MỤC LỤC

[**LỜI NÓI ĐẦU** 3](#_Toc85143432)

[CHƯƠNG 1 GIỚI THIỆU HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN NGƯ LÔI 5](#_Toc85143433)

[1.1 Tổng quan về một số loại ngư lôi trong quân chủng hải quân 5](#_Toc85143434)

[1.1.1 Ngư lôi hơi ga 53BA 5](#_Toc85143435)

[1.1.2 Ngư lôi điện СЭТ-53М 7](#_Toc85143436)

[1.1.3 Ngư lôi điện СЭТ-40У 9](#_Toc85143437)

[1.1.4 Ngư lôi ТЭ-201 10](#_Toc85143438)

[1.2 Giới thiệu chung về hệ thống điều khiển ngư lôi 12](#_Toc85143439)

[1.2.1 Hệ thống dẫn 12](#_Toc85143440)

[1.2.2 Hệ thống kích nổ đầu đạn 13](#_Toc85143441)

[1.2.3 Hệ thống tự lái 13](#_Toc85143442)

[1.3 Bài toán kiểm tra, thử nghiệm hệ thống điều khiển ngư lôi 15](#_Toc85143443)

[CHƯƠNG 2 CÁC PHƯƠNG ÁN THỬ NGHIỆM ĐÁNH GIÁ HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN NGƯ LÔI 17](#_Toc85143444)

[2.1 Thử nghiệm hệ thống điều khiển ngư lôi 17](#_Toc85143445)

[2.1.1 Thử chức năng ở trạm ngư lôi 17](#_Toc85143446)

[2.1.2 Kiểm tra khi ngư lôi hoạt động thực tế 26](#_Toc85143447)

[2.2 Phương án đánh giá tham số chuyển động ngư lôi dựa vào hệ thống dẫn đường quán tính 29](#_Toc85143448)

[CHƯƠNG 3 CƠ SỞ LÝ THUYẾT ĐÁNH GIÁ CHUYỂN ĐỘNG CỦA NGƯ LÔI THEO THUẬT TOÁN DẪN ĐƯỜNG QUÁN TÍNH 32](#_Toc85143449)

[3.1 Xây dựng mô hình toán hệ thống dẫn đường quán tính khi đánh giá tham số chuyển động ngư lôi 32](#_Toc85143450)

[3.1.1 Các hệ tọa độ sử dụng 32](#_Toc85143451)

[3.1.2 Các phép biến đổi tọa độ sử dụng trong hệ thống dẫn đường quán tính 33](#_Toc85143452)

[3.1.3 Xác định vị trí và trạng thái không gian của ngư lôi 51](#_Toc85143453)

[3.2 Mô phỏng thuật toán dẫn đường quán tính bằng quaternion xác định chuyển động ngư lôi trên Matlab 54](#_Toc85143454)

[3.2.1 Mô phỏng quỹ đạo chuyển động của ngư lôi trên Matlab 54](#_Toc85143455)

[3.2.2 Tính toán chuyển động ngư lôi với thuật toán dẫn đường quán tính dùng quaternion 60](#_Toc85143456)

[CHƯƠNG 4 THỬ NGHIỆM THUẬT TOÁN DẪN ĐƯỜNG QUÁN TÍNH XÁC ĐỊNH THAM SỐ CHUYỂN ĐỘNG CỦA NGƯ LÔI 66](#_Toc85143457)

[4.1 . Tổng quan về mô hình thử nghiệm 66](#_Toc85143458)

[4.2 . Thiết kế phần cứng và phần mềm 67](#_Toc85143459)

[4.2.1 . Mạch điện tử 67](#_Toc85143460)

[4.2.2 . Các chức năng cơ bản của chương trình nhúng và phần mềm điều khiển trên máy tính 71](#_Toc85143461)

[4.3 . Thử nghiệm với mô hình đơn giản không áp dụng các bộ lọc nhiễu 75](#_Toc85143462)

[4.4 . Áp dụng bộ lọc Magdwick để lọc nhiễu cho con quay hồi chuyển 79](#_Toc85143463)

[4.4.1 . Giới thiệu bộ lọc Magdwick 79](#_Toc85143464)

[4.4.2 . Thử nghiệm thuật toán dẫn đường quán tính với bộ lọc Madgwick 85](#_Toc85143465)

[**KẾT LUẬN** 93](#_Toc85143466)

[PHỤ LỤC 1 94](#_Toc85143467)

[PHỤ LỤC 2 100](#_Toc85143468)

[TÀI LIỆU THAM KHẢO 103](#_Toc85143469)

LỜI KẾT

**LỜI NÓI ĐẦU**

Ngày nay, cùng với sự phát triển của khoa học - công nghệ, kỹ thuật quân sự được quan tâm đặc biệt ở tất cả các quốc gia trên thế giới. Các loại vũ khí, trang bị kỹ thuật không ngừng được phát triển cả về số lượng và chất lượng, có vai trò hết sức quan trọng trong việc bảo vệ vững chắc Tổ Quốc.

Đất nước Việt Nam có bờ biển dài, vùng biển giàu tài nguyên và có tầm quan trọng trong chiến lược quốc phòng cũng như phát triển kinh tế. Mặc dù điều kiện kinh tế đất nước còn gặp nhiều khó khăn song được sự quan tâm của Nhà nước và Bộ Quốc Phòng, Quân chủng Hải quân đã được trang bị nhiều loại vũ khí hiện đại, trong đó đặc biệt có thể kể đến các loại ngư lôi như: 53ВА, СЭТ-53М, СЭТ-40У, ТЭ-201,... Ngư lôi là loại vũ khí được trang bị cho Hải Quân nhân dân Việt Nam dùng để tiêu diệt các mục tiêu là các tàu mặt nước, tàu ngầm, các công trình trên biển, trên cảng, là loại vũ khí có hiệu quả cao trong chiến đấu, và có tầm quan trọng to lớn thể hiện sức mạnh của Hải quân. Tuy nhiên cũng như bất kỳ trang bị khí tài nào khác, để có thể sử dụng và khai thác cần phải trải qua một khâu hết sức quan trọng là kiểm tra sự làm việc của các thiết bị, hệ thống trên ngư lôi. Do đó cùng với sự có mặt của các loại ngư lôi luôn song hành là các thiết bị, tổ hợp kiểm tra. Tuy nhiên các máy kiểm tra hiện tại đa phần vẫn cấu tạo chủ yếu là các phần tử điện-cơ qua thời gian dài sử dụng nên sai số lớn, đặc biệt là rất cồng kềnh và còn thao tác thủ công nhiều, như vậy sẽ khó đáp ứng được yêu cầu kỹ thuật, cũng như yêu cầu tự động hóa ngày càng cao trong thời đại mới. Một nhiệm vụ rất quan trọng trong việc kiểm tra hoạt động của ngư lôi đó là kiểm tra, thử nghiệm sự làm việc của hệ thống điều khiển thì nhiều tổ hợp kiểm tra phục vụ cho nhiệm vụ này vẫn còn đang dựa trên các công nghệ đã quá cũ, cần phải có sự cải tiến để phù hợp với những yêu cầu quân sự ngày càng cao hơn.

Xuất phát từ nhiệm vụ thực tiễn đó, tôi chọn đồ án tốt nghiệp ***”Nghiên cứu phương án ứng dụng thiết bị dẫn đường quán tính trong bài toán thu thập thông tin khi thử nghiệm hệ thống điều khiển ngư lôi”*** với nội dung tìm hiểu và đề xuất một phương án mới thay thế cho các trang thiết bị, tổ hợp kiểm tra cũ.

Bố cục của đồ án gồm:

* Chương 1: Giới thiệu hệ thống điều khiển ngư lôi.
* Chương 2: Các phương án thử nghiệm đánh giá hệ thống điều khiển ngư lôi.
* Chương 3: Cơ sở lý thuyết đánh giá chuyển động của ngư lôi theo thuật toán dẫn đường quán tính.
* Chương 4: Thử nghiệm thuật toán dẫn đường quán tính xác định tham số chuyển động của ngư lôi.

Do thời gian, tài liệu nghiên cứu và kiến thức bản thân còn hạn chế nên nội dung đồ án chưa sâu và còn nhiều thiếu sót. Rất mong nhận được ý kiến đóng góp, bổ sung của các thầy và các đồng chí.

# GIỚI THIỆU HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN NGƯ LÔI

## Tổng quan về một số loại ngư lôi trong quân chủng hải quân

### Ngư lôi hơi ga 53BA

Ngư lôi 53BA là loại ngư lôi hơi ga, tự dẫn có ngòi nổ không tiếp xúc được trang bị trên các tàu chiến đấu phóng lôi của Hải quân Việt nam. Đây là một trong những phương tiện chiến đấu tiến công quan trọng và chủ yếu của Hải quân. Ngư lôi 53BA dùng để tiêu diệt tàu mặt nước, các công trình nổi trên biển và giáp bờ.

#### Những tính năng kỹ - chiến thuật chủ yếu của ngư lôi

**-** Đường kính (mm): 533, 4 ;

- Độ dài (mm): ≤ 7900 ;

-Trọng lượng ngư lôi đã được chuẩn bị bắn chiến đấu (kg): ≤ 1900;

- Trọng lượng thuốc nổ (kg) : ≥ 210;

- Cự ly hành trình (m) : ≥ 11000 ;

- Tốc độ ở độ sâu 6 - 8m (M/h): 29;

- Hệ thống tự dẫn của ngư lôi - âm thanh thụ động với mặt quạt sục sạo: ± 600 ;

- Đường rắn lượn sục sạo ± 150 , ± 50;

- Trong ngư lôi sử dụng ngòi nổ không tiếp xúc điện từ trường tích cực và thiết bị nổ phối gộp;

- Cự li công tác của ngòi nổ không tiếp xúc theo chiều thẳng đứng (m): - 5 ;

- Độ sâu đường đi ngư lôi (m):

+ Chiến đấu: 7 ;

+ Sục sạo : 12 - 16;

- Sai số của đường đi về độ sâu (m):

+ Trên đoạn đường thẳng: ± 1, 5;

+ ở chế độ tự dẫn: ± 2;

+ ở độ sâu sục sạo: ± 2;

- Bắn từ tàu ngầm lặn dưới nước (độ sâu bằng kính tiềm vọng) (m): ≤ 50;

#### Cấu tạo

Ngư lôi 53BA gồm ba phần chính có thể tháo rời, được nối với nhau bằng các đinh vít. Các phần đó là: Đầu tự dẫn, đầu chiến đấu và ngư lôi vật mang.

- Đầu tự dẫn: (hệ thống tự dẫn) dùng để làm tăng hiệu quả chiến đấu của ngư lôi. Đầu tự dẫn bao gồm: khối thu tín hiệu, khối khuếch đại rơle, khối chỉ báo mức và bảng nguồn.

- Đầu chiến đấu: Dùng để chứa thuốc nổ và ngòi nổ phối gộp; các máy của hệ thống ngòi nổ không tiếp xúc của ngư lôi: cuộn dây thu kênh đứng, kênh ngang cùng với khung điều chỉnh cộng hưởng, thiết bị điện tử.

- Ngư lôi vật mang:

Trong ngư lôi vật mang chứa:

+ Hệ thống động lực của ngư lôi dùng để tạo ra lực đẩy đưa ngư lôi chuyển động trong nước với vận tốc và cự ly hành trình cho trước với độ chính xác cần thiết.

