

# Ứng dụng thuật toán Fuzzy-PID trong việc phân tích và điều hướng cho xe hai bánh đồng trục tự cân bằng

## Applying Fuzzy-PID algorithm in analyzing and navigating self-balancing coaxial two-wheels car

**Đoàn Văn Đồng**

Nhóm nghiên cứu Khoa học và Công nghệ ứng dụng cho sự phát triển bền vững (STASD), Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

\*Tác giả liên hệ: dongdv@ut.edu.vn

### Tóm tắt:

Xe hai bánh đồng trục là một đối tượng khó xác định được trọng tâm để giữ thăng bằng, khó khăn trong việc điều hướng và điều chỉnh tốc độ. Trong bài báo này, mô hình hoá hệ xe hai bánh đồng trục tự cân bằng và thiết kế thuật toán Fuzzy-PID đã được thực hiện. Thuật toán Fuzzy-PID được sử dụng để hiệu chỉnh hệ số với luật mờ thích hợp và được mô phỏng thông qua Matlab Simulink. Các kết quả mô phỏng đã chứng minh được tính ổn định cao của xe hai bánh đồng trục tự cân bằng.

**Từ khóa:** Thuật toán Fuzzy-PID; DC servo; Con lắc ngược.

### Abstract:

The coaxial two-wheeler is a difficult object to determine the center of gravity for balance, and it is difficult to navigate and adjust speed. In this paper, modeling a self-balancing coaxial two-wheel xe system and designing an appropriate Fuzzy-PID algorithm are performed. The Fuzzy-PID algorithm is used to calibrate the coefficients with appropriate fuzzy rules and is simulated through Matlab Simulink. The simulation results have demonstrated the high stability of the self-balancing coaxial two-wheeled vehicle.

**Keywords:** Fuzzy-PID algorithm; DC servo; Inverted pendulum.

### 1. Giới thiệu

Ngày nay, robot là một trong những lĩnh vực công nghệ tiên tiến mang đến cho nhân loại nhiều dịch vụ và tiện ích. Ở nhiều lĩnh vực và không gian khác nhau, robot di động có bánh xe sử dụng linh động và phổ biến [1]. Trong đó, robot di động hai bánh tự cân bằng là một trong những ứng dụng điển hình, được lấy cảm hứng từ hệ thống con lắc ngược. Trọng lượng nhẹ, kích thước nhỏ, xoay nhanh và khả năng cơ động cao là những ưu điểm chính của loại xe này. Từ đó, xe hai bánh đồng trục tự cân bằng được ứng dụng phổ biến, đặc biệt là với những khu vực có nhiều đối tượng di chuyển như công viên, nhà máy [2].

Tuy nhiên, xe hai bánh đồng trục tự cân bằng có tính bất ổn định, thăng bằng kém, phi tuyến và

khó xác định được trọng tâm. Trong quá trình di chuyển, để xe hai bánh đồng trục tự cân bằng có thể duy trì một vận tốc không đổi thì góc nghiêng của thân xe luôn giữ chính xác một góc cố định. Hơn nữa, khi đứng yên, góc nghiêng thân xe phải giữ ổn định bằng không. Do vậy, thuật toán Fuzzy-PID được thiết kế cho xe hai bánh đồng trục tự cân bằng đảm bảo được tính ổn định và giữ thăng bằng tốt.

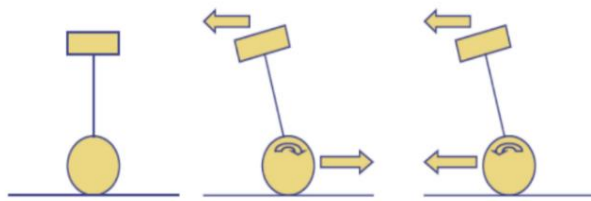
### 2. Nguyên lý cân bằng của xe mô hình hai bánh

Việc giữ thăng bằng của xe ba bánh, bốn bánh là do trọng tâm nằm ở bề mặt chân đế cho các bánh xe tạo ra. Đặc biệt, việc giữ thăng bằng của xe hai bánh là nhờ vào tính chất con quay hồi chuyển khi hai bánh xe đang quay. Tuy nhiên, trọng tâm của

xe rất khó để xác định và bánh xe di chuyển không kịp thời để đáp ứng việc giữ thăng bằng.

