



Xây dựng bộ điều khiển quadrotor treo tải với chiều dài dây cáp thay đổi

Nguyễn Thị Diệu Linh¹, Trần Ngọc Đức²

¹ Phòng Khoa học Công nghệ, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

² Khoa Kỹ thuật Công nghệ, Trường Cao đẳng Kinh tế Công nghiệp Hà Nội

*Email: nguyen.linh@hau.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo ứng dụng phương pháp điều khiển trượt để tổng hợp bộ điều khiển quadrotor có treo tải với độ dài dây cáp thay đổi, bám theo các quỹ đạo bay đặt trước. Xây dựng mô hình toán học cho đối tượng điều khiển, từ đó tiến hành thiết kế bộ điều khiển trượt cho quadrotor. Kiểm chứng, đánh giá chất lượng của bộ điều khiển bằng mô phỏng, cho thấy bộ điều khiển đáp ứng tốt với các đầu vào mong muốn.

Từ khóa: *Điều khiển trượt, Không người lái, Quan sát trạng thái mở rộng, Quỹ đạo, Thiết bị bay.*

Abstract

This paper investigates the use of sliding mode control for designing a controller for a quadrotor carrying a suspended payload with a variable cable length, aiming at tracking predefined flight trajectories. A mathematical model of the system is first derived, followed by the design of a sliding mode controller for the quadrotor. Simulation results are then presented to evaluate the controller's performance, showing satisfactory tracking behavior with respect to the desired reference inputs.

Keywords: *Sliding mode control; Unmanned aerial vehicle (UAV); Extended state observer (ESO); Trajectory tracking; Aerial vehicle*

1. MỞ ĐẦU

Hiện nay, các phương tiện bay không người lái đã và đang được ứng dụng ngày càng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như quân sự, giao thông vận tải, vận chuyển hàng hoá, nông nghiệp và tìm kiếm cứu nạn. Trong đó, quadrotor là một trong những cấu hình phổ biến. Đây là loại phương tiện bay không người lái sử dụng bốn động cơ cánh quạt bố trí đối xứng, có thiết kế đơn giản, khả năng cơ động linh hoạt và hoạt động hiệu quả trong không gian hẹp. Khi được tích hợp thêm cơ cấu treo tải, quadrotor có



thể thực hiện các nhiệm vụ trong các khu vực khó tiếp cận tốt hơn so với các phương tiện vận tải truyền thống. Tuy nhiên, để điều khiển một hệ thống như vậy đặt ra nhiều thách thức về mặt kỹ thuật.

Hệ thống quadrotor có treo tải thường đối mặt với các vấn đề phức tạp như sự dao động của tải trọng, các tác động từ nhiễu bên ngoài như gió hoặc thay đổi môi trường hoạt động, cùng với sự bất định trong mô hình và sai số cảm biến. Ngoài ra, do tải được treo bằng dây nên hệ thống có thêm bậc tự do, khiến việc điều khiển trở nên phức tạp hơn. Quadrotor hoạt động trong môi trường nhiệt đới gió mùa khiến các linh kiện điện tử trong hệ thống điều khiển dễ bị xuống cấp, làm giảm độ tin cậy, hiệu quả khai thác của hệ thống. Do đó, yêu cầu đặt ra là phải xây dựng được một hệ thống điều khiển có độ tin cậy cao, khả năng thích nghi tốt và đủ bền vững để duy trì quadrotor hoạt động ổn định trong nhiều điều kiện khác nhau.

Bộ điều khiển cho quadrotor thường yêu cầu nhiều cảm biến để so sánh tín hiệu đặt và tín hiệu thực tế nhằm tạo ra tín hiệu điều khiển phù hợp. Điều này làm tăng độ phức tạp và chi phí của hệ thống. Bộ điều khiển [1] dựa trên việc lựa chọn hàm Lyapunov nhằm đảm bảo ổn định các quỹ đạo mong muốn dọc trục (X, Z) và góc nghiêng. [2] thiết kế bộ điều khiển PID và LQR để ổn định độ cao. [3] sử dụng động cơ chấp hành một chiều với bộ điều khiển thích nghi để ổn định chuyển động. Tuy nhiên, khi có nhiễu mạnh thì các bộ điều khiển trên không còn tuyến tính nữa, việc ổn định các vòng kín của hệ thống chỉ có thể đạt được đối với một vùng nhỏ xung quanh điểm cân bằng. [4] ứng dụng điều khiển logic mờ, mạng nơ ron nhằm đảm bảo các góc Euler tiến đến 0 trong quá trình chuyển động. [5] ứng dụng bộ điều khiển trượt và trượt bậc cao kết hợp với [6] để ước lượng các biến trạng thái chưa đo được và các nhiễu loạn bên ngoài như gió hoặc tiếng ồn. Tuy nhiên, các bộ điều khiển đó lại đòi hỏi khối lượng tính toán lớn và phức tạp.

Từ những đặc điểm trên, bài báo này đề xuất một phương pháp xây dựng và mô phỏng hệ thống điều khiển quadrotor có treo tải trọng với chiều dài dây cáp thay đổi, trên cơ sở ứng dụng lý thuyết điều khiển trượt. Sử dụng phương pháp điều khiển trượt giúp hệ thống duy trì ổn định trong điều kiện nhiễu và các yếu tố bất định. Cấu trúc



điều khiển này phù hợp với đặc tính của hệ thống quadrotor treo tải khi hoạt động trong môi trường thực tế.

