

DOI:10.22144/ctu.jvn.2022.083

ĐIỀU KHIỂN GIÁM SÁT HỆ CẦU CÂN BẰNG VỚI THANH VÀ BÓNG DÙNG MẠNG NƠ-RON HÀM CƠ SỞ XUYÊN TÂM

Nguyễn Chí Ngôn^{1*}, Nguyễn Văn Thọ² và Trần Thị Hồng Phượng²

¹Khoa Công nghệ, Trường Đại học Cần Thơ

²Trường Cao đẳng nghề An Giang

*Người chịu trách nhiệm về bài viết: Nguyễn Chí Ngôn (email: ncngon@ctu.edu.vn)

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 18/10/2021

Ngày nhận bài sửa: 23/10/2021

Ngày duyệt đăng: 02/11/2021

Title:

Supervisory control for the beam and ball system using the radial basis function neural network

Từ khóa:

Cảm biến siêu âm, điều khiển giám sát, hệ cầu cân bằng, PID, RBF

Keywords:

Beam and ball system, PID, RBF, supervisory control, ultrasonic sensor

ABSTRACT

With its nonlinearity, instability, and data transmission delay, the beam and ball system is quite difficult to control. This study proposes to combine proportional-integral-derivative (PID) control and supervisory control using a radial basis function (RBF) neural network, called RBF-PID control, on a real beam and ball model. This model has been developed that integrated a compensator for sensor error and time delay. The PID controller plays the role of bringing the response close to the reference signal. The task of fine-tuning the response will be handled by the RBF controller. Experimental results on the beam and ball system with an ultrasonic positioning mechanism gave better results than the previous studies. Specifically, the response time was 1.5 ± 0.3 seconds; the settling time archived 6.5 ± 1.0 seconds; although the overshoot was still quite large, about $11 \pm 2\%$, the steady-state error was eliminated. The results showed that the RBF-PID controller is suitable for controlling the system.

TÓM TẮT

Vì tính phi tuyến, bất ổn và có trễ truyền dữ liệu, hệ cầu cân bằng với thanh và bóng khá khó kiểm soát. Nghiên cứu này đề xuất kết hợp điều khiển vi-tích phân-tỷ lệ (PID) và điều khiển giám sát dùng mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm (RBF), gọi là điều khiển RBF-PID, trên mô hình thật của hệ cầu cân bằng. Mô hình này đã được chế tạo từ trước, có tích hợp bộ bù sai số và thời gian trễ. Bộ điều khiển PID đóng vai trò đưa đáp ứng về gần giá trị tham khảo. Nhiệm vụ tinh chỉnh đáp ứng sẽ do bộ RBF đảm trách. Kết quả thực nghiệm trên hệ cầu cân bằng với cơ chế định vị bằng sóng siêu âm cho kết quả tốt hơn các nghiên cứu trước đó. Cụ thể, thời gian tăng của đáp ứng đạt $1,5 \pm 0,3$ giây; thời gian xác lập đạt $6,5 \pm 1,0$ giây; tuy độ vọt lố còn khá lớn, khoảng $11 \pm 2\%$, nhưng sai số xác lập đã được triệt tiêu. Kết quả cho thấy bộ điều khiển RBF-PID thích hợp để kiểm soát hệ thống.

1. GIỚI THIỆU

Hệ cầu cân bằng với thanh và bóng (beam and ball system) là một hệ hờ, có tính phi tuyến và bất

ổn (Salem, 2013; Ahmad & Hussain, 2017), thường được dùng để kiểm nghiệm các giải thuật điều khiển. Bộ điều khiển có nhiệm vụ kiểm soát góc nghiêng của thanh trượt để giữ quả bóng cân bằng tại vị trí

mong muốn. Tuy nhiên, dưới tác động của trọng lực, với một góc nghiêng nhỏ của thanh trượt, quả bóng sẽ lăn nhanh nên rất khó giữ đúng tại vị trí cân bằng. Vì vậy, đây có thể là một điểm đặc trưng đã hấp dẫn nhiều nghiên cứu liên quan đến hệ cầu cân bằng.

Meenakshipriya and Kalpana (2014) và Maalini et al. (2016) đã tập trung xây dựng mô hình hóa hệ cầu cân bằng và áp dụng bộ điều khiển kinh điển PID (Proportional – Integral – Derivative controller) để mô phỏng hoạt động của nó. Tuy nhiên, với tham số cố định, bộ điều khiển PID không đủ linh hoạt để thích ứng với các điều kiện biến đổi của mô hình đối tượng. Chính vì thế, nhiều nghiên cứu đã xây dựng các giải thuật điều khiển hiện đại, thông minh để có khả năng thích ứng tốt hơn. Thật vậy, Kharola and Patil (2017) đã áp dụng thành công giải thuật điều khiển dùng mạng nơ-ron mờ trên mô hình toán của hệ này. Tử và ctv. (2017) đã áp dụng mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF (radial basis function neural network) để mô phỏng hệ điều khiển này. Tương tự, Latif et al. (2019) đã kết hợp bộ điều khiển PID và bộ điều khiển mờ và Azar et al. (2020) đã áp dụng giải thuật bầy đàn để tìm kiếm tham số tối ưu cho bộ điều khiển PID và kiểm chứng trên mô hình hệ cầu cân bằng thông qua mô phỏng. Thực tế cho thấy, giữa mô phỏng trên máy tính và điều khiển thiết bị thật luôn tồn tại một khoảng cách mà ở đó, việc tuyến tính hóa mô hình toán của đối tượng không thể phản ánh đầy đủ các tác động thực tiễn của môi trường. Vì vậy, một số nghiên cứu đã tiến hành xây dựng mô hình thật của hệ cầu cân bằng. Một yêu cầu kỹ thuật khó khăn trong triển khai mô hình thật của hệ này, đó là giải pháp đo đạc chính xác vị trí quả bóng trên thanh trượt. Ngoài ra, thời gian trễ trong truyền thông tín hiệu từ cảm biến định vị về đến bộ điều khiển cũng ảnh hưởng lớn đến việc kiểm soát hệ thống. Bởi vì, nếu bộ điều khiển xác định quả bóng ở vị trí này, nhưng thực tế trên mô hình, quả bóng đã dịch chuyển sang vị trí khác thì tín hiệu điều khiển luôn bị tính toán sai.

