

ĐIỀU KHIỂN BÁM QUỸ ĐẠO CHUYỂN ĐỘNG QUADROTOR TRONG ĐIỀU KIỆN THAM SỐ BẤT ĐỊNH VÀ NHIỄU NGOẠI TÁC ĐỘNG DỰA TRÊN BIOINSPIRED NEURAL DYNAMICS KẾT HỢP BACKSTEPPING

TRAJECTORY TRACKING CONTROL OF A QUADROTOR UNDER PARAMETRIC UNCERTAINTIES AND EXTERNAL DISTURBANCES BASED ON BIO-INSPIRED NEURAL DYNAMICS COMBINED WITH BACKSTEPPING

Nguyễn Thị Hiền^{1,2,*},
Nguyễn Hoài Nam², Võ Thu Hà¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2026.146>

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu bài toán điều khiển bám quỹ đạo bền vững cho phương tiện bay không người lái dạng Quadrotor trong điều kiện tồn tại nhiễu ngoại sinh và bất định tham số. Trên cơ sở mô hình động lực học phi tuyến đầy đủ sáu bậc tự do xây dựng theo định luật Newton-Euler, một cấu trúc điều khiển kết hợp Bioinspired Neural Dynamics và Backstepping (BND-Backstepping). Trong cấu trúc này, Backstepping đảm nhiệm vai trò bảo đảm ổn định phân cấp cho các kênh tịnh tiến và quay, trong khi mô hình BND được sử dụng để xấp xỉ và bù trực tuyến các thành phần phi tuyến chưa biết và nhiễu bị chặn, đồng thời tạo tín hiệu điều khiển trơn. Tính ổn định của hệ kín được chứng minh chặt chẽ bằng phương pháp Lyapunov, bảo đảm các sai lệch bám vị trí và góc quay hội tụ tiệm cận. Các mô phỏng số trên quỹ đạo không gian ba chiều phức tạp trong điều kiện nhiễu mạnh cho thấy bộ điều khiển đề xuất đạt chất lượng bám quỹ đạo tốt, tín hiệu điều khiển mượt và khả năng chống nhiễu vượt trội.

Từ khóa: Quadrotor UAV, Backstepping, Bio-inspired neural dynamics, BND.

ABSTRACT

This paper investigates the problem of robust trajectory tracking control for Quadrotor unmanned aerial vehicles in the presence of external disturbances and parametric uncertainties. Based on a complete nonlinear six-degree-of-freedom dynamic model derived using the Newton-Euler formulation, a hybrid control structure combining Bio-Inspired Neural Dynamics and Backstepping (BND-Backstepping) is developed. In this structure, the backstepping technique is employed to ensure hierarchical stability of the translational and rotational subsystems, while the BND model is utilized to online approximate and compensate for unknown nonlinearities and bounded disturbances, as well as to generate smooth control signals. The stability of the closed-loop system is rigorously proven using Lyapunov theory, guaranteeing asymptotic convergence of both position and attitude tracking errors. Numerical simulations on complex three-dimensional spatial trajectories under severe disturbance conditions demonstrate that the proposed controller achieves high trajectory tracking accuracy, smooth control inputs, and superior disturbance rejection capability.

Keywords: Quadrotor UAV, Backstepping, Bio-inspired neural dynamics, BND.

¹Khoa Điện - Tự động hóa, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

²Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội

*Email: ntien.dien@uneti.edu.vn

Ngày nhận bài: 04/02/2026

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 07/5/2026

Ngày chấp nhận đăng: 29/6/2026

1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, phương tiện bay không người lái (Unmanned Aerial Vehicle - UAV), đặc biệt là UAV dạng Quadrotor, đã trở thành đối tượng nghiên cứu và ứng dụng quan trọng nhờ khả năng cất/hạ cánh thẳng đứng, tính cơ động cao và cấu trúc cơ khí tương đối đơn giản [1, 2]. Cùng với sự phát triển của công nghệ điều khiển và cảm biến, Quadrotor đã được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như giám sát và trinh sát, vận chuyển hàng hóa, tìm kiếm cứu nạn và các hệ thống robot tự hành trong môi trường phức tạp [2, 3]. Những đặc điểm này khiến Quadrotor trở thành một nền tảng điển hình để nghiên cứu và kiểm chứng các phương pháp điều khiển phi tuyến và điều khiển thông minh.

Về mặt động lực học, Quadrotor là một hệ phi tuyến mạnh, đa biến và thiếu cơ cấu chấp hành, chịu ảnh hưởng đáng kể bởi nhiễu gió, sai lệch tham số khí động, mô-men chưa được mô hình hóa và các giới hạn của cơ cấu chấp hành, dẫn đến suy giảm chất lượng bám quỹ đạo trong các kịch bản bay thực tế [4, 5]. Các nghiên cứu gần đây cho thấy ngay cả khi sử dụng mô hình động lực học đầy đủ sáu bậc tự do, các bất định tổng hợp và nhiễu khí động vẫn có thể gây suy giảm đáng kể chất lượng bám quỹ đạo trong các kịch bản bay thực tế [5]. Do đó, bài toán điều khiển bám quỹ đạo chính xác và bền vững cho Quadrotor trong điều kiện bất định và nhiễu ngoài vẫn là một thách thức lớn trong lĩnh vực điều khiển UAV.

Trong số các phương pháp điều khiển phi tuyến đã được phát triển, Backstepping được sử dụng rộng rãi cho Quadrotor nhờ khả năng khai thác trực tiếp cấu trúc dạng strict-feedback của hệ thống và cho phép thiết kế bộ điều khiển theo từng lớp dựa trên tiêu chuẩn ổn định Lyapunov [6, 7]. Nền tảng lý thuyết của phương pháp này được trình bày hệ thống trong các công trình kinh điển về điều khiển phi tuyến và điều khiển thích nghi [6, 7]. Mặc dù Backstepping truyền thống có thể đạt chất lượng bám tốt khi mô hình danh định đủ chính xác, hiệu năng của phương pháp này suy giảm rõ rệt khi tồn tại bất định tham số và nhiễu ngoài do phụ thuộc lớn vào mô hình [8].

Để nâng cao tính bền vững, nhiều nghiên cứu đã kết hợp Backstepping với điều khiển trượt, hình thành phương pháp Backstepping trượt (Sliding Mode Backstepping - BSMC) [9]. Các biến thể của BSMC đã được đề xuất nhằm cải thiện khả năng chống nhiễu và đảm bảo hội tụ hữu hạn cho sai lệch bám quỹ đạo [10, 11]. Tuy nhiên, nhược điểm cố hữu của điều khiển trượt là hiện tượng chattering, gây dao động cao tần trong tín hiệu điều khiển và ảnh hưởng đến độ mượt của mô-men cũng

như tuổi thọ cơ cấu chấp hành [12, 13]. Các nền tảng lý thuyết của điều khiển phi tuyến và điều khiển trượt được trình bày chi tiết trong các tài liệu kinh điển [7, 12, 13].

Song song với các phương pháp điều khiển bền vững truyền thống, các chiến lược điều khiển thông minh dựa trên mạng nơ-ron đã được nghiên cứu nhằm xấp xỉ và bù trực tuyến các thành phần bất định chưa biết của hệ thống. Trong đó, các phương pháp điều khiển nơ-ron thích nghi và nơ-ron kết hợp điều khiển trượt đã cho thấy hiệu quả nhất định trong bài toán điều khiển Quadrotor [14-16]. Bên cạnh đó, các mô hình điều khiển lấy cảm hứng sinh học và học tăng cường cũng bắt đầu được khai thác cho UAV nhằm nâng cao khả năng thích nghi trong môi trường bay phức tạp [17, 18].

Trong giai đoạn gần đây, nhiều nghiên cứu tập trung vào việc xử lý nhiễu và bất định thông qua các kỹ thuật quan sát nhiễu, điều khiển bền vững thích nghi và học tăng cường liên tục. Các kết quả cho thấy việc kết hợp quan sát nhiễu với điều khiển phi tuyến giúp cải thiện đáng kể độ chính xác bám quỹ đạo của Quadrotor trong điều kiện nhiễu mạnh [19, 20]. Đồng thời, các cấu trúc điều khiển kết hợp mạng nơ-ron thích nghi và quan sát trạng thái đã được chứng minh là có khả năng nâng cao hiệu năng điều khiển trong môi trường bay thực tế [21, 22].

