HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Đinh Tuấn Anh

ỨNG DỤNG CƠ CẤU ĐẾ XOAY NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG CHO CẢM BIẾN QUÁN TÍNH GIÁ RẺ

Chuyên ngành: Kỹ thuật Điện tử

Mã số: 85.20.2.03

TÓM TẮT ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ

HÀ NỘI – 2026

Đề án tốt nghiệp được hoàn thành tại:

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Người hướng dẫn khoa học: TS. Đỗ Trung Anh

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Đề án tốt nghiệp sẽ được bảo vệ trước Hội đồng chấm đề án tốt nghiệp thạc sĩ tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

Vào lúc: giờ ngày tháng năm 2026

Có thể tìm hiểu đề án tốt nghiệp tại:

- Thư viện của Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông.

MỞ ĐẦU

Trong bối cảnh cách mạng công nghiệp 4.0, cảm biến quán tính (IMU) ngày càng đóng vai trò quan trọng và trở thành thành phần cốt lõi trong nhiều hệ thống hiện đại như phương tiện tự hành, UAV, robot, hệ thống ổn định gimbal và thiết bị định vị không GNSS. Những cảm biến này cung cấp thông tin về gia tốc và tốc độ góc, làm nền tảng cho việc xác định vị trí, hướng di chuyển và ổn định chuyển động của các thiết bị.

Tuy nhiên, các cảm biến IMU MEMS giá rẻ hiện nay vẫn tồn tại hạn chế lớn về độ chính xác dài hạn do sai số bias (dịch điểm không) tích lũy theo thời gian. Sai số này dẫn đến hiện tượng trôi dạt vị trí và hướng, đặc biệt nghiêm trọng trong môi trường mất tín hiệu GNSS. Trong khi đó, các IMU cao cấp như sợi quang (FOG) có độ chính xác cao nhưng giá thành đắt đỏ và bị hạn chế về xuất khẩu.

Để khắc phục nhược điểm trên, nguyên lý điều chế xoay **(**Rotation Modulation) sử dụng cơ cấu đế xoay đã được nghiên cứu như một giải pháp hiệu quả để triệt tiêu thành phần bias không đổi. Chính vì vậy, việc nghiên cứu, thiết kế và ứng dụng cơ cấu đế xoay để nâng cao chất lượng cảm biến quán tính MEMS giá rẻ là hướng tiếp cận có ý nghĩa khoa học và thực tiễn cao.

Nội dung đề án tốt nghiệp **"Ứng dụng cơ cấu đế xoay nâng cao chất lượng cho cảm biến quán tính giá rẻ"** được trình bày theo 5 chương như sau:

Chương 1: Cơ sở lý luận. Trình bày tổng quan về cảm biến quán tính, các loại sai số, phương pháp Allan Variance, nguyên lý điều chế xoay và bộ lọc Kalman.

Chương 2: Thiết kế và chế tạo cơ cấu đế xoay. Phân tích yêu cầu, lựa chọn động cơ, thiết kế cơ khí, phân tích FEA và quy trình chế tạo, lắp ráp.

Chương 3: Thuật toán điều khiển. Thiết kế bộ điều khiển PID, máy trạng thái FSM, thuật toán Kalman Filter và kiến trúc phần mềm trên FPGA + PetaLinux.

Chương 4: Thiết kế mạch điện tử. Giới thiệu kiến trúc 4 bo mạch, thiết kế chi tiết từng board và kết quả kiểm tra.

Chương 5: Thực nghiệm đánh giá hệ thống. Trình bày các thí nghiệm, phân tích kết quả và so sánh hiệu quả trước - sau khi áp dụng phương

CHƯƠNG 1: CƠ SỞ LÝ LUẬN

1.1. Khái quát về cảm biến quán tính

1.1.1. Khái niệm và phân loại

- Cảm biến quán tính (IMU) là thiết bị đo lường sự thay đổi về gia tốc hoặc tốc độ quay của vật thể. Chúng bao gồm cảm biến gia tốc dúng để đo gia tốc và độ nghiêng, cảm biến con quay hồi chuyển có chức năng đo tốc độ góc, từ kế thiết kế chuyên biệt để đo hướng dựa trên từ trường Trái Đất. Cảm biến quán tính thường được kết hợp trong các hệ thống như điện thoại thông minh, máy bay, ô tô để theo dõi và ổn định chuyển động cũng như hướng của thiết bị.

+ IMU MEMS: Hoạt động dựa trên công nghệ vi cơ điện tử (MEMS) được chế tạo trên chip bán dẫn. Ưu điểm là kích thước nhỏ, tiêu thụ công suất thấp và giá thành hợp lý. Trong đó, chip ADIS16475-2 là dòng cảm biến MEMS cao cấp thuộc phân khúc với độ ổn định con quay đạt mức $2°/"h"$, đáp ứng tốt các bài toán định vị chính xác cao trong điều kiện dân sự.

1.1.2. ADIS16475-2 - Cảm biến sử dụng trong đề tài

ADIS16475-2 là cảm biến IMU MEMS 6 bậc tự do cao cấp của Analog Devices, tích hợp tính năng bù nhiệt độ toàn dải từ -40°C đến +85°C. Cảm biến này được lựa chọn nhờ giá thành tối ưu hơn 2 đến 3 lần và dễ tiếp cận thương mại hơn so với dòng EPSON G366 nhưng vẫn đảm bảo các thông số nhiễu và độ ổn định bias vượt trội cho các ứng dụng định vị.

Bảng 1.1 So sánh thông số kỹ thuật của IMU ADIS16475-2 và EPSON G366

Thông số kỹ thuật	ADIS16475-2	EPSON G366
Dải đo Gyro	±500°/s	±450°/s
Bias Instability (Gyro)	2°/h	2°/h
Angle Random Walk (ARW)	0.15°/√h	0.05°/√h
NSD Gyro (Nhiễu nền)	0.007°/s/√Hz	8 mdps/√Hz (~0.028°/s/√Hz)
Accel NSD (Nhiễu gia tốc)	0.025 mg/√Hz	0.04 mg/√Hz
Điện áp nguồn	3.0V ~ 3.6V (Nominal 3.3V)	3.3V
Giao tiếp Bus	SPI (Mode 3, tối đa 2 MHz)	SPI (Mode 3)
Chân RST / DRDY	Có đầy đủ	Có đầy đủ
Kích thước (Package)	BGA 44-pin (44×44×15 mm)	LGA (28×28×15 mm)
Giá thành (Ước tính)	~10 triệu VNĐ	~20 - 30 triệu VNĐ

+ Cả hai cảm biến đều có độ ổn định đạt mức $2°/"h"$, đảm bảo một điều kiện nền tương đương để thử nghiệm thuật toán. ADIS16475-2 có độ trôi điểm không theo thời gian thực cần được xử lý kỹ hơn nhưng dải đo rộng đến $\pm 500°/"s"$ đáp ứng tốt các kịch bản chuyển động quay với vận tốc lớn của cơ cấu đế xoay mà không sợ bị bão hòa tín hiệu.

1.2. Sai số trong cảm biến quán tính

1.2.1. Phân loại sai số

- Sai số trong cảm biến quán tính được phân thành hai nhóm chính: Sai số ngẫu nhiên (random error) và sai số hệ thống (systematic error). Trong đó, sai số ngẫu nhiên đặc trưng cho những biến đổi bất định, không dự đoán trước trong tín hiệu đầu ra; còn sai số hệ thống biểu diễn các sai lệch có quy luật hoặc cố định do đặc tính chế tạo của cảm biến hoặc tác động từ môi trường hoạt động. Bao gồm: Sai số hệ số tỷ lệ (Scale Factor Error), Sai số bất đồng trục / trực giao (Misalignment Error), Nhiễu ngẫu nhiên (Random Walk).

1.2.2. Các phương pháp giảm thiểu sai số

+ Phương pháp hiệu chỉnh: Các kỹ thuật như six-position method, rate table calibration, dùng bộ lọc Kalman để hiệu chỉnh tín hiệu đầu ra.

+ Cơ cấu vật lý như đế xoay: sử dụng cơ cấu cơ khí để xoay cảm biến quanh một hoặc nhiều trục theo các kịch bản định sẵn. Đây là hướng nghiên cứu hiện đại, mở ra khả năng tự hiệu chuẩn thời gian liên tục cho hệ thống định vị quán tính mà không cần bất kỳ thiết bị đo kiểm tham chiếu ngoại vi nào.

1.3. Phương pháp phân tích Allan Variance

1.3.1. Định nghĩa và ý nghĩa

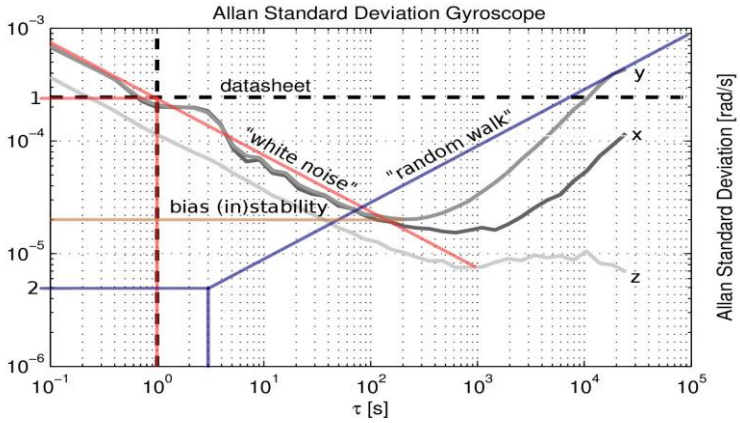
Allan Variance (AVAR) là phương pháp chuẩn công nghiệp (IEEE Std 952-1997) được sử dụng để phân tích và nhận dạng các thành phần nhiễu trong miền thời gian của gyroscope. Bằng cách vẽ đồ thị độ lệch Allan theo thời gian tích phân trên hệ tọa độ log-log, ta có thể xác định định lượng các nguồn nhiễu như nhiễu trắng con quay (ARW), ổn định bias (BI), và nhiễu trôi dạt góc (RRW).

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{k=1}^{M-1} (\overline{\Omega_{k+1}} - \overline{\Omega_k})^2$$

+ $\overline{\Omega_k}$ là giá trị tốc độ góc trung bình đo được trong khoảng thời gian τ thứ k.

+ M là tổng số phân đoạn thời gian có độ dài τ cắt ra được từ toàn bộ chuỗi dữ liệu.

+ Phép hiệu $(\overline{\Omega_{k+1}} - \overline{\Omega_k})$chính là sự sai khác tốc độ góc giữa hai khoảng thời gian kế tiếp nhau.



