

# ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI NƠ-RON PID CHO BALLBOT CHỊU NHIỀU BẤT ĐỊNH

## ADAPTIVE NEURAL PID CONTROLLER FOR BALLBOT WITH UNCERTAINTY

Nguyễn Văn Trường<sup>1\*</sup>, Dương Đại Nhân<sup>1</sup>,  
Bùi Thanh Lâm<sup>1</sup>, Ngô Hữu Mạnh<sup>2</sup>

DOI: <https://doi.org/10.57001/huiv5804.2024.027>

### TÓM TẮT

Điều khiển cân bằng ổn định cho Ballbot đang là thách thức cần tiếp tục nghiên cứu do hệ thống có tính phi tuyến cao và phức tạp. Trong bài báo này, bộ điều khiển thích nghi nơ-ron PID được phát triển cho Ballbot dưới tác động của nhiễu bất định. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển đề xuất cho kết quả tốt hơn so với bộ điều khiển PID truyền thống.

**Từ khóa:** Ballbot, điều khiển thích nghi, PID, nhiễu bất định.

### ABSTRACT

Controlling stability for Ballbots remains a continuing challenge due to their highly nonlinear and complex uncertainty. In this paper, an adaptive neural PID controller is developed for the Ballbot with uncertainty. Simulation results demonstrate that the proposed controller outperforms the conventional PID controller significantly.

**Keywords:** Ballbot, adaptive control, PID, uncertainty.

<sup>1</sup>Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

<sup>2</sup>Trường Đại học Sao Đỏ

\*Email: [nguyenvantruong@hauivn.edu.vn](mailto:nguyenvantruong@hauivn.edu.vn)

Ngày nhận bài: 19/6/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/9/2023

Ngày chấp nhận đăng: 20/01/2024

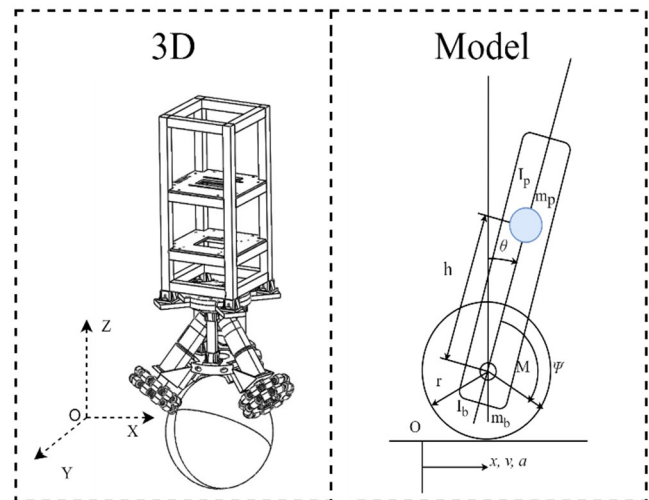
## 1. GIỚI THIỆU

Ballbot là một hệ robot với tính phi tuyến cao và phức tạp [1-4] di chuyển bằng cách cân bằng động trên một quả cầu. Thông thường Ballbot được giữ cân bằng ổn định động bằng điều khiển vòng kín. Các tính toán ước lượng về vị trí, vận tốc, tư thế và tốc độ góc của robot được sử dụng để hình thành luật điều khiển. Do có tính phi tuyến cao và nhiễu tham số đầu vào nên những bộ điều khiển truyền thống như PD, PID, LQR,... không đủ đáp ứng cho hệ thống, đặc biệt là khi ballbot chịu ảnh hưởng bởi nhiễu.

Theo khảo sát, để điều khiển cân bằng động cho Ballbot, một số phương pháp được nghiên cứu phát triển như điều khiển trượt phân cấp (HSMC) [5], điều khiển trượt đầu cuối tác động nhanh không kì dị (NFTSMC) [6, 7], điều khiển mờ thích nghi [8],... Tuy nhiên, các phương pháp tiếp cận trên tương đối khó triển khai và chưa xử lý được bài toán điều khiển cân bằng cho ballbot khi tác động bởi nhiễu.

Để giải quyết các vấn đề trên, bộ điều khiển thích nghi nơ-ron PID (NPID) được thiết kế cho Ballbot để kháng nhiễu bất định. Bộ điều khiển đề xuất có cấu trúc đơn giản, thời gian đáp ứng nhanh và dễ thực hiện. Phương pháp mô phỏng được sử dụng để đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất.

