

Điều khiển ổn định hệ Acrobot sử dụng giải thuật LQR-GA**Stabilizing Acrobot using LQR-GA algorithm**

**Nguyễn Nhật Trường¹, Nguyễn Nguyên Hoàng Minh¹, Nguyễn Minh Tâm¹,
Vũ Văn Phong¹, Trần Vi Đô¹, Lê Tiến Thành¹, Nguyễn Văn Đông Hải^{1,*},
Nguyễn Trần Minh Nguyệt¹, Đinh Thanh Tùng¹, Nguyễn Đăng Anh Thái¹,
Huỳnh Tấn Phát¹, Nguyễn Thành Văn¹, Nguyễn Thế Hùng¹**

¹ Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP HCM, 01 Võ Văn Ngân, P. Linh Chiểu, Q. Thủ Đức, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

Thông tin chung

Ngày nhận bài:

02/01/2021

Ngày nhận kết quả phản biện:

15/03/2021

Ngày chấp nhận đăng:

06/05/2021

Từ khóa:

Acrobot, LQR, giải thuật di truyền, Euler-Lagrange

Keywords:

Acrobot, LQR, genetic algorithm, Euler-Lagrange

Tóm tắt

Trong bài báo này, phương trình động lực học của hệ acrobot được phân tích dựa theo phương pháp Euler-Lagrange. Bên cạnh đó, một mô hình acrobot thực tế được xây dựng cho mục đích kiểm chứng giải thuật. Các thông số chưa biết trong hệ thống được xác định qua việc đo đạc, tính toán và nhận dạng. Dựa vào đó, bộ điều khiển LQR được thiết kế để điều khiển hệ tại các vị trí bất ổn định. Hơn thế nữa, giải thuật di truyền được kết hợp để tối ưu hóa hiệu năng của bộ điều khiển LQR. Trước khi nhúng giải thuật vào mô hình thực tế, đáp ứng của hệ thống được kiểm chứng với các giải thuật LQR, LQR-GA trên môi trường mô phỏng. Với các kết quả ổn định từ việc mô phỏng, giải thuật được thực nghiệm trên mô hình thực tế.

Abstract

In this paper, the dynamic equations of the acrobot system are analyzed using the Euler-Lagrange method. Besides, an actual Acrobot model is built for algorithm validation purposes. The unknown parameters in the system were determined through measurement, calculation and identification. Based on that, the LQR controller is designed to control the system in unstable positions. Furthermore, the genetic algorithm is combined to optimize the performance of the LQR controller. Before embedding the algorithm in the actual model, the system's response was verified with LQR, LQR-GA algorithms on the simulation environment. With stable results from the simulation, the algorithm is tested on the actual model.

1. GIỚI THIỆU

Hệ acrobot mô phỏng lại một vận động viên đu xà hay một phần của robot và nó cũng là một hệ bất ổn định, có độ phi tuyến cao. Việc điều khiển hệ acrobot ổn định được rất nhiều nhà nghiên cứu quan tâm, các phương pháp

tiêu biểu được mô tả ở tài liệu [1]-[4]. Bên cạnh đó, việc tham khảo các tài liệu [4]-[5] khiến tác giả quan tâm đến vấn đề phân tích mô hình động lực học của hệ thống để thiết kế bộ điều khiển (BĐK) cho hệ thống. Đồng thời, đây cũng là cách để nhận định việc kiểm

* tác giả liên hệ, email: hainvd@hcmute.edu.vn, 034 9672 108

chúng đáp ứng của hệ thống giữa mô phỏng và thực tế.

Trong bài báo này, mô hình động lực học của acrobot được phân tích. Dựa trên các thông số hệ thống có được từ mô hình thực nghiệm, BDK Linear Quadratic Regulator (LQR) [6] được thiết kế tại điểm làm việc tĩnh bất ổn định của hệ thống. Giải thuật di truyền (Genetic Algorithm-GA) [7] được áp dụng để tối ưu việc tìm kiếm các thành phần của ma trận Q, từ đó tính toán ra giá trị ma trận K tương ứng sao cho đáp ứng của hệ thống là tối ưu nhất trên mô phỏng. Cuối cùng, đáp ứng của hệ thống với giải thuật LQR-GA tìm được ở mô phỏng được áp dụng ở thực nghiệm để kiểm chứng tính ổn định.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Phương trình động lực học