Hệ thống động lực bao gồm các dung tích chứa các thành phần năng lượng: ngăn khí nén, bình dầu cháy, ngăn nước ngọt; cụm van bơm khí và khoá khí, các máy liên hợp phát động và điều chỉnh: cò trên, khối phát động, van phát động, giảm áp định tốc và buồng đốt; máy chính; cơ cấu chuyển hoá lực: trục chân vịt trong và trục chân vịt ngoài cùng với các chân vịt.

+ Hệ thống điều khiển dùng để điều khiển sự chuyển động của ngư lôi trong mặt phẳng ngang, trong mặt phẳng đứng, ổn định độ lắc ngang quanh trục dọc ngư lôi đồng thời bảo đảm sự làm việc bình thường của hệ thống tự dẫn.

+ Tổ hợp điện nguồn dùng để cung cấp nguồn cho sơ đồ điện của ngư lôi. Tổ hợp điện nguồn bao gồm: máy phát điện, hộp điều chỉnh điện áp, biến đổi điện cùng với ổn tần, cáp nối,...

+ Một số thiết bị của ngòi nổ KTX: hai cuộn dây phát, khung tinh chỉnh cộng hưởng.

+ Hệ thống bôi trơn máy chính: dung tích chứa dầu nhờn-bình dầu nhờn; phân phối dầu nhờn; hệ thống làm mát: bơm nước biển, khoảng rỗng nước đối lưu ngăn chuyển tiếp.

### Ngư lôi điện СЭТ-53М

Ngư lôi СЭТ-53М là một trong những loại vũ khí thuộc tổ hợp vũ khí chống ngầm có xác suất tiêu diệt mục tiêu cao, nó được trang bị trên các tàu Hộ vệ chống ngầm dạng 159-AE. Đây là loại ngư lôi điện chống ngầm, tự dẫn trong hai mặt phẳng, có ngòi nổ không tiếp xúc, làm việc theo nguyên lý điện từ trường tích cực. Ngư lôi СЭТ-53М dùng để tiêu diệt các loại tàu ngầm mục tiêu đi ở độ sâu từ 20m đến 200m.

#### Những tính năng kỹ - chiến thuật cơ bản của ngư lôi

- Đường kính: 534,4 mm;

- Chiều dài: 7800 mm;

- Khối lượng ngư lôi chiến đấu khi đã chuẩn bị để bắn: 1507 kg;

- Số vòng quay của phần ứng và hệ từ của động cơ: 1650 vg/ph; - Loại chân vịt của ngư lôi: 2 cánh;

- Số lượng chân vịt: 2 chiếc;

- Tốc độ của ngư lôi: 29 M/h;

- Cự li hành trình của ngư lôi: 14000 m;

- Khối lượng thuốc nổ nhỏ nhất: 200 kg;

- Độ sâu hành trình của ngư lôi: 20÷ 200 m;

- Góc sục sạo mục tiêu của máy tự dẫn tính theo trục dọc của ngư lôi trong mặt phẳng đứng và mặt phẳng ngang ± 600;

- Thời gian từ lúc bắn ngư lôi đến khi máy tự dẫn bước vào trạng thái làm việc 30 ÷ 40 s;

- Ngòi nổ không tiếp xúc bước vào trạng thái công tác ngay sau khi máy tự dẫn làm việc lần thứ nhất.

#### Cấu tạo

Ngư lôi СЭТ-53М gồm ba phần chính có thể tháo rời, được nối với nhau bằng các đinh vít. Các phần đó là: Đầu tự dẫn, đầu chiến đấu và ngư lôi vật mang.

- Đầu tự dẫn: (hệ thống tự dẫn) dùng để làm tăng hiệu quả chiến đấu của ngư lôi. Đầu tự dẫn bao gồm hai kênh: Kênh đứng và kênh ngang. Hai kênh có cấu tạo hoàn toàn giống nhau. Mỗi kênh gồm có: Khối thu tín hiệu, khối khuếch đại rơle, hộp rơ le, khối nguồn.

- Đầu chiến đấu: Dùng để chứa thuốc nổ và các ngòi nổ phối gộp; các máy của hệ thống ngòi nổ không tiếp xúc của ngư lôi: cuộn dây thu kênh đứng, kênh ngang.

- Ngư lôi vật mang:

Trong ngư lôi vật mang chứa:

+ Hệ thống động lực của ngư lôi dùng để tạo ra lực đẩy đưa ngư lôi chuyển động trong nước với vận tốc và cự ly hành trình cho trước với độ chính xác cần thiết. Hệ thống động lực bao gồm các ăcqui; cụm các bình khí nén; cụm van bơm khí và khoá khí; các máy liên hợp phát động và điều chỉnh: cò trên, van phát động và bộ phận định khoảng cách, cò dưới, côngtăctơ, hãm chậm cùng với bộ phận đóng đường khí, van màng đàn hồi cùng với thiết bị rót dung dịch vào ăcqui; động cơ ngư lôi; cơ cấu chuyển hoá lực: trục chân vịt trong và trục chân vịt ngoài cùng với các chân vịt.

+ Hệ thống điều khiển dùng để điều khiển sự chuyển động của ngư lôi trong mặt phẳng ngang, trong mặt phẳng đứng, ổn định độ lắc ngang quanh trục dọc ngư lôi đồng thời bảo đảm sự làm việc bình thường của hệ thống tự dẫn.

+ Tổ hợp điện nguồn dùng để cung cấp nguồn cho sơ đồ điện của ngư lôi. Tổ hợp điện nguồn bao gồm: ắcqui, biến đổi điện cùng với ổn tần, cáp nối,...

+ Một số thiết bị của ngòi nổ KTX: hai cuộn dây phát, khung tinh chỉnh cộng hưởng, thiết bị khếch đại.

### Ngư lôi điện СЭТ-40У

Ngư lôi СЭТ-40У là ngư lôi điện chống ngầm kích thước nhỏ tự dẫn trong hai mặt phẳng SET - 40 UE được sử dụng từ các tàu mặt nước chống ngầm và các tàu ngầm có trang bị các ống phóng loại nhỏ. Ngư lôi SET - 40 UE dùng để tiêu diệt các tàu ngầm của đối phương.

#### Những tính năng kỹ - chiến thuật cơ bản của ngư lôi

- Đường kính, mm: 400;

- Chiều dài khi lắp đầu đạn chiến đấu, mm: 4500;

- Chiều dài khi lắp đầu đạn bắn tập, mm: 4800;

- Khối lượng của ngư lôi chiến đấu khi đã chuẩn bị bắn, kg: 542;

- Khối lượng của ngư lôi bắn tập khi đã chuẩn bị, kg: 490;

- Khối lượng của đầu đạn chiến đấu, kg: 80;

- Vận tốc hành trình, M/h (hải lí/giờ): 29;

- Cự li hành trình, m: 7500;

- Độ sâu hành trình, m: 20-200;

- Độ sâu bắn được lớn nhất từ tàu ngầm, m: 150;

- Hệ thống tự dẫn tích cực - thụ động âm thanh hai mặt phẳng;

- Đường rắn lượn sục sạo ± 150 , ± 30.

- Bán kính phản ứng của hệ thống tự dẫn, m: 500 ;

- Ngòi nổ không tiếp xúc tích cực thủy âm hoạt động vòng tròn;

- Cự li hoạt động của ngòi nổ không tiếp xúc, m: 8-9.

#### Cấu tạo

Ngư lôi SET - 40 UE gồm có hệ thống tự dẫn, đầu đạn chiến đấu hoặc đầu đạn bắn tập, hệ thống ngòi nổ không tiếp xúc và thiết bị nổ phối gộp, khoang ăcqui, khoang sau, phần đuôi.

- Hệ thống tự dẫn dùng để phát hiện và tự dẫn ngư lôi vào tàu ngầm mục tiêu. Hệ thống tự dẫn được lắp ở phần đầu của ngư lôi.

- Hệ thống ngòi nổ không tiếp xúc tích cực thủy âm: Hệ thống này gồm có bốn bộ biến đổi áp điện của thiết bị thu-phát, khối máy phát - khuếch đại và khối rơle;

- Hệ thống điều khiển của ngư lôi làm việc cùng với hệ thống tự dẫn và dùng để:

+ Bảo đảm điều khiển ngư lôi trên quãng đường tự hành theo các thông số đặt;

+ Bảo đảm điều khiển ngư lôi trên quãng đường sục sạo mục tiêu lần thứ nhất;

+ Bảo đảm điều khiển ngư lôi trên đoạn đường tự dẫn tương ứng với các lệnh do hệ thống tự dẫn tạo ra phụ thuộc vào các thông tin về vị trí của mục tiêu tương đối so với ngư lôi;

+ Thực hiện chương trình sục sạo lần hai.

### Ngư lôi ТЭ-201

Ngư lôi điện tự dẫn đa năng điều khiển từ xa ТЭ-201 được thiết kế để phóng từ thiết bị phóng ngư lôi của tàu ngầm, được trang bị kênh nạp dữ liệu và thiết bị điều khiển từ xa của tàu, dùng để tiêu diệt các mục tiêu ngầm, tàu mặt nước và các công trình ven biển. Đây là loại ngư lôi hiện đại nhất đang được trang bị trong quân chủng Hải quân.

#### Các đặc tính kỹ - chiến thuật quan trọng

- Đường kính: 534,4 mm;

- Chiều dài ngư lôi khi không lắp ru lô dây điều khiển từ xa:

+ Chiến đấu: 7828+7-17 mm;

+ Bắn tập với БМД: 7927+7-17 mm;

- Khối lượng ngư lôi khi không lắp ru lô dây điều khiển từ xa ЛКТУ:

+ Chiến đấu: 2350+30-50 kg;

+ Thực hành với БМД: 1900±30 kg;

- Khối lượng thuốc nổ: 250 kg;

- Tốc độ trung bình của ngư lôi chiến đấu (khi nhiệt độ 150C và độ mặn 360/00):

+ Ở chế độ I: 45±2 M/h;

+ Ở chế độ II: 32±3 M/h;

- Tốc độ ngư lôi bắn tập với ắc quy sử dụng nhiều lần БМД:

+ Ở chế độ I: 40±2 M/h;

+ Ở chế độ II: 30±3 M/h.

- Cự ly hành trình của ngư lôi chiến đấu:

+ Ở chế độ I: 15000 m;

+ Ở chế độ II: 25000 m;

- Cự ly hành trình của ngư lôi bắn tập với ắc quy sử dụng nhiều lần:

+ Ở chế độ I: 9000 m;

+ Ở chế độ II: 15000 m.

- Dải độ sâu hành trình của ngư lôi: Từ 6 đến 450m.

- Phương pháp tự dẫn theo mục tiêu - Tàu mặt nước - thủy âm chủ động theo vệt nước đuôi tàu mục tiêu.

- Phương pháp tự dẫn theo mục tiêu - tàu ngầm - thủy âm chủ động - thụ động (bằng phương pháp định vị pha sử dụng hiệu ứng Đốp le trong chế độ chủ động).

- Cự ly hoạt động của hệ thống tự dẫn theo mục tiêu tàu ngầm trong điều kiện chùm âm lan truyền thẳng đến mục tiêu với bán kính tương đương 10m:

+ Khi độ sâu của biển là 200m hoặc lớn hơn: đến 1500m;

+ Khi độ sâu của biển từ 60m đến 200m: đến 800m.

- Khoảng cách làm việc của ngòi nổ không tiếp xúc điện từ tích cực theo mục tiêu tàu mặt nước ≤ 6m.

