

MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG RUNG ĐỘNG ĐẾN ƯỚC LƯỢNG GÓC NGHIÊNG CỦA QUADROTOR SỬ DỤNG BỘ LỌC KALMAN VÀ CẢM BIẾN MPU6050

EXPERIMENTAL EVALUATION OF VIBRATION EFFECTS ON QUADROTOR TILT ANGLE ESTIMATION USING A KALMAN FILTER AND MPU6050 SENSOR

¹ Dương Mạnh Hùng, ¹ Nguyễn Trung Tấn, ¹ Phan Nhật Giang, ² Đặng Anh Tú

¹ Học viện Kỹ thuật Quân sự, ² Học viện Phòng không Không Quân

Ngày nhận bài: 12/6/2025, Ngày chấp nhận đăng: 11/8/2025

Tóm tắt:

Trong các hệ thống quadrotor thương mại hiện nay, các bo mạch điều khiển thường được tích hợp sẵn dưới dạng hộp đen, hạn chế khả năng tùy biến và tối ưu trong các ứng dụng đặc thù hoặc điều kiện vận hành khắc nghiệt. Nhằm giải quyết vấn đề này và hướng tới việc làm chủ công nghệ điều khiển, nhóm tác giả đề xuất một mô hình thực nghiệm triển khai trên giá quay ba trục, cho phép khảo sát động lực học và thiết kế bộ điều khiển cho các kênh điều khiển góc của mô hình quadrotor. Thông qua quá trình này, các tham số điều khiển được xác định để phục vụ cho việc ổn định và điều khiển góc quay. Góc quay được đo bằng cảm biến MPU6050 – một cảm biến phổ biến tích hợp gia tốc kế và con quay hồi chuyển – và xử lý bởi vi điều khiển STM32F303CCT6 chi phí thấp. Ngoài ra, hệ thống thực nghiệm còn được sử dụng để điều chỉnh các tham số của bộ lọc Kalman, qua đó đánh giá hiệu quả của thuật toán trong các điều kiện vận hành thực tế. Mô hình có thể được ứng dụng trong thiết kế, phát triển bộ điều khiển tùy biến, cũng như phục vụ đào tạo và nghiên cứu trong lĩnh vực điều khiển bay không người lái.

Từ khóa: Máy bay không người lái; Điều khiển UAV; Bộ lọc Kalman, IMU, MPU6050

Abstract:

In most commercial quadrotor systems, the control boards are pre-integrated as closed systems, limiting user access to internal parameters and customization for specific applications or harsh operating conditions. To address this limitation and advance the capability to design custom control systems, this study introduces an experimental model implemented on a three-axis rotational stand. The platform enables investigation of attitude dynamics and development of control algorithms for angular motion channels of a quadrotor model. Angular orientation is measured using the MPU6050 sensor an integrated accelerometer and gyroscope and processed by a cost-effective STM32F303CCT6 microcontroller. The experimental setup is also employed to tune parameters of the Kalman filter, facilitating evaluation of the algorithm's performance under real-world operating conditions. The proposed system serves as a foundation for customized controller design and is well-suited for educational and research purposes in unmanned aerial vehicle (UAV) control.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle (UAV); UAV Control; Kalman Filter; IMU; MPU6050

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đơn vị đo lường quán tính (Inertial Measurement Unit – IMU) là một thành

phần quan trọng trong các hệ thống giám sát, chẩn đoán và điều khiển, được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như

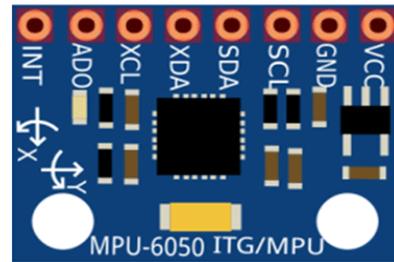
thiết bị bay không người lái (UAV), điều hướng và giao thông, ô tô tự hành, thiết bị di động, phân tích chuyển động con người, người máy, và các hệ thống điều khiển thông minh khác ([5], [7], [8]).

Một IMU tiêu chuẩn thường tích hợp cảm biến gia tốc ba trục và con quay hồi chuyển ba trục, cho phép đo các đại lượng vật lý như gia tốc tuyến tính và tốc độ góc. Với ưu điểm về chi phí thấp, tiêu thụ điện năng nhỏ, độ chính xác tương đối cao và dễ tích hợp, IMU trở thành lựa chọn phổ biến trong các hệ thống nhúng và thiết bị di động [6].