Trong các nghiên cứu hiện nay, có hai trường phái thiết kế mô hình thực của hệ cầu cân bằng với kỹ thuật định vị quả bóng bằng phương pháp tiếp xúc và không tiếp xúc. Đối với phương pháp tiếp xúc, các nhóm nghiên cứu đã dùng hòn bi sắt trượt trên 2 thanh kim loại, như trong công bố của (Keshmiri, 2012; Saad & Khalallah, 2017). Vị trí của hòn bi chính là điểm ngăn mạch hai thanh trượt kim loại. Phương pháp này tỏ ra thuận lợi trong thiết kế, nhưng nó tồn tại một hạn chế lớn, đó là sai số vị trí sẽ tăng theo thời gian, do hòn bi và các thanh trượt sẽ bị mài mòn, bị oxy hóa và bám bụi bẩn. Để khắc phục hạn chế này, nhiều nhóm nghiên cứu đã

sử dụng phương pháp định vị không tiếp xúc. Trong các nghiên cứu của Ali et al. (2017) và Ahmad et al. (2017), các tác giả đã sử dụng cảm biến siêu âm để đo vị trí quả bóng. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chưa quan tâm đến việc xử lý sai số cảm biến và thời gian trễ của tín hiệu. Hơn nữa, điểm hạn chế lớn của các nghiên cứu này là các tác giả lại sử dụng bộ điều khiển PID truyền thống cho mô hình thực nghiệm của mình.

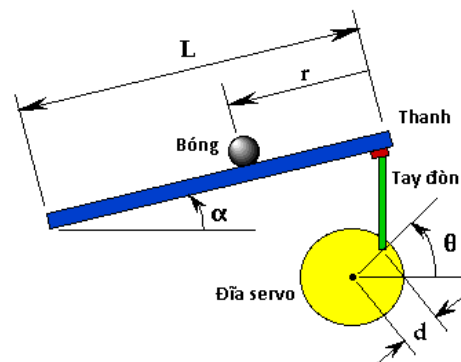
Nghiên cứu này nhằm mục tiêu áp dụng kỹ thuật điều khiển kết hợp giữa giải thuật điều khiển PID và giải thuật điều khiển giám sát (supervisory control) dùng mạng nơ-ron RBF (Liu, 2013), gọi tắt là bộ điều khiển RBF-PID, trên mô hình thực của hệ cầu cân bằng. Trong phạm vi bài báo này, giải thuật điều khiển và kết quả thực nghiệm sẽ được tập trung trình bày chi tiết. Phương pháp thiết kế và chế tạo mô hình thực nghiệm có tích hợp bộ bù sai số cảm biến và thời gian trễ của hệ thống được trình bày trong một công bố khác của nhóm nghiên cứu.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng điều khiển

Hệ cầu cân bằng với thanh và bóng được mô tả ở Hình 1 và được mô tả chi tiết trong các tài liệu của Ngôn và Tín (2011); Choudhary et al. (2016); Tử và ctv. (2017). Bộ điều khiển có nhiệm vụ kiểm soát động cơ để đĩa servo quay một góc $\theta(t)$, thông qua tay đòn, thanh trượt sẽ nghiêng một góc $\alpha(t)$ thích hợp nhằm giữ quả bóng cân bằng tại vị trí $r(t)$. Đối tượng này được mô hình hóa với ngõ vào là $\theta(t)$ và ngõ ra là $r(t)$ bằng hàm truyền tuyến tính hóa (Meenakshipriya et al., 2014; Tử và ctv., 2017; Ali et al., 2017) được xác định như sau (1), cùng với các thông số mô hình cho trong Bảng 1.

$$G(s) = \frac{R(s)}{\Theta(s)} = -\frac{mg}{\left(\frac{J_b}{R_b^2} + m\right) s^2} \left[\frac{m}{rad} \right] \quad (1)$$



Hình 1. Mô hình hệ cầu cân bằng

Bảng 1. Các thông số mô hình đối tượng

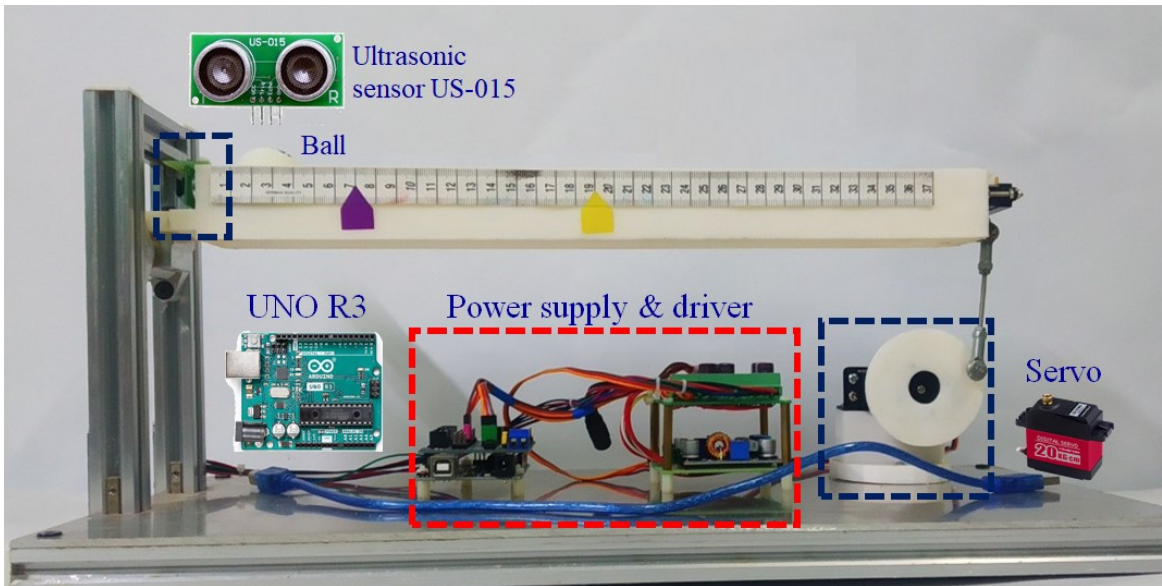
Tham số	Đơn vị	Ý nghĩa
m	kg	Khối lượng của quả bóng
R_b	m	Bán kính của quả bóng
J_b	kg.m ²	Momen quán tính của quả bóng
g	m/s ²	Gia tốc trọng trường
θ	rad	Góc quay đĩa servo (ngõ vào)
r	m	Vị trí quả bóng (ngõ ra)

