (Duty Cycle).

Phương pháp điều khiển được thể hiện ở **Thuật toán**

1. Mặc dù các bộ điều khiển truyền thống PID có thể được sử dụng, tuy nhiên thành phần tỷ lệ của bộ điều khiển PID thường gây ra vọt lố và dao động đặc biệt là khi kẹp các vật cứng và có thể sẽ gây hư hỏng đối với các vật dễ vỡ. Để kiểm soát vọt lố và ổn định trong quá trình kẹp, phương pháp đề xuất là vì chỉnh góc quay động cơ α một

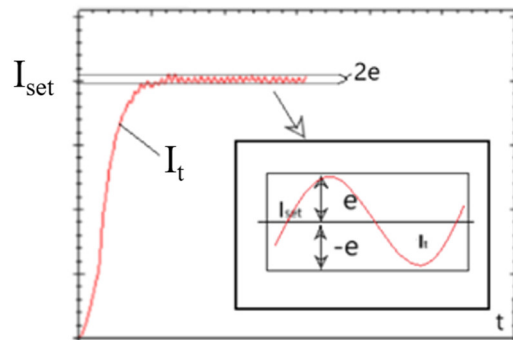
lượng δ , trong đó δ là khoảng quay bé nhất của động cơ tay kẹp. Cụ thể, khi dòng kẹp lớn hơn $I_{set} + e$ thì tăng góc quay động cơ từng khoảng bằng δ để giảm lực kẹp, và ngược lại khi dòng kẹp bé hơn $I_{set} - e$. Trong đó giá trị e cần lựa chọn lớn hơn độ tăng/giảm dòng điện khi giảm/tăng góc quay động cơ một khoảng δ trong quá trình kẹp. Nếu bỏ qua nhiễu thì bằng cách này bộ điều khiển sẽ đảm bảo độ vọt lố bé hơn giá trị e .

Thuật toán 1: Thuật toán điều khiển lực kẹp

```

IF (kẹp vật = true) // Kiểm tra lệnh kẹp vật
     $I_t = \text{readCurrent}()$ 
    IF ( $I_t < I_{set} - e$ ) THEN // Lực kẹp nhỏ hơn lực kẹp cho phép
         $\alpha = \alpha - \delta;$  // Giảm giá trị góc  $\alpha$  một khoảng bằng  $\delta$  để tăng lực kẹp
    ELSE IF ( $I_t > I_{set} + e$ ) THEN // Lực kẹp lớn hơn lực kẹp cho phép
         $\alpha = \alpha + \delta;$  // Tăng giá trị góc  $\alpha$  một khoảng bằng  $\delta$  để giảm lực kẹp
    END IF
    Servo.Rotate( $\alpha$ ); // Gửi lệnh quay ngón tay đến góc  $\alpha$ 
END IF
    
```

Trong nghiên cứu này giá trị $e = 5\text{mA}$ được chọn thông qua thực nghiệm, hình 6 thể hiện đồ thị cường độ dòng điện theo thời gian trong quá trình kẹp vật. Thời gian chu kỳ điều khiển là 0.05s . Quá trình kẹp sẽ là mở kẹp ở mức tối đa và "từ từ" đóng kẹp lại. Dòng điện để chuyển động ngón tay khi không có vật kẹp là tương đối nhỏ. Khi tiếp xúc với vật, giá trị cường độ dòng điện sẽ tăng lên như thể hiện ở hình 6. Phương pháp điều khiển được đề xuất sẽ giữ cho dòng kẹp ổn định trong khoảng $[I_{set} - e, I_{set} + e]$.



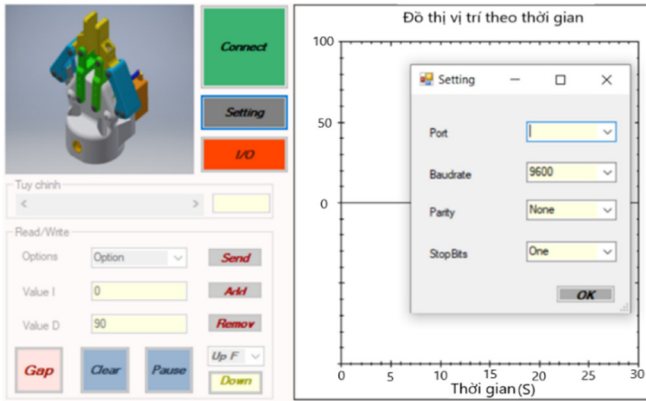
Hình 6. Đồ thị cường độ dòng điện theo thời gian trong quá trình kẹp vật

Lưu ý tay kẹp sử dụng giá trị phản hồi từ cảm biến cường độ dòng điện nên việc lọc nhiễu cho cảm biến là

cần thiết, bộ lọc nhiễu Kalman Filter được sử dụng giúp tín hiệu trả về từ cảm biến ổn định hơn [7].

