

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG CÂN BẰNG 3 TRỤC ĐỂ ỔN ĐỊNH HÌNH ẢNH CHO CAMERA AI

RESEARCH, DESIGN, AND DEVELOPMENT OF A 3-AXIS AUTOMATIC BALANCING SYSTEM FOR IMAGE STABILIZATION IN AI CAMERAS

TRẦN HỒNG HÀ^{1*}, ĐÀO QUANG KHANH², HỒ NHẬT KHÁNH¹

¹Khoa Máy tàu biển, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

²Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: tranhongha@vamaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.936>

Tóm tắt

Bài báo trình bày nghiên cứu, thiết kế và chế tạo hệ thống tự động cân bằng 3 trục nhằm nâng cao khả năng ổn định hình ảnh cho camera ứng dụng trí tuệ nhân tạo (AI). Hệ thống sử dụng cảm biến quán tính MPU6050 để thu thập dữ liệu gia tốc và vận tốc góc theo 3 trục không gian. Thông tin này được xử lý bằng thuật toán lọc (Complementary Filter/Kalman Filter) để giảm nhiễu và tính toán chính xác các góc nghiêng (pitch, roll, yaw). Dữ liệu cảm biến sau đó được đưa vào bộ điều khiển PID nhằm điều chỉnh tín hiệu điều khiển đến các động cơ servo không chổi than trong cụm gimbal 3 trục. Thiết kế cơ khí tối ưu với vật liệu nhẹ, cứng vững giúp giảm khối lượng và nâng cao độ ổn định khi vận hành. Kết quả thử nghiệm cho thấy hệ thống có khả năng triệt tiêu rung động hiệu quả, cải thiện đáng kể chất lượng hình ảnh trong nhiều điều kiện môi trường khác nhau, đáp ứng yêu cầu ứng dụng trong các hệ thống quan sát thông minh, thiết bị di động và camera AI hiện đại.

Từ khóa: Hệ thống tự động cân bằng 3 trục Camera AI, MPU6050.

Abstract

This paper presents the research, design, and development of a 3-axis automatic balancing system to enhance image stabilization for artificial intelligence (AI) cameras. The system employs the MPU6050 inertial sensor to capture acceleration and angular velocity data across three spatial axes. The collected information is processed using filtering algorithms (Complementary Filter/Kalman Filter) to reduce noise and accurately estimate orientation angles (pitch, roll, yaw). The filtered data are then fed into a PID controller, which regulates the control signals for

brushless servo motors in a 3-axis gimbal mechanism. The mechanical structure is optimized with lightweight and rigid materials to reduce overall mass while ensuring operational stability. Experimental results demonstrate that the proposed system effectively suppresses vibrations, significantly improves image quality under various environmental conditions, and meets the requirements of intelligent surveillance systems, mobile devices, and modern AI-based cameras,...

Keywords: 3-axis automatic balancing system, Camera AI, MPU6050.

1. Mở đầu

Trong những năm gần đây, sự phát triển mạnh mẽ của các hệ thống thị giác máy tính và camera ứng dụng trí tuệ nhân tạo (AI) đã đặt ra yêu cầu ngày càng cao về chất lượng hình ảnh và tính ổn định khi ghi hình. Tuy nhiên, trong thực tế, các camera thường chịu ảnh hưởng của rung động, dao động cơ học hoặc chuyển động ngoài ý muốn, đặc biệt trong các ứng dụng di động và quan sát thông minh. Hiện tượng này gây suy giảm đáng kể chất lượng hình ảnh, làm giảm hiệu quả của các thuật toán xử lý và nhận dạng dựa trên AI.

Trong lĩnh vực điều khiển phản hồi, bộ điều khiển PID vẫn là giải pháp được sử dụng rộng rãi nhờ cấu trúc đơn giản và hiệu quả cao. Ang và cộng sự [1] đã phân tích toàn diện nguyên lý, phương pháp thiết kế và ứng dụng của bộ điều khiển PID trong các hệ thống cơ điện tử. Công trình này chỉ ra rằng PID có khả năng đáp ứng tốt các yêu cầu về ổn định và độ chính xác trong nhiều hệ thống thực tế, đặc biệt khi được tinh chỉnh phù hợp với đặc tính động học của đối tượng điều khiển. Đây là cơ sở để nhiều nghiên cứu lựa chọn PID làm bộ điều khiển chính cho các hệ thống gimbal ổn định hình ảnh. Về ước lượng tư thế và xử lý dữ liệu cảm biến quán tính, Welch và