Nghiên cứu này không đề cập chi tiết đến mô hình toán của đối tượng, mà chỉ tập trung vào việc áp dụng giải thuật điều khiển RBF-PID cho mô hình thực nghiệm của hệ cầu cân bằng với ngõ vào của đối tượng là góc quay $\theta(t)$ của đĩa servo và ngõ ra là vị trí $r(t)$ của quả bóng.

2.2. Mô hình thực nghiệm

Mô hình thực nghiệm của hệ cầu cân bằng với thanh và bóng được trình bày trong Hình 2. Trong

mô hình này, mô-đun Arduino Uno R3 thông dụng được dùng làm mạch giao tiếp giữa máy tính và thiết bị. Bộ điều khiển được thiết kế hoàn toàn trên máy tính. Tín hiệu điều khiển động cơ DC Servo hiệu LD-27MG sẽ được truyền từ bộ điều khiển trên máy tính đến driver của động cơ thông qua mạch giao tiếp này. Mô-đun cảm biến siêu âm US – 015 được bố trí ở đầu thanh trượt để đo vị trí quả bóng trên thanh. Mỗi mẫu giá trị đo này sẽ được đưa vào hàm bù sai số để khắc phục hạn chế sai số cảm biến và thời gian trễ của truyền thông tín hiệu. Tín hiệu ước lượng được từ hàm bù sai số sẽ truyền về máy tính thông qua mạch giao tiếp và được xem là vị trí của quả bóng. Chi tiết về việc thiết kế, chế tạo mô hình cầu cân bằng cùng với thuật toán bù sai số có thể tham khảo tại Ngõn và ctv. (2022).

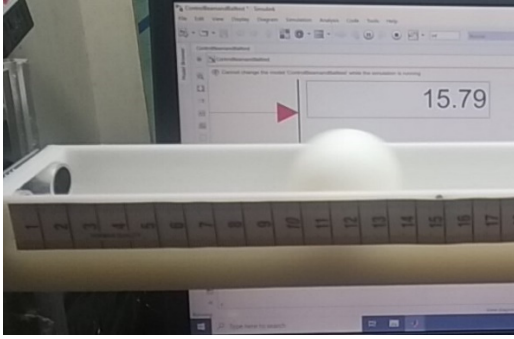


Hình 2. Mô hình thực nghiệm hệ cầu cân bằng

2.3. Hàm bù sai số cảm biến và thời gian trễ dữ liệu

Thực nghiệm trên hệ cầu cân bằng cho thấy dưới tác động của trọng lực, tốc độ di chuyển của quả bóng khá nhanh trên thanh trượt. Vì vậy, khi cảm biến lấy mẫu vị trí quả bóng, xử lý dữ liệu và truyền đến máy tính thì thực tế nó đã lăn sang vị trí mới, không còn ở vị trí vừa được lấy mẫu trước đó. Điều này gây nên tình trạng tính toán sai tín hiệu điều khiển, dẫn đến chất lượng kiểm soát hệ cầu cân bằng không tốt.

Để hạn chế sai số định vị của cảm biến, nghiên cứu này bố trí thí nghiệm như Hình 3. Một máy ảnh có chức năng chụp chế độ thể thao (chụp nhanh) được sử dụng để ghi đồng thời giá trị đo của cảm biến đã truyền về máy tính và vị trí hiện tại của quả bóng trên thanh trượt có gắn thước kẻ vạch (Hình 3). Tập hợp các mẫu dữ liệu thí nghiệm này dùng để xây dựng hàm bù sai số dựa theo phương pháp bình phương tối thiểu Levenberg-Marquardt (Marquardt, 1963; Gavin, 2000), được trình bày chi tiết trong Ngõn và Tín (2021).

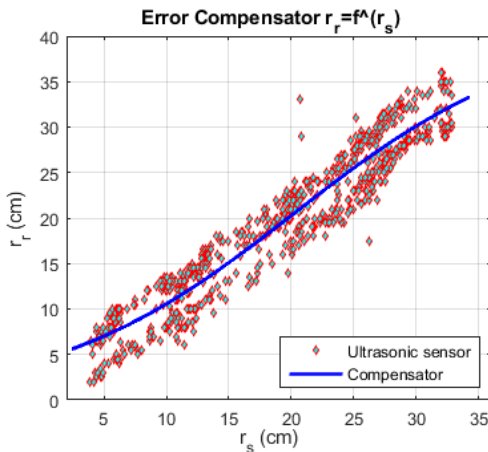


Hình 3. Bố trí thí nghiệm đo khoảng cách với cảm biến siêu âm

Hàm bù sai số được xác định và sử dụng trong nghiên cứu này như sau:

$$r_r = \hat{f}(r_s) = \frac{41.07}{(1 + 8.15 \times e^{-0.1 \times r_s})} \quad (2)$$

Trong đó, r_s là vị trí quả bóng đo được bằng cảm biến siêu âm; r_r là vị trí ước lượng bằng hàm bù sai số (2). Hình 4 minh họa tương quan của hàm bù sai số (2) và dữ liệu đo đạc được bằng thực nghiệm. Hàm bù sai số (2) được tích hợp vào vi điều khiển trên mô-đun Arduino Uno R3. Mỗi thời điểm vi điều khiển đọc giá trị cảm biến siêu âm US-015 thu được vị trí r_s thì giá trị này được đưa vào hàm (2) để tính toán được giá trị r_r . Giá trị r_r mới được truyền về máy tính và được hiểu đó là vị trí của quả bóng trên thanh trượt.