Dựa trên phương pháp Euler-Lagrange [1], phương trình động lực học của hệ thống được trình bày như sau:

$$D \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + C \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + G = \tau \tag{1}$$

Trong đó,

$$D = \begin{bmatrix} \beta_1 + \beta_2 + 2\beta_3 \cos \theta_2 & \beta_2 + \beta_3 \cos \theta_2 \\ \beta_2 + \beta_3 \cos \theta_2 & \beta_2 \end{bmatrix}$$

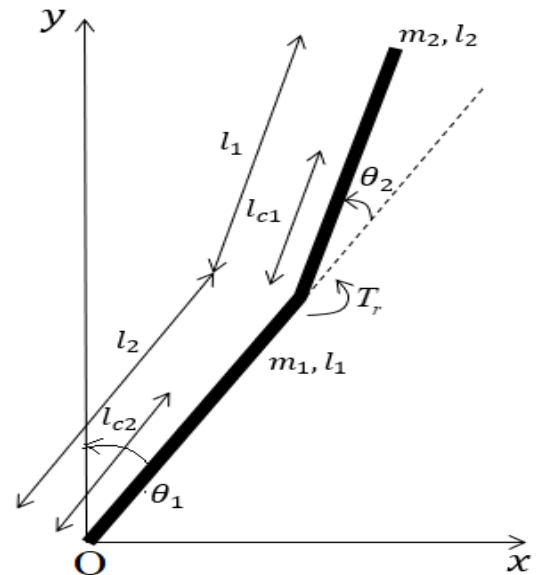
$$C = \begin{bmatrix} -\beta_3 \sin \theta_2 \dot{\theta}_2 & -\beta_3 \sin \theta_2 \dot{\theta}_2 - \beta_3 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \\ \beta_3 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$I_1 = \frac{1}{12} m_{\text{thanh1}} (l_1^2 + w_1^2) + \frac{1}{2} m_{dc} r_{dc}^2 + m_{dc} l_{dc}^2$$

$$I_2 = \frac{1}{12} m_{\text{thanh2}} (l_2^2 + w_2^2) + \frac{1}{2} m_{tai} r_{tai}^2 + m_{tai} l_{tai}^2 \tag{2}$$

$$G = \begin{bmatrix} \beta_4 g \cos \theta_1 + \beta_5 g \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \beta_5 g \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}, \quad \tau = \begin{bmatrix} T_r \\ 0 \end{bmatrix}$$

với T_r là momen do động cơ DC tạo ra, $\beta_1 = m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + I_1$, $\beta_2 = m_2 l_{c2}^2 + I_2$, $\beta_3 = m_2 l_1 l_{c2}$, $\beta_4 = m_1 l_{c1} + m_2 l_1$, $\beta_5 = m_2 l_{c2}$. Các thông số mô hình được giải thích ở Bảng 1 (phần dưới). θ_1 (rad), θ_2 (rad) lần lượt là góc lệch của link 1 so với phương thẳng đứng và góc lệch của link 2 so với link 1.



Hình 1. Mô hình toán học acrobot trong hệ trục tọa độ Oxy

Công thức tính mô-men quán tính của toàn bộ thanh 1 và thanh 2 được tính toán dựa theo công thức

(2) dưới đây. Các thông số được thể hiện ở Bảng 1.

Mối quan hệ giữa điện áp cấp cho động cơ và mô-men tác động thông qua tỉ số truyền được mô tả như sau [8]

$$T_r = N_g K_t (U - K_e N_g \dot{\phi}) / R_m \quad (3)$$

Trong đó, N_g là tỉ số truyền động cơ, K_t (kgm^2) là hệ số momen xoắn động cơ, U (V) là điện áp cấp cho động cơ, K_e (kgm^2) là hằng số momen động cơ, ϕ (rad) là góc quay động cơ, R_m (Ohm) là điện trở nội động cơ.

2.2. Bộ điều khiển LQR-GA

2.2.1. Giới thiệu điều khiển LQR

Acrobot sẽ được tuyến tính hóa tại vị trí bất ổn định $[\theta_1 \ \theta_2]^T = [\pi/2 \ \pi]^T$ và BDK sẽ được thiết kế để điều khiển ổn định hệ thống tại vị trí này.

Mục tiêu của BDK LQR là tối thiểu hóa hàm sau

$$J = \int_0^{+\infty} (x^T Qx(t) + u^T Ru(t))dt \quad (4)$$

Trong đó, Q , R là ma trận bán xác định dương và xác định dương không đổi theo thời gian cần được lựa chọn.

Luật điều khiển hồi tiếp trạng thái để đưa vector trạng thái x về 0 sao cho hàm mục tiêu J đạt cực tiểu (tìm K để J đạt cực tiểu).

$$u = -Kx \quad (5)$$

Trong đó, $K = R^{-1}B^T S$ và S là nghiệm của phương trình đại số Riccati sau:

$$0 = -SA - A^T S + SBR^{-1}B^T S - Q \quad (6)$$

Việc giải (6) để tìm K thỏa mãn J rất khó khăn. Do đó, Matlab đã hỗ trợ lệnh `lqr()` để tính K thông qua công thức:

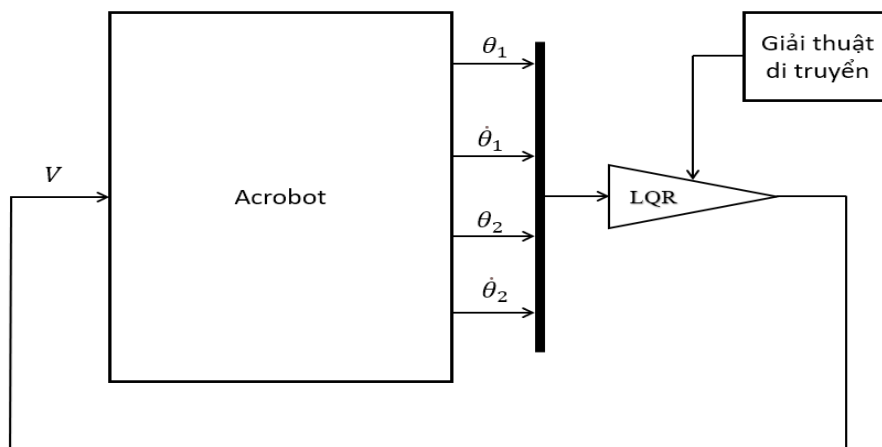
$$K = \text{lqr}(A, B, Q, R) \quad (7)$$

Với A , B là ma trận hệ thống sau khi đã được tuyến tính hóa.

2.2.2. Kết hợp GA và LQR

Để nâng cao chất lượng điều khiển hệ thống, ma trận K tối ưu cần được tính toán. Mặt khác, việc tính toán K phụ thuộc bởi ma trận trọng số Q . Khi thay đổi ma trận Q (tăng hoặc giảm các thành phần của ma trận) sẽ làm thay đổi ma trận K dẫn đến thay đổi chất lượng điều khiển của hệ thống. GA được đề xuất nhằm tìm kiếm các thành phần trong ma trận Q để tối ưu chất lượng điều khiển.

Thông số GA được lựa chọn như sau, số thế hệ tối đa: 30, số lượng cá thể: 10, số lượng nhiễm sắc thể trong một cá thể: 4, hệ số lai ghép: 0,9; hệ số đột biến: 0,1; kiểu mã hóa: mã hóa thập phân, kiểu chọn lọc: chọn lọc sắp hạng tuyến tính, kiểu lai ghép: lai ghép hai điểm