Việc giữ thăng bằng dựa theo nguyên tắc điều khiển xe hai bánh chạy hướng cùng chiều với hướng nghiêng (hình 1), cụ thể:

- (i) Khi tay lái được đẩy nghiêng về phía trước thì xe hai bánh được điều khiển để chạy về phía trước;
- (ii) Khi tay lái được đẩy nghiêng về một hướng, xe hai bánh được điều khiển chạy về hướng phía sau.



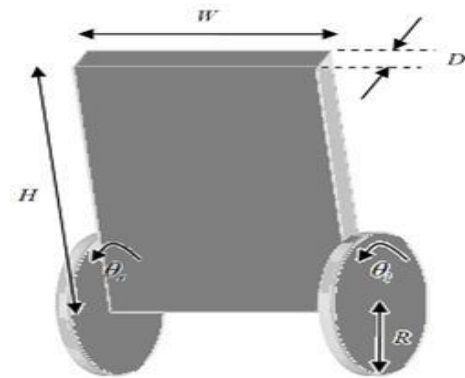
**Hình 1.** Nguyên tắc điều khiển giữ thăng bằng.

Trong thực tế, do khả năng cảm nhận và phản ứng thăng bằng của mỗi người là khác nhau nên xe hai bánh đồng trục tự cân bằng chỉ thiết kế cho một người sử dụng. Mặc dù, xe hai bánh đồng trục tự cân bằng có nhiều ưu điểm như giảm ô nhiễm môi trường và tiếng ồn, linh hoạt sử dụng trong nhiều môi trường, địa hình khác nhau, dễ dàng sử dụng và giá thành thấp. Tuy nhiên, yêu cầu để thiết kế và điều hướng xe khi di chuyển với vận tốc cao và dừng lại tại vị trí mong muốn gặp nhiều thách thức. Nguyên nhân chính là do các yếu tố như mô hình phi tuyến bậc cao, các thuộc tính của xe không ổn định và hiện tượng nhiễu xen kẽ phát sinh từ các hoạt động của động cơ. Hơn nữa, trong thực tế, mô hình xe hai bánh đồng trục tự cân bằng là mô hình bất định. Cụ thể, mô hình này có thể không được mô tả và đo lường tính toán trước, các tham số, thông số cũng thay đổi một cách thường xuyên như tốc độ, hướng, ma sát,...

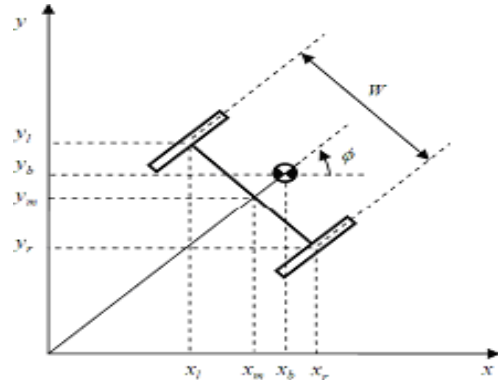
Mô hình xe hai bánh đồng trục tự cân bằng khi áp dụng thuật toán PID đã mang lại tính ổn định cao hơn, cân bằng và điều hướng tốt hơn. Thế nhưng, thời gian đáp ứng của mô hình vẫn còn chậm, độ vọt lố so với vị trí mong muốn dừng lại vẫn cao.

