

A Method of Applying 81-Rule Fuzzy Control For Three-Linked Acrobot

Nguyen Tran Minh Nguyet, Nguyen Van Dong Hai*, Nguyen Ngoc Truong Son, Tran Van Thang,
Nguyen Le Tan Tai, Phan Thanh Khang, Nguyen Thanh Giang, Bui Quoc Huy, Le Ngoc Duy Tan, Bui
Tan Tai

Ho Chi Minh city University of Technology and Education (HCMUTE), Vietnam

* Corresponding author. Email: hainvd@hcmute.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 12/10/2022
Revised: 03/11/2022
Accepted: 10/11/2022
Published: 28/04/2022

KEYWORDS

Gymnastic robot;
Genetic algorithm;
Under-actuated system;
Acrobot;
Fuzzy control.

ABSTRACT

Acrobot, which is also called gymnastic robot, is a single input-multi output (SIMO) system which imitates motion of a barbell athlete. However, two links of this model are just equivalent to body and hand of athlete. To imitate better motion of athlete, three-linked acrobot- a complicated multi input-multi output (MIMO) under-actuated system – is developed. Parts of barbell athlete including leg, body and hand, are modelled well by this new system. In this paper, we present a method to apply an 81-rule fuzzy algorithm, which is popularly used for invert pendulum systems, to balance this model at upward equilibrium point. Instead of using a complicated 729-rule fuzzy controller which is set by knowledge of experts, we use more simple fuzzy structure. Through genetic algorithm (GA), the pre-processing and post-processing coefficients of fuzzy controller are chosen. With these suitable coefficients, our fuzzy controller is proved to work well through Matlab/Simulink simulation.

Một Phương Pháp Áp Dụng Điều Khiển Mờ 81-Luật Cho Acrobot Ba Link

Nguyễn Trần Minh Nguyệt, Nguyễn Văn Đông Hải*, Nguyễn Ngọc Trường Sơn, Trần Văn Thắng,
Nguyễn Lê Tấn Tài, Phan Thanh Khang, Nguyễn Thành Giang, Bùi Quốc Huy, Lê Ngọc Duy Tân, Bùi
Tấn Tài

Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP HCM, Việt Nam

* Tác giả liên hệ. Email: hainvd@hcmute.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 12/10/2022
Ngày hoàn thiện: 03/11/2022
Ngày chấp nhận đăng: 10/11/2022
Ngày đăng: 28/04/2022

TỪ KHÓA

Gymnastic robot;
Giải thuật di truyền;
Hệ thống under-actuated;
Acrobot;
Điều khiển mờ.

TÓM TẮT

Acrobot, còn được gọi là gymnastic robot, là một hệ thống một vào- nhiều ra (SIMO) mô phỏng chuyển động của một vận động viên tập xà đơn. Dù vậy, hai link của mô hình này chỉ xấp xỉ phần thân và cánh tay của vận động viên. Để mô tả tốt hơn chuyển động của vận động viên, acrobot ba link – một hệ thống nhiều vào- nhiều ra (MIMO) phức tạp – được phát triển. Những phần cơ thể của vận động viên xà đơn, bao gồm chân, thân và cánh tay, được mô hình hóa tốt thông qua hệ thống mới này. Trong bài báo này, chúng tôi giới thiệu một phương pháp sử dụng giải thuật mờ 81 luật – vốn được dùng rộng rãi cho các hệ thống con lắc ngược – để ổn định hệ acrobot ba link tại điểm làm việc tĩnh hướng lên. Thay vì dùng một bộ điều khiển mờ 729 luật phức tạp được xây dựng bởi kinh nghiệm chuyên gia, chúng tôi sử dụng một cấu trúc mờ đơn giản hơn. Thông qua giải thuật di truyền, các thông số tiền xử lý và hậu xử lý của bộ điều khiển mờ được chọn. Với các thông số phù hợp này, bộ điều khiển mờ của chúng tôi được chứng minh hoạt động tốt trên mô phỏng Matlab/Simulink.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.76.2023.1291>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

1. Giới thiệu

Đối tượng con lắc ngược (inverted pendulum- IP) là đối tượng nghiên cứu được quan tâm trong điều khiển tự động [1]. Rất nhiều giải thuật sau khi được áp dụng thành công cho hệ IP đã được mở rộng áp dụng cho các đối tượng khác có cấu trúc SIMO (single input-multi output: một vào nhiều ra) và MIMO (multi input-multi output: nhiều vào – nhiều ra) under-actuated tương tự, như cần trục 2D [2], cần trục tháp [3]. Đây là những dạng mô hình mà con lắc thay vì được điều khiển ổn định dựng đứng lên thì được điều khiển theo kiểu làm giảm nhanh dao động tự nhiên khi con lắc hướng xuống. Giải thuật mờ 81-luật ở Bảng 2 (phần phụ lục) được đề nghị cho hệ IP [4] đã được thực hiện thành công ở các hệ IP trên xe [4] cũng như IP quay [5] và giải thuật cũng đã được linh hoạt biến đổi để áp dụng thành công ở các hệ thống cần trục 2D [2] và cần trục tháp [3]. Ở các hệ thống này, một biến trạng thái (ví dụ như góc dao động tải) là tự ổn định theo thời gian. Biến trạng thái còn lại (như góc quay cánh tay đòn) là không bị mất ổn định khi bị tác động lệch khỏi vị trí cân bằng. Do đó, điều khiển các hệ MIMO under-actuated này là đơn giản hơn so với điều khiển một hệ cân bằng tại vị trí làm việc ổn định không bền vững, như acrobot. Tuy nhiên, việc thử nghiệm giải thuật mờ 81-luật trên cho một cấu trúc SIMO và MIMO under-actuated có cấu trúc gần với pendubot – một hệ IP quen thuộc – vẫn chưa được áp dụng thử nghiệm.

Acrobot hai link (two-linked acrobot: A2L) là một cấu trúc mô tả hoạt động của một vận động viên tập thể dục dụng cụ, bao gồm cánh tay và toàn bộ phần thân. Tín hiệu điều khiển là động cơ gắn giữa link 1 và 2, tương ứng với lực quay của cánh tay người vận động viên [6]. Việc áp dụng giải thuật tuyến tính LQR đã được thành công để hệ thống ở vị trí TOP trên mô phỏng [7]. Việc áp dụng giải thuật điều khiển mờ để hỗ trợ giải thuật PD đã được áp dụng thành công trên mô phỏng và thực nghiệm cho đối tượng này ở vị trí MID [8]. Tuy nhiên, kết quả thực nghiệm chưa được thực hiện đối với giải thuật mờ đơn thuần.

Acrobot ba link (three-linked acrobot: A3L) là một dạng phát triển của A2L. Nó mô tả chính xác hơn chuyển động của vận động viên thể dục dụng cụ so với A2L. Trong cấu trúc này, 3 link lần lượt mô tả phần cánh tay, phần thân phía trên (từ đầu đến hông) và toàn bộ phần chân (từ hông xuống đến gót chân). Lực quay của hai động cơ tương ứng với lực quay của phần cánh tay và phần hông của người vận động viên. Trong nghiên cứu [9], hệ phương trình phi tuyến của A3L được phân tích. Giải thuật swing-up đã được thiết lập trên mô phỏng để đưa A3L đến được vị trí TOP. Tuy nhiên, trong nghiên cứu đó, việc điều khiển cân bằng tại vị trí TOP chưa được đề cập đến. Trong nghiên cứu [10], A3L đã được phân tích toán học một lần nữa và mô hình thực nghiệm đã được xây dựng. Tuy nhiên, các tác giả trong bài báo trên chỉ mô tả đối tượng A3L hoạt động với link 1 hướng xuống. Họ mô tả dao động qua lại chứ không điều khiển ổn định đối tượng trên ở vị trí hướng lên. Nền tảng thực nghiệm trong bài báo đó cũng khảo sát đối tượng khi link 1 hướng xuống. Do đó, việc khảo sát A3L ở vị trí thẳng đứng hướng lên là mới và cần thiết.