Hình 1. Mô hình quadrotor

Tuy nhiên, các thông số kỹ thuật mà nhà sản xuất cung cấp trong bảng dữ liệu thường chỉ phản ánh hiệu suất thiết bị trong điều kiện làm việc danh định. Trong khi đó, ảnh hưởng của các yếu tố môi trường như nhiệt độ, độ ẩm, rung động cơ học và va đập đến độ chính xác đo lường và độ tin cậy lâu dài của hệ thống vẫn chưa được đánh giá đầy đủ [1].



Hình 2. MPU6050

Đối với ứng dụng quadrotor [9], IMU thường phải hoạt động trong môi trường rung động cao gây ra bởi động cơ đẩy hoặc nhiễu từ gió. Đây là yếu tố có thể làm sai lệch việc ước lượng góc nghiêng (roll, pitch) nếu không được xử lý đúng cách.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả thực hiện thực nghiệm nhằm xác định các đặc trưng nhiễu của cảm biến IMU thương mại MPU6050 (Hình 2) khi lắp đặt trên mô hình quadrotor (Hình 1). Dựa trên dữ liệu đo thực tế, các tham số cho bộ lọc Kalman được thiết lập lại nhằm tăng cường hiệu suất ước lượng góc trong điều kiện rung động đặc trưng từ hệ thống động cơ.

2. THUẬT TOÁN ƯỚC LƯỢNG GÓC NGHIÊNG CỦA MÔ HÌNH QUADROTOR

2.1. Đọc dữ liệu từ đơn vị đo lường quán tính MPU6050

MPU6050 là cảm biến tích hợp bao gồm gia tốc kế và con quay hồi chuyển ba trục, thường được sử dụng trong các hệ thống nhúng nhờ đặc tính nhỏ gọn, chi phí thấp và dễ tích hợp. Trong nghiên cứu này, MPU6050 được cấu hình hoạt động với giao thức truyền dữ liệu I²C, kết nối với vi điều khiển STM32F303CCT6 để thu thập và xử lý tín hiệu cảm biến. Cảm biến cho phép đo hai đại lượng vật lý chính: Gia tốc tuyến tính trên ba trục (A_x , A_y , A_z), Tốc độ góc quanh ba trục (G_x , G_y , G_z).

Sau khi khởi tạo và hiệu chuẩn, dữ liệu thô từ MPU6050 được lấy mẫu định kỳ ở tần số 1kHz. Tín hiệu đo được xử lý sơ bộ qua bộ lọc thông thấp để loại bỏ nhiễu tần số cao, sau đó được quy đổi sang đơn vị vật lý tương ứng (m/s² hoặc g, rad/s) để đưa vào thuật toán ước lượng góc nghiêng.

Hiệu chỉnh và chuyển đổi dữ liệu cảm biến: Để sử dụng dữ liệu từ gia tốc kế và con quay hồi chuyển nhằm ước lượng góc nghiêng (roll, pitch), dữ liệu thô cần được chuyển đổi sang đơn vị góc. Trong giai đoạn khởi tạo, cảm biến được giữ cố định để lấy mẫu nhằm tính sai số tĩnh *Bias*. Dữ liệu đầu ra được hiệu chỉnh bằng cách bù sai số tĩnh và chia cho hệ số độ nhạy (*Sensitivity*) theo công thức:

$$A_{real} = (A_{raw} - Bias) / Sensitivity \quad (1)$$

Trong đó: A_{real} là gia tốc thực sau hiệu chỉnh; A_{raw} là dữ liệu thô từ cảm biến; *Bias* là sai số tĩnh; *Sensitivity* là độ nhạy do nhà sản xuất cung cấp. Sau khi xử lý, góc nghiêng có thể tính theo dữ liệu gia tốc kế như sau:

$$Roll = \arctan(A_y / A_z) \quad (2)$$

$$Pitch = \arctan(-A_x / \sqrt{A_y^2 + A_z^2}) \quad (3)$$

Đối với con quay hồi chuyển, dữ liệu thô đầu ra thường có đơn vị là độ/giây (°/s). Sau khi hiệu chỉnh theo sai số tĩnh và hệ số độ nhạy, dữ liệu được tích phân theo thời gian để cập nhật góc nghiêng (*Roll/Pitch*):

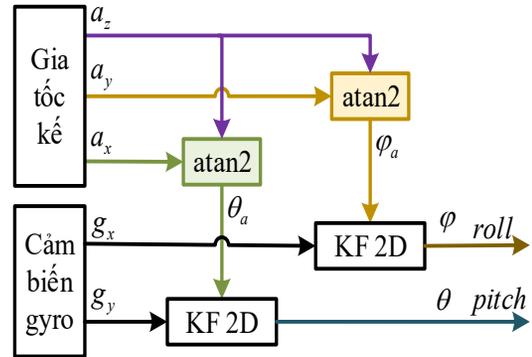
$$\theta(t) = \theta(t - \Delta t) + (\omega_{gyro} - Bias) \cdot \Delta t \quad (4)$$

Trong đó: $\theta(t)$ là góc nghiêng (*Roll/Pitch*) tại thời điểm t ; ω_{gyro} là tốc độ góc (*Roll/Pitch*) thu được từ con quay hồi

chuyển.

