

DOI:10.22144/ctu.jvn.2022.033

ĐIỀU KHIỂN CÁNH TAY ROBOT SCARA HAI BẬC TỰ DO DỰA TRÊN GIẢI THUẬT PID MỜ

Nguyễn Hoàng Dũng^{1*}, Nguyễn Khánh Trân¹, Đái Tiến Trung² và Phan Hoài Loan³

¹Bộ môn Tự động hóa, Trường Đại học Cần Thơ

²ViettelPost Cần Thơ

³Trường Cao đẳng nghề Cần Thơ

*Người chịu trách nhiệm về bài viết: Nguyễn Hoàng Dũng (email: hoangdung@ctu.edu.vn)

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 02/11/2021

Ngày nhận bài sửa: 02/12/2021

Ngày duyệt đăng: 22/04/2022

Title:

Controlling a two-DOF SCARA robot arm based on a fuzzy-PID algorithm

Từ khóa:

Arduino, cánh tay robot hỗ trợ tập vật lý trị liệu, logic mờ, PID, simulink

Keywords:

Arduino, fuzzy, PID, robot arm for physical therapy, simulink

ABSTRACT

This paper presents a mechanic design of 2-DOF SCARA robot arm which is controlled to support for post-stroke patients by using physical therapy exercises. Fuzzy and PID algorithms have been utilized to control the robot arm by learning and repeating therapist's movements. Loadcell in the design is utilized to measure the movement force of therapist's arm. The algorithms were built based on MATLAB SIMULINK and connected to Arduino kit to control the robot arm. The orbital synchronization between the learning signal and repetition signal is approximately 79.85% for axis 1 and 76.95% for axis 2. The results of this study are the initial research for the robot arm with more degrees of freedom for patient supports in physiotherapy activities effectively.

TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp thiết kế cơ khí của robot 2 bậc tự do (degree of freedom, DOF) dạng SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm) được điều khiển bằng giải thuật PID (Proportional Integral Derivative) mờ để hỗ trợ bệnh nhân sau đột quỵ tập vật lý trị liệu. Giải thuật mờ Fuzzy và thuật toán PID được dùng để điều khiển hệ tay máy hai bậc tự do dựa trên cơ sở việc học và lặp lại các động tác tập. Loadcell sử dụng trong thiết kế được dùng để đo lực của quá trình vận động tay. Các giải thuật được xây dựng dựa trên phần mềm SIMULINK của MATLAB và kết nối với kit Arduino để điều khiển cánh tay robot. Quỹ đạo trong việc lặp lại động tác học so với quỹ đạo học có độ phù hợp 79,85% đối với khớp 1 và 76,95% đối với khớp 2. Kết quả của nghiên cứu này là cơ sở ban đầu để mở rộng nhiều bậc tự do cho cánh tay robot để hỗ trợ bệnh nhân tập vật lý trị liệu hiệu quả hơn nữa.

1. GIỚI THIỆU

Theo số liệu thống kê năm 2017 về tai nạn giao thông toàn cầu của tổ chức y tế thế giới WHO (World Health Organization), số ca chấn thương hoặc tàn tật do các tai nạn giao thông chiếm từ 20-50 triệu người. Các ca chấn thương này thường dẫn

đến tai biến hoặc sự khuyết tật về vận động (Mayo et al., 2002). Các khuyết tật về vận động luôn có những tác động tiêu cực đến chất lượng cuộc sống của các bệnh nhân cũng như gia đình của họ như hạn chế về khả năng hoạt động độc lập trong sinh hoạt hằng ngày. Do đó, việc phục hồi vận động cho các bệnh nhân gặp chấn thương đóng một vai trò rất

quan trọng trong quá trình điều trị (Liepert et al., 2000).

Theo thống kê của Trung tâm Kiểm soát Bệnh tật thành phố Hồ Chí Minh, số bệnh nhân đột quỵ có xu hướng tăng và mỗi năm Việt Nam có thêm khoảng 200.000 người bị đột quỵ. Cũng theo thống kê của Cục Quản lý Khám và Chữa bệnh (Bộ Y tế), những năm gần đây tỉ lệ người đột quỵ ngày càng trẻ hóa (chiếm 2%) và trung niên chiếm 1/3 tổng số trường hợp đột quỵ, nam giới có tỉ lệ mắc đột quỵ cao hơn 4 lần so với nữ giới. Những trường hợp bệnh đột quỵ được cứu sống sẽ để lại di chứng (liệt chân/tay/thân người) và là gánh nặng thật sự cho người thân và xã hội. Họ cần người chăm sóc và chữa trị vật lý trị liệu để phục hồi chức năng vận động.

Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng, trong quá trình điều trị phục hồi chức năng vận động, nếu thời gian tập các động tác vật lý tăng lên (Kwakkel et al., 2002) cùng với số lần lặp cao (Butefisch et al., 1995) và đúng động tác theo yêu cầu của các liệu pháp thì nó sẽ mang đến những kết quả phục hồi đáng kể (Bayona et al., 2005). Gần đây, ngày càng nhiều cánh tay robot được phát triển và áp dụng để thay thế hoặc hỗ trợ chuyên gia trong việc điều trị và hỗ trợ cho các trường hợp phục hồi vận động như robot Armeo (Sanchez et al., 2006), robot L-Exos (Frisoli et al., 2007), cánh tay robot của Rosen (Rosen et al., 2005) hoặc cánh tay robot thông minh của Zhang (Zhang et al., 2007) và cánh tay robot ARMin I và II của Nef (Nef et al., 2007).

