

MÔ HÌNH HÓA VÀ ĐIỀU KHIỂN BỘ CON QUAY HỒI CHUYỂN CHO ROBOT TỰ CÂN BẰNG HAI BÁNH DƯỚI TÁC ĐỘNG CỦA NHIỀU

NHỮ NGUYỄN MINH CHÂU¹ - TRẦN NAM CƯỜNG¹ - NGUYỄN TƯỜNG LONG^{1*}

¹ Trường Đại học Bách Khoa - Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

Ho Chi Minh City University of Technology,
Vietnam National University, Ho Chi Minh City, Vietnam

*Tác giả liên hệ - Email: ntlong@hcmut.edu.vn

Ngày nhận bài: 21/7/2026

Ngày sửa bài: 12/8/2026

Ngày duyệt đăng bài: 23/8/2026

Tóm tắt:

Bài viết xây dựng mô hình phi tuyến theo phương dọc cho robot tự cân bằng hai bánh tích hợp Paired CMG quay ngược chiều. Mô hình mô tả sự liên kết giữa chuyển động tịnh tiến, góc nghiêng thân, mômen bánh xe và mômen CMG. Cấu trúc điều khiển lai được đề xuất, trong đó bánh xe tạo mômen duy trì và trao đổi động lượng với mặt đất, còn Paired CMG xử lý đáp ứng quá độ nhanh. 8 phép thử trên mô hình Paired CMG một trục đều đạt. Với góc nghiêng ban đầu 2° , hệ trở về miền $\pm 0,5^\circ$ sau 1,07s. Xung lực 10 N kéo dài 0,2s tại độ cao 1 m gây góc lệch cực đại $0,422^\circ$. Mômen bậc thang 5N·m làm gimbal bão hòa sau 5,20s và thân vượt ngưỡng ngã sau 6,53s. Kết quả xác định giới hạn của CMG đơn và thiết lập bộ thử cho mô hình lai; hiệu năng của hệ bánh xe-CMG sẽ được đánh giá sau khi xác định đầy đủ thông số bánh xe.

Từ khóa: robot tự cân bằng hai bánh, con lắc ngược, Paired CMG, phân bổ mômen.

Modeling and control of a gyroscope-equipped two-wheeled self-balancing robot under disturbances

Abstract:

This study develops a longitudinal nonlinear model of a two-wheeled self-balancing robot equipped with a counter-rotating paired control moment gyroscope (CMG). The model couples translational motion, body tilt, wheel torque, and CMG torque. A hybrid control architecture is proposed in which the wheels provide sustained torque and exchange momentum with the ground, while the paired CMG handles rapid transient responses. All eight tests of the single-axis paired CMG model were passed. From an initial tilt of 2° , the system returned to within $\pm 0.5^\circ$ after 1.07 s. A 10 N force applied for 0.2 s at a height of 1 m produced a maximum tilt of 0.422° . A sustained torque of 5 N·m caused gimbal saturation after 5.20s, followed by the body exceeding the fall threshold after 6.53s. The results establish the limitations of a standalone CMG and a test set for the hybrid model. Full wheel-CMG performance will be assessed once the wheel parameters have been determined.

Keywords: two-wheeled self-balancing robot, inverted pendulum, paired control moment gyroscope, torque allocation