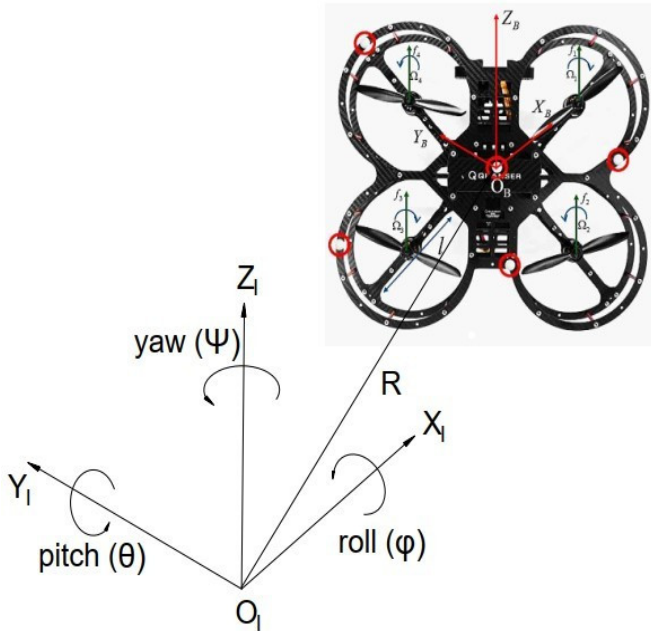
Gần đây hơn, các phương pháp học tăng cường và học thích nghi liên tục đã được áp dụng cho bài toán điều khiển Quadrotor nhằm đối phó với nhiễu gió biến thiên và sự thay đổi tham số theo thời gian [23]. Các biến thể Backstepping trượt kết hợp quan sát bậc cao và thời gian hội tụ cố định cũng được đề xuất để tăng cường độ bền vững và cải thiện tốc độ đáp ứng [11, 24]. Ngoài ra, các phương pháp điều khiển đội hình và bám quỹ đạo sử dụng Backstepping kết hợp quan sát nhiễu đã mở rộng phạm vi ứng dụng của Quadrotor trong các hệ đa UAV [25].

Trong nhóm các mô hình học thích nghi, Bioinspired Neural Dynamics (BND) được xem là một mô hình nơ-ron động học có cấu trúc gọn nhẹ, đầu ra bị chặn và tính ổn định nội tại cao, phù hợp cho việc sinh tín hiệu bù trơn trong các hệ phi tuyến chịu nhiễu [26, 27]. Các nghiên cứu gần đây cho thấy việc tích hợp các mô hình nơ-ron động thích nghi vào cấu trúc điều khiển phi tuyến có thể nâng cao đáng kể độ chính xác bám quỹ đạo và khả năng chống nhiễu cho Quadrotor [28].

Xuất phát từ những hạn chế của Backstepping truyền thống và Backstepping trượt, đồng thời kế thừa các ưu điểm của Bioinspired Neural Dynamics, bài báo này đề xuất một bộ điều khiển BND-Backstepping mới cho Quadrotor. Trong cấu trúc đề xuất, Backstepping đảm

nhệm vai trò bảo đảm ổn định phân cấp cho các kênh tịnh tiến và quay, trong khi mô hình BND được tích hợp nhằm xấp xỉ và bù trực tuyến các thành phần bất định tổng hợp và nhiễu ngoài, qua đó nâng cao tính bền vững và làm trơn tín hiệu điều khiển.

2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC CỦA QUADROTOR



Hình 1. Cấu trúc của Quadrotor

Mô hình động lực học của Quadrotor được xây dựng dựa trên định luật Newton-Euler và cách biểu diễn chuẩn trong các tài liệu kinh điển và các nghiên cứu gần đây [1, 2, 28]. Quadrotor là một phương tiện bay không người lái gồm bốn rotor gắn trên khung cứng đối xứng. Hai rotor quay cùng chiều kim đồng hồ (rotor 1, 3) và hai rotor quay ngược chiều (rotor 2, 4) nhằm triệt tiêu mô-men phản lực tổng quanh trục z (yaw).

Hai hệ tọa độ được sử dụng trong mô hình hóa gồm hệ tọa độ quán tính: $\mathcal{F}_I = \{O_I, X_I, Y_I, Z_I\}$ và hệ tọa độ thân $\mathcal{F}_B = \{O_B, X_B, Y_B, Z_B\}$. Vị trí của Quadrotor trong hệ quán tính được ký hiệu:

$$\mathbf{p} = [x \ y \ z]^T \in \mathbb{R}^3 \quad (1)$$

Tư thế của Quadrotor được mô tả bằng ba góc Euler:

$$\boldsymbol{\eta} = [\phi \ \theta \ \psi]^T \quad (2)$$

trong đó: ϕ , θ và ψ lần lượt là các góc roll, pitch và yaw.

Ma trận quay từ hệ thân sang hệ quán tính được xác định:

$$\mathbf{R}(\boldsymbol{\eta}) = \mathbf{R}_z(\psi)\mathbf{R}_y(\theta)\mathbf{R}_x(\phi) \quad (3)$$

với:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & s_\theta s_\psi c_\psi - c_\phi s_\psi & c_\phi s_\psi c_\psi + s_\phi s_\psi \\ c_\theta s_\psi & s_\theta s_\psi c_\psi + c_\phi s_\psi & c_\phi s_\psi s_\psi - s_\phi s_\psi \\ -s_\theta & s_\phi c_\theta & c_\phi c_\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

trong đó: $c(\cdot)$ và $s(\cdot)$ lần lượt là hàm $\cos(\cdot)$ và $\sin(\cdot)$. Ma trận $\mathbf{R}$ là trực giao, do đó $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T$.

Quan hệ giữa vận tốc góc thân $\boldsymbol{\omega} = [p \ q \ r]^T$ và đạo hàm các góc Euler:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{Q}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\omega} \quad (5)$$

với $\mathbf{Q}(\boldsymbol{\eta})$ là ma trận động học Euler:

$$\mathbf{Q}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi / \cos\theta & \cos\phi / \cos\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

Để mô hình hóa Quadrotor thiếu cơ cấu chấp hành các giả thiết được đưa ra như sau:

- **Giả thiết 1.** Quadrotor được xem là vật rắn tuyệt đối, cấu trúc đối xứng và tâm khối lượng trùng với gốc hệ tọa độ thân.

- **Giả thiết 2.** Các góc Euler bị chặn với các điều kiện (7):

$$-\frac{\pi}{2} \leq \phi, \theta \leq \frac{\pi}{2}, \quad -\pi \leq \psi \leq \pi \quad (7)$$

- **Giả thiết 3.** Các bất định mô hình và nhiễu ngoài trong động lực học của Quadrotor được giả thiết là bị chặn. Cụ thể:

• **Bất định tham số vật lý:**

$$m = m_0 + \Delta m \quad (8)$$

$$k_f = k_{f0} + \Delta k_f \quad (9)$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_0 + \Delta \mathbf{J} \quad (10)$$

trong đó: $\mathbf{m}_0$, $\mathbf{k}_{f0}$, $\mathbf{J}_0$ là các giá trị danh định; Δm , Δk_f , $\Delta \mathbf{J}$ biểu diễn sai lệch do tải thay đổi, sai số nhận dạng/ước lượng,...

• **Bất định khí động học và nhiễu môi trường:** sai lệch các hệ số cản tịnh tiến c_{dx} , c_{dy} , c_{dz} , sai lệch các hệ số cản quay $k_{\omega x}$, $k_{\omega y}$, $k_{\omega z}$, hiệu ứng gyroscopic chưa mô hình hoá chính xác, rung động động cơ, sai lệch lực giữa các rotor, và nhiễu gió/môi trường.

Toàn bộ các ảnh hưởng trên được gộp lại thành:

• Nhiều lực tổng hợp $\mathbf{d}_t(t) \in \mathbb{R}^3$ trong động lực học tịnh tiến

• Nhiều mô-men tổng hợp $\mathbf{d}_r(t) \in \mathbb{R}^3$ trong động lực học quay

thoả mãn điều kiện bị chặn:

$$\|\mathbf{d}_t(t)\| \leq \bar{d}_t, \quad \|\mathbf{d}_r(t)\| \leq \bar{d}_r. \quad (11)$$

với $\bar{d}_t, \bar{d}_r$ là các hằng số dương hữu hạn nhưng không biết trước.

2.1. Phương trình động lực học tịnh tiến

Trong hệ tọa độ quán tính, áp dụng định luật II Newton:

$$\sum \mathbf{F}_i = m\ddot{\mathbf{p}} \quad (12)$$

trong đó: $\mathbf{p} = [x \ y \ z]^T \in R^3$ là vị trí tâm khối trong hệ quán tính $\{I\}$, và $\ddot{\mathbf{p}}$ là gia tốc tịnh tiến.