Nhiều nghiên cứu của Volpe et al. (2001), Kahn et al. (2006) và Klamroth-Marganska et al. (2014) chỉ ra rằng hiệu quả của việc sử dụng liệu pháp phục hồi chức năng bằng cánh tay robot đã được đánh giá và khẳng định là một thay thế hữu hiệu cho các liệu pháp điều trị thông thường. Thậm chí, một số nghiên cứu cho thấy rằng khả năng sử dụng của cánh tay robot phục hồi chức năng hỗ trợ cho các chuyên gia y tế là một yếu tố quan trọng và được ứng dụng thành công trong điều trị (Dijkers et al., 1991; Lee et al., 2005).

Ngoài ra, một cánh tay robot phục hồi chức năng được thiết kế chuyên biệt để hỗ trợ cho các chuyển động lặp đi lặp lại dựa trên các bài tập cụ thể. Trong đó, các nhiệm vụ chuyển động này phải dựa trên những hoạt động sinh hoạt hàng ngày ADL (activities of daily living) bao gồm như ăn uống, mặc quần áo và các hoạt động quan trọng khác (Guidali et al., 2008). Việc này thường đòi hỏi cánh tay robot có nhiều bậc tự do DOF (degree of freedom) để hỗ trợ chuyển động của toàn bộ cánh

tay và bàn tay một cách mềm dẻo (Avizzano & Bergamasco, 1999).

Qua đó, việc thiết kế một cánh tay robot với 2 bậc tự do dạng SCARA (selective compliance articulated robot arm) có thể thực hiện linh hoạt các chuyển động của khớp vai và khớp khuỷu tay với mục tiêu đáp ứng yêu cầu cho các hoạt động tập luyện phục hồi chức năng được đề xuất trong nghiên cứu này. Các chuyển động này được robot học lại từ các bác sĩ trị liệu hoặc chuyên gia hỗ trợ cho các bệnh nhân và sau đó chuyển động nâng đỡ cánh tay bệnh nhân theo đúng quỹ đạo của động tác đã được học trước đó. Trong nghiên cứu hiện tại, cánh tay robot được lập trình điều khiển dựa trên giải thuật điều khiển PID (proportional integral derivative) mờ với các đáp ứng chuyển động được ghi lại theo thời gian thực thông qua phần mềm MATLAB & SIMULINK giúp cho việc đánh giá và theo dõi quá trình chuyển động một cách hiệu quả.

Kết quả thí nghiệm ban đầu cho thấy cánh tay có thể thực hiện theo một số động tác cơ bản như co gập cẳng tay hoặc động tác trong sinh hoạt hàng ngày như di chuyển đồ vật trên một mặt phẳng. Động tác lau bàn được chọn để tập cho robot chuyển động theo quỹ đạo mà chuyên gia xác định trước.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Việc vận hành cánh tay robot được chia thành 3 quá trình độc lập khác nhau. Quá trình học (điều các khớp linh hoạt theo động tác học, tương tác người - máy) được xử lý dựa trên giải thuật Fuzzy để điều chỉnh độ rộng xung PWM (pulse width modulation) điều khiển động cơ, đồng thời tăng khả năng mượt mà cho quá trình chuyển động của robot. Quá trình xử lý dữ liệu học (loại bỏ các góc do quá trình nhiễu tạo ra, biến chuyển động có gia tốc thành chuyển động đều đối với từng khớp) và đồng thời giảm bớt các biến góc được lưu trữ không cần thiết do nhiễu lực gây ra. Quá trình lặp lại động tác (thực hiện lại động tác và quỹ đạo đã học) với từng khớp chuyển động đều.

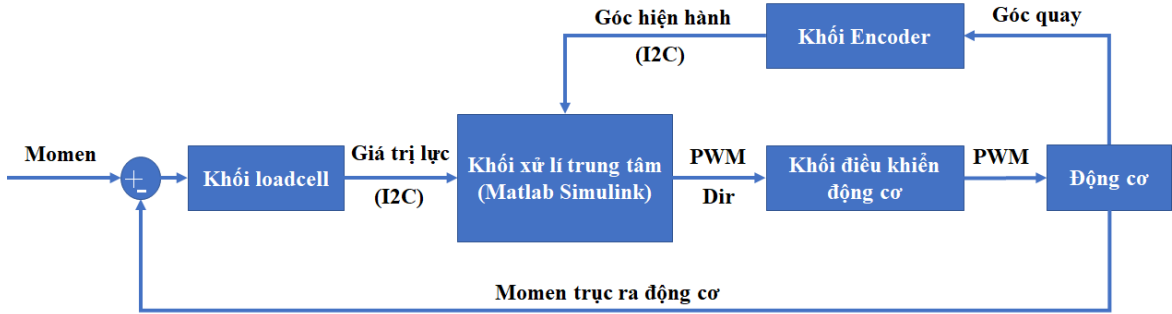
2.1. Quá trình học dựa trên quỹ đạo

Sơ đồ khối quá trình học của cánh tay robot được trình bày ở Hình 1. Quá trình này gồm 5 khối chính: khối Loadcell, khối xử lý trung tâm, khối điều khiển động cơ, động cơ và khối đọc xung encoder.

Khi có moment (từ tay người) tác động vào loadcell tạo tín hiệu lực dạng tương tự. Tín hiệu này sẽ được xử lý và chuyển thành tín hiệu số, đồng thời gửi đến khối xử lý trung tâm thông qua giao thức I2C.

Kit vi điều khiển Arduino MEGA 2560 sẽ đảm nhiệm vai trò xử lý trung tâm cho hệ thống. Các giải thuật học và giải thuật điều khiển được nhúng trực tiếp từ MATLAB SIMULINK vào kit này. Khối nhận giá trị lực dạng tín hiệu số và giá trị góc hiện hành của từng khớp được gửi từ khối loadcell và khối encoder thông qua giao thức I2C (inter-integrated circuit), sau đó xử lý bởi giải thuật và đưa

ra xung PWM điều khiển phù hợp cho động cơ. Mạch cầu H (H-bridge) có vai trò khuếch đại tín hiệu từ khối xử lý trung tâm và cấp cho động cơ. Động cơ quay tạo mô men trên trục đầu ra cho chuyển động của cánh tay robot, đồng thời so sánh với mô men đo người hướng dẫn tập vật lý trị liệu tác động và gửi đến bộ xử lý trung tâm.

