

ỨNG DỤNG KỸ THUẬT CUỐN CHIỀU TRONG ĐIỀU KHIỂN ROBOT LIÊN KẾT ĐƠN LINH HOẠT

APPLICATION OF BACKSTEPPING TECHNIQUE IN SINGLE-LINK FLEXIBLE JOINT ROBOT CONTROL

HUỖNH TẤN BÌNH^{1a}, PHẠM THANH TÙNG¹

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

+ Tác giả liên hệ: ^aEmail: binhht@vlute.edu.vn

Nhận bài (Received): 12/01/2023; Phản biện (Reviewed): 16/01/2023; Chấp nhận (Accepted): 01/3/2023

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày phương pháp thiết kế bộ điều khiển bám vị trí cho robot liên kết đơn linh hoạt ứng dụng kỹ thuật cuốn chiều. Đây là hệ thống được sử dụng rộng rãi trong nhiều ứng dụng mà robot tương tác với môi trường hoặc với con người. Kỹ thuật cuốn chiều là một trong những bước đột phá trong điều khiển hệ thống phi tuyến. Nó có thể đảm bảo sự ổn định toàn cục, cải thiện hiệu suất bám và quá độ. Tính ổn định của hệ thống được chứng minh bằng lý thuyết Lyapunov. Các kết quả mô phỏng với MATLAB/Simulink cho thấy hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất với thời gian tăng đạt 3.1524s, thời gian xác lập là 5.7324s, độ vọt lố là 0% và sai số xác lập tiến về 0.

Từ khóa: robot, kỹ thuật cuốn chiều, Lyapunov, MATLAB/Simulink

ABSTRACT

This article presents the method of designing the controller of single-link flexible joint robot position tracking using a backstepping technique. This system has been widely used in many applications where robots interact with environments or with humans. Backstepping method is one of the most breakthrough methods for controlling the nonlinear system. It can guarantee global stability and improvement of tracking and transient performances. The stability of the system is proven by Lyapunov's theory. Simulation results in MATLAB/Simulink show the effectiveness of the proposed controller with the rising time reaching 3.1524s, the settling time is 5.7324s, the percent overshoot is 0% and the steady state error converges to zero.

Keywords: robot, backstepping technique, Lyapunov, MATLAB/Simulink

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, việc nghiên cứu về robot liên kết đơn linh hoạt đã được phát triển rộng rãi nhờ trọng lượng nhẹ, chi phí thấp hơn, khối lượng công việc lớn hơn, khả năng cơ động tốt hơn, tốc độ hoạt

động cao hơn, hiệu quả năng lượng và số lượng ứng dụng lớn hơn [1 – 2].

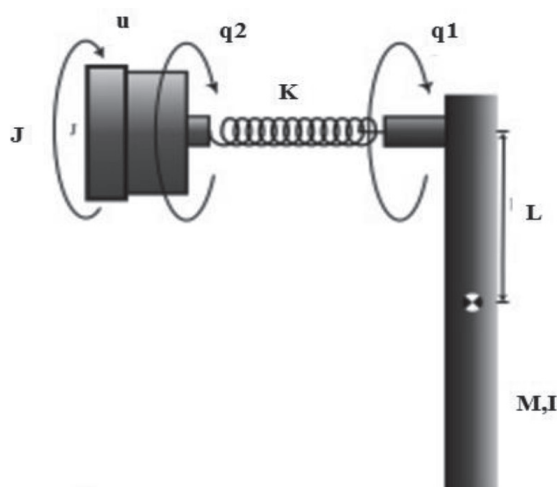
Robot liên kết đơn linh hoạt đã được nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu và công bố, chẳng hạn như điều khiển trượt thích nghi mờ tối ưu dựa vào bộ điều khiển

