

NGHIÊN CỨU VỀ PHƯƠNG PHÁP LỌC MAGDWICK TRONG VIỆC XỬ LÝ TÍN HIỆU BỘ ĐO LƯỜNG QUÁN TÍNH IMU

INVESTIGATION OF MADGWICK FILTER IN PROCESSING IMU SIGNALS

Nguyễn Quang Duy¹,
Nguyễn Thành Trung^{1,*}, Phạm Văn Hà²

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.113>

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày một nghiên cứu về việc sử dụng bộ lọc Madgwick để chuẩn hóa các tín hiệu từ Đơn vị đo lường quán tính (IMU). IMU là một hệ thống được sử dụng rộng rãi để đo lường và theo dõi chuyển động của các vật thể, những tín hiệu từ các cảm biến IMU thường bị hỏng do sai lệch, nhiễu tích lũy làm giảm độ chính xác của phép đo. Bộ lọc Madgwick là bộ lọc bổ sung kết hợp dữ liệu từ gia tốc kế, con quay hồi chuyển và từ kế để ước tính hướng của cảm biến. Mục đích của nghiên cứu này là kiểm tra hiệu quả của bộ lọc Madgwick trong việc cải thiện độ chính xác đo của tín hiệu IMU. Kết quả cho thấy bộ lọc Madgwick làm giảm đáng kể nhiễu và lỗi trong tín hiệu của cảm biến IMU, đồng thời cải thiện độ chính xác của phép đo. Nghiên cứu này cung cấp mô tả chi tiết về bộ lọc Madgwick và việc triển khai nó. Từ đó có thể ứng dụng vào các hệ thống phân tích chuyển động của con người, điều hướng robot và điều khiển máy bay không người lái.

Từ khóa: IMU, cảm biến gia tốc, con quay hồi chuyển, bộ lọc Madgwick.

ABSTRACT

This paper presents a study on the use of the Madgwick filter to normalize signals from Inertial Measurement Units (IMUs). IMUs are widely used systems for measuring and tracking the motion of objects, but the signals from IMU sensors are often corrupted by bias and accumulated noise, which reduces the measurement accuracy. The Madgwick filter is a complementary filter that combines data from accelerometers, gyroscopes, and magnetometers to estimate the orientation of the sensor. The purpose of this study is to evaluate the effectiveness of the Madgwick filter in improving the measurement accuracy of IMU signals. The results show that the Madgwick filter significantly reduces noise and errors in IMU signals while improving the measurement accuracy. This article provides a detailed description of the Madgwick filter and its implementation, which can be applied to human motion analysis systems, robot navigation, and unmanned aerial vehicle control.

Keywords: IMU, accelerometer, gyroscope, Madgwick filter.

¹Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

²Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: trung.nguyenthanh@hust.edu.vn

Ngày nhận bài: 03/4/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 05/5/2023

Ngày chấp nhận đăng: 15/6/2023

1. GIỚI THIỆU

Đơn vị đo lường quán tính (IMU) là một công nghệ đo lường vị trí và chuyển động phổ biến được sử dụng trong nhiều lĩnh vực từ robot đến các thiết bị di động và máy bay không người lái. IMU bao gồm tập hợp các cảm biến quán tính như gia tốc kế, con quay hồi chuyển và từ kế. Tuy nhiên, những sai số trong quá trình đo đạc có thể tích lũy và dẫn đến kết quả đo không chính xác, ảnh hưởng đến hiệu suất và độ chính xác của hệ thống. Vì vậy, việc hiểu rõ về cảm biến và các vấn đề liên quan đến nó rất quan trọng. Trong bài báo này, chúng ta sẽ tập trung về cảm biến MPU-6050 và bộ lọc Madgwick. Bộ lọc này là một phương pháp xử lý tín hiệu phổ biến cho việc lọc nhiễu của cảm biến.