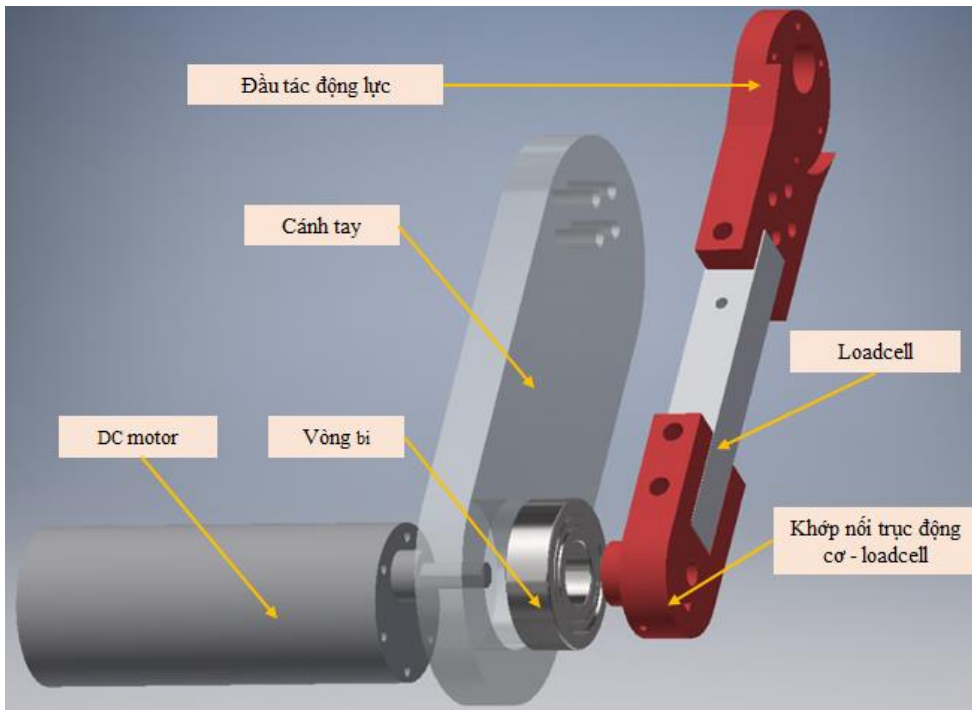


Hình 1. Sơ đồ khối quá trình học của cánh tay robot

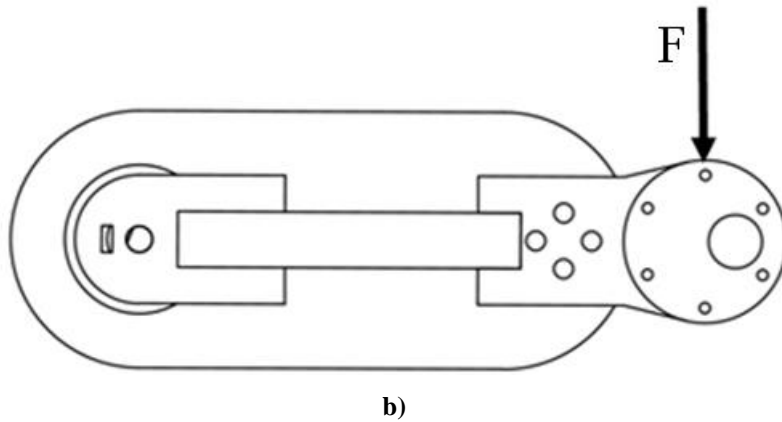
Các encoder nối trực tiếp với trục động cơ (chưa qua giảm tốc) để đo chiều quay và góc quay của trục đầu ra động cơ (đã qua giảm tốc). Tín hiệu xung từ encoder được đọc bởi bộ xử lý của từng khớp và đồng thời gửi dữ liệu đến bộ xử lý trung tâm. Tại đây, các giá trị góc hiện hành sẽ được lưu trữ phục vụ cho việc lặp lại động tác tập vật lý trị liệu.

2.2. Thiết kế cánh tay robot SCARA

Khớp 1 của cánh tay robot SCARA có tích hợp thêm loadcell được thiết kế như Hình 2. Do hai khớp có thiết kế tương tự nhau nên Hình 2 chỉ trình bày thiết kế cơ khí của khớp 1.



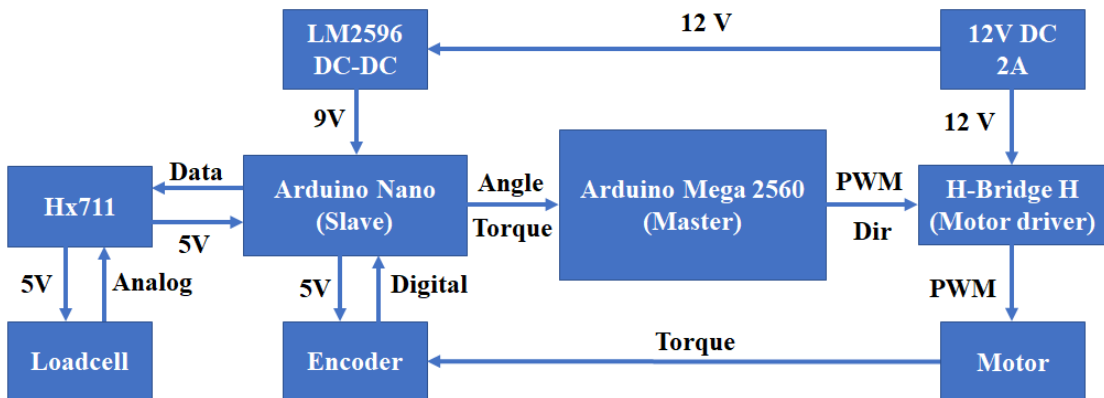
a)