- Khoảng cách làm việc của ngòi nổ không tiếp xúc điện từ tích cực theo mục tiêu tàu ngầm ≤ 2m.

#### Thành phần cơ bản của ngư lôi chiến đấu

Hoạt động của ngư lôi được bảo đảm bởi các hệ thống thực hiện thuật toán chọn trước trên toàn bộ quãng đường hành trình.

Theo các chức năng thực hiện, trong ngư lôi chiến đấu có thể chia ra các hệ thống sau:

- Hệ thống tự dẫn và kích nổ khối thuốc nổ;

- Hệ thống điều khiển chuyển động của ngư lôi;

- Hệ thống điều khiển từ xa bằng dây dẫn;

- Hệ thống động lực với ắc quy sử dụng một lần;

- Hệ thống điện của ngư lôi;

- Hệ thống khí -thủy lực.

Các hệ thống của ngư lôi liên lạc với nhau qua máy tính số và mạng điện trên ngư lôi.

## Giới thiệu chung về hệ thống điều khiển ngư lôi

Trong thành phần hệ thống điều khiển ngư lôi nói chung, gồm có:

- Hệ thống tự lái;

- Hệ thống dẫn;

- Hệ thống kích nổ đầu đạn.

### Hệ thống dẫn

Hệ thống dẫn dùng để liên tục xác định vị trí của mục tiêu và ngư lôi, xác định các tham số chuyển động của chúng, tạo ra các lệnh dẫn hướng và truyền các lệnh đó đến thiết bị tự lái. Hệ thống dẫn hướng còn đảm bảo hiệu chỉnh quỹ đạo chuyển động của ngư lôi và dẫn nó tiếp cận mục tiêu với sai số cho phép.

Phụ thuộc vào phương pháp dẫn ngư lôi đến mục tiêu, thành phần và công dụng của các thiết bị máy móc trong hệ thống dẫn hướng có thể khác nhau.

Trong hệ thống điều khiển từ xa**:** Lệnh điều khiển có thể trực tiếp tạo ra trên ngư lôi hoặc ở vị trí điều khiển nằm ngoài ngư lôi, sau đó mới truyền đến ngư lôi. Phần lớn máy móc chủ yếu của hệ thống đặt ở vị trí điều khiển, phần trên ngư lôi đơn giản và nhẹ hơn.

Trong các hệ thống tự dẫn: Thiết bị đặt ngoài ngư lôi không tham gia vào quá trình điều khiển. Máy móc trên ngư lôi (gọi là thiết bị tự dẫn) tiến hành sục sạo, bắt và bám sát mục tiêu và tạo ra các lệnh điều khiển.

Trong các hệ thống điều khiển kết hợp: Thiết bị máy móc trên ngư lôi phức tạp và cồng kềnh hơn, nhưng đảm bảo bắn được ở cự ly xa (nhờ phương pháp điều khiển từ xa) và độ chính xác cao (nhờ phương pháp tự dẫn).

### Hệ thống kích nổ đầu đạn

Hệ thống kích nổ đầu đạn dùng để đưa đầu đạn vào hoạt động ở thời điểm tiêu diệt mục tiêu tốt nhất.

Kích nổ đầu đạn ở khu vực ngư lôi gặp mục tiêu có thể tiến hành bằng hai cách:

- Truyền các lệnh từ vị trí điều khiển;

- Dùng các ngòi nổ đặt trên ngư lôi.

Các ngòi nổ đặt trên ngư lôi có thể là loại tiếp xúc (chạm nổ) hoặc không tiếp xúc.

Các ngòi nổ tiếp xúc chỉ gây nổ khi ngư lôi va chạm vào mục tiêu.

Các ngòi nổ không tiếp xúc gây nổ cách mục tiêu ở khoảng cách xác định. Loại này được sử dụng rộng rãi hơn trên các loại ngư lôi hiện nay.

### Hệ thống tự lái

Hệ thống tự lái hay còn gọi là hệ thống ổn định dùng để giữ cho vị trí của ngư lôi trong quá trình chuyển động được ổn định, đồng thời điều khiển chuyển động của ngư lôi theo các chương trình đã đặt trước, theo các lệnh tự dẫn và theo các tín hiệu ổn định.

Toàn bộ các máy móc của thiết bị tự lái đều đặt trên ngư lôi. Thành phần của nó gồm:

- Các phần tử đo;

- Thiết bị trung gian;

- Thiết bị chấp hành.

Hệ thống tự lái lại được chia ra làm các hệ thống thành phần;

- Máy điều khiển độ sâu dùng để điều khiển sự chuyển động của ngư lôi trong mặt phẳng đứng và bảo đảm:

+ Đưa ngư lôi đi về độ sâu chiến đấu.

+ Điều khiển ngư lôi theo độ sâu và góc nghiêng dọc ở độ sâu chiến đấu  
trên đoạn đường tự lái.

+ Điều khiển ngư lôi theo độ sâu và góc nghiêng dọc theo lệnh của hệ  
thống tự dẫn.

Hoạt động của máy dựa vào việc điều khiển độc lập của bộ phận thủy tĩnh và bộ phận con lắc. Hai bộ phận này độc lập hoặc kết hợp với nhau tác động đến máy lái thông qua các cơ cấu tổng hợp.

- Máy lái hướng dùng để:

+ Điều khiển hướng ngư lôi trên đoạn đường tự lái.

+ Điều khiển hướng ngư lôi trong quá trình tự dẫn.

Để thực hiện các qui luật điều khiển nêu trên máy lái hướng ngư lôi có  
cảm biến hướng bằng con quay ba bậc tự do, có cấu tạo gần giống với la bàn  
con quay, nhưng được trang bị thêm thiết bị khởi động nhanh bằng khí nén.

Sự chuyển điều khiển ngư lôi từ qui luật điều khiển này sang qui luật  
điều khiển khác tùy thuộc vào các lệnh của hệ thống tự dẫn, còn việc bảo đảm  
chức năng của tất cả các thành phần của máy do khối rơle thực hiện.

- Máy giảm lắc dùng để ổn định góc lắc của ngư lôi khi nó chuyển động trên đoạn đường sục sạo cũng như khi dẫn dắt theo lệnh của hệ thống tự dẫn.

Sự ổn định này đạt được là nhờ có các lái phụ. Các lái phụ đánh lái ngược chiều nhau, khi có tác động của dòng nước ngược tạo thành mômen lật, mômen này có xu hướng quay ngư lôi quanh trục dọc của nó.

Máy giảm lắc chứa cảm biến góc lắc γ và cảm biến vận tốc góc ω. Cảm biến góc lắc là một con lắc cùng với con quay hiệu chỉnh lực ly tâm xuất hiện khi ngư lôi lượn vòng trong của mặt phẳng các vây ngang. Cảm biến vận tốc góc là con quay hai bậc tự do.

## Bài toán kiểm tra, thử nghiệm hệ thống điều khiển ngư lôi

Đặc thù nhiệm vụ quân sự luôn yêu cầu bất kỳ loại trang bị, khí tài nào cũng cần phải có độ chính xác và sự ổn định làm việc. Đối với ngư lôi, là một vũ khí có vai trò quan trọng trong chiến đấu bảo vệ Tổ quốc của Hải quân, đòi hỏi phải luôn bảo đảm một cơ số nhất định đáp ứng tốt các chỉ tiêu kỹ thuật, khả năng sẵn sàng chiến đấu cao. Để làm được điều đó, nhiệm vụ kiểm tra, bảo quản và thử nghiệm hoạt động của vũ khí ngư lôi là vô cùng cần thiết, yêu cầu cần phải thực hiện thường xuyên, có quy trình chuẩn mực, đảm bảo độ chính xác, tin cậy. Trong đó hệ thống điều khiển là linh hồn của ngư lôi, quyết định đến khả năng, chất lượng hoạt động chiến đấu của ngư lôi, đồng thời hệ thống điều khiển cũng có cấu trúc rất phức tạp. Do đó bài toán kiểm tra, đánh giá, thử nghiệm hệ thống điều khiển của các loại ngư lôi đặt ra cực kỳ cấp thiết, và yêu cầu ngày càng phải nâng cao hơn chất lượng kiểm tra, đánh giá.

Hiện nay, đã có khá nhiều trang bị, phương tiện phục vụ cho kiểm tra tổng hợp hệ thống điều khiển của các loại ngư lôi, từ kiểm tra hệ thống ngòi nổ không tiếp xúc, hệ thống tự dẫn, đến kiểm tra hệ thống tự lái.

Tại các trạm ngư lôi, các thiết bị kiểm tra các thành phần trong hệ thống điều khiển như giá kiểm tra máy điều khiển độ sâu, máy lái hướng, máy giảm lắc hay các tổ hợp máy kiểm tra hệ thống ngòi nổ không tiếp xúc, kiểm tra hệ thống tự dẫn đều được thiết kế chuyên biệt để kiểm tra cho từng hệ thống của từng loại ngư lôi.

Bên cạnh đó, để phục vụ kiểm tra hoạt động thực tế của ngư lôi, ở đầu ngư lôi bắn tập còn được trang bị một thiết bị đặc biệt để ghi lại trạng thái, hoạt động của ngư lôi trong điều kiện thực hành. Thiết bị này gọi là máy ghi vết đi.

Tuy các tổ hợp, thiết bị kiểm tra hiện tại đã tương đối đầy đủ nhưng đa phần là các thiết bị cũ, tương tự, cơ cấu cơ khí qua thời gian dài hoạt động không còn giữ được đặc tính kỹ - chiến thuật như ban đầu. Trong đó, có thể kể đến là máy ghi vết đi của các loại ngư lôi phổ biến trong quân chủng Hải quân như 53BA, СЭТ-53М, СЭТ-40У. Các thiết bị này vì cấu tạo chủ yếu là cơ khí nên có kích thước tương đối lớn, hơn nữa tình trạng sử dụng lâu dài đã có nhiều sai số và cũng khó khăn trong sữa chữa thay thế linh kiện, phụ tùng. Với sự phát triển nhanh chóng của công nghệ hiện nay, yêu cầu cần phải liên tục cải tiến các trang thiết bị ngày càng tốt hơn, hoạt động chính xác, thuận tiện cho sửa chữa, nâng cấp, đồng thời phải tinh gọn và đa chức năng hơn. Do đó trong đồ án tốt nghiệp này, tôi đã lựa chọn giải quyết bài toán thu thập các tham số hoạt động của hệ thống điều khiển ngư lôi trên cơ sở áp dụng các kỹ thuật của thiết bị dẫn đường quán tính với mục đích đưa ra một phương án mới khả thi và hiệu quả hơn để thay thế cho thiết bị cũ.

**KẾT LUẬN CHƯƠNG 1**

Như vậy chương 1 đã nêu lên được tổng quan về hệ thống điều khiển của ngư lôi. Trong đó đã giới thiệu được cụ thể về một số loại ngư lôi hiện có của quân chủng Hải quân, tính năng kỹ - chiến thuật cơ bản của chúng, nhiệm vụ, thành phần cơ bản của một hệ thống điều khiển ngư lôi.

Qua những phần giới thiệu, ngoài những thông tin cơ bản về một số loại ngư lôi và thành phần của hệ thống điều khiển ngư lôi, chương 1 cũng đã khái quát về bài toán kiểm tra, thử nghiệm hệ thống điều khiển. Đây chính là tiền đề quan trọng cho chúng ta nghiên cứu rõ hơn về vấn đề cần giải đáp của đề tài. Trong chương 2, ta tiếp tục đi vào tìm hiểu một số phương pháp thử nghiệm, đánh giá đang được khai thác hiện nay.