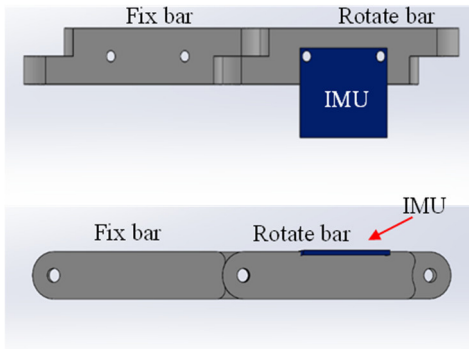
Bộ lọc Madgwick là một bộ lọc bổ sung kết hợp dữ liệu từ gia tốc kế, con quay hồi chuyển để ước tính hướng của cảm biến. Ngoài ra bộ lọc còn có thể kết hợp từ kế để kết quả chính xác hơn. Nó đã được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng khác nhau như phân tích chuyển động của con người, điều hướng robot và điều khiển máy bay không người lái. Bộ lọc Madgwick có ưu điểm là chi phí tính toán thấp, triển khai đơn giản, hiệu suất tốt trong việc giảm thiểu nhiễu và lỗi.

Bộ lọc Madgwick đã được nghiên cứu để nâng cao độ chính xác về hướng và tốc độ góc của cảm biến IMU và được ứng dụng ở nhiều lĩnh vực khác nhau. Trong nghiên cứu "Real-Time Attitude Estimation for Mobile Devices" của University of California [1] và "A motion tracking method by combining the IMU and camera in mobile devices" [2] tác giả đã ước lượng hướng và góc của thiết bị di động giúp xác định vị trí chuyển động của người sử dụng. Nghiên cứu [3] đã tính toán hướng và góc cho thiết bị bay không người lái. Nghiên cứu [4] đã trình bày việc duy chính xác vị trí đánh dấu để UAV có thể hạ cánh an toàn. Ngoài ra với lĩnh vực phân tích chuyển động của cơ thể con người, tác giả đã sử dụng các cảm biến IMU để đo các thông số động học người chuyển động [5, 6]. Mục đích của nghiên cứu này là kiểm tra hiệu quả của bộ lọc Madgwick trong việc chuẩn hóa tín hiệu IMU và cải thiện độ chính xác của phép đo. Chúng tôi đánh giá hiệu quả của bộ lọc Madgwick trên dữ liệu IMU trong thực tế đo được qua các giá trị góc thiết lập khác nhau và nhiều lần tiến hành thực nghiệm.

2. MÔ HÌNH THÍ NGHIỆM

2.1. Thiết lập phần cơ khí

Phần cứng gồm 2 thanh kết hợp với nhau tạo thành 1 khớp bản lề như hình 1. Cảm biến IMU được gắn lên thanh di động của cơ cấu. Phạm vi chuyển động của thanh quay so với thanh cố định trong khoảng -70° đến 70° .



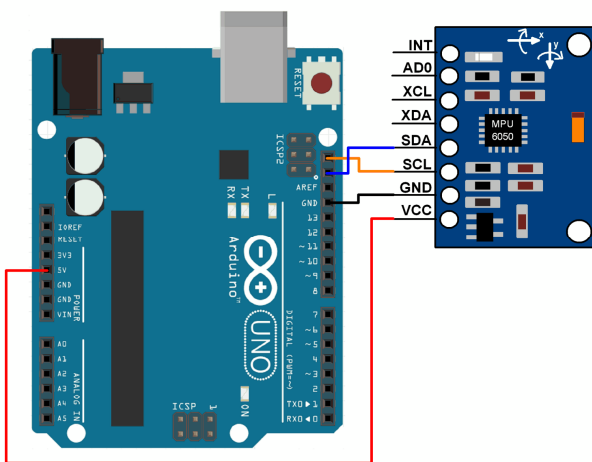
Hình 1. Hình ảnh Mô hình phần cứng

2.2. Thiết lập phần điện tử

MPU-6050 là thiết bị hệ thống vi cơ điện tử (MEMS) 6 trục kết hợp bởi 3 trục gia tốc và 3 trục con quay hồi chuyển giúp lấy dữ liệu về góc quay và gia tốc với mức tiêu thụ điện năng thấp và độ chính xác cao. Cảm biến thường được ứng dụng trong máy bay không người lái, robot, điện thoại thông minh, hệ thống chơi game.