Hình 2. Bản vẽ cơ khí của khớp 1; a) Bản vẽ 3D cơ khí khớp 1; b) Hướng lực tác động lên khớp 1 (hướng nhìn vuông góc - từ trên xuống)

Do động cơ có giảm tốc lớn nên nó sẽ bị cứng (sau giảm tốc) trực đầu ra khi chưa cấp điện và cũng đảm bảo mô men lớn. Khi có lực F tác động làm giá trị điện áp trên loadcell thay đổi và được chuyển

thành dạng số để gửi đến bộ xử lý trung tâm. Tại đây, các tính toán sẽ được thực hiện để đưa ra xung PWM cùng hướng quay phù hợp cho động cơ. Sơ đồ khối của phần cứng mạch điều khiển của từng khớp được trình bày như Hình 3.



Hình 3. Sơ đồ khối kết nối phần cứng mạch điều khiển của cánh tay robot

Tín hiệu từ loadcell (Tải 1 kg) được đọc bởi module chuyển đổi từ tương tự sang số (HX711) có độ phân giải 24 bit. Sau đó, dữ liệu được đọc bởi một vi điều khiển Arduino nano với vai trò là một slave thu thập thông tin của một khớp trong hệ thống bằng giao thức SPI (serial peripheral interface). Hệ thống sử dụng phương thức đa điều khiển kiểu (Multi – Control) (Paine et al., 2013) nên sẽ có từng bộ điều khiển riêng cho từng khớp. Trong đó, hai kit Arduino nano (slave 8, slave 9) với nhiệm vụ giao tiếp với bộ xử lý trung tâm và đọc giá trị các cảm biến trong giao tiếp I2C (inter-integrated circuit). Các vi điều khiển slave sẽ đọc giá trị của loadcell thông qua module HX711, đọc encoder từ động cơ và gửi toàn bộ dữ liệu đến vi điều khiển master.

Vi điều khiển Arduino Mega 2560 đảm nhận việc xử lý chính trong toàn bộ mạch điều khiển. Các giải thuật sẽ được nhúng trực tiếp từ MATLAB & SIMULINK trên kit vi điều khiển. Giải thuật mờ (được thảo luận ở phần tiếp theo) trên vi điều khiển master tính toán xung PWM và hướng quay cấp cho động cơ dựa trên dữ liệu về lực và góc được vi điều khiển slave gửi đến.

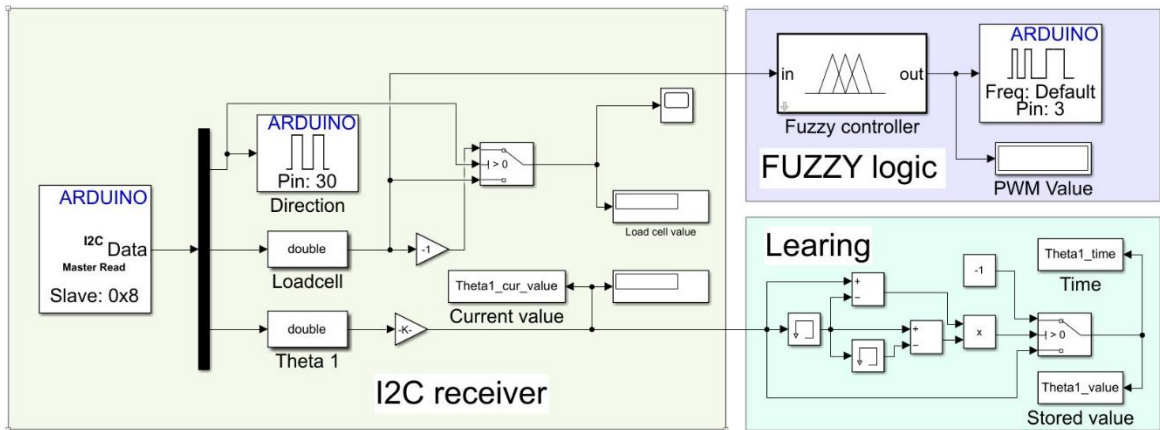
Động cơ một chiều 12V (giảm tốc với tỉ số truyền 1:180, tốc độ 50 rpm) được sử dụng để giảm giá thành khi cánh tay robot được áp dụng vào thực tế. Mô men đầu ra trực động cơ đủ lớn phù hợp cho việc lặp lại động tác khi có tải. Thêm vào đó, encoder được bố trí để đo góc quay của khớp tương ứng. Cánh tay robot sử dụng encoder hall 12 xung

được tích hợp sẵn trên trục động cơ (chưa qua giảm tốc). Sau khi giảm tốc 1:180, 1 vòng quay tại trục đầu ra sẽ được 2.160 xung tương ứng 1/6 độ/xung. Tín hiệu xung từ encoder sẽ được đọc và được xử lý thành góc hiện hành của trục ra động cơ, gửi đến vi điều khiển master thông qua vi điều khiển slave.

Phần mềm được chia thành 3 thuật toán khác thực hiện theo quá trình nối tiếp nhau theo thứ tự: (1) Thuật toán học: Sử dụng giải thuật mờ fuzzy (Hình 4) để điều khiển tín hiệu đầu ra cấp cho động

cơ; (2) Thuật toán xử lý: Loại bỏ các giá trị nhiễu lực do sai số trong quá trình chế tạo phần cơ khí của cánh tay robot và quá trình học gây ra.