tuyến tính hóa hồi tiếp trong [1], điều khiển mờ nơ-ron thích nghi được phát triển trong [2], trong [3] đã sử dụng mô hình tuyến tính đa vùng dựa vào điều khiển bám ngõ ra, bộ quan sát dựa vào điều khiển trượt tích phân được đề xuất trong [4], điều khiển rung dư có độ cứng và giảm chấn thay đổi được xem xét trong [5], trong [6] đã tiến hành phân tích đặc tính hội tụ thời gian hữu hạn của bộ điều khiển phức hợp. Nghiên cứu này đề xuất và kiểm chứng hiệu quả của kỹ thuật cuộn chiếu trong điều khiển bám vị trí góc quay của robot liên kết đơn linh hoạt. Kỹ thuật cuộn chiếu là một trong những bước đột phá trong điều khiển hệ thống phi tuyến. Nó có thể đảm bảo sự ổn định toàn cục, cải thiện hiệu suất bám và quá độ [7]. Các phương pháp điều khiển cuộn chiếu khác nhau đã được sử dụng rộng rãi để giải các bài toán điều khiển hệ thống phi tuyến. Phương pháp này đã được phát triển cho hệ thống Lotka-Volterra Prey-Predator với độ trễ thời gian không đổi trong [8]. Một kỹ thuật điều khiển cuộn chiếu đã được thực hiện trong [9] để ổn định tiệm cận cho hệ thống phi tuyến với hồi tiếp ngõ ra tĩnh trì hoãn. Phương pháp cuộn chiếu thích nghi bền vững kết hợp với hồi tiếp hệ thống phi tuyến sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo được thực hiện trong [10].

Bài báo được tổ chức gồm 5 phần: mô hình toán học của robot được trình bày trong phần 2, phần 3 trình bày các bước thiết kế bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật cuộn chiếu, các kết quả mô phỏng và đánh giá được trình bày trong phần 4 và phần 5 là kết luận.

2. Mô hình toán học robot liên kết đơn linh hoạt

Mô hình robot liên kết đơn linh hoạt như Hình 1 [1].



Hình 1. Robot liên kết đơn linh hoạt

Phương trình động học của robot liên kết đơn linh hoạt như (1) [1]:

$$\begin{cases} I\ddot{q}_1 + MgL \sin q_1 + K(q_1 - q_2) = 0 \\ J\ddot{q}_2 + K(q_2 - q_1) = u \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó, $q_1 \in \mathbb{R}^n$ và $q_2 \in \mathbb{R}^n$ lần lượt là góc liên kết và góc động cơ, K là độ cứng của liên kết, $u \in \mathbb{R}^n$ là ngõ vào điều khiển, J là quán tính của động cơ, I là quán tính của liên kết, M là số lượng liên kết, L là chiều dài từ môi ghép đến tâm liên kết.

Định nghĩa các biến trạng thái như (2):

$$\begin{aligned} x_1 &= q_1 \\ x_2 &= \dot{q}_1 \\ x_3 &= q_2 \\ x_4 &= \dot{q}_2 \end{aligned} \quad (2)$$

Không gian trạng thái của hệ thống (1) được viết như (3):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{I}(MgL \sin x_1 + K(x_1 - x_3)) \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{J}(u - K(x_3 - x_1)) \end{cases} \quad (3)$$

Phương trình (3) của hệ thống có thể được viết đơn giản như (4):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + g(\mathbf{x}) \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f(\mathbf{x}) + mu \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó, $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ là vector trạng thái, $f(\mathbf{x}) = K(x_1 - x_3)/J$, $g(\mathbf{x}) = -x_3 - MgL \sin(x_1)/I - K(x_1 - x_3)/I$ và $m = 1/J$.

Sai số được định nghĩa như (5) và (6):

$$e_1 = x_1 - x_{1d} \quad (5)$$

$$e_2 = \dot{x}_1 - \dot{x}_{1d} \quad (6)$$

Trong đó, x_1 là vị trí thực tế và x_{1d} là vị trí mong muốn của robot. Mục tiêu điều khiển là x_1 bám theo x_{1d} , $\dot{x}_1$ bám theo $\dot{x}_{1d}$.

3. Thiết kế bộ điều khiển dựa vào kỹ thuật cuốn chiếu

Phương pháp thiết kế bộ điều khiển cuốn chiếu cho robot liên kết đơn linh hoạt được thực hiện theo các bước như sau [11]:

Bước 1

Định nghĩa sai số như (5) và đạo hàm của (5) như (7):

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_{1d} = x_2 - \dot{x}_{1d} \quad (7)$$

Để $e_1 \rightarrow 0$, hàm Lyapunov được định nghĩa như (8):

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (8)$$

Đạo hàm của (8) như (9):

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 (x_2 - \dot{x}_{1d}) \quad (9)$$

