

Điều khiển trượt trong vấn đề bám quỹ đạo của hệ thống con lắc ngược quay

Sliding control in trajectory tracking for rotary inverted pendulum

Trần Minh Đức^{1*}, Võ Minh Tài^{1,2}, Lương Trung Nam³, Nguyễn Hăng Ri³,
Nguyễn Trần Nhất Phi³, Trần Minh Duy³, Nguyễn Hữu Hải Sơn³, Phạm Đức Lương³,
Trịnh Xuân Nam³, Võ Đoàn Chuẩn³

¹Trường Đại học Bách Khoa (HCMUT), Đại học Quốc gia TPHCM (VNU-HCMC)

²Đại học RMIT Việt Nam (RMIT University Vietnam)

³Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TPHCM (HCMUTE)

*tmduc.sdh222@hcmut.edu.vn

Ngày nhận bài:

28/7/2023

Ngày chấp nhận đăng:

20/9/2023

Keywords: Rotary
Inverted Pendulum,
Trajectory tracking
control, Sliding mode
control, Genetic
Algorithm, SMC

ABSTRACT

The problem of tracing the trajectory for underactuated robot systems is of great interest and in research by many researchers. Therefore, the problem of trajectory tracking for the rotary inverted pendulum (RIP) system is focused on in this study. This study proposes to design a sliding mode controller (SMC) to solve the trajectory tracking problem for the RIP system. Lyapunov stability theory is used to prove the stability of this controller. Besides, the systematic parameters of RIP are identified by genetic algorithm (GA) before designing the controller to ensure that no system parameters are randomly selected. This study is carried out by simulation on Matlab/Simulink software and experimented with system parameters recognized by GA. Through simulation results and experiments on the real model, it shows the ability to track the trajectory by the SMC algorithm with the parameters identified by the GA method.

TÓM TẮT

Bài toán bám quỹ đạo đặt cho các hệ cánh tay robot thiếu dẫn động được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm và tìm hiểu. Vì vậy, vấn đề bám quỹ đạo đặt cho hệ thống con lắc ngược quay (RIP) được tập trung nghiên cứu trong bài nghiên cứu này. Nhóm tác giả đề xuất thiết kế bộ điều khiển (BĐK) trượt (sliding mode control - SMC) để giải quyết bài toán bám quỹ đạo đặt cho RIP. Lý thuyết ổn định Lyapunov được sử dụng để chứng minh độ ổn định của BĐK này. Bên cạnh đó, các thông số hệ thống của đối tượng RIP được nhận dạng bằng giải thuật di truyền (GA) trước khi thiết kế BĐK nhằm đảm bảo không có thông số hệ thống nào là lựa chọn ngẫu nhiên. Nghiên cứu này được thực hiện bằng mô phỏng trên phần mềm Matlab/Simulink và thực nghiệm với các thông số hệ thống được nhận dạng bằng GA. Thông qua kết quả mô phỏng và thí nghiệm trên mô hình thực cho thấy khả năng bám quỹ đạo bằng giải thuật SMC với các thông số được nhận dạng bằng phương pháp.

Từ khóa: Con lắc
ngược quay, Điều
khiển bám quỹ đạo,
Điều khiển trượt, giải
thuật di truyền, SMC

1. Giới thiệu

Bài toán bám quỹ đạo hay theo dõi quỹ đạo cho các hệ thống robot thiếu dẫn động được nhiều nhà nghiên cứu kiểm nghiệm với các BDK khác nhau. Mục tiêu nghiên cứu này vẫn tiếp tục phát triển. S. Heshmati-Alamdari và cộng sự (2001) đã nghiên cứu BDK bám bền vững có tên là điều khiển dự báo (model predictive control) hệ thống robot tự hành dưới nước. Nghiên cứu được thực hiện trên mô phỏng, quỹ đạo mà nhóm tác giả đề xuất có hình dạng bất kì, robot được thiết lập không đi qua các vùng an toàn được thiết kế sẵn. S. Q. Liu và cộng sự (2020) đề xuất xây dựng BDK thích nghi trượt backstepping điều khiển bám quỹ đạo cho hệ thống khinh khí cầu (underactuated airships). BDK được thực hiện trên mô phỏng với quỹ đạo cần theo dõi được thiết lập bất kì. Kết quả điều khiển cho thấy hệ thống khinh khí cầu với BDK đề xuất bám tốt quỹ đạo mong muốn. Ngoài ra, tác giả còn so sánh với BDK PID và Azinheira's BS. Kết quả cho thấy BDK thích nghi trượt backstepping bám tốt hơn hai bộ còn lại. Bên cạnh đó, nhiều phương pháp điều khiển bám được nghiên cứu chẳng hạn như backstepping (Z. Liu, 2019, trang 834-840), mạng thần kinh nhân tạo thích nghi (J. Zhang và cộng sự, 2020, trang 108193) thích nghi backstepping (N. T. Binh và cộng sự, 2019, trang 465-473) mờ trượt backstepping (Z. Yan và cộng sự, 2019, trang 166788-166795) PID trượt (A. K. Vo và cộng sự, 2020) điều khiển trượt bám (G. B. H và cộng sự, 2020) mờ - PID (Fuzzy PID) (M. -T. Le và cộng sự, 2022, trang 1-10) tối ưu thông số BDK PID ứng dụng GA (GA-PID) (M. -T. Le và cộng sự, 2022, trang 1-10), phương pháp điều khiển bám radial basis function (RBF) neural network - based adaptive sliding mode control (SMC) (T.T. Pham và cộng sự) giải thuật điều khiển bám quỹ đạo PID trượt thích nghi dựa trên chế độ Quasi-sliding mới và radial basis function neural network (Thanh Tung Pham & Chi-Ngon Nguyen, 2023, trang 121-134) v.v.

Giải thuật di truyền (GA) được ứng dụng

phổ biến để tối ưu thông số bộ điều khiển, nhận dạng mô hình hệ thống. Một số nghiên cứu có thể kể đến ứng dụng thành công GA trong việc tối ưu thông số bộ điều khiển, chẳng hạn như tối ưu thông số các bộ điều khiển PID, LQR (M.-T. Le và cộng sự, 2022, trang 57-65), (Hoang Chinh Tran và cộng sự, 2018, trang 31-36), nhận dạng thông số hệ thống (Nguyen Van Dong Hai và cộng sự, 2015, trang 12-17), (K. Kampisios và cộng sự, 2008, trang 887-892). Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả chỉ tập trung ứng dụng GA để nhận dạng thông số hệ thống thực tế trong Hình 6 chứ không dùng GA để tối ưu các thông số của BDK SMC.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi tập trung nghiên cứu về BDK trượt cho RIP. Quá trình điều khiển bao gồm hai tác vụ chính: Tác vụ thứ nhất điều khiển cân bằng tại vị trí thẳng đứng hướng lên tại vị trí góc con lắc, trong khi đó cánh tay bám theo quỹ đạo đề xuất. Trong nghiên cứu này, quỹ đạo sóng sin và xung vuông được chọn lựa để làm quỹ đạo bám. Điều khiển trượt được nghiên cứu và kiểm nghiệm trên mô phỏng và thực nghiệm. Một số điểm mạnh của SMC là tính bền vững (robust) chống lại các thay đổi của tham số mô hình và nhiễu bên ngoài, đáp ứng nhanh hội tụ và cách triển khai BDK lên mô hình dễ dàng (Sondarangallage D.A. Sanjeeva & Manukid Parnichkun, 2022, trang 89-101). Tuy nhiên, khuyết điểm của BDK này là gây ra hiện tượng chattering, tức là khi hệ thống hoạt động lâu, động cơ sẽ rất nóng, khi hoạt động lâu dài có thể làm tổn hại mô hình.

Đóng góp chính của bài báo này bao gồm:

- Điều khiển bám quỹ đạo cho hệ thống RIP bằng phương pháp trượt (SMC) trên mô phỏng và thực nghiệm.
- Ứng dụng GA để nhận dạng các thông số hệ thống thực tế ở Hình 6 trước khi triển khai BDK SMC.

Cấu trúc bài báo này bao gồm: Phần 1 giới thiệu về các công trình nghiên cứu của một số nhóm tác giả trên thế giới. Ngoài ra, phần này

cũng trình bày về mục tiêu điều khiển và các đóng góp của bài báo. Phần 2, mô hình toán của hệ RIP được đề cập. Trong phần 3 của bài viết, nhóm sẽ thiết kế BDK trượt bám. Phần 4 giới thiệu về phần cứng mà nhóm tác giả xây dựng để làm thí nghiệm. Phần 5 đưa ra các kết

quả cho hệ RIP được trình bày. Phần 6 là phần kết luận cho toàn bài viết và hướng phát triển cho đối tượng nghiên cứu này.

2. Khái quát về hệ RIP

2.1. Mô hình toán học hệ RIP

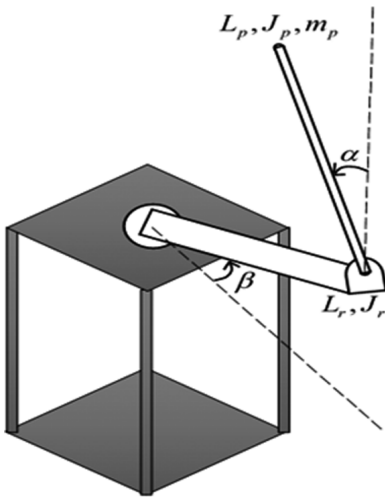
Hình 1 trình bày về hệ RIP trong không gian 3D. Phương trình động lực học hệ RIP là:

$$\begin{pmatrix} m_p L_r^2 + \frac{1}{4} m_p L_p^2 + \\ -\frac{1}{4} m_p L_p^2 \cos^2 \alpha + J_r \end{pmatrix} \ddot{\beta} - \frac{1}{2} m_p L_p L_r \cos \alpha \ddot{\alpha} + \frac{1}{2} m_p L_p^2 \sin \alpha \cos \alpha \dot{\beta} \dot{\alpha} + \frac{1}{2} m_p L_p L_r \sin \alpha \dot{\alpha}^2 = \tau - B_r \dot{\beta} \quad (1)$$

$$-\frac{1}{2} m_p L_p L_r \cos \alpha \dot{\beta} + \left(J_p + \frac{1}{4} m_p L_p^2 \right) \ddot{\alpha} - \frac{1}{4} m_p L_p^2 \cos \alpha \sin \alpha \dot{\beta}^2 - \frac{1}{2} m_p L_p g \sin \alpha = -B_p \dot{\alpha} \quad (2)$$

Trong đó α là góc của thanh con lắc, β là góc cánh tay, $\tau = [\tau_m \quad 0]^T$ là vector moment.

Hình 1. Mô hình hệ RIP



Bảng 1. Đại lượng hệ RIP

Đại lượng và ý nghĩa	Đơn vị
m_p : Trọng lượng thanh con lắc	kg
L_p : Chiều dài thanh con lắc	m
l_p : Khoảng cách từ trục encoder đến tâm thanh con lắc	rad
L_r : Moment quán tính của thanh con lắc	kgm ²
L_r : Chiều dài thanh cánh tay	rad
l_r : Khoảng cách từ trục động cơ đến trọng tâm thanh cánh tay	m
B_r : Hệ số ma sát cánh tay	kgm ²
B_p : Hệ số ma sát con lắc	kgm ²
g : Moment xoắn động cơ	Nm
g : Gia tốc trọng trường	m/s ²

2.2. Mô hình động cơ DC

Mối quan hệ giữa moment động cơ servo DC và điện áp theo công thức (3):

$$\tau = -k_3 \ddot{\beta} - k_2 \dot{\beta} + k_1 e \quad (3)$$

Trong đó

$$k_1 = \frac{K_t}{R_m}; k_2 = C_m + \frac{K_t}{R_m} K_b; k_3 = J_m \quad (4)$$

Thông số động cơ trong Bảng 2.

Bảng 2. Thông số động cơ

Đại lượng	Đơn vị
K_b	V / (rad / sec)
K_t	V / (rad / sec)
R_m	Ω
J_m	kg.m ²
C_m	N.m / (rad / sec)

Trong đó K_t hằng số moment, K_b hằng số phản điện, R_m điện trở động cơ, C_m hệ số ma sát nhớt, J_m moment quán tính của rotor động cơ DC.

2.3. Hệ phương trình phi tuyến của hệ thống

Ta được phương trình động học của hệ

RIP với ngõ vào là điện áp α , ngõ ra là góc α và β dạng ma trận như phương trình (5):

$$D(\alpha, \beta) \begin{bmatrix} \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \end{bmatrix} + C(\alpha, \dot{\alpha}, \beta, \dot{\beta}) \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} + G(\alpha, \beta) = v \quad (5)$$

Trong đó:

$$D(\alpha, \beta) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} m_p L_p L_r \cos(\alpha) & m_p L_r^2 + \frac{1}{4} m_p L_p^2 - \frac{1}{4} m_p L_p^2 \cos(\alpha)^2 + J_r + k_3 \\ \left(J_p + \frac{1}{4} m_p L_p^2 \right) & -\frac{1}{2} m_p L_p L_r \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C(\alpha, \dot{\alpha}, \beta, \dot{\beta}) = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{2} m_p L_p L_r \sin(\alpha) \right) \dot{\alpha} & \left(\frac{1}{2} m_p L_p^2 \sin(\alpha) \cos(\alpha) \right) \dot{\alpha} + B_r + k_2 \\ B_p & -\frac{1}{4} m_p L_p^2 \cos(\alpha) \sin(\alpha) \dot{\beta}^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$G(\alpha, \beta) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{2} m_p L_p g \sin(\alpha) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$v = [k_1 e \quad 0]^T \quad (9)$$

Đặt biến trạng thái:

$$x_1 = \alpha; x_2 = \dot{\alpha}; x_3 = \beta; x_4 = \dot{\beta} \quad (10)$$

Hệ phương trình trạng thái của hệ có dạng như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_1(x) + g_1(x)e \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f_2(x) + g_2(x)e \end{cases} \quad (11)$$

Các hàm $f_1(x)$, $g_1(x)$, $f_2(x)$, $g_2(x)$ được trình bày trong Phụ lục của bài báo này.

2.4. Nhận dạng các thông số hệ thống

Trong phần này, GA được ứng dụng để nhận thông số hệ RIP trong Hình 6. Việc nhận dạng thông số trước khi triển khai BDK là rất quan trọng vì có một số thông số như ma sát, khoảng cách trọng tâm rất khó xác định. Khi nhận dạng hoàn tất, việc điều khiển trở nên đáng tin cậy. Phương pháp nhận dạng được dựa trên pseudo-code trong tài liệu (Nguyen Van Dong Hai và cộng sự, 2015, trang 12-17), (Trung-Kien Tran và cộng sự, 2022, trang 28-36). Thông số hệ thống sau khi dùng GA được cung cấp trong Bảng 3. Bộ thông số này cũng

được dùng để thực hiện mô phỏng hệ thống RIP với BDK trượt bám.

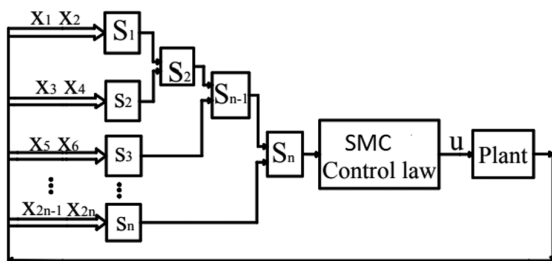
Bảng 3. Thông số hệ thống sau khi nhận dạng bằng GA

Đại lượng	Giá trị
m_p	0.15 kg
l_p	0.11 m
J_p	8e-05 kgm ²
l_r	0.23 m
B_r	0.3 kgm ²
B_p	6,6e-04 kgm ²
K_b	0.09 V / (rad / sec)
K_t	0.09 V / (rad / sec)
R_m	8 Ω
J_m	4e-5 kg.m ²
C_m	0.000048 N.m / (rad / sec)

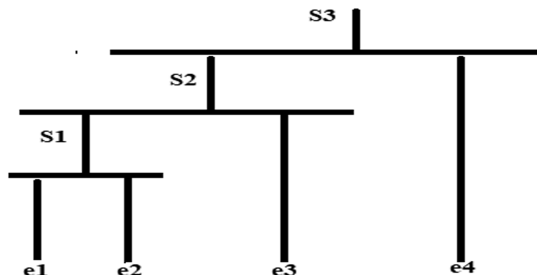
2.5. BDK trượt bám

Các mặt trượt được định nghĩa như Hình 2

Hình 2. Cấu trúc điều khiển trượt cho RIP Waijung 1 (STM32 target).



Hình 3. Cấu trúc của các mặt trượt Waijung 1 (STM32 target).



Điều khiển trượt bám quỹ đạo hệ RIP, ta cần đặt ra các giá trị đặt cho các biến trạng thái của hệ thống như sau:

$$X_d = [x_{1d} \quad x_{2d} \quad x_{3d} \quad x_{4d}]^T \quad (12)$$

Sai số giữa trạng thái thực và trạng thái mẫu của hệ là: $e_i = x_i - x_{id}$ với $(i = 1, 2, 3)$.

Dựa vào Hình 3, các mặt trượt sẽ lần lượt được đặt như (11). Trong đó c_1, c_2, c_3, c_4 là tham số cần tìm kiểm thỏa tiêu chuẩn Hurwitz.

$$s_1 = c_1 e_1 + c_2 e_2; \quad s_2 = s_1 + c_3 e_3; \quad s_3 = s_2 + c_4 e_4 \quad (13)$$

Đạo hàm các mặt trượt theo thời gian t:

$$\dot{s}_1 = c_1 \dot{e}_1 + c_2 \dot{e}_2 = c_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_{1d}) + c_2 [f_1(x) + g_1(x)u_1 - \dot{x}_{2d}] \quad (14)$$

$$\dot{s}_2 = \dot{s}_1 + c_3 \dot{e}_3 = c_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_{1d}) + c_2 [f_1(x) + g_1(x)u_2 - \dot{x}_{2d}] + c_3 (x_4 - \dot{x}_{3d}) \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \dot{s}_3 = \dot{s}_2 + c_4 \dot{e}_4 = c_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_{1d}) + c_2 [f_1(x) + g_1(x)u_3 - \dot{x}_{2d}] + \\ + c_3 (x_4 - \dot{x}_{3d}) + c_4 [f_2(x) + g_2(x)u_3 - \dot{x}_{4d}] \end{aligned} \quad (16)$$

Mục tiêu điều khiển thanh cánh tay bám quỹ đạo đặt trong khi giữ cho con lắc luôn ở vị trí cân bằng $x_{1d} = x_{2d} = \dot{x}_{1d} = 0$

Điện áp điều khiển cho từng mặt trượt:

$$u_i = u_{eq(i)} + u_{sw(i)} \quad (17)$$

Với $(i = 1, 2, 3)$, $u_{eq(i)}$ là điện áp giữ các trạng thái trên mặt trượt tương ứng, $u_{sw(i)}$ là điện áp kéo các trạng thái về mặt trượt tương ứng.

Cho $\dot{s}_i = 0$, ta được các phương trình (18), (19) và (20) như sau:

$$u_{eq1} = \frac{-(c_1 x_2 + c_2 f_1(x))}{c_2 g_1(x)} \quad (18)$$

$$u_{eq2} = \frac{-(c_1 (x_2 - \dot{x}_{1d}) + c_2 f_1(x) + c_3 (x_4 - x_{4d}))}{c_2 g_1(x)} \quad (19)$$

$$u_{eq3} = \frac{-(c_1 x_2 + c_2 f_1(x) + c_3 (x_4 - x_{4d}) + c_4 (f_2(x) - \dot{x}_{4d}))}{c_2 g_1(x) + c_4 g_2(x)} \quad (20)$$

Tín hiệu điều khiển được tìm theo nguyên lý ổn định Lyapunov. Định nghĩa hàm Lyapunov được chọn sẽ liên quan đến mặt trượt s_3 :

$$V = \frac{1}{2} s_3^2 \quad (21)$$

Đạo hàm V theo thời gian t, ta được:

$$\dot{V} = s_3 \dot{s}_3 \quad (22)$$

Với thành phần đạo hàm được trình bày trong phương trình (23)

$$\begin{aligned}
 \dot{s}_3 &= c_1 \dot{e}_1 + c_2 \dot{e}_2 + c_3 \dot{e}_3 + c_4 \dot{e}_4 \\
 &= c_1 x_2 + c_2 \left(f_1(x) + g_1(x)(u_{sw3} + u_{eq3}) \right) \\
 &\quad + c_3 (x_4 - x_{4d}) + c_4 \left(\left(f_2(x) + g_2(x)(u_{sw3} + u_{eq3}) \right) - \dot{x}_{4d} \right) \\
 &= c_1 (x_2 - \dot{x}_{1d}) + c_2 f_1(x) + c_3 (x_4 - x_{4d}) + c_4 (f_2(x) - \dot{x}_{4d}) \\
 &\quad + (c_2 g_1(x) + c_4 g_2(x)) u_{eq3} + (c_2 g_1(x) + c_4 g_2(x)) u_{sw3}
 \end{aligned} \tag{23}$$

Thay thế trong (20) vào (23), ta được

$$\dot{s}_3 = (c_2 g_1(x) + c_4 g_2(x)) u_{sw3} \tag{24}$$

Theo nguyên lý ổn định của Lyapunov, do V là hàm xác định dương, nên \dot{V} bắt buộc phải là hàm xác định âm để thỏa điều kiện ổn định của tiêu chuẩn.

Do đó, ta đặt:

$$\dot{s}_3 = -ks_3 - \eta \text{sign}(s_3) \tag{25}$$

Với k, η là những hằng số dương

Kết quả thu được:

$$\dot{V}(t) = s_3 (-ks_3 - \eta \text{sign}(s_3)) = -ks_3^2 - \eta |s_3| \leq 0 \tag{26}$$

thỏa mãn nguyên lý ổn định của Lyapunov.

Khi ấy, ta có:

$$u_{sw3} = \frac{-ks_3 - \eta \text{sign}(s_3)}{c_2 g_1(x) + c_4 g_2(x)} \tag{27}$$

Có thể thấy, $u_3 = u_{eq3} + u_{sw3}$ đảm bảo cho mặt trượt s_3 tiến về không và ổn định khi $t \rightarrow \infty$. Khi ấy các mặt trượt s_2 và s_1 cũng tiến về không và ổn định. Các sai số quỹ đạo e_i ($i = 1L 4$) sẽ tiến về không.

Như vậy, tín hiệu điều khiển bằng BDK trượt là phương trình (28) có dạng sau:

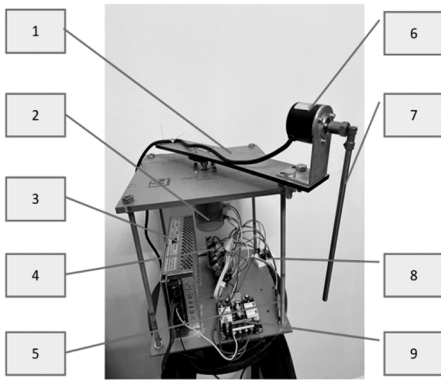
$$u = u_3 = u_{eq3} + u_{sw3} \tag{28}$$

Với u_{sw3} và u_{eq3} được tính ở (20) và (28).

2.6. Hệ thống thực nghiệm

Bộ thư viện Waijung phiên bản 1 (waijung blockset library version 1) được nhóm tác giả sử dụng để điều khiển hệ thống thực Hình 4. Hướng dẫn cách tích hợp thư viện Waijung vào Matlab/Simulink được thực hiện bởi Tiến sỹ Trần Đức Thiện (Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TPHCM) tại địa chỉ https://www.youtube.com/watch?v=aEh1S_XN87w. Khi thực hiện thí nghiệm, chúng ta cần lưu ý rằng bộ thư viện này chỉ hỗ trợ Matlab từ phiên bản R2009a đến R2018a (Waijung).

Hình 4. Hệ thống thực nghiệm RIP



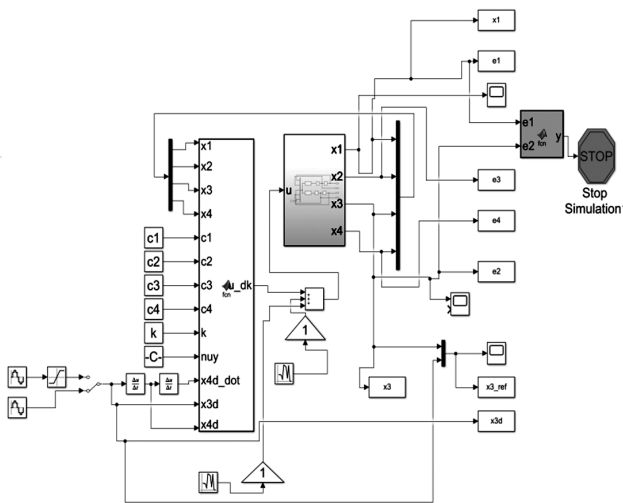
Thành phần trong Hình 4:
 Thanh cánh tay
 Động cơ Nisca NF5475 với encoder 200 ppr
 Nguồn xung
 Kit STM32F407 Discovery
 CP2102
 Cảm biến encoder thành con lắc
 Thanh con lắc
 Điện trở kéo lên
 Mạch điều khiển động cơ IR2184

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kết quả mô phỏng

Trong phần này, kết quả mô phỏng điều khiển bám quỹ đạo cho trước bằng giải thuật trượt bám được trình bày. Thông số BDK trượt bám được lựa chọn bằng phương pháp thử sai