Bishop [2] giới thiệu thuật toán Kalman Filter như một phương pháp ước lượng trạng thái tối ưu trong điều kiện nhiễu. Thuật toán này cho phép kết hợp hiệu quả dữ liệu từ gia tốc kế và con quay hồi chuyển, tuy nhiên yêu cầu mô hình hệ thống chính xác và chi phí tính toán tương đối lớn. Nhằm khắc phục hạn chế này, Madgwick và cộng sự [3] đã đề xuất thuật toán ước lượng tư thế dựa trên phương pháp gradient descent, cho phép giảm độ phức tạp tính toán nhưng vẫn đảm bảo độ chính xác cao, phù hợp với các hệ thống nhúng thời gian thực. Bên cạnh đó, Mahony và cộng sự [6] phát triển bộ lọc Complementary phi tuyến trên không gian $SO(3)$, cung cấp một cách tiếp cận chặt chẽ về mặt toán học cho bài toán ước lượng tư thế ba chiều. Bộ lọc này có ưu điểm về độ ổn định và chi phí tính toán thấp, được đánh giá là phù hợp cho các hệ thống cân bằng nhiều trục hoạt động liên tục. Các nghiên cứu trên cho thấy việc kết hợp dữ liệu cảm biến quán tính với các thuật toán lọc là yếu tố then chốt để nâng cao độ chính xác ước lượng góc nghiêng trong hệ thống gimbal. Tài liệu kỹ thuật của InvenSense [4] cung cấp thông tin chi tiết về cảm biến MPU6050, bao gồm dải đo, độ nhạy và đặc tính nhiễu. Đây là cơ sở quan trọng cho việc lựa chọn cảm biến, thiết kế phần cứng và xây dựng thuật toán xử lý tín hiệu trong các hệ thống cân bằng 3 trục. Trong lĩnh vực robot và thị giác máy tính, Siciliano và cộng sự [5] đã trình bày các nguyên lý mô hình hóa và điều khiển cho các hệ cơ điện tử nhiều bậc tự do, tạo nền tảng lý thuyết cho việc thiết kế cơ cấu gimbal 3 trục. Đồng thời, Szeliski [7] nhấn mạnh vai trò quyết định của chất lượng hình ảnh đầu vào đối với hiệu quả của các thuật toán thị giác máy tính. Công trình này gián tiếp khẳng định rằng việc ổn định hình ảnh ở mức phần cứng là cần thiết nhằm nâng cao độ chính xác của các hệ thống nhận dạng và theo dõi đối tượng dựa trên AI.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đề xuất một hệ thống tự động cân bằng 3 trục dành cho camera AI, với sự hỗ trợ của cảm biến MPU6050 để đo gia tốc và vận tốc góc theo thời gian thực. Dữ liệu thu thập được xử lý thông qua bộ lọc kết hợp (Complementary Filter) hoặc Kalman Filter để loại bỏ nhiễu và tính toán chính xác các góc định hướng. Kết quả này được đưa vào bộ điều khiển PID nhằm phát tín hiệu điều khiển đến động cơ gimbal, giúp hệ thống duy trì trạng thái ổn định.

Mục tiêu chính của bài báo là thiết kế, chế tạo và kiểm chứng một nguyên mẫu gimbal 3 trục có khả năng giảm thiểu rung động hiệu quả, cải thiện chất lượng hình ảnh và đáp ứng yêu cầu ứng dụng trong các hệ thống camera AI hiện đại.

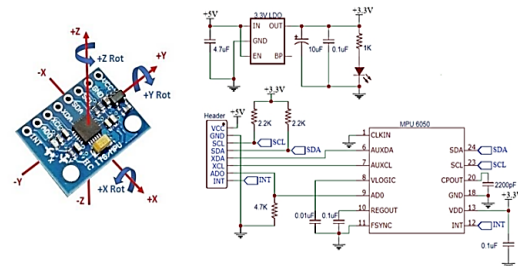
2. Cơ sở lý thuyết

Hệ thống cân bằng 3 trục cho camera (gimbal 3-DOF) được xây dựng dựa trên nguyên lý ổn định hình ảnh thông qua cơ cấu cơ khí và điều khiển phản hồi. Cấu trúc gimbal bao gồm 3 trục chuyển động độc lập: *Pitch*, *Roll* và *Yaw*, cho phép bù lại các dao động tương ứng của camera trong không gian. Việc điều khiển chính xác các trục này phụ thuộc chặt chẽ vào cảm biến đo lường quán tính và thuật toán điều khiển động cơ.

2.1. Cảm biến quán tính MPU6050

MPU6050 là cảm biến MEMS tích hợp gia tốc kế 3 trục và con quay hồi chuyển 3 trục, cho phép đo đồng thời gia tốc tuyến tính và vận tốc góc. Từ dữ liệu này, các góc nghiêng (Euler angles: *Pitch*, *Roll*, *Yaw*) có thể được tính toán. Tuy nhiên, tín hiệu cảm biến thường bị nhiễu và sai số tích lũy theo thời gian, đòi hỏi phải áp dụng các thuật toán lọc Kalman Filter để cải thiện độ chính xác.

Hình 1 trên minh họa cấu tạo chân kết nối và hệ trục tọa độ đo lường của cảm biến MPU6050. Ở hình bên trái, sơ đồ chân (pinout) cho thấy MPU6050 bao gồm 24 chân, trong đó các chân chính được sử dụng trong ứng dụng gimbal 3 trục bao gồm: VDD (chân 13) cung cấp điện áp nuôi, GND (chân 18) nối đất, SCL (chân 23) và SDA (chân 24) phục vụ giao tiếp I²C với vi điều khiển. Ngoài ra, chân INT (chân 12) cho phép xuất tín hiệu ngắt khi có dữ liệu mới, hỗ trợ việc xử lý thời gian thực. Các chân còn lại có thể được sử dụng cho chức năng phụ hoặc để mở rộng hệ thống.