# CÁC PHƯƠNG ÁN THỬ NGHIỆM ĐÁNH GIÁ HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN NGƯ LÔI

## Thử nghiệm hệ thống điều khiển ngư lôi

Việc thử nghiệm hệ thống điều khiển ngư lôi là một công việc thường xuyên, được thực hiện dưới nhiều hình thức đa dạng từ kiểm tra chức năng từng bộ phận, kiểm tra tổng hợp tại trạm đến kiểm tra thực nghiệm hoạt động của ngư lôi bắn tập.

### Thử chức năng ở trạm ngư lôi

Nhiệm vụ kiểm tra chức năng các máy của các loại ngư lôi tại trạm hiện nay cơ bản đều có thể thực hiện nhờ các máy kiểm tra chức năng riêng biệt. Dưới đây là một số máy, tổ hợp kiểm tra ở trạm hiện có.

#### Giá kiểm tra máy điều khiểm độ sâu 238.07.00 ПP1

- Công dụng của giá kiểm tra: Dùng để kiểm tra - hiệu chỉnh:

+ Máy điều khiển độ sâu 238.07.00;

+ Hộp rơ le 238.07.0100;

+ Máy lái máy điều khiển độ sâu 238.08.00.

- Những tính năng kỹ thuật của giá kiểm tra:

+ Giới hạn góc nghiêng dọc của giá trong mặt phẳng đứng ± 600;

+ Giá trị các vạch khắc của cơ cấu tính: thang tính thô 50; thang tính tinh 3';

+ Vùng chuyển dịch kim chỉ của cơ cấu thang đo so với vị trí giữa (về phía trước và về phía sau) ± 25 mm;

+ Vạch khắc của cơ cấu thang đo 0,5 mm;

+ Vùng chuyển dịch kim chỉ báo của thiết bị lò xo so với vị trí giữa (về phía trước và sau) ± 10 mm;

+ Giá trị vạch khắc của thiết bị lò xo ± 0,5 mm;

+ Áp suất khi làm việc lấy ra từ điều chỉnh áp suất 26 ± 2 at;

+ Áp suất khí cần thiết cấp cho bộ rung làm việc 1 at;

+ Áp suất lớn nhất được tạo ra bởi bơm nén nước 25 at;

+ Điện áp một chiều cấp cho trạm kiểm tra 27 ± 3 V;

+ Điện trở cách điện của trạm kiểm tra ≥ 30 MΩ;

+ Độ chính xác của cơ cấu thang đo của giá kiểm tra cấp 2,5;

+ Kích thước của giá kiểm tra: dài 900 mm; rộng 620 mm; cao 1190 mm;

+ Khối lượng của giá kiểm tra 240 kg;

#### Giá kiểm tra máy lái hướng CT8019

- Công dụng: Dùng để kiểm tra và hiệu chỉnh các máy lái hướng.

- Những tính năng kỹ thuật của giá kiểm tra:

Giá kiểm tra đảm bảo:

+ Đặt các góc tĩnh thử máy:

Theo hướng (phải và trái) 00 – 1800

Theo góc nghiêng dọc ± 100

+ Lắc cơ khí giá cùng máy trong mặt phẳng ngang:

Góc 10 ± 10’

Tần số 25 ± 2 hoặc 36 ± 2

+ Giá trị của mỗi vạch chia của đĩa số đặt góc theo hướng 10

+ Sai số tính theo thước chạy ≤ 6’

+ Giá trị của mỗi vạch chia đĩa số đặt góc nghiêng dọc 30’

+ Dung tích của bình chia khí 6-8 Lít

+ Áp suất công tác cực đại trong bộ chia khí 200 kG/cm2

+ Thiết bị khởi động được lắp trên giá, bảo đảm:

Tự động cấp và cắt đường khí cao áp 200 kG/cm2 đến giá treo máy sau khoảng thời gian được đặt trên đĩa số của rơle thời gian;

Cấp đều khí cao áp vào giá treo máy trong khoảng thời gian ≤ 2 phút

+ Áp suất khí cấp đến bộ rung của giá kiểm tra 1,7 ± 0,2 kG/cm2

+ Động cơ điện:

Công suất 0,55 kW

Tốc độ quay 1500 v/p

+ Đồng hồ giây:

Giá trị của mỗi vạch chia 0,01 s

Sai số khi tần số điện áp định mức ≤ 0,03 s

+ Điện nguồn nuôi giá kiểm tra:

Điện áp xoay chiều ba pha 380 V

Tần số 50 Hz

+ Điện áp nguồn nuôi thiết bị khởi động 27V

+ Kích thước:

Dài ≤ 1000 mm

Rộng ≤ 400 mm

Cao ≤ 2100 mm;

+ Khối lượng 335 kg.



Hình 2.1 Mặt máy kiểm tra CT8019



Hình 2.2 Giá kiểm tra máy lái hướng CT8019

#### Thiết bị kiểm tra máy giảm lắc gồm: Hộp kiểm tra 274.058.041, thiết bị quay, giá đỡ và bộ dây cáp đấu nối.

\* Hộp kiểm tra máy giảm lắc

- Công dụng: Hộp kiểm tra máy giảm lắc dùng để kiểm tra chức năng của máy giảm lắc 274.008.

- Những tính năng kỹ thuật:

+ Nguồn một chiều 27 ± 3 V

+ Nguồn xoay chiều ba pha tần số 500 ± 10 Hz 40 ± 2 V

+ Nguồn xoay chiều 50 Hz 220 V

+ Điện trở cách điện ≥ 5 MΩ

+ Góc quay của giá cố định giảm lắc:

Theo chiều nghiêng dọc +400 ÷ 900

Theo chiều lắc ngang ± 600

+ Công suất nguồn:

Nguồn một chiều 20 W230

Nguồn xoay chiều tần số 500 Hz 20 W

Nguồn xoay chiều tần số 50 Hz 40 W

+ Kích thước của bàn kiểm tra 274.508.041:

Dài ≤ 400 mm

Rộng ≤ 350 mm

Cao ≤ 250 mm

+ Kích thước của thiết bị quay cùng với giá đỡ:

Dài ≤ 405 mm

Rộng ≤ 280 mm

Cao ≤ 520 mm

+ Khối lượng của bộ kiểm tra ≤ 50 kg.

\* Thiết bị quay

- Công dụng: Thiết bị quay MПУ-1 dùng để kiểm tra các con quay trong các điều kiện phòng thí nghiệm. Các máy kiểm tra trên thiết bị được bảo đảm góc quay trong trong mặt phẳng ngang và hai phía với vận tốc bất kỳ trong hiới hạn từ 0,03 đến 1500/s.

- Những tính năng kỹ thuật của thiết bị quay:

+ Giải vận tốc góc của sàn từ 0,03 đến 1500/s.

+ Tính không đồng đều vận tốc góc của sàn không được lớn hơn:

2% đối với vận tốc góc từ 0,03 đến 0,050/s;

1,5% đối với vận tốc góc từ 0,05 đến 0,30/s;

2% đối với vận tốc góc từ 0,3 đến 1500/s.

+ Sai số đặt vận tốc góc theo đĩa số của cơ cấu đếm không được lớn hơn:

±5% đối với vận tốc góc từ 0,03 đến 0,050/s;

±3% đối với vận tốc góc từ 0,03 đến 0,050/s;

1% đối với vận tốc góc từ 0,03 đến 0,050/s.232

+ Sai lệch vận tốc góc trái, phải của sàn không được lớn hơn:

1,5% đối với vận tốc góc từ 0,03 đến 0,10/s;

1% đối với vận tốc góc từ 0,1đến 1500/s.

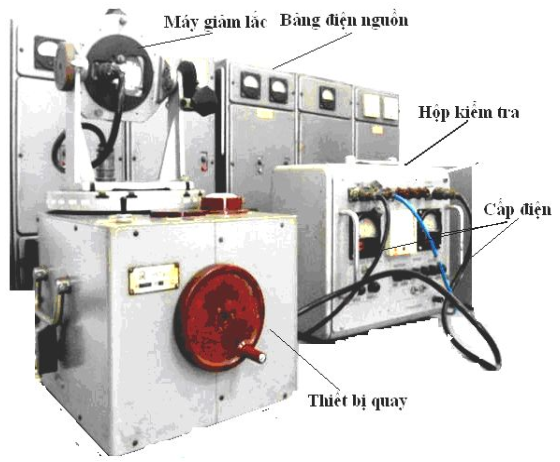
+ Điều chỉnh trơn vận tốc góc.

+ Tải cho phép lớn nhất trên sàn 8 kg.

+ Giải nhiệt độ công tác từ +15 đến + 350C.

+ Số lượng vòng dẫn điện của cổ góp 1

+ Nguồn nuôi động cơ ~ 220 v, 50 Hz



Hình 2.3 Thiết bị kiểm tra máy giảm lắc

#### Tổ hợp máy kiểm tra hệ thống tự dẫn

- Tổ hợp máy ПАС-А dùng để kiểm tra và hiệu chỉnh các thông số điện của hệ thống tự dẫn ngư lôi 53ВА. Tổ hợp máy kiểm tra có thể vừa dùng để kiểm tra các khối riêng biệt của hệ thống tự dẫn và vừa dùng để kiểm tra hệ thống tự dẫn đã được lắp ráp hoàn chỉnh.

Thành phần của tổ hợp máy ПАС-А gồm:

+ Khối nguồn БП: Dùng để cấp các điện áp 220V, 27V, 6,3V;

+ Máy phát tín hiệu hình sin ГС: Dùng để tạo ra điện áp dạng hình sin tần số thay đổi được để kiểm tra hoạt động của khối khuếch đại rơle;

+ Bộ tạo giả tín hiệu ИC: Dùng để tạo giả tín hiệu tàu mục tiêu;

+ Máy kiểm tra sự làm việc khối rơle ППА;

+ Thiết bị kiểm tra bộ thu: ПП;

+ ПAC - A: Trạm kiểm tra hệ thống tự dẫn;

+ Bộ nạp từ: dùng để nạp từ cho bộ thu (ПУ), kèm cầu chì 20A để phục vụ tự động ngắt nạp từ.

- Tổ hợp máy КПЦ-А dùng để kiểm tra và hiệu chỉnh các thông số điện của hệ thống tự dẫn ngư lôi СЭТ-53М và СЭТ-40У. Tổ hợp máy kiểm tra có thể vừa dùng để kiểm tra các khối riêng biệt của hệ thống tự dẫn và vừa dùng để kiểm tra hệ thống tự dẫn đã được lắp ráp hoàn chỉnh trong ngư lôi СЭТ-53М và СЭТ-40У.

Thành phần của tổ hợp máy kiểm tra КПЦ-А của СЭТ-53М, gồm có:

+ Máy kiểm tra thiết bị tự dẫn;

+ Khối nguồn của thiết bị tự dẫn;

+ Máy tạo giả tín hiệu;

+ Thiết bị kích từ từ cho máy thu;

+ Máy tạo thiên áp;

+ Máy kiểm tra các chế độ cấp nguồn;

+ Bộ chia điện áp hai kênh;

+ Máy phát tín hiệu hình sin.