Hình 4. Kiểm nghiệm hàm bù sai số với cảm biến siêu âm

2.4. Xây dựng bộ điều khiển RBF-PID

Theo Liu (2013), nguyên tắc điều khiển kết hợp thuật toán điều khiển PID và bộ điều khiển giám sát dùng mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF, gọi tắt là bộ điều khiển RBF-PID được trình bày trên Hình 5. Theo nguyên tắc này, bộ điều khiển PID vẫn mang năng lượng chủ đạo để kiểm soát đối tượng. Bộ điều khiển RBF với cơ chế tự học trực tuyến sẽ đóng vai trò tự tinh chỉnh tín hiệu điều khiển phù hợp với sự biến đổi về môi trường hay đặc tính của đối tượng. Cơ chế tự chỉnh này cho phép bộ điều khiển RBF khắc phục được hạn chế về việc cố định tham số của bộ điều khiển PID. Bộ PID cũng có tác động ngược lại với bộ điều khiển RBF. Nếu bộ điều khiển RBF độc lập kiểm soát thiết bị, giải thuật cập nhật bộ trọng số của mạng sẽ khó hoặc lâu hội tụ, kéo theo thời gian xác lập của đáp ứng dài. Trong khi kết hợp với PID, nhờ bộ PID kéo đáp ứng về gần với giá trị xác lập nhanh chóng, mà giải thuật huấn luyện mạng RBF trở nên dễ dàng hội tụ hơn.

Trên sơ đồ Hình 5, vì bộ điều khiển PID chạy trong miền thời gian rời rạc nên tín hiệu điều khiển được lấy mẫu theo tần số lấy mẫu T_s của hệ thống. Tín hiệu điều khiển PID liên tục được xác định như sau:

$$u_p(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

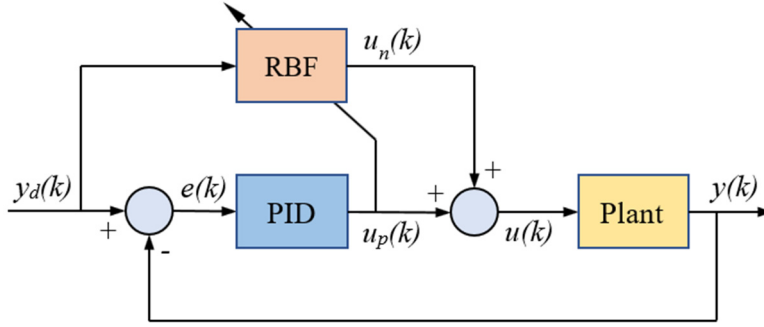
với $e(t)$ là sai biệt giữa đáp ứng và tín hiệu tham khảo. Gọi k là bước rời rạc tại thời điểm lấy mẫu $t = kT_s$ thì khâu tích phân và đạo hàm trong (3) được tính gần đúng như sau (Liu, 2013):

$$\int_0^t e(t) dt \cong T_s \sum_{n=0}^k e(n) \quad (4)$$

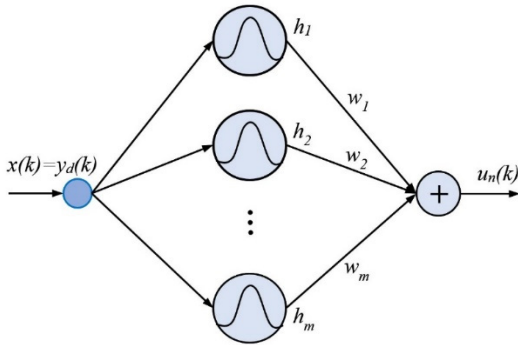
$$\frac{de(t)}{dt} \cong \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (5)$$

Thay (4) và (5) vào (3), ta có tín hiệu điều khiển PID rời rạc là:

$$u_p(k) = K_p e(k) + K_i T_s \sum_{n=0}^k e(n) + \frac{K_s}{T_s} (e(k) - e(k-1)) \quad (6)$$



Hình 5. Nguyên tắc điều khiển giám sát RBF-PID



Hình 6. Cấu trúc bộ điều khiển mạng nơ-ron RBF

Cấu trúc [1-m-1] của bộ điều khiển mạng nơ-ron RBF một ngõ vào, một ngõ ra và m nơ-ron ẩn được minh họa trên Hình 6. Gọi véc-tơ $\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_m]^T$ là các ngõ ra của các hàm Gauss trong mạng RBF m nút, thì ngõ ra hàm Gauss thứ j được xác định bởi (Liu, 2013):

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|x(k) - c_j\|^2}{2b_j^2}\right) \quad (7)$$

trong đó, $x(k)$ là ngõ vào của mạng RBF, trong trường hợp này, theo sơ đồ Hình 5 thì $x(k) = y_d(k)$; $\mathbf{c}_j = [c_1, \dots, c_m]$ là véc-tơ tâm và $\mathbf{b}_j = [b_1, \dots, b_m]^T$ là véc-tơ độ rộng của các hàm Gauss trong mạng nơ-ron RBF.

Gọi véc-tơ trọng số của mạng RBF là:

$$\mathbf{w} = [w_1, \dots, w_m]^T \quad (8)$$

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

$$u_n(k) = h_1 w_1 + h_2 w_2 + \dots + h_m w_m = \mathbf{h}^T \mathbf{w} \quad (9)$$

Kết hợp (6) và (9) ta có tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển RBF-PID là:

$$u(k) = u_p(k) + u_n(k) \quad (10)$$

2.5. Huấn luyện trực tuyến bộ điều khiển RBF

Một cách tổng quát, huấn luyện trực tuyến mạng nơ-ron RBF là quá trình cập nhật trực tuyến véc-tơ trọng số \mathbf{w} , véc-tơ tâm \mathbf{c}_j và véc-tơ độ rộng \mathbf{b}_j của các hàm Gauss trong mạng.