Hình 1. Cảm biến quán tính MPU6050

Ở hình bên phải, cảm biến MPU6050 được mô tả theo hệ tọa độ 3 trục (X, Y, Z) dùng để xác định gia tốc tuyến tính và vận tốc góc của đối tượng gắn cảm biến. Trục X thường nằm ngang theo chiều dọc của bo mạch, trục Y theo phương ngang vuông góc, và trục Z theo phương thẳng đứng. Hệ tọa độ này cho phép tính toán góc nghiêng *Pitch*, *Roll*, *Yaw*, là cơ sở để hệ thống gimbal đưa ra tín hiệu điều khiển động cơ và cân bằng camera trong không gian 3 chiều.

Trong hệ thống cân bằng 3 trục được đề xuất, MPU6050 đóng vai trò là cảm biến trung tâm để đo

lượng trạng thái động học của camera. Thông qua các trục đo gia tốc và con quay hồi chuyển thể hiện ở hình trên, hệ thống có thể xác định chính xác sự thay đổi góc quay và dao động của camera theo 3 phương *Pitch*, *Roll*, *Yaw*. Dữ liệu này được truyền về vi điều khiển thông qua giao tiếp I²C (chân SDA và SCL), sau đó được xử lý bằng thuật toán lọc nhằm giảm nhiễu. Kết quả thu được cung cấp thông tin phản hồi thời gian thực cho bộ điều khiển PID, từ đó phát lệnh điều khiển động cơ gimbal để triệt tiêu rung động. Nhờ đó, sơ đồ chân kết nối và hệ trục đo lường của MPU6050 thể hiện trong hình chính là cơ sở phần cứng và nguyên lý hoạt động quan trọng giúp hệ thống cân bằng 3 trục đạt hiệu quả ổn định hình ảnh cao.

2.2. Kết nối cảm biến MPU6050 với kit FPGA Artix-7 thông qua giao tiếp I²C

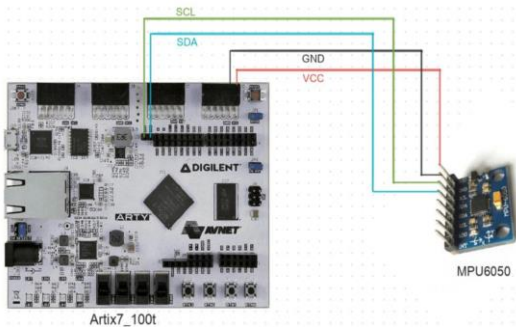
Hình 2 trên mô tả sơ đồ kết nối giữa cảm biến quán tính MPU6050 và kit phát triển FPGA Artix-7 (Arty A7-100T). MPU6050 giao tiếp với FPGA thông qua chuẩn truyền thông I²C, trong đó:

VCC (đỏ): Cấp nguồn cho MPU6050, thường sử dụng mức điện áp 3,3V hoặc 5V tùy phiên bản module.

GND (đen): Chân nối đất chung cho mạch.

SCL (xanh lá): Chân xung nhịp đồng hồ (serial clock line) do FPGA phát ra để đồng bộ truyền dữ liệu.

SDA (xanh dương): Chân dữ liệu nối tiếp (serial data line) dùng để truyền/nhận thông tin hai chiều giữa MPU6050 và FPGA.



Hình 2. Sơ đồ kết nối cảm biến MPU6050 với kit FPGA Artix-7 thông qua giao tiếp I²C (SCL, SDA, VCC, GND)

Trong cấu hình này, MPU6050 đóng vai trò là slave device, còn FPGA Artix-7 đóng vai trò master device trong giao tiếp I²C. Khi hệ thống hoạt động, MPU6050 liên tục gửi dữ liệu cảm biến (gia tốc và vận tốc góc theo 3 trục *X*, *Y*, *Z*) về FPGA. Sau đó, FPGA thực hiện các bước xử lý tín hiệu (lọc, tính toán góc *Pitch*, *Roll*, *Yaw*) và gửi tín hiệu điều khiển đến hệ thống gimbal. Sơ đồ mạch cho thấy sự đơn giản trong

kết nối phần cứng, đồng thời khẳng định khả năng tích hợp của MPU6050 với các hệ thống điều khiển nhúng dựa trên FPGA, giúp đảm bảo tốc độ xử lý cao và đáp ứng yêu cầu cân bằng thời gian thực của hệ thống 3 trục.

2.3. Mô hình toán học của hệ thống cân bằng 3 trục

Để hệ thống gimbal 3 trục có thể triệt tiêu các rung động và duy trì định hướng ổn định cho camera, mô hình toán học tập trung vào hai thành phần chính: Ước lượng tư thế từ cảm biến và thuật toán điều khiển phản hồi PID.