Thành phần của tổ hợp máy kiểm tra КПЦ-А của СЭТ-40У, gồm có:

+ Thiết bị để kiểm tra hệ thống tự dẫn khi đã lắp ráp hoàn chỉnh;

+ Khối các bộ rung kiểm tra БКБ 241.201.001;

+ Hộp nối БКБ 241.201.008;

+ Dây cáp nối đến máy kiểm tra 241.201.011-1;

+ Manipuliator;

+ Máy kiểm tra khối khuếch đại УУ;

+ Khối kiểm tra máy phát xung;

+ Máy phát tín hiệu;

+ Máy đo công suất của máy phát xung;

+ Khối biến đổi điện;

+ Hộp điều chỉnh điện áp.

#### Thiết bị kiểm tra NNKTX

- Thiết bị kiểm tra ПАС-Н dùng để kiểm tra, hiệu chỉnh các thông số điện của hệ thống ngòi nổ không tiếp xúc của ngư lôi 53ВА khi khai thác bảo quản và sửa chữa thường xuyên. Nhờ các máy ΠAC-Н có thể kiểm tra các khối riêng lẽ và ngòi nổ khi đã lắp ráp hoàn chỉnh.

Thành phần của ΠAC - H gồm:

+ Khối nguồn dùng để nuôi khối điện tử, máy kiểm tra thiết bị điện tử và còn để kiểm tra máy thu. Khối nguồn gồm hai khố i biến đổi điện và khối nắn dòng;

+ Máy kiểm tra khuếch đại điện từ dùng để kiểm tra và hiệu chỉnh các thông số của khối khuếch đại;

+ Khối hiệu chỉnh khung cộng hưởng dùng để kiểm tra cộng hưởng cuộn thu;

+ Máy tạo giả tín hiệu để kiểm tra chức năng của ngòi nổ khi đã lắp ráp hoàn chỉnh. Khi kiểm tra chức năng nó tạo ra tín hiệu công tác, đưa đến bộ thu khi ngòi nổ không tiếp xúc đã lắp vào ngư lôi;

+ Đèn báo làm việc để kiểm tra chức năng của ngòi nổ khi đã lắp hoàn chỉnh;

+ Bộ dây cáp để nối ПАС-Н với các khối của ngòi nổ và nối các máy của ΠAC-H với nhau, để nối bộ nguồn và các máy của ПАС-Н với lưới điện xoay chiều 220V;

+ Các dụng cụ đo tiêu chuẩn ( B3 - 38, B7, 15, tần kế Д506 M14, mêgaôm kế M4100/1, ôm kế M371, để đo điện áp tần số, điện trở cách điện và để xác định sự nguyên vẹn của các dây cáp;

- Tổ hợp máy kiểm tra КПС-Н dùng để kiểm tra và hiệu chỉnh các thông số điện của thiết bị ngòi nổ không tiếp xúc ngư lôi СЭТ-53M và СЭТ-40У.

Trong tổ hợp máy kiểm tra gồm có:

+ Máy kiểm tra thiết bị khuếch đại;

+ Bộ nắn;

+ Máy biến đổi điện cùng với bộ ổn tần;

+ Máy cân bằng;

+ Máy kiểm tra điện áp nguồn;

+ Máy kiểm tra sự làm việc của ngòi nổ;

+ Máy kiểm tra cuộn phát;

+ Máy bổ trợ.

### Kiểm tra khi ngư lôi hoạt động thực tế

Khi tiến hành thử nghiệm thực tế đối với ngư lôi bắn tập, đầu ngư lôi chiến đấu sẽ được thay thế bởi đầu ngư lôi bắn tập.

Đầu ngư lôi bắn tập trang bị những thiết bị cần thiết phục vụ cho bắn tập, trong đó có máy ghi vết đi là một thiết bị quan trọng phục vụ cho quá trình kiểm tra, thử nghiệm.

a) Công dụng của máy ghi vết đi

Máy ghi vết đi - máy phổ biến dùng để ghi lại các đại lượng đường đi của ngư lôi.

Máy ghi sẽ ghi độ sâu của ngư lôi, vận tốc ngư lôi, góc lắc dọc và góc lắc ngang của ngư lôi. Máy ghi vết đi còn để đánh dấu thời gian và thời điểm làm việc của ngòi nổ không tiếp xúc khi ngư lôi đi gần tàu mục tiêu.

Việc ghi độ sâu đường đi của ngư lôi được tiến hành dựa vào áp suất của cột nước tác động lên phần tử nhạy cảm kiểu hộp xếp.

Lắc ngang và lắc dọc của ngư lôi được ghi lại nhờ quả dọi (con lắc) quán tính. Các con lắc này được treo tại điểm tâm tương ứng với mặt phẳng lắc. Còn việc đánh dấu sự làm việc của ngòi nổ không tiếp xúc được thực hiện bởi các rơle điện từ.

b) Hoạt động của máy ghi vết đi

Khi cò ngư lôi mở và côngtăctơ đóng lại thì nguồn được cấp đến cho động cơ của máy ghi vết đi. Thông qua hộp số, truyền động của động cơ được đưa đến 2 lõi cuốn giấy và tang trống dẫn động. Chính vì vậy mà băng giấy từ lõi cuốn giấy này được quấn sang lõi cuốn giấy kia.

Nước biển theo ống dẫn vào máy ghi vết đi, áp lực thủy tĩnh sẽ tác động lên phần tử cảm nhận độ sâu nhỏ và lớn. Truyền động này được đưa tới làm dịch chuyển các kim ghi, các kim ghi dịch chuyển trong các rãnh định hướng và ghi lại độ sâu của ngư lôi lên băng giấy của máy ghi vết đi.

Ở phần đầu của ngư lôi thực tập có lắp bộ phận chuyên dùng để đo vận tốc của ngư lôi. Bộ phận đo vận tốc được nối với đầu chuyên dùng của ống đo để khi ngư lôi chuyển động, áp lực nước theo ống dẫn được đưa đến hộp xếp dưới của bộ phận đo vận tốc.

Để cho vận tốc ghi lại ở máy ghi vết đi không bị ảnh hưởng bởi áp lực thủy tĩnh, người ta có bộ phận làm bằng áp suất ở mặt trên của hộp xếp, nơi có áp lực nước đi vào. Vì vậy áp lực nước ở hộp xếp dưới lớn hơn áp lực nước ở hộp xếp trên một giá trị của áp suất cột nước. Các đáy của hộp xếp với thanh giằng sẽ chuyển dịch, nén lò xo của nó lại. Sự chuyển dịch của thanh giằng sẽ làm dịch chuyển bộ ghi của cơ cấu ghi.

Rơle đánh dấu thời gian (nếu có lắp) bắt đầu làm việc vào thời điểm ngư lôi rời khỏi ống phóng. Các xung điện được tạo ra theo thời gian và được các rơle tiếp nhận rồi ghi lên băng giấy theo kiểu xung bậc thang.

Các thiết bị dùng để ghi và đo vận tốc cũng như rơle đánh dấu thời gian làm việc không được sử dụng thường xuyên trong các lần bắn tập chúng chỉ được sử dụng trong các lần cần phải nghiên cứu sự làm việc của ngư lôi. Đối với rơle dùng để đánh dấu sự làm việc của ngòi nổ không tiếp xúc, nó nhận xung từ ngòi nổ không tiếp xúc vào thời điểm khi ngư lôi đi gần hay đi qua mục tiêu.

Việc ghi lắc ngang và lắc dọc được thực hiện nhờ các con lắc dọc; mỗi lần lắc ngang hay lắc dọc thì con lắc sẽ ghi lại trạng thái lắc của ngư lôi.

c) Những tính năng kỹ chiến thuật của máy ghi vết đi ngư lôi СЭТ-53М

Chiều dài: 356 mm;

Đường kính: 81 (101) mm;

Vận tốc trượt của băng giấy: 3,5 (0,3 mm/s;

Giới hạn đo độ sâu: 0-20-/ 0-60, 0-100-/0-200 m;

Chiều cao biểu đồ độ sâu: 36 +-57 mm;

Giới hạn đo vận tốc: 5-40, 10-60, 10-80, 30-60, 40-80 M/h;

Chiều cao biểu đồ vận tốc: 30 ± 8 mm;

Giới hạn lắc ngang và lắc dọc: ± 300;

Chiều cao biểu đồ (tính từ vạch chuẩn không):

- Lắc ngang: ± 13 mm;

- Lắc dọc: ± 8,5 mm;

Thời gan làm việc của máy: ≥ 25 phút;

Chiều dài băng giấy: 6 m;

Khối lượng máy: 4,2 ± 0,2 kg;

Kim của cơ cấu ghi lắc ngang dịch chuyển sang trái theo tương quan sau:

- So với kim ghi lắc dọc: 17,5 ± 0,5 m;

- So với kim ghi độ sâu nhỏ: 23,5 ±0,5 mm;

- So với kim ghi độ sâu lớn: 30 ± 0,5 mm;

- So với kim ghi sự làm việc của ngòi nổ: 0 ± 0,5 mm;

Sai số khi đo độ sâu: ≤ 2 %;

Sai số khi đo vận tốc đối với các vùng giới hạn trên:

- ở vùng từ 10-40: ≤ 0,5;

- ở vùng từ 10-60 và 10-80: ≤ 1;

- ở vùng từ 30-60 và 40-80: ≤ 0,5 M/h;

Sai số khi đo vận tốc đối với các vùng giới hạn dưới khoảng 5 M/h;

Sai số khi đo góc lắc:

- Lắc ngang: ≤ 20;

- Lắc dọc: ≤ 20.

## Phương án đánh giá tham số chuyển động ngư lôi dựa vào hệ thống dẫn đường quán tính

Cùng với sự phát triển của kỹ thuật hiện đại, ngày càng có nhiều phương pháp đo lường hiệu quả, thuận tiện và đạt được độ chính xác cao hơn. Các phương tiện, thiết bị đánh giá, kiểm tra như đã giới thiệu ở phần trước, cơ bản dựa trên những kỹ thuật còn thô sơ, các thiết bị đòi hỏi thao tác thủ công nhiều, chưa có sự tự động hóa từ đó dễ dẫn đến sai sót trong quá trình thức hiện quy trình kiểm tra. Hơn nữa việc kiểm tra, đánh giá khi sử dụng các thiết bị cũ chỉ có thể thực hiện cho từng bộ phận, từng chức năng riêng biệt, trong khi thực tế vận hành, các bộ phận chức năng trong hệ thống điều khiển của ngư lôi có sự ảnh hưởng tác động lẫn nhau, do đó để đáp ứng yêu cầu về độ chính xác và ổn định hoạt động ngày càng cao của trang bị, cần thiết phải có phương pháp kiểm tra tổng hợp hoạt động của cả hệ thống điều khiển sao cho hiệu quả, chính xác và tối giản hóa thao tác con người.

Bên cạnh đó, máy ghi vết đi được trang bị cho ngư lôi bắn tập cũng có cấu tạo cơ khí cồng kềnh, việc ghi lại các thông số ngư lôi được thực hiện bằng cơ cấu ghi - cuộn giấy khá thô sơ, các thông số thu được cũng đơn giản chưa phản ánh được hết trạng thái hoạt động của ngư lôi, hơn nữa qua sử dụng lâu dài làm giảm đi độ chính xác cơ khí khá nhiều. Tuy vẫn còn được sử dụng phổ biến trong nhiều loại ngư lôi hiện có của Hải quân ta, nhưng vì là máy đo ghi kết quả dạng tương tự, nên việc thu thập, phân tích số liệu từ máy ghi vết đi gặp nhiều khó khăn, đồng thời việc lưu trữ, truyền đạt hay triển khai các phương pháp phân tích số cũng không thuận tiện. Do đó, để nâng cao hơn hiệu quả nhiệm vụ kiểm tra, đánh giá ngư lôi, đồ án này sẽ trình bày một giải pháp dựa trên kỹ thuật dẫn đường quán tính và xây dựng thiết bị số thực nghiệm phương pháp dẫn đường quán tính đo trạng thái góc và quỹ đạo chuyển động của ngư lôi trong không gian – những tham số có thể đánh giá tổng quát chất lượng điều khiển ngư lôi. Như vậy, với giải pháp này, đồ án sẽ tập trung chủ yếu vào giải quyết bài toán đánh giá các tham số chuyển động của ngư lôi.

Dẫn đường vốn được xem là một trong các kỹ năng từ xa xưa và ngày nay nó trở thành lĩnh vực khoa học tương đối phức tạp. Về bản chất nó là việc sử dụng các phương tiện, thiết bị khác nhau để tìm đường đi từ điểm này đến điểm kia.

Một cách tiếp cận cho vấn đề này là việc sử dụng nguyên lý “dự đoán” mà vị trí hiện tại có thể được tính toán thông qua vị trí ban đầu, vận tốc và hướng. Quá trình dự đoán được thực hiện bằng cách xác định vị trí đã biết trước đó và thời điểm đo, vận tốc trung bình và thời điểm hiện tại. Vận tốc có thể được xác định thông qua góc hướng để xác định các thành phần chuyển động. Mỗi thành phần sau này được nhân với thời gian kể từ điểm trước đó đến hiện tại để xác định sự thay đổi của vị trí. Cuối cùng, đại lượng thay đổi theo các hướng cộng với vị trí ban đầu để xác định vị trí hiện tại. Một trong những phương pháp sử dụng cách tiếp cận này là phương pháp dẫn đường quán tính. Trong phương pháp này nhờ các cảm biến quán tính (con quay, gia tốc kế) ta có thể xác định chuyển động quay, chuyển động tịnh tiến vật mang so với hệ tọa độ quán tính.

Nguyên lý hoạt động của thiết bị dẫn đường quán tính dựa vào định luật cơ học Newton. Theo định luật Newton một vật sẽ đứng yên hoặc chuyển động thẳng đều nếu không có ngoại lực tác động. Nếu có ngoại lực tác động lên một vật nó sẽ làm cho vật chuyển động với gia tốc tỷ lệ với ngoại lực này. Tính chất này cho phép ta có khả năng đo được gia tốc và từ thông tin gia tốc ta có thể xác định các tham số về vận tốc và vị trí. Thiết bị đo gia tốc được gọi là gia tốc kế. Một hệ thống dẫn đường quán tính thường sử dụng ba gia tốc kế và mỗi thiết bị này sẽ xác định gia tốc theo một hướng. Thông thường thì các gia tốc kế này được lắp sao cho trục nhạy của chúng vuông góc với nhau từng đôi một.

Để dẫn đường trong không gian quán tính ta cần phải duy trì việc xác định được hướng của các gia tốc kế theo các hướng nhất định trong không gian này. Chuyển động quay của ngư lôi trong không gian quán tính có thể được xác định nhờ các con quay. Do đó con quay có thể được sử dụng để xác định hướng của các gia tốc kế trong thời gian hoạt động. Do đó, nhờ vào việc sử dụng con quay ta có thể xác định hướng các gia tốc trên các trục của hệ tọa độ tham chiếu nhất định trước khi thực hiện tính tích phân để xác định các tham số vận tốc và vị trí.

Do vậy, dẫn đường quán tính là quá trình mà ở đó các dữ liệu đo nhờ con quay và gia tốc kế được sử dụng để xác định vị trí của ngư lôi. Bằng cách kết hợp hai loại thiết bị đo (con quay, gia tốc kế) ta có thể xác định được chuyển động ngư lôi trong không gian quán tính và do đó ta cũng có thể xác định được vị trí trong hệ tọa độ tham chiếu này.

Bên cạnh đó, thông tin từ con quay cũng giúp thiết bị dẫn đường quán tính đưa ra được trạng thái góc quay trong không gian của ngư lôi, từ đó đưa ra được một hệ 6 tọa độ ( 3 tọa độ vị trí và 3 tọa độ góc) để xác định trạng thái không gian đầy đủ của ngư lôi.

Không giống như các hệ thống dẫn đường sử dụng nguyên lý lan truyền sóng như dẫn đường nhờ thiết bị vô tuyến, dẫn đường nhờ các thiết bị quang học ….v.v nguyên lý hệ thống dẫn đường quán tính không bị ảnh hưởng bởi môi trường, cự ly hoạt động của vật mang, và có thể hoạt động độc lập không cần các thông tin đưa tới từ bên ngoài.

**KẾT LUẬN CHƯƠNG 2**

Trong chương 2 đã trình bày khái quát về một số trang thiết bị, phương tiện hiện có phục vụ cho kiểm tra, đánh giá chất lượng hệ thống điều khiển ngư lôi trong quân chủng Hải quân.

Trên cơ sở đó, rút ra một số nhận xét về tính hiệu quả của các phương pháp cũ và khả năng đổi mới phương pháp để phù hợp với yêu cầu ngày càng cao về chất lượng cũng như tính hiện đại, tính tự động. Từ đó, đi đến đề xuất phương án sử dụng thiết bị dẫn đường quán tính và giới thiệu sơ lược về kỹ thuật này.

Trong chương 3 sẽ nghiên cứu cụ thể, tiến hành xây dựng mô hình toán của phương pháp dẫn đường quán tính và mô phỏng thử trên Matlab.

# CƠ SỞ LÝ THUYẾT ĐÁNH GIÁ CHUYỂN ĐỘNG CỦA NGƯ LÔI THEO THUẬT TOÁN DẪN ĐƯỜNG QUÁN TÍNH

## Xây dựng mô hình toán hệ thống dẫn đường quán tính khi đánh giá tham số chuyển động ngư lôi

### Các hệ tọa độ sử dụng

#### Hệ tọa độ liên kết với khối đo quán tính IMU XbYbZb

Hệ tọa độ liên kết với thiết bị dẫn đường là hệ tọa độ mà ở đó việc đo của hệ thống dẫn đường quán tính được thực hiện. Các trục của hệ tọa độ liên kết với khối đo quán tính IMU trùng với các trục đầu ra của khối. Do đó, tín hiệu thô của khối IMU chứa các thành phần về tốc độ góc quay và gia tốc dọc theo các trục của hệ tọa độ liên kết này. Mô tả về hệ tọa độ liên kết với thiết bị dẫn đường quán tính không đế như hình 3.1:



Hình 3.1 Hệ tọa độ liên kết gắn với IMU

Gốc tọa độ - ở tâm của khối đo hệ thống dẫn đường quán tính;

Trục  - hướng sang phải khối IMU;

Trục - hướng về phía trước khối IMU;

Trục - hướng lên trên và vuông góc với mặt phẳng.

Khối IMU được đặt lên vật mang sao cho trục trùng với trục dọc, trục được đặt theo hướng lên trên và vuông góc với vật mang.

#### Hệ tọa độ dẫn đường XYZ

Các tham số tính toán cuối cùng cần đường tính phục vụ bài toán dẫn đường do đó xuất hiện yêu cầu đưa ra khái niệm về hệ tọa độ dẫn đường. Hệ tọa độ dẫn đường được trọn sao cho việc biểu diễn cũng như tính toán các đại lượng đơn giản nhất.

Trong đồ án này chọn hệ tọa độ dẫn đường là hệ tọa độ địa phương XYZ có tâm và các trục cố định sao cho tại thời điểm phóng ngư lôi, hệ tọa độ XYZ trùng với hệ tọa độ liên kết tàu (tại thời điểm phóng có thể khác với hệ tọa độ liên kết IMU XbYbZb một góc 𝜓 bằng góc quay dàn phóng ngư lôi). Để làm trùng hệ tọa XYZ với hệ tọa độ XbYbZb ta có thể thực hiện bằng cách quay hệ tọa độ XYZ lần lượt theo ba góc quay quanh theo các trục của nó. Trục quay đầu tiên là trục Z và góc quay được gọi là góc hướng. Trục quay thứ hai được thực hiện quanh trục X và góc quay được gọi là góc nghiêng. Tiếp theo thực hiện quay theo trục Y để làm trùng hệ tọa độ địa lý địa phương và hệ tọa độ liên kết. Góc quay này được gọi là góc lắc. Ba góc trên (góc hướng - 𝜓, góc nghiêng - ϑ, góc lắc - γ) là ba góc Euler.

### Các phép biến đổi tọa độ sử dụng trong hệ thống dẫn đường quán tính

#### Ma trận cosin định hướng

Để chuyển đổi tọa độ một vector từ hệ tọa độ này sang hệ tọa độ khác ta có thể sử dụng ma trận chuyển. Việc chuyển đổi vector từ hệ tọa độ I sang hệ tọa độ b được biểu diễn như sau



Ở đây  - ma trận chuyển từ hệ tọa độ I sang hệ tọa độ b.

Thường ma trận chuyển giữa hai hệ tọa độ được gọi là ma trận cosin định hướng.

Các phần tử của ma trận cosin định hướng giữa hai hệ tọa độ thường được tính bằng cách tính các giá trị cosin định hướng giữa mỗi trục của hệ tọa độ này với tất cả các trục của hệ tọa độ kia. Một trong những phương pháp quan trọng để xác định ma trận cosin định hướng là dựa vào ba góc quay thuận. Các góc quay này được gọi là các góc Euler. Sử dụng ba góc quay độc lập cho phép ta có thể xác lập mọi vị trí tương đối giữa hệ tọa độ này với hệ tọa độ kia.

Ta xét ba góc quay Euler . Sử dụng tập hợp ba góc quay thuận là ba góc Euler để làm trùng hai hệ tọa độ cho trước. Ta sẽ thực hiện việc làm trùng hệ tọa độ xyz với hệ tọa độ xbybzb.

Lần đầu tiên thực hiện quay hệ tọa độ xyz quanh trục x với góc quay . Việc quay quanh trục z góc sẽ tạo ra hệ tọa độ như trên hình 2.



Hình 3.2 Quay hệ tọa độ xyz quanh trục x một góc

Thao tác quay lần này và các lần tiếp theo được thực hiện theo chiều dương tức chiều quay ngược chiều kim đồng hồ khi nhìn từ trục quay xuống gốc tọa độ. Vị trí vector ở hệ tọa độ mới có thể được biểu diễn dựa vào các tọa độ ở hệ tọa độ ban đầu như biểu thức



Hoặc dưới dạng ma trận



Lần quay thứ hai được thực hiện bằng cách quay hệ tọa độ  quanh trục  góc như trên hình 2.2.



Hình 3.3 Quay hệ tọa độ quanh trục góc

Kết quả sau khi quay hệ tọa độ quanh trục ta nhận được hệ tọa độ . Việc chuyển đổi giữa hai hệ tọa độ và có thể được thực hiện theo biểu thức



Và



Cuối cùng thực hiện phép quay thứ ba quanh trục y2 với góc chuyển hệ tọa độ thành hệ tọa độ , như trên hình.