Hàm mục tiêu của quá trình huấn luyện mạng được chọn như sau (Liu, 2013):

$$E(k) = \frac{1}{2} (u_n(k) - u(k))^2 \quad (11)$$

Cũng theo (Liu, 2013), Phương pháp gradient descent được áp dụng để cập nhật các tham số của mạng như sau:

$$\Delta w_j(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial w_j(k)} = \eta [u_n(k) - u(k)] h_j(k) \quad (12)$$

$$w_j(k) = w_j(k-1) + \Delta w_j(k) + \alpha [w_j(k-1) - w_j(k-2)]$$

$$\Delta b_j(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial b_j(k)} = \eta [u_n(k) - u(k)] w_j(k) h_j(k) \frac{\|x - c_j\|^2}{b_j^3(k)} \quad (13)$$

$$b_j(k) = b_j(k-1) + \Delta b_j(k) + \alpha [b_j(k-1) - b_j(k-2)]$$

$$\Delta c_j(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial c_j(k)} = \eta [u_n(k) - u(k)] w_j(k) \frac{x - c_j}{b_j^2(k)} \quad (14)$$

$$c_j(k) = c_j(k-1) + \Delta c_j(k) + \alpha [c_j(k-1) - c_j(k-2)]$$

Trong đó, các hệ số $\eta \in (0,1)$ là hằng số tốc độ học và $\alpha \in (0,1)$ là hệ số mô-men.

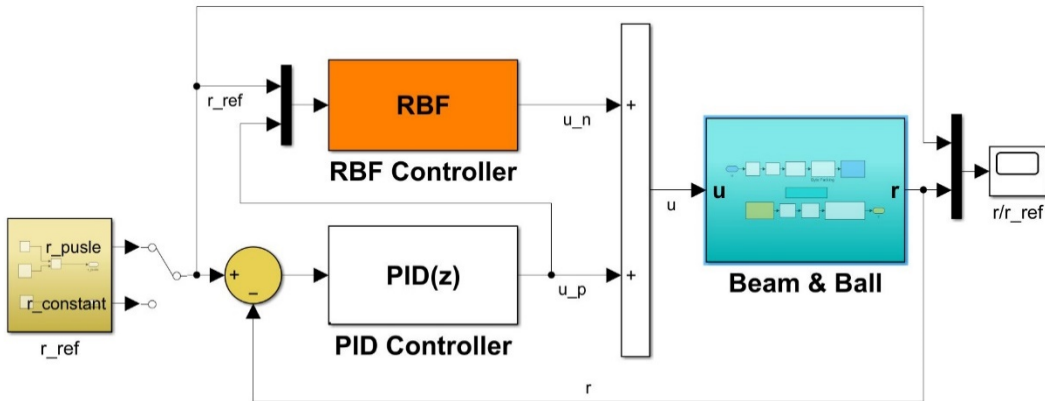
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Sơ đồ điều khiển

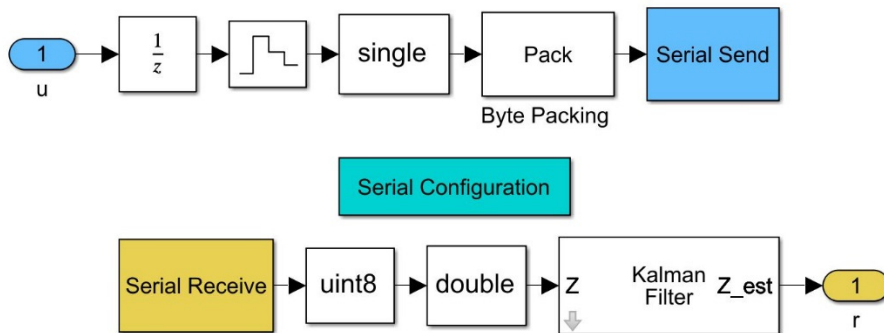
Sơ đồ điều khiển mô hình thực nghiệm hệ cầu cân bằng với thanh và bóng (Hình 2) được xây dựng

trong MATLAB/Simulink như Hình 7. Bộ điều khiển PID được chọn lựa thông số theo phương pháp thử sai, với $K_P = 8$, $K_I = 0,06$, $K_D = 6$. Việc lựa chọn tham số bộ PID không quá nghiêm ngặt, vì tín hiệu điều khiển còn có sự tham gia điều chỉnh của bộ điều khiển RBF. Cấu trúc mạng nơ-ron RBF được sử dụng trong thực nghiệm này là $[1 - 4 - 1]$, với véc-tơ trọng số được khởi động ngẫu nhiên trong $[0, 1]$; véc-tơ tâm c_j và véc-tơ độ rộng b_j của các hàm Gauss được chọn gồm $c_j = [-30, -15, 15, 30]$ và $b_j = [10,$

$10, 10, 10]^T$. Hằng số tốc độ học được chọn là $\eta = 0,1$ và hệ số mô-men được chọn là $\alpha = 0,5$. Thực nghiệm điều khiển cho thấy, khi bộ điều khiển PID tác động và đưa đáp ứng vị trí quả bóng về gần vị trí mong muốn (vị trí tham khảo) thì mạng nơ-ron RBF hội tụ nhanh và góp phần tích cực trong việc tinh chỉnh đáp ứng của hệ cầu cân bằng.



Hình 7. Sơ đồ điều khiển giám sát RBF-PID hệ cầu cân bằng

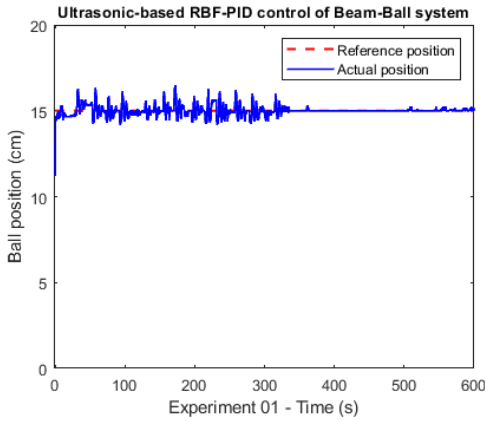


Hình 8. Sơ đồ truyền nhận dữ liệu

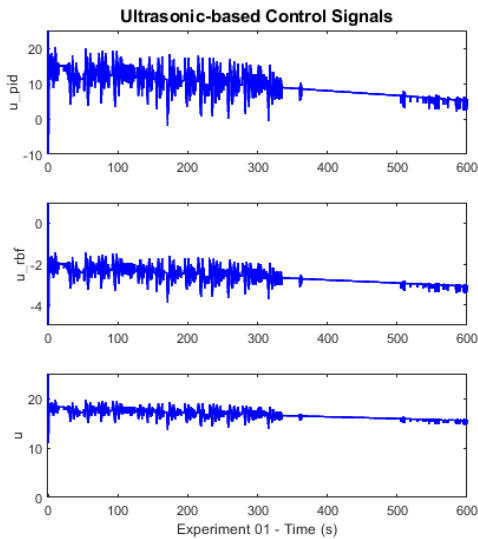
Hình 7 cho thấy khối Beam & Ball thực chất là khối giao tiếp giữa máy tính và mô-đun Arduino Uno R3, được MATLAB hỗ trợ sẵn các thư viện công cụ truyền thông nối tiếp mạnh mẽ. Sơ đồ bố trí mạch giao tiếp như Hình 8. Trong đó, tín hiệu điều khiển u sẽ được truyền từ máy tính xuống mạch driver của động cơ DC servo để kiểm soát góc nghiêng của thanh trượt. Đồng thời, vị trí quả bóng sau khi được bù sai số sẽ được truyền ngược về máy tính để làm tín hiệu hồi tiếp cho hệ điều khiển.

3.2. Thực nghiệm 1 – tín hiệu tham khảo cố định

Thực nghiệm 1 được triển khai với vị trí tham khảo cố định ở 15 cm (hàm step) và cảm biến vị trí được dùng là cảm siêu âm US-015. Hình 9 trình bày đáp ứng của hệ cầu cân bằng. Hình 10 trình bày tín hiệu điều khiển tương ứng. Kết quả cho thấy quả bóng được giữ vững ở vị trí 15 cm như mong muốn, mặc dù có dao động nhẹ xung quanh vị trí cân bằng.



Hình 9. Đáp ứng vị trí với vị trí tham khảo cố định



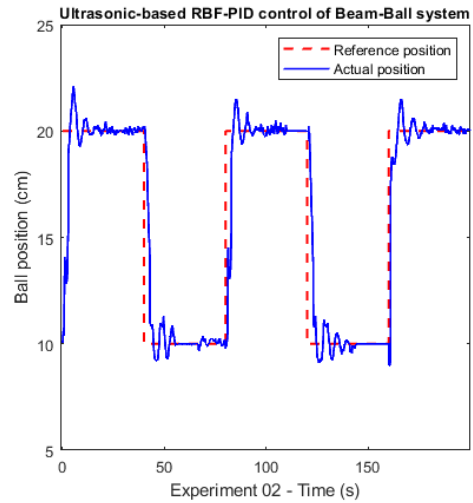
Hình 10. Tín hiệu điều khiển ứng với vị trí tham khảo cố định

3.3. Thực nghiệm 2 – tín hiệu tham khảo xung vuông

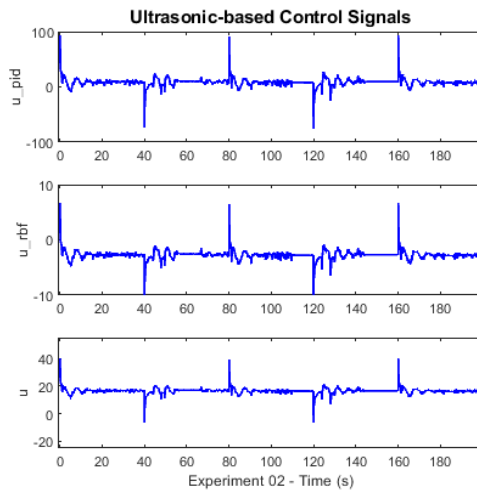
Thực nghiệm 2 được triển khai với vị trí tham khảo dạng xung vuông biên độ biến thiên từ 10 đến 20 cm. Kết quả thực nghiệm cho đáp ứng vị trí quả bóng như trình bày trên Hình 11 và tín hiệu điều khiển tương ứng như trên Hình 12. Kết quả thực nghiệm cho thấy quả bóng được giữ vững ở 2 vị trí là 10 cm và 20 cm, theo biến đổi của xung vuông tham khảo. Quá trình chuyển trạng thái từ vị trí 10 cm này sang vị trí 20 cm, đáp ứng có dao động theo quán tính của quả bóng, phản ánh đúng động lực học của hệ.

Thống kê cho thấy thời gian tăng của đáp ứng khá nhanh, đạt $1,5 \pm 0,3$ giây; thời gian xác lập còn

khá dài, khoảng $6,5 \pm 1$ giây; độ vọt lố khá lớn, khoảng $11 \pm 2\%$; nhưng sai số xác lập đã bị triệt tiêu.