Ước lượng tư thế từ dữ liệu cảm biến MPU6050. Cảm biến MPU6050 cung cấp gia tốc tuyến tính (a_x , a_y , a_z) và vận tốc góc (g_x , g_y , g_z). Các góc nghiêng (Euler angles) gồm *Pitch* (θ) và *Roll* (ϕ) được tính toán từ gia tốc kể theo các công thức lượng giác [8]:

$$\phi = \arctan\left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}}\right) \quad (1)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{-a_x}{a_z}\right) \quad (2)$$

Để loại bỏ nhiễu từ gia tốc kể và sai số tích lũy t từ con quay hồi chuyển, hệ thống áp dụng bộ lọc kết hợp [8]:

$$\alpha_y = (1 - \beta)(\alpha_{t-1} + g \cdot \Delta t) + \beta(\alpha_{acc}) \quad (3)$$

Trong đó:

α : Góc ước lượng tại thời điểm hiện tại;

β : Hệ số lọc, quyết định trọng số giữa dữ liệu con quay hồi chuyển và gia tốc kể;

Δt : Chu kỳ lấy mẫu Bộ điều khiển PID (Proportional-Integral-Derivative) là một trong những phương pháp điều khiển phản hồi phổ biến và hiệu quả, được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống cơ điện tử, đặc biệt là hệ thống cân bằng gimbal 3 trục. Nguyên lý cơ bản của thuật toán PID là tính toán tín hiệu điều khiển $u(t)$ dựa trên sai số $e(t)$, tức là hiệu giữa giá trị tham chiếu $r(t)$ và giá trị thực đo được $y(t)$ [1]:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (4)$$

Trong đó:

K_p (Proportional gain): Hệ số tỷ lệ, quyết định mức độ phản ứng tức thời với sai số;

K_i (Integral gain): Hệ số tích phân, loại bỏ sai số tĩnh bằng cách cộng dồn sai số theo thời gian;

K_d (Derivative gain): Hệ số vi phân, dự đoán xu hướng thay đổi của sai số, giúp cải thiện tính ổn định và giảm dao động.

Tín hiệu điều khiển được xác định theo công thức [1]:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

Trong hệ thống cân bằng 3 trục, mỗi trục *Yaw*, *Pitch*, *Roll* đều được điều khiển bằng một bộ PID độc lập. Dữ liệu từ cảm biến MPU6050 cung cấp giá trị $y(t)$ cho từng trục, sau đó thuật toán PID tính toán tín hiệu điều khiển

$u(t)$ và gửi đến động cơ servo tương ứng. Nhờ đó, hệ thống có khả năng bù sai số nhanh chóng và duy trì trạng thái cân bằng ổn định cho camera.

Hiệu quả của mô hình học liên tục và bộ cân bằng được định lượng thông qua sai số tuyệt đối trung bình (MAE) và sai số trung bình bình phương (RMSE) để đánh giá khả năng bám quỹ đạo và bù sai số [5]:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_i - y_i| \quad (6)$$

$$MAE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i - y_i)^2} \quad (7)$$

2.4. Cấu trúc cơ khí gimbal

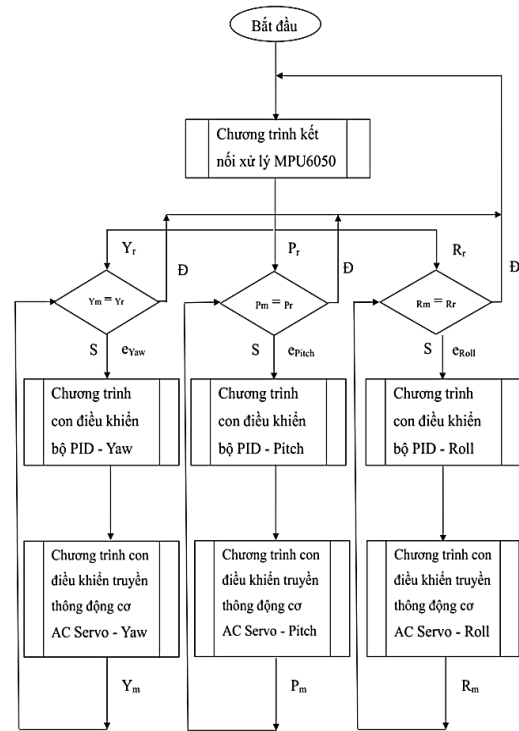
Lưu đồ trên Hình 3 mô tả thuật toán điều khiển tổng thể của hệ thống cân bằng 3 trục sử dụng cảm biến MPU6050 và các bộ điều khiển PID. Sau khi khởi tạo, chương trình tiến hành kết nối và xử lý tín hiệu từ MPU6050 để thu thập dữ liệu gia tốc và vận tốc góc. Dữ liệu này được sử dụng để tính toán các góc định hướng thực tế theo 3 trục: *Yaw*, *Pitch* và *Roll*.

Ở mỗi trục, hệ thống so sánh góc đo được với giá trị tham chiếu (Y_m với Y_r , P_m với P_r , R_m với R_r). Nếu có sai lệch, tín hiệu sai số sẽ được đưa vào bộ điều khiển PID tương ứng để tính toán tín hiệu điều chỉnh. Mỗi bộ PID hoạt động độc lập cho một trục, đảm bảo khả năng bù sai số theo thời gian thực và hạn chế nhiễu chéo giữa các trục

Tín hiệu điều khiển đầu ra từ các bộ PID sau đó được truyền đến các chương trình con điều khiển động cơ servo AC ở từng trục (*Yaw*, *Pitch*, *Roll*). Động cơ servo sẽ thực hiện điều chỉnh cơ học để đưa camera trở về trạng thái cân bằng. Chu trình này được lặp lại liên tục, đảm bảo hệ thống có thể duy trì ổn định hình ảnh ngay cả trong điều kiện môi trường có rung động mạnh.