Hình 3.4 Quay hệ tọa độ quanh trục y2 với góc

Việc chuyển tọa độ vector từ hệ tọa độ sang hệ tọa độ nhờ hệ phương trình



Hoặc viết dưới dạng ma trận



Do đó ma trận chuyển từ hệ tọa độ xyz sang hệ tọa độ có thể được tính thông qua các ma trận C3, C2, C1 như sau



|  |  |
| --- | --- |
| Với | ( . ) |

Và



Có vô hạn tập hợp ba góc quay có thể thực hiện được việc quay từ hệ tọa độ xyz sang hệ tọa độ . Do đó, cần phải hiểu rằng không có khái niệm duy nhất về ba góc Euler.

Với ba góc Euler xác định với các phép quay nhất định cần được thực hiện nhất quán. Nếu như đặc thứ tự phép quay thay đổi thì ma trận cosin định hướng C nhận được cũng sẽ thay đổi.

Ma trận cosin định hướng giữa hai hệ tọa độ vuông góc có những đặc tính sau:

1. Định thức ma trận cosin định hướng luôn bằng một

detC=1

2. Ma trận nghịch đảo ma trận chuyển bằng ma trận chuyển vị



Ma trận có hai tính chất này trong đại số gọi là ma trận trực giao.

Sử dụng ma trận cosin định hướng trên ta có thể dễ dàng chuyển đổi tọa độ vector từ hệ tọa độ này sang hệ tọa độ khác. Ví dụ, chuyển tọa độ vector từ hệ tọa độ liên kết với IMU sang hệ tọa độ địa lý địa phương



Với - ma trận cosin định hướng chuyển từ hệ tọa độ b sang hệ tọa độ N.

Để chuyển ngược lại từ hệ tọa độ địa lý địa phương sang hệ tọa độ liên kết với IMU ta thực hiện thông qua ma trận chuyển vị như sau



Ma trận chuyển là ma trận trực giao.

Để đưa ra khái niệm về hướng của vật mang trong hệ tọa độ địa lý địa phương thường sử dụng ba góc Euler – góc nghiêng , góc lắc và góc hướng . Như khái niệm về các góc Euler của vật mang ta có biểu diễn của ma trận cosin định hướng như sau:

|  |  |
| --- | --- |
|  | ( . ) |

Với

;

;

;

;

;

;

;

;

.

Ta xét tình huống với độ lệch góc giữa hệ tọa độ xyz và hệ tọa có thể coi là các góc nhỏ. Trong trường hợp này ma trận chuyển C có thể viết lại () như sau:



Điều này cho thấy với các góc nhỏ vector quay có thể được tính gần đúng bằng tổng các vector quay thành phần. Do đó, khi biểu diễn là ma trận chuyển thành phần với góc quay nhỏ thì ma trận C có thể được biểu diễn dưới dạng



Từ giá trị các phần tử ma trận cosin định hướng C ta có thể xác định các góc Euler xác định hướng thiết bị bay theo các công thức dưới đây

|  |  |
| --- | --- |
|  | ( . ) |

#### Vecto quay

Thay vì sử dụng ba góc quay để làm trùng hệ tọa độ ban đầu với hệ tọa độ nào đó ta có thể chỉ sử dụng một phép quay quanh một trục xác định một góc. Để thể hiện phép quay này ta sử dụng vector và gọi nó là vector quay. Vector quay có hướng trùng với trục quay và có độ lớn bằng độ lớn góc quay.

Phương trình vecto quay có thể được biểu diễn dưới dạng



Ở đây, Ф – độ lớn vecto quay, i – vecto đơn vị dọc theo hướng Фx, Фy, Фz – là các hình chiếu của véc tơ quay lên các trục x, y, z. Các góc ϑ, β, γ – là các góc tạo bởi trục quay so với các trục của hệ tọa độ

Vector quay thỏa mãn phương trình



Với  - vận tốc góc giữa hai hệ tọa độ.

Với góc  nhỏ phương trình trên có thể viết dưới dạng thu gọn sau



Thông thường để thuận tiện cho thao tác chuyển hệ tọa độ đại quaternion Hamilton được sử dụng.

Quaternion Hamilton được định nghĩa là một số siêu phức dạng:

|  |  |
| --- | --- |
|  | ( . ) |

Với , , , là các số thực và tập tạo nên cơ sở cho không gian vector quaternion. Đại lượng , , thể hiện vector trong không gian vector quaternion và là độ lớn của phép quay quay quanh vector này.

|  |  |
| --- | --- |
|  | ( . ) |

Với là giá trị góc quay, - là các góc giữa trục quay và trục của hệ tọa độ.

Như vậy các thành phần của quaternion có thể biểu diễn qua thành phần của một vector quay .

|  |  |
| --- | --- |
|  | ( . ) |

Để sử dụng quaternion trong việc xây dựng thuật toán cho hệ thống dẫn đường ta cần nắm được các tính chất cơ bản của đại số quaternion. Dưới đây mô tả một số tính chất cơ bản của quaternion.

Chuẩn của một quaternion Q được tính theo công thức



Nếu Q là một quaternion biểu diễn vector quay thì chuẩn của nó bằng một .

Cộng hai quaternion. Tổng của hai quaternion [Q] và [S] được xác định theo công thức



Trừ hai quaternion. Phép trừ quaternion [Q] cho quaternion [S] được xây dựng trên cơ sở phép cộng quaternion [Q] với quaternion -

Hoặc



Nhân hai quaternion. Việc nhân hai quaternion [Q] và quaternion [S] được thực hiện như sau:



Phép nhân quaternion không có tính giao hoán, tức .

Khi nhân một quaternion với một số thực



Việc nhân hai quaternion được xây dựng trên cơ sở luật phân phối trong đại số. Vector cơ sở i, j, ktrong không gian quaternion thỏa mãn phương trình



Quaternion liên hợp với quaternion [Q] được xác định theo biểu thức



Chuẩn của quaternion Q có thể được tính bằng tích của nó với quaternion liên hợp . Chuẩn của quaternion Q được xác định theo công thức



Chuẩn của quaternion nhận được từ việc nhân hai quaternion [Q] và [S] bằng tích giá trị của các chuẩn quaternion thành phần . Do đó, trong trường hợp tổng quát chuẩn của vector tính theo công thức



Quaternion nghịch đảo. Nếu quaternion [Q] không bằng không thì quaternion nghịch đảo với nó là [Q-1] được xác định thỏa mãn điều kiện



Sử dụng khái niệm về chuẩn ta có thể xác định được quaternion nghịch đảo với quaternion [Q] theo công thức



Với .

Do đó



Một số quaternion đặc biệt

- Quaternion không [Q0] là quaternion với thành phần vô hướng và thành phần có hướng đều bằng không



- Quaternion đơn vị. Quaternion đơn vị được định nghĩa là quaternion có chuẩn bằng 1 thành phần có hướng bằng 0. Quaternion đơn vị được biểu diễn dưới dạng công thức



Để biểu diễn hướng ta cần có ba bậc tự do trong khi một quaternion mô tả việc quay hệ tọa độ có bốn thành phần do đó xuất hiện điều kiện rằng buộc giữa các thành phần này. Phương trình biểu diễn rằng buộc của một quaternion đặc trưng cho chuyển động quay giữa hai hệ tạo độ là



Sử dụng tính chất chuẩn của quaternion biểu diễn chuyển động quay ta có thể hiệu chỉnh quá trình tính toán nhờ chuẩn hóa các phần tử thành phần của quaternion theo giá trị .

So sánh hai quaternion. Hai quaternion [Q] và [S] bằng nhau khi thành phần vô hướng và có hướng của từng quaternion này bằng nhau. Như vậy, nếu quaternion [Q]=[S] khi

hoặc

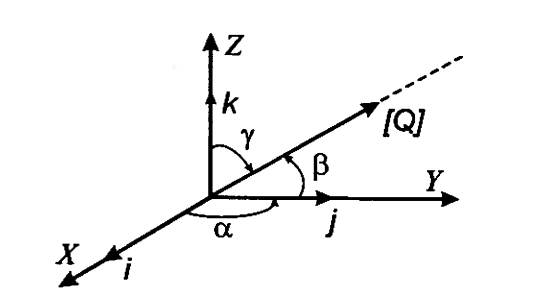
Chuyển tọa độ nhờ quaternion. Ta có thể thực hiện việc chuyển tọa độ vector R trong hệ tọa độ quán tính sang hệ tọa độ liên kết nhờ quaternion.

|  |  |
| --- | --- |
|  | ( . ) |

Lấy {i, j, k} là một cơ sở chuẩn của vector trong không gian ba chiều R3. Thì vector bất kỳ x=x1i+x2j+x3k trong không gian ba chiều R3 có thể biểu diễn dưới dạng quaternion với thành phần vô hướng bằng không. Do đó, theo định nghĩa trước đây thì bất kỳ quaternion nào cũng gồm hai thành phần: thành phần vô hướng và thành phần có hướng

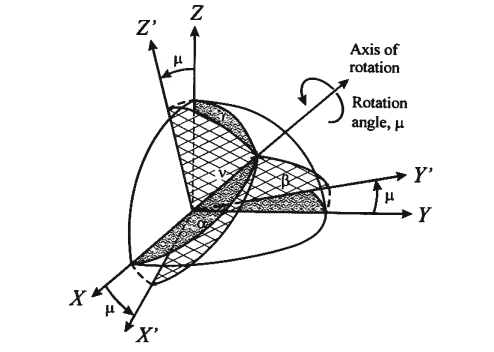


Trong đó thành phần vô hướng là q0 và thành phần có hướng là .



Hình 3.5 Hướng của quaternion trong không gian

Tiếp theo ta sẽ nghiên cứu quaternion trong bài toán chuyển đổi hệ trục tọa độ. Hai hệ tọa độ bất kỳ được thể hiện trên hình 3.6. Trong đó hệ tọa độ XYZ cố định trong không gian và hệ tọa độ chuyển động trong không gian và hai hệ tọa độ này có cùng gốc tọa độ.



Hình 3.6 Chuyển động các trục của hệ tọa độ quay quanh một trục cố định với góc , trục này tạo với các trục X,Y,Z các góc và tương ứng

Chuyển động các trục của hệ tọa độ quay quanh một trục cố định với góc , trục này tạo với các trục X,Y,Z các góc và tương ứng. Cần chú ý rằng trục quay cũng tạo với các trục và các góc và .

Việc chuyển tọa độ vector R từ hệ tọa độ b sang hệ tọa độ I có thể được thực hiện qua quaternion Q như sau:

|  |  |
| --- | --- |
|  | ( . ) |

Sử dụng biểu thức trên và luật nhân các vector i,j,k quaternion đặc trưng cho chuyển động quay có thể được xác định dưới dạng ma trận

|  |  |
| --- | --- |
|  | ( . ) |

Với

|  |  |
| --- | --- |
|  | ( . ) |

Từ công thức (.) cho ta thấy nếu ta xác định được quaternion thì ta có thể xác định được các phần tử của ma trận cosin định hướng.

Như vây, dễ thấy rằng sử dụng quaternion có ứu điểm là chỉ sử dụng bốn biến thay vì sử dụng chín biến như khi sử dụng ma trận cosin định hướng.

#### Phương trình Pausson

Tất cả các đại lượng vị trí, vận tốc, gia tốc đều có thể biểu diễn dưới dạng một vector nên ở đây ta chỉ nghiên cứu sự thay đổi của một vector trong các hệ tọa độ khác nhau. Như phân trước ta đã biết để chuyển đổi tọa độ vector từ hệ tọa độ I sang hệ tọa độ b ta dùng công thức



Ở đây  là ma trận chuyển từ hệ tọa độ I sang hệ tọa độ b.