## 2. ĐỘNG LỰC HỌC CHO BALLBOT



Hình 1. Mô hình Ballbot

Ballbot là một hệ gồm 5 bậc tự do, trong đó có 2 bậc tự do trong mặt phẳng và 3 bậc tự do thuộc góc xoay Euler. Mô hình Ballbot được chỉ ra trong hình 1.

Trong đó:  $r_b$  - bán kính quả bóng,

$L$  - khoảng cách từ trọng tâm Ballbot đến tâm của quả bóng,

$m_p$  - khối lượng hình thể,

$m_b$  - khối lượng của quả bóng,

$I_b$  - mô-men quán tính của quả bóng,

$I_p$  - mô-men quán tính của Ballbot,

$\Psi$  - góc xoay của quả bóng

$\theta$  - góc xoay của thân Ballbot.

Phương trình động lực học cho Ballbot được biểu diễn như sau:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + D(\dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} \quad (1)$$

Trong đó,  $q = [\theta, \psi]^T$  là ma trận tọa độ suy rộng,  $M(q)$  là ma trận khối lượng,  $C(q, \dot{q})$  là ma trận Coriolis,  $D(\dot{q})$  là ma trận quán tính,  $\tau$  là mô-men phát động.

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M_{11} = I_b + I_p + m_b r_b^2 + m_p (r_b^2 + l^2) \quad (3)$$

$$M_{12} = M_{11} + m_p r_b l \cos(\theta + \psi) \quad (4)$$

$$M_{21} = M_{12} \quad (5)$$

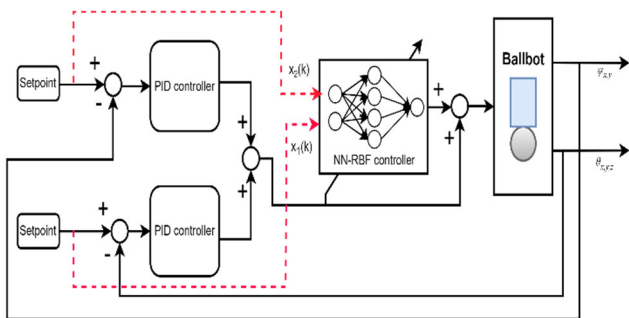
$$M_{22} = M_{11} + 2m_p r_b l \cos(\theta + \psi) + m_p l^2 + I_p \quad (6)$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_p r_b l \sin(\theta + \psi) (\dot{\theta} + \dot{\psi})^2 \\ -m_p r_b l \sin(\theta + \psi) (\dot{\theta} + \dot{\psi})^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$D(\dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{gm_p r_b l \sin(\theta + \psi)}{m_p l^2 + I_p} \end{bmatrix} \quad (8)$$

### 3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI NƠ-RON PID (NPID)

#### 3.1. Thiết kế bộ điều khiển NPID



Hình 2. Cấu trúc bộ điều khiển NPID

Bộ điều khiển NPID thiết kế cho Ballbot có cấu trúc như hình 2. Ballbot được điều khiển đồng thời trên hai mặt phẳng tọa độ XOY và YOZ [4]. Giả sử  $q_{d1}$  là quỹ đạo mong muốn trong không gian tác vụ,  $q_1$  là thông số quỹ đạo thực tế. Sai số thực tế có thể được xác định là:

$$e_1 = q_{d1} - q_1 \quad (9)$$

Với vòng điều khiển thứ 2, sai số góc được biểu diễn là:

$$e_2 = q_{d2} - q_2 \quad (10)$$

Trong đó:  $q_{d2}$  chính là góc lệch mong muốn đạt được của hệ thống,  $q_2$  là góc thực tế.

Tín hiệu điều khiển của bộ PID [9] là:

$$U_{PID} = K_{p1} e_{x1} + k_{i1} \int e_{x1} + K_{d1} \dot{e}_{x1} + K_{p2} e_{x2} + k_{i2} \int e_{x2} + K_{d2} \dot{e}_{x2} \quad (11)$$

Trong đó:  $k_{p1}, k_{i1}, k_{d1}, k_{p2}, k_{i2}, k_{d2}$  là tham số điều khiển.