4. THÍ NGHIỆM

Tiến hành thí nghiệm kẹp vật và hiển thị đồ thị phản hồi lực trên máy tính thông qua WinForm C#. Hình 7 thể hiện giao diện kết nối giữa máy tính và tay kẹp thông qua WinForm.



Hình 7. Giao diện phần mềm kết nối tay kẹp

Các thí nghiệm cho kết quả khả quan khi bộ điều khiển đề xuất thể hiện được tính ổn định và đáp ứng cơ bản được những mục tiêu ban đầu nghiên cứu đặt ra.



(a) Kẹp quả trứng



(b) Kẹp gói bánh xốp



(c) Kẹp chai nước

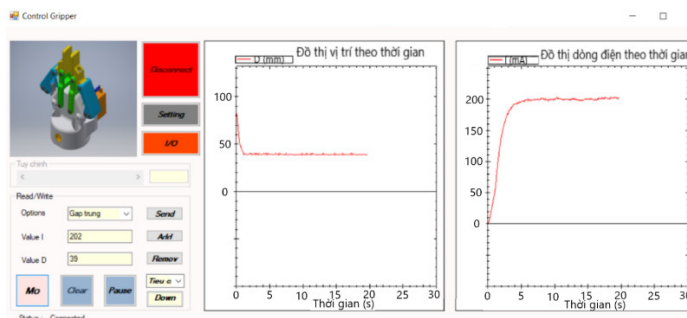


(d) Kẹp khối gỗ

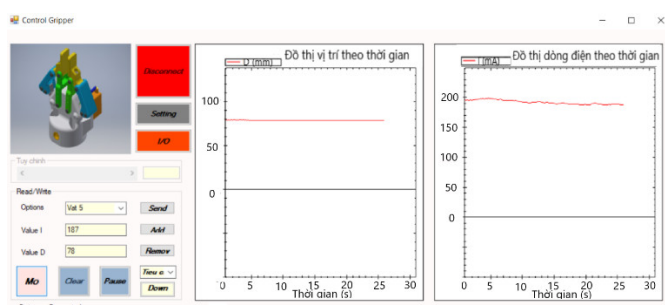
Hình 8. Các vật kẹp mẫu của tay kẹp trong thực tế

Hình 8 thể hiện một số kết quả kẹp vật thực tế của mô hình tay kẹp. Tay kẹp có thể được sử dụng với những vật kẹp khác nhau, đa dạng cả về hình dạng và kích thước, đáp ứng được những công việc kẹp thông dụng. Việc điều chỉnh lực và vị trí chính xác giúp cho tay kẹp có thể kẹp được những vật thể dễ vỡ và dễ biến dạng.

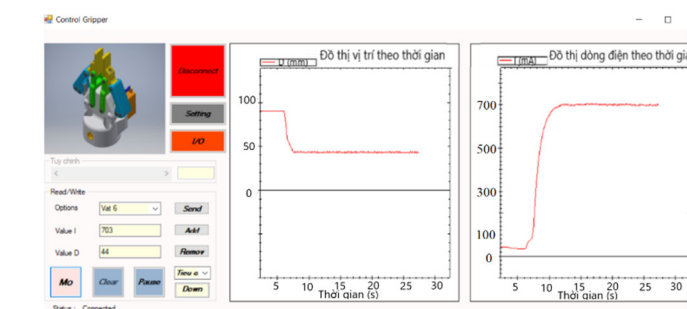
Hình 8 là các vật thông dụng hằng ngày được dùng để kiểm tra khả năng kẹp gồm quả trứng (vật dễ vỡ), gói bánh xốp (vật mềm), chai nước và khối gỗ (vật cứng). Hình 9, 10, 11 và 12 thể hiện đồ thị khoảng kẹp D_t và giá trị cường độ dòng điện theo thời gian I_t khi kẹp các vật này. Theo công thức (3) và (7), dòng điện kẹp I_{set} cho từng đối tượng kẹp sẽ khác nhau, phụ thuộc vào các thông số như khối lượng vật, hệ số ma sát. Trong nghiên cứu này, dòng điện kẹp cho từng vật được xác định bằng thực nghiệm bằng cách tăng dần giá trị I_{set} đến một ngưỡng giá trị đảm bảo vật không bị rơi và ổn định trong quá trình gắp thả vật. Lưu ý sẽ có hiện tượng nhiễu khi đo dòng điện. Nhìn chung, các kết quả cho thấy dòng kẹp khá ổn định, đảm bảo vật không bị hư hỏng và rơi trong khi kẹp.