1. Đặt vấn đề

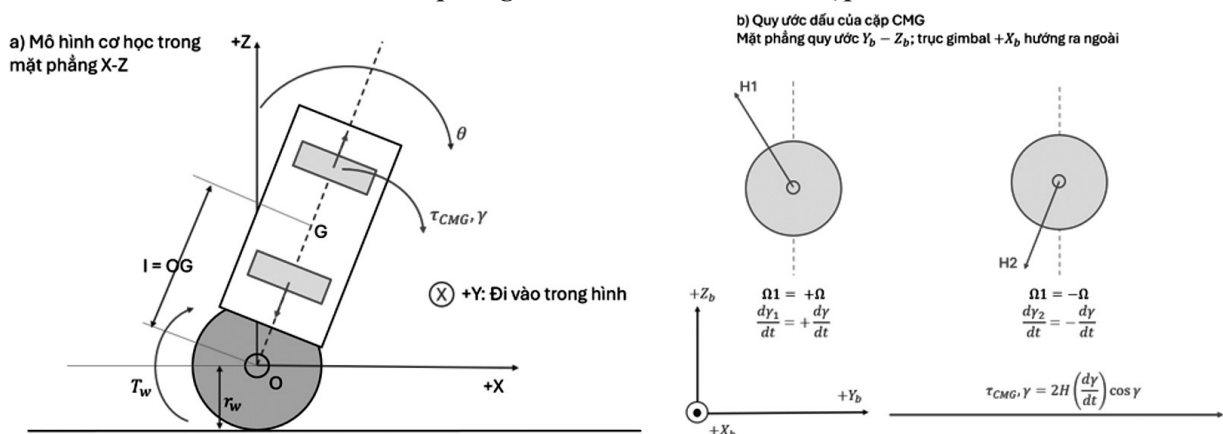
Robot tự cân bằng hai bánh có thể được mô hình hóa như một con lắc ngược trên đế di động, trong đó chuyển động tịnh tiến, góc nghiêng thân và mômen bánh xe liên kết chặt chẽ với nhau (Ghaffari et al., 2016; Grasser et al., 2002; Pathak et al., 2005). Control Moment Gyroscope (CMG) tạo mômen lớn bằng cách đổi hướng vector động lượng góc của rotor, nhưng khả năng điều khiển bị giới hạn bởi hành trình gimbal và trạng thái suy biến (Bedrossian et al., 1990; Kurokawa, 2007; Winder, 1978). Vì vậy, nghiên cứu này đề xuất cấu trúc điều khiển lai, trong đó Paired CMG xử lý đáp ứng quá độ nhanh, còn bánh xe cung cấp mômen duy trì và hỗ trợ quản lý động lượng. Mục tiêu là xây dựng mô hình động lực học phi tuyến, áp dụng các giới hạn cơ cấu chấp hành và đánh giá khả năng ổn định của hệ dưới tác động của nhiễu.

2. Mô tả hệ thống

2.1. Kiến trúc cơ học và hệ tọa độ

Hệ thống gồm một thân cứng đặt trên hai bánh đồng trục, 2 động cơ dẫn động và một cụm Paired CMG lắp trong thân. Hệ quán tính OXYZ có X trùng phương chuyển động dọc, Y song song trục bánh xe và Z hướng lên. Góc nghiêng θ dương khi thân quay từ +Z về +X quanh +Y; $\theta = 0$ biểu thị tư thế thẳng đứng. Trong mô hình phẳng, hai động cơ nhận lệnh mômen bằng nhau nên chuyển động yaw và roll không được xét.

Hình 1. Cấu hình phẳng của robot hai bánh tích hợp Paired CMG



Khối lượng m_b biểu thị toàn bộ cụm nằm phía trên trục bánh, gồm thân, nguồn, điện tử, gimbal và rotor. Trọng tâm G cách trục bánh một đoạn l . Mỗi bánh có bán kính r_w , khối lượng m_w và mômen quán tính dọc trục J_w . Tọa độ x mô tả chuyển vị của trục bánh. Điều kiện lăn không trượt liên hệ x với góc quay trung bình của hai bánh.

2.2. Cấu hình Paired CMG

Cụm Paired CMG gồm hai rotor vành khăn giống nhau. Hai tốc độ rotor được đo theo cùng chiều dương của trục z_b nên mang dấu đối nhau. Hai trục gimbal song song với $+x_b$. Cách đặt dấu này làm cho hai mômen hữu ích cùng chiều quanh $+y_b$ khi các gimbal chuyển động đối xứng.

$$\Omega_1 = +\Omega, \Omega_2 = -\Omega \quad (2.1)$$

$$H = J_s \Omega \quad (2.2)$$

Mômen trên thân được định nghĩa là mômen phản lực đối với tốc độ biến thiên động lượng rotor. Với các dấu nêu trên, thành phần điều khiển quanh $+y_b$ là

$$\tau_{CMG,Y} = H(\dot{\gamma}_1 \cos \gamma_1 - \dot{\gamma}_2 \cos \gamma_2) \quad (2.3)$$

$$\gamma_1 = \gamma, \gamma_2 = -\gamma, \dot{\gamma}_1 = \dot{\gamma}, \dot{\gamma}_2 = -\dot{\gamma} \Rightarrow \tau_{CMG,Y} = 2H\dot{\gamma} \cos \gamma \quad (2.4)$$

Hai rotor quay ngược chiều chỉ triệt tiêu động lượng tổng tại $\gamma = 0$. Với điều khiển đối xứng, thành

phần theo z_b triệt tiêu nhưng động lượng tổng theo y_b bằng $-2H \sin \gamma$. Vì vậy, chuyển động gimbal làm thay đổi động lượng nội tại; bánh xe và mặt đất vẫn cần thiết để thực hiện quản lý động lượng lâu dài.