Một bộ điều khiển (BĐK) tuyến tính đã được mô phỏng thành công ở [12] để đưa ra một giải thuật đơn giản để ổn định cân bằng cho hệ. Tuy nhiên, để mở rộng khoảng hoạt động hệ thống – hệ vẫn có thể về vị trí ổn định khi giá trị ban đầu của biến trạng thái ở xa so với vị trí làm việc – thì một giải thuật lai, PD-trượt – được đề nghị ở [11]. Giải thuật lai này đã chứng minh được tính hiệu quả trên mô phỏng. Tuy nhiên, thông qua lý thuyết thiết kế trượt [11] và LQR [12], các BĐK trên đòi hỏi việc xác định thông số mô hình rất chính xác để có thể đưa ra BĐK hiệu quả. Điều này khó đạt được với các mô hình được tự chế tạo, thông số động cơ không được chính xác, các thanh link được giả thiết là dài đồng chất... Trong trường hợp này, giải thuật mờ là một giải pháp phù hợp. Đối với điều khiển mờ, việc xác định hệ phương trình trạng thái, thông số mô hình chính xác là không cần thiết. Việc thiết kế chủ yếu dựa trên hiểu biết chuyên gia về hệ thống, quá trình thử sai để xác định các thông số điều khiển mờ.

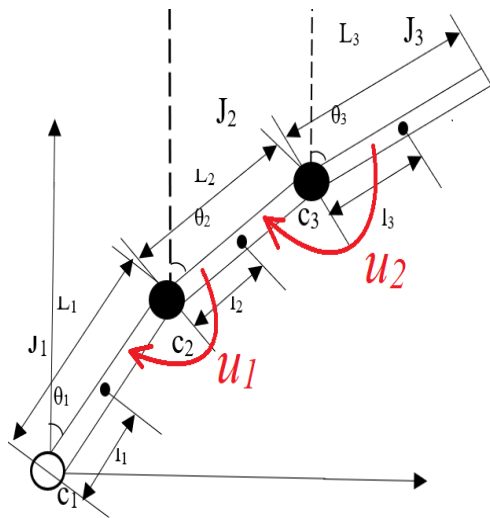
Trong bài báo này, nhóm tác giả mở rộng luật mờ, vốn được đề nghị cho hệ IP và thành công ở các hệ MIMO under-actuated dạng cần trục, sang hệ MIMO under-actuated dạng acrobot ba link. Cấu trúc acrobot là hoàn toàn khác và phức tạp đáng kể so với một lớp các cấu trúc dạng cầu trục nên đóng góp của nghiên cứu này là đáng kể.

2. Mô hình toán học

2.1. Giới thiệu mô hình

Trong nghiên cứu [13], một cấu trúc acrobot n-link được giới thiệu. Tuy nhiên, mô hình trong nghiên cứu đó được giới thiệu ở dạng tổng quát, còn đạo hàm riêng, nguyên hàm nên việc sử dụng để mô tả lại riêng cho trường hợp riêng là 2-link, 3-link trong mô phỏng là khó khăn. Do đó, nhóm tác giả hướng đến dạng mô hình A2L, A3L đã được chứng minh sẵn trong các tài liệu [6], [12]. Việc phát triển thêm cho hệ cao hơn 3 link có thể được xem xét thêm trong tài liệu gợi ý ở [13]. Tuy nhiên, trong nghiên cứu đó, tác giả Sergej Celikovskiy đặt biến trạng thái trên tinh thần tạo ra cấu trúc robot đi bộ.

Mô hình toán học của A3L được phân tích ở [9]. Từ tài liệu đó, ta cũng có mô tả hệ thống thể hiện ở Hình 1. Hệ phương trình động lực học được thể hiện ở (1).



Hình 1. Mô hình toán A3L

Bảng 1. Thông số và biến số mô hình A3L

Thông số/ Biến số	Diễn giải	Giá trị lựa chọn	Đơn vị
θ_i	Góc lệch link i so với phương thẳng đứng ($i=1:3$)		rad
u_1	Momen do động cơ DC gắn ở link 1 tác động vào link 2		Nm
u_2	Momen do động cơ DC gắn ở link 2 tác động vào link 3		Nm
m_i ($i=1,2,3$)	Khối lượng link i ($i=1,2,3$)	0.05	kg
c_i	Hệ số ma sát của khớp i ($i=1, 2, 3$)		Nms
l_i ($i=1,2,3$)	Chiều dài link i ($i=1,2,3$)	0.2	m
l_{ci} ($i=1,2,3$)	Khoảng cách từ trục quay link i đến trọng tâm link i ($i=1,2,3$)	0.1	m
I_i ($i=1,2,3$)	Momen quán tính của link i	$= \frac{1}{3} m_i l_i^2$	kgm ²
m_{ci} ($i=1,2$)	Khối lượng của động cơ tạo ra các momen u_i		kg

Hệ phương trình toán học của hệ thống được thể hiện thông qua hệ phương trình trạng thái sau:

$$A(X) \ddot{X} = B(X, \dot{X}) \dot{X} + C(X) + D \quad (1)$$

Trong đó, $X = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$; $C(X) = [C_1 \sin \theta_1 \ C_2 \sin \theta_2 \ C_3 \sin \theta_3]^T$; $D = [-u_1 \ u_1 - u_2 \ u_2]^T$;

$$A(X) = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \cos(\theta_2 - \theta_1) & A_{13} \cos(\theta_3 - \theta_1) \\ A_{12} \cos(\theta_2 - \theta_1) & A_{22} & A_{23} \cos(\theta_3 - \theta_2) \\ A_{13} \cos(\theta_3 - \theta_1) & A_{23} \cos(\theta_3 - \theta_2) & A_{33} \end{bmatrix};$$

$$B(X, \dot{X}) = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \sin(\theta_2 - \theta_1) \dot{\theta}_2 & B_{13} \sin(\theta_3 - \theta_1) \dot{\theta}_3 \\ B_{21} \sin(\theta_2 - \theta_1) \dot{\theta}_1 & B_{22} & B_{23} \sin(\theta_3 - \theta_2) \dot{\theta}_3 \\ -B_{13} \sin(\theta_3 - \theta_1) \dot{\theta}_1 & B_{32} \sin(\theta_3 - \theta_2) \dot{\theta}_2 & B_{33} \end{bmatrix};$$

$$A_{11} = m_1 l_1^2 + J_1 + (m_2 + m_3 + m_{c1} + m_{c2}) L_1^2; \quad A_{12} = (m_2 l_2 + (m_3 + m_{c2}) L_2) L_1; \quad A_{13} = m_3 l_3 L_1;$$

$$A_{22} = m_2 l_2^2 + J_2 + (m_3 + m_{c2}) L_2^2; \quad A_{23} = m_3 l_3 L_2; \quad A_{33} = m_3 l_3^2 + J_3; \quad B_{11} = -(c_1 + c_2);$$

$$B_{12} = c_2 + (m_2 l_2 + (m_3 + m_{c2}) L_2) L_1; \quad B_{13} = m_3 l_2 L_1; \quad B_{21} = c_2 - (m_2 l_2 + (m_3 + m_{c2}) L_2) L_1;$$

$$B_{22} = -(c_2 + c_3); \quad B_{23} = c_3 + m_3 l_3 L_2; \quad B_{32} = c_3 - m_3 l_3 L_2; \quad B_{33} = -c_3;$$