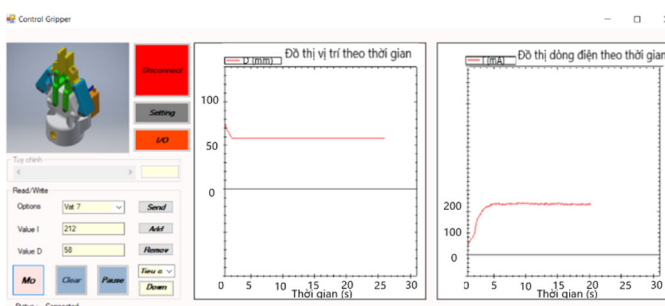
Hình 9. Đồ thị vị trí và dòng điện theo thời gian khi kẹp quả trứng với $I_{set} = 200mA$



Hình 10. Đồ thị vị trí và dòng điện theo thời gian khi kẹp gói bánh xốp với $I_{set} = 190mA$



Hình 11. Đồ thị vị trí và dòng điện theo thời gian khi kẹp chai nước với $I_{set} = 700mA$



Hình 12. Đồ thị vị trí và dòng điện theo thời gian khi kẹp khối gỗ với $I_{set} = 210mA$

5. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày mô hình tay kẹp có phản hồi lực kẹp. Phương pháp điều khiển cho kết quả khá tốt trong ổn định lực kẹp và kiểm soát tốt độ vọt lố. Các thí nghiệm thực tế cho thấy tay kẹp được phát triển có khả năng kẹp được nhiều vật có kích thước khác nhau và đặc biệt hữu

dụng khi kẹp các vật dễ vỡ. Thiết bị cũng được trang bị chuẩn giao tiếp công nghiệp Modbus RTU RS485 giúp dễ dàng tích hợp vào các cánh tay robot công nghiệp. Trong tương lai nhóm nghiên cứu sẽ tiếp tục hoàn thiện thiết kế cơ khí và phát triển các thuật toán điều khiển để phát hiện và chống trượt trong quá trình kẹp.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Bách khoa Hà Nội (HUST) trong đề tài mã số T2023-TĐ-016.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Simone Cortinovis, Giuseppe Vitroni, Marco Maggiali, Rocco Antonio Romeo, "Control Methodologies for Robotic Grippers: A Review," *Section Actuator for Robot*, 2023.
- [2]. Daniel Castrol, Lino Marques, Urbano Nunes, A.T. de Almeida, "Tactile Force Control Feedback in a Parallel Jaw Gripper," *IEEE Portugal*, 884-888, 1997.
- [3]. Marco Costanzo, Giuseppe De Maria, Ciro Natale, "Slipping Control Algorithms for Object Manipulation with Sensorized Parallel Grippers," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 7455-7461, 2018.
- [4]. Kuat Telegenov, Yedige Tlegenov, Almas Shintemirov, "A Low-Cost Open-Source 3-D-Printed Three-Finger Gripper Platform for Research and Educational Purposes," *IEEE Access*, 3, 638-647, 2015.
- [5]. Ashutosh Kumar, Abhuri Lakshman Kumar, Aravindan Arunachallam, "Robotic GripperWith Force Feedback System," *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 1-5, 2020
- [6]. Rahul Kumar, Utkal Mehta, Praneel Chandb, "A Lowcost Linear Force Feedback Control System for a Two-Fingered Parallel Configuration Gripper," *Procedia Computer Science*, 105, 264-269, 2016.
- [7]. <https://tapit.vn/khai-niem-ve-giao-thuc-modbus-rtu-va-ket-noi-phan-cung/>. Accessed 16 May 2020.
- [8]. Gareth J. Monkman, StefanHesse, Ralf Steinmann, Henrik Schunk, *Robot Grippers*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 466 pages, 2007.
- [9]. Alfian Ma'arif, Iswanto, Aninditya Anggari Nuryono, Rio Ikhsan Alfian, "Kalman Filter for Noise Reducer on Sensor Readings," *Signal and Image Processing Letters*, 1, 50-61, 2019

AUTHORS INFORMATION

Le Dinh Nam¹, Duong Van Lac¹, Bui Tien Son²

¹School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam

²Department of Science and Technology, Hanoi University of Industry, Vietnam