Lực nâng tổng do bốn rotor sinh ra được biểu diễn trong hệ thân $\{B\}$ bởi:

$$\mathbf{F}_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F \end{bmatrix} = F\mathbf{e}_3, \quad \mathbf{e}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Do (12) viết trong hệ quán tính, lực nâng được biến đổi sang $\{I\}$ thông qua ma trận quay $\mathbf{R}(\eta)$:

$$\mathbf{F}_T = \mathbf{R}(\eta)\mathbf{F}_B = \mathbf{R}(\eta)\mathbf{e}_3 F \quad (14)$$

trong đó: $\eta = [\phi \ \theta \ \psi]^T$ là các góc Euler (roll-pitch-yaw). Chọn trục Z , hướng lên, vectơ trọng lực trong $\{I\}$ là:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} \quad (15)$$

và lực cản khí động học cơ bản được xấp xỉ tuyến tính theo vận tốc:

$$\mathbf{F}_D = -\text{diag}(c_{dx}, c_{dy}, c_{dz})\dot{\mathbf{p}} \quad (16)$$

Thay từ công thức (13) đến (16) vào (12), phương trình động lực học tịnh tiến tổng quát:

$$m\ddot{\mathbf{p}} = \mathbf{R}(\eta)\mathbf{e}_3 F + \mathbf{G} + \mathbf{F}_D + \mathbf{d}_t \quad (17)$$

Khai triển (17) theo từng trục trong $\{I\}$:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\frac{c_{dx}}{m}\dot{x} + \frac{1}{m}(\cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi)U_1 + d_x \\ \ddot{y} = -\frac{c_{dy}}{m}\dot{y} + \frac{1}{m}(\cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi)U_1 + d_y \\ \ddot{z} = -\frac{c_{dz}}{m}\dot{z} - g + \frac{1}{m}(\cos\phi\cos\theta)U_1 + d_z \end{cases} \quad (18)$$

trong đó: $\mathbf{d}_t = [d_x \ d_y \ d_z]^T$ và $U_1 = F$ là lực nâng tổng tác dụng lên Quadrotor.

Lực nâng tổng được sinh ra bởi bốn rotor và giả thiết tỷ lệ với bình phương tốc độ quay:

$$U_1 = F = k_f \sum_{i=1}^4 \Omega_i^2 \quad (19)$$

với Ω_i là tốc độ góc rotor thứ i và k_f là hệ số lực nâng.

2.2. Phương trình động lực học chuyển động quay

Động lực học quay của Quadrotor được xây dựng dựa trên phương trình Euler cho chuyển động quay của vật rắn, được biểu diễn trong hệ tọa độ thân FB như sau:

$$\sum \boldsymbol{\tau}_B = \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{J}\boldsymbol{\omega}) \quad (20)$$

trong đó:

- $\boldsymbol{\omega} = [p \ q \ r]^T$ là vectơ tốc độ góc của thân Quadrotor quanh các trục roll, pitch và yaw;

- $\mathbf{J} = \text{diag}(I_{xx}, I_{yy}, I_{zz})$ là ma trận mô-men quán tính của Quadrotor trong hệ tọa độ thân;

- $\boldsymbol{\tau}_B$ là tổng các mô-men tác dụng lên Quadrotor.

Các mô-men chính tác dụng lên Quadrotor bao gồm: mô-men điều khiển sinh ra bởi các rotor, mô-men gyroscopic do rotor quay, mô-men cản khí động và các mô-men nhiễu chưa mô hình hóa chính xác.

Do cấu hình hình học của Quadrotor, các rotor sinh ra mô-men điều khiển quanh các trục thân thông qua sự chênh lệch lực đẩy và mô-men phản lực:

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} lk_f(\Omega_2^2 - \Omega_4^2) \\ lk_f(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ k_m(\Omega_1^2 + \Omega_3^2 - \Omega_2^2 - \Omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (21)$$

trong đó:

- l là khoảng cách từ tâm khối lượng đến mỗi rotor;
- k_f và k_m lần lượt là hệ số lực đẩy và hệ số mô-men phản lực;
- Ω_i ($i = 1, \dots, 4$) là tốc độ góc của rotor thứ i .

Do các rotor quay với tốc độ cao, sự thay đổi tốc độ góc thân sinh ra mô-men gyroscopic, được mô hình hóa bởi:

$$\boldsymbol{\tau}_g = \mathbf{J}_r \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega \end{bmatrix} \times \boldsymbol{\omega}, \quad \Omega = \sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} \Omega_i \quad (22)$$

trong đó: $\mathbf{J}_r$ là mô-men quán tính của rotor. Trong nhiều nghiên cứu, thành phần này có thể được xấp xỉ hoặc gộp vào nhiễu quay khi phân tích bền vững.

Mô-men cản do ma sát và khí động được xấp xỉ tuyến tính theo tốc độ góc:

$$\tau_d = -\text{diag}(k_{\omega x}, k_{\omega y}, k_{\omega z}) \omega \quad (23)$$

trong đó: $k_{\omega x}, k_{\omega y}, k_{\omega z} > 0$ là các hệ số cản quay.

Các tác động chưa được mô hình hóa chính xác như nhiễu gió xoáy, rung động cơ khí, sai lệch lực rotor và nhiễu môi trường được gộp vào vectơ mô-men nhiễu:

$$\mathbf{d}_r = \begin{bmatrix} d_\phi \\ d_\theta \\ d_\psi \end{bmatrix}, \quad \|\mathbf{d}_r(t)\| \leq \bar{d}_r \quad (24)$$

với $\bar{d}_r$ là hằng số dương hữu hạn nhưng không biết trước.

Cộng tất cả các mô-men (21) đến (24) vào phương trình Euler (20), thu được:

$$\mathbf{J}\dot{\omega} = -\omega \times (\mathbf{J}\omega) + \tau + \tau_g + \tau_d + \mathbf{d}_r \quad (25)$$

Khai triển (25) theo từng trục quay, động lực học quay của Quadrotor được viết dưới dạng:

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \dot{\theta} \dot{\psi} - \frac{J_r}{I_{xx}} \dot{\theta} \dot{\Omega} - \frac{k_{\omega x}}{I_{xx}} \dot{\phi}^2 + \frac{1}{I_{xx}} U_2 + d_\phi \\ \ddot{\theta} = \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \dot{\phi} \dot{\psi} + \frac{J_r}{I_{yy}} \dot{\phi} \dot{\Omega} - \frac{k_{\omega y}}{I_{yy}} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{I_{yy}} U_3 + d_\theta \\ \ddot{\psi} = \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \dot{\phi} \dot{\theta} - \frac{k_{\omega z}}{I_{zz}} \dot{\psi}^2 + \frac{1}{I_{zz}} U_4 + d_\psi \end{cases} \quad (26)$$

trong đó: U_2, U_3, U_4 lần lượt là các mô-men điều khiển quanh các trục roll, pitch và yaw.

2.3. Bất định tham số trong động lực học quay

Do khó xác định chính xác các tham số vật lý trong thực tế, các tham số quay được mô hình hóa dưới dạng:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_0 + \Delta \mathbf{J}, \quad k_{\omega i} = k_{\omega i 0} + \Delta k_{\omega i}, \quad i \in \{x, y, z\} \quad (27)$$

trong đó: $\Delta \mathbf{J}$ và $\Delta k_{\omega i}$ là các bất định tham số bị chặn. Các sai lệch này, cùng với mô-men gyroscopic chưa được mô hình hóa chính xác, có thể được xem như một phần của nhiễu tổng hợp $\mathbf{d}_r$ trong quá trình thiết kế bộ điều khiển.