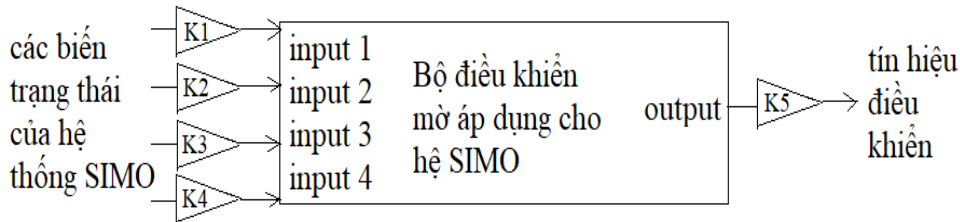
$$C_1 = (m_1 l_1 + (m_2 + m_3 + m c_1 + m c_2) L_1) g; \quad C_2 = (m_2 l_2 + (m_3 + m c_2) L_2) g; \quad C_3 = m_3 l_3 g$$

Từ (1), hệ phương trình động lực học của hệ thống được viết lại dưới dạng sau để có thể mô tả trên Matlab/Simulink:

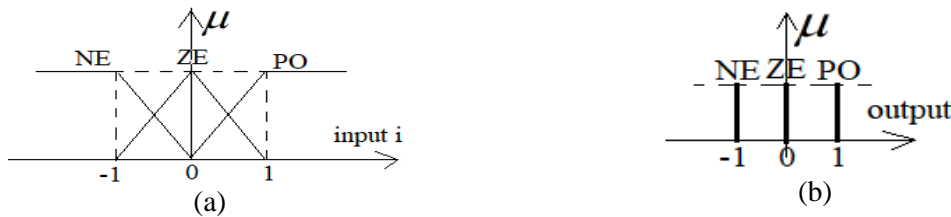
$$\ddot{X} = A^{-1}(X)B(X, \dot{X})\dot{X} + A^{-1}(X)C(X) + A^{-1}(X)D \quad (2)$$

3. Giải thuật mờ

Để điều khiển hệ A3L, nếu chỉ áp dụng một BDK mờ duy nhất với số hàm liên thuộc mỗi ngõ vào là 3, số luật mờ tối thiểu là 3^6 luật. Đây là số lượng luật mờ rất lớn. Do đó, việc hiệu chỉnh luật mờ theo kinh nghiệm chuyên gia là rất khó khăn. Do đó, hướng tiếp cận của chúng tôi áp dụng luật mờ vốn đơn giản hơn và áp dụng nhiều khối mờ để giảm tải sự phức tạp của mỗi bộ mờ trong cấu trúc BDK. Cấu trúc BDK mờ dùng cho hệ SIMO bậc thấp được áp dụng chính trong bài báo này tương ứng với bảng luật mờ ở Bảng 2 (phụ lục) được thể hiện ở Hình 2 và Hình 3.



Hình 2. Cấu trúc bộ điều khiển mờ cho hệ SIMO một vào/ bốn ra



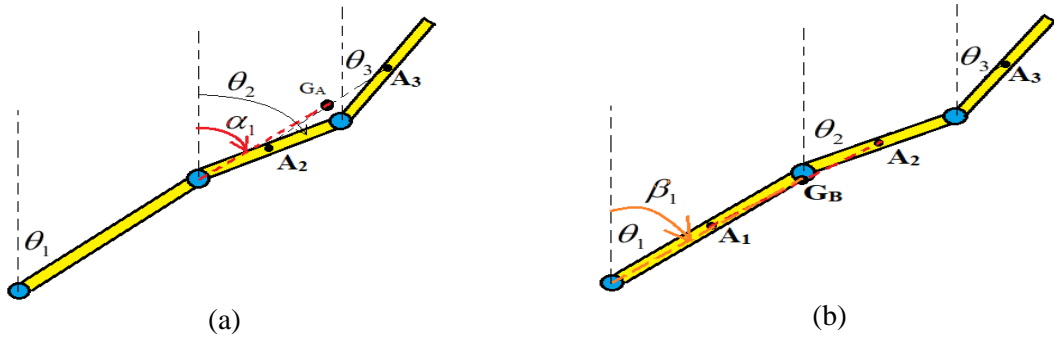
Hình 3. Hàm liên thuộc của các ngõ vào/ra của bộ điều khiển mờ ở [4]: (a)- ngõ vào input thứ i ; (b)- ngõ ra output

Trong cấu trúc này, các thông số K_i (với $i=1:5$) của mỗi BDK mờ là các khối tiền xử lí/ hậu xử lí được lựa chọn để chuẩn hóa các khoảng giá trị của các biến trạng thái ngõ vào/ra của BDK về dạng chuẩn hóa (từ -1 đến 1) của các hàm liên thuộc (được thể hiện ở Hình 3). Với ngõ vào nào được ưu tiên điều khiển hơn thì tiền xử lí tương ứng ngõ vào đó sẽ được hiệu chỉnh tăng lên tương đối so với các ngõ tiền xử lí của các ngõ vào khác. Để tăng cường sự tác động của tín hiệu ngõ ra, khối hậu xử lí sẽ được hiệu chỉnh tăng. Tuy vậy, việc hiệu chỉnh tăng giảm các khối tiền/ hậu xử lí đều ảnh hưởng qua lại lẫn nhau giữa các biến trạng thái và ngõ ra nên việc hiệu chỉnh các khối xử lí cũng là tương đối.

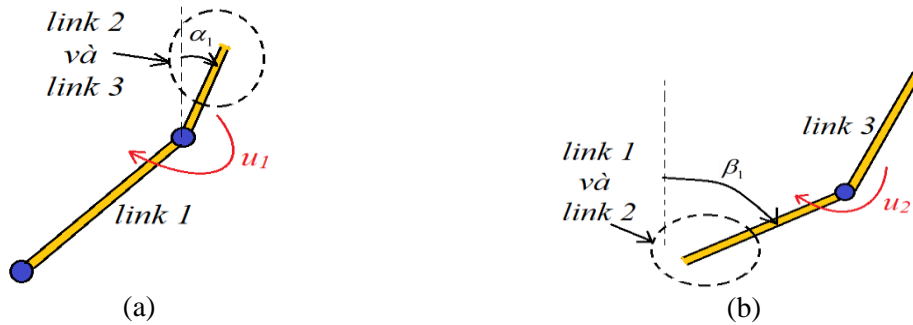
Cấu trúc BDK mờ dạng này đã được áp dụng tốt cho các hệ SIMO hai bậc như IP trên xe [4] và IP quay [5]. Để áp dụng được BDK mờ của SIMO hai bậc cho A3L, chúng tôi xấp xỉ hệ thống trên về hai hệ thống SIMO hai bậc tương đương được thể hiện ở Hình 5. Ở Hình 5a, sự kết hợp của link 2 và 3 sẽ tạo ra một khối giả lập. Trọng tâm khối giả lập này kết hợp với trục quay động cơ DC 1 tạo ra một góc là α_1 (độ) so với phương thẳng đứng. Ở Hình 5b, sự kết hợp của link 1 và 2 sẽ tạo ra một khối giả lập. Trọng tâm khối giả lập này kết hợp với trục quay động cơ DC 2 tạo ra một góc là β_1 (độ) so với phương thẳng đứng. Để đơn giản, ta giả thiết khi A3L cân bằng thì các công thức sau được xấp xỉ:

$$\alpha_1 \approx \theta_2; \quad \beta_1 \approx \theta_1 \quad (3)$$

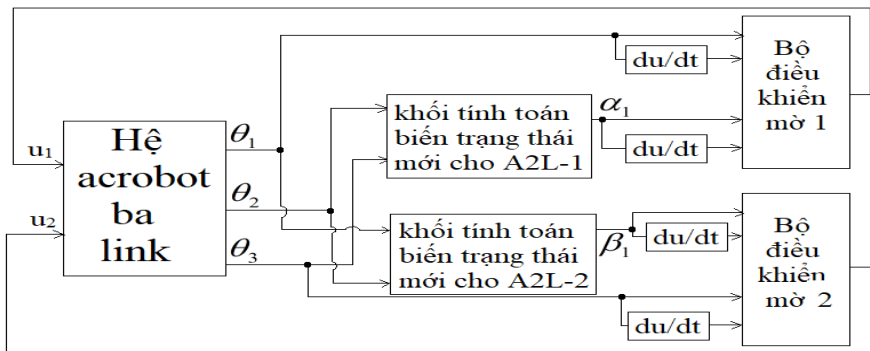
Cấu trúc mờ áp dụng cho A3L được thể hiện ở Hình 6. Trong đó, BDK mờ 1 và BDK mờ 2 được áp dụng lần lượt được áp dụng để điều khiển các đối tượng A2L-1 (Hình 5a) và A2L-2 (Hình 5b).



Hình 4. Mô tả thành phần trọng tâm các khối link



Hình 5. Sự tương đương của A3L với hai hệ SIMO hai bậc tương đương: (a)- hệ A2L-1 gồm một phần gồm chỉ link 1 và một phần gồm cả link 2 và 3; b) hệ A2L-2 gồm một phần gồm cả link 1 và 2 và phần gồm chỉ link 3



Hình 6. Cấu trúc điều khiển mờ cho hệ A3L

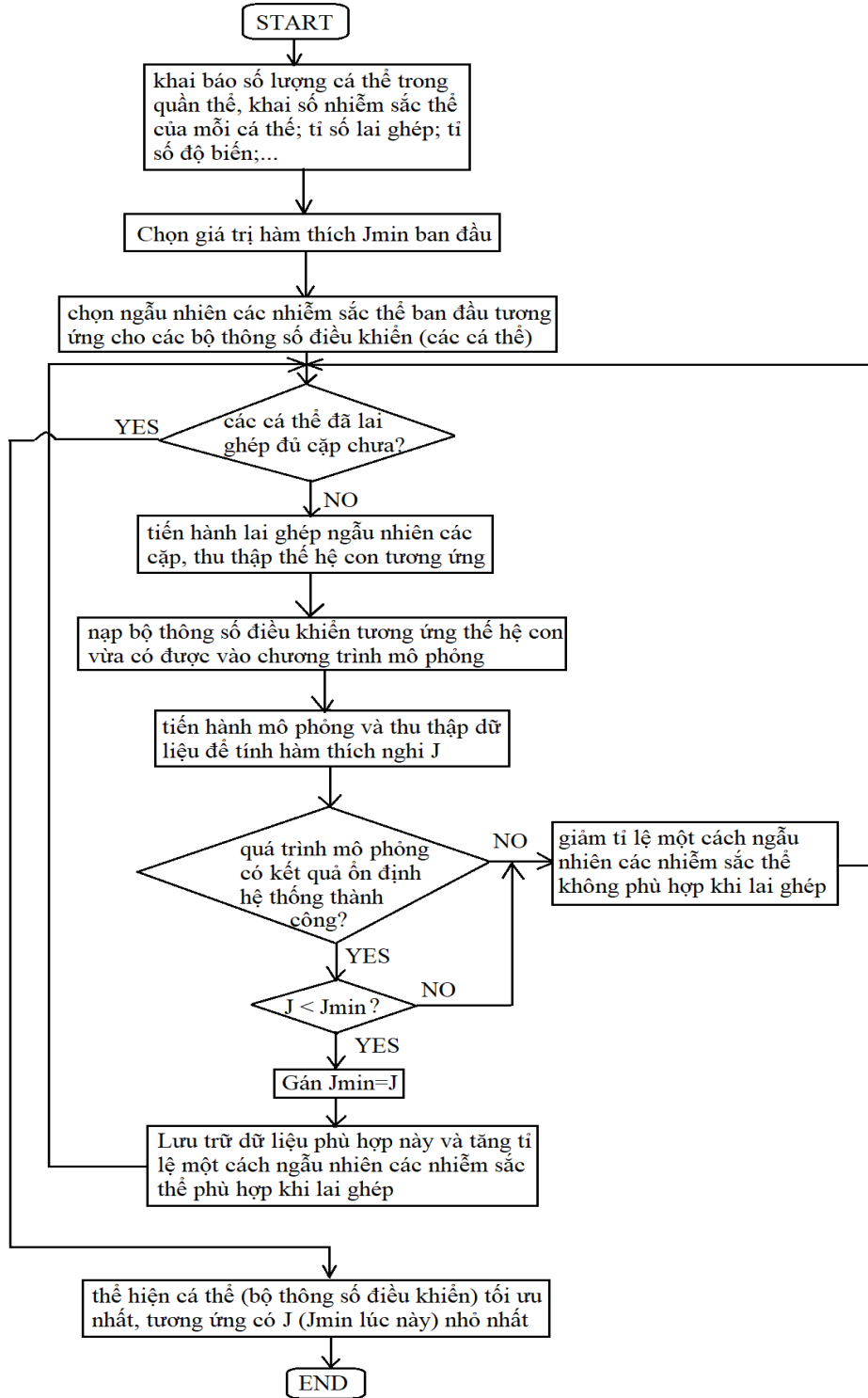
Ở đối tượng IP trên xe (cart and pole – C&P) – một đối tượng SIMO hai bậc, ngõ vào khối mờ ở Hình 2 lần lượt là vị trí xe, vận tốc xe, góc con lắc, vận tốc góc con lắc.

Để áp dụng luật mờ SIMO cho đối tượng A2L-1, ta nhận thấy:

- Khi θ_1 dương thì u_1 cần âm để cân bằng. Điều này ngược chiều quy ước khi áp dụng BDK mờ ở Bảng 2. Do đó, ngõ vào input 1 của BDK mờ 1 là $-\theta_1$ (rad), ngõ vào input 2 của BDK mờ 1 là $-\dot{\theta}_1$ (rad/s).
- Khi α_1 dương thì u_1 cần dương để cân bằng. Điều này cùng chiều quy ước khi áp dụng BDK mờ ở Bảng 2. Do đó, ngõ vào input 3 của BDK mờ 1 là α_1 (rad), ngõ vào input 4 của BDK mờ 1 là $\dot{\alpha}_1$ (rad/s).
- Do các input đã được chỉnh phù hợp chiều dương quy ước với ngõ ra u_1 nên các thông số tiền xử lý và hậu xử lý của BDK mờ 1 (lần lượt được chọn là K1_1, K2_1, K3_1, K4_1, K5_1) sẽ được lựa chọn với giá trị dương.

Tương tự, để áp dụng luật mờ SIMO cho đối tượng A2L-2, ta thấy:

- Khi β_1 dương thì u_2 cần dương để cân bằng. Điều này là phù hợp với chiều quy ước khi áp dụng BDK mờ ở Bảng 2. Do đó, ngõ vào input 1 của BDK mờ 2 là β_1 (rad), ngõ vào input 2 của BDK mờ 2 là β_1 (rad/s).