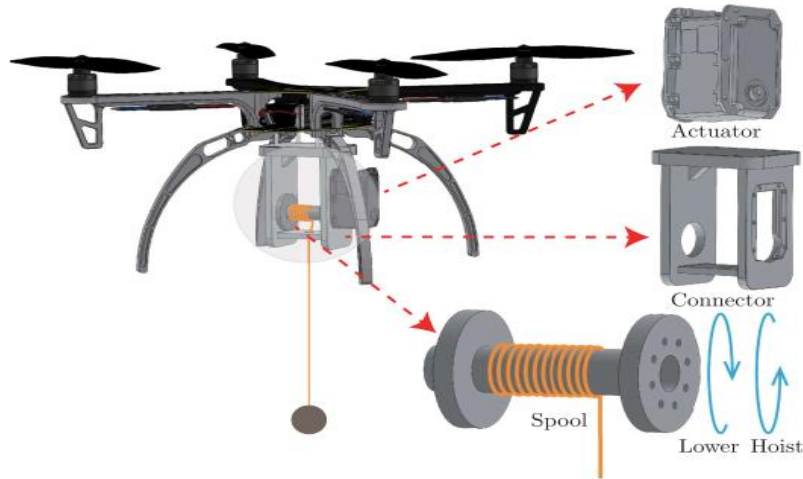
2. BỘ ĐIỀU KHIỂN QUADROTOR TREO TẢI VỚI CHIỀU DÀI DÂY CÁP THAY ĐỔI

2.1. Giả thiết treo tải trọng

Những năm gần đây, phương tiện bay không người lái đã trở thành công cụ nghiên cứu phổ biến trong lĩnh vực robot hàng không và được ứng dụng trong nhiều tình huống khác nhau. Vận chuyển treo tải bằng quadrotor là một lĩnh vực nghiên cứu và ứng dụng quan trọng. Tuy nhiên, do tải trọng luôn dao động trong quá trình vận chuyển, việc điều khiển quadrotor và tải treo trở nên phức tạp. Phần lớn các nghiên cứu về quadrotor treo tải hiện tại đang tập trung vào sử dụng dây có chiều dài cố định, việc chuyển động nâng, hạ tải chỉ được thực hiện bằng cách điều chỉnh độ cao. Tuy nhiên, trong một số tình huống cụ thể, phương pháp này tỏ ra không hiệu quả, chẳng hạn khi cần vượt qua không gian hẹp bị giới hạn về độ cao. Khi hoạt động trong các không gian này với chiều dài dây cáp cố định, quadrotor hoặc tải có nguy cơ va chạm với các chướng ngại vật. Vì vậy, để linh hoạt điều chỉnh vị trí tương đối giữa tải trọng và quadrotor thông qua kết nối bằng một cơ cấu thay đổi chiều dài dây cáp là cần thiết.

Trong bài báo này, hệ thống vận chuyển bằng quadrotor với khả năng nâng và hạ tải trọng được thiết kế bằng cách lắp đặt một cơ cấu chấp hành bên dưới quadrotor thể hiện trong hình 1. Cấu tạo của bộ nâng và hạ tải bao gồm một cuộn dây, một cơ cấu truyền động và một bộ kết nối. Cuộn dây được kết nối với cơ cấu chấp hành, truyền động qua bộ kết nối và cơ cấu truyền động có thể cung cấp mômen khác nhau để làm cuộn dây quay theo các hướng khác nhau. Cụ thể, khi cuộn dây quay theo chiều kim đồng hồ, dây cáp được thả ra, chiều dài cáp tăng lên và tải trọng được hạ xuống. Ngược lại, khi cuộn dây quay ngược chiều kim đồng hồ, dây sẽ được kéo lại, chiều dài dây giảm đi và tải trọng được nâng lên. Vì chiều dài dây có thể điều chỉnh, số lượng bậc tự do và đầu vào điều khiển của hệ thống tăng lên, trong trường hợp này hệ thống có chín bậc tự do và năm đầu vào điều khiển. Do đó, vấn đề thiết kế bộ điều khiển trở nên phức tạp hơn khi xem xét việc nâng và hạ tải trọng. Để giải quyết vấn đề này, hệ thống được chia ra hai hệ con: hệ thống con vòng trong và hệ thống con vòng ngoài.

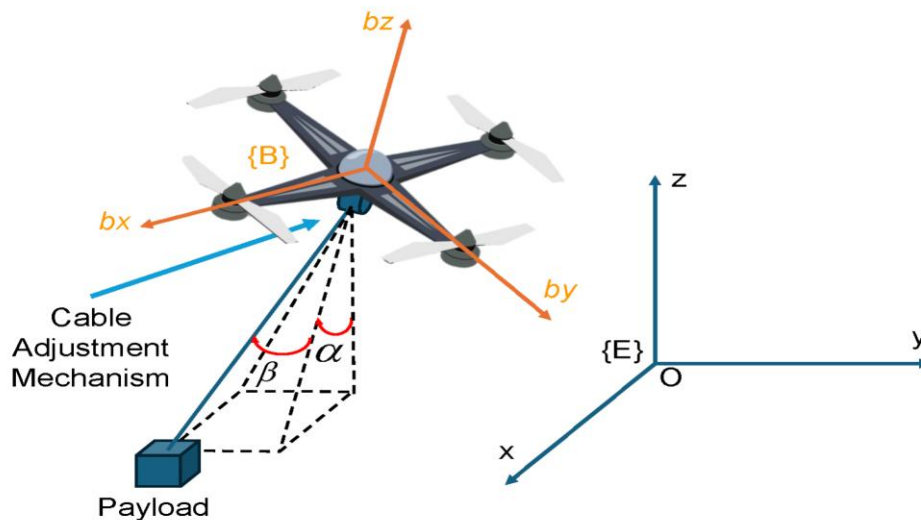
Hệ thống con vòng trong điều khiển các chuyển động quay của quadrotor, trong khi hệ thống con vòng ngoài điều khiển các chuyển động tịnh tiến và chuyển động của tải trọng treo được kết nối bởi cơ cấu chấp hành.