Từ quá trình mô hình hóa động lực học chuyển động tịnh tiến và chuyển động quay, mô hình toán học đầy đủ của Quadrotor có thể được biểu diễn dưới dạng hệ phương trình phi tuyến bậc hai với nhiễu và bất định như sau:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\frac{c_{dx}}{m} \dot{x} + \frac{1}{m} (c_\phi c_\psi s_\theta + s_\phi s_\psi) U_1 + d_x \\ \ddot{y} = -\frac{c_{dy}}{m} \dot{y} + \frac{1}{m} (c_\phi s_\psi s_\theta - s_\phi c_\psi) U_1 + d_y \\ \ddot{z} = -\frac{c_{dz}}{m} \dot{z} - g + \frac{1}{m} (c_\phi c_\theta) U_1 + d_z \\ \ddot{\phi} = \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \dot{\theta} \dot{\psi} - \frac{J_r}{I_{xx}} \dot{\theta} \dot{\Omega} - \frac{k_{\omega x}}{I_{xx}} \dot{\phi}^2 + \frac{1}{I_{xx}} U_2 + d_\phi \\ \ddot{\theta} = \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \dot{\phi} \dot{\psi} + \frac{J_r}{I_{yy}} \dot{\phi} \dot{\Omega} - \frac{k_{\omega y}}{I_{yy}} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{I_{yy}} U_3 + d_\theta \\ \ddot{\psi} = \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \dot{\phi} \dot{\theta} - \frac{k_{\omega z}}{I_{zz}} \dot{\psi}^2 + \frac{1}{I_{zz}} U_4 + d_\psi \end{cases} \quad (28)$$

Vectơ đầu vào điều khiển $\mathbf{U} = [U_1 \ U_2 \ U_3 \ U_4]^T$ được xác định từ tốc độ quay của các rotor:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_d & k_d & k_d & k_d \\ 0 & k_d & 0 & -k_d \\ -k_d & 0 & k_d & 0 \\ k_p & -k_p & k_p & -k_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1^2 \\ \Omega_2^2 \\ \Omega_3^2 \\ \Omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Nhận xét: Từ các phương trình động lực học chuyển động tịnh tiến và chuyển động quay cho thấy:

- Mô hình tổng quát của Quadrotor (28) là hệ phi tuyến mạnh, đa biến và thiếu cơ cấu chấp hành.
- Các tham số bất định, bao gồm khối lượng m , ma trận quán tính $\mathbf{J}$, các hệ số lực đẩy và mô-men (k_d, k_p), cũng như các hệ số cản khí động ($c_{dx}, c_{dy}, c_{dz}, k_{\omega x}, k_{\omega y}, k_{\omega z}$), ảnh hưởng chuyển động bám quỹ đạo của Quadrotor.

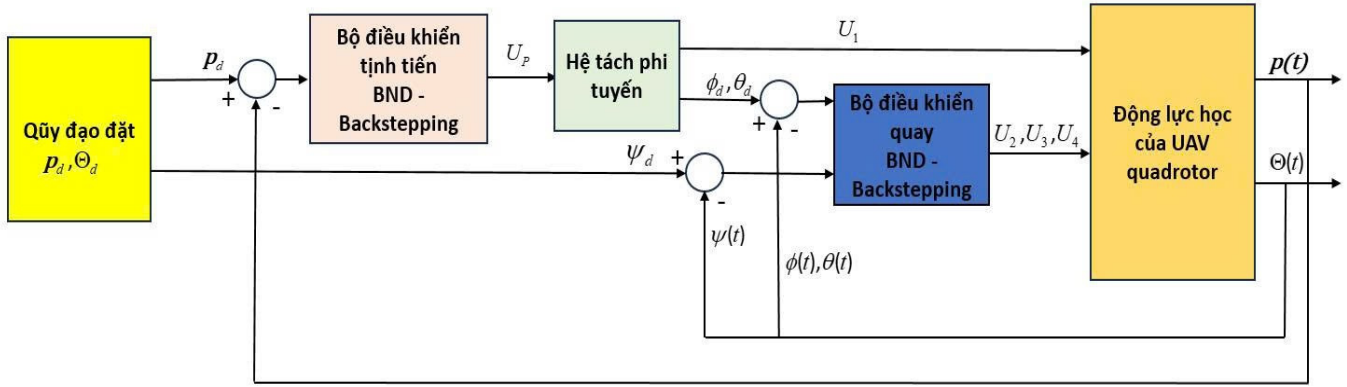
- Các nhiễu chuyển động tịnh tiến $\mathbf{d}_1 = [d_x \ d_y \ d_z]^T$ và nhiễu chuyển động quay $\mathbf{d}_2 = [d_\phi \ d_\theta \ d_\psi]^T$ xuất hiện trực tiếp trong mô hình động lực học, các tham số bất định là không biết trước hoặc không biết chính xác và bị chặn.

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN BND-BACKSTEPPING

Cấu trúc điều khiển được thiết kế theo dạng phân cấp, trong đó kênh tịnh tiến được thiết kế trước để suy ra lực nâng tổng U_1 và các góc đặt, sau đó kênh quay được xây dựng để sinh các mô-men điều khiển U_2, U_3, U_4 .

3.1. Bioinspired Neural Dynamics (BND)

Mô hình Bioinspired Neural Dynamics (BND) được phát triển dựa trên mô hình nơ ron Hodgkin-Huxley và sau đó mở rộng bởi Grossberg, có khả năng xấp xỉ mạnh mẽ các thành phần bất định và nhiễu trong hệ phi tuyến [26, 27].



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc điều khiển

Động lực học của mỗi nơ-ron thứ i trong mô hình BND được mô tả bởi [28]:

$$\dot{V}_{s,i} = -A_i V_{s,i} + (B_i - V_{s,i})f(e_i) - (D_i + V_{s,i})g(e_i), \quad (30)$$

trong đó: e_i biểu diễn sai lệch giữa trạng thái mong muốn và trạng thái ước lượng của Quadrotor.

Các hàm kích hoạt phi tuyến được xác định bởi:

$$f(e_i) = \max\{e_i, 0\}, \quad g(e_i) = \max\{-e_i, 0\} \quad (31)$$

Trong mô hình (30), $V_{s,i}$ là trạng thái nơ-ron đóng vai trò tín hiệu bù cho các bất định và nhiễu ngoại sinh. Tham số $A_i > 0$ xác định tốc độ suy giảm nội tại của trạng thái nơ-ron, trong khi $B_i > 0$ và $D_i > 0$ lần lượt quy định các giới hạn bão hòa phía dương và phía âm của tín hiệu bù. Nhờ cơ chế kích thích - ức chế sinh học thông qua các hàm $f(e_i)$ và $g(e_i)$, tín hiệu $V_{s,i}$ có khả năng thích nghi trơn theo sai lệch và luôn bị chặn trong một miền hữu hạn.

Nhờ cơ chế shunting đặc trưng, đầu ra $V_{s,i}$ luôn bị giới hạn trong khoảng $[-D_i, B_i]$ và thay đổi trơn theo thời gian. Để mở rộng mô hình (30) sang dạng nhiều chiều phục vụ cho điều khiển Quadrotor UAV, ta viết lại dưới dạng vector như sau:

$$\text{trong đó: } \dot{\mathbf{V}}_s = -\Lambda \mathbf{V}_s + \mathbf{G} \quad (32)$$

$$\text{và } \mathbf{V}_s = [V_{s1} \ V_{s2} \ \dots \ V_{sn}]^T \in \mathbb{R}^n \quad (33)$$

$$\Lambda = A + E, \ A = \text{diag}(A_1, \dots, A_n), \ E = \text{diag}(|e_1|, \dots, |e_n|), \quad (34)$$

Vector kích hoạt $\mathbf{G}$ được xác định theo từng phần tử như sau:

$$\mathbf{G}_i = \begin{cases} B_i e_i, & e_i \geq 0 \\ D_i e_i, & e_i < 0 \end{cases} \quad (35)$$

với $B = \text{diag}(B_1, \dots, B_n)$ và $D = \text{diag}(D_1, \dots, D_n)$

Nhận xét: Xét phương trình trên với e_i là tín hiệu vào, nếu e_i bị chặn thì trạng thái $V_{s,i}$ là ổn định theo nghĩa vào - trạng thái. Khi $e_i \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$, thì $V_{s,i} \rightarrow 0$. Nhờ khả năng

thích nghi động và đặc tính bão hòa nội tại, tín hiệu đầu ra của mô hình BND thể hiện hành vi ổn định hơn trong điều kiện có nhiễu và biến đổi môi trường, đồng thời luôn bị chặn trong miền $[-D_i, B_i]$.

3.2. Thiết kế bộ điều khiển tịnh tiến dựa trên BND - Backstepping

Việc thiết kế bộ điều khiển cho kênh tịnh tiến được thực hiện theo phương pháp Backstepping phân cấp, trong đó các hàm Lyapunov được xây dựng tuần tự để bảo đảm ổn định tiệm cận của sai lệch bám [6, 7]. Từ mô hình động lực học tịnh tiến trong (18) có thể viết gọn dưới dạng:

$$\ddot{\mathbf{p}} = \mathbf{u}_p - \mathbf{D}_t \dot{\mathbf{p}} - g \mathbf{e}_3 + \mathbf{d}_t, \quad \mathbf{e}_3 = [0 \ 0 \ 1]^T \quad (36)$$

Tín hiệu điều khiển ảo được định nghĩa:

$$\mathbf{u}_p = \frac{1}{m} \mathbf{R}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{e}_3 U_1 = \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix} \quad (37)$$

Véc-tơ $\mathbf{u}_p$ đại diện cho thành phần gia tốc sinh ra bởi lực nâng tổng U_1 trong hệ tọa độ quán tính. Đặt sai lệch vị trí và vận tốc dựa trên mô hình tịnh tiến (18):

$$\mathbf{e}_p = \mathbf{p}_d - \mathbf{p}, \quad \mathbf{e}_v = \dot{\mathbf{p}}_d - \dot{\mathbf{p}} + \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_p \quad (38)$$

trong đó: $\mathbf{K}_1 = \text{diag}(k_{1x}, k_{1y}, k_{1z}) > 0$.