## 2.1. Mô hình toán học

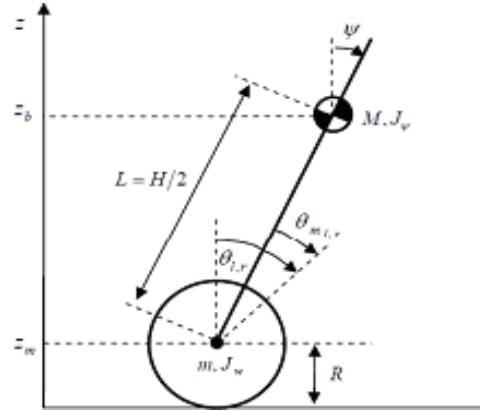
Mô hình và hệ quy chiếu của hệ thống điều khiển tối ưu cho xe hai bánh đồng trục tự cân bằng được mô tả tại hình 2 [3].



(a) Mô hình xe.



(b) Hệ quy chiếu góc nghiêng xe.

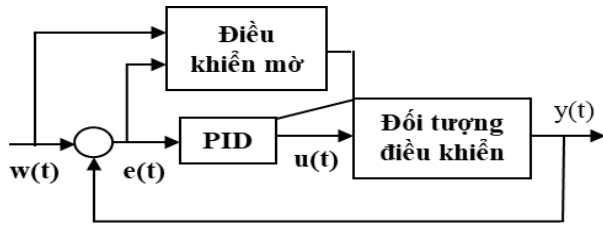


(c) Hệ quy chiếu từ trên xuống.

**Hình 2.** Mô hình và hệ quy chiếu.

## 2.2. Thuật toán Fuzzy-PID

Mô hình tuyến tính của xe hai bánh phi tuyến là khác nhau theo từng điểm làm việc. Để khắc phục điều này, cần thiết sử dụng bộ điều khiển mờ dựa trên cơ chế suy luận mờ Takasi-Sugeno [4]. Trong đó, ứng dụng luật điều khiển PID ứng với từng điểm làm việc.



Hình 3. Bộ điều khiển mờ Sugeno.

Các thông số được sử dụng trong bộ điều khiển tuyến tính như sau:

$$K_d = (K_{dmax} - K_{dmin}) \cdot K'_d + K_{dmin} \quad (1)$$

$$K_p = (K_{pmax} - K_{pmin}) \cdot K'_p + K_{pmin} \quad (2)$$

Với  $[K_{pmin}; K_{pmax}]$  và  $[K_{dmin}; K_{dmax}]$  được xác định trước khoảng  $K_p, K_d$  tương ứng. Thuật toán Fuzzy được sử dụng trong bài báo này với sự kết hợp suy luận mờ loại Takagi-Sugeno [3].

Thuật toán Fuzzy-PID lấy sai số và tỷ lệ thay đổi sai số để làm thông số đầu vào cho bộ điều khiển. Thành phần vi phân giúp cho hệ thống phản ứng nhanh hơn với những thay đổi sai lệch theo thời gian. Bộ điều khiển PID có bộ các thông số

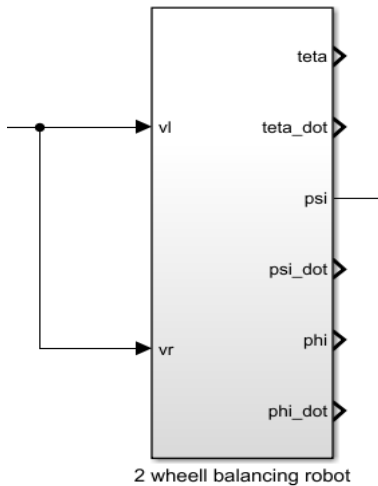
thay đổi dựa vào điều kiện làm việc thông qua công thức (1) và (2). Nói cách khác, có thể xem bộ điều khiển mờ là bộ giám sát thay đổi các thông số của bộ điều khiển PID thích hợp với từng điểm làm việc.