Hình 2. Sơ đồ điều khiển Acrobot với LQR-GA

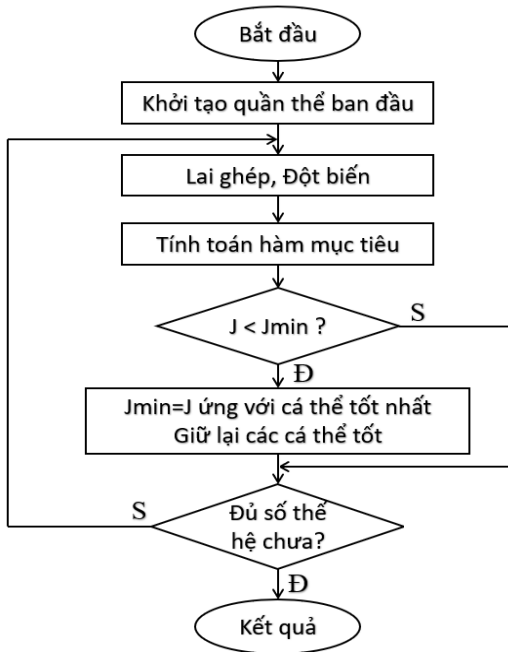
Hàm mục tiêu của GA được chọn ở

(8). Việc tìm kiếm bộ thông số điều khiển sao cho đáp ứng hệ thống sao cho J_{GA} này càng nhỏ tức việc mô phỏng hoạt động của acrobat đối với thông số điều khiển tương ứng cho ra hàm J_{GA} nhỏ nhất có thể tức làm sai số giữa link 1 và 2 là nhỏ nhất trong thời gian nhanh nhất tức làm hệ thống nhanh ổn định, có thời gian xác lập nhỏ nhất và sai số xác lập nhỏ nhất

$$J_{GA} = \sum_{i=1}^N (e_{1i}^2 + e_{2i}^2) \quad (8)$$

Trong đó, $e_1 = \theta_{1d} - \theta_1$, $e_2 = \theta_{2d} - \theta_2$, θ_{1d} và θ_{2d} lần lượt là giá trị đặt của θ_1 và θ_2 ; N là số mẫu dữ liệu có được trong thời gian mô phỏng cho trước. Trong trường hợp mô phỏng này, ta có thời gian lấy mẫu là 0.01s.

Quá trình tìm kiếm cá thể (tức các giá trị của ma trận Q) diễn ra theo lưu đồ giải thuật sau:



Hình 3. Lưu đồ chương trình GA

2.3. Mô phỏng và thực nghiệm

2.3.1. Mô phỏng

Thông số hệ thống được đo đạc và ước lượng từ chính mô hình thực tế và được trình bày ở Bảng 1 [8].

Bảng 1. Thông số hệ thống

Thông số	Mô tả	Giá trị	Đơn vị
l_1	Chiều dài thanh 1	0,19	m
l_{cl}	Khoảng cách từ điểm đầu đến trọng tâm thanh 1	0,12	m
l_2	Chiều dài thanh 2	0,23	m
l_{c2}	Khoảng cách từ điểm đầu đến trọng tâm thanh 2	0,14	m
m_1	Khối lượng thanh 1 bao gồm động cơ	0,603	kg
m_2	Khối lượng thanh 2 bao gồm tải	0,5	kg
I_1	Mô-men quán tính của thanh 1	0,0128	kg.m ²
I_2	Mô-men quán tính của thanh 2	0,0113	kg.m ²
g	Gia tốc trọng trường	9,81	m/s ²
m_{thanh1}	Khối lượng thanh 1	0,153	kg
m_{thanh2}	Khối lượng thanh 2	0,2	kg
w_1	Độ rộng thanh 1	0,06	m
w_2	Độ rộng thanh 2	0,06	m
m_{dc}	Khối lượng động cơ gắn ở cuối thanh 1	0,45	kg
r_{dc}	Bán kính của động cơ	0,0175	m
l_{dc}	Khoảng cách từ động cơ đến trục quay thanh 1	0,165	m
m_{tai}	Khối lượng tải gắn ở cuối thanh 2	0,3	kg
r_{tai}	Bán kính của tải	0,03	m
l_{tai}	Khoảng cách từ tải đến trục quay thanh 2	0,185	m

Với thông số hệ thống ở Bảng 1, ma trận hệ thống A, B ở (9) được tuyến tính tại vị trí $[\theta_1 \ \theta_2 \ U]^T = \left[\frac{\pi}{2} \ \pi \ 0\right]^T$ như sau:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 38,7854 & 0 & -13,8472 & 0,5405 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -46,8658 & 0 & -27,3399 & -2,3501 \end{bmatrix}; \quad (9)$$