2.2. Thuật toán ước lượng góc nghiêng sử dụng bộ lọc Kalman

Bộ lọc Kalman nói chung là một bộ ước lượng tuyến tính tối ưu theo tiêu chuẩn cực tiểu phương sai của sai số ước lượng [15].



Hình 3. Sơ đồ thực hiện ước lượng góc nghiêng sử dụng thuật toán lọc Kalman 2D

Với dạng đệ quy (recursive), bộ lọc này phù hợp để triển khai trên các bộ vi xử lý nhúng, nhờ hiệu quả tính toán và khả năng cập nhật trạng thái liên tục theo thời gian thực. Trong nghiên cứu này, bộ lọc Kalman hai thành phần được sử dụng để ước lượng góc nghiêng (*roll/pitch*) từ hai nguồn dữ liệu: Góc nghiêng thô tính từ gia tốc kế; Tốc độ góc đo từ cảm biến con quay hồi chuyển. Sơ đồ hoạt động của bộ lọc được minh họa trong (Hình 3). Các phương trình bộ lọc Kalman:

Quan sát: $y_k = Hx_k + r_k \quad (5)$

Động học: $x_k = Ax_{k-1} + q_{k-1} \quad (6)$

trong đó: $y_k = [y_k^a \ y_k^g]^T$; y_k^a, y_k^g - phép đo cập nhật từ gia tốc kế và con quay hồi chuyển với thời gian lấy mẫu Δt ; $x_k = [\alpha_k \ \dot{\alpha}_k]^T$ - trạng thái vị trí góc và vận tốc góc; $r_k = \begin{bmatrix} R_\alpha & 0 \\ 0 & R_{\dot{\alpha}} \end{bmatrix}$; $R_\alpha, R_{\dot{\alpha}}$ là

phương sai nhiễu quan sát;

$$\mathbf{q}_k = \begin{bmatrix} Q_\alpha & 0 \\ 0 & Q_{\dot{\alpha}} \end{bmatrix}; Q_\alpha, Q_{\dot{\alpha}} - \text{phương sai}$$

nhiều động học; $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ - ma trận

quan sát; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ - ma trận động học;

B1) Dự đoán trạng thái tiên nghiệm:

$$\tilde{\mathbf{x}}_{k-1} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} \quad (7)$$

Với: $\tilde{\alpha}_k = \hat{\alpha}_{k-1} + \Delta t \cdot \hat{\alpha}_{k-1}$; $\hat{\alpha}_k = \hat{\alpha}_{k-1}$

B2) Hiệp phương sai tiên nghiệm:

$$\tilde{\mathbf{P}}_{k-1} = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (8)$$

$$\tilde{\mathbf{P}}_{k-1} = \begin{bmatrix} \tilde{p}_{k-1}^1 & \tilde{p}_{k-1}^2 \\ \tilde{p}_{k-1}^3 & \tilde{p}_{k-1}^4 \end{bmatrix}; \mathbf{P}_{k-1} = \begin{bmatrix} p_{k-1}^1 & p_{k-1}^2 \\ p_{k-1}^3 & p_{k-1}^4 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{p}_{k-1}^1 = p_{k-1}^1 + \Delta t(p_{k-1}^2 + p_{k-1}^3 + \Delta t \cdot p_{k-1}^4) + Q_\alpha$$

$$\tilde{p}_{k-1}^2 = p_{k-1}^2 + \Delta t \cdot p_{k-1}^4; \tilde{p}_{k-1}^3 = p_{k-1}^3 + \Delta t \cdot p_{k-1}^4;$$

$$\tilde{p}_{k-1}^4 = p_{k-1}^4 + Q_{\dot{\alpha}};$$

B3) Tính hệ số hiệu chỉnh Kalman:

$$\mathbf{K}_k = \tilde{\mathbf{P}}_{k-1}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\tilde{\mathbf{P}}_{k-1}\mathbf{H} + \mathbf{R})^{-1} \quad (9)$$

$$\mathbf{K}_k = \begin{bmatrix} K_k^1 & K_k^2 \\ K_k^3 & K_k^4 \end{bmatrix} \text{ trong đó:}$$

$$K_k^1 = \tilde{p}_{k-1}^1 \cdot q_{k-1}^1 + \tilde{p}_{k-1}^2 \cdot q_{k-1}^3;$$

$$K_k^2 = \tilde{p}_{k-1}^1 \cdot q_{k-1}^2 + \tilde{p}_{k-1}^2 \cdot q_{k-1}^4;$$

$$K_k^3 = q_{k-1}^1 \cdot \tilde{p}_{k-1}^3 + q_{k-1}^3 \cdot \tilde{p}_{k-1}^4;$$

$$K_k^4 = \tilde{p}_{k-1}^3 \cdot q_{k-1}^2 + \tilde{p}_{k-1}^4 \cdot q_{k-1}^4;$$

$$\mathbf{D} = \tilde{p}_{k-1}^1 \cdot \tilde{p}_{k-1}^4 + \tilde{p}_{k-1}^1 \cdot R_{\dot{\alpha}} - \tilde{p}_{k-1}^2 \cdot \tilde{p}_{k-1}^3 + \tilde{p}_{k-1}^4 \cdot R_\alpha + R_\alpha \cdot R_{\dot{\alpha}}$$

$$q_k^1 = (\tilde{p}_{k-1}^4 + R_{\dot{\alpha}})/\mathbf{D}; q_k^2 = -\tilde{p}_{k-1}^2/\mathbf{D};$$

$$q_k^3 = -\tilde{p}_{k-1}^3/\mathbf{D}; q_k^4 = (\tilde{p}_{k-1}^1 + R_\alpha)/\mathbf{D};$$

B4) Cập nhật trạng thái hậu nghiệm:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \tilde{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{K}_k(\mathbf{y}_k - \mathbf{H}\tilde{\mathbf{x}}_{k-1}) \quad (10)$$

trong đó:

$$\hat{\alpha}_k = \tilde{\alpha}_k + K_k^1(y_k^a - \tilde{\alpha}_k) + K_k^2(y_k^g - \tilde{\alpha}_k);$$

$$\hat{\dot{\alpha}}_k = \tilde{\dot{\alpha}}_k + K_k^3(y_k^a - \tilde{\alpha}_k) + K_k^4(y_k^g - \tilde{\alpha}_k);$$

B5) Hiệp phương sai hậu nghiệm:

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{H})\tilde{\mathbf{P}}_{k-1} \quad (11)$$

trong đó:

$$p_k^1 = (1 - K_k^1)\tilde{p}_{k-1}^1 - K_k^2\tilde{p}_{k-1}^3;$$

$$p_k^2 = (1 - K_k^1)\tilde{p}_{k-1}^2 - K_k^2\tilde{p}_{k-1}^4;$$

$$p_k^3 = -K_k^3\tilde{p}_{k-1}^1 + (1 - K_k^4)\tilde{p}_{k-1}^3;$$

$$p_k^4 = -K_k^3\tilde{p}_{k-1}^2 + (1 - K_k^4)\tilde{p}_{k-1}^4;$$

Vòng lặp được thực hiện từ **B1** đến **B5**.

Với mục đích thực thi trên vi điều khiển thông dụng, các phép toán ma trận cần được chuyển đổi tách ra thành các phương trình tính toán riêng lẻ tương ứng với từng bước.

Ý nghĩa của tham số Q và R trong bộ lọc Kalman: Trong cấu trúc của bộ lọc Kalman, hai tham số quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác của quá trình ước lượng là ma trận nhiễu động học (**Q**) và ma trận nhiễu quan sát (**R**). Việc lựa chọn hoặc xác định đúng các giá trị này có vai trò quyết định đến chất lượng và tính ổn định của bộ lọc trong thực tế.

Q – Ma trận hiệp phương sai nhiễu động học (process noise covariance) thể hiện mức độ tin tưởng vào mô hình động học của hệ thống. Giá trị Q càng lớn, bộ lọc càng “mở” hơn với khả năng hệ thống có thể thay đổi nhanh hoặc không chính xác theo mô hình ước lượng. Nếu Q quá nhỏ, bộ lọc dễ “cứng”, phản ứng chậm và có thể bỏ qua các thay đổi thực sự xảy ra.

R – Ma trận hiệp phương sai nhiễu quan sát (measurement noise covariance) phản ánh độ tin cậy của dữ liệu cảm biến đo

được. Giá trị R càng lớn, bộ lọc càng giảm niềm tin vào số liệu đo, và ngược lại. Trong thực tế, dữ liệu từ gia tốc kế thường nhiễu cao hơn, đặc biệt trong điều kiện rung động mạnh như quadrotor khi động cơ hoạt động.

Tác động thực tế: Nếu Q quá lớn và R quá nhỏ \rightarrow bộ lọc phản ứng rất nhanh, nhưng dễ bị dao động hoặc nhiễu. Nếu Q quá nhỏ và R quá lớn \rightarrow bộ lọc phản ứng chậm, dễ trễ và không theo kịp chuyển động thực tế.

Do đó, việc xác định đúng các tham số Q và R phù hợp với điều kiện làm việc thực tế của hệ thống quadrotor là cực kỳ quan trọng. Thay vì sử dụng giá trị mặc định hoặc lý thuyết, nghiên cứu này tiến hành thực nghiệm để ước lượng Q và R dựa trên dữ liệu thực, từ đó tối ưu hóa hiệu suất ước lượng góc nghiêng trong môi trường có rung động đặc trưng của quadrotor.

3. PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM THỐNG KÊ XÁC ĐỊNH THAM SỐ NHIỀU CHO BỘ LỌC KALMAN

3.1 Phương pháp phương sai Allan (AVAR – Allan Variance) thực nghiệm thống kê xác định phương sai nhiễu quan sát bộ lọc Kalman ước lượng góc nghiêng.

Phương sai Allan (*Allan Variance* – AVAR) [4] là một phương pháp thống kê hiệu quả được sử dụng để phân tích các loại nhiễu khác nhau trong cảm biến, đặc biệt là trong hệ thống đo quán tính như IMU. Phương pháp này dựa trên kỹ thuật lấy mẫu theo cụm (*cluster sampling*) để đánh giá độ ổn định và các thành phần nhiễu như *white noise*, *bias instability*, *random walk*, v.v.

Trong trường hợp cảm biến quán tính

IMU (gồm gia tốc kế và con quay hồi chuyển ba trục), tín hiệu đầu vào có thể được mô tả dưới dạng một véc-tơ tín hiệu liên tục theo thời gian: $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ với N là số mẫu thu được tại chu kỳ lấy mẫu Δt . Thời lượng mỗi cụm dữ liệu (*cluster*) được định nghĩa là $T = m \cdot \Delta t$, trong đó m là số mẫu trong mỗi cluster. Giá trị trung bình của cụm thứ i được xác định như sau:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{m} \left(\sum_{k=(i-1)m+1}^{im} x_k \right) \quad (12)$$

với $i = 1, 2, \dots, K$ và $K = \lceil N/m \rceil$ là tổng số cluster không trùng lặp. Phương sai Allan được tính từ các cụm giá trị trung bình:

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2(K-1)} \sum_{i=1}^{K-1} (\bar{x}_{i+1} - \bar{x}_i)^2 \quad (13)$$

Cấu hình cảm biến và thu thập dữ liệu:

Trong nghiên cứu này, cảm biến IMU sử dụng là MPU6050, tích hợp gia tốc kế và con quay hồi chuyển ba trục, kết nối với vi điều khiển STM32F303CCT6 thông qua giao tiếp I²C. Dữ liệu thô được lấy mẫu ở tần số 1 kHz, với bộ lọc thông thấp kỹ thuật số tích hợp sẵn trong MPU6050. Dữ liệu sau đó được truyền qua giao tiếp USB từ STM32F303 lên máy tính để xử lý. Thực nghiệm AVAR được tiến hành theo các bước:

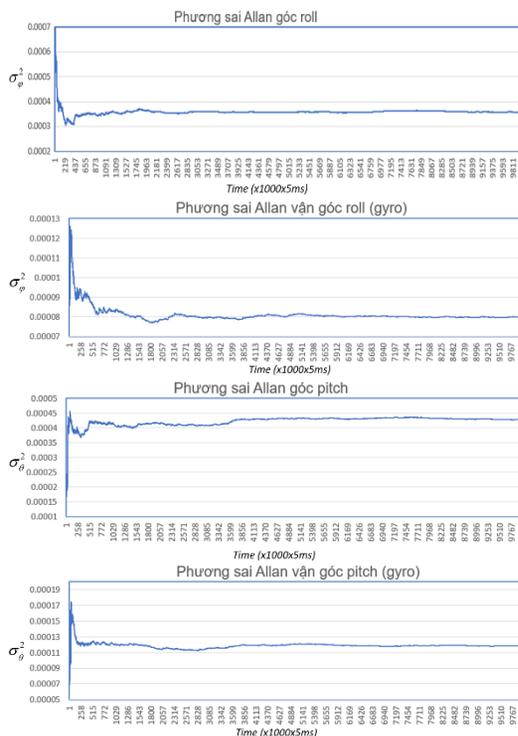
- + Thu thập dữ liệu tại trạng thái tĩnh trong thời gian dài.
- + Lấy mẫu từ $N = 10^6$ điểm dữ liệu, chia thành các cụm có độ dài $m = 10^3$ mẫu.
- + Tính phương sai Allan cho các tham số liên quan đến ước lượng góc nghiêng.

Hai dạng tín hiệu được sử dụng để phân tích AVAR:

+) θ_{acc} : Góc roll và pitch tính toán từ dữ liệu gia tốc kế.

+) ω_{gyro} : Tốc độ góc roll và pitch đo từ con quay hồi chuyển.

Một ví dụ kết quả thực nghiệm được biểu diễn dưới dạng đồ thị (Hình 5), cho phép xác định gần đúng giá trị phương sai đo R tương ứng kênh góc roll: $R_{\phi} \approx 0,00037$; $R_{\dot{\phi}} = 0,0000796$, kênh góc pitch: $R_{\psi} \approx 0,00043$; $R_{\dot{\psi}} = 0,0000119$;



Hình 4. Thực nghiệm thống kê Phương sai Allan

3.2 Thực nghiệm xác định tham số bộ lọc Kalman ước lượng góc nghiêng

Trong cấu trúc bộ lọc Kalman, ma trận Q và R lần lượt đại diện cho **phương sai nhiễu hệ thống** (nhiều động học) và **phương sai nhiễu đo lường** (quan sát). Chất lượng và hiệu suất của bộ lọc phụ thuộc mạnh mẽ vào cách lựa chọn hai tham số này. Trong phần lớn các trường hợp

thực tế, giá trị của Q và R thường được lựa chọn thông qua quá trình thử – sai, nhằm đảm bảo bộ lọc đạt được **sự ổn định, tính hội tụ nhanh**, và **khả năng khử nhiễu tốt** trong các điều kiện hoạt động khác nhau.

Một trong những yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến đặc tính động của bộ lọc là **tỷ số giữa Q và R** . Tỷ số này thể hiện mức độ ưu tiên giữa mô hình hệ thống (*predictor*) và tín hiệu đo lường (*measurement*):

+) Khi **Q/R nhỏ** \rightarrow bộ lọc tin tưởng nhiều hơn vào dữ liệu đo \rightarrow hội tụ chậm hơn, độ trễ lớn hơn, nhưng ổn định hơn.

+) Khi **Q/R lớn** \rightarrow bộ lọc tin nhiều vào mô hình hệ thống \rightarrow hội tụ nhanh, phản ứng nhạy, nhưng dễ bị nhiễu nếu mô hình không chính xác.

Thực nghiệm xác định tỷ số Q/R : Để đánh giá ảnh hưởng của tỷ số Q/R đến hiệu quả ước lượng, các thử nghiệm được thực hiện trong hai điều kiện:

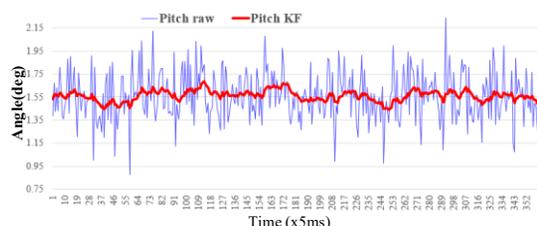
+) **Điều kiện tĩnh:** Quadrotor đứng yên, bốn động cơ không hoạt động (Hình 5)

+) **Điều kiện có rung động:** Quadrotor cố định nhưng bốn động cơ hoạt động tạo ra rung thực tế (Hình 6).

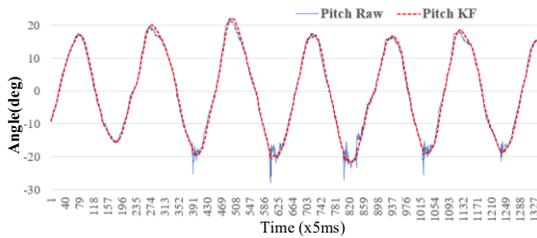
Dữ liệu được thu thập từ cảm biến IMU (MPU6050) và xử lý theo hai kênh:

+) **Tín hiệu thô:** góc pitch tính toán trực tiếp từ gia tốc kế (*đường nét mảnh*);

+) **Tín hiệu đã lọc:** kết quả đầu ra từ bộ lọc Kalman với tỷ số Q/R được điều chỉnh (*đường nét đậm*).