Hình 7. Lưu đồ tính toán GA để tìm kiếm và tối ưu hóa BDK mờ cho A3L

- Khi θ_3 dương thì u_2 cần dương để cân bằng. Điều này là phù hợp với chiều quy ước khi áp dụng BDK mờ ở Bảng 2. Do đó, ngõ vào input 3 của BDK mờ 2 là θ_3 (rad), ngõ vào input 4 của BDK mờ 2 là $\dot{\theta}_3$ (rad/s).

- Do các input đã được chỉnh phù hợp chiều dương quy ước với ngõ ra u_1 nên các thông số tiền xử lý và hậu xử lý của BDK mờ 2 (lần lượt được chọn là K1_2, K2_2, K3_2, K4_2, K5_2) sẽ được lựa chọn với giá trị dương.

Việc lựa chọn các thông số tiền xử lý và hậu xử lý của các BDK mờ 1 và 2 có thể được lựa chọn phù hợp thông qua thử sai. Tuy nhiên, việc áp dụng phương pháp này là khó khăn và tốn nhiều công sức. Do đó, việc áp dụng giải thuật tìm kiếm như PSO hay giải thuật di truyền (genetic algorithm -GA) là cần thiết. Theo lý thuyết, nếu thời gian tìm kiếm là đủ dài thì giải thuật tìm kiếm nào cũng dẫn đến kết quả tối ưu nhất. Trong hai giải thuật trên, GA là thông dụng hơn. Từ đó, việc áp dụng GA được chúng tôi áp dụng để tìm kiếm các thông số tiền xử lý và hậu xử lý phù hợp. GA có hai tác dụng chính trong áp dụng thiết kế BDK là “tìm kiếm” và “tối ưu hóa” thông số BDK. Quá trình tìm kiếm và tối ưu hóa BDK dùng GA được thực hiện như ở Hình 7. Hàm thích nghi được lựa chọn là

$$J = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^3 \theta_j^2(k) \quad (4)$$

Trong đó, N là số mẫu thu thập được trong quá trình mô phỏng (ví dụ: nếu ta chọn thời gian lấy mẫu là 0.01s và thời gian mô phỏng là 10s thì N=1001). Hàm thích nghi càng nhỏ tức thông số BDK tìm được càng tối ưu.

4. Kết quả mô phỏng

Chương trình mô phỏng được thể hiện ở Hình 8. Thời gian mô phỏng được chọn là 10s. Thông số mô hình ở Bảng 1 được chọn như sau:

$$L1=0.25; L2=L1; L3=L1; I1=0.125; I2=I1; I3=I1; m1=2; m2=2; m3=2; mc1=0.3; mc2=0.3; \quad (5)$$

$$c1=0.7; c2=0.7; c3=0.7; g=9.81;$$

Giá trị ban đầu của các biến trạng thái được lựa chọn như sau:

$$\theta_1=0; \dot{\theta}_1=0; \theta_2=0; \dot{\theta}_2=0.1 \text{ (rad)}; \theta_3=0; \dot{\theta}_3=0 \quad (6)$$

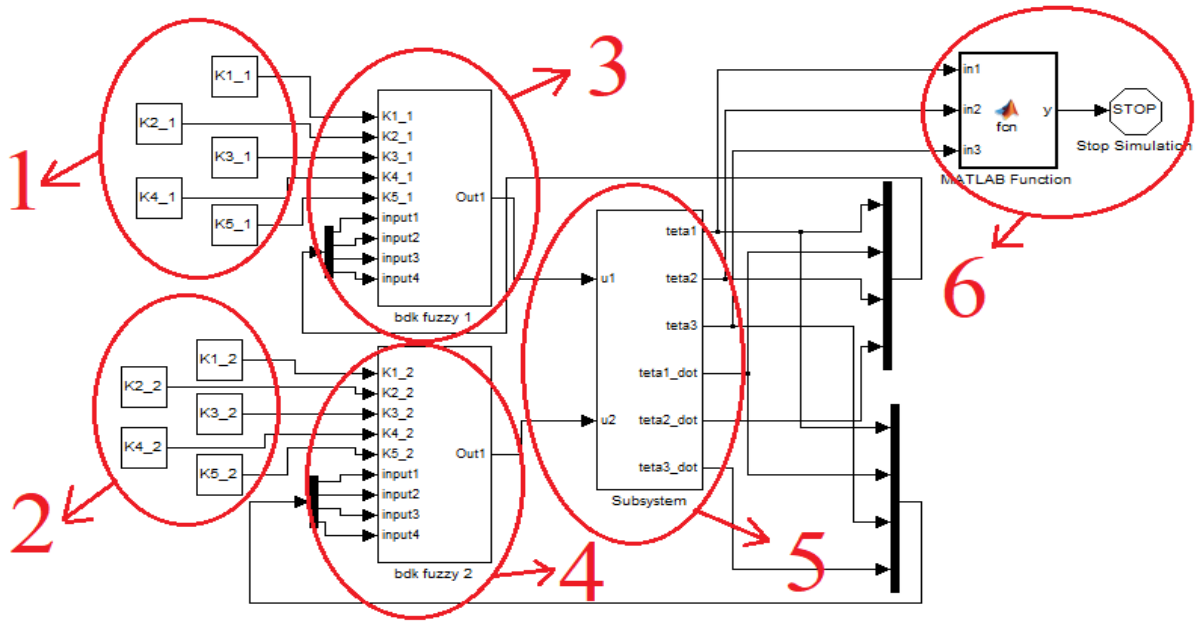
Thời gian lấy mẫu là 0.01s. Các thông số của giải thuật GA được chọn như sau: số cá thể trong quần thể là 20; số nhiễm sắc thể trong mỗi cá thể là 10 (do có 10 thông số mờ cần tìm kiếm); hệ số lai ghép là 0.6; hệ số đột biến là 0.4.

Quá trình chạy GA là quá trình mô phỏng nhiều lần được mô tả như ở Hình 7. Giá trị hàm J được cập nhật với giá trị giảm dần theo quá trình chạy các thế hệ của GA. Ta nhận thấy, J giảm dần khi GA chạy đủ lâu. Qua quá trình mô phỏng, khi số thế hệ đạt 10000 thì giá trị J không thay đổi nhiều nữa. Điều này đưa ra các kết luận:

- Cấu trúc BDK mờ được đề nghị ở bài báo này đã điều khiển thành công mô hình A3L. Điều này do GA đã tìm được thông số phù hợp để quá trình mô phỏng chạy được hết toàn thời gian mô phỏng (trong trường hợp này, thời gian mô phỏng được nhóm chọn là 10s).

- GA là phù hợp để tìm kiếm và tối ưu hóa thông số điều khiển mờ.

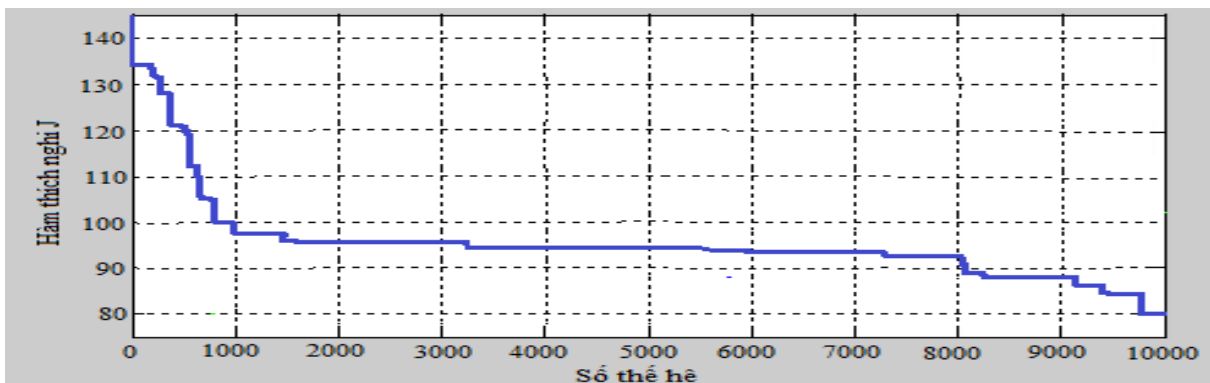
- Ở thế hệ thứ 10000 trở đi, có khả năng chương trình GA đã rơi vào cực trị cục bộ. Việc hiệu chỉnh tầm và khoảng tìm kiếm có thể là một biện pháp.



Hình 8. Chương trình mô phỏng mờ cho A3L

Giải thích các khối trong Hình 8:

- (1) - Các khối tiền/ hậu xử lí của BĐK mờ thứ 1
- (2) - Các khối tiền/ hậu xử lí của BĐK mờ thứ 2
- (3) - BĐK mờ thứ 1
- (4) - BĐK mờ thứ 2
- (5) - Khối mô tả hệ A3L
- (6) - Khối tạo tình trạng dừng mô phỏng để tránh treo chương trình nếu biến trạng thái vượt giới hạn cho phép



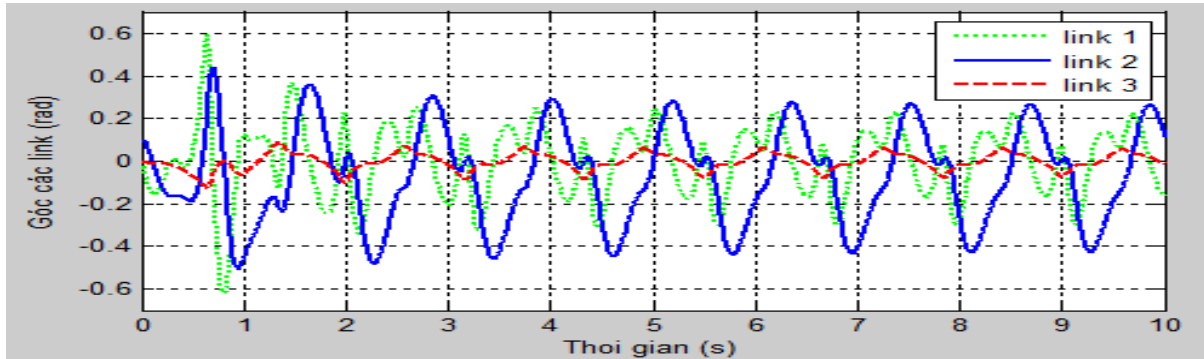
Hình 9. Sự thay đổi giá trị hàm thích nghi J theo số thế hệ GA

Trong Hình 9, giá trị hàm J ở (4) theo thời gian được thể hiện các thế hệ. Ta nhận thấy hàm này càng giảm chứng tỏ tổng bình phương các sai số là giảm theo thế hệ. Điều này tương ứng việc bám vị trí TOP của A3L là tốt dần theo thế hệ. Kết quả mô phỏng của các giá trị thông số điều khiển ở các BĐK 1 và 2 sau khi được tìm kiếm bằng GA có thể được so sánh ở hai giá trị ở các thế hệ thứ 9000 và 10000. Ở thế hệ 9000 và 10000, ta lần lượt có thông số điều khiển được tìm ra bởi GA được liệt kê ở (7) và (8).

$$K1_1=94.2231; K1_2=2.4881; K1_3=45.2189; K1_4=92.5734; K1_5=57.3298; J= 88.16 \quad (7)$$

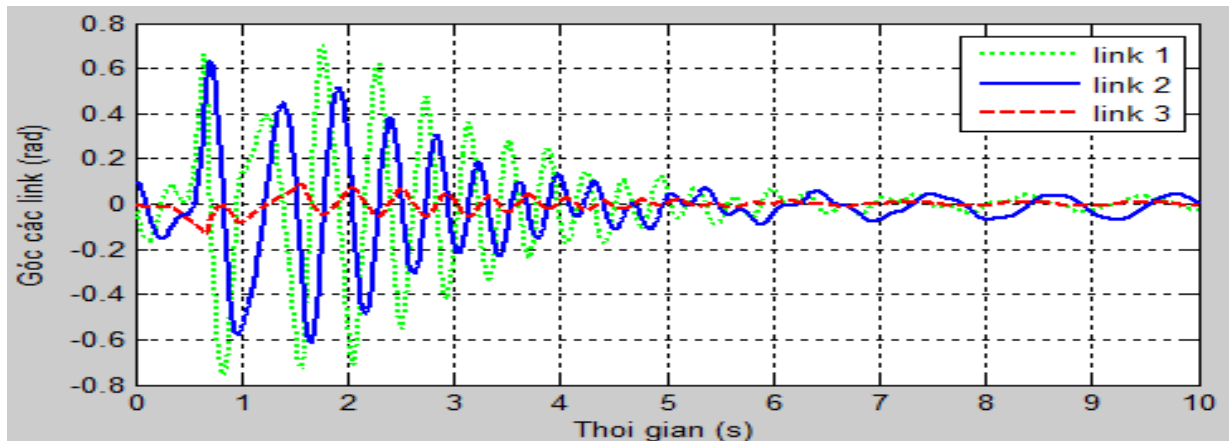
$$K1_1=23.7239; K1_2=4.2377; K1_3=19.34258; K1_4=86.4634; K1_5=23.3234; J=80.87 \quad (8)$$

Đáp ứng hệ thống dưới tác động của các BĐK có thông số như ở (7) và (8) được thể hiện lần lượt ở Hình 10 và Hình 11 dưới đây.



Hình 10. Đáp ứng A3L với bộ thông số ở (7)

Trong Hình 10, ta thấy link 1 dao động từ -0.6 rad đến 0.6 rad và ổn định dao động sau 3s. Ở trạng thái ổn định, link này vẫn dao động từ -0.3 rad đến 0.22 rad chứ không về vị trí 0 hẳn. Link 2 dao động trong khoảng từ -0.5 rad đến 0.42 rad trước khi rơi vào trạng thái dao động ổn định quanh khoảng -0.41 rad đến 0.3 rad sau khoảng thời gian xác lập 3s. Dao động của link 3 là ít nhất, tầm -0.1 rad đến 0.1 rad quanh vị trí cân bằng. Như vậy, hệ A3L ổn định thành công nhưng dao động còn nhiều.



Hình 11. Đáp ứng A3L với bộ thông số ở (8)

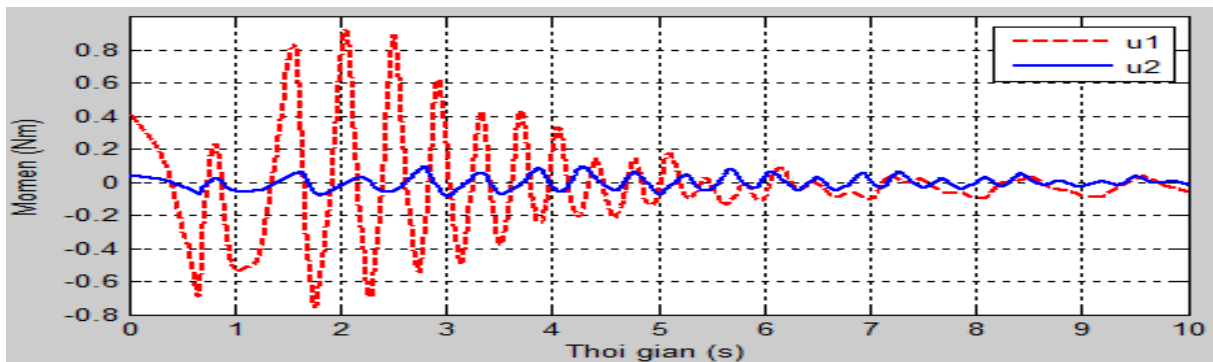
Trong Hình 11, link 1 dao động trong khoảng -0.7 rad đến 0.7 rad và ổn định dao động sau 5 giây. Như vậy, khoảng thời gian xác lập của hệ thống ở Hình 11 là dài hơn so với ở Hình 10. Độ dao động ban đầu của hệ thống (đối với link 1) là lớn hơn ở Hình 11 so với ở Hình 10. Tương ứng, link 2 cũng dao động lớn (-0.6 rad đến 0.6 rad) so với Hình 10. Thời gian xác lập của link 2 cũng là 5s, lớn hơn so với 3s ở thí nghiệm trước. Tuy nhiên, khi ổn định rồi thì độ dao động của link 1 và link 2 là nhỏ hơn nhiều so với thí nghiệm trước: link 1 dao động trong khoảng -0.04 rad đến 0.04 rad (thay vì -0.3 rad đến 0.3 rad ở thí nghiệm trước); link 2 dao động trong khoảng từ -0.05 rad đến 0.05 rad (thay vì -0.41 rad đến 0.3 rad ở thí nghiệm trước). Link 3 ở Hình 11 dao động rất nhỏ quanh vị trí ổn định trong khi link này dao động lớn từ -0.08 đến 0.08 rad quanh vị trí cân bằng ở Hình 10.

Thông qua Hình 10 và Hình 11, thông số được GA tối ưu hóa đã cải thiện rõ rệt sự dao động sau khi ổn định xác lập của hệ A3L. Tuy nhiên, thông số tối ưu hơn lại làm xấu đi dao động ban đầu, khi quá độ, của hệ thống. Tuy vậy, việc áp dụng GA đã cho ra thông số tối ưu hơn theo thời gian khi so sánh hàm thích nghi J có được (ở (7) và (8)). Đáp ứng BDK ở Hình 11 có giá trị hàm thích nghi nhỏ hơn ở Hình 10 ($J=80.87$ so với $J=88.16$) nên có đáp ứng tốt hơn.

Tuy vậy, dao động của hệ thống ở mô phỏng không bị triệt tiêu hoàn toàn, ngay cả khi chương trình GA chạy rất lâu. Điều này có thể được lý giải là các luật mờ trong Bảng 2 là chưa phù hợp hoàn toàn

cho đối tượng A3L. Mặt khác, việc kết hợp 2 BDK mờ có thể làm một số luật không còn chính xác so với khi được áp dụng cho 1 hệ SIMO hai bậc đơn lẻ (như IP trên xe). Như vậy, việc áp dụng BDK mờ cho hệ SIMO là phụ hợp nhưng cần được cải tiến thêm. Một biện pháp cải tiến là sửa chữa các luật mờ trong Bảng 2 trước khi áp dụng cho A3L.

Ở Hình 12, tín hiệu momen u_1 và u_2 từ Hình 1 được trình bày. Các tín hiệu điều khiển này được tương ứng với bộ thông số (8), tức tương ứng với BDK fuzzy đã được tối ưu hóa thông qua GA. Ta thấy, tín hiệu điều khiển ở các link cũng không về hẳn giá trị 0. Tín hiệu u_1 dao động quanh giá trị 0, trong khoảng từ -0.1 Nm đến 0.1 Nm sau khi dao động lớn từ -0.8 Nm đến 0.85 Nm. Tín hiệu u_2 dao động quanh giá trị 0, trong khoảng từ -0.02 rad đến 0.03 rad. Tương ứng với các biến trạng thái không về 0 được và dao động quanh vị trí cân bằng (Hình 11), các tín hiệu điều khiển cũng không về 0. Điều này khẳng định lại sự chưa tối ưu trong các luật điều khiển ở Bảng 2 khi áp dụng cho hệ A3L. Trong trường hợp này, GA không phải là giải pháp tuyệt đối để cải thiện chất lượng điều khiển. Cũng trong Hình 12, ta thấy, tín hiệu điều khiển u_1 là lớn hơn và dao động mạnh hơn u_2 . Điều này được lý giải là do u_1 phải chịu sức nặng của cả 2 link (link 2 và link 3) so với u_2 chỉ chịu sức nặng của 1 link (link 3).



Hình 12. Tín hiệu momen (Nm) tác động vào các link 2 và 3

6. Kết luận

Trong bài báo, chúng tôi mở rộng việc áp dụng BDK mờ - vốn chỉ dành cho hệ SIMO hai bậc- sang đối tượng cân bằng MIMO under-actuated phức tạp như hệ A3L. BDK mờ ở [4] đã được chúng tôi áp dụng thành công bằng cách xây dựng cấu trúc ghép phù hợp và điều này đã được chứng minh thông qua mô phỏng Matlab/Simulink. Việc tìm kiếm và tối ưu hóa thông số điều khiển của cấu trúc mờ này được GA thực hiện thành công. Tuy nhiên, kết quả mô phỏng cũng cho thấy BDK chưa triệu tiêu được dao động khi xác lập của các link. Điều này được chúng tôi lý giải là do các luật mờ trong Bảng 2 là chưa hoàn toàn phù hợp với hệ A3L. Việc thay đổi luật mờ phải dựa vào kiến thức chuyên gia trong quá trình vận hành hệ thống. Trong trường hợp này, đây là sự kết hợp của hai bộ mờ khác nhau nên việc hiệu chỉnh từng luật trong mỗi bộ mờ là rất khó khăn. Đây là một vấn đề mở nghiên cứu trong tương lai.

Lời cảm ơn

Công trình này thuộc về đề tài nghiên cứu khoa học T2022-50, được tài trợ kinh phí bởi trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TPHCM (HCMUTE), Việt Nam.

Phụ lục 1

Bảng 2. 81-luật mờ áp dụng cho hệ IP [4]