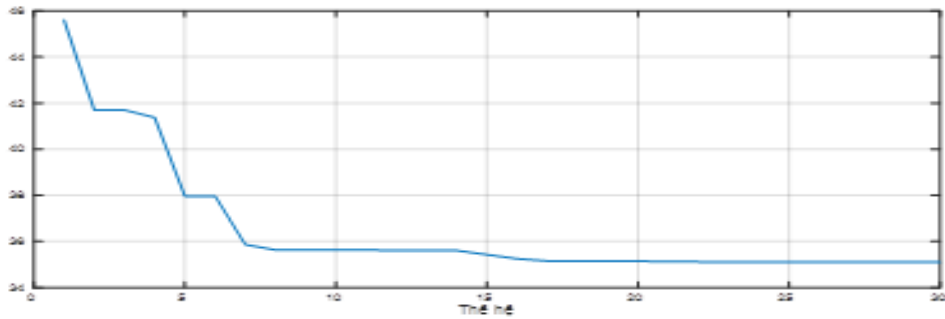
$$B = [0 \ -1,2881 \ 0 \ 5,6002]^T$$

BĐK LQR được tính toán dựa trên các ma trận hệ thống tuyến tính tại điểm

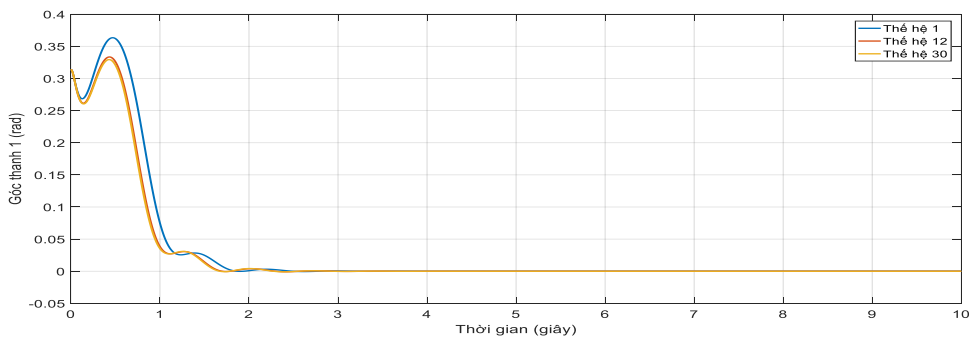
làm việc tĩnh và hệ thống với BĐK LQR-GA được mô phỏng. Khi đặt hệ thống tại vị trí ban đầu

$$[\theta_1(0) \ \dot{\theta}_1(0) \ \theta_2(0) \ \dot{\theta}_2(0)]^T = \left[\frac{\pi}{10} \ 0 \ -\frac{\pi}{12} \ 0\right]^T$$

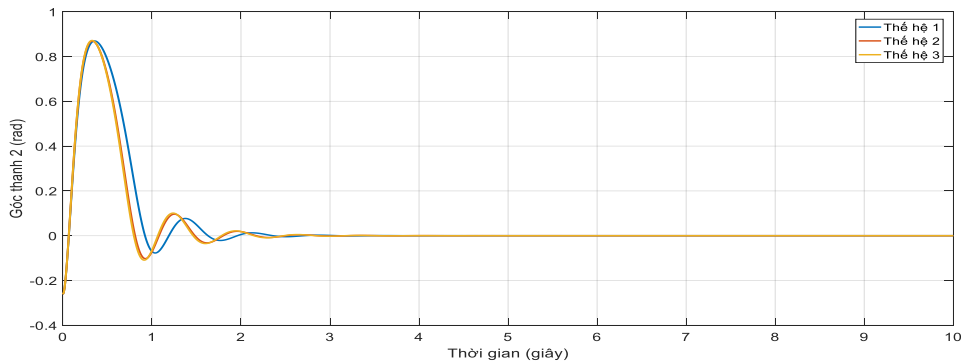
, ta có Hình 5, 6 trình bày giá trị đáp ứng của thanh 1 và 2 của hệ qua các thế hệ khác nhau. Hình 4 cho thấy giá trị hàm mục tiêu giảm dần qua các thế hệ



Hình 4. Giá trị của hàm mục tiêu J_{GA} qua các thế hệ



Hình 5. Góc thanh 1 ở 3 thế hệ khác nhau



Hình 6. Góc thanh 2 ở 3 thế hệ khác nhau

Hình 4 mô tả giá trị hàm mục tiêu trong GA giảm dần sau 30 thế hệ. Cụ thể, ở thế hệ 1, giá trị hàm mục tiêu xấp xỉ gần 46, sau 15 thế hệ giá trị hàm mục tiêu ở khoảng 35.5 và sau 30 thế hệ giá trị hàm mục tiêu giảm xuống còn khoảng 35.