Hình 1. Hệ thống quadrotor treo tải với chiều dài dây cáp thay đổi.

2.2. Mô hình động học hệ thống tải treo trên quadrotor với chiều dài dây cáp không cố định

Mô hình của hệ thống treo tải trọng bằng quadrotor với một bộ truyền động để thu, thả tải trọng được minh họa trong hình 2. Trong hệ thống này, bộ truyền động được gắn cố định vào dưới của thân quadrotor và có nhiệm vụ điều chỉnh chiều dài của dây cáp giúp thu, thả tải trọng một cách linh hoạt.



Hình 2. Mô hình cơ bản của hệ thống tải treo trên quadrotor.



Mô hình động lực học của hệ thống sử dụng hai hệ quy chiếu: Hệ tọa độ quán tính $\{E\}$ là hệ tọa độ cố định trong không gian, hệ tọa độ $\{B\}$ là hệ quy chiếu gắn với thân quadrotor, di chuyển cùng với phương tiện. Tâm của hệ tọa độ gắn với thân quadrotor được đặt tại tâm khối của nó để đơn giản trong việc phân tích động lực học. Tải trọng được treo vào quadrotor thông qua một sợi dây cáp. Quadrotor có thể di chuyển theo hướng các trục tọa độ dưới tác động của bộ điều khiển. Khi chiều dài của dây cáp thay đổi, tải trọng sẽ dịch chuyển theo hướng tương ứng với sự thay đổi của dây. Các góc dao động α và β lần lượt là góc tạo bởi dây cáp với mặt phẳng $y-z$ và mặt phẳng $x-z$.

Để đơn giản hóa mô hình quadrotor treo tải, sử dụng các giả thiết giả thiết sau [3]-[4]:

Giả thiết 1: Cáp treo không đàn hồi và không có khối lượng.

Giả thiết 2: Các góc dao động α và β đều nằm trong khoảng $(-\pi/2; \pi/2)$.

Giả thiết 3: Điểm treo nằm ở trọng tâm quadrotor.

Mô hình động lực học hệ thống được tách thành hai hệ con: Hệ con vòng trong mô tả chuyển động quay của quadrotor và hệ con vòng ngoài bao gồm ba thành phần chính là chuyển động tịnh tiến của quadrotor, biến thiên chiều dài dây cáp và các góc lắc α, β của tải trọng.

Trong hệ tọa độ mặt đất, vị trí của quadrotor được xác định bởi $\xi = [x \ y \ z]^T \in R^3$. Vị trí tải trọng $\xi_l = [x_l \ y_l \ z_l]^T \in R^3$ được xác định dựa trên mối quan hệ hình học giữa quadrotor với tải trọng và được biểu diễn dưới dạng:

$$x_l = x + f_1, y_l = y + f_2, z_l = z - f_3 \quad (1)$$

Trong đó: $f_1 = L \sin \alpha \cdot \cos \beta$; $f_2 = L \sin \beta$; $f_3 = L \cos \alpha \cdot \cos \beta$, với L là độ dài dây cáp.

Đạo hàm (1) theo thời gian, ta được:

$$\begin{cases} \dot{x}_l = \dot{x} + \dot{L} S_\alpha C_\beta + L \dot{\alpha} C_\alpha C_\beta - L \dot{\beta} S_\alpha S_\beta \\ \dot{y}_l = \dot{y} + \dot{L} S_\beta + L \dot{\beta} C_\beta \\ \dot{z}_l = \dot{z} - \dot{L} C_\alpha C_\beta + L \dot{\alpha} S_\alpha C_\beta + L \dot{\beta} C_\alpha S_\beta \end{cases} \quad (2)$$



Trong đó: $S_\beta = \sin\beta$, $C_\alpha = \cos\alpha$

Tọa độ tổng quát của hệ con vòng ngoài được chọn là $\mathbf{q} = [x \ y \ z \ \alpha \ \beta \ l]^T$ và Lagrange tương ứng của hệ con này được xác định bởi [4]:

$$L_{out} = T_{out} - P \quad (3)$$

Trong đó P là thế năng của hệ thống, T_{out} bao gồm động năng của chuyển động tịnh tiến của quadrotor và dao động của tải trọng, các thành phần này được xác định như sau:

$$\begin{cases} T_{out} = \frac{1}{2} m_q \dot{\xi}^T \dot{\xi} + \frac{1}{2} m_q \dot{\xi}_l^T \dot{\xi}_l \\ P = m_q g z + m_l g z \end{cases} \quad (4)$$

Từ các công thức (2), (3), (4) thay thế vào phương trình Lagrange [3]-[5]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L_{out}}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L_{out}}{\partial q} = Q_i \quad (5)$$