Tín hiệu bù BND $\mathbf{V}_{st} \in \mathbb{R}^3$ được sinh từ sai lệch $\mathbf{e}_v$ theo mô hình shunting:

$$\dot{\mathbf{V}}_{st} = -\Lambda_t \mathbf{V}_{st} + \mathbf{G}_t(\mathbf{e}_v), \quad (39)$$

với $\Lambda_t = \mathbf{A}_t + \mathbf{E}_t \mathbf{A}_t > 0$ chéo, $\mathbf{E}_t = \text{diag}(|e_{v,x}|, |e_{v,y}|, |e_{v,z}|)$,

và

$$G_{t,i}(e_{v,i}) = \begin{cases} B_{t,i} e_{v,i}, & e_{v,i} \geq 0, \\ D_{t,i} e_{v,i}, & e_{v,i} < 0, \end{cases} \quad i \in \{x, y, z\} \quad (40)$$

Nhờ đặc tính shunting, mỗi $V_{st,i}(t)$ bị chặn trong $[-D_{t,i}, B_{t,i}]$. Chọn luật điều khiển ảo:

$$\mathbf{u}_p = \ddot{\mathbf{p}}_d + \mathbf{K}_1 \dot{\mathbf{e}}_p + \mathbf{K}_2 \mathbf{e}_v + \mathbf{D}_1 \dot{\mathbf{p}} + \mathbf{g} \mathbf{e}_3 + \mathbf{V}_{st}, \quad (41)$$

trong đó: $\mathbf{K}_2 = \text{diag}(k_{2x}, k_{2y}, k_{2z}) \succ 0$. Để chứng minh sự ổn định (41) chọn hàm Lyapunov sau:

$$V_t = \frac{1}{2} \mathbf{e}_p^T \mathbf{e}_p + \frac{1}{2} \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v + \frac{1}{2} \mathbf{V}_{st}^T \mathbf{B}_t^{-1} \mathbf{V}_{st} \quad (42)$$

trong đó:

$$\mathbf{B}_t = \text{diag}(B_{t,x}, B_{t,y}, B_{t,z}) \succ 0. \quad (43)$$

Từ (36) đến (41) suy ra động lực học sai lệch khép kín:

$$\dot{\mathbf{e}}_p = \mathbf{e}_v - \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_p, \quad \dot{\mathbf{e}}_v = -\mathbf{K}_2 \mathbf{e}_v - (\mathbf{V}_{st} - \mathbf{d}_1) \quad (44)$$

Lấy đạo hàm V_t theo (39) và (44) cho ta:

$$\begin{aligned} \dot{V}_t = & -\mathbf{e}_p^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_p - \mathbf{e}_v^T \mathbf{K}_2 \mathbf{e}_v + \mathbf{e}_v^T (\mathbf{d}_1 - \mathbf{V}_{st}) \\ & + \mathbf{V}_{st}^T \mathbf{B}_t^{-1} \mathbf{G}_t (\mathbf{e}_v) - \mathbf{V}_{st}^T \mathbf{B}_t^{-1} \Lambda_t \mathbf{V}_{st} \end{aligned} \quad (45)$$

Với lựa chọn biên BND đủ lớn để bao phủ nhiễu bị chặn (Giả thiết 2), tồn tại lựa chọn tham số sao cho

$$\mathbf{e}_v^T (\mathbf{d}_1 - \mathbf{V}_{st}) + \mathbf{V}_{st}^T \mathbf{B}_t^{-1} \mathbf{G}_t (\mathbf{e}_v) \leq 0 \quad (46)$$

suy ra:

$$\dot{V}_t \leq -\mathbf{e}_p^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_p - \mathbf{e}_v^T \mathbf{K}_2 \mathbf{e}_v \quad (47)$$

do đó $\mathbf{e}_p, \mathbf{e}_v \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$ và các tín hiệu trong hệ bị chặn.

Suy ra U_1 và góc đặt (ϕ_d, θ_d) Từ $\mathbf{u}_p = [U_x \ U_y \ U_z]^T$ và quan hệ trong phương trình tịnh tiến (18), chọn:

$$U_1 = m \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + (U_z + g)^2} \quad (48)$$

$$\phi_d = \arctan \left(\frac{U_x \sin \psi_d - U_y \cos \psi_d}{U_z + g} \right),$$

$$\theta_d = \arctan \left(\frac{U_x \cos \psi_d + U_y \sin \psi_d}{U_z + g} \right) \quad (49)$$

3.3. Thiết kế bộ điều khiển quay dựa trên BND - Backstepping

Từ mô hình động lực học quay của Quadrotor trong (26) viết gọn như sau:

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{f}_r(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}}, \Omega) + \mathbf{B}_r \mathbf{U}_\omega + \mathbf{d}_2, \quad \mathbf{U}_\omega = [U_2 \ U_3 \ U_4]^T \quad (50)$$

trong đó: $\boldsymbol{\eta} = [\phi \ \theta \ \psi]^T$; $\mathbf{f}_r(\cdot)$ gom các thành phần phi tuyến; $\mathbf{B}_r = \text{diag}(1/I_{xx}, 1/I_{yy}, 1/I_{zz})$; và $\mathbf{d}_2$ là nhiễu bị chặn.

Đặt quỹ đạo mong muốn $\boldsymbol{\eta}_d = [\phi_d \ \theta_d \ \psi_d]^T$. Sai lệch được định nghĩa:

$$\mathbf{e}_\eta = \boldsymbol{\eta}_d - \boldsymbol{\eta}, \quad \mathbf{e}_\omega = \dot{\boldsymbol{\eta}}_d - \dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{K}_3 \mathbf{e}_\eta \quad (51)$$

với $\mathbf{K}_3 = \text{diag}(k_{3\phi}, k_{3\theta}, k_{3\psi}) \succ 0$

Tín hiệu bù BND $\mathbf{V}_{sr} \in \mathbb{R}^3$ được sinh từ sai lệch $\mathbf{e}_\omega$ theo shunting model:

$$\dot{\mathbf{V}}_{sr} = -\Lambda_r \mathbf{V}_{sr} + \mathbf{G}_r(\mathbf{e}_\omega) \quad (52)$$

Trong đó:

- $\mathbf{V}_{sr} = [V_{sr,\phi} \ V_{sr,\theta} \ V_{sr,\psi}]^T$ là véc-tơ tín hiệu bù nhiễu quay, dùng để xấp xỉ và bù các nhiễu/bất định chưa biết trong kênh quay (nhiều mô-men, sai lệch tham số, mô-men gyroscopic không mô hình hóa chính xác).

- $\mathbf{e}_\omega = [e_{\omega,\phi} \ e_{\omega,\theta} \ e_{\omega,\psi}]^T$ là sai lệch tốc độ góc, đóng vai trò tín hiệu kích thích đầu vào của mô hình BND.

- $\Lambda_r = \mathbf{A}_r + \mathbf{E}_r \succ 0$ là ma trận suy giảm, quyết định tốc độ tiêu tán năng lượng của tín hiệu BND, trong đó:

- $-\mathbf{A}_r = \text{diag}(a_{r,\phi}, a_{r,\theta}, a_{r,\psi}) \succ 0$ là thành phần suy giảm tuyến tính hằng, đảm bảo ổn định nội tại của động lực BND.

- $-\mathbf{E}_r = \text{diag}(|e_{\omega,\phi}|, |e_{\omega,\theta}|, |e_{\omega,\psi}|)$ là thành phần suy giảm phụ thuộc sai lệch, giúp tăng tốc độ dập tắt $\mathbf{V}_{sr}$ khi sai lệch lớn.

- $\mathbf{G}_r(\mathbf{e}_\omega)$ là hàm kích hoạt từng phần, được định nghĩa theo từng kênh:

$$G_{r,j}(\mathbf{e}_{\omega,j}) = \begin{cases} B_{r,j} \mathbf{e}_{\omega,j}, & e_{\omega,j} \geq 0, \\ D_{r,j} \mathbf{e}_{\omega,j}, & e_{\omega,j} < 0, \end{cases} \quad i \in \{\phi, \theta, \psi\}, \quad (53)$$

trong đó: $B_{r,j} > 0$ và $D_{r,j} > 0$ là các hệ số kích hoạt bất đối xứng, cho phép BND phản ứng khác nhau với sai lệch dương và âm, từ đó cải thiện khả năng bù nhiễu bị chặn và nhiễu phi đối xứng.