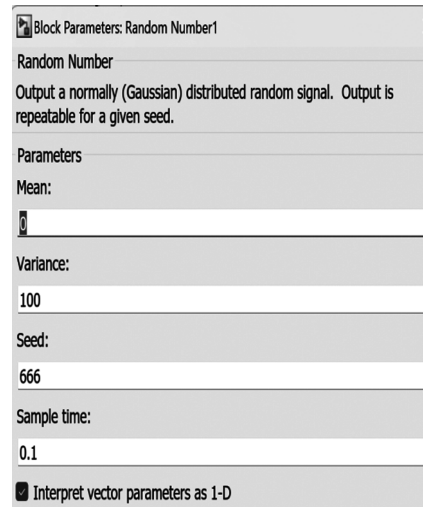
Hình 5. Chương trình mô phỏng điều khiển hệ RIP bám quỹ đạo bằng giải thuật trượt



bao gồm: $c_1 = 4,8$; $c_2 = 7,14$; $c_3 = -4,37$; $c_4 = -1.2$; $k = 90$; $\eta = 0.3$

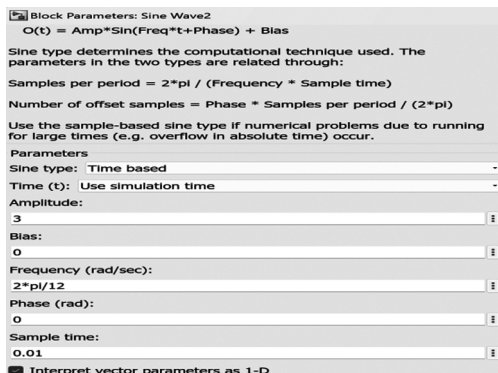
Bên cạnh đó, nhiều ngõ vào cũng được thiết lập như Hình 6 để làm tăng độ tin cậy của BDK khi có nhiễu tác động.

Hình 6. Thiết lập giá trị của nhiễu ngõ vào trên chương trình mô phỏng

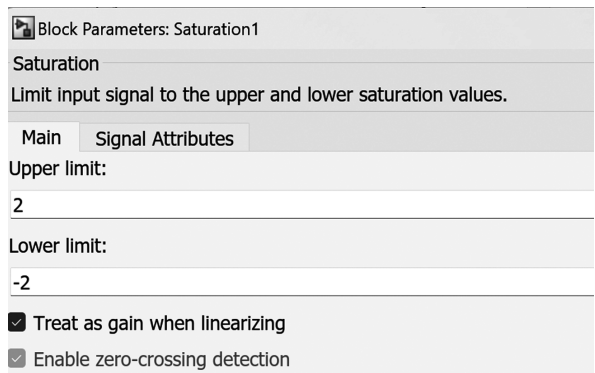


Trường hợp 1: Bám quỹ đạo xung

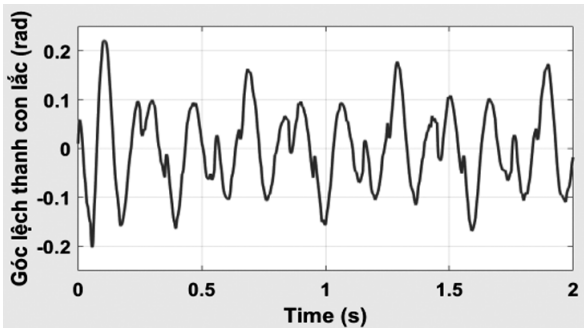
Hình 7. Thiết lập quỹ đạo sin trên phần mềm Matlab/Simulink



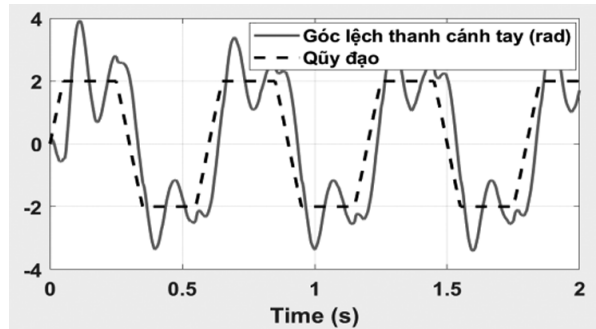
Hình 8. Khởi xén sóng sin để tạo quỹ đạo xung



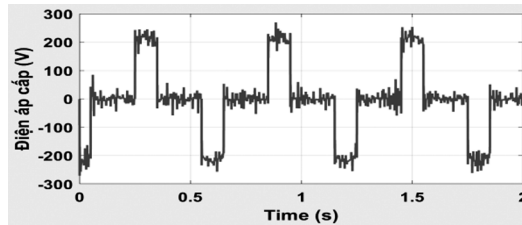
Hình 9. Kết quả mô phỏng đáp ứng con lắc cân bằng khi cánh tay bám quỹ đạo xung



Hình 10. Kết quả mô phỏng đáp ứng thanh cánh tay bám quỹ đạo xung

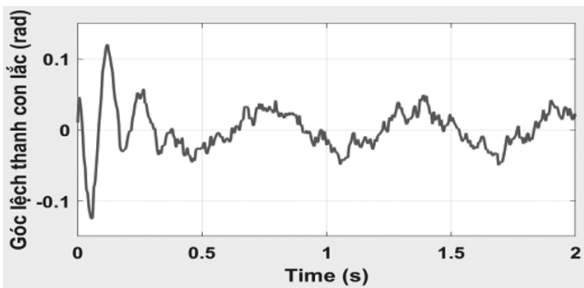


Hình 11. Điện áp cấp

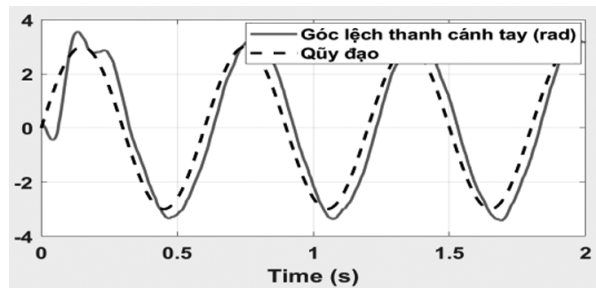


Trường hợp 2: Bám quỹ đạo hình sin

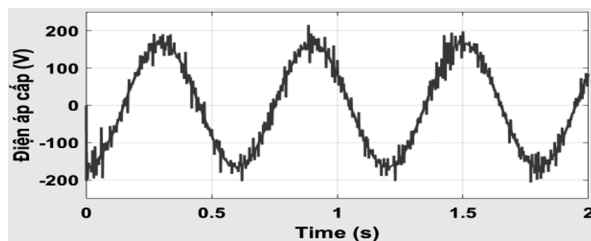
Hình 12. Kết quả mô phỏng đáp ứng con lắc cân bằng khi cánh tay bám quỹ đạo sóng sin



Hình 13. Kết quả mô phỏng đáp ứng thanh cánh tay bám quỹ đạo sóng sin



Hình 14. Điện áp cấp



3.2. Nhận xét kết quả mô phỏng

Phần 3.1 đã trình bày các kết quả từ Hình 9 đến Hình 14. Kết quả mô phỏng trong trường hợp 1 cho thấy rằng khi thanh cánh tay bám quỹ đạo xung thì thanh con lắc vẫn hoạt động cân bằng. Biên độ lớn nhất của thanh con lắc là $[-0,2; 0,2]$ rad. Nhìn kỹ Hình 10, kết quả bám của thanh cánh tay chưa thực sự tốt do sự thay đổi quỹ đạo quá đột ngột, tuy nhiên thanh cánh tay vẫn bám theo quỹ đạo đặt. Ngoài ra, điện áp cấp trong quá trình hệ thống hoạt động

cũng được cung cấp trong Hình 11. Đối với trường hợp 2, góc cánh tay Hình 13 bám theo quỹ đạo đặt hình sin nhưng vẫn còn lệch so với quỹ đạo mong muốn. Hình 12 cho ta thấy rằng trong quá trình thanh cánh tay bám theo quỹ đạo đặt thì thanh con lắc hoạt động ổn định. Biên độ dao động lớn nhất của thanh con lắc là $[-0,15; 0,15]$ rad. Điện áp cấp trong quá trình hệ thống hoạt động cũng được cung cấp trong Hình 11.

Thông qua hai trường hợp, ta thấy rằng

điều khiển bám cho hệ RIP bằng BDK trượt bám cho kết quả bám tốt, con lắc cân bằng hướng lên và BDK có tính bền vững cao, khừ được nhiễu từ môi trường.

3.3. Kết quả thực nghiệm

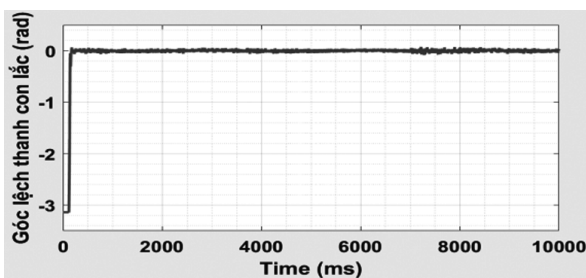
Trong phần này, kết quả thực nghiệm điều khiển bám quỹ đạo cho trước bằng giải thuật trượt bám được trình bày. Thông số BDK trượt bám được lựa chọn theo phương pháp thử sai bao gồm:

$$c_1 = 0,23; c_2 = -12; c_3 = 4,2; c_4 = 2,3; k = 0; \eta = -17$$

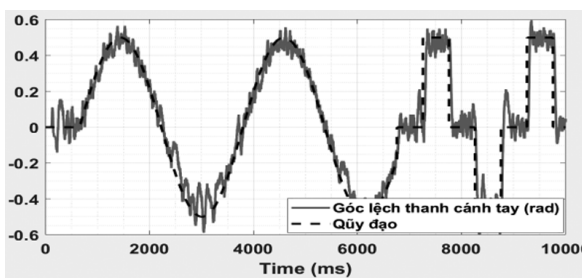
Quỹ đạo đề xuất trong phần thực nghiệm này bao gồm sóng sin và xung vuông.

sin có biên là ± 0.5 rad, xung vuông có biên độ là ± 0.5 rad. Chương trình điều khiển hệ thống RIP thực nghiệm được lập trình trên Matlab/Simulink bằng bộ thư viện Waijung phiên bản 1 được trình bày trong Hình 18. Tác giả đã quan sát động cơ và nhận thấy rằng động cơ nóng dần theo thời gian do tác động của hiện tượng chattering. Chính vì thế, tham số η cần được quan tâm lựa chọn để giảm thiểu tối đa hiện tượng này. Tham số η nếu tiếp tục giảm (so với -17) thì động cơ sẽ nhanh chóng bị nóng hơn đối với hệ thống RIP mà nhóm tác giả xây dựng. Hình 15-17 là kết quả triển khai BDK SMC lên phần cứng Hình 4.

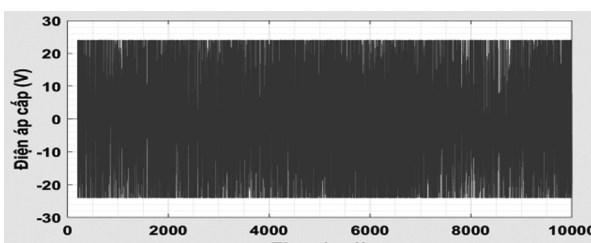
Hình 15. Kết quả thực nghiệm con lắc cân bằng khi thanh cánh tay bám quỹ đạo



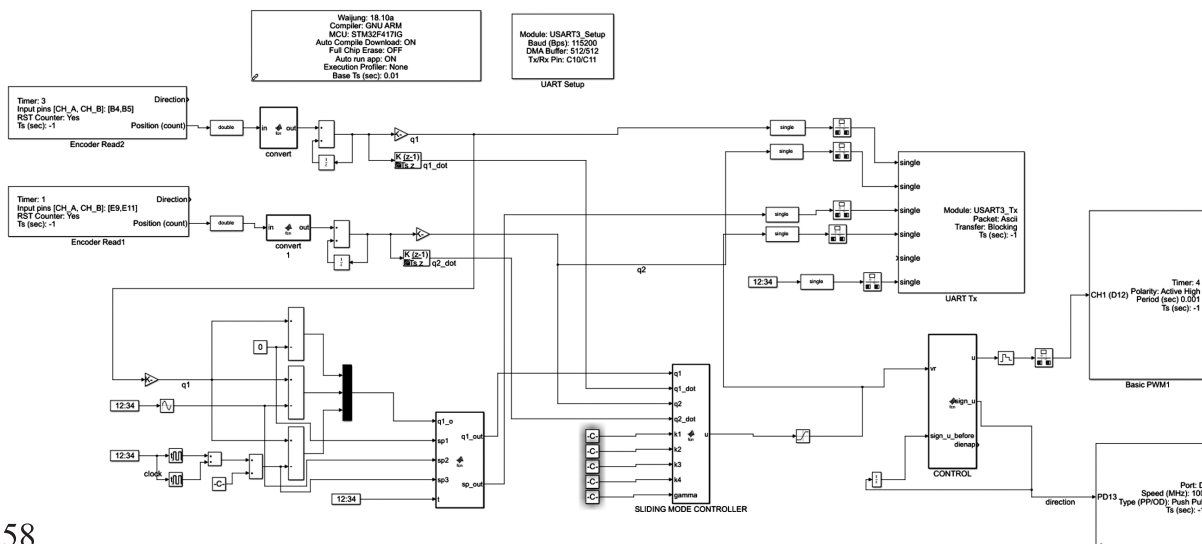
Hình 16. Kết quả thực nghiệm đáp ứng thanh cánh tay bám quỹ đạo



Hình 17. Điện áp cấp trong quá trình hoạt động



Hình 18. Chương trình điều khiển hệ thống RIP thực nghiệm được lập trình trên Matlab/Simulink bằng bộ thư viện Waijung phiên bản 1



3.4. Nhận xét kết quả thực nghiệm

Hình 15 đến Hình 17 trình bày kết quả thực nghiệm trong trường hợp sóng sin cho thấy rằng khi thanh cánh tay bám sát quỹ đạo xung thì con lắc vẫn hoạt động cân bằng quanh vị trí thẳng đứng hướng lên. Đối với trường hợp xung vuông, góc cánh tay bám sát theo quỹ đạo đặt hình xung vuông. Hình 18 cho ta thấy rằng trong quá trình thanh cánh tay bám theo quỹ đạo đặt thì thanh con lắc hoạt động ổn định quanh vị trí cân bằng. Điện áp cấp trong quá trình hệ thống hoạt động cũng được cung cấp trong Hình 17. Kết quả thực nghiệm cho thấy rằng hệ thống bám quỹ đạo đặt tốt, cánh tay hoạt động quanh vị trí cân bằng với biên độ hoạt động nhỏ trong suốt quá trình cánh tay bám theo quỹ đạo đặt.

4. Kết luận

Phương pháp điều khiển bám bằng giải

thuật trượt được triển khai thành công trên hệ RIP trong mô phỏng và thực nghiệm bằng mô hình thực. Mục tiêu thanh con lắc cân bằng trong khi cánh tay của hệ bám theo quỹ đạo đặt mong muốn được hoàn thiện và thể hiện qua các kết quả mô phỏng và thực nghiệm. Như đã nêu ở phần giới thiệu về khuyết điểm của BDK SMC và phần nhận xét kết quả thực nghiệm, hiện tượng cần được quan tâm và hạn chế khi ứng dụng SMC để điều khiển các hệ thống khác. Giải quyết khuyết điểm này cũng là hướng phát triển. Nhóm tác giả đề xuất dùng hàm saturation (sat) thay vì hàm sign hoặc logic mờ (fuzzy) khi thiết kế BDK SMC để hạn chế hiện chattering.

5. Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin gửi lời cảm ơn TS. Nguyễn Văn Đông Hải (Khoa Điện - Điện tử, Đại học SPKT TPHCM) đã hướng dẫn, góp ý để chúng tôi hoàn thành nghiên cứu này

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- A. K. Vo, H. T. Nguyen, V. D. H. Nguyen, M. T. Nguyen & T. T. H. Le, "Trajectory Tracking Pid-Sliding Mode Control for Two-Wheeled Self-Balancing Robot," in Solanki, V., Hoang, M., Lu, Z., Pattnaik, P. (eds) Intelligent Computing in Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing, Singapore, 2020.
- G. B. H. e. al., "Trajectory Tracking Sliding Mode Control for Cart and Pole System," in Solanki, V., Hoang, M., Lu, Z., Pattnaik, P. (eds) Intelligent Computing in Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing, Singapore, 2020.
- H. C. Tran, X. D. Huynh, T. T. H. Le, M. T. Nguyen, and V. Đông H. Nguyen, "Controlling real self-balancing bicycle model using genetic algorithm for optimizing LQR controller", JTE, no. 54, pp. 15–22, Sep. 2019.
- Hoang Chinh Tran, Vi Do Tran, Thi Thanh Hoang Le, Minh Tam Nguyen, Van Dong Hai Nguyen, "Genetic Algorithm Implementation for Optimizing Linear Quadratic Algorithm to Control Acrobot Robotic System," Robotica & Management, vol. 23, no. 1, pp. 31-36, 2018.
- J. Zhang, X. Xiang, Q. Zhang, W. Li, "Neural network-based adaptive trajectory tracking control of underactuated AUVs with unknown asymmetrical actuator saturation and unknown dynamics," Ocean Engineering, vol. 218, no. 15, p. 108193, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108193>.
- K. Kampsios, P. Zanchetta, C. Gerada, A. Trentin and O. Jasim, "Induction Motor parameters identification using Genetic Algorithms for varying flux levels," 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, Poznan, Poland, 2008, pp. 887-892,

doi: 10.1109/EPEPEMC.2008.4635379.

- M. -T. Le, L. H. Thuong, P. T. Tung, C. -T. Pham and C. -N. Nguyen, "Performance Evaluation of Fuzzy-PID and GA-PID Controllers on a 3-DOF Delta Robot Tracking Control," 2022 International Conference on Control, Robotics and Informatics (ICCRI), Danang, Vietnam, 2022, pp. 1-10, doi: 10.1109/ICCRI55461.2022.00008.
- M.-T. Le, H. T. Luong, T. T. Pham, C. T. Pham, and C. N. Nguyen, "Optimization of PID controller by genetic algorithm experiment on delta robot", MCA, vol. 3, no. 2, pp. 57-65, Nov. 2022.
- Nguyen Van Dong Hai, Hoang Ngoc Van, Nguyen Minh Tam, Nguyen Thi Yen Tuyet, Nguyen Phong Luu, "Identifying parameters for cart and pole system," JTE, vol. 36, pp. 12-17, 2015.
- Nguyen Van Dong Hai, Hoang Ngoc Van, Nguyen Minh Tam, Nguyen Thi Yen Tuyet, Nguyen Phong Luu, "Identifying parameters for cart and pole system," JTE, vol. 36, pp. 12-17, 2015.
- N. T. Binh, N. A. Tung, D. P. Nam & N. H. Quang, "An Adaptive Backstepping Trajectory Tracking Control of a Tractor Trailer Wheeled Mobile Robot," International Journal of Control, Automation and Systems , vol. 17, p. 465–473, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s12555-017-0711-0>.
- S. Heshmati-Alamdari, A. Nikou and D. V. Dimarogonas, "Robust Trajectory Tracking Control for Underactuated Autonomous Underwater Vehicles in Uncertain Environments," IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 18, no. 3, pp. 1288-1301, 2021, doi: 10.1109/TASE.2020.3001183.
- S. Q. Liu, Y. J. Sang, J. F. Whidborne, "Adaptive sliding-mode-backstepping trajectory tracking control of underactuated airships," Aerospace Science and Technology, vol. 97, pp. 1-13, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105610>.
- S. Inthiyaz, R. Nalli, T. Rakesh, K. Subbarao, S. H. Ahammad and V. Rajesh, "GA based PID controller: Design and Optimization," 2021 6th International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), Coimbatore, India, 2021, pp. 285-289, doi: 10.1109/ICICT50816.2021.9358640.
- Sondarangallage D.A. Sanjeewa & Manukid Parnichkun, "Control of rotary double inverted pendulum system using LQR sliding surface based sliding mode controller," Journal of Control and Decision , vol. 9, no. 1, pp. 89-101, 2022, doi: <https://doi.org/10.1080/23307706.2021.1914758>.
- T.T. Pham, M.T. Le, C.N. Nguyen, "Omnidirectional Mobile Robot Trajectory Tracking Control with Diversity of Inputs," International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, vol. 10, no. 11, pp. 639-644, 10.18178/ijmerr.10.11.639-644.
- Thanh Tung Pham, Chi-Ngon Nguyen, "Adaptive PID sliding mode control based on new Quasi-sliding mode and radial basis function neural network for Omni-directional mobile robot," AIMS Electronics and Electrical Engineering, vol. 7, no. 2, pp. 121-134, 2023, doi: 10.3934/electreng.2023007.
- Trung-Kien Tran, Minh-Tai Vo, Minh-Duc Tran, Trong-Tai Nguyen, Van-Dong-Hai Nguyen, Trung-Kien Hoang, Huu-Phat Tran, Van-Thanh Bui, "On the problem of identification system, controller design, real-time fault detection and diagnosis for water single tank system," International Journal of Robotica & Management, vol. 27, no. 1, pp. 28-36,