Kết hợp điều khiển PID và mạng nơ-ron, luật điều khiển cho Ballbot có dạng như sau:

$$U_{NPID} = U_{PID} + U_{RBF} \quad (12)$$

Trong đó,  $U_{PID}$  được thiết kế như (11),  $U_{RBF}$  được thiết kế như sau. Mạng nơ-ron RBF [10] có cấu trúc mạng là [2 - 4 - 1] gồm 2 đầu vào, 1 lớp ẩn và 1 lớp đầu ra. Trong đó lớp ẩn được xây dựng gồm 4 nơ-ron. Vec-tơ h của mạng nơ-ron RBF được xác định như sau:

$$h = [h_1 \quad h_2 \quad h_3 \quad h_4]^T \quad (13)$$

$$h_j = \exp \left[ \frac{-\|X - C_{ji}\|^2}{2b_j^2} \right]; j = 1, 2, 3, 4; i = 1, 2 \quad (14)$$

Trong đó:  $X = [x_1, x_2]^T$  là ngõ vào của điểm setpoint vị trí và góc bộ NPID

$$C_{ji} = [C_{j1}, C_{j2}, C_{j3}, C_{j4}]^T \text{ là vec-tơ tâm}$$

$b_j = [b_1 \quad b_2 \quad b_3 \quad b_4]^T$  là vec-tơ độ rộng của các hàm Gauss trong mạng nơ-ron RBF.

Trọng số trong mạng nơ-ron RBF được thiết kế như sau:

$$w = [w_1, w_2, w_3, w_4]^T \quad (15)$$

Ngõ ra của mạng nơ-ron RBF, cũng chính là ngõ ra của bộ điều khiển nơ-ron RBF được xác định như sau:

$$U_{RBF}(k) = h_1 w_1 + h_2 w_2 + h_3 w_3 + h_4 w_4 \quad (16)$$

Thông qua cách học Gradient Descent, độ biến thiên trọng số ngõ ra  $\Delta w_j(k)$ , độ biến thiên trọng số giữa điểm nút cơ sở và điểm nút trung tâm  $\Delta c_{ji}(k)$ , độ biến thiên độ rộng tâm nơ-ron  $\Delta b_j(k)$  được tính như sau:

$$\begin{cases} \Delta w_j(k) = \eta (U_{PID}(k) - U_{RBF}(k)) h_j \\ \Delta c_{ji}(k) = \eta (U_{PID}(k) - U_{RBF}(k)) w_j \frac{x_j - c_{ji}}{b_j^2} \\ \Delta b_j(k) = \eta (U_{PID}(k) - U_{RBF}(k)) h_j w_j \frac{\|X - C_{ji}\|}{b_j^3} \end{cases} \quad (17)$$

Luật cập nhật các thông số của mạng như sau:

$$\begin{cases} w_j(k) = w_j(k-1) + \Delta w_j(k) + \alpha (w_j(k-1) - w_j(k-2)) \\ c_{ji}(k) = c_{ji}(k-1) + \Delta c_{ji}(k) + \alpha (c_{ji}(k-1) - c_{ji}(k-2)) \\ b_j(k) = b_j(k-1) + \Delta b_j(k) + \alpha (b_j(k-1) - b_j(k-2)) \end{cases} \quad (18)$$

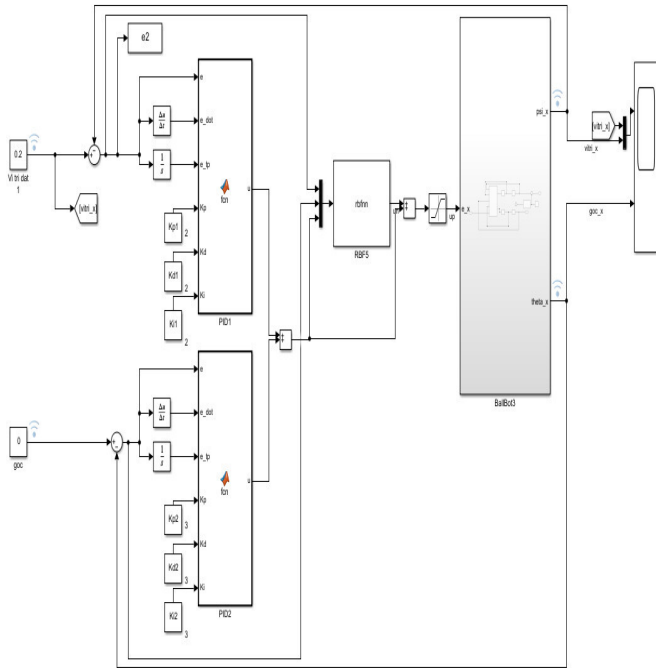
Trong đó:  $\eta$  là tốc độ học,  $\alpha$  là hệ số động học,  $j = 1, 2, 3, 4$  và  $i = 1, 2$ .

#### 3.2. Sơ đồ điều khiển và kết quả mô phỏng

Các thông số động học của hệ thống ballbot là  $r_b = 0,14m$ ;  $L = 1,2m$ ;  $m_p = 9,5kg$ ;  $m_b = 0,5kg$ ;  $I_b = 0,0052$ ;  $r_b = 0,125$ ;  $g = 9,8$ . Ở đây mô hình Ballbot đang ở vị trí  $\psi = 0,2$  m, bộ điều khiển NPID phải thực hiện balancing về góc  $\theta = 0$  (rad) và giữ nguyên vị trí đó.

Để cho thấy hiệu suất đã được cải thiện, bộ điều khiển đề xuất được so sánh với bộ điều khiển PID trong trường hợp không nhiễu và chịu nhiễu bất định  $\xi(t)$ . Nhiễu tác dụng vào Ballbot qua phương trình:

$$\xi(t) = 9,89 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \exp\left(\frac{-(t-3)^2}{2 \cdot 0,25^2}\right) \text{ (rad)} \quad (19)$$



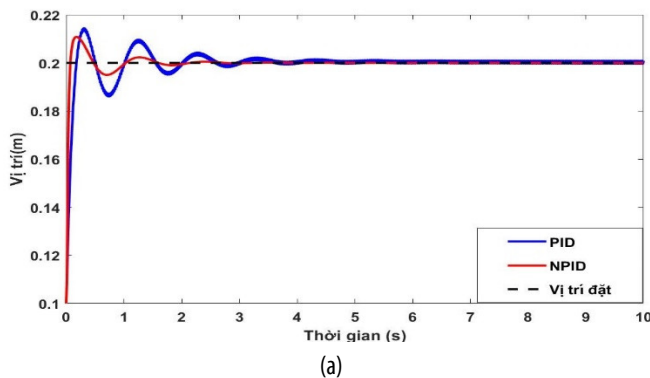
Hình 3. Sơ đồ bộ điều khiển NPID

Sơ đồ của bộ điều khiển đề xuất như hình 3. Các tham số của bộ điều khiển được lựa chọn như bảng 1.

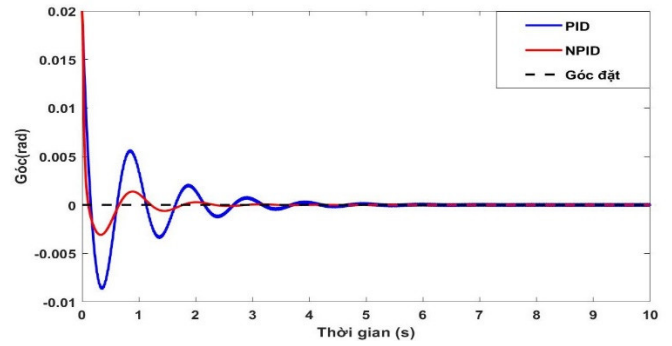
Bảng 1. Bảng tham số bộ điều khiển NPID

$k_{p1}$	$k_{i1}$	$k_{d1}$	$k_{p2}$	$k_{i2}$	$k_{d2}$
5,25	1,2	1,05	9,75	9,66	0,01

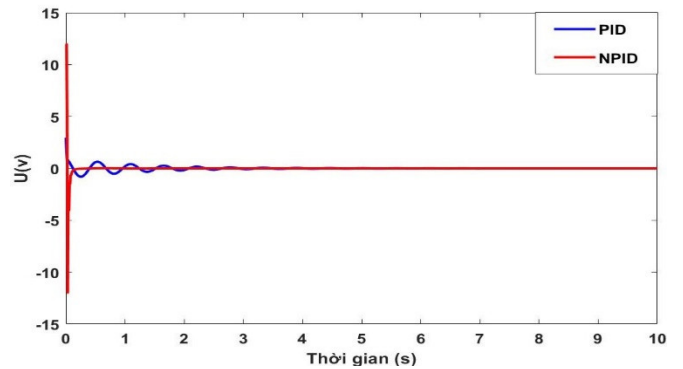
Mạng nơ-ron RBF được sử dụng trong mô phỏng này là [2 - 4 - 1], vectơ trọng số được khởi tạo ngẫu nhiên trong [4, 1], vectơ tâm  $c_{ji}$  và vectơ độ rộng  $b_j$  của các hàm Gauss là  $c_{j1} = [-1,5 \ -1 \ 1 \ 1,5]^T$ ,  $c_{j2} = [-1,5 \ -1 \ 1 \ 1,5]^T$  và  $b_j = [1,05 \ 1,05 \ 1,05 \ 1,05]^T$ . Hằng số tốc độ học được chọn là  $\eta = 0,0055$  và hệ số momen được chọn là  $\alpha = 0,0021$ .