Ta có phương trình động lực học của hệ con chuyển động tịnh tiến được xác định:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{m_q + m_l} (F_x + f_{rx} - m_l \ddot{f}_1) \\ \ddot{y} = \frac{1}{m_q + m_l} (F_y + f_{ry} - m_l \ddot{f}_2) \\ \ddot{z} = \frac{1}{m_q + m_l} (F_z + f_{rz} + m_l \ddot{f}_3) \\ \ddot{L} = \frac{F_L + f_{rl}}{m_l} + g C_\alpha C_\beta - \dot{x}_1 S_\alpha C_\beta - \dot{y}_1 S_\beta + \dot{z}_1 C_\alpha C_\beta + L \dot{\beta}^2 + L \dot{\alpha}^2 C_\beta^2 \\ \ddot{\alpha} = \frac{1}{L C_\beta^2} (2L \dot{\alpha} \dot{\beta} S_\beta C_\beta - \dot{x}_1 C_\alpha C_\beta - \dot{z}_1 S_\alpha C_\beta - 2L \dot{\alpha} C_\beta^2 - g S_\alpha C_\beta) \\ \ddot{\beta} = \frac{1}{L} (-g S_\beta C_\beta - \dot{y}_1 C_\beta + \dot{x}_1 S_\alpha C_\beta - \dot{z}_1 C_\alpha C_\beta - 2L \dot{\beta} - L \dot{\alpha}^2 S_\beta C_\beta) \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó: m_q, m_l - khối lượng của quadrotor và tải, F_x, F_y, F_z - các lực điều khiển hướng di chuyển của quadrotor theo các trục, F_L - lực điều khiển độ dài của dây cáp, $f_{rx}, f_{ry}, f_{rz}, f_{rl}$ - lực cản không khí tác dụng lên quadrotor và tải trọng được xác định:

$$\begin{cases} f_{rx} = -d_x \dot{x} - d_p (\dot{x} + \dot{L} S_\alpha C_\beta + L \dot{\alpha} C_\alpha C_\beta - L \dot{\beta} S_\alpha S_\beta) \\ f_{ry} = -d_y \dot{y} - d_p (\dot{y} + \dot{L} C_\beta + L \dot{\beta} C_\beta) \\ f_{rz} = -d_z \dot{z} - d_p (\dot{z} - \dot{L} C_\alpha C_\beta + L \dot{\alpha} C_\alpha S_\beta + L \dot{\beta} C_\alpha S_\beta) \\ f_{rl} = -d_l \dot{L} - d_p \dot{L} - d_p \dot{x} S_\alpha S_\beta - d_p \dot{y} S_\beta + d_p \dot{z} C_\alpha C_\beta \end{cases} \quad (7)$$



Theo giả thiết 3, do cách treo của tải trọng, động lực học quay của quadrotor không bị ảnh hưởng. Do đó, hệ con vòng bên trong vẫn giữ nguyên như trong trường hợp không có tải trọng treo.

Dựa trên mô hình động lực học của hệ thống quadrotor treo tải sử dụng cáp có độ dài thay đổi ở phương trình (3) và (4), ta thấy rằng hệ có tổng cộng 9 bậc tự do, bao gồm: ba bậc tự do vị trí của quadrotor, một bậc tự do độ dài cáp, hai bậc tự do góc dao động của tải trọng và ba bậc tự do quay của quadrotor. Để điều khiển hệ thống này chỉ có năm đầu vào điều khiển, bao gồm lực đẩy của quadrotor, ba moment lực và lực điều chỉnh độ dài cáp.

2.3. Thiết kế bộ điều khiển cho hệ thống tải treo trên quadrotor với chiều dài của dây cáp không cố định

2.3.1. Bộ điều khiển bám vị trí và hạn chế góc lắc

Nhiệm vụ chủ yếu của hệ thống điều khiển là dẫn hướng quadrotor bám theo quỹ đạo mong muốn nên các sai số bám quỹ đạo được định nghĩa như sau:

$$\begin{aligned} e_x &= x - x_d, e_y = y - y_d \\ e_z &= z - z_d, e_l = L - L_d \end{aligned} \quad (8)$$

Trong đó: L_d - chiều dài dây mong muốn; x_d, y_d và z_d lần lượt là các vị trí mong muốn của quadrotor theo các trục x, y và z.

Nếu chỉ sử dụng các biến sai số này để tạo ra lực điều khiển F_x, F_y, F_z , quadrotor chỉ có thể bám theo quỹ đạo tham chiếu mà không trực tiếp triệt tiêu được các góc lắc của tải. Do đó, cần thiết kế một sơ đồ điều khiển có khả năng điều khiển quadrotor bám theo quỹ đạo đặt trước và có khả năng đồng thời giảm thiểu dao động của tải.

Để đạt được mục tiêu trên cần bổ sung lực điều khiển kéo dây cáp F_L có tác dụng thay đổi chiều dài dây cáp và ba hàm sai số phụ trợ được đề xuất. Khi ba hàm được sử dụng làm tín hiệu phản hồi trong hệ thống điều khiển, các hàm này thiết lập mối quan hệ động học giữa vị trí, chiều dài dây và các góc lắc, có thể đồng thời thỏa mãn cả hai yêu cầu bám quỹ đạo và chống lắc. Các hàm sai số phụ trợ theo [4] được định nghĩa như sau:

$$\varepsilon_x(t) = e_x - g_1, \varepsilon_y(t) = e_y - g_2, \varepsilon_z(t) = e_z - L_d + g_3 \quad (9)$$



Khi bộ điều khiển triệt tiêu hoàn toàn góc lắc và dây cáp dài $L = L_d$, ta được $g_1 = g_2 = 0$ và $g_3 = L_d$. Điều này có nghĩa là khi bộ điều khiển sử dụng phản hồi là các hàm sai số phụ trợ thành công trong việc triệt tiêu dao động lắc, đồng thời nó cũng đảm bảo khả năng bám theo quỹ đạo định trước một cách chính xác.