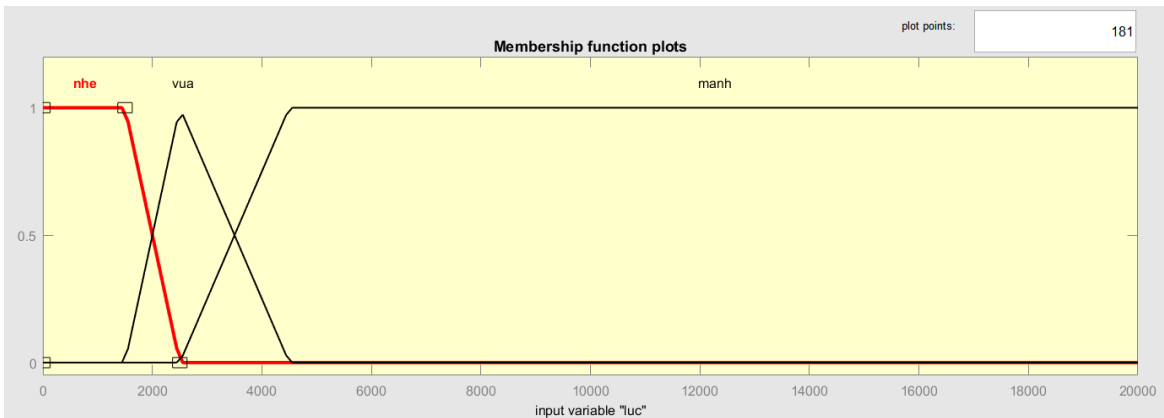
Giải thuật học được chia thành 3 phần chính (Hình 4). Các giá trị lực và góc được gửi lên từ vi điều khiển slave cùng lúc đưa đến khối học và khối mờ (fuzzy). Khối fuzzy có nhiệm vụ điều khiển động cơ quay theo hướng lực tác động. Khối học sẽ ghi lại quỹ đạo đang được thực hiện và lưu trữ làm dữ liệu cho thuật toán lặp lại động tác.



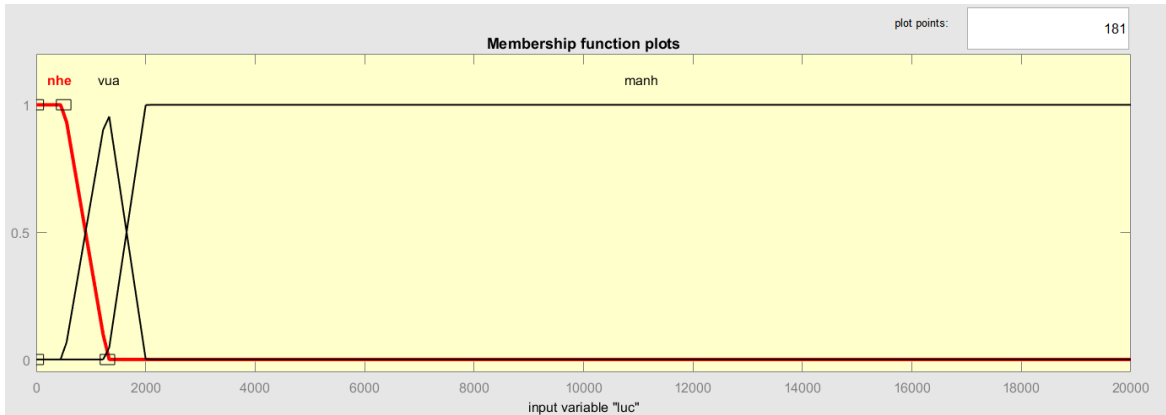
Hình 4. Sơ đồ các khối lệnh thuật toán học trên MATLAB SIMULINK

Thuật toán lặp lại động tác: Lặp lại động tác đã học sử dụng bộ điều khiển PID. Dựa vào giá trị thực nghiệm về lực tác động lên từng khớp và yêu cầu cánh tay robot phải có độ linh hoạt trong quá trình học, các tập mờ được xây dựng riêng tương ứng cho khớp 1 và 2 (Hình 5 và Hình 6). Tương ứng với luật

giải mờ ngõ ra, luật mờ được thiết lập: Nếu lực nhẹ thì động cơ quay chậm, nếu lực vừa động cơ quay vừa và nếu lực mạnh thì động cơ quay nhanh tương ứng với các giá trị PWM được gửi đến động cơ. Chính điều này sẽ giúp động cơ quay được mượt mà hơn.