### 3. Mô phỏng xe hai bánh đồng trục tự cân bằng

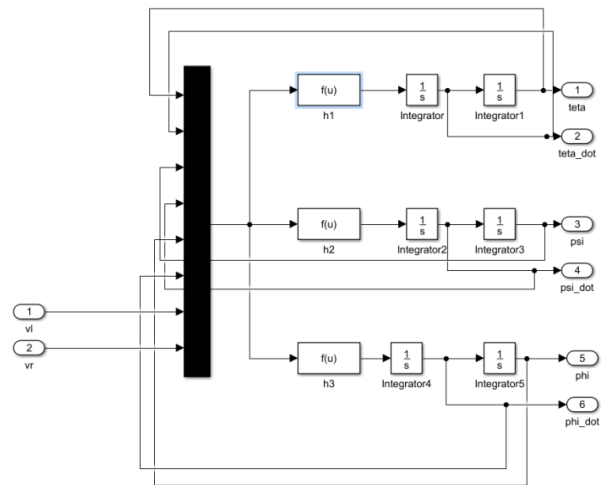
#### 3.1. Mô phỏng so sánh thuật toán PID và Fuzzy-PID

Với mô hình toán học và hệ phương trình tuyến tính hóa phân tích ở trên, xe hai bánh đồng trục tự cân bằng được mô phỏng thông qua khối Subsystem (hình 4), sơ đồ kết nối chi tiết bên trong (hình 5) và sơ đồ điều khiển tổng quát sử dụng thuật toán Fuzzy-PID (hình 6).

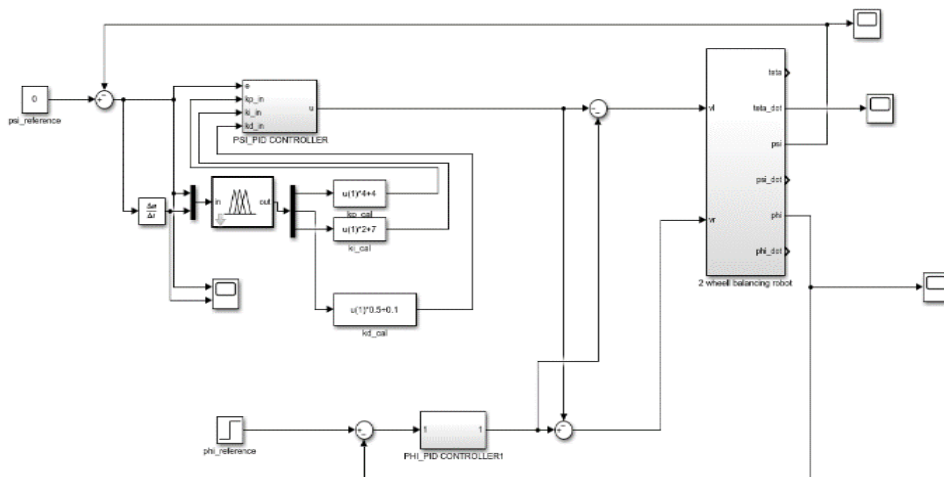
Thực hiện mô phỏng xe hai bánh đồng trục tự cân bằng với các thông số như bảng 1 và bộ góc nghiêng thân xe như sau:



Hình 4. Khối Subsystem mô hình xe.



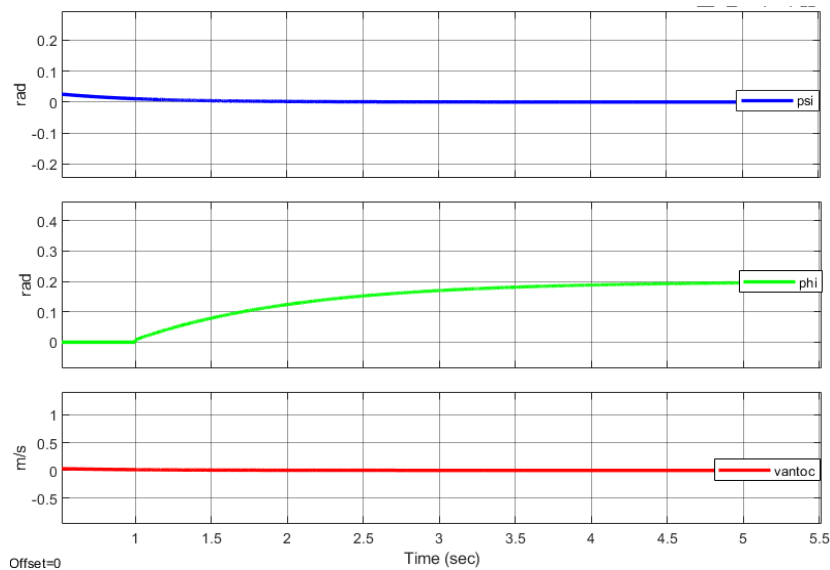
Hình 5. Sơ đồ kết nối chi tiết.