Chọn luật điều khiển kênh quay:

$$\mathbf{U}_\omega = \mathbf{B}_r^{-1} (\ddot{\boldsymbol{\eta}}_d - \mathbf{f}_r(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}}, \Omega) + \mathbf{K}_3 \dot{\mathbf{e}}_\eta + \mathbf{K}_4 \mathbf{e}_\omega + \mathbf{V}_{sr}), \quad (54)$$

với $\mathbf{K}_4 = \text{diag}(k_{4\phi}, k_{4\theta}, k_{4\psi}) \succ 0$. Theo đó, các mô-men điều khiển được xác định lần lượt:

$$\begin{aligned} U_2 &= I_{xx} (\ddot{\phi}_d - f_\phi + k_{3\phi} \dot{e}_\phi + k_{4\phi} e_\phi^\phi + V_{sr,\phi}) \\ U_3 &= I_{yy} (\ddot{\theta}_d - f_\theta + k_{3\theta} \dot{e}_\theta + k_{4\theta} e_\theta^\theta + V_{sr,\theta}) \\ U_4 &= I_{zz} (\ddot{\psi}_d - f_\psi + k_{3\psi} \dot{e}_\psi + k_{4\psi} e_\psi^\psi + V_{sr,\psi}) \end{aligned} \quad (55)$$

trong đó: f_ϕ, f_θ, f_ψ là các thành phần phi tuyến tương ứng của $\mathbf{f}_r(\cdot)$.

Thay (54) vào mô hình quay, thu được hệ sai lệch khép kín:

$$\dot{\mathbf{e}}_{\eta} = \mathbf{e}_{\omega} - \mathbf{K}_3 \mathbf{e}_{\eta}, \quad \dot{\mathbf{e}}_{\omega} = -\mathbf{K}_4 \mathbf{e}_{\omega} - (\mathbf{V}_{sr} - \mathbf{d}_2) \quad (56)$$

Do $\mathbf{V}_{sr}$ có động lực riêng, chọn hàm Lyapunov:

$$V_r = \frac{1}{2} \mathbf{e}_{\eta}^T \mathbf{e}_{\eta} + \frac{1}{2} \mathbf{e}_{\omega}^T \mathbf{e}_{\omega} + \frac{1}{2} \mathbf{V}_{sr}^T \mathbf{B}_r^{-1} \mathbf{V}_{sr} \quad (57)$$

Lấy đạo hàm (58) theo thời gian và thay (57) vào thu được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_r = & -\mathbf{e}_{\eta}^T \mathbf{K}_3 \mathbf{e}_{\eta} - \mathbf{e}_{\omega}^T \mathbf{K}_4 \mathbf{e}_{\omega} + \mathbf{e}_{\eta}^T \mathbf{e}_{\omega} \\ & - \mathbf{e}_{\omega}^T (\mathbf{V}_{sr} - \mathbf{d}_2) + \mathbf{V}_{sr}^T \mathbf{B}_r^{-1} \dot{\mathbf{V}}_{sr} \end{aligned} \quad (58)$$

Với $\dot{\mathbf{V}}_{sr} = -\Lambda_r \mathbf{V}_{sr} + \mathbf{G}_r(\mathbf{e}_{\omega})$, và giả thiết nhiễu bị chặn, có thể chọn các tham số BND và ma trận $\mathbf{K}_4$ đủ lớn sao cho các hạng còn lại bị triệt tiêu, suy ra:

$$\dot{V}_r \leq -\mathbf{e}_{\eta}^T \mathbf{K}_3 \mathbf{e}_{\eta} - \mathbf{e}_{\omega}^T \mathbf{K}_4 \mathbf{e}_{\omega} \quad (59)$$

Do đó $\mathbf{e}_{\eta}, \mathbf{e}_{\omega} \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$ và các mô-men điều khiển U_2, U_3, U_4 là hữu hạn và bị chặn.

Cuối cùng, véc-tơ điều khiển tổng của Quadrotor có dạng:

$$\mathbf{U} = [U_1 \quad U_2 \quad U_3 \quad U_4]^T \quad (60)$$

trong đó: U_1 được xác định từ kênh tịnh tiến và (U_2, U_3, U_4) từ (54).

4. MÔ PHỎNG BỘ ĐIỀU KHIỂN BND-BACK STEPPING CHO QUADROTOR BẮM QUỸ ĐẠO KHI CÓ NHIỄU VÀ THAM SỐ BẤT ĐỊNH

Hiệu quả của thuật toán điều khiển được chứng minh thông qua mô phỏng trên phần mềm Matlab. Quỹ đạo tham chiếu được lựa chọn dạng xoắn ốc 3D trong không gian, gồm chuyển động tròn trong mặt phẳng x-y và tăng dần theo trục z. Quỹ đạo đặt có dạng:

$$\mathbf{p}_d(t) = \begin{bmatrix} x_d(t) \\ y_d(t) \\ z_d(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + 8\cos(0,1t) \\ -8 + 8\sin(0,1t) \\ 0,2t \end{bmatrix} \quad (61)$$

với vận tốc và gia tốc tham chiếu thu được bằng đạo hàm theo thời gian:

$$\dot{\mathbf{p}}_d(t) = \begin{bmatrix} -0,8\sin(0,1t) \\ 0,8\cos(0,1t) \\ 0,2 \end{bmatrix} \quad (62)$$

$$\ddot{\mathbf{p}}_d(t) = \begin{bmatrix} -0,08\cos(0,1t) \\ -0,08\sin(0,1t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (63)$$

Góc yaw (ψ) tham chiếu được chọn không đổi để đơn giản hóa bài toán theo dõi tư thế:

$$\psi_d(t) = 0,2\text{rad}, \quad \dot{\psi}_d(t) = 0. \quad (64)$$

Mô phỏng được thực hiện trong khoảng thời gian $t \in [0,7]$ với bước lấy mẫu dt và bộ giải số ode45. Trạng thái ban đầu được chọn gần điểm đầu của quỹ đạo tham chiếu nhằm đánh giá chính xác khả năng bám và đáp ứng quá độ:

$$\mathbf{p}(0) = \mathbf{p}_d(0), \quad \dot{\mathbf{p}}(0) = 0, \quad \eta(0) = 0, \quad \omega(0) = 0 \quad (65)$$

Các tham số vật lý của Quadrotor (khối lượng danh định m_0 , ma trận quán tính J , hệ số cản, giới hạn lực/mô-men) được giữ giống kịch bản trước để đảm bảo tính nhất quán. Bất định tham số được xét dưới dạng khối lượng thay đổi theo thời gian, trong khi nhiễu ngoại sinh được mô hình hóa thông qua các thành phần nhiễu tác động lên kênh tịnh tiến và kênh quay.

Bảng 1. Thông số mô hình Quadrotor và giới hạn đầu vào sử dụng trong mô phỏng

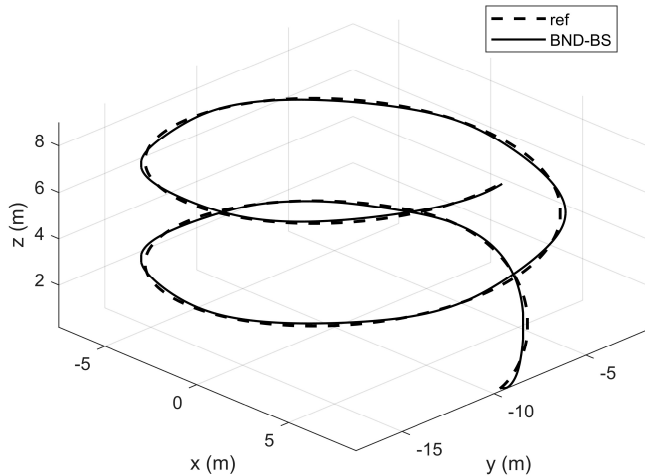
Tham số	Giá trị	Tham số	Giá trị
m_0	1,121 (kg)	g	9,81 (m/s ²)
I_{xx}	0,01 (kgm ²)	I_{yy}	0,01 (kgm ²)
I_{zz}	0,0148 (kgm ²)	I	diag(0.01, 0.01, 0.0148)
$\phi_{\max}, \theta_{\max}$	45°	$U_{1,\max}$	55 (N)
$\tau_{\max}$	2,5 (Nm)		

Hiệu năng bám quỹ đạo và ổn định tư thế được đánh giá thông qua các đồ thị: quỹ đạo 3D, đầu ra tọa độ x, y, z so với $\mathbf{p}_d$, sai lệch vị trí $\mathbf{e}_p = \mathbf{p}_d - \mathbf{p}$, đầu ra góc Euler (ϕ, θ, ψ) so với $(\phi_d, \theta_d, \psi_d)$, sai lệch góc $\mathbf{e}_{\eta} = \eta_d - \eta$, và tín hiệu điều khiển (U_1, τ) với $\tau = [U_2 \quad U_3 \quad U_4]^T$.