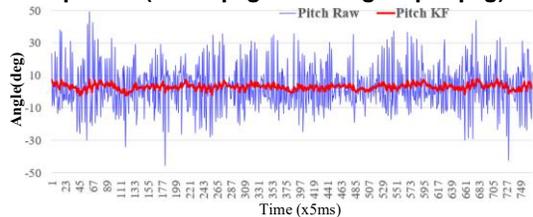


(a) Góc pitch không thay đổi

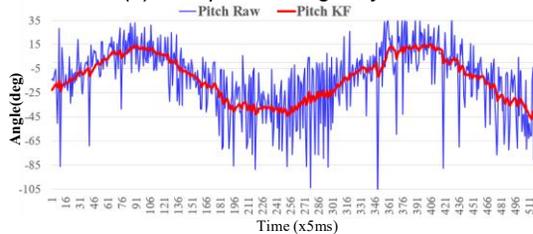


(b) Góc pitch thay đổi

Hình 5. Đồ thị ước lượng góc Pitch trong điều kiện tĩnh (bốn động cơ không hoạt động)



(a) Góc pitch không thay đổi



(b) Góc pitch thay đổi

Hình 6. Đồ thị ước lượng góc Pitch trong điều kiện rung động (bốn động cơ hoạt động)

Phân tích kết quả (Hình 5 và Hình 6):

Trong điều kiện tĩnh (Hình 5), cả hai tín hiệu thô và đã lọc đều khá ổn định, tín hiệu Kalman cho kết quả mượt hơn và giảm nhiều biên độ nhỏ rõ rệt. Trong điều kiện rung động (Hình 6), tín hiệu thô bị nhiễu mạnh do ảnh hưởng của rung động từ động cơ. Trong khi đó, bộ lọc Kalman vẫn duy trì được tín hiệu ổn định và mượt, loại bỏ hầu hết thành phần dao động không mong muốn. Sau quá trình thử nghiệm nhiều cấu hình, một tỷ số $Q/R \approx 0.01$ phù hợp đã được xác định, cho phép bộ lọc đáp ứng tốt cả về tốc độ hội tụ và khả năng chống nhiễu. Kết quả này là cơ sở để lựa chọn tham số tối ưu cho bộ lọc Kalman trong điều kiện ứng dụng thực tế trên quadrotor.

Các kết quả thực nghiệm trong nghiên cứu này được thực hiện với một module cảm biến MPU6050 cụ thể, trong điều kiện lắp đặt và môi trường rung động nhất định.

Do đặc điểm sản xuất hàng loạt và sai số hiệu chuẩn nội bộ, các cảm biến MPU6050 khác nhau có thể có đặc trưng nhiễu và đáp ứng động học không hoàn toàn giống nhau.

Do đó, các tham số bộ lọc Kalman được xác định trong nghiên cứu này không mang tính đại diện tuyệt đối cho mọi cảm biến MPU6050, mà cần được hiệu chỉnh lại tùy theo từng ứng dụng cụ thể và điều kiện vận hành thực tế.

5. KẾT LUẬN

Kết quả thực nghiệm cho thấy rằng, các rung động từ hệ thống cơ khí, đặc biệt là từ động cơ của quadrotor, ảnh hưởng đáng kể đến độ chính xác của phép đo góc nghiêng khi sử dụng cảm biến IMU MPU6050 – một module phổ biến có chi phí thấp. Trong bối cảnh đó, thuật toán lọc Kalman được chứng minh là một giải pháp hiệu quả giúp khử nhiễu và cải thiện độ ổn định của tín hiệu ước lượng.

Tuy nhiên, để đạt được hiệu suất lọc tối ưu, việc xác định đúng các tham số nhiễu – đặc biệt là phương sai đo lường – là yếu tố then chốt. Bài báo đã đề xuất phương pháp thực nghiệm sử dụng phương sai Allan để ước lượng tham số này một cách khách quan và có cơ sở thống kê. Kết quả cho thấy bộ lọc Kalman với tham số được xác định từ dữ liệu thực mang lại hiệu quả tốt trong cả điều kiện tĩnh và có rung động.

Ngoài Kalman lọc tuyến tính cổ điển,

vẫn còn nhiều giải pháp khác có thể được xem xét như bộ lọc bù (Complementary Filter), Kalman mở rộng (EKF), Kalman không tuyến tính (UKF),... Các hướng tiếp cận này sẽ được tác giả tiếp tục nghiên cứu và trình bày trong các công bố tiếp theo.