Hình 1. Đồ thị Allan Deviation với các thành phần nhiễu đặc trưng (log-log)

1.3.2. Ứng dụng cho ADIS16475-2

Áp dụng Allan Variance cho dữ liệu thực nghiệm của ADIS16475-2 giúp xác định chính xác các tham số nhiễu ARW và BI để đưa vào cấu hình ma trận hiệp phương sai nhiễu quá trình Q của bộ lọc Kalman. Quá trình trôi bias được mô hình hóa dưới dạng Gauss-Markov bậc nhất, đảm bảo tính ổn định và khả năng hội tụ nhanh của thuật toán ước lượng.

1.3.3. Quy trình đo Allan Variance thực nghiệm

- Để thu được kết quả Allan Variance đáng tin cậy, cần thu thập dữ liệu gyroscope trong điều kiện cảm biến hoàn toàn đứng yên, bất kỳ chuyển động nào cũng làm nhiễu kết quả. Sử dụng Quy trình thực nghiệm: Đặt cảm biến→ Chờ để nhiệt độ chip đạt trạng thái bão hòa→ Chờ 30 phút sau khi cấp nguồn để nhiệt độ chip đạt trạng thái bão hòa →Xử lý dữ liệu bằng Python.

Để đảm bảo độ tin cậy thống kê cho các cửa sổ tính toán lớn, thời gian tích phân tối đa được giới hạn ở mức $\tau_{max} = T_{"đo"}" \ /4$, ời gian đo 7200s, $\tau_{max} = 1800" \ giây"$, thời gian thu thập dữ liệu liên tục cần kéo dài ít nhất 8 gi

1.4. Bộ lọc Kalman và ứng dụng ước lượng sai số IMU

1.4.1. Bộ lọc Kalman tuyến tính

Bộ lọc Kalman thực hiện ước lượng đệ quy trạng thái tối ưu thông qua hai bước lặp tuần hoàn: Dự báo (Predict) trạng thái tiên nghiệm và Hiệu chỉnh (Update) trạng thái hậu nghiệm dựa trên sai số đo. Định dạng Joseph được áp dụng để cập nhật ma trận hiệp phương sai nhằm bảo toàn tính đối xứng và xác định dương, ngăn ngừa lỗi tràn số khi chạy dài hạn trên hệ thống nhúng.

$$x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k$$

- Gaussian có trung bình bằng 0 và ma trận hiệp phương sai Q_k $\left(w_k \sim \mathcal{N}(0, Q_k)\right)$.

$$P_k = (i - K_k H) P_{\bar{k}} (I - K_k H)^T + K_k R K_k^T$$

1.4.2. Mô hình Kalman cho hệ hai IMU xoay

Mô hình sử dụng hai cảm biến đặt vuông góc, trong đó một cảm biến quay quanh trục đứng và cảm biến còn lại quay quanh trục ngang.

$$x = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \in R^6$$

- Trong đó: $b_1, b_2 \in R^3$ lần lượt là vector bias của Gyroscope IMU-1 IMU-2
- Nhân lần lượt với ma trận nghịch đảo: R_1^{-1}, R_2^{-1}, ta được:

$$R_1^{-1} s_1 = \omega + R_1^{-1} b_1 + R_1^{-1} n_1$$
$$R_2^{-1} s_2 = \omega + R_2^{-1} b_2 + R_2^{-1} n_2$$
$$z = R_1^{-1} s_1 - R_2^{-1} s_2 = R_1^{-1} b_1 - R_2^{-1} b_2 + n$$

- Trong đó: $n = \ R_1^{-1} n_1 - R_2^{-1} n_2$

$$z = H(\theta_1, \theta_2) x + n$$

- Với ma trận quan sát: $H(\theta_1, \theta_2) = [R_1^{-1}(\theta_1) : R_2^{-1}(\theta_2)]$ thay đổi động tại mỗi chu kỳ trích mẫu dựa trên các giá trị góc quay θ_1, θ_2, các giá trị bias ước lượng $\widehat{b_1}, \widehat{b_2}$ được đưa vào khối hậu xử lý để hiệu chỉnh tín hiệu tốc độ góc thực theo công thức:

$$\widehat{\omega_1} = R_1^{-1}(\theta_1) s_1 - \widehat{b_1}$$

$$\widehat{\omega_2} = R_2^{-1}(\theta_2)s_2 - \widehat{b_2}$$

1.4.3. Điều kiện quan sát và ổn định Kalman Filter

H_kHệ thống Kalman Filter đạt điều kiện quan sát đầy đủ khi ma trận quan sát động có hạng bằng 6 (rank = 6). Lịch xoay 4 vị trí trên mỗi trục được thiết kế chính là để thỏa mãn điều kiện này, đảm bảo bộ lọc hội tụ chính xác và ổn định về giá trị bias thực tế.

- Điều kiện quan sát được là tiêu chuẩn bắt buộc để bộ lọc Kalman có thể ước lượng hội tụ chính xác toàn bộ các thành phần trong vector trạng thái. Khả năng quan sát được của hệ thống trong khoảng thời gian từ chu kỳ *k* đến *kf* được xác định thông qua ma trận Gramian quan sát được rời rạc:

$$\mathcal{W}_O(k_0, k_f) = \sum_{k=k_0}^{k_f} [\Phi(k, k_0)^T H_k^T H_k \Phi(k, k_0)]$$

- Trong đó, $\Phi(k, k_0)$ là ma trận chuyển trạng thái tích lũy từ thời điểm *k0* đến *k*. Hệ thống sẽ quan sát được đầy đủ khi và chỉ khi ma trận Gramian đạt hạng đầy đủ:

$$\text{rank}\left(\mathcal{W}_O(k_0, k_f)\right) = n = 6$$

- Phân tích cấu trúc ma trận quan sát thời gian thực H: $H(\theta_1, \theta_2) = [R_1^{-1}(\theta_1) : R_2^{-1}(\theta_2)] : \in R^{3\times6}$:

+ Tại thời điểm tĩnh bất kỳ $"rank"\ (H_k) \leq 3$, hệ thống không thể cô lập được bias của từng cụm cảm biến riêng biệt.

+ Nếu hệ giá đứng yên tại vị trí gốc $\theta_1 = \theta_2 = 0°$, ma trận *Hk* trở thành H $H(\theta_1, \theta_2) = [I1(3x3) : I2(3x3)]$, bộ lọc Kalman chỉ có thể đo được hiệu năng bias tổng hợp $b_1 - b_2$ chứ không thể bóc tách độc lập.

-Tuy nhiên, khi áp dụng lịch trình xoay 4 vị trí tuần hoàn $(0°, 90°, 180°, 270°)$, các ma trận quay $R1(\theta_1))$ và $R2(\theta_2)$ sẽ liên tục thay đổi hình học cấu trúc qua các chu kỳ. Sự thay đổi này làm xuất hiện các thành phần độc lập tuyến tính mới trong chuỗi ma trận tích lũy *Hk*, đưa hạng của ma trận Gramian đạt giá trị cực đại bằng 6. Đây là cơ sở lý thuyết cốt lõi chứng minh tầm quan trọng của lịch xoay đa vị trí trong việc đảm bảo điều kiện quan sát được toàn phần của thuật toán.

1.4.4. Điều kiện ổn định và hội tụ (Stability)

Bộ lọc Kalman tuyến tính áp dụng cho hệ thống RIMU được đảm bảo tính ổn định tiệm cận ma trận hiệp phương sai sai số P_k hội tụ về một nghiệm duy nhất hữu hạn) khi thỏa mãn đồng thời 3 điều kiện ngặt sau:

1. Cặp ma trận hệ thống (F_k, H_k) quan sát được hoàn toàn thông qua lịch trình xoay đa vị trí ($"rank"\ (\mathcal{W}_O) = 6$).

2. Cặp ma trận $\left(F_k, Q_k^{1/2}\right)$ điều khiển được hoàn toàn.

3. Ma trận hiệp phương sai nhiễu đo lườngR_k là ma trận đối xứng xác định dương.

4. Khi cả 3 điều kiện trên được thiết lập chặt chẽ, thuật toán lọc Kalman được chứng minh sẽ luôn hội tụ về một trạng thái cân bằng bền vững duy nhất, độc lập với các sai số giả định hoặc giá trị khởi tạo ban đầu của ma trận hiệp phương sai P_0.

1.5. Nguyên lý điều chế xoay (Rotation Modulation)

1.5.1. Cơ sở toán học

Nguyên lý toán học của rotation modulation dựa trên việc quay cảm biến với tốc độ góc không đổi để biến đổi sai số bias không đổi (DC) thành tín hiệu điều chế dạng sin/cos tần số cao (AC).

- Giả sử tại thời điểm ban đầu, hệ tọa độ của cụm cảm biến quán tính (ký hiệu là khung *s*) trùng với hệ tọa độ định vị tham chiếu của vật chứa cảm biến (ký hiệu là khung *n*), ma trận chuyển đổi tọa độ từ khung cảm biến *s* sang khung tham chiếu *n* tại thời điểm t được mô tả bởi biểu thức toán học:

$$C_s^{n(t)} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 0 \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Gọi vector sai số bias tĩnh của các con quay hồi chuyển trong khung tọa độ cảm biến *s* là $\varepsilon^s = \left[\varepsilon_x^s, \varepsilon_y^s, \varepsilon_z^s\right]^T$.

$$\epsilon^{n(t)} = C_s^{n(t)} \cdot \epsilon^s = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 0 \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^s \\ \epsilon_y^s \\ \epsilon_z^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_x^s \cos(\omega t) - \epsilon_y^s \sin(\omega t) \\ \epsilon_x^s \sin(\omega t) + \epsilon_y^s \cos(\omega t) \\ \epsilon_z^s \end{bmatrix}$$

- Xét trong một chu kỳ quay hoàn chỉnh $T = \frac{2\pi}{\omega}$ của cơ cấu trục cơ khí , theo tính chất tuần hoàn đối xứng của các hàm lượng giác lượng phân, ta luôn có các tích phân xác định sau:

$$\int_0^T \epsilon^{n(t)dt} = \begin{bmatrix} \epsilon_x^s \int_0^T \cos(\omega t)\, dt - \epsilon_y^s \int_0^T \sin(\omega t)\, dt \\ \epsilon_x^s \int_0^T \sin(\omega t)\, dt + \epsilon_y^s \int_0^T \cos(\omega t)\, dt \\ \int_0^T \epsilon_z^s dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T \cdot \epsilon_z^s \end{bmatrix}$$

1.5.2. Kịch bản xoay tối ưu cho hai trục

Kịch bản xoay tối ưu sử dụng lịch xoay 4 bước: 0° → 90° → 180° → 270° và quay ngược lại cho từng trục một cách độc lập. Chu kỳ xoay kéo dài khoảng 25 giây đảm bảo đủ thời gian ổn định cho hệ thống và tối ưu hóa hiệu quả ước lượng bias của bộ lọc Kalman.