2.3. Thông số tham chiếu và giới hạn

Mô hình Paired CMG hiện tại có tổng khối lượng 60 kg và được đặt trên một khớp quay cố định. Thân có kích thước $0,70 \times 0,70 \times 1,50$ m, với trọng tâm cách trục quay 0,75 m. Hệ gồm hai rotor vành khăn giống nhau, mỗi rotor có khối lượng 15 kg, bán kính ngoài 0,30 m, bán kính trong 0,20 m và mômen quán tính dọc trục $J_s = 0,975 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Hai rotor quay với tốc độ không đổi lần lượt là $\Omega_1 = +300$ rpm và $\Omega_2 = -300$ rpm, tạo ra động lượng góc có độ lớn $H = 30,63 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ cho mỗi rotor. Góc gimbal được giới hạn trong phạm vi $\pm 45^\circ$, tốc độ gimbal cực đại là $60^\circ/\text{s}$, tương đương $1,047 \text{ rad/s}$, và gia tốc gimbal cực đại là $300^\circ/\text{s}^2$, tương đương $5,236 \text{ rad/s}^2$. Cơ cấu gimbal được mô tả bằng mô hình bậc nhất với hằng số thời gian 0,02 s. Lệnh mômen được giới hạn ở $60 \text{ N} \cdot \text{m}$, nhỏ hơn giới hạn động học tại $\gamma = 0$, và hệ phương trình được tích phân bằng phương pháp Runge-Kutta bậc bốn với bước thời gian cố định 0,005s.

3. Mô hình động lực học

3.1. Động học lăn và năng lượng

Tọa độ suy rộng của mô hình dọc là $q = [x, \theta]^T$. Vị trí trọng tâm của cụm thân phía trên trục bánh được viết như sau:

$$x_G = x + l \sin \theta, \quad z_G = l \cos \theta \quad (3.1)$$

$$\dot{x} = r_w \dot{\psi} \quad (3.2)$$

Đặt m là tổng khối lượng tịnh tiến của robot, J_b là quán tính pitch của cụm thân tại G và $J_{w\Sigma}$ là tổng quán tính dọc trục của hai bánh. Động năng và thế năng được chọn sao cho $\theta = 0$ là tư thế con lắc ngược.

$$T = \frac{1}{2} \left(m + \frac{J_{w\Sigma}}{r_w^2} \right) \dot{x}^2 + m_b l \cos \theta \dot{x} \dot{\theta} + \frac{1}{2} (J_b + m_b l^2) \dot{\theta}^2 \quad (3.3)$$

$$V = m_b g l \cos \theta \quad (3.4)$$

3.2. Phương trình chuyển động ghép

Ký hiệu τ_w là tổng mômen mà hai động cơ tác dụng lên bánh theo chiều làm robot tiến về +X. Phản lực cùng độ lớn tác dụng lên thân theo chiều -Y. Mômen Paired CMG và mômen nhiễu được lấy dương quanh +Y. Hai hệ số b_x và b_θ mô tả cản nhớt tương đương.

$$M_x = m + \frac{J_{w\Sigma}}{r_w^2}, \quad J_\theta = J_b + m_b l^2 \quad (3.5)$$

$$M_x \ddot{x} + m_b l \cos \theta \ddot{\theta} - m_b l \sin \theta \dot{\theta}^2 = \frac{\tau_w}{r_w} - b_x \dot{x} \quad (3.6)$$

$$J_\theta \ddot{\theta} + m_b l \cos \theta \ddot{x} - m_b g l \sin \theta = -\tau_w + \tau_{\text{CMG}} + \tau_d - b_\theta \dot{\theta} \quad (3.7)$$

Hai phương trình trên giữ hạng phi tuyến $m_b l \sin \theta \dot{\theta}^2$. Khi bỏ mômen, cản và CMG, đạo hàm năng lượng cơ học bằng không trong miền lăn không trượt. Đây là phép kiểm tra quan trọng đối với dấu của hạng trọng lực và liên kết quán tính.

$$\Delta = M_x J_\theta - (m_b l \cos \theta)^2 > 0 \quad (3.8)$$

Điều kiện $\Delta > 0$ bảo đảm ma trận khối lượng khả nghịch. Đặt $c = m_b l \cos \theta$ và định nghĩa hai vế phải r_1, r_2 , gia tốc có thể tính trực tiếp mà không đòi quy ước dấu.