Bảng 2. Thông số bộ điều khiển BND-Backstepping sử dụng trong mô phỏng

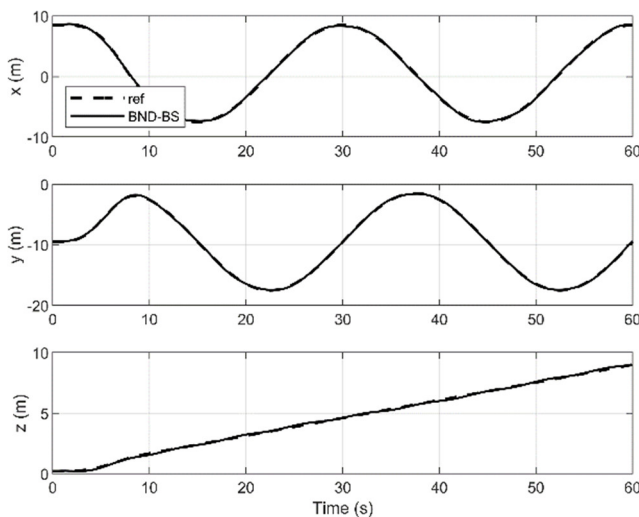
Tham số	Giá trị	Tham số	Giá trị
K_{1p}	diag(1.8, 1.8, 2.5)	K_{2p}	diag(3.9, 3.9, 5.3)
K_{1a}	diag(6.0, 6.0, 2.5)	K_{2a}	diag(3.0, 3.0, 1.5)
A_1	diag(2.0, 2.0, 2.2)	B_1	diag(5.5, 5.5, 6.0)
D_1	diag(5.5, 5.5, 6.0)	A_2	diag(3.5, 3.5, 3.0)
B_2	diag(2.4, 2.4, 2.0)	D_2	diag(2.4, 2.4, 2.0)

Kết quả được biểu diễn từ hình 3 đến hình 8.

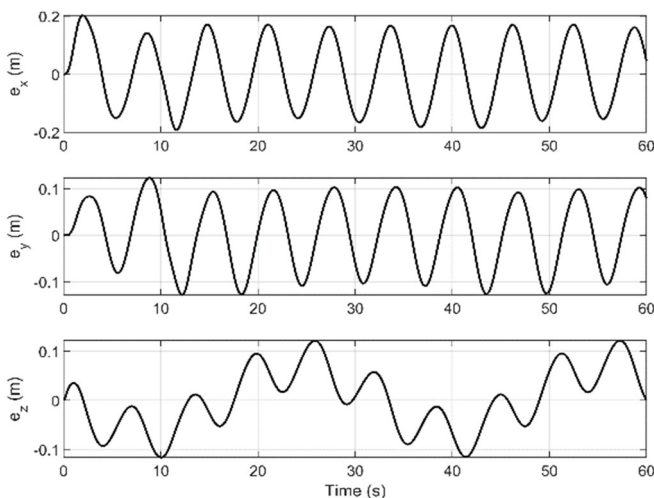


Hình 3. Biểu diễn chuyển động theo quỹ đạo 3D

Nhận xét: Từ hình 3 cho thấy, quỹ đạo bay không gian ba chiều của Quadrotor dưới tác động của bộ điều khiển BND-Backstepping. Quỹ đạo chuyển động thực bám quỹ đạo chuyển động đặt với sai lệch nhỏ cho phép.

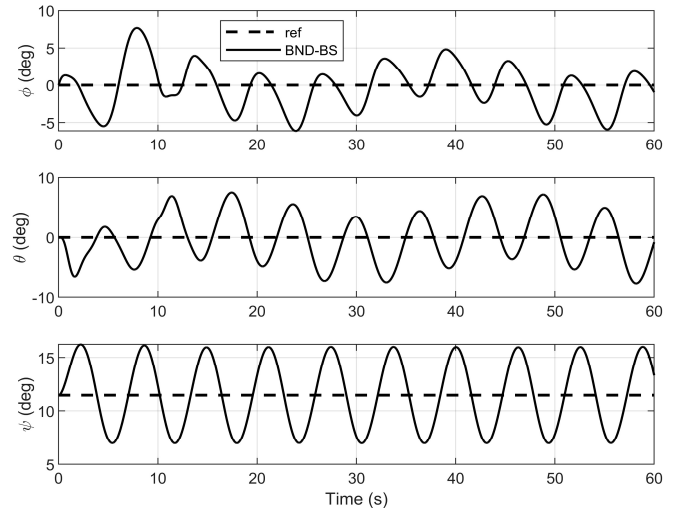


Hình 4. Biểu diễn đáp ứng vị trí theo trục x, y, z

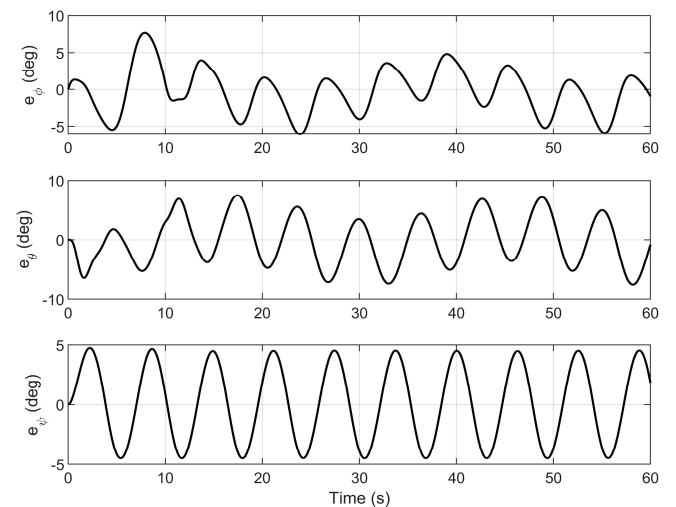


Hình 5. Biểu diễn sai vị trí của trục x, y, z

Nhận xét: Hình 4 và 5 cho thấy, biên độ sai lệch được giữ trong các giới hạn xấp xỉ $|e_x| \leq 0,201\text{m}$, $|e_y| \leq 0,123\text{m}$ và $|e_z| \leq 0,121\text{m}$. Sai lệch theo phương thẳng đứng vẫn tồn tại thành phần lệch tĩnh nhỏ, phản ánh khả năng bù bất định chưa hoàn toàn triệt tiêu của bộ điều khiển BND trong điều kiện nhiễu và thay đổi tham số.

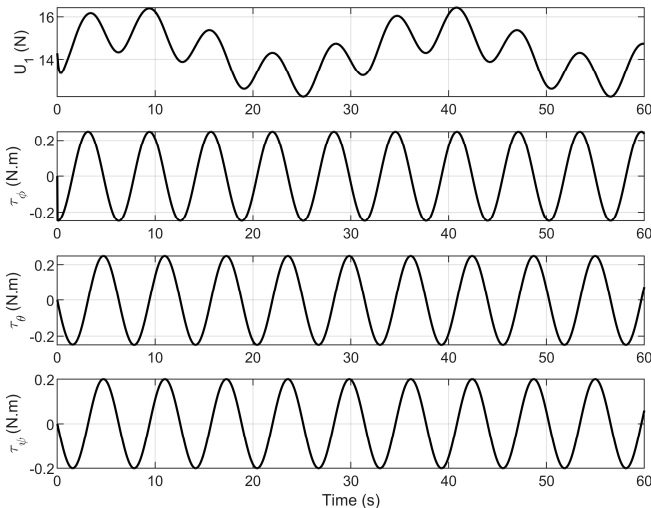


Hình 6. Đáp ứng các góc Euler



Hình 7. Sai lệch góc Euler

Nhận xét: Hình 6 và 7 thể hiện đáp ứng các góc Euler và sai lệch góc Euler của Quadrotor. Các góc roll và pitch dao động với biên độ tương đối lớn do trực tiếp tham gia vào việc tạo lực tịnh tiến để bám quỹ đạo, trong khi góc yaw có đáp ứng trơn hơn. Dù tồn tại dao động, các trạng thái góc vẫn được duy trì trong miền an toàn và không gây mất ổn định hệ thống. Sai lệch góc roll và pitch dao động trong khoảng $\pm(4,5^\circ - 7,6^\circ)$, trong khi sai lệch góc yaw nhỏ hơn, duy trì trong khoảng $\pm 4,5^\circ$. Điều này cho thấy cấu trúc backstepping thuần túy chưa tạo đủ độ suy giảm (damping) để triệt tiêu dao động trong các chuyển động phức tạp.