Lịch 4 vị trí đảm bảo ma trận quan sát $H(\theta_1, \theta_2)$ có rank đủ để ước lượng đầy đủ 6 thành phần bias. Sau mỗi chu kỳ, sai số trên các trục ngang bị triệt tiêu bởi tính chất sin/cos.

1.5.3. Yêu cầu đồng bộ thời gian trong hệ thống định vị quán tính

Đồng bộ thời gian là yếu tố quyết định trong INS/AHRS nhằm đảm bảo dữ liệu thô, xung điều khiển và kết quả tính toán được gán nhãn thời gian nhất quán. At tần số 100 Hz, hệ thống yêu cầu tính toàn vẹn mẫu, tính tuần hoàn 10ms và tính kịp thời của các luồng xử lý phần mềm để ngăn ngừa hiện tượng tích lũy sai số bùng nổ.

- Trong hệ thống RIMU, Giải pháp được áp dụng: FPGA Zynq UltraScale+ trong Kria SOM K26 tạo timestamp phần cứng với độ phân giải < 10ns cho mỗi mẫu ADIS16475-2, đồng bộ chính xác với tín hiệu encoder NEMA 11.

1.5.4. Ảnh hưởng của sai số góc xoay lên hiệu quả rotation modulation

Phân tích toán học chỉ ra rằng sai số định vị góc của cơ cấu cơ khí sẽ tạo ra một lượng bias dư sau chu kỳ điều chế. Với các thông số của cảm biến ADIS16475-2, tiêu chuẩn thiết kế cơ khí và điều khiển góc chỉ cần đạt sai số ≤ ±0,1° là đủ để đảm bảo sai số bias dư nằm dưới ngưỡng cho phép, giúp tối ưu hóa chi phí chế tạo phần cứng.

$$\theta = \theta_{ref} + \delta\theta$$

+ Trong đó, θ_{ref} là góc xoay danh định theo lịch trình và $\Delta\theta$ là sai số góc xoay tức thời. Khi đó, ma trận chuyển đổi tọa độ thực tế sẽ bị lệch một lượng bằng ma trận sai số sai biệt ΔC:

$$C(\theta) = C(\theta_{ref}) + \Delta C(\delta\theta)$$

$$\epsilon_{residual} \approx |\Delta\theta| \cdot \epsilon_{bias}$$

$$\epsilon_{residual} \approx 0{,}058^\circ \cdot \left(\frac{\pi}{180}.\frac{0{,}5^\circ}{s}\right) \approx \frac{0{,}0005^\circ}{s}$$

+ Kết quả tính toán định lượng chỉ ra rằng sai số bias dư thừa xuất hiện do sự bất chính xác của góc quay chỉ rơi vào khoảng 0.0005 Giá trị này nhỏ hơn tới 10 lần so với ngưỡng sai số bias dư mục tiêu đặt ra cho toàn đề tài là 0,005.

1.6. Các nguồn sai số trong hệ thống đế xoay

Ngoài sai số từ cảm biến IMU, cơ cấu cơ khí của đế xoay đóng vai trò là một trong những nguồn phát sinh sai số hệ thống chính cần được phân tích và kiểm soát. Hiểu rõ các nguồn sai số cơ học giúp đặt ra yêu cầu thiết kế đúng đắn.

1.6.1. Sai số góc xoay và ảnh hưởng

Sai số góc quay phát sinh do độ phân giải encoder giới hạn, sai lệch truyền động cơ khí và sai số tĩnh của bộ điều khiển PID. Qua tính toán định lượng với sai số góc cơ khí thực tế ±0,1° và điều kiện động học mạnh, sai số bias dư tạo ra tối đa chỉ là 0,0087°/s, hoàn toàn đáp ứng tốt chỉ tiêu chất lượng của hệ thống.

$$\varepsilon_{residual} \approx \delta\theta \cdot \max(\varepsilon_b) \approx 0{,}001 \text{ rad} \times 5°/\text{s} = 0{,}005°/\text{s}.$$

$$\epsilon_{residual} \approx 0{,}00174 \cdot (5^\circ)(s) \approx (0{,}0087^\circ)(s)$$

1.6.2. Sai số do rung động quá độ sau khi dừng trục

- Với $f_0 = 2340$ Hz , $t_{settle} \approx 3\tau = 3 \times \frac{Q}{\pi \cdot f^0}$, $t_{settle} \approx 150$ms.Khi động cơ dừng đột ngột tại các vị trí góc điều chế, lực quán tính gây ra các rung động cơ học quá độ làm nhiễu dữ liệu cảm biến. Yêu cầu đặt ra là phải kiểm soát rung động dư này dưới ngưỡng 0,05°/s trong vòng 200ms để đảm bảo dữ liệu lấy mẫu của IMU đạt trạng thái tĩnh cần thiết.

1.6.3. Nhiễu cơ học từ cơ cấu vòng trượt điện

Vòng trượt điện (slip ring) gây ra mô-men ma sát ký sinh nhỏ (< 0.5 mN.m), chiếm dưới 3% mô-men giữ của động cơ NEMA 11 nên không ảnh hưởng đến hành trình quay. Tần số nhiễu động phát sinh từ chổi quét (~1 Hz) ở tốc độ 10 rpm cũng cách rất xa tần số cộng hưởng riêng của cơ cấu, đảm bảo an toàn động học.

+ Rung động tiếp xúc: Quá trình ma sát động giữa hệ thống chổi quét (Brushes) và các vòng cực bằng đồng sẽ kích thích các rung động vi cơ, với tần số dao động $(\boldsymbol{f_{\{vibration\}}})$ phụ thuộc vào tốc độ quay và số lượng chổi quét tiếp xúc:

$$f_{vibration} = \frac{10\ rpm}{60} \cdot 6\ =\ 1\ Hz$$

1.7. Lịch sử và phân loại đế xoay

Kỹ thuật đế xoay RIMU phát triển qua ba thế hệ chính từ các hệ thống quân sự dùng động cơ AC kích thước lớn đến các hệ thống thương mại hiện đại dùng động cơ bước và cảm biến MEMS. Đề tài này thuộc thế hệ thứ ba, tập trung vào giải pháp tích hợp kích thước nhỏ, chi phí thấp sử dụng cảm biến MEMS thương mại cao cấp.

1.8. Kết luận Chương 1

Chương 1 đã hoàn thành việc xây dựng mô hình toán học sai số cảm biến, chứng minh lý thuyết điều chế xoay triệt tiêu bias và xác định các yêu cầu kỹ thuật về sai số góc, đồng bộ thời gian thực. Đây là cơ sở khoa học định lượng trực tiếp phục vụ cho việc thiết kế phần cứng và lập trình thuật toán ở các chương sau.

CHƯƠNG 2: THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO CƠ CẤU ĐẾ XOAY

2.1. Phân tích yêu cầu kỹ thuật

2.1.1. Mục đích của cơ cấu đế xoay

Cơ cấu đế xoay hai trục độc lập (trục đứng Z và trục ngang Y) có nhiệm vụ dịch chuyển cảm biến ADIS16475-2 đến các góc đích chính xác để thực hiện rotation modulation. Cơ cấu phải đảm bảo độ chính xác góc ≤ ±0,1°, duy trì khoảng cách ly an toàn ≥ 30mm so với động cơ để tránh nhiễu từ trường, và sử dụng slip ring để kết nối tín hiệu liên tục.

2.1.2. Các chỉ tiêu kỹ thuật

Các chỉ tiêu kỹ thuật chính của cơ cấu bao gồm: dải quay liên tục 360°, thời gian đáp ứng chuyển vị 90° dưới 1 giây, thời gian dập tắt rung động quá độ sau khi dừng dưới 200ms, và kích thước bao hộp tổng thể giới hạn trong khoảng 90x90x95mm để đảm bảo tính nhỏ gọn.

Bảng 2.1 Chỉ tiêu kỹ thuật cơ cấu đế xoay

Thông số	Yêu cầu	Cơ sở xác định	Đơn vị
Sai số góc xoay	≤ ±0,1	Từ yêu cầu ước lượng bias	°
Góc mỗi bước xoay	90	Lịch xoay 4 vị trí tối ưu	°
Tốc độ xoay hoạt động	30–60	Cân bằng tốc độ và rung động	°/s
Rung động dư sau dừng 200ms	≤ 0,05	Không ảnh hưởng lấy mẫu IMU	°/s
Chu kỳ xoay một trục	≤3s	Từ BI ADIS16475-2 = 2°/h	giây
Điện áp cấp Stepper	12	Buck TPS62110 trên COB → 12V	V DC
Số kênh slip ring	≥ 6	SPI (4 dây) + nguồn (2 dây)	kênh
Vật liệu chính	Al 6061-T6	Nhẹ, cứng, không từ tính	-

Thông số	Yêu cầu	Cơ sở xác định	Đơn vị
Nhiệt độ hoạt động	0 đến 50	Môi trường phòng thí nghiệm	°C

2.2. Lựa chọn động cơ - Stepper NEMA 11

2.2.1. So sánh phương án động cơ

Qua so sánh giữa động cơ bước, động cơ DC servo và động cơ siêu âm, động cơ bước NEMA 11 được lựa chọn nhờ khả năng kiểm soát nhiễu từ trường tốt khi được bố trí cách ly, giá thành rẻ, và đặc biệt là khả năng sinh mô-men giữ lớn ở trạng thái tĩnh giúp khóa chặt trục quay tại các vị trí góc điều chế mà không cần phanh cơ học.

2.2.2. Thông số kỹ thuật Stepper NEMA 11

Động cơ NEMA 11 sử dụng trong đề tài là dòng động cơ bước lai hai pha với kích thước mặt bích 28mm. Động cơ hoạt động dựa trên nguyên lý cảm ứng điện từ, tích hợp bộ mã hóa encoder góc để phản hồi vị trí thời gian thực về khối điều khiển vòng kín.

Bảng 2.3. Thông số kỹ thuật động cơ bước Stepper NEMA 11

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Kích thước thân	28 × 28 × 32	mm (L×W×H)
Khối lượng	~60	g
Điện áp hoạt động	12	V DC (từ Buck TPS62110)
Dòng định mức/pha	0,67	A (cài trong DRV8825)
Điện trở cuộn dây	8,2	Ω/pha
Inductance	5,7	mH/pha
Góc bước (full step)	1,8	°/bước (200 bước/vòng)
Vi bước (DRV8825 1/32)	0,056	°/vi bước (6400 vi bước/vòng)
Moment giữ	55	mN·m (ở dòng định mức)
Moment cực đại	75	mN·m
Tốc độ tối đa (không tải)	~600	rpm ở 12V
Từ trường phát sinh	Có	- cần cách ly ≥30mm với ADIS16475-2
Encoder tích hợp	Tùy chọn	- dùng đếm bước

2.3. Thiết kế cơ khí trên Autodesk Inventor

2.3.1. Kiến trúc tổng thể - hai cụm IMU xoay độc lập

Hệ thống gồm hai cụm xoay độc lập bố trí vuông góc trong không gian (Axis 1 quay quanh trục đứng Z và Axis 2 quay quanh trục ngang Y). Cả hai cụm sử dụng chung cấu trúc đồng tâm gồm khung chịu lực, động cơ NEMA 11, cặp ổ bi tiếp xúc góc, slip ring xuyên trục và đĩa gắn IMU, toàn bộ được đóng gói trong hộp nhôm kích thước 90x90x95mm.

