

# ĐIỀU KHIỂN ỔN ĐỊNH CHO ROBOT HAI BÁNH TỰ CÂN BẰNG

## STABILIZING CONTROL FOR TWO-WHEELED SELF BALANCING ROBOT

Hồ Đắc Lộc<sup>1</sup>, Nguyễn Hùng<sup>1</sup>, Trương Ngọc Sơn<sup>2</sup>  
Trường Đại Học Kỹ Thuật Công Nghệ Tp.HCM<sup>1</sup>  
Trường Đại Học Sư Phạm Kỹ Thuật Tp.HCM<sup>2</sup>

### TÓM TẮT

Bài báo trình bày thiết kế bộ điều khiển ổn định cho robot hai bánh tự cân bằng dùng kỹ thuật điều khiển LQR và điều khiển trượt. Robot hai bánh tự cân bằng được mô hình như hệ con lắc ngược di động. Robot được cấu tạo gồm thân robot gắn trên hai bánh xe đồng trục truyền động bằng hai động cơ DC riêng rẽ. Mô hình động lực học phi tuyến cho hệ thống được dẫn xuất. Bộ điều khiển trượt và bộ điều khiển LQR được thiết kế để giữ cân bằng cho robot trong trạng thái cân bằng dựa trên mô hình được tuyến tính hóa ở điểm cân bằng. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển được thiết kế có thể đáp ứng yêu cầu đặt ra của hệ thống. Bộ điều khiển trượt cho thấy tính ổn định bền vững cao hơn bộ điều khiển LQR khi hệ thống có nhiễu ngoài. Kết quả tiến hành thực nghiệm cũng chứng minh tính ổn định cân bằng và hiệu quả của các bộ điều khiển đưa ra.

### ABSTRACT

The paper proposes controller design for two-wheeled self balancing robot based on LQR and sliding mode control. Two-wheeled self balancing robot is modeled as an mobile inverted pendulum system. It is composed of an inverted pendulum and a chassis with two coaxial wheels. The sliding mode controller and LQR are designed to stabilize the robot at upright position under straight-line motion. The designed controller stabilizes the robot based on the linearized model. The simulation results are presented to show the effectiveness of the proposed controllers. The sliding mode controller is more stabilized than the LQR in case of external disturbances. The experiment results show that the LQR and sliding mode controller provide the ability to keep the robot upright for a long time.

**Từ khóa:** Robot hai bánh tự cân bằng, điều khiển trượt, điều khiển LQR, con lắc ngược di động.

### 1. GIỚI THIỆU

Robot hai bánh tự cân bằng đã cho thấy nhiều ứng dụng trong cuộc sống và trở thành đối tượng của các nhà nghiên cứu, các kỹ sư và những người đam mê robot. Robot hai bánh tự cân bằng được mô hình như một hệ con lắc ngược di động [1]. Robot được cấu tạo gồm phần thân robot và hai bánh xe đồng trục truyền động bằng hai động cơ DC riêng rẽ [1]. Để giữ thăng bằng cho robot, một bộ xử lý đọc các tín hiệu cảm biến, thông qua quá trình tính toán, tín hiệu điều khiển được gửi đến hai động cơ để điều khiển robot di chuyển về sau hay trước sao cho trọng lượng của robot luôn

đặt trên trọng tâm của hai bánh xe. Vấn đề cần quan tâm là bài toán điều khiển cân bằng cho robot khi di chuyển trên các địa hình khác nhau. Đã có nhiều giải thuật điều khiển đã được công bố và tiến hành thực nghiệm như: điều khiển PID [2], điều khiển bằng phương pháp Logic mờ [3], mạng nơron nhân tạo [4]. Bài báo này áp dụng bộ điều khiển trượt và LQR để điều khiển ổn định cho robot. Cả hai bộ điều khiển được thiết kế dựa trên mô hình hệ thống đã được tuyến tính hóa. Kết quả cho thấy bộ điều khiển trượt có ưu điểm là hoạt động tốt đối với các nhiễu tác động vào hệ thống.

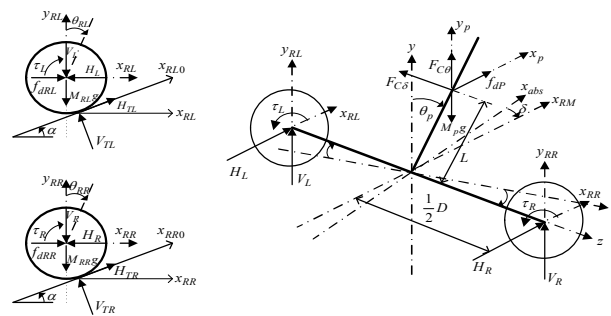
## 2. MÔ HÌNH ĐỘNG HỌC CỦA ROBOT HAI BÁNH TỰ CÂN BẰNG

Hình 1 mô tả các lực tác dụng lên robot hai bánh tự cân bằng. Mô hình robot hai bánh tự cân bằng bao gồm mô hình con lắc ngược được gắn trên khung với hai bánh xe đồng trục. Ta xét mô hình robot đảm bảo hai bánh xe luôn tiếp xúc với mặt đường và lăn không trượt. Robot có thể xoay quanh trục z với góc xoay  $\theta_p$  và vận tốc góc tương

ứng  $\dot{\theta}_p$ . Chuyển động tịnh tiến của thân robot được mô tả bởi thông số vị trí  $x_p$  và vận tốc  $\dot{x}_p$ . Thân robot không di chuyển theo hướng z. Thay vào đó robot có thể xoay quanh trục y với góc xoay tương ứng là  $\delta$  và vận tốc góc là  $\dot{\delta}$ . Những thông số mô hình của robot tự cân bằng được định nghĩa trong Bảng 1.

**Bảng 1.** Các thông số của mô hình

Thông số	Định nghĩa	Đơn vị
$\theta_p$	Góc nghiêng	[ rad ]
$\delta$	Góc xoay	[ rad ]
$J_{RL}$	Moment quán tính của bánh xe	[ kgm <sup>2</sup> ]
$M_r$	Khối lượng bánh xe	[ kg ]
$J_p$	Moment quán tính của con lắc ngược quanh trục z	[ kgm <sup>2</sup> ]
$J_\delta$	Moment quán tính của con lắc ngược quanh trục y	[ kgm <sup>2</sup> ]
$M_p$	Khối lượng con lắc ngược	[ kg ]
$R$	Bán kính bánh xe	[ m ]
$L$	Khoảng cách từ tâm bánh xe đến trọng tâm con lắc ngược	[ m ]
$D$	Khoảng cách giữa 2 bánh xe	[ m ]
$x_p$	Vị trí của con lắc ngược trên trục x	[ m ]
$g$	Gia tốc trọng trường	[ m/s <sup>2</sup> ]
$\tau_L, \tau_R$	Lực tác động vào bánh xe trái và phải	[ Nm ]
$x_{RL0}, x_{RR}$	Vị trí bánh xe trái và phải	[ m ]
$H_L, H_R$ $V_L, V_R$	Phản lực giữa bánh xe trái/phải và con lắc ngược	[ N ]
$\theta_{RL0}, \theta_{RR}$	Góc xoay của bánh xe trái và phải	[ rad ]
$f_{aRL}, f_{aRR}$	Nhiều lực tác động lên trọng tâm bánh xe trái và phải	[ N ]
$f_{aP}, F_{C\theta}$	Nhiều lực theo phương ngang và phương thẳng đứng tác động lên con lắc ngược	[ N ]



**Hình 1.** Lực tác động lên robot hai bánh tự cân bằng

### 2.1. Mô hình động lực học bánh xe

Mô hình bánh xe được đặt trên mặt phẳng nghiêng so với mặt phẳng ngang một góc  $\alpha$ . Chọn phương chuyển động x trùng với mặt phẳng nghiêng. Ta có phương trình lực tác động lên bánh xe như sau:

$$\ddot{x}_{RL0} M_r = -\cos\alpha H_L + \cos\alpha f_{aRL} - \sin\alpha V_L - \sin\alpha M_r g + H_{TL} \quad (1)$$

Phương trình cân bằng mô men:

$$\ddot{\theta}_{RL0} J_{RL} = \tau_L - H_{TL} R \quad (2)$$

Bởi vì chuyển động tịnh tiến xảy ra ở tâm của bánh xe. Chuyển động quay của nó có thể được chuyển thành chuyển động tịnh tiến như sau:

$$\dot{x}_{RL0} = R \dot{\theta}_{RL0} \rightarrow \ddot{x}_{RL0} = R \ddot{\theta}_{RL0} \rightarrow \ddot{\theta}_{RL0} = \frac{\ddot{x}_{RL0}}{R} \quad (3)$$

Từ phương trình (2) và (3) ta có phản lực theo phương ngang là:

$$H_{TL} = \frac{\tau_L}{R} - \frac{J_{RL}}{R} \ddot{\theta}_{RL0} = \frac{\tau_L}{R} - \frac{J_{RL}}{R^2} \ddot{x}_{RL0} \quad (4)$$

Thay phương trình (4) vào phương trình (1) ta có phương trình động lực học của bánh xe phải:

$$\left(M_r + \frac{J_{RL}}{R^2}\right)\ddot{x}_{RL0} = -\cos\alpha H_L + \frac{\tau_L}{R} + \cos\alpha f_{dRL} - \sin\alpha V_L - M_r g \sin\alpha \quad (5)$$

Phương trình động lực học cho cả hai bánh xe:

$$\left(2M_r + \frac{2J_{RL}}{R^2}\right)\ddot{x}_{RL0} = -\cos\alpha(H_L + H_R) + \frac{\tau_L + \tau_R}{R} + \cos\alpha(f_{dRL} + f_{dRR}) - \sin\alpha(V_L + V_R) - 2M_r g \sin\alpha \quad (6)$$

## 2.2. Mô hình động lực học con lắc ngược

Phương trình lực tác dụng theo phương ngang thu được từ Hình 1.

$$\ddot{x}_p M_p = (H_R + H_L) + f_{dP} \quad (7)$$

Mối tương quan của gia tốc trọng lực  $\ddot{x}_p$  của con lắc với gia tốc theo phương ngang  $\ddot{x}_r$  được biểu diễn như sau:

$$\ddot{x}_p = \ddot{\theta}_p L \cos\theta_p - L \sin\theta_p \cdot \dot{\theta}_p^2 + \ddot{x}_r \quad (8)$$

Mối tương quan của gia tốc theo phương ngang và gia tốc nghiêng của thân robot được biểu diễn như sau:

$$\ddot{x}_r = \cos\alpha \cdot \ddot{x}_{r0} \quad (9)$$

Phản lực theo phương ngang từ phương trình (7) và (9) được viết lại:

$$\begin{aligned} (H_L + H_R) &= \ddot{x}_p M_p - f_{dP} \\ &= (\ddot{\theta}_p L \cos\theta_p - L \sin\theta_p \cdot \dot{\theta}_p^2 + \ddot{x}_r) M_p - f_{dP} \\ &= \ddot{\theta}_p L \cos\theta_p M_p - L \sin\theta_p \cdot \dot{\theta}_p^2 M_p \\ &\quad + \cos\alpha \cdot \ddot{x}_{r0} M_p - f_{dP} \end{aligned} \quad (10)$$

Phương trình lực tác dụng theo phương gia tốc  $\ddot{y}_p$

$$\ddot{y}_p M_p = V_R + V_L - M_p g + F_{C\theta} \quad (11)$$

Mối tương quan giữa gia tốc theo phương thẳng đứng của con lắc và gia tốc góc nghiêng của thân robot được thể hiện như sau:

$$\ddot{y}_p = -\ddot{\theta}_p L \sin\theta_p - L \cos\theta_p \cdot \dot{\theta}_p^2 + \sin\alpha \cdot \ddot{x}_{r0} \quad (12)$$

Thay phương trình (12) vào phương trình (11), phản lực theo phương thẳng đứng là:

$$\begin{aligned} V_R + V_L &= M_p \ddot{x}_{r0} \sin\alpha - M_p L \sin\theta_p \ddot{\theta}_p \\ &\quad - M_p L \cdot \dot{\theta}_p^2 \cos\theta_p + M_p g - F_{C\theta} \end{aligned} \quad (13)$$

Thay thế phản lực theo phương ngang và phương đứng trong phương trình (6) ta được phương trình cho gia tốc  $\ddot{x}_{r0}$ :

$$\begin{aligned} (2M_r + M_p + \frac{2J_R}{R^2})\ddot{x}_{r0} &= -M_p L \cos(\theta_p + \alpha) \ddot{\theta}_p \\ &\quad + M_p L \sin(\theta_p + \alpha) \dot{\theta}_p^2 - (2M_r + M_p) g \sin\alpha \\ &\quad + \frac{\tau_L + \tau_R}{R} + (f_{dP} + f_{dRL} + f_{dRR}) \cos\alpha + F_{C\theta} \sin\alpha \end{aligned} \quad (14)$$

Phương trình mô men của trọng tâm con lắc ngược:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_p J_p &= (V_R + V_L) L \sin\theta_p \\ &\quad - (H_R + H_L) L \cos\theta_p - (\tau_L + \tau_R) \end{aligned} \quad (15)$$

Thay thế phản lực theo phương ngang và phương đứng trong công thức (15), phương trình (15) có thể được viết lại:

$$\begin{aligned} (J_p + M_p L^2) \ddot{\theta}_p &= -M_p L \cos(\theta_p + \alpha) \ddot{x}_{r0} \\ &\quad + M_p g L \sin\theta_p - (\tau_L + \tau_R) - F_{C\theta} L \sin\theta_p + f_{dP} L \cos\theta_p \end{aligned} \quad (16)$$

Tuyến tính các phương trình trên với góc lệch  $\theta_p, \alpha$  tương đối nhỏ như sau:

$$\sin\theta_p \approx \theta_p, \cos\theta_p \approx 1, \sin\alpha \approx \alpha, \cos\alpha \approx 1, \quad (17)$$

$$\sin(\theta_p + \alpha) \approx \theta_p + \alpha, \cos(\theta_p + \alpha) \approx 1, (\dot{\theta}_p)^2 \approx 0$$

Ta thu được mô hình tuyến tính của robot hai bánh tự cân bằng như sau:

$$\begin{aligned} \left(2M_r + M_p + \frac{2J_R}{R^2}\right)\ddot{x}_{r0} &= -M_p L \ddot{\theta}_p - (2M_r + M_p) g \alpha + \frac{\tau_L + \tau_R}{R} \\ &\quad + F_{C\theta} \sin\alpha + (f_{dP} + f_{dRL} + f_{dRR}) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} (J_p + M_p L^2) \ddot{\theta}_p &= -M_p L \ddot{x}_{r0} + M_p g L \theta_p \\ &\quad - (\tau_L + \tau_R) - F_{C\theta} L \theta_p + f_{dP} L \end{aligned} \quad (19)$$

Phương trình mô men của con lắc ngược quay quanh trục y là:

$$\ddot{\delta} J_\delta = (H_L - H_R) \frac{D}{2} \quad (20)$$

$$\ddot{\delta} = \frac{6}{(M_p + 9M_r)RD} (\tau_L - \tau_R) \quad (21)$$

Sắp xếp các phương trình trên, tuyến tính hóa xung quanh điểm làm việc tĩnh ( $x_{r0}=0, \theta_p=0, \delta=0$ ). Phương trình trạng thái của hệ thống có thể được viết dưới dạng ma trận sau:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_{r0} \\ \dot{\ddot{x}}_{r0} \\ \dot{\theta}_p \\ \dot{\ddot{\theta}}_p \\ \dot{\delta} \\ \dot{\ddot{\delta}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & | & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{23} & 0 & | & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & | & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{43} & 0 & | & 0 & 0 \\ - & - & - & - & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & 0 & | & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & | & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{r0} \\ \ddot{x}_{r0} \\ \theta_p \\ \ddot{\theta}_p \\ \delta \\ \ddot{\delta} \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B_2 & 0 \\ 0 & 0 \\ B_4 & 0 \\ - & - \\ 0 & 0 \\ 0 & B_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ d_2 \\ 0 \\ d_4 \\ - \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22) \end{aligned}$$

Trong đó:

$$A_{23} = g \left( 1 - \frac{4}{3} L \frac{M_p}{X} \right), A_{43} = \frac{gM_p}{X}, B_4 = -\frac{Y}{X}$$

$$B_2 = \left( \frac{4LY}{3X} - \frac{1}{M_p L} \right), B_6 = \frac{6}{(9M_r + M_p)RD}$$

$$X = \frac{1}{3} \frac{M_p(M_p + 12M_r)L}{M_p + 3M_r}, Y = \frac{M_p}{(M_p + 3M_r)R} + \frac{1}{L}$$

$$d_2 = \frac{-4g(2M_r + M_p)}{12M_r + M_p} \alpha, d_4 = \frac{3g(2M_r + M_p)}{L(12M_r + M_p)} \alpha$$

Mô hình động lực học cho robot hai bánh tự cân bằng có thể được mô tả bởi phương trình tổng quát sau:

$$\dot{x} = Ax + Bu + D_d = Ax + B(u + \tilde{D}_d) = Ax + Bu_1 \quad (23)$$

với

$$B\tilde{D}_d = D_d$$

$$\tilde{D}_d = (B^T B)^{-1} B^T D_d = \frac{1}{B_2^2 + B_4^2} \begin{bmatrix} B_2 d_2 + B_4 d_4 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

### 3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

#### 3.1. Thiết kế bộ điều khiển LQR

Bộ điều khiển LQR được áp dụng cho hệ thống tuyến tính được cho bởi phương trình:

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \quad (25)$$

$$x(0) = x_0$$

Mục tiêu là thiết kế các bộ điều khiển nhằm cực tiểu chỉ số năng lượng:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x'(t)Qx(t) + u'(t)Ru(t)] dt \quad (26)$$

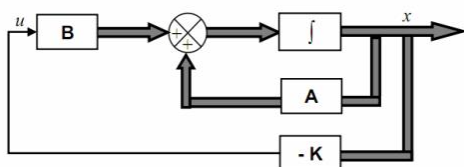
Luật điều khiển cho LQR được chọn như sau:

$$u = -R^{-1} B^T \bar{P} x \quad (27)$$

Trong đó ma trận  $\bar{P} = \bar{P} \geq 0$  được xác định là nghiệm của phương trình đại số Ricatti:

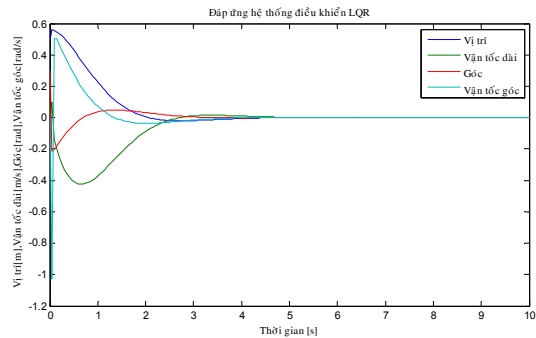
$$0 = PA + A^T P - PBR^{-1} B^T P + Q \quad (28)$$

Kết quả xác định được ma trận hồi tiếp trạng thái  $K = R^{-1} B^T \bar{P}$  của hệ thống điều khiển. Sơ đồ khối của bộ điều khiển LQR được mô tả trên Hình 2.

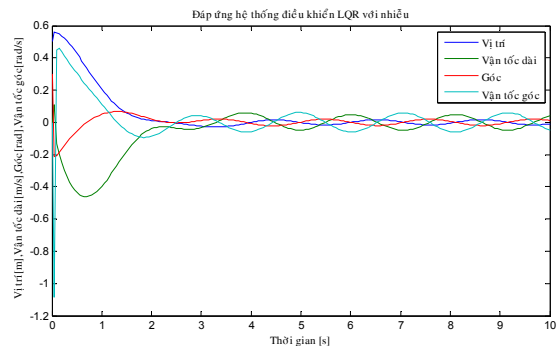


Hình 2. Sơ đồ khối bộ điều khiển LQR

Kết quả mô phỏng đáp ứng hệ thống cho bộ điều khiển LQR được trình bày trên Hình 3 và Hình 4.



Hình 3. Đáp ứng của bộ điều khiển LQR không có nhiễu



Hình 4. Đáp ứng của bộ điều khiển LQR có nhiễu

#### 3.2. Thiết kế bộ điều khiển trượt

Mặt trượt s được chọn sao cho:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} s^T \dot{s} < 0 \quad (29)$$

Nghĩa là s được chọn thỏa mãn:

$$\dot{s} = \frac{ds}{dt} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) \quad (30)$$

với  $\varepsilon > 0$ .

Lấy vi phân phương trình (30) theo thời gian và kết hợp với (23) ta được:

$$\dot{s} = \frac{ds}{dt} = S \frac{dx}{dt} = S(Ax + Bu + D_d) \quad (31)$$

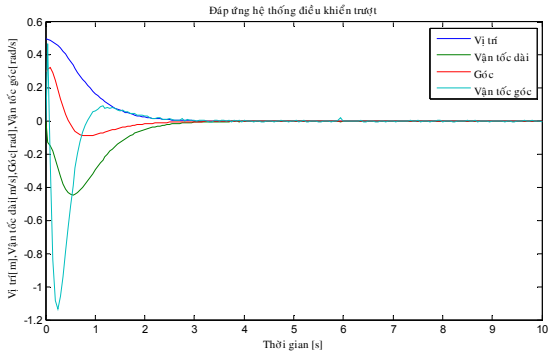
Từ phương trình (30) và (31) ta được:

$$\dot{s} = SAx + SBu + SD_d = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) \quad (32)$$

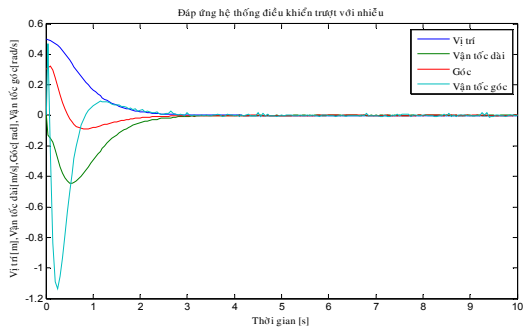
Luật điều khiển trượt được thiết kế như sau:

$$u = -(SB)^{-1} (SAx + SD_d + \varepsilon \operatorname{sgn}(s)) \quad (33)$$

Kết quả mô phỏng đáp ứng hệ thống cho bộ điều khiển trượt được trình bày trên Hình 5 và Hình 6.



**Hình 5.** Đáp ứng của bộ điều khiển trượt không có nhiễu



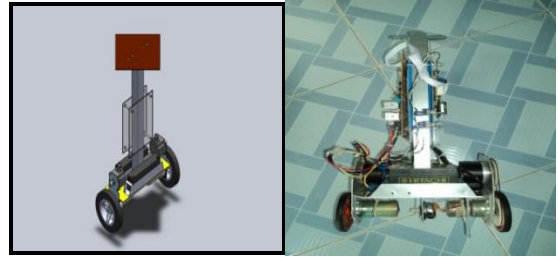
**Hình 6.** Đáp ứng của bộ điều khiển trượt có nhiễu

Kết quả mô phỏng cho thấy cả hai bộ điều khiển đều đưa các biến trạng thái về giá trị 0 sau khoảng thời gian 5s. Đối với bộ điều khiển LQR hệ thống không ổn định khi bị tác động của nhiễu ngoài. Đối với hệ thống sử dụng bộ điều khiển trượt các biến trạng thái dao động quanh điểm cân bằng. Tính ổn định bền vững của bộ điều khiển trượt cao hơn bộ điều khiển LQR ngay cả khi hệ thống có nhiễu ngoài hoặc sự không chắc của thông số mô hình.

#### 4. THI CÔNG MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM

Robot thực nghiệm được thiết kế gồm 2 phần: phần cơ khí và mạch điều khiển. Phần cơ khí robot bao gồm 2 phần: thân robot và 2 bánh xe đồng trục. Cảm biến encoder được lắp có trục song song với trục động cơ và được truyền động từ động cơ để đo vị trí dịch chuyển và tính vận tốc dài. Để xác định góc nghiêng bằng cách dùng một encode với một thanh kim loại gắn lên trục, đầu còn lại của thanh kim loại thì xuống mặt tiếp xúc. Trong giới hạn góc nghiêng nhỏ có thể xem góc lệch của encode này đồng dạng với với nghiêng của robot. Mô hình

thực nghiệm của robot được trình bày trên Hình 7.

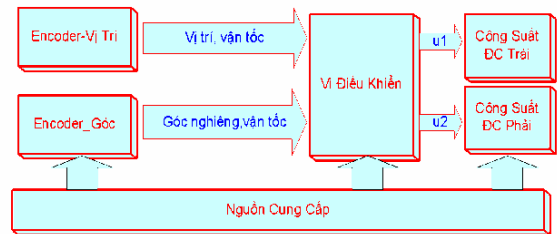


**Hình 7.** Mô hình thực nghiệm

Các thông số của mô hình:

$M_p=2.45$  (Kg),  $M_r=0.25$  (Kg),  $L=0.1$  (m),  $R=0.042$  (m),  $D=0.26$  (m).

Sơ đồ khối hệ thống điều khiển được trình bày trên Hình 8.



**Hình 8.** Sơ đồ khối hệ thống điều khiển

Chương trình điều khiển được xây dựng trên công nghệ vi điều khiển ATMEGA32. Vi điều khiển đọc các giá trị cảm biến sau đó thực hiện quá trình tính toán theo giải thuật định trước, sau đó gửi tín hiệu điều khiển đến hai động cơ có gắn encoder.

Kết quả thực thi chương trình:

- Robot đạt trạng thái cân bằng ổn định khi sử dụng phương pháp điều khiển LQR và điều khiển trượt.

- Dao động xung quanh điểm cân bằng khoảng 5 độ.

#### 5. KẾT LUẬN

Bài báo đã đưa ra hai bộ điều khiển LQR và điều khiển trượt cho robot hai bánh tự cân bằng. Các kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy sự hiệu quả của chúng, đặc biệt bộ điều khiển trượt ổn định bền vững hơn trong trường hợp hệ thống bị tác động của nhiễu ngoài. Kết quả cho thấy khả năng áp dụng các bộ điều khiển này cho hệ thống ứng dụng trong thực tế.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Minh Tao Kang, Hak Kyeong Kim, and Sang Bong Kim, Control System Design for a Mobile Inverted Pendulum via Sliding Mode Technique.
- [2] Christanto Dwicahyo Putro, Endra Pitowano, Effect of Dynamics Loading on a PID controlled Two-Wheeled Vehicle of Wheelchair-Based Inverted Pendulum.
- [3] Eric Minnaert, Brian Hemmelman, Dan Dolan, Inverted Pendulum Design With Hardware Fuzzy Logic Controller.
- [4] Martin Seyr, Stefan Jakubek, Gregor Novark, Neural Network Predictive Trajectory Tracking of an Autonomous Two-Wheeled Mobile Robot.
- [5] Nawawi S.W, Ahmad M.N, Osman J.H.S, Husain A.R and Abdollah M.F, Controller Design for Two-wheels Inverted Pendulum Mobile Robot Using PISMC.
- [6] Nak Soon Choi, Seo Kwang Kim, Gun You Lee, Hak Kyeong Kim and Sang Bong Kim, Sliding mode control for rejecting disturbance of mobile inverted pendulum.
- [7] Wilfrid Perruquetti, Jean Pierre Barbot, Sliding mode control for engineering, 2002.
- [8] Muhammad Usman Asad, Umar Frooq, Athar Hanlf, Mahmood ul Hasan, Student Member IEEE, Design And Implementation of Real Time Controller for Self Balancing Robot.
- [9] Seul Jung, Member IEEE, Sung Su Kim. Control Experiment of a Wheel-Driven Mobile Inverted Pendulum Using Neural Network, march 2008.
- [10] Jian Huang, Zhi-Hong Guan, Takayuki Matsuno, Toshio Fukuda, Kosuke Sekiyama, Sliding Mode Velocity Control of Mobile – Wheeled Inverted Pendulum System.