Hình 6. Sơ đồ khối thuật toán Fuzzy-PID xe hai bánh đồng trục tự cân bằng.

**Bảng 1.** Thông số mô phỏng [4].

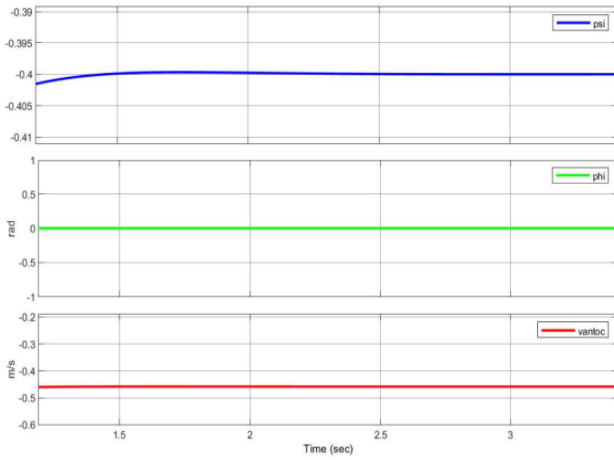
Thông số	Giá trị	Đơn vị	Ý nghĩa
$m$	0.01	Kg	Khối lượng bánh xe
$M$	1.2	Kg	Khối lượng xe
$H$	0.112	m	Chiều cao xe
$W$	0.170	m	Chiều rộng xe
$J_m$	$5 \cdot 10^{-4}$	$\text{Kgm}^2$	Moment quán tính động cơ
$K_b$	0.0187	$\text{Vs/rad}$	Hệ số EMF của động cơ
$T$	0.004	s	
$L$	0.08	m	Khoảng cách từ trọng tâm xe đến trục
$D$	0.055	m	Chiều ngang xe
$J_w$	$(m \cdot R^2)/2$	$\text{Kgm}^2$	
$K_t$	0.01	$\text{Nm/A}$	Moment xoắn của động cơ
$R$	0.033	m	Bán kính bánh xe
$f_m$	0.1		Hệ số ma sát bánh xe và động cơ
$f_w$	0.1		Hệ số ma sát bánh xe và mặt đường
$R_m$	4.2	$\Omega$	Điện trở động cơ
$N$	30		Tỷ số giảm tốc
$G$	9.81	$\text{m/s}^2$	Gia tốc trọng trường
$a$	$n \cdot K_t / R_m$		
$peta$	$n \cdot K_t \cdot K_b / R_m + f_m$		
$J_{psi}$	$(M \cdot L^2) / 3$	$\text{Kgm}^2$	
$J_{phi}$	$M \cdot (W^2 + D^2) / 12$	$\text{Kgm}^2$	



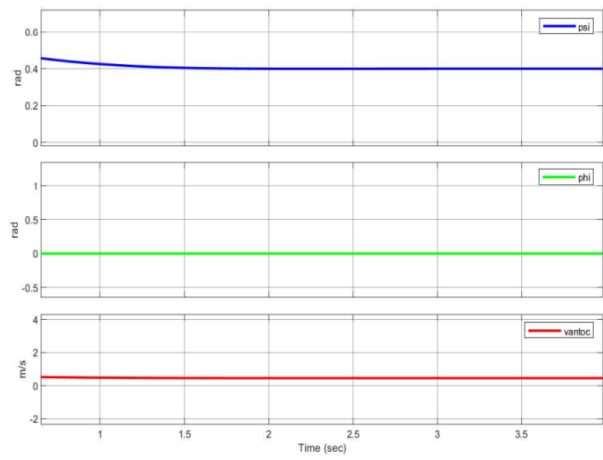
**Hình 7.** Giá trị góc quay thân xe là 0.2 (rad) và góc nghiêng là 0 (rad).