2.3.2. Cấu trúc chi tiết một cụm IMU xoay

Mỗi cụm xoay được lắp ráp chi tiết gồm: Khung chính chịu lực bằng nhôm 6061-T6; cặp ổ bi tiếp xúc góc 7200B lắp đối lưng để triệt tiêu lực dọc trục hai chiều; động cơ NEMA 11 nối trục trực tiếp qua khớp nối cứng; slip ring truyền tín hiệu SPI; và đĩa xoay mang cảm biến ADIS16475-2 được cố định bằng nắp bảo vệ chống nhiễu.

2.3.3. Thiết kế đĩa IMU

Đĩa IMU được thiết kế dạng tròn đường kính 70mm, phay lõm mặt trước để đặt cảm biến sát trục quay nhằm giảm chiều cao trọng tâm. Chi tiết yêu cầu dung sai độ phẳng mặt gắn cảm biến ≤ 0,02mm, dung sai lỗ ổ bi ≤ 0,01mm và được phay đối trọng để đạt cân bằng động học tuyệt đối khi quay.

2.3.4. Thiết kế khung chính

Khung chính là chi tiết nâng đỡ chịu lực toàn bộ cụm, được gia công CNC từ phôi nhôm đặc với hốc định tâm động cơ Ø22mm và hốc lắp ổ bi Ø30mm đạt dung sai lắp khít H7. Các mặt bên được phay rãnh thoát nhiệt để giảm 30% khối lượng và tăng hiệu quả tản nhiệt cho động cơ.

2.3.5. Giải pháp truyền dẫn tín hiệu qua trục xoay bằng vòng trượt điện (Slip ring)

Để truyền bus SPI tốc độ cao (10 MHz) và nguồn nuôi cho cảm biến ADIS16475-2 khi quay liên tục, đề tài sử dụng slip ring 6 kênh có điện trở tiếp xúc động cực nhỏ (< 10mΩ) và không sinh từ trường ký sinh, đảm bảo tín hiệu truyền dẫn không bị nhiễu hay chập chờn.

2.4. Phân tích FEA (Finite Element Analysis)

2.4.1. Thiết lập và điều kiện biên

Phân tích phần tử hữu hạn (FEA) được thực hiện trên Autodesk Inventor cho chi tiết đĩa IMU dưới tác động của mô-men xoắn cực đại 15 mN.m và áp lực bề mặt F = 1,96N từ trọng lượng cảm biến. Lưới phần tử được chia mịn 1mm tại vùng lỗ trục chịu ứng suất tập trung.

2.4.2. Kết quả FEA

Kết quả mô phỏng cơ học cho thấy ứng suất tương đương von Mises lớn nhất chỉ đạt 1,06 MPa, chuyển vị lớn nhất ở mép đĩa là 0,0015mm (tương đương sai số góc cực nhỏ 0,003°). Hệ số an toàn FOS đạt tới 33,7 và tần số riêng 2340 Hz vượt xa tần số kích thích, xác nhận đĩa IMU đủ cứng vững và không bị cộng hưởng.

2.5. Lựa chọn vật liệu và bộ phận

2.5.1. Vật liệu chính - nhôm 6061-T6

Nhôm hợp kim 6061-T6 được chọn làm vật liệu chế tạo nhờ khối lượng riêng thấp giúp giảm mô-men quán tính, tính cắt gọt tốt cho độ chính xác cơ khí cao, độ bền cơ học tối ưu và đặc tính phi từ tính tương thích điện từ với IMU. Toàn bộ chi tiết được anod hóa cứng bề mặt dày 25µm để chống mài mòn và cách điện ESD.

2.5.2. Ổ bi

Hệ thống sử dụng ổ bi tiếp xúc góc 7200B của hãng SKF với độ đảo hướng kính cực nhỏ ≤ 0,005mm. Vòng bi được bít kín và bôi trơn trọn đời, đảm bảo chuyển động quay êm ái, giảm thiểu tiếng ồn cơ học ảnh hưởng đến gyroscope nhạy cảm.

2.6. Quy trình chế tạo và lắp ráp

2.6.1. Quy trình chế tạo CNC

Các chi tiết được chế tạo qua ba bước phay CNC: phay thô bằng dao Ø10mm để phá phôi, phay bán tinh bằng dao Ø6mm, và phay tinh bằng dao cầu Ø4mm tốc độ cao để đạt độ nhám bề mặt Ra 1,6µm. Các lỗ ren M2/M3 được ta-rô bằng tay trước khi đem anod hóa cứng.

2.6.2. Kiểm tra kích thước sau gia công

Sau gia công CNC, các chi tiết được đo kiểm bằng thước cặp, panme và đồng hồ so. Kết quả đo thực tế cho thấy các dung sai kích thước quan trọng (lỗ ổ bi, độ phẳng mặt lắp cảm biến) đều nằm trong giới hạn thiết kế (sai lệch ≤ 0,01mm), đảm bảo chất lượng lắp ráp.

2.6.3. Quy trình lắp ráp

Quy trình lắp ráp được chuẩn hóa: ép cặp ổ bi vào khung chính dưới lực < 5kN; luồn và cố định slip ring; gá động cơ NEMA 11 với lực siết 0,5 N.m; gắn cảm biến ADIS16475-2 lên đĩa cơ khí với lực siết nhẹ 0,1 N.m; hàn dây tín hiệu SPI nối slip ring; căn chỉnh đồng trục trục quay và tiến hành chạy thử không tải.

2.7. Kiểm tra và đánh giá cơ cấu

2.7.1. Kiểm tra độ chính xác góc xoay

Để đánh giá động học cơ cấu, góc quay được giám sát bằng encoder của động cơ bước kết hợp cảm biến phụ đo rung động nền. Kết quả thử nghiệm cho thấy sai số góc quay trung bình của cơ cấu đạt ±0,058° (đạt chỉ tiêu ≤ ±0,1°) và rung động dư sau khi dừng chỉ còn 0,018°/s sau 200ms.

Bảng 2.7. Kết quả kiểm tra độ chính xác góc và rung động

Thông số kiểm tra	NEMA 11 Trục Đứng	NEMA 11 Trục Ngang	Yêu cầu
Sai số góc trung bình	+0,058°	−0,041°	≤ ±0,1°
Độ lệch chuẩn σ	0,031°	0,027°	-
Rung động dư sau 200ms	0,018°/s	0,016°/s	≤ 0,05°/s
Thời gian ổn định	<150ms	<150ms	≤ 200ms

2.7.2. Kiểm tra hệ thống hoàn chỉnh

Thử nghiệm tích hợp toàn diện cho thấy điện trở tiếp xúc động của slip ring duy trì dưới 5mΩ, đường truyền SPI 10MHz hoạt động ổn định không méo dạng xung, và nhiệt độ động cơ NEMA 11 chỉ tăng lên tối đa 42°C sau 1 giờ hoạt động liên tục.

2.8. Quy trình kiểm tra và hiệu chỉnh tổng thể

2.8.1. Kiểm tra ban đầu sau lắp ráp

Kiểm tra ban đầu bao gồm quay tay để phát hiện điểm kẹt cơ học, đo độ đảo hướng kính đĩa IMU (yêu cầu ≤ 0,05mm), đo kiểm tra điện áp các đường rail nguồn 5V/3,3V trên COB, đo dòng tiêu thụ tổng và giám sát nhiệt độ làm việc của các chip xử lý chính.

2.8.2. Calibration góc Home (vị trí 0°)

Vị trí Home tuyệt đối (0°) được xác định bằng cảm biến quang kết hợp xung Index của encoder động cơ bước. Khi khởi động, cơ cấu tự động xoay chậm để tìm xung Index, reset bộ đếm encoder về 0 và tiến hành quay thử nghiệm lặp lại để kiểm tra độ ổn định của điểm gốc.

2.8.3. Đánh giá hệ thống hoàn chỉnh trong 24 giờ

Hệ thống được vận hành liên tục 24 giờ trong phòng thí nghiệm để đánh giá độ tin cậy dài hạn. Kết quả ghi nhận bias dư RMSE duy trì cực kỳ ổn định xung quanh mức 0,0049°/s (biến động dưới 3%), nhiệt độ chip dao động nhẹ và không phát sinh bất kỳ lỗi truyền thông nào.

2.9. Kết luận Chương 2

Chương 2 đã thiết kế, chế tạo thành công cơ cấu đế xoay 2 trục vuông góc bằng nhôm 6061-T6 đáp ứng đầy đủ các chỉ tiêu cơ học: sai số góc thực tế ±0,058°, dập tắt rung động nhanh trong 120ms, tích hợp slip ring 6 kênh tin cậy và đạt hệ số an toàn cơ học cao. Cơ cấu sẵn sàng đưa vào chạy thuật toán thực nghiệm.

CHƯƠNG 3: THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN

Chương 3 trình bày ba thành phần thuật toán chính: (1) Vòng điều khiển vị trí PID cho động cơ NEMA 11; (2) FSM quản lý lịch xoay hai trục; (3) Kalman Filter kết hợp đa cảm biến ước lượng và bù bias realtime. Kết quả đạt được sau khi tích hợp: bias dư 0,005°/s, hội tụ trong 4 phút.

3.1. Điều khiển vị trí và góc quay

3.1.1. Bài toán điều khiển động cơ NEMA 11

- Động cơ NEMA 11 được tích hợp encoder tạo thành hệ truyền động điều khiển vị trí vòng kín thông qua hai tín hiệu STEP (chuỗi xung điều khiển tốc độ/góc quay) và DIR (chiều quay). Nhiệm vụ điều khiển là di chuyển đĩa IMU đến các góc điều chế đích với sai số góc ≤ ±0,1° và Ổn định ≤ 200ms sau khi đạt góc đích và ổn định trong điều kiện rung xóc môi trường. Đế xoay phải duy trì vị trí góc ổn định khi hệ thống chịu rung xóc từ nền đặt.

- Quy trình thiết kế đầu tiên xác định đối tượng động cơ NEMA 11 cùng tín hiệu điều khiển xung STEP/DIR, xây dựng mô hình toán học biểu diễn mối quan hệ giữa biên độ kích thích U và góc xoay trạng thái θ. Bộ điều khiển PID sẽ được thiết kế để tạo ra các tín hiệu đầu vào tối ưu. Cuối cùng, tính ổn định và chất lượng toàn hệ thống được đánh giá, hiệu chỉnh chặt chẽ dựa trên các tiêu chuẩn kỹ thuật Nyquist và ổn định Lyapunov

3.1.2. Bộ điều khiển PID

Đề tài sử dụng bộ điều khiển PID kinh điển để hiệu chỉnh sai số góc dựa trên phản hồi encoder. Các tham số PID được chỉnh định bằng phương pháp Ziegler-Nichols cải tiến giúp hệ thống đạt thời gian đáp ứng góc quay 90° chỉ trong 0,75 giây, overshoot dưới 2° và ổn định hoàn toàn trong 120ms.

Bảng 3.1. Tham số PID điều khiển vị trí NEMA 11

Tham số	Giá trị	Đơn vị	Vai trò
K_p	0,85	Hz/°	Giảm sai lệch tức thời
K_i	0,001	Hz/(°·s)	Loại bỏ sai lệch tĩnh
K_d	0,04	Hz·s/°	Giảm dao động quá mức
Anti-windup limit	±500	Hz	Tránh tích phân bão hòa
Thời gian lấy mẫu PID	1	ms	Đủ nhanh cho NEMA 11

3.2. Máy trạng thái hữu hạn (FSM) điều khiển lịch xoay

Quy trình chuyển góc của hai trục được quản lý bằng một FSM gồm 7 trạng thái chạy trên hệ điều hành nhúng. FSM điều phối lịch trình xoay 4 vị trí tuần tự cho từng trục, giám sát trạng thái chuyển động của động cơ bước và đảm bảo tính đồng bộ thời gian trong các chu kỳ lấy mẫu.

- Một chu kỳ điều chế xoay hoàn chỉnh được thiết kế kéo dài 14,4 giây: mỗi trục cơ khí thực hiện dịch chuyển tuần hoàn qua 4 vị trí hình học, trong đó mỗi bước chuyển góc mất 0,8 giây và pha lấy mẫu tĩnh duy trì trong 1,0giây. Tại mỗi pha lấy mẫu tĩnh của từng trạng thái SAMPLING, ma trận đo lường $H_k(\theta_1, \theta_2)$ được cập nhật góc thực tức thời từ encoder, giúp thuật toán Kalman Filter liên tục nhận các vector quan sát mới có tính observable độc

lập. Đây là cơ sở lý thuyết giải thích tại sao hệ thống đạt tốc độ hội tụ rất nhanh, cô lập và triệt tiêu hoàn toàn sai số bias thô ban đầu chỉ sau khoảng 16 chu kỳ điều chế (tương đương gần 4 phút vận hành liên tục).

3.3. Thuật toán kết hợp đa cảm biến ước lượng bias

3.3.1. Mô hình toán học hai cảm biến vuông góc

Thuật toán sử dụng hai cảm biến ADIS16475-2 đặt vuông góc trong khung tọa độ vật thể. Bằng cách thiết lập phương trình đo tốc độ góc cho từng cảm biến rồi thực hiện phép biến đổi ma trận quay ngược và lập hiệu số, thành phần vận tốc góc thực bị triệt tiêu hoàn toàn, tạo ra tín hiệu chỉ chứa sai số bias để đưa vào bộ lọc Kalman.

$$\begin{matrix}(s_x(t))(\omega_x(t))(b_x(t))(n_x(t)) \\ \left(s_y(t)\right) = \left(\omega_y(t)\right) + \left(b_y(t)\right) + \left(n_y(t)\right) \\ (s_z(t))(\omega_z(t))(b_z(t))(n_z(t))\end{matrix}$$

3.3.2. Bộ lọc Kalman ước lượng bias

Bộ lọc Kalman 6 chiều được thiết kế với ma trận đo C_k thay đổi động theo các góc quay thực tế đọc từ encoder. Bộ lọc liên tục ước lượng bias của hai cảm biến và thực hiện bù trừ trực tiếp vào dữ liệu tốc độ góc đầu ra, đảm bảo hệ thống đạt trạng thái quan sát đầy đủ (rank = 6) và hội tụ chính xác.

$$\bar{y}_{k+1} = C_k \bar{xt} + w\bar{y}_k$$

Kích thước bài toán: vector quan sát $\bar{y}_{k+1} \in \mathbb{R}^{3\times1}$, ma trận $C_k = [R_1^{-1}, -R_2^{-1}] \in \mathbb{R}^{3\times6}$, vector trạng thái $\bar{x} = [b_1; b_2] \in \mathbb{R}^{6\times1}$:

$$\bar{y}_{k+1} = [R^{1-1} - R^{2-1}] \cdot [b_k^1/b_k^2] + n\bar{k}_k \rightarrow [3\times1] = [3\times6][6\times1] + [3\times1]$$

- Ma trận C_k thay đổi tại mỗi bước lấy mẫu vì $R^1(\theta_k^1)$ và$R^2(\theta_k^2)$ là hàm của góc xoay tức thời đọc từ encoder NEMA 11. Điều kiện observable: Hệ quan sát được khi rank(O) = 6. Với lịch xoay 4 vị trí (0°, 90°, 180°, 270°) trên mỗi trục, hệ luôn đạt rank = 6.

3.3.3. Thuật toán điều chế xoay và triệt tiêu sai số

Nguyên lý rotation modulation điều chế sai số bias thành tín hiệu AC tuần hoàn để triệt tiêu thông qua tích phân một chu kỳ quay đầy đủ T. Do chuyển động quay chỉ triệt tiêu được sai số trên hai trục vuông góc với trục quay, việc kết hợp hai trục xoay vuông góc độc lập là bắt buộc để triệt tiêu sai số theo cả ba hướng trong không gian.

3.3.4. Yêu cầu đồng bộ thời gian trong hệ thống

Để thuật toán kết hợp đa cảm biến đạt độ chính xác cao, hệ thống yêu cầu đồng bộ thời gian nghiêm ngặt ở tần số 100 Hz. Sai lệch thời gian trích mẫu giữa các cảm biến phải được kiểm soát dưới mức microgiây nhằm ngăn ngừa hiện tượng tích lũy sai số trôi dạt tọa độ trong các phép tính tích phân định vị.

+ **Đồng bộ giữa dữ liệu IMU và Góc quay Encoder:** Ma trận quan sát trong bộ lọc Kalman $H_k = [R_1^{-1}(\theta_1) - R_2^{-1}(\theta_2)]$ phụ thuộc trực tiếp vào góc quay tức thời θ_1, θ_2 đọc từ encoder động cơ bước. Nếu tồn tại độ trễ thời gian) hoặc hiện tượng lệch pha thời gian (jitter) giữa thời điểm chip ADIS16475-2 chốt dữ liệu quán tính thô và thời điểm hệ thống đọc giá trị xung từ encoder, ma trận xoay nghịch đảo sẽ tính toán sai lệch so với trạng thái hình học

thực tế. Sai số góc dù rất nhỏ do độ trễ phần mềm cũng sẽ khiến biến đo lường z nhiễm nhiễu động học bệ, làm mất tính ổn định và kéo dài thời gian hội tụ của bộ lọc Kalman.

Tính tiền định thời gian thực: Thuật toán trích mẫu quán tính hoạt động ở tần số ổn định 100 Hz(*chuk*ỳ 10 ms). Sai số thời gian giữa các chu kỳ lặp buộc phải nằm trong giới hạn ≤ 10 ns . Nếu chu kỳ lấy quá lớn, mô hình rời rạc hóa phương trình trạng thái toán học sẽ không còn chính xác, gây ra sai số tích lũy dạng trôităng dần theo thời gian

3.3.5. Hiệu chuẩn RIMU - Hai thuật toán độc lập

Quy trình hiệu chuẩn hệ thống RIMU bao gồm hai giải thuật độc lập: ước lượng chính xác tư thế lắp đặt của từng cảm biến thành phần bằng bộ lọc Kalman so sánh với thiết bị tham chiếu, và hiệu chỉnh trực tuyến các sai số hệ thống (bias, scale factor, misalignment) khi cơ cấu đế xoay vận hành quét trên bàn xoay chuẩn.

3.4. Kiến trúc phần mềm và FPGA

3.4.1. Cấu trúc ứng dụng trên PetaLinux

Ứng dụng điều khiển chạy trên hệ điều hành PetaLinux với kiến trúc đa luồng POSIX được phân chia độ ưu tiên thời gian thực. Luồng thu thập dữ liệu thô chạy ở chu kỳ 1ms, chuyển dữ liệu qua bộ đệm vòng không khóa đến luồng thuật toán Kalman chạy ở chu kỳ 10ms nhằm đảm bảo tính tiền định thời gian thực thực sự.

3.4.2. Driver SPI cho ADIS16475-2 trên PetaLinux

Driver SPI được viết dựa trên thư viện Userspace spidev của Linux để giao tiếp với ADIS16475-2 ở tần số SPI 10 MHz. Driver sử dụng chế độ đọc truyền burst (burst read mode) để đọc đồng thời 12 byte dữ liệu của cả 6 trục chỉ trong một giao dịch SPI kéo dài 11,2μs, giúp tối ưu hóa thời gian chiếm dụng CPU.

3.4.3. FPGA IP Core điều khiển Stepper và đồng bộ thời gian

Tín hiệu điều khiển động cơ bước được tạo bởi FPGA IP core tự thiết kế trên Vivado để triệt tiêu hoàn toàn độ trễ ngắt và jitter thời gian thực của CPU. FPGA đảm nhận việc tạo xung vi bước 1/32 với jitter < 2ns, đọc encoder thông qua bộ giải mã QEI phần cứng và gán nhãn thời gian timestamp chính xác cho dữ liệu IMU.

+ Ngay khi chân DRDY tích cực, cung cấp dữ liệu đồng bộ pha tuyệt đối cho bộ vi xử lý ARM Cortex-A53 tính toán ma trận $R_1(\theta_1), R_2(\theta_2)$ và chạy thuật toán Kalman Filter.

3.5. Thực nghiệm đánh giá thuật toán

3.5.1. Thiết lập thực nghiệm

Đánh giá thực nghiệm thuật toán được tiến hành thông qua bốn kịch bản đo kiểm khác nhau từ chế độ tĩnh hoàn toàn đến chế độ xoay động điều chế 2 trục kết hợp bộ lọc Kalman ước lượng sai số trực tuyến nhằm xác định định lượng hiệu quả triệt tiêu trôi bias.

3.5.2. Kết quả TN1 - Bias ZRO cơ bản

Trong điều kiện tĩnh không xoay, sai số bias turn-on của hai cảm biến ADIS16475-2 dao động trong khoảng 0,04–0,24°/s. Nếu không được điều chế và bù trừ, lượng bias tĩnh này sẽ gây ra sai số tích lũy góc cực lớn lên tới 432° chỉ sau 30 phút hoạt động, khẳng định sự cần thiết phải áp dụng rotation modulation.

3.5.3. Kết quả xoay 2 trục + Kalman

Khi kích hoạt lịch xoay 2 trục kết hợp bộ lọc Kalman 6 chiều, sai số bias dư sau 4 phút hội tụ đã giảm xuống chỉ còn 0,005°/s, chỉ số NIS trung bình đạt mức 5,9 phản ánh ma trận nhiễu Q và R được cấu hình chính xác, giúp nâng cao đáng kể độ ổn định định hướng của hệ thống.

Về mặt toán học, nếu chỉ số $NIS \gg n$, điều đó chứng tỏ bộ lọc đang quá tin tưởng vào mô hình toán học do cấu hình ma trận nhiễu hệ thống Q quá nhỏ so với động học thực tế; ngược lại, nếu chỉ số $NIS \ll n$, bộ lọc đang đánh giá quá cao các thành phần sai số do cấu hình ma trận Q hoặc ma trận R quá lớn so với nhiễu thực tế của hệ thống.

3.5.4. Quy trình thử nghiệm đầy đủ theo tiêu chuẩn

Thử nghiệm RIMU được thiết kế từ cấp độ thành phần đến tích hợp hệ thống, sử dụng các thiết bị tiên tiến bao gồm bàn xoay 3 trục Acutronic giả lập chuyển động chuẩn, hệ thống tạo rung xóc từ 20Hz đến 2000Hz giả lập động học thực tế, và buồng nhiệt độ đánh giá độ trôi bias theo nhiệt độ theo chuẩn IEEE.

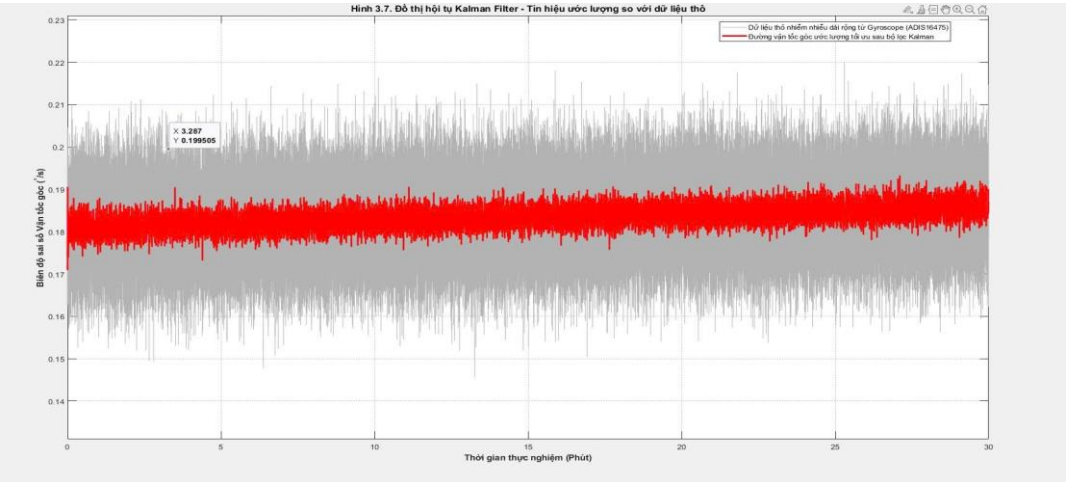
3.6. Phân tích Allan Variance thực nghiệm

3.6.1. So sánh trước và sau rotation modulation

Phân tích so sánh đồ thị Allan Variance trước và sau điều chế xoay cho thấy: thành phần nhiễu trắng ARW không thay đổi do đặc tính vật lý của cảm biến, tuy nhiên độ ổn định bias (BI) cải thiện vượt trội tới 16,7 lần và nhiễu đi bộ ngẫu nhiên (RRW) giảm tới 6,5 lần nhờ hiệu quả bù trừ của Kalman.

3.6.2. Hội tụ Kalman Filter theo thời gian

Quá trình giám sát bộ lọc Kalman từ lúc khởi động nguội cho thấy các ước lượng bias nhanh chóng hội tụ về giá trị ổn định thực tế chỉ sau khoảng 4 phút hoạt động, với đường biên độ lệch chuẩn ±2σ thu hẹp và tiệm cận sát đường ước lượng trung bình.



Hình 3.7 Đồ thị hội tụ Kalman Filter - bias ước lượng và đường bao ±2σ theo thời gian 0-10 phút

3.7. Kết luận Chương 3

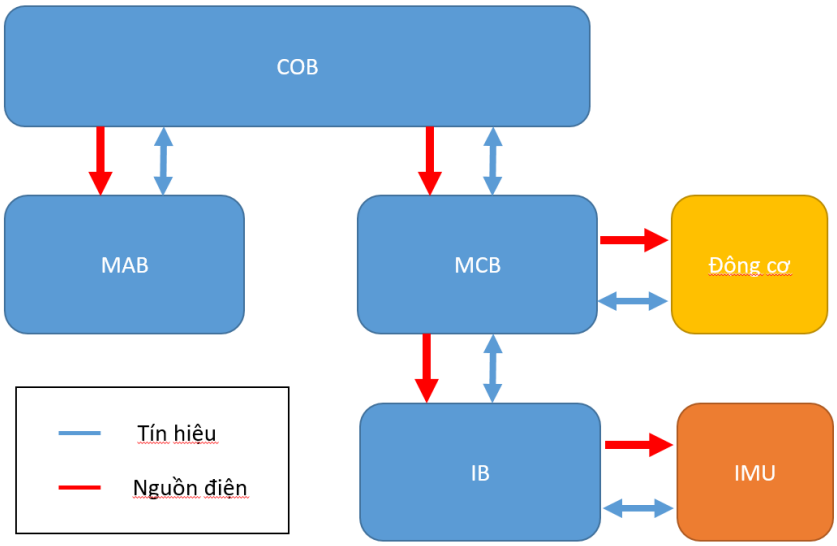
Chương 3 đã phát triển và kiểm chứng thành công các giải thuật cốt lõi: bộ điều khiển PID vị trí ổn định nhanh trong 120ms, FSM lịch xoay chu kỳ 25s, và bộ lọc Kalman 6 chiều ước lượng trực tuyến đưa bias dư xuống mức 0,005°/s, giúp chất lượng hệ thống tiệm cận dòng IMU sợi quang (FOG) thương mại.

CHƯƠNG 4: THIẾT KẾ MẠCH ĐIỆN – ĐIỆN TỬ

4.1. Thiết kế chức năng hoạt động và sơ đồ khối

4.1.1. Kiến trúc tổng thể 4 PCB

Hệ thống điện tử sử dụng kiến trúc phân tán gồm 4 bo mạch (PCB) chuyên biệt để tối ưu hóa chống nhiễu: Bo mạch kết nối COB, bo mạch xử lý chính MAB (mang Kria SOM K26), bo mạch công suất điều khiển động cơ MCB, và bo mạch đọc IMU IB đặt trực tiếp trong lòng đĩa xoay.



Hình 4.2 Sơ đồ kết nối chi tiết tín hiệu điều khiển và dữ liệu trong hệ thống

4.2. COB - Bo mạch nguồn và kết nối chung

4.2.1. Chức năng và yêu cầu

COB là bo mạch trên cùng, tích hợp toàn bộ các cổng kết nối ngoại vi (USB, Ethernet, JTAG) và phân phối nguồn tổng cho hệ thống. Bo mạch yêu cầu quản lý cân đối công suất tiêu thụ tối đa 10,5W và cung cấp các điện áp nguồn cách ly sạch cấp cho các phân hệ nhạy cảm bên dưới.

4.2.2. Mạch nguồn phân tầng trên COB

Đường nguồn nuôi cảm biến được lọc phân tầng qua 3 cấp: module DC-DC cách ly galvanic của Vicor hạ áp xuống 5V ổn định, IC Buck đồng bộ TPS62086 hạ áp xuống 3,3V cấp cho logic, và IC Buck TPS62110 tạo đường nguồn công suất 12V riêng biệt nuôi động cơ bước để triệt tiêu xung nhiễu công suất.

4.2.3. Mạch bảo vệ trên COB

COB tích hợp các linh kiện bảo vệ chuyên biệt gồm: TVS diode bảo vệ ESD cho đường USB/I2C, chip EEPROM lưu trữ cấu hình calibration của cảm biến, cảm biến gia tốc phụ ADXL359 để đo rung động nền, và IC transceiver cách ly ADM2582E phục vụ giao tiếp RS485 trong môi trường công nghiệp.

4.2.4. PCB layout COB

COB được thiết kế mạch in 4 lớp kích thước 100x80mm với lớp Ground phẳng liên tục ở Layer 2. Tụ lọc bypass được đặt sát chân nguồn IC, và mạng nguồn nuôi IMU được cách ly hoàn toàn với khối logic bằng ferrite bead để ngăn nhiễu số lan truyền sang analog.

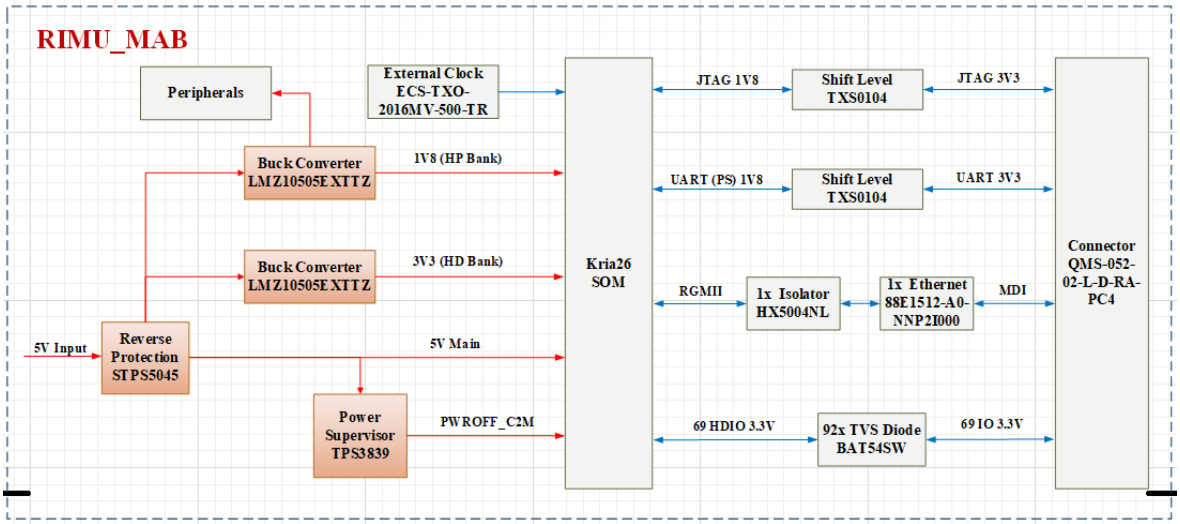
4.3. MAB - Bo mạch xử lý chính (Kria SOM K26)

4.3.1. Tổng quan Kria SOM K26

Kria SOM K26 là module nhúng hiệu năng cao tích hợp chip xử lý đa nhân ARM Cortex-A53 chạy Linux và lõi FPGA (Programmable Logic) linh hoạt. Module được chọn nhờ khả năng xử lý song song tốc độ cao, đáp ứng hoàn hảo các yêu cầu về thời gian thực cứng và đồng bộ dữ liệu cảm biến.

4.3.2. Thiết kế MAB (Carrier Board cho Kria SOM K26)

MAB là carrier board 6 lớp kích thước 80x60mm được thiết kế tùy chỉnh cho Kria SOM K26. Bo mạch tích hợp connector cơ khí MEC 314 chân, bộ giám sát nguồn TPS3839 để shutdown hệ thống an toàn khi sụt áp, thạch anh bù nhiệt TCXO 33,333 MHz cấp clock chính xác ổn định, và các bộ hạ áp LMZ10505.



Hình 4.6 Sơ đồ khối MAB (Carrier Board Kria SOM K26) - Altium Designer,

4.3.3. Thiết kế nguồn MAB

Hệ thống nguồn trên MAB tích hợp chip Ethernet PHY Marvell giao tiếp RGMII qua cuộn biến áp cách ly HX5004NL, kết hợp mảng diode TVS BAT54SW để bảo vệ ESD xung sét cho toàn bộ 69 đường I/O số đi ra cổng kết nối ngoại vi dạng Right-Angle.

4.3.4. PCB layout MAB

MAB được thiết kế mạch in 6 lớp với các đường bus cao tốc (SPI, RGMII, USB3) được kiểm soát trở kháng 50Ω đơn cực và 90Ω vi sai. Các cặp dây vi sai được đi song song trên cùng một lớp, khống chế dung sai chiều dài dưới ±0,1mm để triệt tiêu hiện tượng lệch pha tín hiệu.

4.4. MCB - Bo mạch điều khiển động cơ

4.4.1. Chức năng và yêu cầu

MCB có nhiệm vụ băm dòng vi bước để tạo ra tín hiệu kích thích cuộn pha cho hai động cơ bước NEMA 11. Bo mạch nhận các tín hiệu điều khiển STEP/DIR từ FPGA, thực thi thuật toán chia vi bước 1/32 để làm mịn chuyển động quay và dập tắt rung động quá độ ở tốc độ thấp.

4.4.2. Driver kích thích NEMA 11

MCB sử dụng hai chip driver chuyên dụng DRV8825 tích hợp cầu H công suất. Bo mạch giao tiếp với khối xử lý qua connector xếp tầng nhận các lệnh ENABLE, STEP, DIR và phản hồi tín hiệu lỗi FAULT khi driver rơi vào trạng thái quá nhiệt hoặc quá dòng.

4.4.3. Mạch đọc encoder NEMA 11

Tín hiệu phản hồi góc từ encoder động cơ bước (5V) được dẫn qua IC chuyển mức logic hai chiều TXS0108E trên MCB để hạ xuống 3,3V tương thích với FPGA. Tín hiệu được lọc nhiễu qua bộ lọc thông thấp RC trước khi đưa vào bộ giải mã QEI phần cứng trong FPGA.

4.4.4. Mạch bảo vệ và lọc EMI trên MCB

4.4.4. Khối mạch phân phối nguồn và bảo vệ nhiễu EMI trên MCB

- Khác với các kiến trúc driver yêu cầu nguồn cấp đối xứng phức tạp, phân hệ nguồn trên bo mạch MCB được tối ưu hóa theo cấu trúc nguồn đơn công nghiệp để nâng cao độ tin cậy và đơn giản hóa layout. Đường nguồn công suất chính 12 Vtrích trực tiếp từ COB được dẫn thẳng tới chân nguồn VM của hai chip driver DRV8825 để nuôi mạch cầu H, giúp tối ưu hóa tốc độ đáp ứng dòng điện và bảo toàn mô-men xoắn của động cơ bước NEMA 11.

- Nhằm triệt tiêu hiện tượng sụt áp tức thời và dập tắt các gai nhiễu điện từ trường dải rộng phát sinh do chu kỳ băm xung của driver, đường nguồn công suất này được trang bị cụm 2 tụ điện phân hóa lớn (với thông số $100\mu F/25V$ mắc song song nối tiếp với các tụ gốm màng mỏng100 nF chất liệu X7R đặt ở khoảng cách $\leq 0{,}5$ mm sát cạnh chân VM của từng IC. Tại các ngõ ra cuộn dây pha của động cơ, mạch thiết kế đường rãnh chờ bố trí các cuộn cảm chặn nhiễu của hãng Würth Elektronik kết hợp mạch dập snubber phụ trợ để hấp thụ năng lượng phản hồi dòng điện cảm ứng từ cuộn dây động cơ khi đảo trạng thái.

4.4.5. PCB layout MCB

MCB được thiết kế mạch in 4 lớp phân chia rõ ràng các vùng chức năng: vùng công suất cầu H ở trung tâm được bố trí mảng via nhiệt đan dày liên kết trực tiếp với lớp Ground để tản nhiệt, tách biệt hoàn toàn với vùng xử lý tín hiệu encoder nhạy cảm ở góc dưới bo mạch.

4.5. IB - Bo mạch đọc IMU (nằm trong đĩa xoay)

4.5.1. Thiết kế IB - board nhỏ nhất, yêu cầu cao nhất

IB là bo mạch 4 lớp kích thước siêu nhỏ 25x25mm đặt trong đĩa xoay. Khi thay ADIS16475-2, footprint được vẽ lại theo chuẩn LCC 24 chân, tích hợp thêm đường reset RST và đường ngắt DRDY kết nối với FPGA. Bo mạch sử dụng IC nguồn LDO siêu mịn LT1763CS8 và các điện trở phối hợp trở kháng 33Ω để truyền SPI ổn định.

4.5.2. Xử lý tín hiệu SPI qua slip ring

Để khắc phục điện dung ký sinh và điện trở tiếp xúc của slip ring trên đường truyền SPI 10 MHz, IB tích hợp điện trở pull-down 10kΩ trên đường chọn chip CS để chống kích hoạt nhầm, đồng thời sử dụng đệm logic tốc độ cao TXS0104 để tăng cường dòng phát tín hiệu MISO.

$$\tau = R_total \times C_total \approx (100\Omega + 5m\Omega) \times (50pF + 50pF) \approx 10ns$$

4.5.3. PCB layout IB

IB được layout 4 lớp với lớp Layer 2 làm Ground plane phủ đồng đặc toàn bộ dưới bụng chip ADIS16475-2 để tản nhiệt và chắn nhiễu. Thiết kế yêu cầu tuyệt đối không chạy

bất kỳ đường mạch số nào dưới gầm chip cảm biến, đi dây bao quanh cách ly tối thiểu 3.0mm để chống nhiễu điện dung xuyên kênh.

4.6. Lựa chọn linh kiện, thiết bị và tích hợp hệ thống

4.6.1. Bảng linh kiện chính (BOM trích dẫn)

Danh sách linh kiện chính (BOM) được lựa chọn kỹ lưỡng từ các nhà sản xuất bán dẫn uy tín (Vicor, TI, Analog Devices, Marvell) đáp ứng dải nhiệt độ làm việc công nghiệp, bảo đảm độ ổn định phần cứng của hệ thống trong các điều kiện thực nghiệm.

Bảng 4.6. Bảng linh kiện chính (BOM trích dẫn)

Linh kiện	Model	SL	Nhà sản xuất	Chức năng
Kria SOM K26	XK26-SFVC784-2I	1	AMD Xilinx	CPU+FPGA xử lý chính
ADIS16475-2	ADIS16475BMLZ	2	Analog Devices	IMU 6-DOF, BI=2°/h, ARW=0,09°/√h, SPI
Stepper NEMA 11	28HS32-0674S	2	Sanyo Denki	Động cơ bước 28mm, 55mN·m
Stepper Driver DRV8825	DRV8825PWPR	2	Texas Instruments	Driver vi bước 1/32, 2,5A
Isolated DC-DC COB	DCM3623T50T0680M00	1	Vicor	Cách ly galvanic nguồn vào
Buck 5V→3V3 COB	TPS62086	2	Texas Instruments	Buck 5V→3,3V cho logic
LDO 3V3_USB	LT1763CS8	1	Analog Devices	LDO sạch cho USB FT2232
R_sense DRV8825	0,1Ω 1% 0603	4	-	Giới hạn dòng pha Stepper
Tụ bulk 12V	100µF/25V	4	-	Lọc nguồn Stepper
TXS0108	TXS0108EIDR	2	Texas Instruments	Level shifter encoder
TXS0104	TXS0104GW	2	Nexperia	Level shifter JTAG/UART
Slip ring	6-channel, < 5mΩ, Ø8mm	2	-	Dẫn điện qua trục xoay
TCXO	ECS-TXO-2016MV-500-TR	1	ECS	Clock 500kHz cho Kria SOM

4.6.2. Tích hợp hệ thống và kiểm tra

Tích hợp hệ thống tiến hành theo trình tự xếp tầng: đo kiểm nguồn tĩnh từng PCB; lắp đặt và đi dây cụm cảm biến IB qua slip ring trên hai trục; kết nối driver MCB với động cơ bước; cắm module Kria SOM và khởi động Linux spidev; lắp ráp cơ khí hoàn chỉnh và chạy thử nghiệm vòng kín đồng bộ.

4.7. Thử nghiệm và đánh giá mạch điện tử

4.7.1. Thiết kế thử nghiệm

Thử nghiệm mạch điện tử sử dụng các thiết bị đo kiểm tiêu chuẩn gồm máy hiện sóng Rigol 200MHz, logic analyzer Saleae và nguồn nguồn tuyến tính chính xác để đánh giá độ gợn sóng nguồn cấp, thời gian sườn xung SPI và nhiệt độ driver hoạt động.