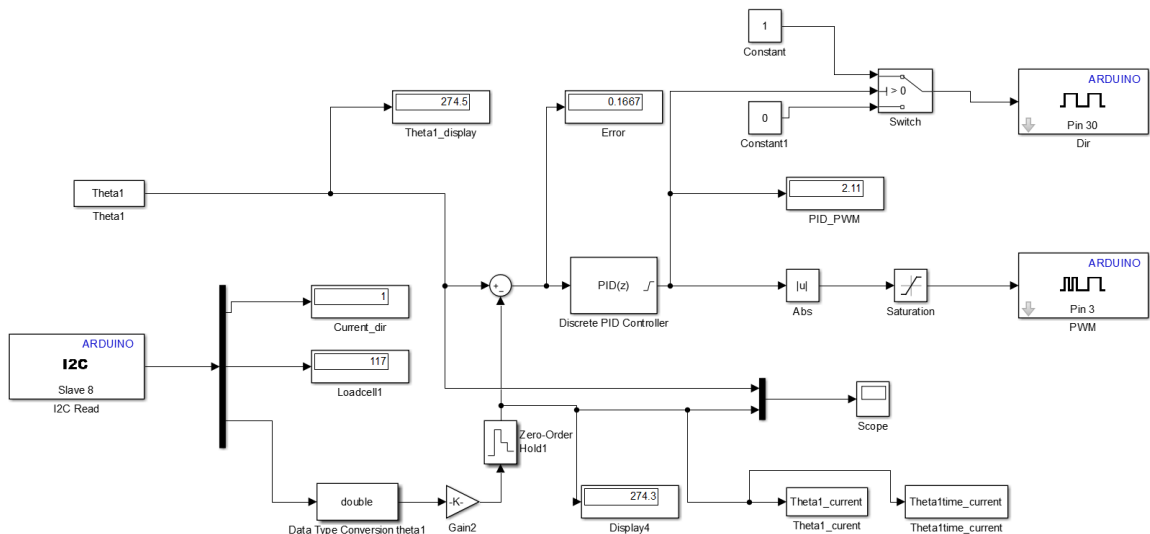
Hình 5. Mờ hóa ngõ vào khớp 1



Hình 6. Mờ hóa ngõ vào khớp 2

Thuật toán xử lý nhằm loại bỏ các biến không cần thiết cho quá trình tự động và cũng đồng thời giảm bớt lượng dữ liệu phải nạp vào Arduino master từ đó tăng thêm thời gian học mà vẫn đảm bảo chuyển động lặp lại là chuyển động gần phù hợp với yêu cầu tập vật lí trị liệu với tốc độ chậm và đều (Hình 7).

Thuật toán sẽ đánh dấu các giá trị mà tại đó có thay đổi chiều chuyển động của các khớp, tất cả các giá trị tăng dần hoặc giảm dần còn lại sẽ mang giá trị là -1. Sau đó thuật toán loại ra các giá trị -1 và giữ lại thời điểm tương ứng với giá trị góc được giữ trước đó.

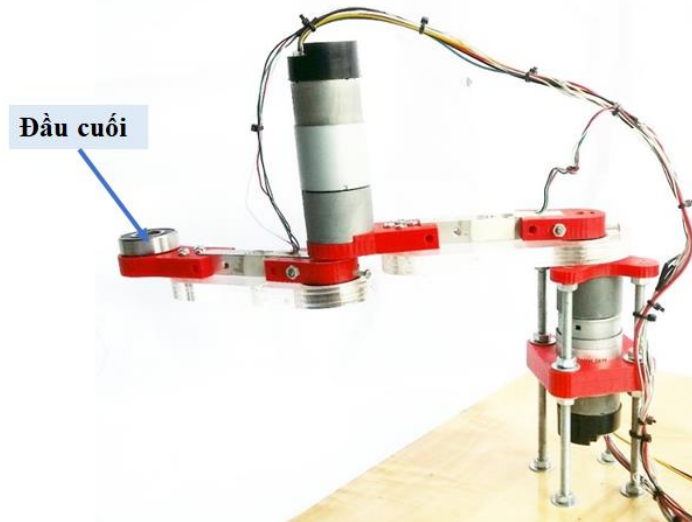


Hình 7. Sơ đồ các khối lệnh thuật toán lặp lại động tác trên MATLAB SIMULINK

Thuật toán PID được dùng để điều khiển quá trình lặp lại quỹ đạo tập của động tác (Hình 7) dựa vào dữ liệu đã được xử lý. Các thông số K_i , K_p , K_d của bộ điều khiển PID cho các khớp được tìm bằng phương pháp thử sai (các thông số chi tiết được đề cập trong mục 3).

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Cánh tay robot SCARA 2 bậc tự do được thiết kế hoàn chỉnh và mô tả ở Hình 8. Trong đó, nghiệm thức (250mg/kg) tăng cao nhất và có ý nghĩa thống kê so với nghiên cứu của Sajid et al. (2009).



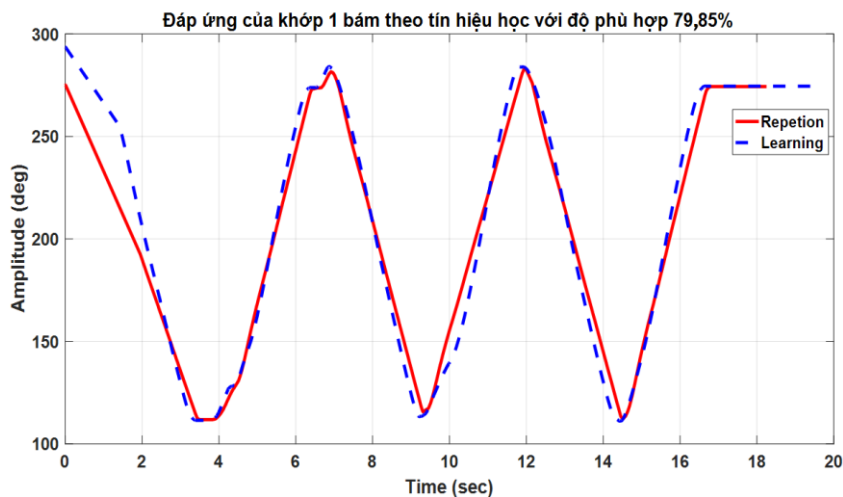
Hình 8. Cánh tay robot SCARA hai bậc tự do (nhìn theo phương ngang)

Độ linh hoạt của robot khi sử dụng động cơ một chiều cứng trực cho quá trình học và đáp ứng của bộ PID được khảo sát bằng cách cho cánh tay robot học và lặp lại động tác lau bàn. Người tập sẽ ở vị trí đối diện tay máy có khoảng cách sao cho phù hợp với độ dài cánh tay của người thực hiện động tác. Bàn tay sẽ đặt tại vị trí đầu cuối được chỉ ra trong Hình 8. Vị trí và cách đặt tay của chuyên gia/bác sĩ và người tập/bệnh nhân là tương tự cho các bài tập. Chuyên gia sẽ dẫn hướng chuyển động cho robot bằng cách tác động lực vào cánh tay robot, các khớp sẽ được điều khiển sao cho đầu cuối của cánh tay tương ứng với quỹ đạo tập.