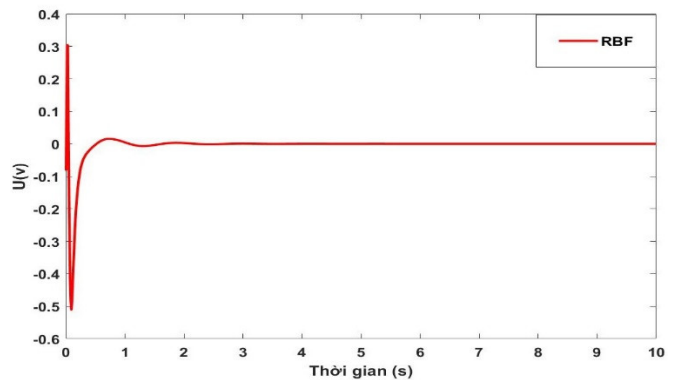
(a)



(b)

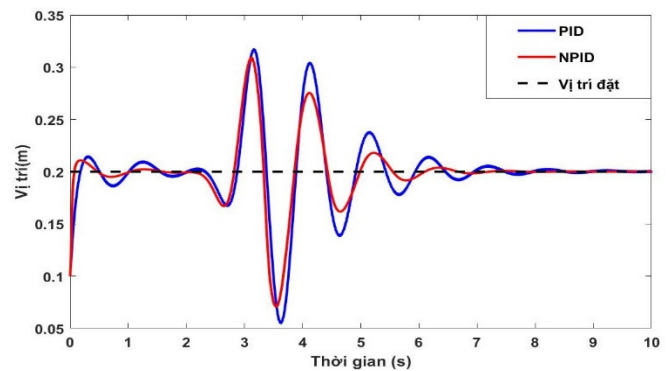


(c)

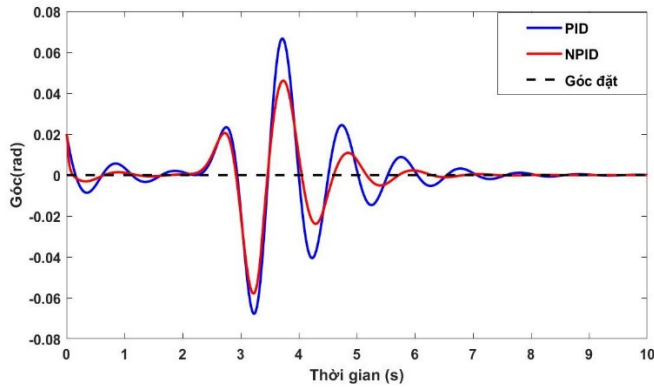


(d)

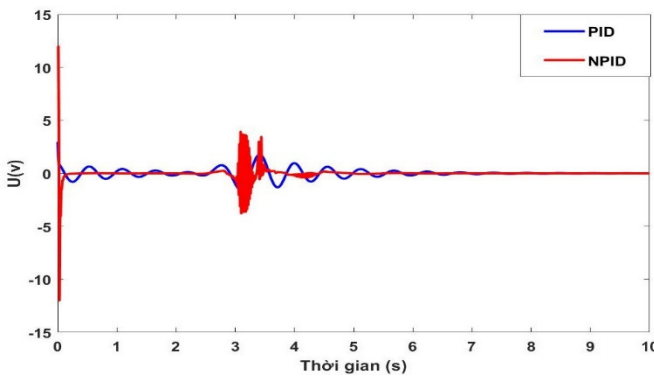
Hình 4. a) Tín hiệu vị trí trường hợp không nhiễu; b) Tín hiệu góc trường hợp không nhiễu; c) Tín hiệu điều khiển trường hợp không nhiễu; d) Tín hiệu bù của bộ RBF trường hợp không nhiễu



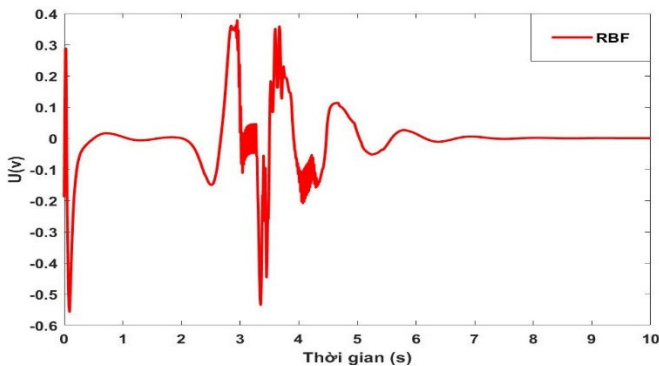
(a)