No.	Input1	Input2	Input3	Input4	Output
1	NE	NE	PO	NE	NB
2	NE	NE	PO	ZE	NB
3	NE	NE	PO	PO	NM
4	NE	NE	ZE	NE	NB
5	NE	NE	ZE	ZE	NM
6	NE	NE	ZE	PO	NS
7	NE	NE	NE	NE	NM
8	NE	NE	NE	ZE	NS
9	NE	NE	NE	PO	ZE
10	NE	ZE	PO	NE	NB
11	NE	ZE	PO	ZE	NM
12	NE	ZE	PO	PO	NS
13	NE	ZE	ZE	NE	NM
14	NE	ZE	ZE	ZE	NS
15	NE	ZE	ZE	PO	ZE
16	NE	ZE	NE	NE	NS
17	NE	ZE	NE	ZE	ZE
18	NE	ZE	NE	PO	PS
19	NE	PO	PO	NE	NM
20	NE	PO	PO	ZE	NS
21	NE	PO	PO	PO	ZE
22	NE	PO	ZE	NE	NS
23	NE	PO	ZE	ZE	ZE
24	NE	PO	ZE	PO	PS
25	NE	PO	NE	NE	ZE
26	NE	PO	NE	ZE	PS
27	NE	PO	NE	PO	PM
28	ZE	NE	PO	NE	NB
29	ZE	NE	PO	ZE	NM
30	ZE	NE	PO	PO	NS
31	ZE	NE	ZE	NE	NM
32	ZE	NE	ZE	ZE	NS
33	ZE	NE	ZE	PO	ZE
34	ZE	NE	NE	NE	NS
35	ZE	NE	NE	ZE	ZE
36	ZE	NE	NE	PO	PS
37	ZE	ZE	PO	NE	NM
38	ZE	ZE	PO	ZE	NS
39	ZE	ZE	PO	PO	ZE
40	ZE	ZE	ZE	NE	NS
41	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
42	ZE	ZE	ZE	PO	PS
43	ZE	ZE	NE	NE	ZE
44	ZE	ZE	NE	ZE	PS
45	ZE	ZE	NE	PO	PS
46	ZE	PO	PO	NE	PM
47	ZE	PO	PO	ZE	NS
48	ZE	PO	PO	PO	PS
49	ZE	PO	ZE	NE	ZE
50	ZE	PO	ZE	ZE	PS
51	ZE	PO	ZE	PO	PM
52	ZE	PO	NE	NE	PS
53	ZE	PO	NE	ZE	PM
54	ZE	PO	NE	PO	PB
55	PO	NE	PO	NE	NM
56	PO	NE	PO	ZE	NS
57	PO	NE	PO	PO	ZE
58	PO	NE	ZE	NE	NS
59	PO	NE	ZE	ZE	ZE
60	PO	NE	ZE	PO	PS
61	PO	NE	NE	ZE	ZE
62	PO	NE	NE	ZE	PS
63	PO	NE	NE	PO	PM
64	PO	ZE	PO	NE	NS
65	PO	ZE	PO	ZE	ZE
66	PO	ZE	PO	PO	PS
67	PO	ZE	ZE	NE	ZE
68	PO	ZE	ZE	ZE	PS
69	PO	ZE	ZE	PO	PM
70	PO	ZE	NE	NE	PS
71	PO	ZE	NE	ZE	PM
72	PO	ZE	NE	PO	PB
73	PO	PO	PO	NE	ZE
74	PO	PO	PO	ZE	PS
75	PO	PO	PO	PO	PM
76	PO	PO	ZE	NE	PS
77	PO	PO	ZE	ZE	PM
78	PO	PO	ZE	PO	PB
79	PO	PO	NE	NE	PM
80	PO	PO	NE	ZE	PB
81	PO	PO	NE	PO	PB

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Nemitha, B. Vijaya Bhaskar, and R. Kumar, "A Comparative Study of Inverted Pendulum," in *Proceedings of the International Conference on Soft Computing Systems, Advances in Intelligent Systems and Computing (Springer)*, pp. 593-602, 2016.
- [2] N. V. D. Hai, N. T. Van, and N. M. Tam, "Application of fuzzy and PID algorithm in gantry crane control," *Journal of Technical Education Science*, no. 44A, pp. 48-53, 2017.
- [3] V. D. H. Nguyen et al., "Experimental Fuzzy Control for Tower Crane," *Journal of Science and Technology Education - Ho Chi Minh City University of Technology and Education*, no. 68, pp. 36-47, 2022.
- [4] H. T. Hoang, "Smart Control System," (in Vietnamese), VNU-HCM Publishing House.
- [5] T. T. H. Le et al., "Fuzzy Controller for Rotary Inverted Pendulum," *Robotica & Management*, vol. 23, no. 2, pp. 16-20, 2018.
- [6] R. Tedrake, "Underactuated Robotics: Algorithms for Walking, Running, Swimming, Flying, and Manipulation" (Course Notes for MIT 6.832).

- [7] H. C. Tran *et al.*, "Genetic Algorithm Implementation for Optimizing Linear Quadratic Algorithm to Control Acrobot Robotic System," *Robotica & Management*, vol. 23, no. 1, pp. 31-36, 2018.
- [8] V. D. H. Nguyen *et al.*, "A Method of PD-Fuzzy Control for Acrobot," *International Journal of Robotica and Management*, vol. 26, no. 2, pp. 28-34, Dec. 2021.
- [9] T. Henmi *et al.*, "Motion Control of Underactuated Linkage Robot based on Gymnastic Skill," *Electr Eng Jpn*, Wiley, pp. 1-9, 2018.
- [10] D. H. Lee *et al.*, "Dynamics analysis and experiment of a 3-link gymnastic robot," in *3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, pp. 174-179, 2017.
- [11] N. T. M. Nguyet *et al.*, "Survey and compare sliding PD and LQR control for three-link acrobot system," (in Vietnamese), *Scientific magazine of Tien Giang University*, no. 12, pp. 50-59, 2022.
- [12] D. T. Giang *et al.*, "LQR control for three-step Acrobot system," (in Vietnamese), *Scientific magazine of Tien Giang University*, no. 11, pp. 22-29, 2021.
- [13] S. Celikovsky *et al.*, "Embedding the generalized Acrobot into the n-link with a cyclic variable and its application to walking design," in *European Control Conference (ECC)*, pp. 682-689, 2013.



Nguyen Tran Minh Nguyet received the Master of Science in Automation from the Faculty of Electrical Electronic Engineering, Technology University, Viet Nam in 2009. Currently, she is a lecturer at the Faculty of High Quality Training, Ho Chi Minh City University of Technology and Education. Research interests are Machine learning; Design intelligent controller for automatic control system. Email: nguyetnm@hcmute.edu.vn



Nguyen Van Dong Hai received the PhD. degree of System Engineering from the Department of Mechatronics, Electronics and Computers, University of Craiova, Romania in 2018. Currently, he is a lecturer in Automatic Control Department at the Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology and Education (HCMUTE). Research interests are Nonlinear and Intelligent Control for robotics; Modelling for System. Email: hainvd@hcmute.edu.vn



Nguyen Ngoc Trung Son (Student ID: 19151024). He is student of Faculty for High Quality Training of Ho Chi Minh city of Technology and Education (HCMUTE). His research interests are nonlinear control and intelligent control for systems. Email: 19151024@student.hcmute.edu.vn.



Tran Van Thang (Student ID: 19151176). He is student of Faculty for High Quality Training of Ho Chi Minh city of Technology and Education (HCMUTE). His research interests are nonlinear control and intelligent control for systems. Email: 19151176@student.hcmute.edu.vn.



Nguyen Le Tan Tai (Student ID: 19151019). He is student of Faculty for High Quality Training of Ho Chi Minh city of Technology and Education (HCMUTE). His research interests are nonlinear control and intelligent control for systems. Email: 19151019@student.hcmute.edu.vn.



Phan Thanh Khang (Student ID: 19151138). He is student of Faculty for High Quality Training of Ho Chi Minh city of Technology and Education (HCMUTE). His research interests are nonlinear control and intelligent control for systems. Email: 19151138@student.hcmute.edu.vn.



Nguyen Thanh Giang (Student ID: 19151117). He is student of Faculty for High Quality Training of Ho Chi Minh city of Technology and Education (HCMUTE). His research interests are nonlinear control and intelligent control for systems. Email: 19151117@student.hcmute.edu.vn.



Bui Quoc Huy (Student ID: 19151082). He is student of Faculty for High Quality Training of Ho Chi Minh city of Technology and Education (HCMUTE). His research interests are nonlinear control and intelligent control for systems. Email: 19151082@student.hcmute.edu.vn.



Le Ngoc Duy Tan (Student ID: 19151169). He is student of Faculty for High Quality Training of Ho Chi Minh city of Technology and Education (HCMUTE). His research interests are nonlinear control and intelligent control for systems. Email: 19151169@student.hcmute.edu.vn.



Bui Tan Tai (Student ID: 19151013). He is student of Faculty for High Quality Training of Ho Chi Minh city of Technology and Education (HCMUTE). His research interests are nonlinear control and intelligent control for systems. Email: 19151013@student.hcmute.edu.vn.