$$r_1 = \frac{\tau_w}{r_w} - b_x \dot{x} + m_b l \sin \theta \dot{\theta}^2, \quad r_2 = -\tau_w + \tau_{\text{CMG}} + \tau_d - b_\theta \dot{\theta} + m_b g l \sin \theta \quad (3.9)$$

$$\ddot{x} = \frac{J_\theta r_1 - c r_2}{\Delta}, \quad \ddot{\theta} = \frac{M_x r_2 - c r_1}{\Delta} \quad (3.10)$$

3.3. Động lượng và mômen của Paired CMG

Với vectơ đơn vị trục rotor nhận được bằng phép quay quanh x_b , động lượng của rotor thứ i là

$$\mathbf{H}_i = J_s \Omega_i (0, -\sin \gamma_i, \cos \gamma_i) \quad (3.11)$$

Mômen thân bằng âm tốc độ biến thiên động lượng rotor trong hệ gimbal. Tích có hướng sau cho đúng dấu của (2.3), đồng thời cho thấy, thành phần không mong muốn quanh z_b triệt tiêu dưới điều khiển đối xứng.

$$\tau_{B,i} = -\frac{dH_i}{dt} = -\dot{\gamma}_i \mathbf{e}_{x,b} \times \mathbf{H}_i \quad (3.12)$$

$$\tau_{CMG,max} = 2H\dot{\gamma}_{max}\cos\gamma \quad (3.13)$$

Với $H = 30,6305 \text{ N m s}$ và $\dot{\gamma}_{max} = 1,0472 \text{ rad/s}$, giới hạn động học là $64,15 \text{ N m}$ tại $\gamma = 0$ và $45,36 \text{ N m}$ tại $|\gamma| = 45^\circ$. Giới hạn lệnh 60 N m của phần mềm nằm dưới giá trị trung tâm nhưng vẫn phải giảm theo $\cos\gamma$ khi gimbal lệch khỏi trung tâm.

3.4. Động học cơ cấu và nhiễu

Cơ cấu gimbal được mô tả bằng đáp ứng tốc độ bậc nhất có giới hạn gia tốc. Hàm sat hoặc clip được áp dụng trước khi tích phân, và lệnh hướng ra ngoài bị đặt bằng không khi góc đã chạm giới hạn.

$$\ddot{\gamma} = \text{sat}\left(\frac{\gamma_{cmd}-\gamma}{T_e}, \pm\alpha_{max}\right), \quad |\gamma| \leq \gamma_{max} \quad (3.14)$$

$$\tau_d = F_d h_d \text{ hoặc } \tau_d = \tau_{d,0} w_d(t) \quad (3.15)$$

Ở (3.15), F_d là lực ngang đặt tại độ cao h_d , còn $w_d(t)$ mô tả dạng xung, bậc thang hoặc xung lực hữu hạn. Mô hình bánh xe phải bổ sung giới hạn $|\tau_w|$, tốc độ động cơ và điều kiện bám $|F_x| \leq \mu N$.

$$\mathbf{x}_s = [x, \dot{x}, \theta, \dot{\theta}, \gamma, \dot{\gamma}]^T \quad (3.16)$$

4. Chiến lược điều khiển lai bánh xe CMG

4.1. Mômen cân bằng yêu cầu

Bộ điều khiển cấp cao tạo mômen tổng yêu cầu quanh trục pitch. Dạng dưới đây kết hợp cân bằng góc với giới hạn trôi vị trí. Các hệ số vị trí có thể đặt bằng không khi mục tiêu chỉ là phục hồi tư thế.

$$\tau_{req} = -K_p\theta - K_d\dot{\theta} - K_i \int \theta dt - K_x x - K_v \dot{x} \quad (4.1)$$

Theo (3.7), mômen cân bằng thực trên thân là $-\tau_w + \tau_{CMG}$. Do đó, dấu mômen động cơ bánh trong bộ phân bổ phải ngược với mômen phản lực mong muốn trên thân.

4.2. Phân tách theo dải tần

2 bộ lọc bù nhau tách mômen yêu cầu thành phần chậm và nhanh. Tần số cắt ω_c được chọn thấp hơn dải đáp ứng hiệu dụng của gimbal nhưng cao hơn dải điều chỉnh vị trí.

$$F_L(s) = \frac{\omega_c}{s+\omega_c}, \quad F_H(s) = \frac{s}{s+\omega_c}, \quad F_L + F_H = 1 \quad (4.2)$$

$$\tau_{CMG,0}^* = F_H \tau_{req}, \quad \tau_{BW,0}^* = F_L \tau_{req} \quad (4.3)$$

Ký hiệu τ_{BW} là mômen phản lực của bánh trên thân, vì vậy $\tau_{BW} = -\tau_w$. Khi không có bão hòa và không tái định tâm, tổng 2 thành phần trong (4.3) đúng bằng τ_{req} .