Do tính đối xứng của mô hình quadrotor nên kênh roll và kênh pitch có tính tương đồng, nên nghiên cứu trong bài báo hiện tập trung chủ yếu vào kênh góc **pitch**. Kênh **yaw** đòi hỏi bổ sung mô hình mô-men động cơ và đặc tính điều khiển phi tuyến, sẽ được nhóm tác giả tiếp tục nghiên cứu và trình bày trong các công bố kế tiếp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [14] Capriglione, D., Carratu, M., Catelani, M., Ciani, L., Patrizi, G., Pietrosanto, A., & Sommella, P. (2021). *Experimental Analysis of Filtering Algorithms for IMU-Based Applications Under Vibrations*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 70, 1–10. <https://doi.org/10.1109/tim.2020.3044339>.
- [15] G. Welch and G. Bishop, "An Introduction to the Kalman Filter", University of North Carolina at Chapel Hill Department of Computer Science Chapel Hill, NC 27599-3175, February 2009.
- [16] H.-Q.-T. Ngo; T.-P. Nguyen; V.-N.-S. Huynh; ; T.-S. Le; C.-T. Nguyen, "Experimental Comparison of Complementary Filter and Kalman Filter Design for Low-Cost Sensor in Quadcopter", 2017 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)
- [17] Jintao Li and Jeancheng Fang, "Not Fully Overlapping Allan Variance and Total Variance for Inertial Sensor Stochastic Error Analysis," IEEE Transaction and Measurement, vol. 62, No. 10, pp. 2659-2672, 2013.
- [18] J. Xu, H. He, F. Qin, and L. Chang, "A novel autonomous initial alignment method for strapdown inertial navigation system," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 66, no. 9, pp. 2274–2282, Sep. 2017.
- [19] J. Otegui, A. Bahillo, I. Lopetegi, and L. E. Diez, "Evaluation of experimental GNSS and 10-DOF MEMS IMU measurements for train positioning," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 68, no. 1, pp. 269–279, Jan. 2019.
- [20] Q. Chen, X. Niu, J. Kuang, and J. Liu, "IMU mounting angle calibration for pipeline surveying apparatus," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 69, no. 4, pp. 1765–1774, Apr. 2020.
- [21] Q. He, C. Zeng, X. He, X. Xu, and Z. Lin, "Calibrating accelerometers for space-stable inertial navigation systems at system level," Measurement, vol. 127, pp. 472–480, Oct. 2018.
- [22] Saw kyaw Wai, Hin Ko and Dr.Kyaw Soe Lwin, "Basic Multicopter Control with inertial sensors," International journal of scientific and research publications, vol. 4, no. 9, pp. 229–233, 2014.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả Dương Mạnh Hùng tốt nghiệp đại học (năm 2004) tại Trường Học viện Kỹ thuật Quân sự và nhận bằng Thạc sĩ (năm 2008) tại Trường Học viện Kỹ thuật Quân sự. Năm 2018 nhận bằng Tiến sĩ ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa tại Trường Học viện Kỹ thuật Quân sự. Hiện nay tác giả công tác tại Học viện Kỹ thuật Quân sự.

Hướng nghiên cứu chính: Điều khiển UAV, Điều khiển tự động và hệ thống nhúng, Xử lý tín hiệu và cảm biến.



Tác giả Nguyễn Trung Tấn tốt nghiệp đại học (năm 2004) tại Trường Học viện Kỹ thuật Quân sự và nhận bằng Thạc sĩ (năm 2007) tại Trường Học viện Kỹ thuật Quân sự. Năm 2013 nhận bằng Tiến sĩ ngành Kỹ thuật điện tử tại Trường Đại học công nghệ Cáp Nhĩ Tân (HIT), Trung Quốc. Hiện nay tác giả công tác tại Học viện Kỹ thuật Quân sự.

Hướng nghiên cứu chính: Tập trung vào các công nghệ hỗ trợ cho thể hệ truyền thông không dây tiếp theo, bao gồm xử lý tín hiệu không gian-thời gian, truyền thông UAV, MIMO, tích hợp hệ thống và máy học.



Tác giả: Phan Nhật Giang tốt nghiệp đại học (năm 1994), Thạc sĩ (năm 2002) tại Học viện Kỹ thuật Quân sự. Nhận bằng Tiến sĩ về Kỹ thuật điện tử năm 2005 tại Trường đại học thông tin và vô tuyến điện tử quốc gia Belarusian, Belarus.

Hướng nghiên cứu chính: Điều khiển tự động và hệ thống nhúng.



Tác giả Đặng Anh Tú tốt nghiệp Đại học năm 2024 tại Học viện Kỹ thuật quân sự, chuyên ngành Máy bay động cơ, tốt nghiệp thạc sĩ chuyên ngành Máy bay và thiết bị bay năm 2010 tại Học viện PK-KQ, nghiên cứu sinh tại Đại học hàng không vũ trụ Nam kinh, Trung Quốc. Hiện đang công tác tại Khoa Kỹ thuật hàng không, Học viện Phòng không không quân.

Hướng nghiên cứu chính: Động lực thiết bị bay; Thiết bị bay không người lái.