Một số thông số của cảm biến MPU-6050:

- Độ nhạy: cảm biến gia tốc có thang đo là $\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, \pm 16g$, con quay hồi chuyển có thang đo $\pm 250^\circ/s, \pm 500^\circ/s, \pm 1000^\circ/s, \pm 2000^\circ/s$
- Kích thước: MPU-6050 có kích thước 3,9mm x 3,9mm x 1,2mm, có khối lượng 2,2g.
- Nhiệt độ hoạt động: MPU-6050 có phạm vi nhiệt độ hoạt động từ $-40^\circ C$ đến $85^\circ C$.
- Xử lý chuyển động kỹ thuật số (DMP): Trên bo mạch có bộ xử lý chuyển động kỹ thuật số giúp tính toán chính xác hơn.



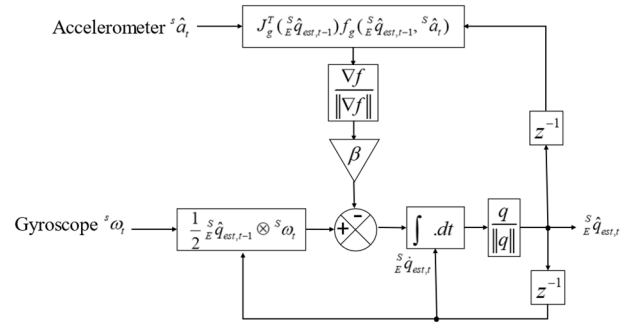
Hình 2. Cách nối chân của MPU-6050 với Arduino

Để dễ dàng đọc tín hiệu từ cảm biến ta sử dụng Arduino Uno R3 kết hợp kết nối với máy tính thông qua giao tiếp UART. Phần mềm matlab sẽ xử lý tín hiệu nhận được qua bộ lọc Madgwick và đưa ra giá trị đầu ra.

3. THUẬT TOÁN

Bộ lọc Madgwick là một phương pháp lọc Kalman được sử dụng để giảm thiểu độ nhiễu của dữ liệu quan sát trong các ứng dụng đo lường động được đề xuất bởi Sebastian O.H. Madgwick vào năm 2010 [7]. Bộ lọc Madgwick sử dụng mô hình dự báo động lực để lọc tín hiệu từ cảm biến IMU. Mô hình được dựa trên các giả định về tính chất của tín hiệu và sử dụng phương pháp tính toán để dự báo các giá trị tín hiệu trong tương lai.

Bộ lọc Kalman là một công cụ toán học được phát triển bởi Rudolph E. Kalman vào năm 1960 để thực hiện phép ước tính của một biến bằng cách thực hiện các phương trình dự báo cập nhật [8]. Bộ lọc Kalman được sử dụng phổ biến trong các thuật toán lọc định hướng và các cảm biến định hướng thương mại. Tuy nhiên bộ lọc có một số hạn chế. Chúng khá phức tạp để thực hiện, các mối quan hệ trạng thái mô tả động học quay theo 3 chiều thường yêu cầu các vector trạng thái lớn và cần bộ lọc Kalman mở rộng để tuyến tính hóa vấn đề. Kế thừa từ phương pháp Kalman để lọc tín hiệu, bộ lọc Madgwick tập trung vào việc cập nhật và chỉnh sửa, dự báo của mô hình dự báo động lực dựa trên các giá trị tín hiệu đầu vào thực tế. Điều đó giúp giảm sai số và tối ưu hóa tín hiệu cần thiết. Bộ lọc sử dụng biểu diễn quaternion để mô tả sự kết hợp của các hướng theo 3 chiều mà không bị ảnh hưởng bởi các điểm kỳ dị khi biểu diễn góc Euler.