4.3. Tái định tâm gimbal có bù mômen

Một hạng $-k_{\gamma\gamma}$ được thêm vào lệnh tốc độ gimbal để kéo gimbal về trung tâm. Hạng này tự tạo mômen CMG; bánh xe phải bù đúng phần chênh lệch để tổng mômen trên thân vẫn bám theo lệnh cấp cao.

$$\dot{\gamma}_{cmd} = \text{sat}\left(\frac{\tau_{CMG,0}}{2H\cos\gamma} - k_{\gamma\gamma}\gamma, \pm\dot{\gamma}_{max}\right) \quad (4.4)$$

$$\tau_{CMG}^* = 2H\dot{\gamma}_{cmd}\cos\gamma, \quad \tau_{BW}^* = \tau_{req} - \tau_{CMG}^* \quad (4.5)$$

$$\tau_w^* = -\tau_{BW}^* \quad (4.6)$$

Nếu gimbal, bánh xe hoặc độ bám bão hòa, bộ phân bổ dùng mômen đạt được thay cho mômen yêu cầu và chuyển phần dư sang cơ cấu còn khả năng. Cơ chế này không thể vượt giới hạn vật lý đồng thời của cả 2 cơ cấu; khi tổng mômen khả dụng nhỏ hơn mômen trọng lực và nhiễu, robot sẽ rời miền phục hồi.

4.4. Chống tích phân bão hòa và logic an toàn

$$\dot{\xi} = -\theta + k_{aw}(\tau_{ach} - \tau_{req}), \tau_{ach} = -\tau_w + \tau_{CMG} \quad (4.7)$$

Tích phân ξ chỉ tăng tự do khi cơ cấu còn theo được lệnh. Khi sai lệch mômen xuất hiện, hạng back calculation đưa trạng thái tích phân về giá trị phù hợp. Bộ điều khiển cũng phải giám sát góc thân, tốc độ bánh, biên gimbal và cờ mất bám để chuyển sang chế độ dừng an toàn nếu trạng thái rời miền phục hồi.

5. Phương pháp mô phỏng và kiểm chứng

5.1. Nền tảng tính toán

Phần mềm Paired CMG v1.3 dùng Python, mô hình thân một trục quanh khớp cố định, bộ điều khiển PID bão hòa và tích phân RK4 bước 0,005 s. Trong lần chạy kiểm chứng cho bản thảo, tám phép thử tự động đều đạt: tính quán tính rotor, trạng thái cân bằng, phân kỳ khi tắt điều khiển, cộng mômen của hai CMG, giới hạn gimbal, phục hồi góc nhỏ, nhiễu bậc thang và bộ đệm hiển thị. Giao diện không tham gia tính toán các chỉ tiêu trong phần này.

Mô hình lai dự kiến thay khớp cố định bằng (3.6)-(3.10) và bổ sung trạng thái bánh xe. Cùng một bộ tạo nhiễu, bộ ghi dữ liệu và chuẩn đánh giá sẽ được giữ lại để việc so sánh không thay đổi điều kiện thử.

5.2. Các trường hợp thử

Bảng 1. Các trường hợp thử

Mã	Điều kiện	Mục đích	Thời gian
S0	$\theta_0 = 0$; không nhiễu	Kiểm tra cân bằng số	1 s
S1	$\theta_0 = 2^\circ$; không nhiễu	Phục hồi góc nhỏ	10 s
S2	10 N tại 1 m; 0,2 s; bắt đầu 1 s	Đáp ứng xung	10 s
S3	5 N m bậc thang; bắt đầu 1 s	Bão hòa động lượng	20 s
S4	Quét mômen và tốc độ bánh	Miền khả thi của điều khiển lai	Sau khi khóa tham số
S5	Quét μ và giới hạn quãng đường	Độ bền vững với tiếp xúc	Sau khi khóa tham số

5.3. Chỉ tiêu đánh giá

Các chỉ tiêu chính gồm góc lệch cực đại, thời gian xác lập, mômen điều khiển cực đại, biên gimbal, thời điểm bão hòa, thời điểm vượt ngưỡng ngã và năng lượng điều khiển ước tính. Thời gian xác lập được tính từ thời điểm đầu tiên mà $|\theta| \leq 0,5^\circ$ và $|\dot{\theta}| \leq 1^\circ/\text{s}$ được duy trì đến cuối phép chạy.