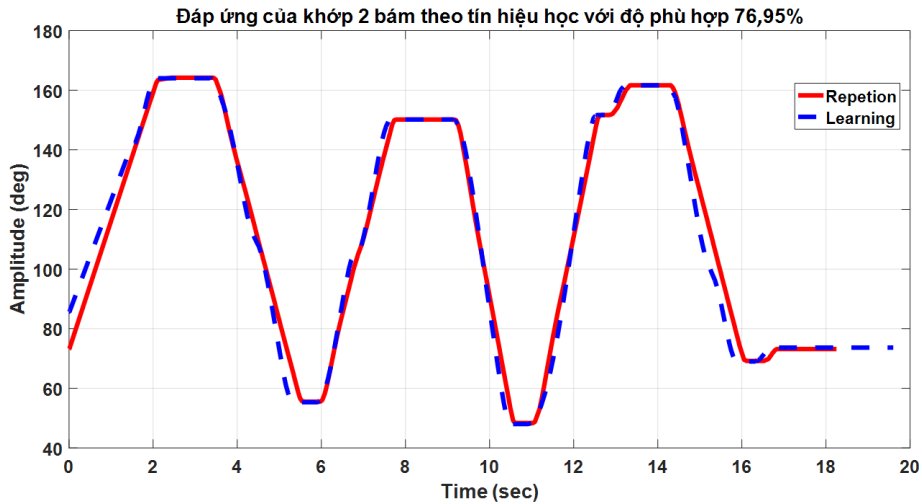
Giá trị góc của các khớp được ghi lại trong quá trình tập và đáp ứng trong quá trình lặp lại được đánh giá độ phù hợp dựa trên (1) (Dũng, 2013).

$$Fit = \left[\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \right] \times 100 \quad (1)$$

Giải thuật mờ và bộ điều khiển vi tích phân tỉ lệ PID đã điều khiển tốt cánh tay robot SCARA hai bậc tự do cho việc học động tác tập vật lý trị liệu và lặp lại theo giới gian thực với đáp ứng không có độ vọt lố và thời gian xác lập tiến về zero (Hình 9 và Hình 10). Độ phù hợp của khớp 1 là 79,85% trong khi của khớp 2 là 76,95%.



Hình 9. Góc quay khớp 1 thực tế, xử lý và tự động



Hình 10. Góc quay khớp 2 thực tế, xử lý và tự động

Mặc dù giải thuật điều khiển PID mờ cho kết quả tốt với độ phù hợp giữa quỹ đạo mong muốn và quỹ đạo lặp lại xấp xỉ 80%. Tuy nhiên, để độ chính xác cao hơn, hướng sắp tới của nhóm nghiên cứu sẽ tích hợp thêm một trong số các giải thuật sau: điều khiển trượt thích nghi hệ phi tuyến dùng mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm (Dũng, 2010), điều khiển hệ phi tuyến dựa trên giải thuật feedforward-feedback (Dũng, 2011) và bộ điều khiển PID dựa trên mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF (Dũng & Hiến, 2018).

4. KẾT LUẬN VÀ ĐỀ XUẤT

Cánh tay robot SCARA được điều khiển tốt trong quá trình học nhờ vào sự kết hợp giữa cảm biến loadcell và giải thuật mờ tìm ra giá trị xung PWM phù hợp để cấp cho động cơ dựa vào lực tác

động lên khớp. Bộ điều khiển PID được tìm dựa trên thực nghiệm đã thực hiện việc lặp lại động tác học tốt với quỹ đạo lặp lại xấp xỉ 80%. Kết quả này hứa hẹn nhiều khả năng ứng dụng trong thực tế, chỉ cần chuyên gia hướng dẫn tập các động tác vật lý trị liệu, robot sẽ di chuyển đúng tọa độ theo quỹ đạo đó, ghi nhớ và lặp lại nhiều lần mà không cần đến người hỗ trợ cho người được tập.

Nghiên cứu này là cơ sở để phát triển hệ tay máy nhiều bậc hơn có thể đặt tay của người bệnh tập vật lý trị liệu và thực hiện động tác. Cơ sở để đánh giá các bài tập cần lặp lại gần chính xác động tác của chuyên gia là dựa trên đánh giá hoàn thành các cử động của bài tập. Các tập mờ trong giải thuật này có thể được tăng thêm, từ đó tăng độ mượt cho robot trong quá trình học và lặp lại.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Avizzano C. A. & Bergamasco, M. (1999). Technological Aids for the treatment of tremor. *Sixth International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*.
- Bayona, N. A., Bitensky, J., Salter, K., & Teasell, R. (2005). The role of task-specific training in rehabilitation therapies. *Topics in Stroke Rehabilitation*, 12(3), 58-65. <https://doi.org/10.1310/BQM5-6YGB-MVJ5-WVCR>
- BergamascoFrisoli, MA., Borelli, L., Montagner, A., Marcheschi, S., Procopio, C., SalsIedo, F., Bergamasco, M., Carboncini, M. C., Tolaini, M., &Frisoli, A., Marcheschi, S., Montagner, A., Procopio, C., Rossi, B., SalsIedo, F., & Tolaini, M. (2007). Arm rehabilitation with a robotic exoskeleton in Virtual Reality. *Proceedings of the IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*; June 13–15; Noordwijk, The Netherlands, 631–642. doi: 10.1109/ICORR.2007.4428491
- Butefisch, C., Hummelsheim, H., Denzler, P., & Mauritz, K.-H. (1995). Repetitive training of isolated movements improves the outcome of motor rehabilitation of the centrally paretic hand. *Journal of the Neurological Sciences*, 130(1), 59–68. [https://doi.org/10.1016/0022-510X\(95\)00003-K](https://doi.org/10.1016/0022-510X(95)00003-K)
- Dijkers, M. P., deBear, P. C., Erlandson, R. F., Kristy, K., Geer, D. M., & Nichols, A. (1991).