(b)



(c)



(d)

Hình 5. a) Tín hiệu vị trí trường hợp chịu nhiễu; b) Tín hiệu góc trường hợp chịu nhiễu; c) Tín hiệu điều khiển trường hợp chịu nhiễu; d) Tín hiệu bù nhiễu của bộ RBF trường hợp chịu nhiễu

Mô phỏng trường hợp không nhiễu được thể hiện trong hình 4. Tín hiệu của vị trí và tín hiệu của bộ điều khiển NPID cho kết quả tốt hơn so với bộ điều khiển PID. Tương tự, đối với trường hợp tác động nhiễu bất định lên Ballbot trong hình 5. Bộ điều khiển NPID cho thấy khả năng thích nghi tương đối tốt so với bộ điều khiển PID làm cho hệ thống đạt được trạng thái ổn định nhanh nhất. Tín hiệu bù nhiễu của mạng nơ-ron RBF được thể hiện trong hình 4(d) và hình 5(d) cho thấy khả năng xấp xỉ sai số đầu ra làm cho bộ điều khiển NPID đạt chất lượng tốt hơn bộ điều khiển PID.

#### 4. KẾT LUẬN

Phương pháp điều khiển NPID được thiết kế để giải quyết vấn đề cân bằng cho Ballbot một cách linh hoạt và hiệu quả hơn so với bộ điều khiển truyền thống PID. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển NPID cho kết quả tốt hơn so với bộ điều khiển PID truyền thống trong cả hai trường hợp không nhiễu và chịu nhiễu bất định. Trong nghiên cứu tiếp theo, phương pháp trên sẽ được ứng dụng trên mô hình thực tế trong bài toán cân bằng và bám quỹ đạo của mô hình Ballbot.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Hertig L., Schindler D., Bloesch M., Remy C. D., Siegwart R., "Unified state estimation for a ballbot," in *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2471-2476, 2013.
- [2]. Do V. T., Lee S. G., Kim J. H., "Robust integral backstepping hierarchical sliding mode controller for a ballbot system," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 144, 106866, 2020.
- [3]. Raja Sekhar N., Korrapati M., Hota R., Siva Kumar C., "New dynamic model and simulation of the ballbot using reaction wheels," in *Machines, Mechanism and Robotics: Proceedings of iNaCoMM 2017*, Springer Singapore, 807-816, 2019.
- [4]. Leutenegger S., Fankhauser P., *Modeling and control of a ballbot*. Bachelor Thesis, ETH Zurich, 2010.
- [5]. Nguyen V. T., Vu X. T., Giap H. B., "Adaptive Neural Network Hierarchical Sliding-Mode Control for Pendubot Based Genetic Algorithm Optimization," in *Intelligent Systems and Networks: Selected Articles from ICISN 2022, Vietnam*, 574-580. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022.
- [6]. Nguyen V. T., "Non-Negative Adaptive Mechanism-Based Sliding Mode Control for Parallel Manipulators with Uncertainties," *Computers, Materials & Continua*, 74(2), 2023.
- [7]. Nguyen V. T., Su S. F., Nguyen A. T., Nguyen V. T., "Adaptive nonsingular fast terminal sliding mode tracking control for parallel manipulators with uncertainties," in *2019 International Conference on System Science and Engineering (IC SSE)*, 522-525, IEEE, 2019.
- [8]. Sun W., Su S. F., Xia J., Nguyen V. T., "Adaptive fuzzy tracking control of flexible-joint robots with full-state constraints," *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics: systems*, 49(11), 2201-2209, 2018.
- [9]. Johnson M. A., Moradi M. H. *PID control*, 47-107. London, UK: Springer-Verlag London Limited, 2005.
- [10]. Liu J., *Radial Basis Function (RBF) neural network control for mechanical systems: design, analysis and Matlab simulation*. Springer Science & Business Media, 2013.

#### AUTHORS INFORMATION

**Nguyen Van Truong<sup>1</sup>, Duong Dai Nhan<sup>1</sup>,  
Bui Thanh Lam<sup>1</sup>, Ngo Huu Manh<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Hanoi University of Industry, Vietnam

<sup>2</sup>Sao Do University, Vietnam