$$t_s = \min\{t: |\theta(\tau)| \leq 0,5^\circ \text{ và } |\dot{\theta}(\tau)| \leq 1^\circ/\text{s}, \forall \tau \geq t\} \quad (5.1)$$

Đối với mô hình lai, bảng kết quả phải báo thêm chuyển vị cực đại, tốc độ bánh cực đại, tỷ lệ thời gian mỗi cơ cấu bão hòa và biên lực bám. Việc chỉ báo góc thân mà không báo chuyển vị và trạng thái gimbal có thể che giấu một nghiệm cân bằng không khả thi về cơ học.

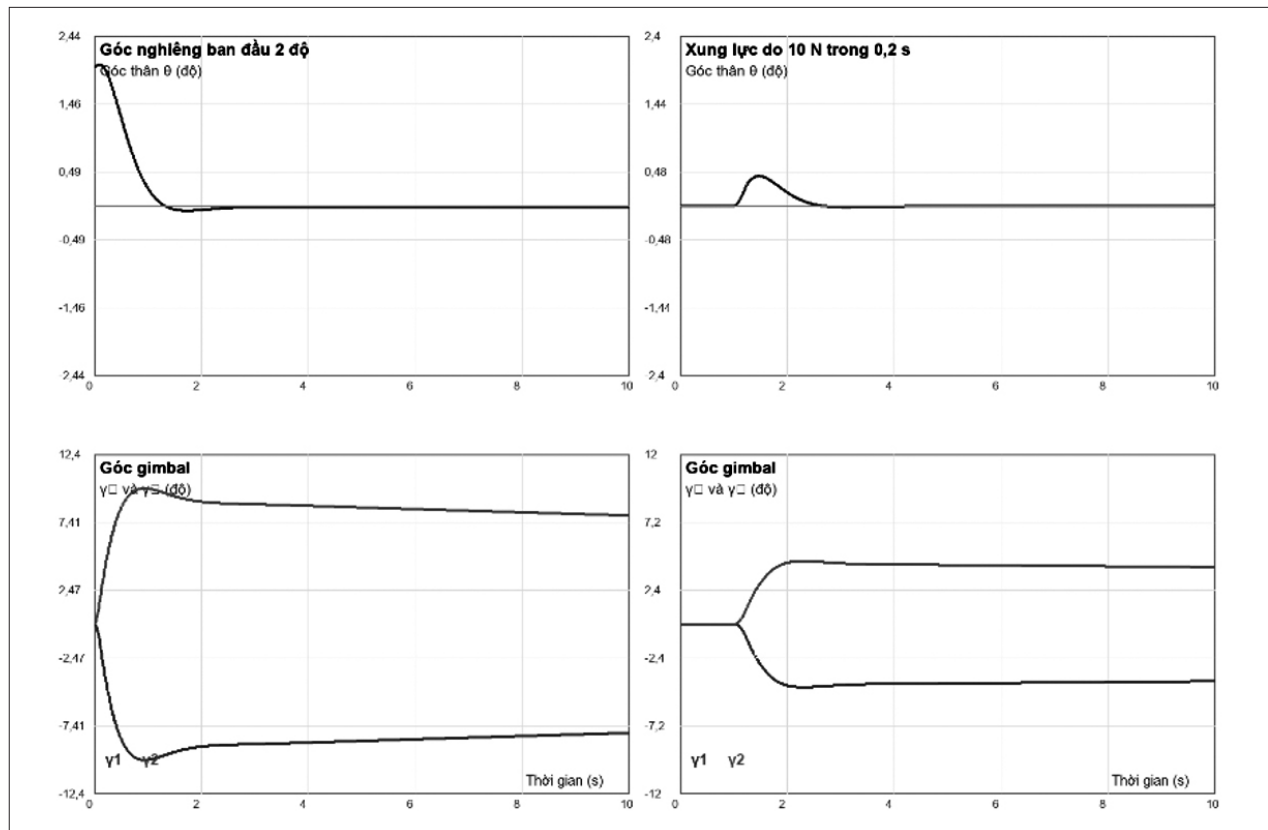
6. Kết quả và thảo luận

6.1. Kết quả đường cơ sở Paired CMG

Hình 2 trình bày 2 đáp ứng hữu hạn của mô hình khớp cố định. Với $\theta_0 = 2^\circ$, góc cực đại là $2,031^\circ$ do trễ cơ cấu ngán, sau đó đi vào miền xác lập tại 1,07 s. Biên gimbal lớn nhất là $9,882^\circ$ và không xuất hiện bão hòa. Khi lực ngang 10 N tác dụng trong 0,2 s, góc lệch cực đại là $0,422^\circ$, thời gian xác lập là 1,30 s và biên gimbal là $4,459^\circ$.