2022, doi: <https://doi.org/10.24193/rm.2022.1.6>.

Z. Liu, "Practical backstepping control for underactuated ship path following associated with disturbances," IET Intelligent Transport Systems, vol. 13, no. 5, pp. 834-840, 2019, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5448>.

Z. Yan, Z. Yang, J. Zhang, J. Zhou, A. Jiang and X. Du, "Trajectory Tracking Control of UUV Based on Backstepping Sliding Mode With Fuzzy Switching Gain in Diving Plane," IEEE Access, vol. 7, pp. 166788-166795, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2953530.

Hướng dẫn tích hợp thư viện Waijung blockset vào Matlab. Truy cập tại https://www.youtube.com/watch?v=aEh1S_XN87w&t=38s. Ngày truy cập ngày 02 tháng 08 năm 2023.

Waijung 1 (STM32 target). Truy cập tại <https://www.aimagin.com/en/waijung-1-stm32-target.html>. Ngày truy cập ngày 02 tháng 08 năm 2023.

PHỤ LỤC

$$f1 = -(16*Bp*Jr*x2 + 16*Bp*k3*x2 - 2*Lp^3*g*mp^2*\sin(x1) + 4*Bp*Lp^2*mp*x2 + 16*Bp*Lr^2*mp*x2 + 2*Lp^3*g*mp^2*\cos(x1)^2*\sin(x1) - 4*Bp*Lp^2*mp*x2*\cos(x1)^2 - Lp^4*mp^2*x4^3*\cos(x1)*\sin(x1) - 8*Lp*Lr^2*g*mp^2*\sin(x1) - 8*Jr*Lp*g*mp*\sin(x1) + Lp^4*mp^2*x4^3*\cos(x1)^3*\sin(x1) - 8*Lp*g*k3*mp*\sin(x1) + 4*Lp^2*Lr^2*mp^2*x2^2*\cos(x1)*\sin(x1) - 4*Lp^2*Lr^2*mp^2*x4^3*\cos(x1)*\sin(x1) + 8*Lp*Lr*k2*mp*x4*\cos(x1) - 4*Jr*Lp^2*mp*x4^3*\cos(x1)*\sin(x1) - 4*Lp^2*k3*mp*x4^3*\cos(x1)*\sin(x1) + 8*Br*Lp*Lr*mp*x4*\cos(x1) + 4*Lp^3*Lr*mp^2*x2*x4*\cos(x1)^2*\sin(x1))/(16*Jp*k3 + Lp^4*mp^2 + 16*Jp*Jr - Lp^4*mp^2*\cos(x1)^2 + 4*Lp^2*Lr^2*mp^2 + 4*Jp*Lp^2*mp + 16*Jp*Lr^2*mp + 4*Jr*Lp^2*mp + 4*Lp^2*k3*mp - 4*Lp^2*Lr^2*mp^2*\cos(x1)^2 - 4*Jp*Lp^2*mp*\cos(x1)^2)$$

$$f2 = -(16*Br*Jp*x4 + 16*Jp*k2*x4 + 4*Br*Lp^2*mp*x4 + 4*Lp^2*k2*mp*x4 + 2*Lp^3*Lr*mp^2*x2^2*\sin(x1) - 2*Lp^3*Lr*mp^2*x4^3*\cos(x1)^2*\sin(x1) - 4*Lp^2*Lr*g*mp^2*\cos(x1)*\sin(x1) + 8*Jp*Lp*Lr*mp*x2^2*\sin(x1) + 2*Lp^4*mp^2*x2*x4*\cos(x1)*\sin(x1) + 8*Bp*Lp*Lr*mp*x2*\cos(x1) + 8*Jp*Lp^2*mp*x2*x4*\cos(x1)*\sin(x1))/(16*Jp*k3 + Lp^4*mp^2 + 16*Jp*Jr - Lp^4*mp^2*\cos(x1)^2 + 4*Lp^2*Lr^2*mp^2 + 4*Jp*Lp^2*mp + 16*Jp*Lr^2*mp + 4*Jr*Lp^2*mp + 4*Lp^2*k3*mp - 4*Lp^2*Lr^2*mp^2*\cos(x1)^2 - 4*Jp*Lp^2*mp*\cos(x1)^2)$$

$$g1 = (8*Lp*Lr*k1*mp*\cos(x1))/(16*Jp*k3 + Lp^4*mp^2 + 16*Jp*Jr - Lp^4*mp^2*\cos(x1)^2 + 4*Lp^2*Lr^2*mp^2 + 4*Jp*Lp^2*mp + 16*Jp*Lr^2*mp + 4*Jr*Lp^2*mp + 4*Lp^2*k3*mp - 4*Lp^2*Lr^2*mp^2*\cos(x1)^2 - 4*Jp*Lp^2*mp*\cos(x1)^2)$$

$$g2 = (4*k1*mp*Lp^2 + 16*Jp*k1)/(16*Jp*k3 + Lp^4*mp^2 + 16*Jp*Jr - Lp^4*mp^2*\cos(x1)^2 + 4*Lp^2*Lr^2*mp^2 + 4*Jp*Lp^2*mp + 16*Jp*Lr^2*mp + 4*Jr*Lp^2*mp + 4*Lp^2*k3*mp - 4*Lp^2*Lr^2*mp^2*\cos(x1)^2 - 4*Jp*Lp^2*mp*\cos(x1)^2)$$