Hình 8. Tín hiệu điều khiển

Nhận xét: Hình 8 cho thấy lực đẩy tổng U_1 biến thiên trong khoảng 12,2 - 16,6N để đáp ứng chuyển động xoắn ốc kết hợp leo cao, trong khi các mô-men điều khiển luôn nằm trong giới hạn $\pm 0,2\text{Nm}$. Không xuất hiện hiện tượng bão hòa hay rung giật mạnh, cho thấy bộ điều khiển có khả năng triển khai thực tế.

5. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, một bộ điều khiển bám quỹ đạo cho Quadrotor UAV đã được đề xuất dựa trên cấu trúc kết hợp Backstepping và Bio-inspired Neural Dynamics (BND) cho mô hình động lực học phi tuyến đầy đủ sáu bậc tự do. Bộ điều khiển được thiết kế theo dạng phân cấp cho các kênh tịnh tiến và quay, trong đó BND đóng vai trò xấp xỉ và bù các nhiễu/bất định mô hình và nhiễu ngoại sinh bị chặn, đồng thời đảm bảo tính trơn và bị chặn của các tín hiệu điều khiển. Phân tích Lyapunov cho thấy hệ kín đạt ổn định tiệm cận, và các mô-men điều khiển sinh ra là hữu hạn.

Các kết quả mô phỏng trên quỹ đạo không gian ba chiều dạng xoắn ốc cho thấy bộ điều khiển BND-Backstepping đảm bảo được tính ổn định của hệ và khả năng bám quỹ đạo trong điều kiện tồn tại đồng thời bất định mô hình và nhiễu ngoại sinh. Quỹ đạo thực bám sát quỹ đạo tham chiếu, các tín hiệu điều khiển duy trì trong giới hạn cho phép và không xuất hiện hiện tượng bão hòa hay mất ổn định trong suốt quá trình mô phỏng.

Tuy nhiên, kết quả cũng cho thấy sai lệch bám vị trí và góc Euler vẫn còn tồn tại với biên độ đáng kể, đặc biệt tại các trục x, z và các góc quay roll, pitch khi Quadrotor thực hiện chuyển động xoắn ốc có độ cong lớn và thay đổi độ cao đồng thời. Nguyên nhân chủ yếu xuất phát từ cấu trúc Backstepping thuần túy trong kênh quay có

độ suy giảm hạn chế, cũng như khả năng bù của mô hình BND còn mang tính xấp xỉ và chưa đủ mạnh để triệt tiêu hoàn toàn các dao động phát sinh trong các kịch bản quỹ đạo phức tạp.

Nhìn chung, phương pháp BND-Backstepping thể hiện ưu điểm về cấu trúc rõ ràng, dễ triển khai và đảm bảo ổn định, song vẫn còn hạn chế về độ chính xác bám trong các bài toán chuyển động phức tạp. Đây là cơ sở để định hướng các nghiên cứu tiếp theo theo hướng tăng cường độ bền vững và khả năng bám quỹ đạo, chẳng hạn như kết hợp BND với điều khiển trượt, điều khiển hữu hạn thời gian, hoặc tích hợp thêm cơ chế quan sát và bù nhiễu nhằm nâng cao hiệu năng và khả năng ứng dụng thực tế của phương pháp đề xuất.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED), mã số 107.01-2017.306.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. S. Bouabdallah, P. Murrieri, R. Siegwart, "Design and control of a Quadrotor UAV," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 4393–4398, 2004.
- [2]. R. Mahony, V. Kumar, P. Corke, "Multirotor aerial vehicles: Modeling, estimation, and control of Quadrotor," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 19, 3, 20-32, 2012.
- [3]. M. Faessler, F. Fontana, D. Scaramuzza, "Nonlinear H_∞ control for aggressive Quadrotor flight," *Automatica*, 52, 298-305, 2015.
- [4]. M. Muthusamy, S. Balasubramani, "Adaptive backstepping control for Quadrotor with uncertainties," *ISA Transactions*, 113, 95-107, 2021.
- [5]. Y. Caballero-Martin, et al., "Robust backstepping trajectory tracking for UAVs with disturbances," *Aerospace Science and Technology*, 139, 2024.
- [6]. M. Krstic, I. Kanellakopoulos, P. Kokotovic, *Nonlinear and Adaptive Control Design*. John Wiley & Sons, 1995.
- [7]. H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, 3rd ed. Prentice Hall, 2002.
- [8]. Z. Doukhi, A. Abdallah, "Intelligent controller design for Quadrotor stabilization with uncertainties," *Journal of Advanced Transportation*, 2017.
- [9]. A. Mokhtari, A. Benallegue, "Dynamic modeling and sliding mode control of a Quadrotor," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2006.
- [10]. X. Zhao, Y. Sun, "Terminal sliding mode control for UAV trajectory tracking with disturbances," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67, 12, 10342-10352, 2020.
- [11]. V. Borja-Jaimes, et al., "Backstepping sliding mode control of Quadrotor UAV with super-twisting observer," *Applied Sciences*, 15, 2025.

- [12]. V. I. Utkin, "Variable structure systems with sliding modes," *IEEE Transactions on Automatic Control*, 22, 2, 212-222, 1977.
- [13]. V. Utkin, J. Guldner, J. Shi, *Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems*. CRC Press, 2009.
- [14]. M. Jafari, D. Xu, "Adaptive neural sliding mode control for Quadrotor UAV with uncertainties," *Neurocomputing*, 275, 184-197, 2018.
- [15]. A. Dooraki, D. Lee, "RBF neural network based backstepping control for Quadrotor trajectory tracking," *Drones*, 2, 30, 2018.
- [16]. H. Abdilllah, et al., "Neural network-based adaptive control of UAV under external disturbances," *Applied Soft Computing*, 146, 2024.
- [17]. L. Chen, F. Gao, "Bio-inspired flight controller using deep reinforcement learning," *IEEE Transactions on Cybernetics*, 54, 3, 1341-1353, 2024.
- [18]. J. Klausen, et al., "Model-free reinforcement learning for Quadrotor trajectory tracking using PPO," *Robotics and Autonomous Systems*, 150, 2022.
- [19]. M. Izadi, et al., "High-gain disturbance observer for robust Quadrotor control," *Control Engineering Practice*, 136, 2024.
- [20]. Y. Nettari, et al., "Adaptive robust backstepping sliding mode control for Quadrotor UAV," *IFAC PapersOnLine*, 55, 12, 2022.
- [21]. R. Mousavi, et al., "Observer-based adaptive neural control for Quadrotor UAV," *Actuators*, 13, 5, 2024.
- [22]. P. C. Yuste, et al., "Simulation-based evaluation of reinforcement learning for Quadrotor control," *Neurocomputing*, 543, 2024.
- [23]. Y. Liu, et al., "Continual reinforcement learning control for Quadrotor UAV in wind disturbance," *Sensors*, 25, 2025.
- [24]. T. Huang, et al., "Disturbance-observer-based fixed-time backstepping control for UAVs," *Drones*, 9, 2025.
- [25]. F. Wang et al., "Disturbanceobserver-based backstepping formation control of Quadrotors," *Applied Mathematics and Computation*, 428, 2022.
- [26]. S. Grossberg, "Nonlinear neural networks: Principles, mechanisms, and architectures," *Neural Networks*, 1, 1, 17-61, 1988.
- [27]. S. X. Yang, M. Q. H. Meng, "An efficient neural network approach to dynamic robot motion planning," *Neural Networks*, 13, 2, 143-148, 2000.
- [28]. Z. Xu, T. Yan, S. X. Yang, S. A. Gadsden, "Bioinspired backstepping sliding mode control and adaptive sliding innovation filter of Quadrotor unmanned aerial vehicles," *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 3, 100116, 2023.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Thi Hien^{1,2}, Nguyen Hoai Nam², Vo Thu Ha¹

¹Faculty of Electrical Engineering and Automation, University of Economics - Technology for Industries, Vietnam

²School of Electrical Engineering and Electronics, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam