Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ
Phần A: Khoa học Tự nhiên, Công nghệ và Môi trường
website: ctujsvn.ctu.edu.vn

DOI:10.22144/ctu.jvn.2022.032

CHẾ TẠO HỆ CẦU CÂN BẰNG TÍCH HỢP BỘ BÙ SAI SỐ ĐỊNH VỊ CHO CẢM BIẾN SIÊU ÂM VÀ HỒNG NGOẠI

Nguyễn Chí Ngôn[1*], Nguyễn Văn Thọ[2] và Trần Thị Hồng Phượng[2]

[1]*Khoa Công nghệ, Trường Đại học Cần Thơ*

[2]*Trường 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: 07/10/2021
Ngày nhận bài sửa: 28/10/2021
Ngày duyệt đăng: 22/04/2022

Title:
Implementation of Beam and Ball system integrated positioning error compensators for ultrasonic and infrared sensors

Từ khóa:
Arduino, bộ bù sai số, giải thuật Levenberg-Marquardt, hệ cầu cân bằng, PID, mạng nơ-ron RBF

Keywords:
Arduino, Beam & Ball system, Error compensator, PID, Levenberg-Marquardt algorithm, RBF neural networks

ABSTRACT

The Beam and Ball system is an unstable object that is often used to test several control algorithms. Due to the fast movement of the ball on the beam, when the sensor measures the ball position and transmits that data to the computer, the ball has moved to a new position that affects to the control quality. This study focuses on design and implementation of a real model of the beam and ball system, positioning the ball by ultrasonic and infrared sensors. Functions of positioning errors are identified and applied to compensate the sensor errors and the delay time of data transmission. An Arduino UNO R3 module is used to transmit the control signal from the computer to the driver of servo motor, and receive the measured position signal from the sensor to feed back to the control system. Experiments with RBF-PID controller and infrared sensor show that the rise time of the system archives 1.5 ±0.3 seconds, the setting time is about 6 ± 1 seconds, the overshoot is about 11 ± 2%, and the steady-state error is eliminated.

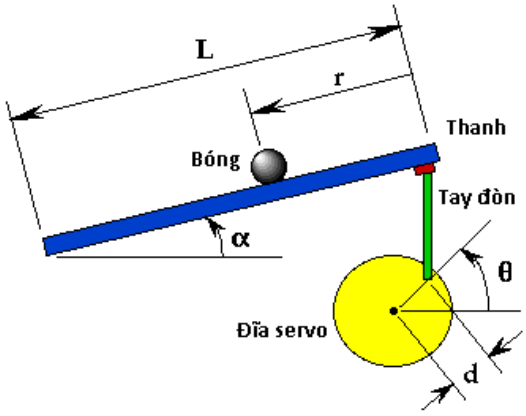
TÓM TẮT

Hệ cầu cân bằng với thanh và bóng thường được dùng để kiểm nghiệm các giải thuật điều khiển. Do tốc độ di chuyển nhanh của bóng trên thanh trượt nên khi cảm biến lấy mẫu vị trí bóng và truyền dữ liệu về đến máy tính, quả bóng đã di chuyển sang vị trí mới, ảnh hưởng đến chất lượng điều khiển. Nghiên cứu này tập trung thiết kế và chế tạo mô hình cầu cân bằng, định vị quả bóng bằng cảm biến siêu âm và hồng ngoại. Hàm bù sai số cảm biến được áp dụng để khắc phục sai số cảm biến và độ trễ do truyền dữ liệu. Module Arduino UNO R3 được sử dụng để truyền tín hiệu điều khiển từ máy tính xuống mô hình để kiểm soát động cơ và nhận tín hiệu vị trí đo được từ cảm biến để phản hồi cho máy tính. Thực nghiệm với bộ điều khiển RBF-PID và cảm biến hồng ngoại cho thấy đáp ứng của hệ có thời gian tăng đạt 1,5 ± 0,3 giây, thời gian xác lập khoảng 6 ± 1 giây, độ vọt lố khoảng 11 ± 2%, và sai số xác lập là không đáng kể.

1. GIỚI THIỆU

Kiểm soát các hệ thống bất ổn luôn là một nhiệm vụ quan trọng và khó khăn trong kỹ thuật điều khiển. Hệ cầu cân bằng với thanh và bóng (beam & ball system) như mô tả trên Hình 1 (Ngôn & Tín, 2011; Tứ và ctv., 2017) thường được sử dụng để kiểm nghiệm các giải thuật điều khiển áp dụng cho các đối tượng vốn khó có thể triển khai trực tiếp trong

thực tế, như giữ cân bằng thân máy bay khi hạ cánh hoặc khi nó hoạt động trong luồng không khí nhiễu loạn (Ali et al., 2017). Nhiệm vụ của bộ điều khiển áp dụng cho hệ cầu cân bằng là kiểm soát vị trí của quả bóng cân bằng tại vị trí mong muốn, phù hợp với nhiều yếu tố phi tuyến tác động như nhiễu cảm biến vị trí quả bóng, độ trễ của động cơ tác động, độ trễ của thao tác truyền nhận dữ liệu, tác động của ma sát và tác động của các yếu tố bất định khác của điều kiện thực tế. Vị trí quả bóng sẽ lăn nhanh dưới tác động của một góc nghiêng nhỏ của thanh trượt (còn được gọi là thanh cân bằng), do đó, cầu cân bằng là một hệ vòng hở, phi tuyến và bất ổn (Salem, 2013; Ahmad & Hussain, 2017).



Hình 1. Mô hình hệ cầu cân bằng

Mặc dù hệ cầu cân bằng (Hình 1) được sử dụng làm cơ sở để xây dựng các hệ tự cân bằng như tên lửa, máy bay và xe tự hành (Ahmad et al., 2017; Ali et al., 2017; Latif et al., 2017). Tuy nhiên, các nghiên cứu chủ yếu dựa vào mô phỏng trên phương trình toán của đối tượng. Thật vậy, trong Meenakshipriya & Kalpana (2014) và Choudhary & Kumar (2016), các tác giả chỉ mô phỏng thuật toán kinh điển như PID (proportional integral derivative controller), LQR (linear quadratic regulator) để kiểm soát đối tượng này. Trong các nghiên cứu của Ngôn và Tín (2011), Kharola and Patil (2017), Tứ và ctv. (2017), các tác giả đã mô phỏng thành công việc kết hợp các kiểu điều khiển thông minh dựa trên logic mờ và mạng nơ-ron nhân tạo để kiểm soát vị trí quả bóng trên thanh trượt.

Một số nghiên cứu xây dựng mô hình thực nghiệm của hệ cầu cân bằng cũng đã được triển khai, công bố, thậm chí là thương mại sản phẩm. Cách đơn giản nhất để xác định vị trí là dùng hòn bi sắt trượt trên 2 thanh trượt bằng kim loại (Keshmiri, 2012; Saad & Khalallah, 2017). Hòn bi sẽ ngắn mạch hai thanh trượt kim loại tại vị trí tiếp xúc gây ra sự biến thiên về điện áp hay dòng điện, từ đó, xác định vị trí hòn bi trên cầu. Điểm hạn chế lớn nhất của phương pháp này là sai số theo thời gian, khi hòn bi và các thanh trượt bị mài mòn, bị oxy hóa, bám bụi bẩn… Để khắc phục hạn chế này, các nghiên cứu trong Ahmad et al. (2017), Ali et al. (2017), và Latif et al. (2017) sử dụng cảm biến không tiếp xúc dùng sóng siêu âm để xác định vị trí quả bóng. Tuy nhiên, thực tế cho thấy cảm biến siêu âm có sai số không tuyến tính (Ngôn và ctv., 2021). Do đó, nếu không có giải pháp bù sai số, còn gọi là hiệu chỉnh mềm cảm biến thì sai số vị trí sẽ ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng điều khiển.

Nghiên cứu này tập trung xây dựng mô hình thực nghiệm của hệ cầu cân bằng dựa trên các vật liệu và linh kiện dễ tìm trên thị trường. Cầu cân bằng với thanh trượt và quả bóng được thực hiện bằng kỹ thuật in 3D với vật liệu nhựa ABS. Cảm biến vị trí quả bóng trên thanh trượt được thực hiện với hai kỹ thuật đo không tiếp xúc dùng sóng siêu âm và ánh sáng hồng ngoại. Giải thuật bình phương tối thiểu Levenberg-Marquardt (Gavin, 2000) được áp dụng để xây dựng hàm bù sai số cho cảm biến vị trí bóng. Bộ điều khiển kết hợp PID và mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF (radial basis function neural networks) gọi tắt là bộ điều khiển RBF-PID, được sử dụng để đánh giá kết quả điều khiển với trường hợp minh họa cảm biến vị trí dùng ánh sáng hồng ngoại.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình toán của hệ cầu cân bằng

Mô hình toán của hệ cầu cân bằng đã được trình bày đầy đủ trong nhiều tài liệu (Ngôn & Tín, 2011; Choudhary et al., 2016; Tứ và ctv., 2017). Quả bóng lăn dọc theo thanh trượt dưới tác động của trọng lực. Thanh trượt được kéo nghiêng một góc nhờ mô - men xoắn tạo ra bởi tay đòn và đĩa servo bên ngoài, để kiểm soát vị trí của quả bóng trên thanh (Hình 1). Gọi *r(t)* là vị trí của quả bóng trên thanh (ngõ ra) và *θ(t)* là góc quay của đĩa servo (ngõ vào), hàm truyền tuyến tính hóa của hệ cầu cân bằng (Meenakshipriya et al., 2014; Ali et al., 2017; Tứ và ctv., 2017) được xác định như (1) với các tham số mô hình được bày trong Bảng 1.

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

Bảng 1. Các tham 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)

Truyền động cho đĩa servo trong mô hình này là động cơ DC servo. Gọi $V(t)$ là điện áp cung cấp cho động cơ và $\theta(t)$ là góc quay của trục động cơ – cũng là vị trí đĩa servo trên Hình 1, hàm truyền của động cơ được xác định như (2) với các thông số của động cơ được trình bày ở Bảng 2 (Ali et al., 2017; Jasim, 2018).

$$H(s) = \frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{K \cdot K_g}{\left[Ls + b \quad Js + R \quad + K^2 \right] s} \left[\frac{rad}{V} \right] \quad (2)$$

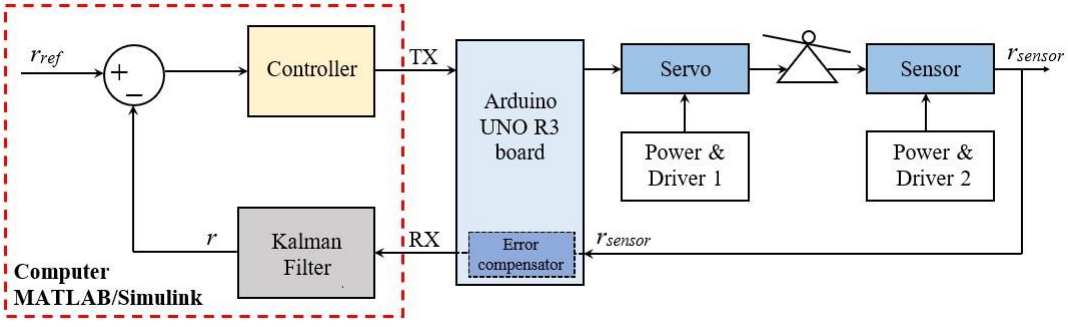
Bảng 2. Các thông số động cơ DC servo

Tham số	Đơn vị	Ý nghĩa
V	V	Điện áp phần ứng (ngõ vào)
θ	rad	Góc servo (ngõ ra)
R	Ω	Điện trở phần ứng
J	kg.m^2	Moment quán tính của roto
L	H	Điện cảm phần ứng
b	Nms	Hệ số ma sát
K	V/rad/s	Hằng số sức điện động cảm ứng
K_g	-	Tỷ số truyền động

Từ các phương trình toán (1) và (2) của đối tượng, ta thấy rằng một số thông số của mô hình trong thực tế không dễ dàng xác định. Vì vậy, khi thiết kế bộ điều khiển theo phương pháp dựa vào mô hình toán sẽ gặp khó khăn. Nghiên cứu này hướng đến việc xây dựng bộ điều khiển có khả năng tự chỉnh định tham số của nó dựa vào sai biệt giữa vị trí quả bóng thực tế và vị trí cân bằng mong muốn. Nghĩa là, để kiểm soát vị trí quả bóng trên thanh trượt, trước tiên ta cần xác định được vị trí hiện tại của bóng. Từ đó, dựa vào sai biệt của nó với vị trí tham khảo bộ điều khiển, ta sẽ kiểm soát động cơ với góc quay phù hợp của đĩa servo, làm cho thanh trượt đạt được góc nghiên tương ứng để giữ quả bóng cân bằng tại vị trí mong muốn trên thanh trượt. Như vậy, mô hình thực nghiệm hệ cầu cân bằng trong nghiên cứu này sẽ tập trung vào việc xác định chính xác vị trí thực tế của quả bóng, xem nó là đáp ứng của hệ. Đồng thời xây dựng cơ chế giao tiếp để bộ điều khiển có thể kiểm soát được góc quay của động cơ DC servo với tín hiệu điều khiển thích hợp. Nói cách khác, mô hình thực nghiệm này phù hợp với các giải thuật điều khiển mà ở đó quá trình thiết kế dựa theo ngõ vào và ngõ ra của đối tượng, mà không quá phụ thuộc vào thông số của nó.

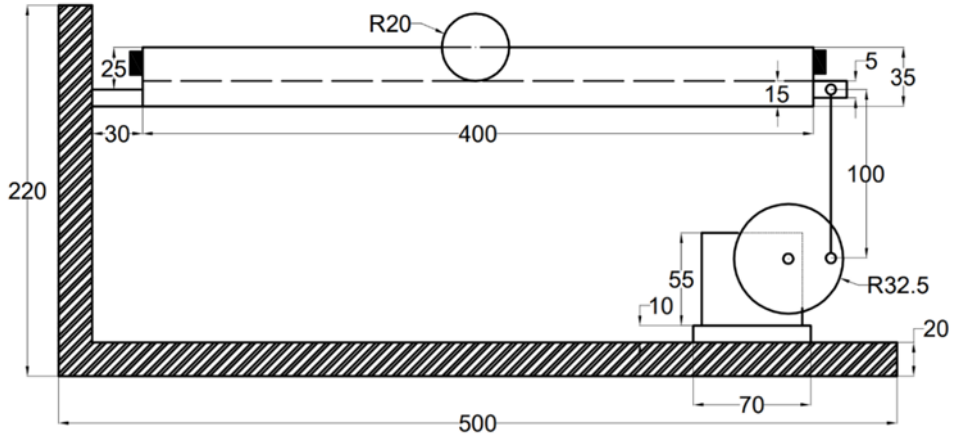
2.2. Thiết kế mô hình

Sơ đồ tổng quát của mô hình thực nghiệm hệ cầu cân bằng được trình bày trên Hình 2. Ở đây, bộ điều khiển sẽ được xây dựng trên máy tính. Tín hiệu điều khiển từ máy tính được truyền xuống mô hình để kiểm soát góc quay của động cơ DC servo thông qua module giao tiếp Arduino UNO R3 thông dụng. Vị trí quả bóng trên thanh trượt được xác định nhờ cảm biến đo khoảng cách dựa trên sóng siêu âm hoặc ánh sáng hồng ngoại. Vị trí bóng được đọc bởi cảm biến và thực hiện bù sai số trên vi điều khiển, sau đó truyền ngược về máy tính thông qua module giao tiếp này. Trên máy tính, bộ lọc nhiễu Kalman xây dựng sẵn của MATLAB được áp dụng để lọc tín hiệu vị trí và hồi tiếp về so sánh với tín hiệu tham khảo, làm cơ sở tính toán cho bộ điều khiển, như sơ đồ Hình 2.



Hình 2. Sơ đồ tổng quát của mô hình hệ cầu cân bằng

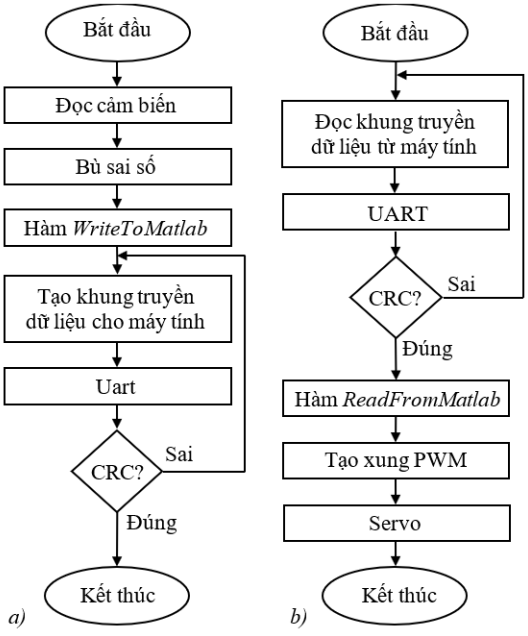
Từ sơ đồ tổng quát của mô hình, bản vẽ thiết kế hệ cầu cân bằng được thực hiện như mô tả trong Hình 3. Thanh trượt 400 mm và quả bóng bán kính 20 mm được chế tạo bằng kỹ thuật in 3D với vật liệu nhựa ABS. Đĩa servo có bán kính 32,5 mm và tay đòn 100 mm được tác động bởi một động cơ DC servo để thay đổi góc nghiêng của thanh trượt. Hai đầu thanh trượt được thiết kế thích hợp để có thể lắp cảm biến đo vị trí bóng dùng siêu âm và ánh sáng hồng ngoại. Tuy nhiên, ở mỗi thời điểm ứng dụng chỉ có một loại cảm biến được kích hoạt. Phần khung mô hình được thi công đủ cứng vững để hạn chế dao động cơ học có thể ảnh hưởng đến chất lượng điều khiển.



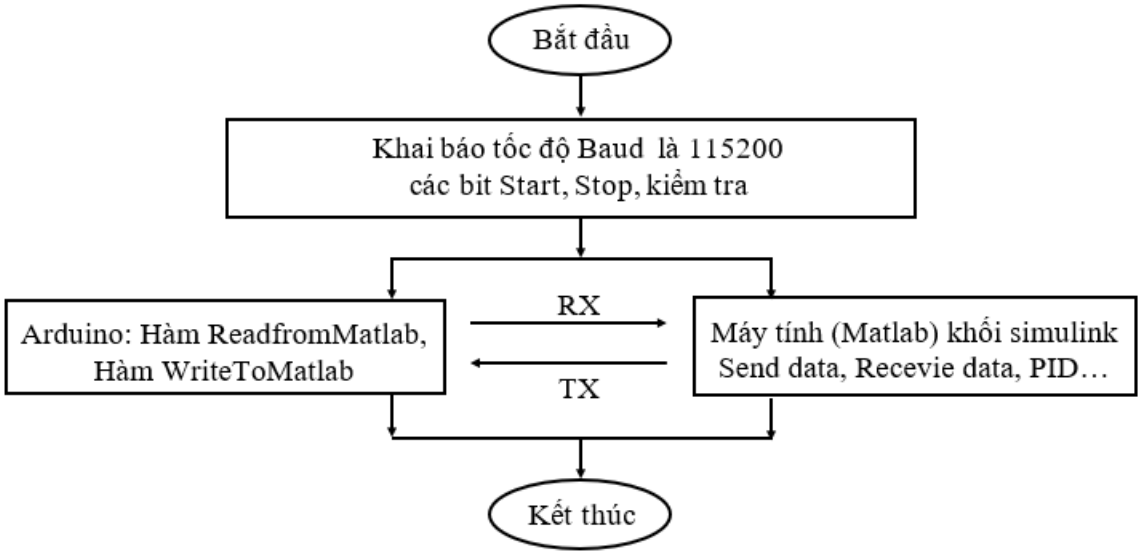
Hình 3. Bản vẽ mô hình hệ cầu cân bằng

2.3. Phần mềm giao tiếp

Theo sơ đồ nguyên lý Hình 2, vi điều khiển được sử dụng trong hệ cầu cân bằng này chỉ đóng vai trò giao tiếp để truyền nhận tín hiệu. Do đó, chương trình hệ thống cho Arduino UNO R3 module được xây dựng khá đơn giản, nhờ được hỗ trợ thư viện hàm phong phú. Giải thuật truyền nhận dữ liệu giữa máy tính và hệ cầu cân bằng được mô tả trên Hình 4. Hình 4a trình bày giải thuật nhận tín hiệu vị trí quả bóng từ hệ cầu truyền lên máy tính. Hình 4b minh họa giải thuật truyền tín hiệu điều khiển từ máy tính xuống bộ driver của động cơ DC servo.



Hình 4. Lưu đồ giải thuật điều khiển hệ thống



Hình 5. Giao tiếp UART

Hình 5 mô tả tổng quát chức năng truyền nhận dữ liệu MATLAB trên máy tính và Arduino UNO R3 module với thư viện hàm có sẵn. Trong đó, hàm *WriteToMatlab* thực hiện việc gửi giá trị vị trí từ cảm biến cho MATLAB; hàm *ReadFromMatlab* thực hiện chức năng nhận tín hiệu điều khiển từ MATLAB để kiểm soát động cơ DC servo.

2.4. Bù sai số cảm biến

Vị trí của quả bóng trên thanh trượt được đo bằng cảm biến khoảng cách dùng sóng siêu âm hoặc ánh sáng hồng ngoại. Gọi $\boldsymbol{r_s}=[r_{s1}, r_{s2}, \ldots, r_{sn}]$ là véc-tơ dữ liệu khoảng cách đo được bằng cảm biến (chữ s được ghi chú cho từ sensor) và $\boldsymbol{r_r}=[r_{r1}, r_{r2}, \ldots, r_{rn}]$ là khoảng cách thực tế của quả bóng đo bằng thước chuẩn (chữ r được ghi chú cho từ ruler). Mục tiêu của việc bù sai số cảm biến, thực chất là xây dựng hàm quan hệ:

$$r_r = \hat{f}(r_s) \quad (4)$$

Với mỗi giá trị vị trí r_{si} mà cảm biến đọc được, hàm bù sai số sẽ trả về giá trị r_{ri} tương ứng có độ chính xác tốt hơn so với vị trí đúng. Giải thuật bình phương tối thiểu Levenberg-Marquardt (Gavin, 2000) được dùng để xác định quan hệ (4) được trình bày chi tiết trong (Ngôn và ctv., 2021). Trong nghiên cứu này, hàm *lsqnonlin* hoặc *cftool* của công cụ *Curve Fitting Toolbox* của MATLAB (The MathWorks Inc., 2021) được sử dụng để xác định hàm bù sai số. Kết quả sẽ được trình bày ở phần sau.