Hình 11. Đáp ứng với vị trí tham khảo xung vuông

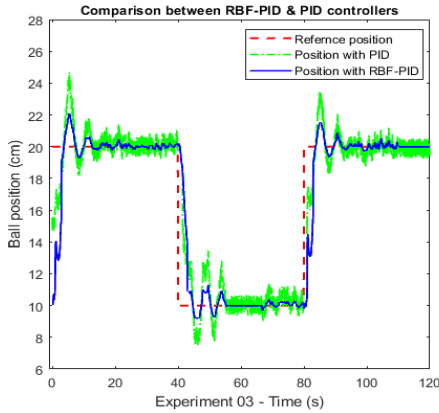


Hình 12. Tín hiệu điều khiển tương ứng với vị trí tham khảo xung vuông

3.4. Thực nghiệm 3 – so sánh hai kiểu điều khiển

Thực nghiệm 3 được triển khai để so sánh hai trường hợp điều khiển. Trường hợp 1: Cơ lập bộ điều khiển RBF, chỉ cho bộ điều khiển PID kinh điển kiểm soát hệ cầu cân bằng. Trường hợp 2: Áp dụng bộ điều khiển kết hợp RBF-PID. Kết quả thực nghiệm cho đáp ứng vị trí quả bóng như trình bày trên Hình 13, khi kiểm soát quả bóng cân bằng ở 2 vị trí tham khảo, lần lượt là 10 cm và 20 cm. Hình 13 cho thấy bộ điều khiển kết hợp RBF-PID đã tham gia tích cực vào việc giữ quả bóng tại vị trí cân bằng,

nhờ sự hỗ trợ của bộ RBF với cơ chế tự cập nhật. Khi chỉ điều khiển hệ cầu cân bằng với bộ điều khiển PID kinh điển, quả bóng vẫn được giữ tại vị trí tham khảo, nhưng nó bị dao động qua lại xung quanh vị trí này. Trong khi bộ điều khiển RBF-PID đã khắc phục đáng kể hiện tượng đó.



Hình 13. So sánh điều khiển RBF-PID và PID kinh điển

3.5. Thảo luận

Bộ điều khiển giám sát RBF-PID có khả năng kiểm soát tốt vị trí quả bóng trên cầu cân bằng với một số chỉ tiêu chất lượng điều khiển đạt yêu cầu, đặc biệt là thời gian tăng và sai số xác lập. Mặc dù

Bảng 2. So sánh một số chỉ tiêu chất lượng với một số nghiên cứu trước đó

Bộ điều khiển	Thời gian tăng (giây)	Độ vọt lố (%)	Thời gian xác lập (giây)	Sai số xác lập (cm)
PID của (Ali et al., 2017)	2	30	10	0
Fuzzy của (Latif et al., 2019)	1,5	10	6	0,5
RBF-PID của nghiên cứu này	1,5 ± 0,3	11 ± 2	6,5 ± 1,0	0

Việc áp dụng giải thuật bù sai số cảm biến và thời gian trễ truyền dữ liệu được triển khai trong nghiên cứu này tỏ ra ưu điểm, mà các nghiên cứu trước đây chưa tiếp cận đến. Thực nghiệm cho thấy, khi cảm biến lấy mẫu vị trí quả bóng, xử lý dữ liệu và truyền về đến máy tính thì quả bóng đã dịch chuyển sang vị trí khác. Do đó, cơ chế bù sai số cho phép bộ điều khiển luôn ước lượng được vị trí mới của quả bóng khi tính toán luật điều khiển.



Hình 13. Clip biểu diễn thực nghiệm điều khiển hệ cầu cân bằng

độ vọt lố của đáp ứng còn khá lớn, khoảng 11±2%, tuy nhiên, so với kết quả thực nghiệm của các công bố hiện nay thì các chỉ tiêu chất lượng là tương đương như trình bày ở Bảng 2. Cụ thể, để giữ quả bóng tại vị trí 20 cm, bộ điều khiển PID trong (Ali et al., 2017) cho độ vọt lố tới 30% và bộ điều khiển mờ trong (Latif et al., 2019) cho độ vọt lố khoảng 10%, còn bộ điều khiển giám sát RBF-PID của nghiên cứu này cho độ vọt lố 11 ± 2%. Thời gian xác lập của hệ thống trong nghiên cứu của Ali et al. (2017) khoảng 10 giây, của Latif et al. (2019) khoảng 6 giây và của nghiên cứu này là 6,5 ± 1,0 giây. Thời gian tăng và sai số xác lập của cả ba nghiên cứu trong Bảng 2 không chênh lệch đáng kể.

Nguyên nhân dẫn đến thời gian xác lập và độ vọt lố của hệ cầu cân bằng trong nghiên cứu này không nằm ở chất lượng điều khiển của bộ RBF-PID mà được đánh giá là do hạn chế về cơ khí chính xác trong chế tạo và ma sát của quả bóng trên thanh trượt. Thật vậy, thực tế điều khiển cho thấy sai số của cơ cấu truyền động từ trục của động cơ servo đến góc nghiêng của thanh trượt đã gây ra dao động của quả bóng, làm cho bộ điều khiển phải mất thời gian để giữ cân bằng ở các thời điểm thay đổi vị trí tham khảo. Ngoài ra, cả thanh trượt và quả bóng đều được chế tạo bằng kỹ thuật in 3D trên vật liệu nhựa ABS nên ma sát cũng ảnh hưởng nhất định đến chất lượng điều khiển.

Quét mã QR trong Hình 13 để xem clip minh họa hoạt động thực nghiệm trên hệ cầu cân bằng này.