Mặt trượt và hàm Lyapunov được định nghĩa như sau [8]:

$$S_x = c_1 \varepsilon_x + \dot{\varepsilon}_x; c_1 > 0; V_x = \frac{1}{2} S_x^2 \quad (10)$$

Đạo hàm cấp một của hàm Lyapunov được xác định:

$$\begin{aligned} \dot{V}_x &= S_x \dot{S}_x = S_x \cdot (c_1 \dot{\varepsilon}_x + \ddot{\varepsilon}_x) = S_x \cdot (c_1 (\dot{x} - \dot{x}_d - \dot{g}_1) + (\ddot{x} - \ddot{x}_d - \ddot{g}_1)) \\ &= S_x \left(c_1 \dot{x} - c_1 \dot{g}_1 + \frac{F_x - m_l \ddot{g}_1}{m_q + m_l} - \ddot{g}_1 - c_1 \dot{x}_d - \ddot{x}_d \right) \\ &= S_x \left(\frac{F_x}{m_q + m_l} + c_1 \dot{x} - c_1 \dot{g}_1 + \frac{m_q + 2m_l}{m_q + m_l} \ddot{g}_1 - c_1 \dot{x}_d - \ddot{x}_d \right) \end{aligned} \quad (11)$$

Từ phương trình (11), tín hiệu điều khiển trượt F_x có thể được xác định như sau:

$$F_x = (m_q + m_l) \left[-k_1 \cdot \text{sgn}(S_x) + c_1 \dot{g}_1 + \frac{m_q + 2m_l}{m_q + m_l} \ddot{g}_1 - c_1 \dot{x} + c_1 \dot{x}_d + \ddot{x}_d \right] \quad (12)$$

Thay (12) vào (11) ta có:

$$\dot{V}_x = -k_1 \cdot S_x \cdot \text{sgn}(S_x) < 0 \quad (13)$$

Bằng việc áp dụng tín hiệu điều khiển F_x được thiết kế theo phương pháp điều khiển trượt, hệ thống hoàn toàn thỏa mãn điều kiện ổn định Lyapunov.

Các tín hiệu điều khiển F_y và F_z cho vị trí theo các trục y và z có thể được xác định bằng phương pháp tương tự thông qua việc áp dụng cùng nguyên lý thiết kế mặt trượt và hàm Lyapunov tương ứng.

$$\begin{cases} F_y = (m_q + m_l) \left[-k_2 \cdot \text{sgn}(S_y) + c_2 \dot{g}_2 + \frac{m_q + 2m_l}{m_q + m_l} \ddot{g}_2 - c_2 \dot{y} + c_2 \dot{y}_d + \ddot{y}_d \right] \\ F_z = (m_q + m_l) \left[-k_3 \cdot \text{sgn}(S_z) + c_3 \dot{g}_3 + \frac{m_q + 2m_l}{m_q + m_l} \ddot{g}_3 - c_3 \dot{z} + c_3 \dot{z}_d + \ddot{z}_d \right] \end{cases} \quad (14)$$

2.3.2. Bộ điều khiển độ dài dây cáp

Theo phương pháp điều khiển trượt để đạt được mục tiêu điều khiển chính xác độ dài dây cáp trong hệ thống quadrotor mang tải treo, biến sai số chiều dài dây cáp, mặt trượt và hàm Lyapunov tương ứng được định nghĩa như sau:

$$\begin{cases} e_L = L - L_d \\ S_L = c_4 e_L + \dot{e}_L; c_4 > 0 \\ V_L = \frac{1}{2} S_L^2 \end{cases} \quad (15)$$

Trong đó: L_d - Chiều dài mong muốn của dây cáp.

Đạo hàm bậc 1 của V_L được xác định:

$$\dot{V}_L = S_L \cdot \dot{S}_L = S_L \left(c_4 \dot{L} + \frac{F_L}{m_l} + C \right) \quad (16)$$

Với $C = gC_\alpha C_\beta - \ddot{x}_1 S_\alpha C_\beta - \ddot{y}_1 S_\beta + \ddot{z}_1 C_\alpha C_\beta + L\dot{\beta}^2 + L\dot{\alpha}^2 C_\beta^2$

Theo [5] bộ điều khiển trượt được thiết kế:

$$F_L = m_l(-k_4(t) \text{sgn}(S_L) - c_4 \dot{L} - C) \quad (17)$$

Trong đó $k_4(t) = k_4 |S_L|$ và k_4 là hằng số dương.

Thay phương trình (17) vào (16) ta có:

$$\dot{V}_L = S_L(-k_4 |S_L| \text{sgn}(S_L)) = -k_4 S_L^2 < 0 \quad (18)$$

Phương trình (18) chứng minh rằng hệ thống điều khiển chiều dài dây cáp của quadrotor đạt ổn định.

2.3.3. Mô phỏng và đánh giá kết quả

Giả thiết quadrotor treo tải với độ dài dây cáp 0,25 m và khối lượng tải 0,5 kg. Vì mô hình động học góc quay không thay đổi nên trong phần này chỉ tập trung vào bám vị trí và góc dao động của tải trọng.



Quỹ đạo tham chiếu có dạng:

$$\begin{cases} x_d = 2.5 \left(1 + \operatorname{sgn} \left(\sin \frac{\pi t}{20} \right) \right) \\ y_d = 2.5 \left(1 + \operatorname{sgn} \left(\cos \frac{\pi t}{20} \right) \right) \\ z_d = 0.25t + 0.5 \end{cases} \quad (19)$$

Góc psi đặt trước $\psi_d = 0$ (rad) và vị trí ban đầu của quadrotor (0; 0; 0,5).

Tham số của quadrotor:

Khối lượng: $m = 1,776$ (kg)

Gia tốc: $g = 9,81$ (m/s²)

Hệ số lực đẩy: $k_T = 0.0087$ (N.s²)

Hệ số mô-men cản: $k_d = 55 \cdot 10^{-6}$ (N.m.s²)

Độ dài: $L = 0,225$ (m)

Mô-men quán tính trục x: $I_{xx} = 0,0035$ (kg.m²)

Mô-men quán tính trục y: $I_{yy} = 0,0035$ (kg.m²)

Mô-men quán tính trục z: $I_{zz} = 0,0055$ (kg.m²)

Mô-men quán tính của cánh quạt: $J = 2,8 \cdot 10^{-6}$ (kg.m²)

Hệ số cản: $k_{cx} = k_{cy} = k_{cz} = 5,567 \cdot 10^{-4}$ (N.s/m); $k_{d\phi} = k_{d\theta} = k_{d\psi} = 5,567 \cdot 10^{-4}$ (N.m.s²)

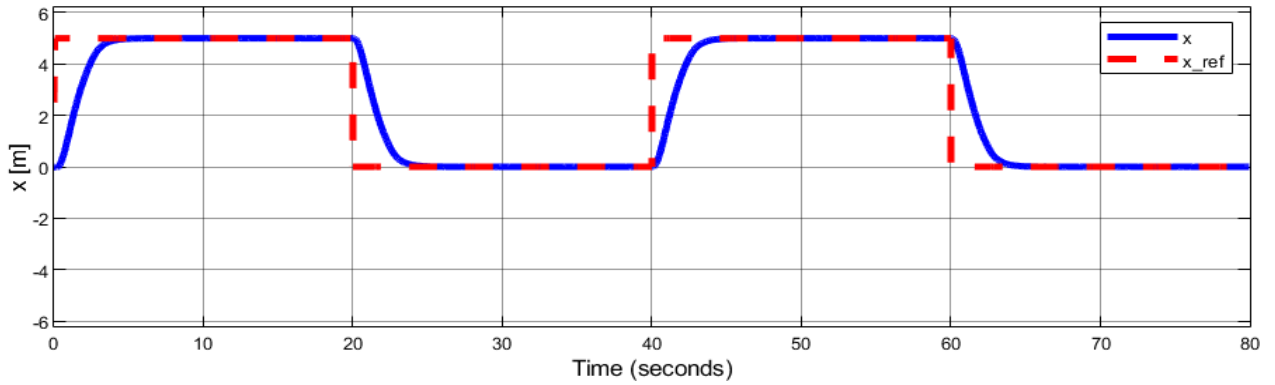
Các tham số của bộ điều khiển

$c_x = c_y = c_z = 1,55$; $c_\phi = c_\theta = c_\psi = 10$; $k_x = k_y = k_z = 0,75$; $k_\phi = k_\theta = k_\psi = 100$; $n_x = n_y = n_z = 1$;

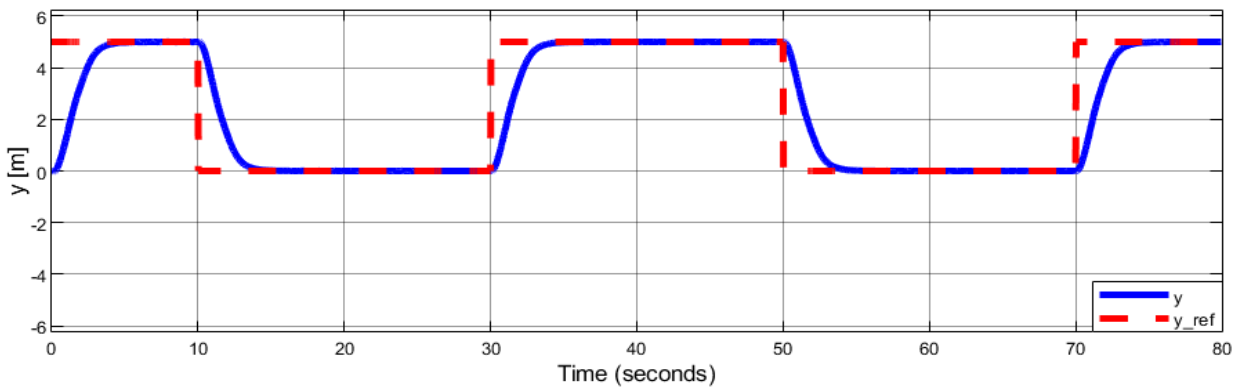
$n_\phi = n_\theta = n_\psi = 1$.

Kết quả mô phỏng quá trình bám quỹ đạo theo các trục tọa độ được trình bày trên hình 3 (a, b, c).