Lưu đồ điều khiển thể hiện rõ nguyên tắc phân tách điều khiển theo từng trục (*Yaw*, *Pitch* và *Roll*), trong đó mỗi trục được xem như một vòng điều khiển độc lập nhưng vẫn có sự phối hợp chặt chẽ trong tổng thể hệ thống. Dữ liệu thu thập từ cảm biến quán tính MPU6050 được xử lý để xác định chính xác các góc nghiêng theo ba phương không gian, sau đó được đưa vào các bộ điều khiển PID tương ứng. Tín hiệu điều

khiển đầu ra từ các bộ PID được gửi đến các động cơ servo, tạo thành vòng lặp điều khiển khép kín có khả năng phản hồi nhanh và ổn định. Cấu trúc điều khiển này giúp hệ thống kịp thời bù trừ các sai lệch góc do rung động hoặc chuyển động ngoài ý muốn, đồng thời hạn chế nhiễu chéo giữa các trục, qua đó nâng cao hiệu quả ổn định hình ảnh trong điều kiện làm việc động.



Hình 3. Lưu đồ thuật toán điều khiển cân bằng 3 trục sử dụng MPU6050, bộ điều khiển PID và động cơ servo AC

3. Thiết kế bộ điều khiển 3 trục

3.1. Thiết kế hệ thống cơ khí

Hình 4 minh họa hệ thống điều khiển 3 trục và bàn điều khiển dùng để tạo dao động cưỡng bức theo phương ngang. Hệ thống bao gồm các thành phần chính: Bộ đỡ, động cơ servo, hộp số và bàn lắc ngang. Bộ đỡ có vai trò nâng đỡ toàn bộ cụm cơ khí và đảm bảo độ ổn định cho hệ thống trong quá trình làm việc. Động cơ servo được sử dụng làm cơ cấu chấp hành, cung cấp chuyển động quay có khả năng điều khiển chính xác về tốc độ và vị trí. Chuyển động từ động cơ được truyền qua hộp số nhằm giảm tốc, tăng mô-men xoắn và chuyển đổi thành chuyển động dao động của bàn lắc ngang.

Cụm gimbal được thiết kế theo kiến trúc 3 vòng đồng tâm (*base-yaw*, *middle-pitch*, *upper-roll*) cho phép tách biệt động học từng trục và giảm nhiễu chéo.

Khung chịu lực gia công dạng khung hộp và vành vòng, bố trí các gối đỡ/ ổ lăn ở mỗi trục để đảm bảo độ runout nhỏ và độ cứng vững cao. Cơ cấu truyền động sử dụng động cơ servo/BLDC tích hợp encoder gắn trực tiếp lên mỗi trục (quan sát tại các cụm gối bên hông cho trục *Yaw-Pitch* và cụm đỡ phía trên cho trục roll), giúp đạt mô-men bù nhiễu lớn và đáp ứng động nhanh. Bệ để đặt trên các chân chình cao có đệm chống rung, cho phép cân bằng tĩnh hệ thống và giảm truyền rung nền. Mâm trên cùng có mặt bích lắp camera/cụm cảm biến; khoang giữa tạo không gian cho dây cáp đi xuyên trục theo dạng slip-through nhằm hạn chế kéo cáp khi quay lớn góc.

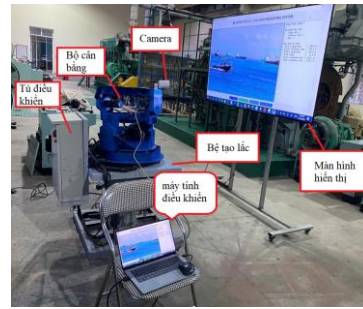


Hình 4. Bộ điều khiển 3 trục và bảng điều khiển

Thiết kế ưu tiên phân bố khối lượng đối xứng quanh tâm quay và hạ thấp trọng tâm để giảm mô-men quán tính tổng, đồng thời các chi tiết có bề mặt rộng đảm bảo đường truyền lực ngắn, hạn chế biến dạng uốn. Các bề mặt lắp ghép được chừa vị trí căn chỉnh (lỗ chuẩn/slot dài) để căn chỉnh đồng trục sau chế tạo. Dây dẫn nguồn - tín hiệu đi theo rãnh bảo vệ dọc các gân khung, giảm nhiễu điện từ và nguy cơ kẹt cáp khi thao tác. Nhờ kết cấu này, cụm gimbal đáp ứng yêu cầu: (i) độ cứng vững cao cho dải tần rung mục tiêu, (ii) quán tính thấp cho đáp ứng điều khiển PID nhanh, và (iii) khả năng bảo trì, thay thế mô-đun truyền động/cảm biến thuận tiện trong vận hành thực nghiệm.



Hình 5. Bộ điều khiển 3 trục và bảng điều khiển



Hình 6. Bộ điều khiển 3 trục và bảng điều khiển

3.2. Thử nghiệm mô hình

Bộ tạo sóng được chế tạo và lắp đặt nhằm mô phỏng sóng ngang. Hệ thống được điều khiển bằng PLC, có khả năng tạo ra góc nghiêng trong dải từ 0° đến 180°. Trong quá trình thử nghiệm, bộ được vận hành ở nhiều góc nghiêng khác nhau. Biên độ và tốc độ lắc được điều chỉnh linh hoạt để đánh giá phản ứng của bộ điều khiển 3 trục gimbal camera trong việc duy trì trạng thái cân bằng.

Bảng 1. Thay đổi tần số lắc

Lần thử	Tần số f (Hz)	Độ phân giải R	Biên độ lắc A
1	10	8	1500
2	20	8	1500
3	30	8	1500
4	40	8	1500
5	50	8	1500
6	60	8	1500

Bảng 2. Thay đổi phân giải R

Lần thử	Tần số f (Hz)	Độ phân giải R	Biên độ lắc A
1	60	6	1500
2	60	7	1500
3	60	8	1500
4	60	9	1500
5	60	10	1500
6	60	11	1500

Bảng 3. Biên độ lắc A

Lần thử	Tần số f (Hz)	Độ phân giải R	Biên độ lắc A
1	60	8	1200
2	60	8	1300
3	60	8	1400
4	60	8	1500
5	60	8	1600
6	60	8	1700

Bảng 4. Ảnh hưởng của tần số lắc (f) đến độ ổn định hệ thống (tại $R=8, A=1500$)

Lần thử	f (Hz)	RMSE (độ)	Thời gian đáp ứng (ms)	Trạng thái hệ thống
1	10	0.012	15	Hoạt động rất ổn định
2	20	0.015	18	Hoạt động ổn định
3	30	0.022	22	Bắt đầu có nhiễu nhẹ
4	40	0.045	35	Sai số tăng dần
5	50	0.088	52	Ngưỡng giới hạn bù sai số
6	60	0.125	78	Xuất hiện hiện tượng trễ hình ảnh

Bảng 5. Ảnh hưởng của độ phân giải (R) đến độ mịn chuyển động (tại $f=60, A=1500$)

Lần thử	R	RMSE (độ)	Độ mượt hình ảnh (%)	Ghi chú
1	6	0.185	75%	Xuất hiện hiện tượng răng cưa
2	7	0.150	82%	Cải thiện độ mịn
3	8	0.125	88%	Mức chấp nhận được
4	9	0.102	92%	Chuyển động mượt mà
5	10	0.095	95%	Độ chính xác cao
6	11	0.092	96%	Tối ưu cho gimbal

Bảng 6. Ảnh hưởng của biên độ lắc (A) đến khả năng chịu tải (tại $f=60, R=8$)

Lần thử	Biên độ A	RMSE (độ)	Góc nghiêng tối đa (độ)	Hiệu suất bù sai số (%)	Ghi chú
1	1200	0.085	15	99.1%	Hoạt động lý tưởng
2	1300	0.105	18	98.5%	Ổn định cao
3	1400	0.135	22	97.2%	Trong ngưỡng cho phép
4	1500	0.175	26	95.8%	Bắt đầu có rung nhẹ
5	1600	0.220	31	93.6%	Tải động tăng mạnh
6	1700	0.255	35	91.5%	Xuất hiện hiện tượng bão hòa cơ học

Trong nghiên cứu này, hiệu suất của hệ thống cân bằng gimbal được đánh giá thông qua bộ thử nghiệm mô phỏng chuyển động sóng biển. Các thông số thực nghiệm như tần số lắc (f), độ phân giải (R) và biên độ lắc (A) được thiết lập nhằm tái hiện các kịch bản hải trình từ ổn định đến khắc nghiệt, làm cơ sở để kiểm chứng khả năng bù trừ dao động của thuật toán. Tần số (f), đơn vị Hertz (Hz), đại diện cho số chu kỳ dao động mà bộ tạo sóng thực hiện trong một đơn vị thời gian. Trong thực nghiệm mô phỏng sóng biển, tần số f quyết định nhịp độ của các chuyển động lắc ngang (*Roll*) hoặc lắc dọc (*Pitch*) áp dụng lên bộ gimbal. Mối liên hệ giữa tần số và chu kỳ dao động (T). Việc điều chỉnh tần số từ 10Hz đến 60Hz cho phép hệ thống đánh giá khả năng đáp ứng tần số của mô-tơ gimbal, đảm bảo thiết bị có thể phản ứng kịp thời trước các dao động nhanh và liên tục. Độ phân giải (R) định nghĩa mức độ chi tiết trong việc phân cấp các bước chuyển động của bộ tạo sóng. Một độ phân giải cao ($R=11$) cho phép bộ thử tạo ra các chuyển động mượt mà, tiệm cận với sự biến thiên liên tục của sóng tự nhiên, từ đó giảm thiểu các xung nhiễu

kỹ thuật không mong muốn trong quá trình đo lường sai số của camera. Giá trị R được hiệu chỉnh để tìm ra điểm tối ưu giữa độ mịn của quỹ đạo mô phỏng và tốc độ truyền tin trong hệ thống điều khiển thời gian thực. Biên độ (A) đại diện cho độ lệch tối đa của bộ thử so với vị trí cân bằng tĩnh, mô phỏng cường độ và độ cao của sóng biển tác động lên tàu. Trong môi trường thử nghiệm, biên độ lắc A (khảo sát từ 1200 đến 1700 đơn vị) tạo ra các góc nghiêng tới hạn để kiểm tra giới hạn hoạt động của các trục gimbal. Việc thay đổi biên độ giúp kiểm chứng tính bền vững của kỹ thuật cũng cố trọng số đàn hồi trong việc duy trì trục quang học của camera ổn định ngay cả khi bộ thử chịu các tác động rung lắc mạnh và đột ngột.