Hình 3. Sơ đồ thuật toán lọc Madwick

Các bước tính toán của thuật toán lọc Madgwick trong cảm biến IMU:

- Bước 1: Tính biến thiên của quaternion. Thể hiện tốc độ thay đổi của cảm biến (ω_t đơn vị $\frac{rad}{s}$).
- Bước 2: Sử dụng thuật toán gradient descent để dự đoán hướng chuyển động được định nghĩa bởi hàm đối tượng và ma trận Jacobi của nó.

$$f_g(\hat{s}_g, \hat{s}_a) = \begin{bmatrix} 2(q_2q_4 - q_1q_3) - a_x \\ 2(q_1q_2 - q_3q_4) - a_y \\ 2(\frac{1}{2} - q_2^2 - q_3^2) - a_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$J_g(\hat{S}\hat{g}) = \begin{bmatrix} -2q_3 & 2q_4 & -2q_1 & 2q_2 \\ 2q_3 & 2q_1 & 2q_4 & 2q_3 \\ 0 & -4q_2 & -4q_3 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\nabla f = J_g^T(q_{t-1})f_g(q_{t-1}, s_{a_t}) \quad (3)$$

- Bước 3: Tính quaternion. Hướng ước tính của cảm biến so với trái đất.

$$S\hat{q}_{est,t} = S\hat{q}_{est,t-1} + S\hat{q}_{est,t}\Delta t \quad (4)$$

$$S\hat{q}_{est,t} = S\hat{q}_{\omega,t} - \beta S\hat{q}_{\epsilon,t} \quad (5)$$

$$S\hat{q}_{\epsilon,t} = \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \quad (6)$$

Hệ số lọc β đại diện cho tất cả các lỗi đo con quay hồi chuyển trung bình bằng không. Các nguồn gây ra lỗi bao gồm: nhiễu cảm biến, răng cưa tín hiệu, lỗi lượng tử hóa, lỗi hiệu chuẩn, bỏ căn chỉnh cảm biến, tính không chính xác của trục cảm biến và đặc điểm đáp ứng tần số.

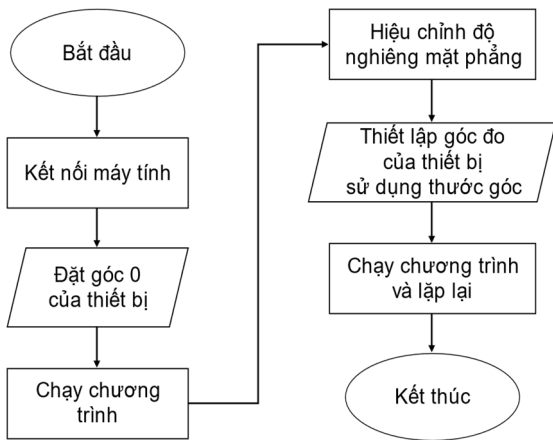
- Bước 4: Đổi quaternion sang góc Euler.

Các góc Euler ψ , θ và ϕ đạt được bằng các phép quay tuần tự. ψ đạt được khi quay quanh Oz, θ đạt được khi quay quanh Oy, ϕ đạt được khi quay quanh Ox. Mối quan hệ giữa các góc euler và quaternion:

$$\psi = \text{atan2}(2q_2q_3 - 2q_1q_4, 2q_1^2 + 2q_2^2 - 1) \quad (7)$$

$$\theta = -\sin^{-1}(2q_2q_4 + 2q_1q_3) \quad (8)$$

$$\phi = \text{atan2}(2q_3q_4 - 2q_1q_2, 2q_1^2 + 2q_4^2 - 1) \quad (9)$$

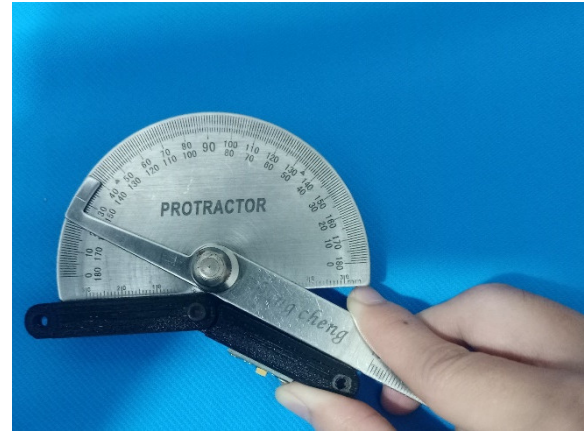


Hình 4. Sơ đồ khối chương trình thu thập dữ liệu

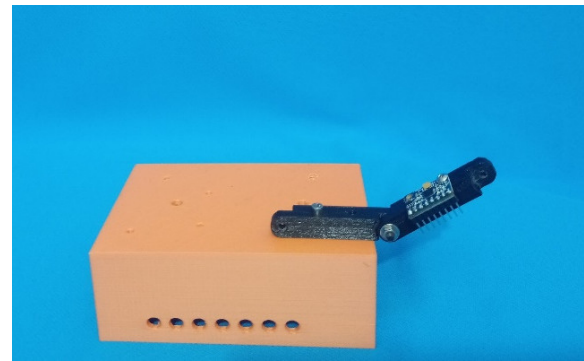
4. THIẾT LẬP THÍ NGHIỆM ĐO

Để thử nghiệm thuật toán ta tiến hành đo thử nghiệm các góc 30°, 45°, 60° lần lượt 15 lần liên tục. Mô hình kết nối thu thập dữ liệu được thể hiện như hình 5, 6.

Thiết bị kết nối với máy tính thông qua giao tiếp UART. Sau đó chỉnh góc 0° trên thiết bị đo bằng thước góc và thực hiện chạy chương trình để xác định độ nghiêng của mặt phẳng cố định thiết bị đo. Tiếp theo tiến hành loại bỏ độ nghiêng của mặt phẳng cố định thông qua chương trình đo. Tiếp tục tiến hành cài đặt góc muốn đo sử dụng thước góc và chạy chương trình đo.

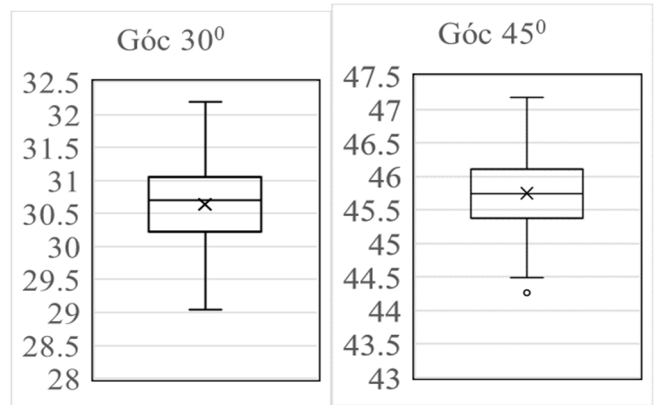


Hình 5. Hình ảnh thiết lập góc



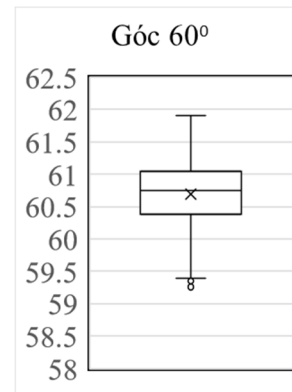
Hình 6. Hình ảnh cố định thiết bị tiến hành đo

5. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM



Hình 7. Kết quả đo góc 30°

Hình 8. Kết quả đo góc 45°



Hình 9. Kết quả đo góc 60°

Đồ thị hình 7, 8, 9 thể hiện kết quả đo thể hiện theo đồ thị Box plot cho các các đo 30° , 45° , 60° tương xứng. Những đồ thị này thể hiện phân bố giá trị góc đo được từ cảm biến MPU-6050 của 15 phép đo cho mỗi góc. Mỗi đồ thị thể hiện các thông số gồm: giá trị lớn nhất, giá trị nhỏ nhất, khoảng giá trị đo được nhiều nhất, giá trị trung bình, giá trị trung vị từ kết quả đo. Từ các kết quả thể hiện trong hình 7, 8, 9 cho thấy, phần lớn kết quả được phân bố trong khoảng $29,04^\circ$ đến $32,19^\circ$; $44,49^\circ$ đến $47,18^\circ$ và $59,39^\circ$ đến $61,9^\circ$ tương ứng cho các góc đo 30° , 45° , 60° . Sai lệch trên lớn nhất của các trường hợp xung quanh 2° còn sai lệch dưới xung quanh 1° . Điều đó chứng tỏ giá trị sai số luôn cố định trong 1 khoảng xác định trước ta có thể ước lượng được. Phần lớn kết quả đo đều tập trung xung quanh các góc cần đo. Cụ thể chúng tập trung tại các giá trị $30,64^\circ$; $45,75^\circ$; $60,69^\circ$ các giá trị này có sai lệch 2,13%; 1,67%; 1,15%. tương ứng với các giá trị cần đo.

So sánh với các kết quả đã công bố từ những bài báo tham chiếu thấy rằng kết quả đo được từ cảm biến MPU-6050 có độ chính xác tương đương nằm trong khoảng 2% giá trị đo.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã trình bày và thực hiện thuật toán lọc Madgwick áp dụng vào cảm biến MPU-6050 tối ưu giá trị đo được để có thể ứng dụng cảm biến vào các hệ thống phân tích chuyển động. Nghiên cứu cho thấy phương pháp lọc Madgwick là một phương pháp hiệu quả trong việc xử lý tín hiệu từ bộ đo lường quán tính IMU. Hướng phát triển tiếp theo của bài báo là có thể đo được tất cả các góc của cảm biến một cách đồng thời cũng như đo nhiều cảm biến cùng một lúc để có thể vận dụng tối đa chức năng của cảm biến. Điều này giúp cải thiện độ chính xác về ước lượng hướng và góc của cảm biến IMU và tăng khả năng ứng dụng vào thực tế như robot, UAV, thiết bị di động,...

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả cảm ơn sự giúp đỡ của các thành viên KomLabVN.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Y. Li, H. Lan, Y. Zhuang, P. Zhang, X. Niu, N. El-Sheimy, 2015. *Real-time attitude tracking of mobile devices*. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pp. 1-7.

[2]. W. Fang, L. Zheng, H. Deng, 2016. *A motion tracking method by combining the IMU and camera in mobile devices*. International Conference on Sensing Technology, p. 117.

[3]. S. A Ludwig, K. D Burnham, 2018. *Comparison of Euler Estimate using Extended Kalman Filter, Madgwick and Mahony on Quadcopter Flight Data*. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), pp. 1236-1240.

[4]. Wu Yibin, X. Niu, J. Du, L. Chang, H. Tang, H. Zhang, 2019. *Artificial Marker and MEMS IMU-Based Pose Estimation Method to Meet Multirotor UAV Landing Requirements*. Sensors, vol. 19, no. 24, p. 5428.

[5]. X. Chen, K. Zhang, H. Liu, Y. Leng, C. Fu, 2021. *A Probability Distribution Model-Based Approach for Foot Placement Prediction in the Early Swing Phase With a Wearable IMU Sensor*. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol. 29, pp. 2595-2604.

[6]. V. Bijalwan, V. B. Semwal, T. K. Mandal, 2021. *Fusion of Multi-Sensor-Based Biomechanical Gait Analysis Using Vision and Wearable Sensor*. IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 13, pp. 14213 - 14220.

[7]. S. O. Madgwick, 2010. *An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays*. Report x-io and University of Bristol (UK), pp. 113-118.

[8]. R. Kalman, 1960. *A new approach to linear filtering and prediction*. Transactions of ASME, Journal of Basic Engineering on Automatic Control, pp. 35-45.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Quang Duy¹, Nguyen Thanh Trung¹, Pham Van Ha²

¹School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam

²Hanoi University of Industry, Vietnam