- Patient and staff acceptance of robotic technology in occupational therapy: a pilot study. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 28(2), 33-44
<https://doi.org/10.1682/JRRD.1991.04.0033>
- Dũng, H. N. (2010). Điều khiển trượt thích nghi hệ phi tuyến dùng mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 15a, 263-272.
- Dũng, H. N. (2011). Điều khiển hệ phi tuyến dựa trên giải thuật Feedforward-Feedback. *Tạp chí khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 19a, 17-26.
- Dũng, H. N. (2013). Đồng bộ hệ chaotic lorenz dùng bộ điều khiển trượt. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 27, 25-30.
- Guidali, M., Schlink, P., Duschau-Wicke, A., & Riener, R. (2011). Online learning and adaptation of patient support during ADL training in Rehabilitation Robotics (ICORR), IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot., 1-6. DOI: 10.1109/ICORR.2011.5975434
- Kahn, L. E., Lum, P. S., Rymer, W. Z., & Reinkensmeyer, D. J. (2006). Robot-assisted movement training for the stroke-impaired arm: Does it matter what the robot does? *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 43(5), 619-629.
<https://doi.org/10.1682/JRRD.2005.03.0056>
- Klamroth-Marganska, V., Blanco, J., Campen, K., Curt, A., Dietz, V., Ettlin, T., Felder, M., Fellinghauer, B., Guidali, M., & Kollmar, A. (2014). Three-dimensional, task-specific robot therapy of the arm after stroke: a multicentre, parallel-group randomised trial. *The Lancet Neurology*, 13(2), 159-166.
[https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(13\)70305-3](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(13)70305-3)
- Kwakkel, G., Kollen, B., & Wagenaar, R. (2002). Long term effects of intensity of upper and lower limb training after stroke: a randomised trial. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 72(4), 473-479.
<https://dx.doi.org/10.1136%2Fjnp.72.4.473>
- Kwakkel, G., Wagenaar, R. C., Koelman, T. W., Lankhorst, G. J., & Koetsier, J. C. (1997). Effects of intensity of rehabilitation after stroke a research synthesis. *Stroke*, 28(8), 1550-1556.
<https://doi.org/10.1161/01.STR.28.8.1550>
- Lee, M., Rittenhouse, M., & Abdullah, H. A. (2005). Design issues for therapeutic robot systems: results from a survey of physiotherapists. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 42(3), 239-252. <https://doi.org/10.1007/s10846-004-7194-y>
- Liepert, J., Graef, S., Uhde, I., Leidner, O., & Weiller, C. (2000). Training-induced changes of motor cortex representations in stroke patients. *Acta Neurologica Scandinavica*, 101(5), 321-326. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0404.2000.90337a.x>
- Mayo, N. E., Wood-Dauphinee, S., Cote, R., Durcan, L., & Carlton, J. (2002). Activity, participation, and quality of life 6 months poststroke. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 83(8), 1035-1042.
<https://doi.org/10.1053/apmr.2002.33984>
- Nef, T., Mihelj, M., & Riener, R. (2007). ARMin: a robot for patient cooperative arm therapy. *Med. Biol. Eng. Comput.*, 45, 887-900.
<https://doi.org/10.1007/s11517-007-0226-6>
- Nelles, G. (2004). Cortical reorganization—effects of intensive therapy. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 22(3), 239-244.
- Nguyen, H. D., & Huynh, T. H. (2018). Controlling the Position of the Carriage in Real-Time Using the RBF Neural Network Based PID Controller. *The 18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS2018)*, YongPyong Resort in PyeongChang, Republic of Korea, October 17~20, 1418-1423.
- Paine, N., Joshua, S., Mehling, J. S., Holley, J., Nicolaus, A., Radford, N. A., Johnson, G., Chien-LiangFok, C.-L., Sentis, L. (2015). Actuator Control for the NASA-JSC Valkyrie Humanoid Robot: A Decoupled Dynamics Approach for Torque Control of Series Elastic Robots. *Journal of Field Robotics*, 32(3), 378-396. DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.21556>
- Rosen, J., Perry, J. C., Manning, N., Burns, S., Hannaford, B. (2005). The human arm kinematics and dynamics during daily activities – towards a 7 DOF upper limb powered exoskeleton. *Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Robotics*; July 18–20; Seattle, USA, 532– 539.
<https://doi.org/10.1109/ICAR.2005.1507460>
- Sajid, M. S., Bokhari, S. A., Mallick, A. S., Cheek, E. C., & Baig, M. K. (2009). Laparoscopic versus open repair of incisional/ventral hernia: a meta-analysis. *The American Journal of Surgery*, 197(1), 64-72.
<https://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2007.12.051>

- Sanchez, R. J., Liu, J., Rao, S., Shah, P., Smith, R., Rahman, T., Cramer, S. C., Bobrow, J. E., & Reinkensmeyer, D. J. (2006). Automating arm movement training following severe stroke: functional exercises with quantitative feedback in a gravity-reduced environment. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 14(3), 378-389. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2006.881553>
- Van Andel, C. J., Wolterbeek, N., Doorenbosch, C. A. M., Veeger, D. H., & Harlaar J. (2008). Complete 3D kinematics of upper extremity functional tasks. *Gait Posture*, 27(1), 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.03.002>
- Volpe, B. T., Krebs, H. I., and Hogan, N. (2001). Is robot-aided sensorimotor training in stroke rehabilitation a realistic option? *Current opinion in neurology*, 14(6), 745-752. <https://doi.org/10.1097/00019052-200112000-00011>
- Zhang, L.- Q., Park, H.- S., & Ren, Y. (2007). Developing an intelligent robotic arm for stroke rehabilitation. *Proceedings of the IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, June 12–15, Noordwijk, The Netherlands, 984-994. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2007.4428543>