Với ma trận Q ở thế hệ 1, 12 và 30, ma trận K được tính toán và điều khiển cho hệ thống. Hình 5 so sánh đáp ứng của góc thanh 1 khi áp dụng thông số K được tính toán từ ma trận Q ở 3 thế hệ khác nhau, góc lệch thanh 1 lớn nhất ở thế hệ 1 là 0.36 radian và 0.33 radian khi ở thế hệ 30. Tương tự, Hình 6 so sánh đáp ứng của góc thanh 2. Cả Hình 5 và Hình 6 đều cho thấy khi sử dụng Q ở thế hệ 30 để tính toán K thì đáp ứng hệ thống là tối ưu nhất.

2.3.2. Thực nghiệm

Mô hình acrobot thực tế điều khiển giữ ổn định ở vị trí $[\theta_1 \ \theta_2 \ U]^T = [\pi/2 \ \pi \ 0]^T$ được mô tả ở Hình 7. Do sự khác biệt đáng kể giữa thông số hệ thống lý tưởng và thông số kết cấu thực nghiệm, việc áp dụng BDK LQR đã được tối ưu hóa bằng GA sẽ tăng khả năng điều khiển thành công mô hình thực nghiệm.

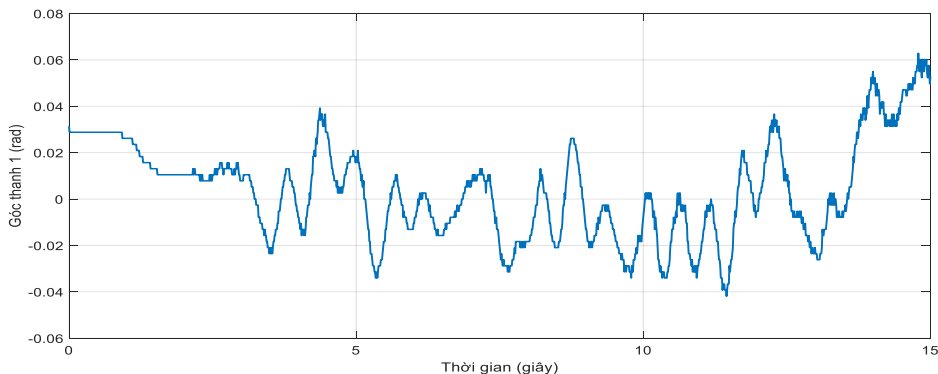
$$Q = \begin{bmatrix} 98,422 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 9,9695 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 99,953 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,8562 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$K = [-76,9839 \ -13,1174 \ 28,0313 \ 1,0235] \quad (11)$$

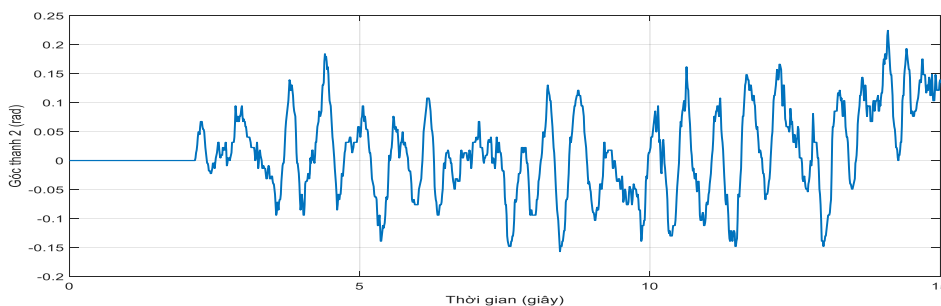
Với ma trận Q tìm được ở thế hệ 30 (10), BDK LQR được tính toán để điều khiển ổn định hệ thống tại vị trí MID và ma trận K được trình bày ở (11).