Kết quả chạy lại phần mềm Paired CMG v1.3 cho thấy hệ duy trì trạng thái cân bằng trong tình huống S0 với góc thân, góc gimbal và mômen điều khiển đều bằng 0. Trong S1, góc lệch cực đại đạt $2,031^\circ$, hệ

Hình 2. Đáp ứng đường cơ sở của mô hình Paired CMG khớp cố định



xác lập sau 1,07 s, biên gimbal đạt $9,882^\circ$ và mômen cực đại là $27,80 \text{ N}\cdot\text{m}$ mà không xảy ra bão hòa. Đối với S2, góc lệch cực đại là $0,422^\circ$, thời gian xác lập là 1,30 s, biên gimbal đạt $4,459^\circ$ và mômen cực đại là $8,97 \text{ N}\cdot\text{m}$. Trong S3, gimbal bão hòa tại giới hạn 45° sau 5,20 s; thân vượt ngưỡng nghiêng 45° tại 6,53 s và không thể xác lập, mặc dù mômen cực đại chỉ đạt $11,63 \text{ N}\cdot\text{m}$. Khi không có điều khiển, thân vượt ngưỡng 45° và ngã sau 1,215 s, trong khi góc gimbal và mômen điều khiển đều bằng 0.

6.2. Nhiều duy trì và giới hạn động lượng

Hình 3 cho thấy CMG đơn độc không duy trì được cân bằng dưới mômen 5 N m có cùng dấu. Gimbal đầu tiên chạm giới hạn tại 5,20 s. Sau đó mômen hữu ích không còn theo lệnh và thân vượt ngưỡng 45° tại 6,53 s. Kết quả này phù hợp với quan hệ $\tau_{\text{CMG}} = 2H\dot{\gamma} \cos \gamma$: mômen chỉ tồn tại khi gimbal tiếp tục thay đổi, trong khi hành trình gimbal là hữu hạn.

Trường hợp bậc thang giải thích vai trò của bánh xe trong cấu trúc lai. Khi bánh xe tạo mômen phản lực chậm và bù quá trình tái định tâm, gimbal có thể trở về gần $\gamma = 0$ thay vì tích lũy góc theo một chiều. Tuy nhiên, kết luận định lượng về thời gian chịu nhiễu hoặc góc phục hồi của hệ lai chỉ có giá trị sau khi giới hạn mômen bánh, tốc độ bánh, ma sát và quãng đường được đưa vào mô phỏng.