Với  $K_{pmin} = 4$ ;  $K_{pmax} = 8$ ;  $K_{dmin} = 0.2$ ;  $K_{dmax} = 0.6$ ;  $K_i = 8$ , kết quả mô phỏng xe hai bánh đồng trục tự cân bằng tại vị trí cân bằng (hình 7). Kết quả mô phỏng xe hai bánh đồng trục tự cân bằng tại vị trí

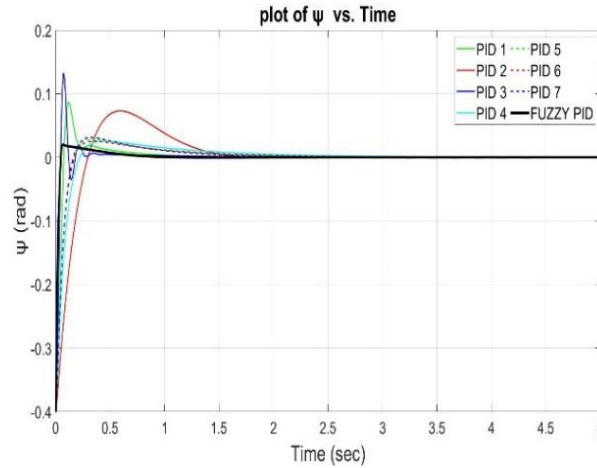
khác 0 như hình 8 và hình 9. Thực hiện thử nghiệm bộ điều khiển PID cho góc nghiêng thân xe với các thông số tại bảng 2, kết quả cụ thể ở hình 10.



**Hình 8.** Giá trị góc quay thân xe là 0 (rad) và góc nghiêng thân xe là -0.4 (rad).



**Hình 9.** Giá trị góc quay thân xe là 0 (rad) và góc nghiêng thân xe là 0.4 (rad)



**Hình 10.** So sánh góc nghiêng thân xe giữa hai bộ điều khiển.

**Bảng 2.** Thông số thử nghiệm góc nghiêng thân xe.

Hệ số PID	PID1	PID2	PID3	PID4	PID5	PID6	PID7
$K_p$	4	4	8	8	6	6	6
$K_d$	0.1	0.6	0.1	0.6	0.35	0.35	0.35
$K_i$	8	8	8	8	8	7	9

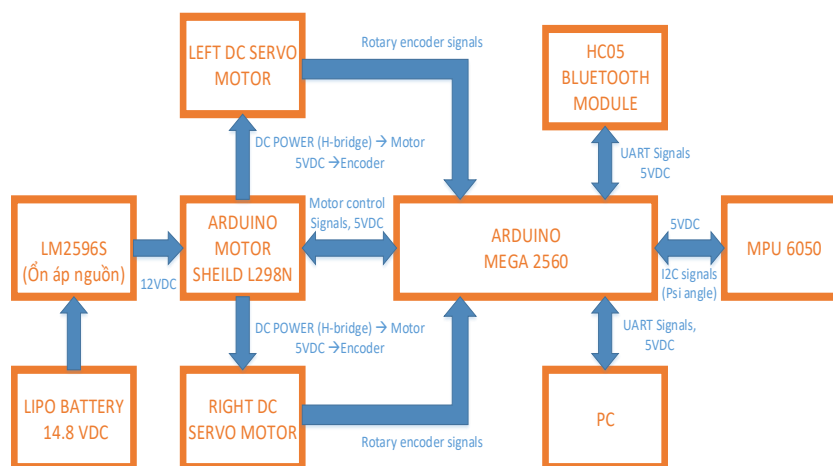
**Bảng 3.** So sánh thuật toán PID và Fuzzy-PID.

Đáp ứng	PID 1	PID 2	PID 3	PID 4	PID 5	PID 6	PID 7	Fuzzy PID
Độ vọt lố (rad)	0.08	0.06	0.13	0.025	0.031	0.015	0.02	0.01
Thời gian quá độ (s)	1.1	1.6	1.5	2.7	1.8	1.7	1.6	0.6

Dựa vào kết quả mô phỏng ở các hình 8, 9 và 10 và kết quả đánh giá độ vọt lố và thời gian quá độ tại bảng 3, có thể thấy các biến điều khiển ở ngõ ra như góc nghiêng thân xe, góc quay thân xe đáp ứng tốt với các giá trị đặt. Tuy nhiên, khi sử dụng bộ điều khiển PID, có thể thấy rằng thời gian quá

độ chậm hơn, độ vượt quá và sai số xác lập lớn. Bộ điều khiển Fuzzy đưa vào đã tối ưu, thời gian quá độ nhanh, đáp ứng nhanh và dao động góc cân bằng gần như bằng 0. Điều này cho thấy hệ hoạt động ổn định hơn khi sử dụng thuật toán Fuzzy-PID.

### 3.2. Thực hiện mô hình

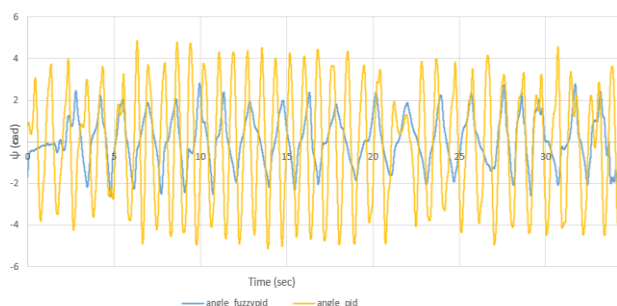


**Hình 11.** Sơ đồ kết nối phần cứng xe hai bánh đồng trục tự cân bằng.

Việc sử dụng các module Arduino và các module tích hợp có sẵn làm cho thiết kế và thi công xe hai bánh đồng trục tự cân bằng trở nên dễ dàng hơn (hình 11-13). Để xe hai bánh đồng trục tự cân bằng ổn định góc nghiêng thân xe, việc hiệu chỉnh dựa vào thuật toán Fuzzy-PID.



**Hình 12.** Mô hình thực tế.



**Hình 13.** Dạng sóng góc nghiêng thân xe.

### 4. Kết luận

Trong bài báo, xe hai bánh đồng trục tự cân bằng với thuật toán Fuzzy-PID đã được tiến hành mô phỏng trên Matlab Simulink. Đồng thời, mô hình này cũng được thiết kế và chế tạo dựa vào các module Arduino. Kết quả của mô hình đưa ra đã minh chứng được các ưu điểm như thời gian quá độ nhanh, đáp ứng nhanh và dao động góc cân bằng gần như bằng 0. Các kết quả này cho thấy hệ xe hai bánh đồng trục tự cân bằng hoạt động ổn định hơn khi sử dụng thuật toán Fuzzy-PID.

### Tài liệu tham khảo

- [1] O. Mohareri, R. Dhaouadi, A. B. Rad; "Indirect adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot via neural networks". Neurocomputing. 2012; 88:54-66. DOI:10.1016/j.neucom.2011.06.035.
- [2] X. Gao, F. Dai, C. Li; "Two types of coaxial self-balancing robots". Journal of Central South University. 2013; 20:2981-2990. DOI:10.1007/s11771-013-1822-2.

- [3] V. I. Slyn'ko, V. S. Denysenko; "The stability analysis of abstract Takagi–Sugeno fuzzy impulsive system". *Fuzzy Sets and Systems*. 2014; 254:67-82. DOI:10.1016/j.fss.2014.02.019.
- [4] N. M. Tâm, N. V. Đ. Hải, N. P. Lưu, L. V. Tuấn; "Mô hình hoá và điều khiển tối ưu cho hệ xe hai bánh đồng trục tự cân bằng". *Tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ thuật*. 2016; số 37 (09/2016):22-30.