2.5. Bố trí thí nghiệm

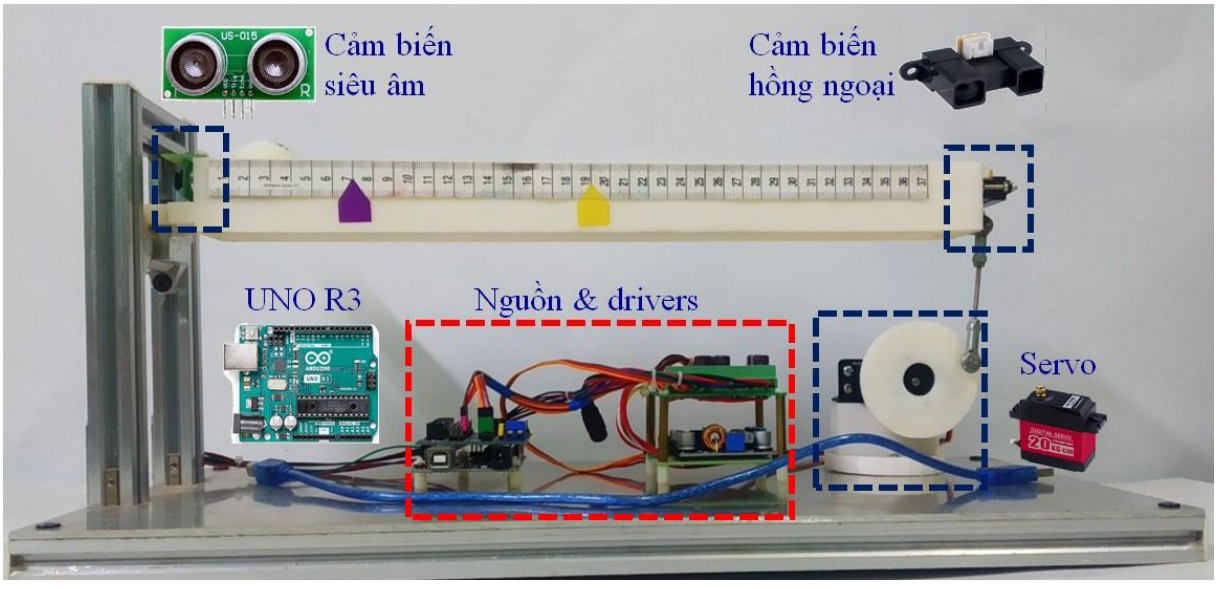
Để có thể xác định hàm bù sai số (4), thí nghiệm thu thập dữ liệu được bố trí như minh họa trên Hình 6. Tại mỗi thời điểm lấy mẫu, quy trình thu thập dữ liệu được tiến hành như sau: Quả bóng nhựa bán kính 20 mm được cho di chuyển tự do trên thanh trượt. Khi đó mạch đọc dữ liệu cảm biến (siêu âm hoặc hồng ngoại) được kích hoạt và truyền giá trị khoảng cách đo được về màn hình máy tính. Một camera được bố trí phù hợp để chụp lại vị trí quả bóng trên thước đo và giá trị khoảng cách trên màn hình máy tính (Hình 6). Thí nghiệm được lặp lại 700 lần với nhiều vị trí bóng và chiều lăn khác nhau trên thanh trượt. Tập hợp toàn bộ giá trị hiển thị trên màn hình máy tính ta có véc-tơ $\boldsymbol{r_s}=[r_{s1}, r_{s2}, \ldots, r_{s700}]$. Tương ứng, tập hợp toàn bộ vị trí thực của quả bóng trên thước đo ta có véc-tơ dữ liệu $\boldsymbol{r_r}=[r_{r1}, r_{r2}, \ldots, r_{r700}]$. Hai véc-tơ dữ liệu này là cơ sở để xác định hàm bù sai số cảm biến. Quy trình thực hiện hoàn toàn tương tự cho cảm biến siêu âm và cảm biến hồng ngoại.

Hình 6. Bố trí thí nghiệm

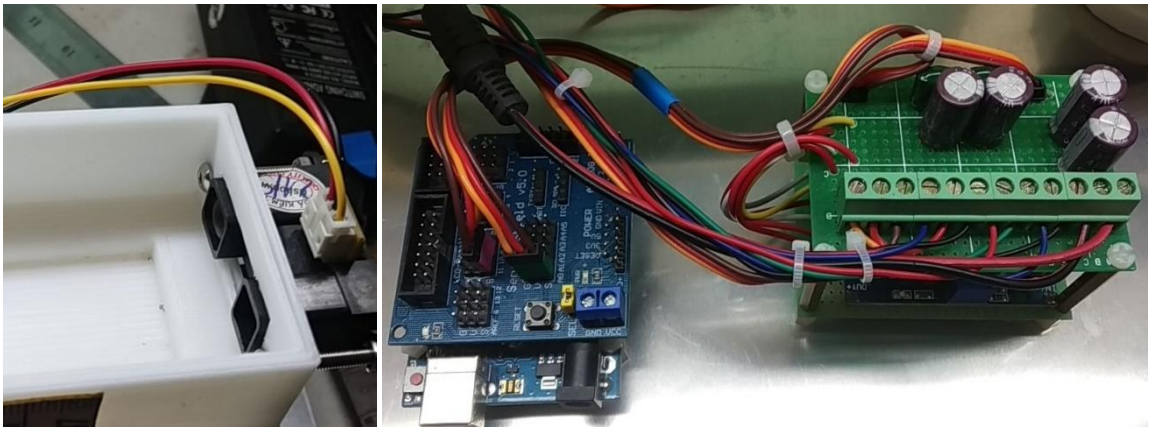
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Chế tạo mô hình thực nghiệm

Mô hình thực nghiệm hệ cầu cân bằng được chế tạo như Hình 7. Trong đó, Arduino UNO R3 module được dùng làm mạch giao tiếp giữa máy tính và mô hình. Module này có nhiệm vụ nhận tín hiệu điều khiển động cơ servo từ máy tính. Đồng thời, nó cũng được dùng để đọc giá trị cảm biến khoảng cách, bù sai số và trả về vị trí quả bóng cho máy tính. Động cơ servo DC hiệu LD-27MG được dùng để điều khiển góc nghiên của thanh trượt. Cảm biến siêu âm US-015 (Synacorp, 2021) và cảm biến hồng ngoại SHARP GP2Y0A02YK0F (Sharp, 2006) dùng để nhận biết vị trí quả bóng khi di chuyển trên thanh trượt. Như đã đề cập, mặc dù 2 module cảm biến khoảng cách được tích hợp trên thanh trượt, tuy nhiên, trong ứng dụng mô hình, chỉ có một loại cảm biến được kích hoạt. Vị trí lắp đặt cảm biến và các module mạch điện liên quan được minh họa trên Hình 8.



Hình 7. Mô hình thực nghiệm



Hình 8. Lắp cảm biến và các module mạch điện

3.2. Xác định hàm bù sai số cảm biến

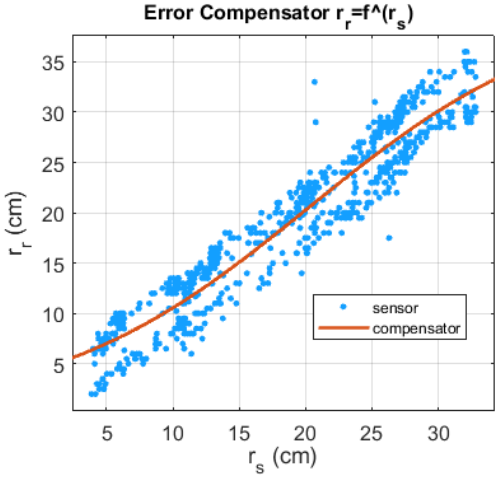
Từ 2 véc-tơ dữ liệu thực nghiệm $\boldsymbol{r_s}=[r_{s1}, r_{s2},..., r_{s700}]$ và $\boldsymbol{r_r}=[r_{r1}, r_{r2},..., r_{r700}]$, công cụ *cftool* của MATLAB được sử dụng để xác định hàm bù sai số cảm biến với giải thuật bình phương tối thiểu Levenberg-Marquardt, tương tự như Ngôn và ctv. (2021). Kết quả xác định được hàm bù sai số cảm biến như (5) với các tham số và độ khớp (fitting) dữ liệu trong Bảng 3.

$$r_r = \hat{f}(r_s) = \frac{a}{\left(1 + b \cdot e^{-c \cdot r_s}\right)} \quad (5)$$

Bảng 3. Hệ số của các hàm bù sai số

Đại lượng	Cảm biến	
	Siêu âm	Hồng ngoại
a	41,07	43,78
b	8,15	7,37
c	0,10	0,09
R^2	0,91	0,92

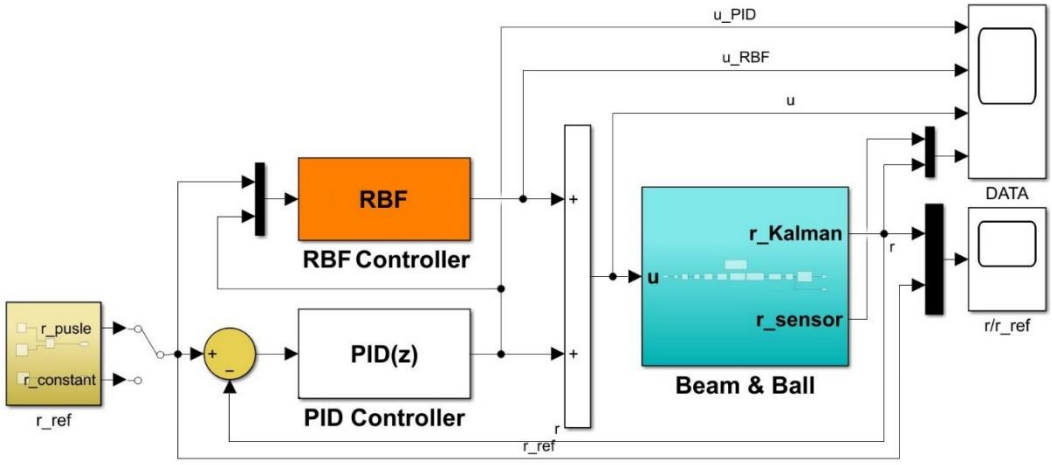
Hình 10 minh họa tương quan giữa dữ liệu đo bằng cảm biến và hàm bù sai số. Với R^2>0,9 cho thấy hàm bù sai số khớp tốt với dữ liệu đo. Như vậy, ứng với mỗi giá trị cảm biến đo được là r_s, vi điều khiển sẽ áp dụng phương trình (5) để tính khoảng cách bù sai số là r_r. Giá trị khoảng cách r_r này sẽ được truyền về máy tính, được hiểu đó là vị trí của quả bóng trên thanh trượt. Trong nghiên cứu này, chuỗi tín hiệu vị trí r_r của quả bóng được lọc nhiễu một lần nữa bằng bộ lọc Kalman dựng sẵn trong công cụ Simulink, trước khi hồi tiếp về làm cơ sở tính toán cho bộ điều khiển (Hình 2).



Hình 10. Minh họa hàm bù sai số đo khoảng cách bằng cảm biến hồng ngoại

3.3. Kiểm nghiệm với bộ điều khiển RBF-PID

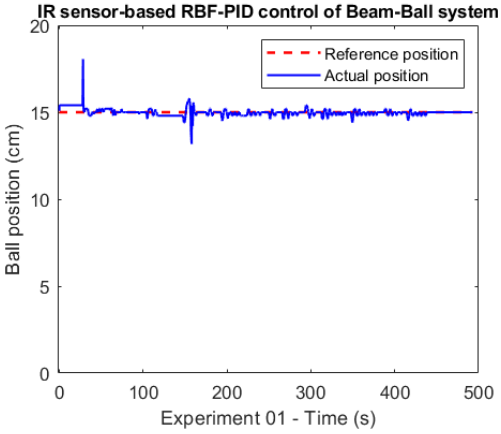
Sơ đồ kết hợp giải thuật điều khiển PID và mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF, gọi tắt là bộ điều khiển RBF-PID áp dụng cho hệ cầu cân bằng đã chế tạo, được mô tả trên Hình 11. Tham số bộ điều khiển PID được chọn là K_P = 8, K_I = 0,06 và K_D = 6 theo phương pháp thử sai. Mạng RBF có cấu trúc [1 – 4 – 1] với các tham số được khởi tạo ngẫu nhiên, góp phần tinh chỉnh đáp ứng nhờ cơ chế tự động cập nhật bộ tham số của nó. Giải thuật điều khiển kết hợp RBF-PID sẽ được trình bày chi tiết ở một bài báo khác trong chuỗi công bố liên quan đến nghiên cứu này. Bộ điều khiển RBF-PID được ứng dụng ở thực nghiệm này chỉ nhằm mục tiêu chứng minh hệ cầu cân bằng được chế tạo có khả năng hoạt động được.



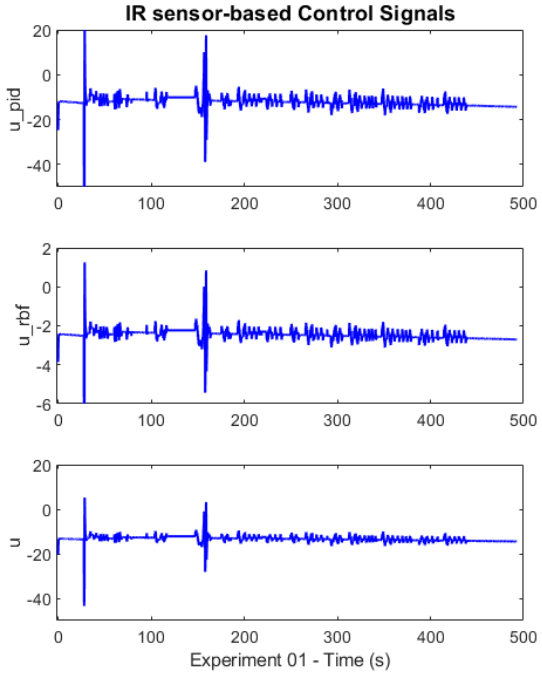
Hình 11. Sơ đồ điều khiển RBF-PID hệ cầu cân bằng

Thực nghiệm 1:

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 biến hồng ngoại. Hình 12 trình bày đáp ứng của hệ cầu cân bằng. Hình 13 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.



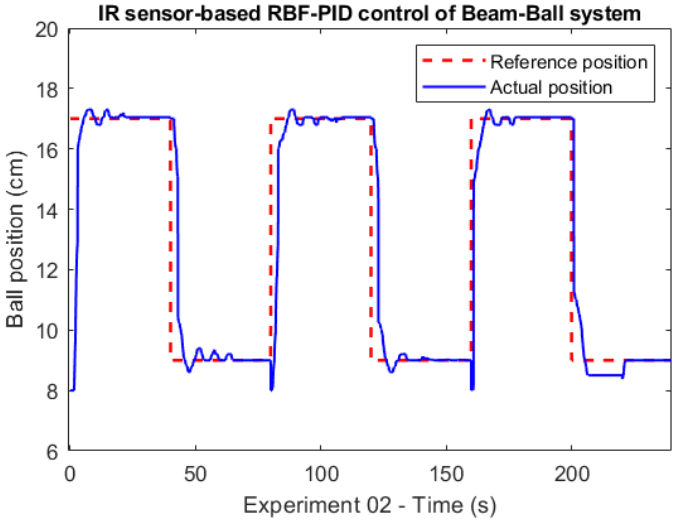
Hình 12. Đáp ứng hệ cầu cân bằng với vị trí tham khảo cố định



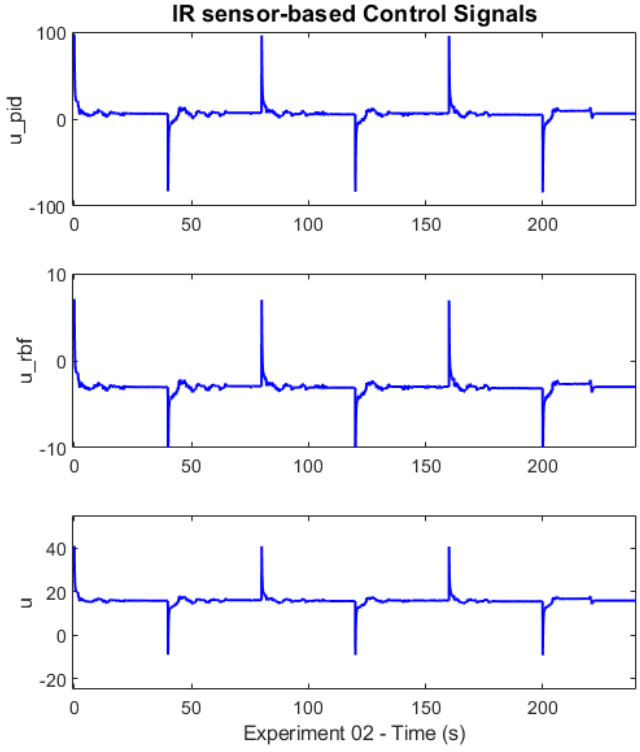
Hình 13. Tín hiệu điều khiển tương ứng với vị trí tham khảo cố định

Thực nghiệm 2:

Thực nghiệm 2 được triển khai với vị trí tham khảo dạng xung vuông và cảm biến vị trí được dùng vẫn là cảm biến hồng ngoại. Hình 14 trình bày đáp ứng của hệ cầu cân bằng. Hình 15 trình bày tín hiệu điều khiển tương ứng. Kết quả cho thấy quả bóng được giữ vững ở 2 vị trí là 9 cm và 17 cm, theo biến đổi của xung vuông tham khảo. Quá trình chuyển trạng thái từ vị trí này sang vị trí khác, 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±0,3 giây; thời gian xác lập còn khá dài, khoảng 6±1 giây; độ vọt lố khá lớn, khoảng cách 11±2%; tuy nhiên, sai số xác lập không đáng kể.



Hình 14. Đáp ứng hệ cầu cân bằng với vị trí tham khảo dạng xung vuông



Hình 15. Tín hiệu điều khiển tương ứng với vị trí tham khảo dạng xung vuông

3.4. Thảo luận

Mô hình cầu cân bằng được triển khai trong nghiên cứu này đặt bộ điều khiển trên máy tính. Tín hiệu điều khiển được truyền xuống mô hình để kiểm soát động cơ DC servo thông qua module giao tiếp Arduino UNO R3 thông dụng. Cảm biến vị trí quả bóng trên thanh trượt được xử lý và hồi tiếp về máy tính thông qua module giao tiếp này. Với thiết kế như trên, mô hình thực nghiệm này có thể áp dụng để khảo sát nhiều kiểu điều khiển hiện đại khác, được xây dựng trên máy tính. Đây là một ưu điểm của thiết kế, không gây cản trở trong việc triển khai các giải thuật điều khiển phức tạp, thường đòi hỏi cấu hình cao cho phần cứng của mô hình.

Các bộ bù sai số cảm biến vị trí được triển khai trong nghiên cứu này cũng có ưu điểm lớn mà các nghiên cứu trước đây chưa tiếp cận đến. Thực tế cho thấy, do tốc độ di chuyển của quả bóng khá nhanh trên thanh trượt nên 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 mới, không còn ở vị trí lấy mẫu trước đó nữa. Hạn chế này xảy ra là do bản thân cảm biến đo khoảng cách có sai số, kết hợp với thời gian trễ của việc xử lý và truyền dữ liệu về máy tính. Cách bố trí thí nghiệm trong nghiên cứu này dùng chức năng chụp ảnh với chế độ thể thao (chụp nhanh), cho phép ghi nhận đồng thời giá trị đo của cảm biến trên màn hình máy tính và vị trí hiện tại của quả bóng trên thanh trượt với thước kẻ vạch. Mẫu dữ liệu thu được của thí nghiệm hàm chứa đầy đủ sai số cảm biến và thời gian trễ của việc xử lý và truyền dữ liệu. Do đó, hàm bù sai số được xác định giúp khắc phục được hạn chế nêu trên.

Bên cạnh các ưu điểm nổi bật trên, mô hình thực nghiệm này vẫn có hạn chế về cơ khí chính xác, do được chế tạo thủ công. Thực tế điều khiển cho thấy sai số cơ khí của các cơ cấu truyền động từ trục của động cơ đến góc nghiêng của thanh trượt đã gây ra dao động của quả bóng mà bộ điều khiển phải mất thời gian để giữ cân bằng được ở các thời điểm thay đổi vị trí tham khảo. Tức là, hạn chế về độ chính xác của các khâu truyền động đã làm kéo dài thời gian xác lập của đáp ứng. Hạn chế này không dễ khắc phục, trừ khi mô hình được chế tạo một cách chính xác, đạt các tiêu chuẩn công nghiệp cần thiết. 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.

Xin vui lòng quét mã QR ở Hình 16 để xem đoạn clip ngắn biểu diễn hoạt động của hệ cầu cân bằng này.

Hình 16. Clip biểu diễn hoạt động của hệ cầu cân bằng

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phương pháp thiết kế và chế tạo mô hình thực nghiệm hệ cầu cân bằng với thanh và bóng. Thanh trượt 400 mm và quả bóng bán kính 20 mm được chế tạo bằng kỹ thuật in 3D với vật liệu nhựa ABS. Đĩa servo bán kính 32,5 mm và tay đòn 100 mm được tác động bởi động cơ DC servo LD-27MG nhằm thay đổi góc nghiêng của thanh trượt. Hai đầu thanh trượt được lắp cảm biến siêu âm US-015 và cảm biến hồng ngoại SHARP GP2Y0A02YK0F, để định vị quả bóng trên thanh trượt. Hàm bù sai số cảm biến dùng giải thuật bình phương tối thiểu Levenberg-Marquardt để bù sai số cảm biến và sai số truyền dữ liệu từ mô hình về máy tính. Arduino UNO R3 module đóng vai trò giao tiếp giữa mô hình và máy tính. Mô đun này chịu trách nhiệm truyền tín hiệu điều khiển từ máy tính xuống mô hình để kiểm soát động cơ và nhận tín hiệu vị trí đo được từ cảm biến để phản hồi cho máy tính. Như vậy, mô hình này đặt trọng tâm vào việc xác định chính xác vị trí thực tế của quả bóng và kiểm soát được góc nghiêng của thanh trượt nhờ động cơ DC servo, thích hợp cho các giải thuật điều khiển mà ở đó quá trình thiết kế dựa theo ngõ vào và ngõ ra của đối tượng, không quá phụ thuộc vào thông số của nó. Kiểm nghiệm mô hình với bộ điều khiển kết hợp RBF-PID cho thấy quả bóng được giữ vững ở vị trí mong muốn, mặc dù có dao động nhẹ xung quanh vị trí cân bằng. Đồng thời, quá trình chuyển trạng thái từ vị trí cân bằng này sang vị trí cân bằng khác tương ứng với việc thay đổi tín hiệu tham khảo cho thấy đáp ứng được xác lập nhanh chóng, với dao động nhẹ theo quán tính của quả bóng, phản ảnh đúng động lực học của hệ. Kết quả thực nghiệm với bộ điều khiển RBF-PID và cảm biến hồng ngoại cho thấy thời gian tăng của đáp ứng khá nhanh, đạt 1,5±0,3 giây; thời gian xác lập còn khá dài, khoảng 6±1 giây; độ vọt lố còn khá lớn, khoảng 11±2%; tuy nhiên, sai số xác lập là không đáng kể.

Trong thời gian tới, nghiên cứu này tiếp tục cải thiện độ chính xác của các khâu truyền động trong mô hình, tiến hành sơn hay xi mạ cả thanh trượt và quả bóng nhựa để giảm thiểu ma sát. Đồng thời, các kỹ thuật điều khiển hiện đại khác cũng sẽ được 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.

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.

Jasim, M. H. (2018). Tuning of a PID controller by bacterial foraging algorithm for position control of DC servo motor. *Engineering and Technology Journal, 36A*(3), 287-294. DOI: http://dx.doi.org/10.30684/etj.36.3A.7

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. *International Journal 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 (IJEOE), 6*(2), 64-78, http://doi.org/10.4018/IJEOE.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.

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. DOI: 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 mờ hồi qui áp dụng cho hệ thanh và bóng. *Tạp chí Khoa học 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/tnu-jst.4812.

The MathWorks Inc. (2021). *Curve Fitting Toolbox™ User's Guide*. URL: https://www.mathworks.com/help/curvefit/ (truy cập 05/10/2021).

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. *Can Tho University Journal of Science,* (50), 37-42. https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2017.064.

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.

Sharp (2006). *GP2Y0A02YK0F - Distance measuring sensor unit datasheet.* Sheet no.: E4-A00101EN, Date Dec.01.2006.

Synacorp (2021). *US-015 High Accuracy Ultrasonic Sensor.* Article-Nr.:5401418. Link: http://synacorp.my/v3/en/ultrasonic-sensors/957-us-015-high-accuracy-ultrasonic-sensor.html (truy cập 5/10/2021).