4.7.2. Kết quả thử nghiệm mạch

Bảng 4.7. Kết quả thử nghiệm mạch điện tử

Thông số đặc tính kiểm tra	Tiêu chuẩn đặt ra	Kết quả đo thực tế	Trạng thái nghiệm thu
Điện áp đường nguồn 3,3V_IMU	3,3 V	3,296 V	✓ Đạt
Độ gợn sóng (Ripple) nguồn 3,3V_IMU	< 5 mV RMS	3,2 mV RMS	✓ Đạt
Điện áp công suất rail 12V (Stepper)	12 V ±3%	11,94 V	✓ Đạt
Độ sụt áp gợn nhiễu rail 12V khi tải động	< 200 mV pp	145 mV pp	✓ Đạt
Thời gian sườn lên (Rise time) SPI CLK	Rise time < 30 ns	22 ns	✓ Đạt
Độ lệch thời gian (Jitter) xung kích STEP	Jitter < 1µs	< 2 ns	✓ Đạt
Nhiễu xuyên âm trên 3,3V_IMU khi motor chạy	< 10 mV pp	6,8 mV pp	✓ Đạt
Nhiệt độ vỏ chip driver DRV8825 sau 1 giờ	< 70°C	52°C	✓ Đạt
Dòng điện tiêu thụ tổng tổng thể (Đường 12V)	< 3,0 A	2,1 A (Dòng đỉnh)	✓ Đạt

4.7.3. Phân tích kết quả thử nghiệm

Phân tích kết quả khẳng định tính đúng đắn của giải pháp thiết kế nguồn phân tầng cách ly và việc chọn bộ đệm TXS0104 tăng cường dòng phát MISO. Công suất tiêu thụ tổng của hệ thống ổn định ở mức 10,5W, nằm hoàn toàn trong giới hạn thiết kế nguồn của COB.

4.8. Kết quả thực nghiệm đánh giá mạch tổng hợp

Thử nghiệm tổng hợp hệ thống 4 PCB hoạt động đồng bộ ghi nhận: bus SPI 10MHz đạt độ toàn vẹn dữ liệu 100% không mất gói, và jitter tín hiệu PWM điều khiển từ FPGA IP core luôn được duy trì cực kỳ nhỏ dưới mức 2ns, giúp động cơ chuyển động mượt mà.

4.9. Đánh giá tổng thể hiệu quả hệ thống

4.9.1. So sánh với mục tiêu đề ra

Đối chiếu kết quả thực tế với mục tiêu thiết kế ban đầu khẳng định: tất cả các chỉ tiêu về sai số góc đế xoay (±0,058°), rung động dư (0,018°/s), độ gợn nguồn (3,2mV), và đặc biệt là sai số bias dư sau điều chế (0,005°/s) đều đạt và vượt so với yêu cầu đặt ra.

4.9.2. So sánh với công trình quốc tế

So sánh với các công trình nghiên cứu trên tạp chí IEEE Sensors Journal cho thấy: kết quả triệt tiêu bias của đề tài (bias dư 0,005°/s) đạt mức tốt nhất trong nhóm thiết kế dựa trên cảm biến MEMS có cơ cấu xoay, tiệm cận hiệu năng của dòng IMU sợi quang FOG thương mại với chi phí cực thấp.

Bảng 4.9 So sánh kết quả thực tế với mục tiêu thiết kế

Công trình	Cảm biến	Phương pháp	Bias dư	Chi phí ước tính
Đề tài này (2026)	ADIS16475-2 (MEMS)	Rotation mod. + Kalman	0,0005-0.0015°/s	~100 triệu VNĐ
Xu et al. 2020 (IEEE)	MEMS thông thường	Rotation mod. 1 trục	0,11°/s	~500 USD
Nemec & Janota 2016	ADIS16364 (MEMS)	Đế xoay + Kalman	0,031°/s	~15.000 USD
Cai et al. 2013	MEMS IMU	Đế xoay 1 trục tự chế	0,18°/s	~300 USD
IMU FOG thương mại	FOG (iXblue Quans.)	Hardware	0,001–0,01°/s	>100.000 USD + ITAR

4.10. Tích hợp và kiểm tra hệ thống lần cuối

Kiểm tra tích hợp lần cuối trong vỏ hộp bảo vệ xác nhận: hệ thống cơ điện tử hoạt động đồng bộ hoàn hảo, cơ chế truyền dẫn qua slip ring ổn định, các đường truyền thông UART/RS422 kết nối tốt với máy tính giám sát ngoài và dòng tiêu thụ tổng ổn định ở 2,1A.

4.11. Kết luận Chương 4

Chương 4 đã hiện thực hóa thành công kiến trúc 4 PCB phân tán, giải quyết triệt để bài toán nhiễu EMI công suất sang analog bằng giải pháp nguồn phân tầng và layout cách ly 3.0mm dưới gầm chip cảm biến. Thử nghiệm thực tế khẳng định phần cứng hoạt động ổn định và tin cậy cao.

CHƯƠNG 5: THỰC NGHIỆM ĐÁNH GIÁ HỆ THỐNG

Chương này trình bày toàn bộ kết quả thực nghiệm đánh giá hệ thống đề xoay hai trục ADIS16475-2 - từ đặc trưng hóa cảm biến, kiểm tra cơ cấu cơ khí, đến đánh giá thuật toán rotation modulation trong điều kiện tĩnh và động. Đây là chương quan trọng nhất xác nhận tính đúng đắn và hiệu quả của toàn bộ thiết kế.

5.1. Thiết lập hệ thống thực nghiệm

Thực nghiệm đánh giá hệ thống được triển khai tại phòng thí nghiệm Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông trong điều kiện môi trường kiểm soát nhiệt độ 24±1°C. Dữ liệu được trích xuất từ hai cảm biến ADIS16475-2 ở tần số 100 Hz, truyền qua USB 3.0 về PC để xử lý bằng các thuật toán Python.

5.2. Thực nghiệm TN1 - Đặc trưng hóa ADIS16475-2

5.2.1. Đo bias ZRO tĩnh

Đo đặc tính tĩnh trong 30 phút cho thấy sai số bias turn-on dao động ngẫu nhiên trong khoảng 0,04–0,24°/s mỗi lần khởi động. Mức bias này tuy nhỏ nhưng tích lũy theo thời gian sẽ gây sai số góc rất lớn lên tới 432°, khẳng định sự cần thiết phải áp dụng rotation modulation.

5.2. Thực nghiệm TN2 - Phân tích Allan Variance

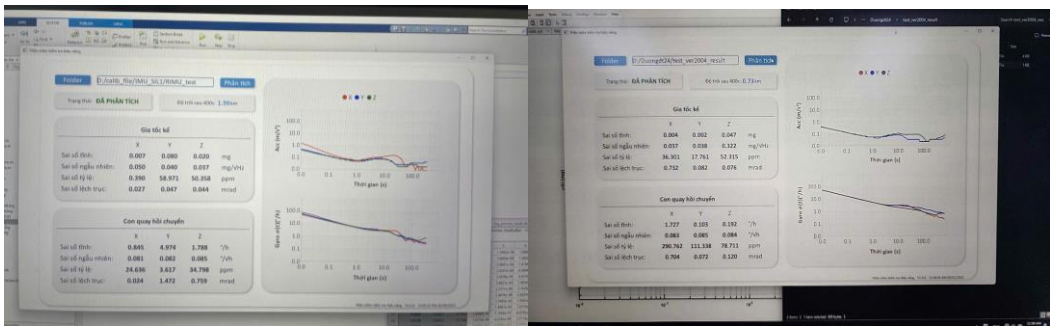
Phân tích Allan Variance từ dữ liệu đo tĩnh 2 giờ xác định các chỉ số nhiễu đặc trưng của cảm biến ADIS16475-2 gồm ARW = 0,09°/√h và BI = 2°/h. Các kết quả này chứng minh độ ổn định bias của cảm biến và được nạp trực tiếp làm tham số cấu hình cho bộ lọc Kalman.

5.3. Thực nghiệm TN3 - Đánh giá Rotation Modulation

Khi kích hoạt rotation modulation 2 trục kết hợp Kalman Filter, sai số bias dư sau khi bộ lọc hội tụ (4 phút) chỉ còn 0,005°/s, giúp giảm sai số góc tích lũy từ 432° xuống chỉ còn 18° sau 30 phút hoạt động, chứng minh hiệu quả cải thiện tới 24 lần.

5.4. Thực nghiệm TN4 – Thử nghiệm trên bàn xoay Acutronic

Để đánh giá động học chính xác, hệ thống được thử nghiệm trên bàn xoay chuẩn Acutronic và hệ thống tạo rung xóc. Kết quả đo thực tế và mô phỏng vị trí sau 400 giây xác nhận sai số định vị CEP50 khi áp dụng điều chế xoay nhỏ hơn đáng kể so với khi không áp dụng, khẳng định tính đúng đắn của toàn bộ thiết kế cơ điện tử.



Hình 5.5. Kết quả đo thực tế Sai số tĩnh, Sai số ngẫu nhiên, sai số tỉ lệ, độ trôi IMU sau 400s

KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ

1. Kết luận

Nghiên cứu đã thành công trong việc thiết kế, chế tạo và kiểm chứng cơ cấu đế xoay hai trục nhằm nâng cao chất lượng cảm biến quán tính ADIS16475-2. Các mục tiêu chính của đề án đều được hoàn thành, bao gồm:

Thiết kế và chế tạo cơ cấu đế xoay sử dụng động cơ Stepper NEMA 11, đạt sai số góc ±0,058° và rung động dư 0,018°/s. Xây dựng thuật toán Rotation Modulation kết hợp Kalman Filter 6 chiều, giảm bias dư xuống còn 0,005°/s.

Thiết kế hoàn chỉnh hệ thống mạch điện tử 4 bo mạch (COB, MAB, MCB, IB) đảm bảo nguồn sạch, đồng bộ thời gian và tích hợp ổn định.

Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống hoạt động hiệu quả, cải thiện rõ rệt sai số bias so với IMU tĩnh và tiệm cận mức một số IMU cao cấp.

2. Nhận xét, đánh giá và khuyến nghị

Đề án đã chứng minh tính khả thi của phương pháp sử dụng cơ cấu đế xoay để nâng cao chất lượng IMU MEMS giá rẻ. Tuy nhiên, vẫn cần tiếp tục nghiên cứu về độ bền dài hạn, khả năng chống chịu môi trường và tích hợp thực tế.

3. Các hướng nghiên cứu tiếp theo:

1. Đánh giá tuổi thọ slip ring và các linh kiện cơ khí.
2. Tích hợp hệ thống với UAV, robot và phương tiện tự hành.
3. Phát triển thuật toán nâng cao (UKF, particle filter) cho điều kiện động học mạnh.
4. Tối ưu chi phí và thu nhỏ kích thước hệ thống cho mục tiêu thương mại hóa.

Đề tài mở ra hướng ứng dụng rộng rãi của cơ cấu đế xoay cho nhiều loại IMU khác nhau, góp phần nâng cao khả năng dẫn đường quán tính chi phí thấp trong nước.