Để $\dot{V}_1 < 0$, nếu ta chọn $x_2 - \dot{x}_{1d} = -k_1 e_1, k_1 > 0$, thì ta được $\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2$

Bước 2

Để $x_2 - \dot{x}_{1d} = -k_1 e_1 \rightarrow x_2 = \dot{x}_{1d} - k_1 e_1$ ta chọn điều khiển ảo như (10):

$$x_{2d} = \dot{x}_{1d} - k_1 \quad (10)$$

Để $x_2 \rightarrow x_{2d}$, ta có sai số mới như (11):

$$e_2 = x_2 - x_{2d} \quad (11)$$

Thế $\dot{x}_2$ trong (4) vào đạo hàm của (11), ta được (12):

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{x}_{2d} = x_3 + g(\mathbf{x}) - \dot{x}_{2d} \quad (12)$$

Lúc này, (9) trở thành (13):

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= e_1 (\dot{x}_2 - \dot{x}_{1d}) = e_1 (x_{2d} + e_2 - \dot{x}_{1d}) \\ &= e_1 (\dot{x}_{1d} - k_1 e_1 + e_2 - \dot{x}_{1d}) \\ &= -k_1 e_1^2 + e_2 e_1 \end{aligned} \quad (13)$$

Để $e_1 \rightarrow 0$ và $e_2 \rightarrow 0$, hàm Lyapunov được thiết kế như (14):

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_2^2 = \frac{1}{2} (e_1^2 + e_2^2) \quad (14)$$

Sau đó, ta có (15):

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 + e_1 e_2 + e_2 (x_3 + g(\mathbf{x}) - \dot{x}_{2d}) \quad (15)$$

Để $\dot{V}_2 < 0$, nếu ta chọn

$$e_1 + x_3 + g(\mathbf{x}) - \dot{x}_{2d} = -k_2 e_2, \quad k_2 > 0 \quad (16)$$

thì ta sẽ có: $\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2$

Bước 3

$$\text{Để } e_1 + x_3 + g(\mathbf{x}) - \dot{x}_{2d} = -k_2 e_2$$

$$\rightarrow x_3 = \dot{x}_{2d} - g(\mathbf{x}) - k_2 e_2 - e_1,$$

ta chọn điều khiển ảo như (17):

$$x_{3d} = \dot{x}_{2d} - g(\mathbf{x}) - k_2 e_2 - e_1 \quad (17)$$

Để $x_3 \rightarrow x_{3d}$, ta được sai số mới như (18):

$$e_3 = x_3 - x_{3d} \quad (18)$$

Sau đó ta có (19):

$$\dot{e}_3 = \dot{x}_3 - \dot{x}_{3d} = x_4 - \dot{x}_{3d} \quad (19)$$

Để $e_3 \rightarrow 0, e_2 \rightarrow 0, e_1 \rightarrow 0$, hàm Lyapunov được thiết kế như (20):

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} e_3^2 = \frac{1}{2} (e_1^2 + e_2^2 + e_3^2) \quad (20)$$

Sau đó:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_3 &= -k_1 e_1^2 + e_1 e_2 + e_2 (x_3 + g(\mathbf{x}) - \dot{x}_{2d}) + e_3 \dot{e}_3 \\
&= -k_1 e_1^2 + e_1 e_2 + e_2 (e_3 + x_{3d} + g(\mathbf{x}) - \dot{x}_{2d}) + e_3 \dot{e}_3 \\
&= -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 + e_2 e_3 + e_3 (x_4 + \dot{x}_{3d}) \\
&= -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 + e_3 (e_2 + x_4 + \dot{x}_{3d})
\end{aligned} \quad (21)$$

Để $\dot{V}_3 < 0$, ta chọn

$$e_2 + x_4 - \dot{x}_{3d} = -k_3 e_3, \quad k_3 > 0 \quad (22)$$

Sau đó, ta sẽ có (23):

$$\dot{V}_3 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 \quad (23)$$

Bước 4

$$\text{Để } e_2 + x_4 - \dot{x}_{3d} = -k_3 e_3$$

$$\rightarrow x_4 = \dot{x}_{3d} - k_3 e_3 + e_2,$$

ta chọn điều khiển ảo như (24):

$$x_{4d} = \dot{x}_{3d} - k_3 e_3 + e_2 \quad (24)$$

Để $x_4 \rightarrow x_{4d}$, ta có sai số mới như (25):

$$e_4 = x_4 - x_{4d} \quad (25)$$

Sau đó, ta có (26):

$$\dot{e}_4 = \dot{x}_4 - \dot{x}_{4d} = f(\mathbf{x}) + mu - \dot{x}_{4d} \quad (26)$$

Để $e_4 \rightarrow 0$, $e_3 \rightarrow 0$, $e_2 \rightarrow 0$, $e_1 \rightarrow 0$, hàm Lyapunov được thiết kế như (27):

$$V_4 = V_3 + \frac{1}{2} e_4^2 = \frac{1}{2} (e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2) \quad (27)$$

Lúc này:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_4 &= -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 + e_3 (e_2 + x_4 - \dot{x}_{3d}) + \\
&\quad e_4 (f(\mathbf{x}) + mu - \dot{x}_{4d})
\end{aligned} \quad (28)$$

vì

$$\begin{aligned}
e_3 (e_2 + x_4 - \dot{x}_{3d}) &= e_3 (e_2 + x_{4d} + e_4 - \dot{x}_{3d}) \\
&= e_3 (e_2 + \dot{x}_{3d} - k_3 e_3 - e_2 + e_4 - \dot{x}_{3d}) \\
&= e_3 e_4 - k_3 e_3^2
\end{aligned} \quad (29)$$

Nên ta có (30):

$$\begin{aligned}
\dot{V}_4 &= -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 + e_3 e_4 - k_3 e_3^2 + e_4 (f(\mathbf{x}) + mu - \dot{x}_{4d}) \\
&= -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 + e_4 (f(\mathbf{x}) + mu - \dot{x}_{4d})
\end{aligned} \quad (30)$$

Để $\dot{V}_4 < 0$, ta chọn

$$e_3 + f(\mathbf{x}) + mu - \dot{x}_{4d} = -k_4 e_4^2 \quad (31)$$

Lúc này:

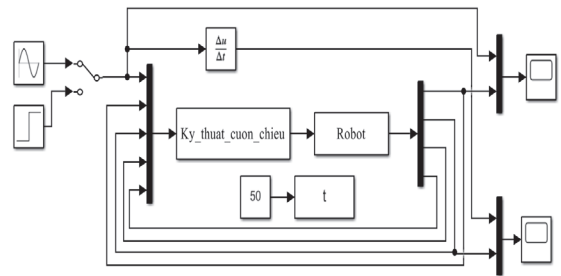
$$\dot{V}_3 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 - k_4 e_4^2 \quad (32)$$

Từ (31), luật điều khiển cuộn chiều cho robot liên kết đơn linh hoạt như (33):

$$u = \frac{1}{m} (-f(\mathbf{x}) + \dot{x}_{4d} - k_4 e_4 - e_3) \quad (33)$$

4. Kết quả mô phỏng và đánh giá

Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển đề xuất được trình bày như Hình 2.



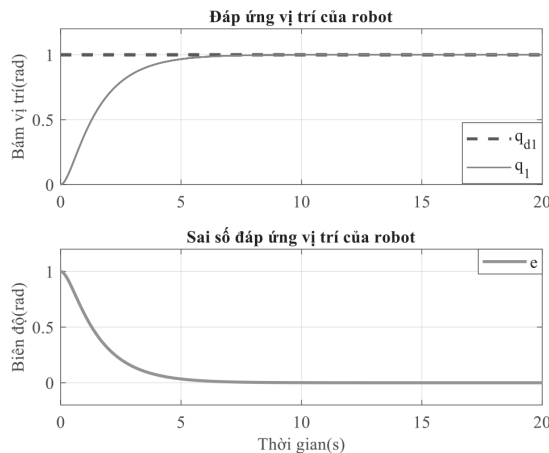
Hình 2. Sơ đồ mô phỏng trong MATLAB/Simulink

Các thông số của robot liên kết đơn linh hoạt như sau [11]: $M=0.2(\text{kg})$, $L=0.02(\text{m})$, $I=1.35 \times 10^{-3}(\text{kg})$, $K=7.47(\text{Nm/rad})$, $J=2.16 \times 10^{-1}(\text{kg.m}^2)$ và $k_1=0.35$, $k_2=3.5$, $k_3=80$, $k_4=50$ là các thông số của kỹ thuật cuộn chiều.

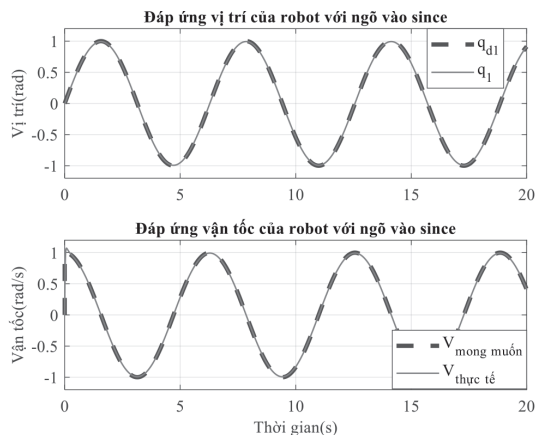
Đáp ứng vị trí và sai số của robot khi ngõ vào là 1(rad) được trình bày như Hình 3. Kết quả từ Hình 3 cho thấy rằng vị trí thực tế (q_1) của robot hội tụ về vị trí mong muốn (q_{d1}) với thời gian tăng đạt 3.1524s, thời gian xác lập là 5.7324s, sai số xác lập tiến về 0 và không có vọt lố. Các chỉ tiêu này được trình bày ở Bảng 1 và nó chứng tỏ hiệu quả của kỹ thuật cuộn chiều trong điều khiển vị trí robot.

Bảng 1. Các chỉ tiêu chất lượng của kỹ thuật cuộn chiều

Các chỉ tiêu chất lượng	Thời gian tăng (s)	Thời gian xác lập (s)	Độ vọt lố (%)	Sai số xác lập (rad)
Kỹ thuật cuộn chiếu	3.1524	5.7324	0	0



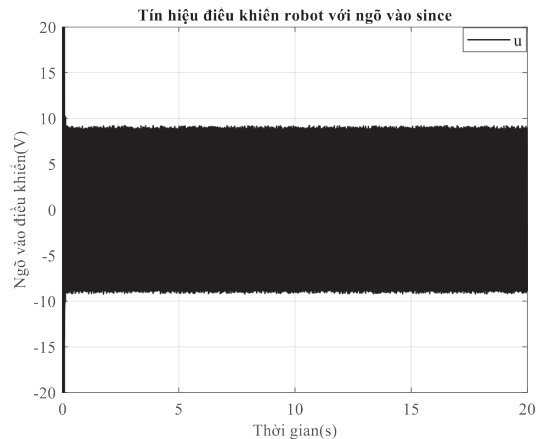
Hình 3. Đáp ứng vị trí và sai số của robot khi ngõ vào là 1(rad)



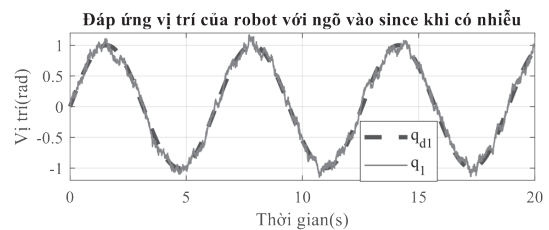
Hình 4. Đáp ứng vị trí và vận tốc bám của robot

Đáp ứng vị trí và vận tốc bám của robot khi ngõ vào là hàm since ($x_{1d} = \sin t$) được thể hiện ở Hình 4. Vị trí thực tế của robot vẫn bám theo vị trí mong muốn trong thời gian hữu hạn với sai số hội tụ về 0 và vận tốc thực tế của robot cũng hội tụ về vận tốc mong muốn. Hình 5 trình bày ngõ vào điều khiển robot và tín hiệu này đã điều khiển bám tốt vị trí của robot. Tuy nhiên,

nó vẫn còn dao động với biên độ trong khoảng $\pm 9(V)$.



Hình 5. Ngõ vào điều khiển của robot



Hình 6. Đáp ứng vị trí của robot với ngõ vào since khi có nhiễu

Đáp ứng vị trí của robot với ngõ vào since khi có nhiễu trắng tác động vào ngõ ra của robot (giả sử nhiễu cảm biến) với công suất 0.001(w) được trình bày như Hình 6. Vị trí thực tế của robot vẫn hội tụ về vị trí mong muốn. Điều này chứng tỏ kỹ thuật cuộn chiếu bền vững với ứng dụng điều khiển bám vị trí robot.

5. Kết luận

Bài báo đã thiết kế bộ điều khiển bám vị trí robot liên kết đơn linh hoạt dựa vào kỹ thuật cuộn chiếu. Lý thuyết Lyapunov đã được sử dụng để chứng minh tính ổn định của hệ thống. Các kết quả mô phỏng với MATLAB/Simulink cho thấy vị trí thực tế (q_1) của robot hội tụ về vị trí mong muốn (q_{d1}) với thời gian tăng đạt 3.1524s, thời gian xác lập là 5.7324s, độ vọt lố là 0% và sai số xác lập tiến về 0. Vị trí này vẫn bền vững khi có nhiễu trắng tác động vào

ngõ ra của robot. Điều này đã chứng minh sự phù hợp và hiệu quả của kỹ thuật cuốn chiếu trong ứng dụng điều khiển bám vị trí robot liên kết đơn linh hoạt. Trong thời

gian tới, nhóm nghiên cứu sẽ tiến hành áp dụng các bộ điều khiển lai hoặc điều khiển thông minh cho robot để cải thiện hiệu quả điều khiển.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. M. J. Mahmoodabadi and N. Nejadkourki. (2020). *Trajectory Tracking of a Flexible Robot Manipulator by a New Optimized Fuzzy Adaptive Sliding Mode-Based Feedback Linearization Controller*. Journal of Robotics, 2020, 1-12.
- [2]. Johnson Antony A. (2019). *Position Control of a Single Link Flexible Joint Robot Manipulator using Adaptive Neuro-Fuzzy Control System*. Irish Interdisciplinary Journal of Science & Research (IIJSR), 3(4), 58-66.
- [3]. R. Rajabi, F. Jahangiri. (2022). *Polytopic Linear Models-Based Output Tracking Control of a Single-Link Flexible Joint Robot Manipulator*. AUT Journal of Modeling and Simulation, 54(1), 45-58.
- [4]. Qi Liu, Zhenyang Cai, Jie Chen, Baoping Jiang. (2021). *Observer-based integral sliding mode control of nonlinear systems with application to single-link flexible joint robotics*. Complex Engineering Systems, 2021, 1-8.
- [5]. Xiaomin Dong, Kaiyuan Shi and Wenfeng Li. (2020). *Residual vibration control of a single-link flexible manipulator with variable stiffness and damping magnetorheological joint*. Journal of Physics: Conference Series, 1678(1), 1-8.
- [6]. Jesus Mendoza-Avila, Denis Efimov, Leonid Fridman, and Jaime A. Moreno. (2022). *An Analysis of Convergence Properties of Finite-Time Homogeneous Controllers Through Its Implementation in a Flexible-Joint Robot*. 2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC), 1-7.
- [7]. Wonhee Kim, Chang Mook Kang, Young Seop Son, and Chung Choo Chung. (2019). *Nonlinear Backstepping Control Design for Coupled Nonlinear Systems under External Disturbances*. Complexity, 2019, 1-13.
- [8]. Mayadah Khalil Ghaffar, Fadhel S. Fadhel and Nabeel E. Arif. (2022). *Application of the Generalized Backstepping Control Method for Lotka-Volterra Prey-Predator System with Constant Time Delay*. 3rd International Conference on Mathematics and Applied Science (ICMAS 2022), 2322 (2022), 1-10.
- [9]. X. Niu and W. Lin. (2022). *A Backstepping Method for Asymptotic Stabilization of a Class of Nonlinear Systems via Delayed Static Output Feedback*. 2022 American Control Conference (ACC), Atlanta, GA, USA, 2022, 5128-5133.
- [10]. Yahui Li, Feng Gao, Franco Bernelli-Zazzera, Zeyou Tong, Fugui Li, Aojia Ma, Lei Zhang, and Jifeng Guo. (2019). *A Novel Robust Adaptive Backstepping Method Combined with SMC on Strict-Feedback Nonlinear Systems Using Neural Networks*. MATEC Web of Conferences, 291(6), 1-7.
- [11]. Jinkun Liu. (2013). *Radial Basis Function (RBF) Neural Network Control for Mechanical Systems*. Springer.