4. KẾT LUẬN

Bài viết trình bày phương pháp kết hợp giữa giải thuật điều khiển kinh điển PID và giải thuật điều khiển giám sát dùng mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF, gọi tắt là bộ điều khiển RBF-PID, trên mô hình thực nghiệm đã được thiết kế và chế tạo trước, có tích hợp bộ bù sai số cảm biến siêu âm và thời gian trễ truyền tín hiệu, để khắc phục những hạn chế mà các nghiên cứu trước đó chưa tiếp cận. Kết quả cho thấy khi cảm biến lấy mẫu vị trí quả bóng, xử lý dữ liệu và truyền về đến máy tính thì quả bóng đã dịch chuyển sang vị trí khác. Vì thế, cơ chế bù sai số cho phép bộ điều khiển luôn ước lượng được vị trí mới của quả bóng trong lúc tính toán luật điều

hiển. Trong cơ chế điều khiển kết hợp này, bộ điều khiển PID được xây dựng theo phương pháp thử sai với yêu cầu không quá nghiêm ngặt, mà chỉ cần đưa đáp ứng về gần giá trị tham khảo. Nhiệm vụ tinh chỉnh đáp ứng còn lại sẽ do bộ điều khiển RBF đảm trách nhờ cơ chế huấn luyện trực tuyến của nó. Kết quả thực nghiệm bộ điều khiển RBF-PID trên hệ cầu cân bằng với cơ chế định vị quả bóng bằng sóng siêu âm cho kết quả từ tương đương đến tốt hơn các nghiên cứu trước đó. Cụ thể, thời gian tăng của đáp

ứng khá nhanh, đạt $1,5 \pm 0,3$ giây; thời gian xác lập đạt khoảng $6,5 \pm 1,0$ giây; độ vọt lố còn khá lớn, khoảng 11 ± 2 %; và sai số xác lập đã được triệt tiêu.

Trong thời gian tới, việc cải thiện độ chính xác cơ khí của các khâu truyền động, sơn hay xi mạ cả thanh trượt và quả bóng nhựa sẽ được tiếp tục triển khai. Đồng thời, một số kỹ thuật điều khiển hiện đại khác cũng được tiếp tục kiểm nghiệm trên mô hình này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Ahmad, B. & Hussain, I. (2017). Design and hardware implementation of ball & beam setup. *2017 Fifth International Conference on Aerospace Science & Engineering (ICASE)*, 1-6, doi: 10.1109/ICASE.2017.8374271.
- Ali, A. T., Ahmed A. M., Almahdi H. A., Osama A. Taha & A. NaserAldeen A. (2017). Design and Implementation of Ball and Beam System Using PID Controller. *Automatic Control and Information Sciences*, 3(1), 1-4. DOI: 10.12691/acis-3-1-1.
- Azar, A. T., Ali, N., Makarem, S., Diab, M. K. & Ammar, H. H. (2020). Design and Implementation of a Ball and Beam PID Control System Based on Metaheuristic Techniques. In: Hassanien A., Shaalan K., Tolba M. (eds), *Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent Systems and Informatics 2019 - AISI 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1058, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31129-2_29.
- Choudhary, M. K. & Kumar, G. N. (2016). ESO Based LQR Controller for Ball and Beam System. *IFAC-Papers On Line*, 49(1), 607-610. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.03.122>.
- Gavin, H. P. (2000). *The Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems*. Department of Civil and Environmental Engineering, Duke University, September 18, 2020.
- Keshmiri, M., Jahromi, A. F., Mohebbi, A., Amoozgar, M. H., & Xie, W.-F. (2012). Modeling and control of ball and beam system using model based and non-model based control approaches. *Inter. J. on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 5(1), 14-35. DOI: <https://doi.org/10.21307/ijssis-2017-468>.
- Kharola, A., & Patil, P. P. (2017). Neural Fuzzy Control of Ball and Beam System. *International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEEO)*, 6(2), 64-78, <http://doi.org/10.4018/IJEEO.2017040104>.
- Latif, S., Muhammad, E. & Naeem, U. (2019). Implementation of ball and beam system using classical and advanced control techniques. *2019 International Conference on Applied and Engineering Mathematics (ICAEM)*, 74-79, doi: 10.1109/ICAEM.2019.8853822.
- Liu, J. (2013). *Radial Basis Function (RBF) Neural Network Control for Mechanical Systems*. Springer, 365 pages. DOI 10.1007/978-3-642-34816-7
- Maalini, P. V. M., Prabhakar, G. & Selvaperumal, S. (2016). Modelling and control of ball and beam system using PID controller. *Inter. Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT)*, 322-326, doi: 10.1109/ICACCCT.2016.7831655.
- Marquardt, D. W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2), 431-441.
- Meenakshipriya, B. & Kalpana, K. (2014). Modelling and Control of Ball and Beam System using Coefficient Diagram Method (CDM) based PID controller. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(1), 620-626. <https://doi.org/10.3182/20140313-3-IN-3024.00079>.
- Ngôn, N. C. & Tín, D. (2011). Điều khiển PID một nơron thích nghi dựa trên bộ nhận dạng mạng nơron mở hồi qui áp dụng cho hệ thanh và bóng. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 20a, 159-168. URL: <https://sj.ctu.edu.vn/ql/docgia/tacgia-1134/baibao-5605.html>
- Ngôn, N. C., Tân, T. T., Phụng, V. C. & Cảnh, N. M. (2021). Cải thiện thiết bị hỗ trợ người khiếm thị điều hướng di chuyển dùng sóng siêu âm. *Thai Nguyen University Journal of Science and Technology*, 226(11), 292-299. DOI: <https://doi.org/10.34238/tmu-jst.4812>.
- Ngôn, N. C., Thọ, N. V., & Phụng, T. T. H. (2022). Chế tạo hệ cầu cân bằng tích hợp bộ bù sai số định vị cho cảm biến siêu âm và hồng ngoại. *Tạp*

- chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 58(2), 11-21. <https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2022.032>.
- Saad, M., & Khalallah, M. (2017). Design and implementation of an embedded ball-beam controller using PID algorithm. *Universal J. of Control and Automation*, 5(4), 63-70. DOI: 10.13189/ujca.2017.050402.
- Salem, F. (2013). Mechatronics Design of Ball and Beam System: Education and Research. *Control Theory and Informatics*, 3(4), 1-26.
- The MathWorks, Inc. (2021). *Curve Fitting Toolbox™ User's Guide*.
- Tứ, N. D., Đăng, L. H., Cường, T. C. & Ngôn, N. C. (2017). Điều khiển thích nghi theo mô hình tham khảo dựa trên mạng nơ-ron RBF. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, (50), 37-42. <https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2017.064>.