Hình 7. Hệ acrobot ở trạng thái ổn định



Hình 8. Đáp ứng góc thanh 1 ở thực tế



Hình 9. Đáp ứng góc thanh 2 ở thực tế

Đáp ứng của hệ thống được mô tả ở Hình 8 và Hình 9 cho thấy hệ acrobot ổn định tại vị trí MID với thông số K tìm được từ GA. Sai số của thanh 1 duy trì trong khoảng rất nhỏ (0.04 đến 0.04 rad) và thanh 2 cũng dao động trong khoảng rất nhỏ (-0.2 đến 0.2 rad)

3. KẾT LUẬN

Trong bài báo, phương trình động học của acrobot được phân tích. Thông qua các thông số hệ thống có được từ mô hình thực nghiệm, BDK LQR được thiết kế điều khiển cho hệ acrobot ở vị trí bất ổn định và GA được áp dụng hỗ trợ cho LQR nhằm tối ưu luật điều khiển. Việc áp dụng giải thuật điều khiển đối với acrobot được tiến hành trên cả hai phương diện là mô phỏng và thực nghiệm. Dựa vào các kết quả mô phỏng, BDK LQR hay LQR-GA đã điều khiển ổn định thành công hệ acrobot và chỉ ra được sự tối ưu hơn của giải thuật LQR-GA (Hình 4, 5, 6). Đồng thời, thông số điều khiển LQR sau khi được tối ưu hóa ở mô phỏng cũng đã chứng tỏ khả năng ổn định mô hình ở thực nghiệm (Hình 8, 9).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Vo Anh Khoa, Nguyen Minh Tam, Tran Vi Do, Nguyen Thien Van, Nguyen Van Dong Hai, “Model and control algorithm construction for rotary inverted pendulum in laboratory”,

Journal of Technical Education Science, No.49, pp. 32-40, 2018.

[2]. Navin John Mathew, K. Koteswara Rao, N. Sivakumaran, “Swing Up and Stabilization Control of a Rotary Inverted Pendulum”, the 10th IFAC International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, pp. 654-659, 2013.

[3]. Selcuk Kizir, Zafer Bingul, Cuneyt Oysu, “Fuzzy Control of a Real Time Rotary Inverted Pendulum System”, International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems, pp. 674-681, 2008.

[4]. Iraj Hassanzadeh, Saleh Mobayen, “Controller Design for Rotary Inverted Pendulum System Using Evolutionary Algorithms”, Mathematical Problems in Engineering, pp.1-17, 2011.

[5]. Philippe Faradja, Guoyuan Qi, Martial Tatchum, “Sliding mode control of a Rotary Inverted Pendulum using higher order differential observer”, 14th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2014), pp. 1123-1127, 2014.

[6]. Tran Thien Dung, Nguyen Nam Trung, Nguyen Van Lanh, “Control design using backstepping technique for a cart-inverted pendulum system”, International Journal of Engineering and

Applied Sciences (IJEAS), Volume-6, pp.70-75, 2019.

[7]. Yung-Chih Fu, Jung-Shan Lin, “Nonlinear Backstepping Control Design of the Furuta Pendulum”, IEEE Conference on Control Applications, pp. 96-101, 2005.

[8]. Mahsa Rahmanian, Mohammad Teshnehlab, Mahdi Aliyari Shoorehdeli, “An off-line fuzzy backstepping controller for rotary inverted pendulum system”, International Conference on Intelligent and Advanced Systems, pp. 109-113, 2007.

[9]. Varunendra Kumar Singh, Vijay Kumar, “Nonlinear Design for Inverted Pendulum using Backstepping Control Technique”, International Journal of

Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET), Vol. 2, pp. 807-810, 2014.

[10]. Trần Hoàng Chinh, “Điều khiển PID-Fuzzy cho hệ Pendubot”, Luận văn Đại học, trường Đại học SPKT TPHCM, 2018.

[11]. K. Furuta, M. Iwase, “Swing-up time analysis of pendulum”, Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences Vol. 52, No. 3, pp. 153-163, 2004.

[12]. Pavol Seman, Boris Rohal’-Ilkiv, Martin Juh’as, Michal Salaj, “Swinging up the Furuta pendulum and its stabilization via model predictive control”, Journal of Electrical Engineering, vol. 64, No. 3, pp. 152-158, 2013.