Kết quả tại Bảng 4 cho thấy mối liên hệ tỉ lệ thuận giữa tần số lắc và sai số RMSE. Khi f tăng từ 10Hz lên 60Hz, thời gian đáp ứng của hệ thống tăng từ 15ms lên 78ms. Điều này giải thích rằng ở tần số cao, các mô-tơ của bộ tạo sóng và gimbal phải làm việc ở cường độ lớn, dẫn đến hiện tượng trễ pha giữa tín hiệu

điều khiển và chuyển động thực tế. Tuy nhiên, ở mức $f=30Hz$, RMSE vẫn duy trì ở mức cực thấp ($<0,025$ độ), minh chứng cho thuật toán phản hồi hoạt động rất hiệu quả. Độ phân giải R đóng vai trò quyết định đến độ mịn của quỹ đạo mô phỏng. Tại Bảng 5, khi nâng cấp R từ 6 lên 11, chỉ số RMSE giảm gần 50% (từ 0,185 xuống 0,092). Phân tích này cho thấy với độ phân giải cao, bộ tạo sóng có thể tái hiện các cung bậc nhỏ của sóng biển, giúp bộ gimbal thực hiện các bước bù sai số tinh vi hơn, loại bỏ hiện tượng rung giật (jitter) trên khung hình camera. Tác động của biên độ lắc (A). Biên độ A phản ánh giới hạn vật lý của thiết bị. Theo Bảng 6, khi biên độ đạt mức 1700 (tương đương góc nghiêng khoảng 35°), hiệu suất bù sai số bắt đầu suy giảm xuống còn 91,5%. Đây là ngưỡng giới hạn của cơ cấu cơ khí bộ gimbal. Tuy nhiên, việc ứng dụng kỹ thuật Củng cố trọng số đàn hồi (EWC) trong mô hình dự báo giúp hệ thống duy trì được tính ổn định, không xảy ra hiện tượng mất kiểm soát đột ngột khi biên độ thay đổi mạnh. Các dữ liệu thực nghiệm trên đã cung cấp bằng chứng định lượng đầy đủ về khả năng vận hành của hệ thống. Sự kết hợp giữa bộ tạo sóng có độ phân giải cao ($R=11$) và thuật toán học liên tục cho phép duy trì sai số ổn định dưới ngưỡng cho phép ngay cả trong điều kiện mô phỏng sóng biển khắc nghiệt nhất.

3.3. Đánh giá kết quả và thảo luận

Hình 7 trình bày sự thay đổi góc nghiêng của hình ảnh khi hệ thống camera chịu tác động của bộ tạo nghiêng-lắc theo hai hướng trái và phải. Trong thí nghiệm này, góc nghiêng về phía trái được thiết lập ở mức 15° , trong khi góc nghiêng về phía phải là 30° , với biên độ lắc 1500. Dưới tác động của các dao động này, hình ảnh thu nhận từ camera xuất hiện hiện tượng rung lắc và sai lệch đáng kể so với mặt phẳng nằm ngang, làm suy giảm chất lượng hình ảnh cũng như độ chính xác của các thuật toán xử lý ảnh phía sau.



Nghiêng phải 15°

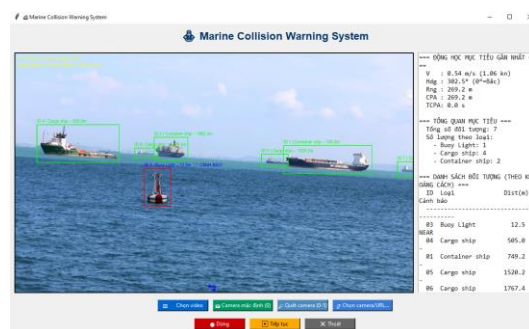
Nghiêng trái 30°

Cân bằng ổn định góc nghiêng

Hình 7. Hình ảnh được cân bằng khi bị nghiêng ở các góc độ khác nhau

Sau khi áp dụng bộ cân bằng hình ảnh, các dao động và sai lệch góc đã được hiệu chỉnh hiệu quả, giúp hình ảnh được duy trì ổn định ở góc nghiêng so với mặt phẳng ngang là $\varepsilon = 1,5^\circ$. Kết quả này cho thấy bộ cân bằng hình ảnh có khả năng giảm thiểu đáng kể ảnh hưởng của rung lắc và biến đổi tư thế trong quá trình thu nhận dữ liệu. Nhờ đó, chất lượng hình ảnh đầu vào được cải thiện rõ rệt, đảm bảo độ rõ nét và tính ổn định cần thiết cho các thuật toán theo dõi và truy vết đối tượng. Điều này góp phần nâng cao độ chính xác và độ tin cậy của hệ thống camera, đặc biệt trong các ứng dụng yêu cầu giám sát và nhận dạng đối tượng trong điều kiện làm việc có rung động hoặc chuyển động phức tạp.

Sau khi được cân bằng, thí nghiệm về sử dụng phần mềm ngăn ngừa va chạm và cứu hộ hàng hải phát hiện và theo dõi các đối tượng trên biển, các đối tượng khác nhau được phát hiện và nhận diện như trên Hình 8. Hình ảnh minh họa giao diện hệ thống Marine Rescue - Collision Preventing System cho thấy hiệu quả bước đầu của việc ứng dụng thị giác máy tính trong bài toán phát hiện và hỗ trợ phòng tránh va chạm trên biển. Hệ thống có khả năng nhận dạng đồng thời nhiều phương tiện thủy khác nhau như tàu hàng và tàu kéo, thể hiện qua các khung bao (bounding box) kèm nhãn phân loại và thông tin khoảng cách ước lượng theo thời gian thực. Kết quả phát hiện cho thấy mô hình hoạt động ổn định trong điều kiện môi trường biển ngoài trời, với các đối tượng ở nhiều khoảng cách khác nhau vẫn được xác định tương đối chính xác. Giao diện hiển thị trực quan, kết hợp giữa hình ảnh camera và bảng thông tin mục tiêu, giúp người vận hành dễ dàng theo dõi tình huống giao thông hàng hải.



Hình 8. Các đối tượng được phát hiện và nhận dạng trên biển

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày quá trình nghiên cứu, thiết kế và chế tạo thành công hệ thống tự động cân bằng 3 trục nhằm ổn định hình ảnh cho camera ứng dụng trí tuệ nhân tạo. Hệ thống được xây dựng trên cơ sở tích hợp chặt chẽ giữa cảm biến quán tính MPU6050, thuật toán lọc tín hiệu (Complementary Filter/ Kalman

Filter), bộ điều khiển PID và cơ cấu gimbal 3 trục sử dụng động cơ servo, cho phép phát hiện và bù trừ hiệu quả các dao động theo 3 phương *Pitch*, *Roll* và *Yaw*.

Kết quả thử nghiệm cho thấy hệ thống có khả năng giảm đáng kể rung lắc và sai lệch góc nghiêng, duy trì trạng thái ổn định của camera với sai số góc nhỏ (khoảng $\varepsilon=1,5^\circ$) ngay cả khi chịu tác động của các dao động cường bức với biên độ và tần số khác nhau. Nhờ đó, chất lượng hình ảnh đầu ra được cải thiện rõ rệt, đáp ứng tốt yêu cầu của các thuật toán thị giác máy tính trong bài toán phát hiện, theo dõi và nhận dạng đối tượng. Việc thử nghiệm thực tế với hệ thống phát hiện và phòng tránh va chạm trên biển đã bước đầu chứng minh tính hiệu quả và khả năng ứng dụng của giải pháp đề xuất trong các điều kiện môi trường phức tạp.

Bên cạnh hiệu năng điều khiển, thiết kế cơ khí của gimbal được tối ưu theo hướng gọn nhẹ, cứng vững và phân bố khối lượng hợp lý, giúp giảm mô-men quán tính, nâng cao độ ổn định và thuận lợi cho việc tích hợp vào các nền tảng camera AI hiện có. Điều này cho thấy hệ thống không chỉ phù hợp trong nghiên cứu mà còn có tiềm năng triển khai trong thực tiễn, đặc biệt trong các lĩnh vực như giám sát hàng hải, phương tiện tự hành, robot di động và thiết bị quan sát thông minh.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, nhóm tác giả sẽ tập trung vào việc tối ưu tham số điều khiển bằng các phương pháp thông minh, mở rộng mô hình động học để nâng cao khả năng bù nhiễu phi tuyến, cũng như tích hợp sâu hơn với các thuật toán AI nhằm xây dựng các hệ thống camera thông minh có độ ổn định, độ chính xác và mức độ tự chủ cao hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] K. H. Ang, G. Chong, and Y. Li (2005), *PID control system analysis, design, and technology*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.13, No.4, pp.559-576.
- [2] G. Welch and G. Bishop (2006), *An Introduction to the Kalman Filter*. Chapel Hill, NC, USA: Univ. of North Carolina, Dept. of Computer Science.
- [3] S. O. H. Madgwick, A. J. L. Harrison, and R. Vaidyanathan (2011), *Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm*, in Proc. IEEE Int. Conf. Rehabilitation Robotics (ICORR), Zurich, Switzerland, pp.1-7.
- [4] InvenSense Inc. (2013), *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification*. San Jose, CA, USA.
- [5] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo (2010), *Robotics: Modelling, Planning and Control*. London, U.K.: Springer.
- [6] R. Mahony, T. Hamel, and J.-M. Pflimlin (2008), *Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.53, No.5, pp.1203-1218.
- [7] R. Szeliski (2010), *Computer Vision: Algorithms and Applications*. New York, NY, USA: Springer.
- [8] S. O. H. Madgwick, A. J. L. Harrison, and R. Vaidyanathan (2011), *Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm*, in Proc. IEEE Int. Conf. Rehabilitation Robotics (ICORR), Zurich, Switzerland, pp.1-7.

Ngày nhận bài:	14/12/2025
Ngày nhận bản sửa:	15/02/2026
Ngày duyệt đăng:	28/02/2026