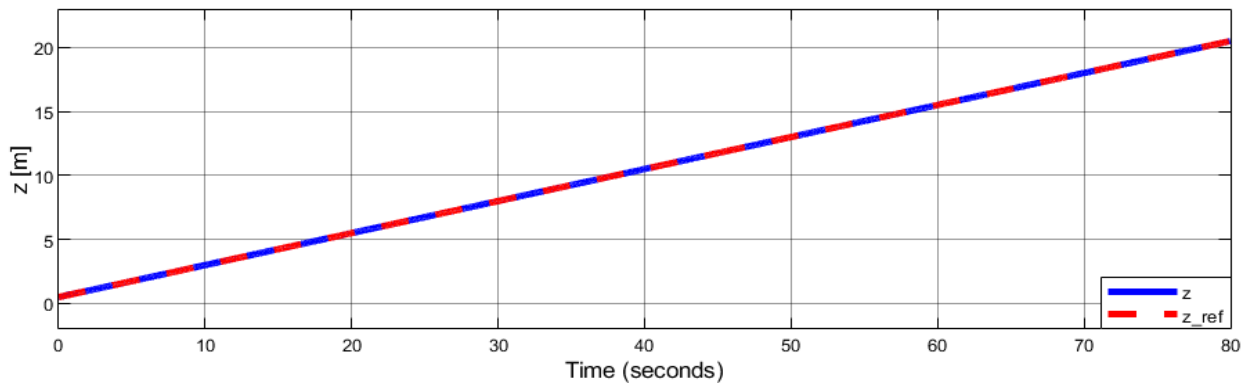
Quadrotor có thể bám theo quỹ đạo mong muốn, đối với quỹ đạo x mất 5 giây, tương tự với quỹ đạo y, z là 5 giây và 2,5 giây.



a. Quỹ đạo quadrotor theo trục x



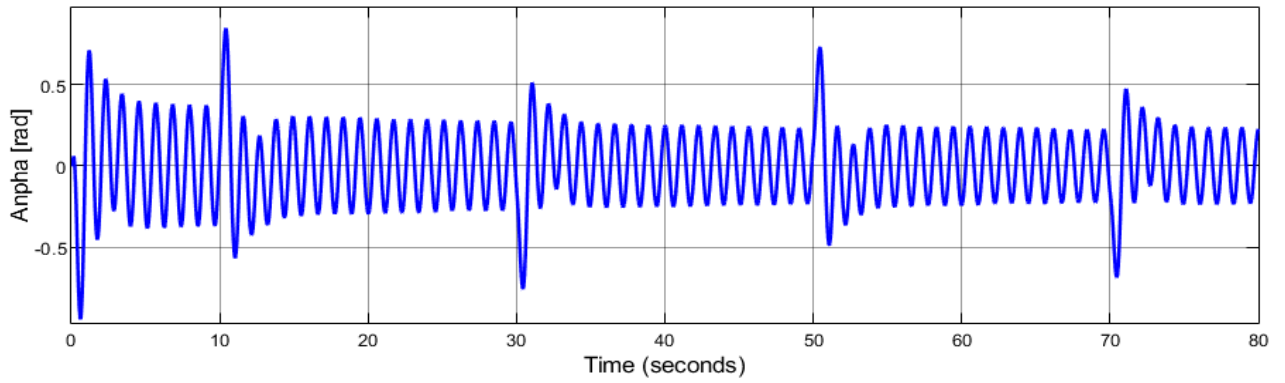
b. Quỹ đạo quadrotor theo trục y



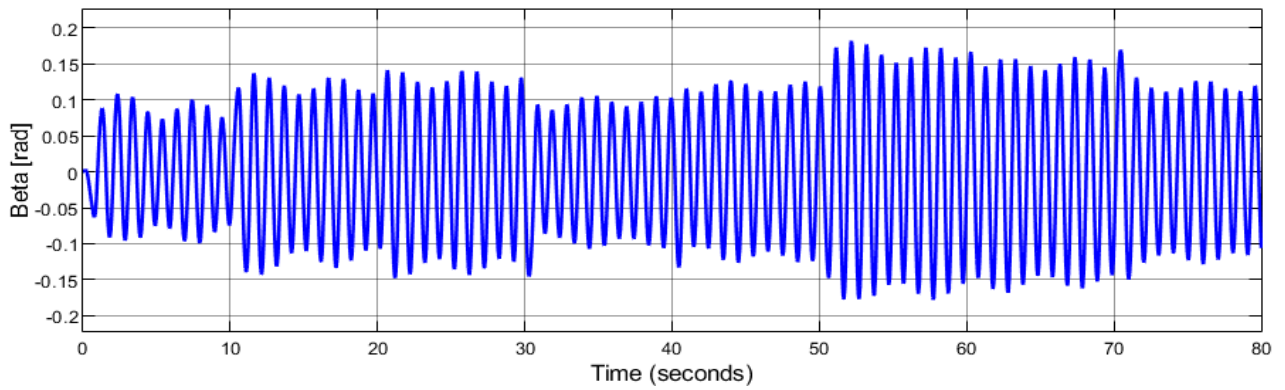
c. Quỹ đạo của quadrotor theo trục z

Hình 3. Quỹ đạo quadrotor theo các trục tọa độ.

Kết quả mô phỏng các góc dao động được trình bày trên hình 4 (a, b). Các góc dao động của tải treo khá lớn và hệ thống dao động đáng kể khi quadrotor chuyển hướng đột ngột. Sau đó, dao động sẽ giảm khi quadrotor di chuyển theo hướng x hoặc y.



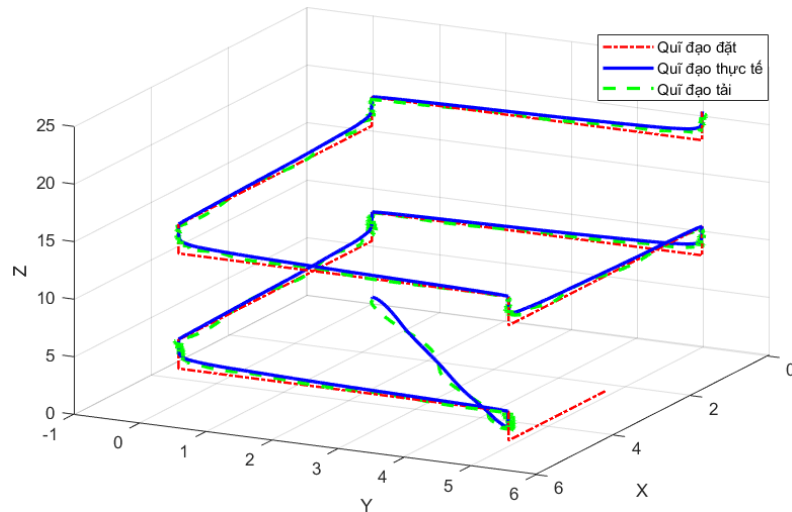
a. Góc dao động Alpha



b. Góc dao động Beta

Hình 4. Các góc dao động của tải.

Trong hình 5 thể thể hiện rõ hơn quỹ đạo của quadrotor và tải treo trong không gian.



Hình 5. Quỹ đạo của quadrotor và tải.



3. TRAO ĐỔI VÀ KẾT LUẬN

Tải trọng treo được mô hình hóa dưới dạng con lắc, trong đó tải được xem xét như một khối lượng điểm treo bên dưới quadrotor. Khi đó, mô hình khảo sát này có 9 bậc tự do chỉ với 5 đầu vào điều khiển, được xây dựng dựa trên phương trình Lagrange. Mặc dù chưa có giải pháp triệt tiêu hoàn toàn góc dao động của tải trọng, nhưng bằng cách coi ảnh hưởng của tải như nhiễu, bộ điều khiển trượt vẫn đảm bảo cho quadrotor bám sát quỹ đạo đặt trước, đồng thời giới hạn góc dao động trong ngưỡng cho phép để hệ thống có thể hoạt động ổn định.

Thông qua mô phỏng, bài báo đã xây dựng mô hình và kiểm tra hiệu quả hoạt động của bộ điều khiển trượt kết hợp với bộ quan sát trạng thái mở rộng trong nhiệm vụ ổn định và bám quỹ đạo của hệ thống. Kết quả cho thấy bộ điều khiển đề xuất có khả năng dẫn hướng quadrotor theo các quỹ đạo định sẵn, ngay cả trong điều kiện tải trọng treo dao động liên tục. Đồng thời, bài báo cũng chứng minh được ưu điểm của phương pháp điều khiển trượt trong việc giảm thiểu những ảnh hưởng của các yếu tố bất định và nhiễu bên ngoài, góp phần nâng cao chất lượng điều khiển.

Kết quả nghiên cứu của bài báo có ý nghĩa thực tiễn, có thể áp dụng trong việc thiết kế và vận hành các hệ thống quadrotor có treo tải trong thực tế, giúp nâng cao hiệu quả và độ tin cậy trong các hoạt động vận chuyển và thu thập dữ liệu bằng quadrotor.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. M. Elshaer and M. M. Abd El Aziz, “Recent advances and challenges in controlling quadrotors with suspended loads,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 12, pp. 12343–12358, 2022.
- [2] X. Liang, H. Yu, Z. Zhang and J. Han, “Unmanned aerial transportation system with flexible connection between the quadrotor and the payload: Modeling, controller design, and experimental validation”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 70, no. 2, pp. 1870–1882, 2022.
- [3] J. Huang, H. Tao and J.-Q. Sun, “Suppressing UAV payload swing with time-varying cable length through nonlinear coupling”, *Mechanical Systems and*



Signal Processing, vol. 185, p. 109790, 2023.

- [4] C.Xinyu, Z.Yongsheng, “Adaptive integral backstepping control for a quadrotor with suspended flight,” in Proc. 5th Int. Conf. Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE), IEEE, pp. 226–234, 2020.
- [5] Y. Wang, D. Li, and J. Huang, “Adaptive sliding mode control for quadrotor payload swing with variable-length cable”, in Proc. IEEE 12th Data Driven Control and Learning Syst. Conf. (DDCLS), pp. 1924–1929, 2023.
- [6] M. A. Basal, “Advanced Sliding Mode Control with Disturbance Rejection Techniques for Multi-DOF Robotic Systems”, J Robot Control (JRC), vol. 6, no. 4, pp. 1612–1623, Jun. 2025.
- [7] M. Labbadi, Y. Boukal, “Advanced Robust Nonlinear Control Approaches for Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle: Roadmap to Improve Tracking-Trajectory Performance in the Presence of External Disturbances”, vol. 384. Springer Nature, 2021.
- [8] S. Tokat, M and O. Eray, “A classification and overview of sliding mode controller sliding surface design methods,” in Recent Advances in Sliding Modes: From Control to Intelligent Mechatronics, pp. 417–439, 2015.