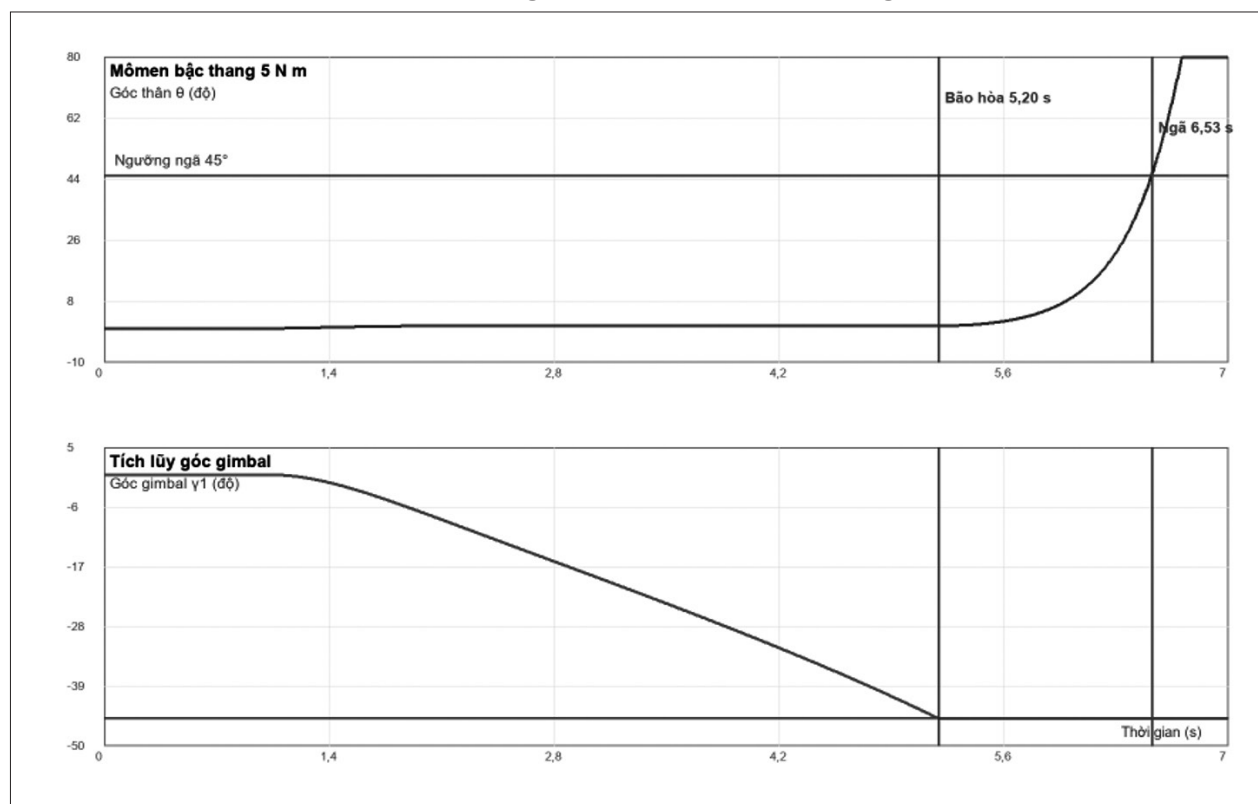
6.3. Miền hiệu dụng và hạn chế

Các kết quả trong Bảng 1 chỉ xác minh quy ước dấu, giới hạn gimbal, bộ điều khiển PID và phương pháp tích phân của mô hình khớp quay cố định; chúng chưa đại diện cho robot hai bánh chuyển động trên mặt đất. Mô hình hiện tại chưa xét đầy đủ động lực học bánh xe, hiện tượng trượt, yaw, roll, độ rơ hộp số, ma sát, trễ cảm biến và dao động mặt đường. Vì vậy, cần bổ sung các thông số thực, phân tích độ nhạy và thử nghiệm phần cứng trước khi sử dụng mô hình cho các quyết định thiết kế.

7. Kết luận

Bản thảo xây dựng mô hình phi tuyến và chiến lược điều khiển lai cho robot hai bánh tích hợp Paired

Hình 3. Bão hòa gimbal dưới mômen bậc thang 5 Nm



CMG, trong đó mômen được phân chia theo dải tần và bánh xe hỗ trợ tái định tâm gimbal. Kết quả từ phần mềm v1.3 cho thấy CMG có thể khử nhiễu hữu hạn nhưng không duy trì cân bằng sau khi gimbal bão hòa, qua đó xác nhận sự cần thiết của kênh bánh xe. Nghiên cứu tiếp theo sẽ xác định thông số hệ truyền động, hiện thực hóa các phương trình (3.6)-(4.7), chạy bộ thử S0-S5 và kiểm chứng mô hình trên nguyên mẫu ■

Cảm ơn Trường Đại học Bách khoa - Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh về không gian Phòng Thí nghiệm thuộc Khoa Khoa học ứng dụng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO:

- Bedrossian, N. S., Paradiso, J., Bergmann, E. V., & Rowell, D. (1990). Steering law design for redundant single-gimbal control moment gyroscopes. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 13(6), 1083-1089. <https://doi.org/10.2514/3.20582>
- Ghaffari, A., Shariati, A., & Shamekhi, A. H. (2016). A modified dynamical formulation for two-wheeled self-balancing robots. *Nonlinear Dynamics*, 83(1-2), 217-230.
- Grasser, F., D'Arrigo, A., Colombi, S., & Rufer, A. C. (2002). JOE: A mobile, inverted pendulum. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49(1), 107-114.
- Kurokawa, H. (2007). Survey of theory and steering laws of single-gimbal control moment gyros. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 30(5), 1331-1340.
- Pathak, K., Franch, J., & Agrawal, S. K. (2005). Velocity and position control of a wheeled inverted pendulum by partial feedback linearization. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(3), 505-513. <https://doi.org/10.1109/TRO.2004.840905>
- Winder, S. W. (1978). Steering laws for double-gimbal control moment gyros. In *Fourth Inter-Center Control Systems Conference (NASA CP-007, pp. 157-173)*. National Aeronautics and Space Administration.