Thông thường các vector mà thành phần của nó là các đại lượng về vị trí, vận tốc …v.v. là các giá trị biến thiên theo thời gian nên ta cần nghiên cứu vận tốc thay đổi của chúng trong các hệ tọa độ khác nhau

Tốc độ thay đổi của vecto R trong hệ tọa độ I được tính bằng công thức Coriolis



Ở đây,  - vận tốc thay đổi vector R trong hệ tọa độ I,

 - vận tốc thay đổi vecto R trong hệ tọa độ m,

 – vecto vận tốc góc chuyển động hệ tọa độ m so với hệ tọa độ I

Phương trình () có thể viết dưới dạng ma trận



Với 

Vecto RI trong hệ tọa độ I có thể được xác định nhờ ma trận cosin định hướng bằng công thức



Bằng cách vi phân hai vế của phương trình trên ta nhận được



Do đó



Suy ra



Từ đó ta nhận được phương trình



Với



Phương trình trên gọi là phương trình Pausson.

Từ phương trình Pausson nhận được ở trên chưa thuận tiện cho việc xây dựng thuật toán cho hệ thống dẫn đường. Để thuận tiện cho quá trình tính toán tiếp theo ta sẽ xây dựng phương trình Pausson dưới dạng ma trận.

Đạo hàm hai về phương trình  ta nhận được



Hay



Sử dụng các công thức  và  ta nhận được phương trình Pauson cho hai hệ tọa độ m, n chuyển động trong không gian khi đo được tốc độ góc quay của chúng so với hệ tọa độ I nào đó như sau

|  |  |
| --- | --- |
|  | ( . ) |

Với



và 

Để biểu diễn ma trận chuyển giữa các hệ tọa độ ta cũng có thể sử dụng quaternion. Một quaternion cũng có thể được biểu diễn dưới dạng ma trận 4x4 như sau



Với là các số thực.

Phương trình Pausson viết cho quaternion có dạng

|  |  |
| --- | --- |
|  | ( . ) |

Ta biểu diễn quaternion đặc trưng cho chuyển động quay

Với góc quay nhỏ ( ) ta có



Do đó khi viết dưới dạng rời rạc ta có



Hoặc

|  |  |
| --- | --- |
|  | ( . ) |

Với T – chu kỳ rời rạc;

- quaternion cập nhật (với góc quay nhỏ).

Như vậy phương trình Pausson có thể mô tả dưới dạng quaternion hoặc dạng ma trận cosin định hướng. Tiếp theo ta sẽ so sánh ưu nhược điểm của hai cách viết này khi mô tả chuyển động quay giữa hệ tọa độ không quán tính b so với hệ tọa độ quán tính I.

Phương trình Pausson dưới dạng ma trận đối với ma trận chuyển từ hệ tọa độ b sang hệ tọa độ I có dạng

|  |  |
| --- | --- |
|  | ( . ) |

Với - vận tốc góc tuyệt đối của hệ tọa độ b.

Phương trình Pausson dưới dạng rời rạc với góc quay nhỏ có thể viết như sau



Suy ra

|  |  |
| --- | --- |
|  | ( 3. ) |

Với có thể coi như là một ma trận cosin định hướng với góc quay nhỏ.

Từ phương trình (.12) và phương trình (.) ta thấy có sự giống nhau khi viết phương trình Pausson ở dạng quaternion và ở dạng ma trận cosin định hướng.

Cần chú ý rằng phương trình (.12) đúng khi chuyển từ hệ không quán tính b sang hệ tọa độ quán tính I. Trong trường hợp cần chuyển từ hệ tọa độ I sang hệ tọa độ b công thức trên có thể được viết lại dưới dạng



Với là quaternion liên hợp của quaternion .

Khi viết dưới dạng ma trận cosin định hướng, ma trận chuyển giữa hệ tọa độ I và hệ tọa độ b có thể được viết như sau



Và



Hay



Khi viết dưới dạng truy hồi ta có

|  |  |
| --- | --- |
|  | ( .) |

Ở đây là ma trận cosin định hướng của phép quay với góc quay nhỏ và nó tương tự như quaternion liên hợp .

So sánh việc chuyển tọa độ dựa vào ma trận cosin định hướng và quaternion được thể hiện trên bảng 3.1.

Bảng 3.1. So sánh việc chuyển tọa độ khi sử dụng ma trận cosin định hướng và quaternion

|  |  |
| --- | --- |
| Ma trận cosin định hướng | Quaternion |
| Chuyển vector R từ hệ tọa độ b sang hệ tọa độ I | |
|  |  |
| Phương trình Pausson | |
|  |  |
| Nghiệm phương trình Pausson dưới dạng truy hồi | |
|  | (Từ b sang I)  (Từ I sang b) |

### Xác định vị trí và trạng thái không gian của ngư lôi

Trong phần 3.1.2.a ta đã có mối quan hệ giữa ma trận cosin chuyển từ hệ tọa độ dẫn XYZ đường sang hệ tọa độ liên kết XbYbZb và 3 góc Euler như sau:

|  |  |
| --- | --- |
|  | ( . ) |

Với

;

;

;

;

;

;

;

;

.

Các góc Euler xác định hướng thiết bị bay theo các công thức dưới đây :

|  |  |
| --- | --- |
|  | ( . ) |

Để xác định vị trí của ngư lôi, ta cần xác định được gia tốc chuyển động của nó trong hệ tọa độ XYZ - khi đo được vector gia tốc trong hệ tọa độ XbYbZb. Việc chuyển đổi tọa độ này có thể được thực hiện nhờ ma trận cosin định hướng .

|  |  |
| --- | --- |
|  | ( . ) |

Với = ()-1 = ()T

Thực hiện tích phân 2 lần ta được vị trí của vật trong hệ tọa độ XYZ:

|  |  |
| --- | --- |
| = + | ( 3.20 ) |

|  |  |
| --- | --- |
| = + | ( . ) |

Với - tọa độ trong hệ tọa độ XYZ

- vận tốc trong hệ tọa độ XYZ

g - gia tốc trọng trường trong hệ tọa độ XYZ

Ma trận cosin định hướng được cập nhật theo công thức (3.14)

Các công thức trên khi áp dụng cho vector quay quaternion như sau:

Theo (3.9), từ quaternion ta có thể thu được ma trân cosin định hướng như sau:

Từ (3.18) và (3.9), ta có thể tính được 3 góc Euler từ quaternion:

|  |  |
| --- | --- |
|  | ( . ) |

Quaternion được cập nhật theo công thức (3.13)

Xác định vector gia tốc trong hệ tọa độ XYZ khi đã đo được vector gia tốc từ bộ đo gia tốc được thực hiện nhờ vector quay quaternion Q như sau:

|  |  |
| --- | --- |
| = x | ( . ) |

Tương tự như với phương pháp dùng ma trận cosin định hướng, từ gia tốc tính được qua 2 lần tích phân sẽ thu được tọa độ ngư lôi trong hệ tọa XYZ.

## Mô phỏng thuật toán dẫn đường quán tính bằng quaternion xác định chuyển động ngư lôi trên Matlab

Quaternion với ưu điểm của mình là giảm gánh nặng tính toán so với ma trận cosin định hướng (số biến cần giải là 4 so với 9 biến khi dùng ma trận cosin định hướng), cho nên trong đồ án này sẽ đi triển khai thuật toán dẫn đường quán tính với phép quay quaternion.

Để kiểm tra thuật toán trên matlab, trước hết cần tạo ra một chuyển động giả định. Chọn hệ tọa độ dẫn đường là hệ tọa độ XYZ như đã mô tả ở mục 3.1.1.b.

### Mô phỏng quỹ đạo chuyển động của ngư lôi trên Matlab

Trong phần này quỹ đạo chuyển động của ngư lôi 53ВА được chọn làm ví dụ thể hiện thuật toán dẫn đường quán tính dùng quaternion.

#### Chuyển động trong mặt phẳng ngang XY

Giả sử ngư lôi được bắn từ ống phóng với góc quay dàn phóng là (0). Các thông số bắn được đặt vào ngư lôi gồm có :

- Hướng phóng ban đầu ⍵ so với trục dọc của tàu phóng lôi : ± 1700

- Góc tách dãn ϑ so với hướng ⍵ : ± 1700

- Cự ly tách dãn Dc : ≤ 14500 m

- Chế độ :

+ Ở chế độ I sục sạo và tự dẫn ngư lôi vào mục tiêu trong vùng tín hiệu yếu được hệ thống tự dẫn thực hiện ở độ sâu sục sạo 14 m. Ngư lôi sẽ nổi lên độ sâu chiến đấu 7 m khi tín hiệu âm tăng lên đến 0,05N/m 2. Khi tín hiệu tăng lên đến 0,1N/m2 (vùng tín hiệu tin cậy) hệ thống tự dẫn chuyển chương trình sục sạo lại từ mặt quạt sang vòng tròn.

+ Ở chế độ thứ II ngư lôi được dẫn vào mục tiêu chỉ ở độ sâu chiến đấu. Khi tín hiệu đạt được 0,05N/m2 thì chuyển sang chế độ sục sạo vòng tròn.

Ở giai đoạn đầu tiên khi ngư lôi vừa phóng ra máy lái hướng sẽ điều khiển để ngư lôi quay về đi trên hướng ⍵. Sau khi ngư lôi đi được một đoạn e = 250 m thì chuyển sang giai đoạn tách dãn.

Ở giai đoạn tách dãn, ngư lôi quay thêm một góc ϑ và ngư lôi sẽ đi trên hướng này một đoạn bằng cự ly Dc. Sau khi đi hết cự ly Dc, máy lái hướng lại tiếp tục điều khiển để ngư lôi quay về hướng ⍵.

Khi tự dẫn bắt được tín hiệu mục tiêu, ngư lôi sẽ được điều khiển theo lệnh từ hệ thống tự dẫn. Trong giai đoạn tự dẫn này, ngư lôi chuyển động theo đường rắn lượn dẫn vào mục tiêu.

Trong giai đoạn chuyển động do máy lái hướng điều khiển, ngư lôi bám theo hướng đặt trước nhờ con quay hồi chuyển quay với tốc độ cao trong máy lái hướng giúp xác định sai lệch giữa góc đặt và góc quay của ngư lôi từ đó tạo ra tín hiệu điều khiển đưa ngư lôi hướng về góc đặt.

Khi mất tín hiệu, ngư lôi quay về hướng song song với hướng ban đầu và thực hiện sục sạo cho đến khi thiết lập lại mối tiếp xúc thuỷ âm mới với mục tiêu. Trong vùng tín hiệu yếu ở chế độ I ngư lôi chuyển động ở độ sâu 14 m. Lúc này, độ nhạy của hệ thống tự dẫn được nâng lên, do mức nhiễu hành trình ở độ sâu này nhỏ hơn so với ở độ sâu chiến đấu. Sau khi tín hiệu tăng đến mức đủ cho rơle sơ cấp của chỉ báo mức công tác thì ngư lôi mới đi lên độ sâu chiến đấu, tiếp tục tự dẫn vào mục tiêu. Lúc này để làm giảm nhiễu, ngưỡng công tác được nâng lên. Khi tín hiệu tăng đến mức làm cho rơle sơ cấp thứ hai của chỉ báo mức công tác, hệ thống tự dẫn chuyển sang chế độ sục sạo vòng tròn.

Ở chế độ I sục sạo vòng tròn khi mất tín hiệu mục tiêu ngư lôi sẽ quay vòng về phía đã nhận được tín hiệu lần sau cùng cho đến khi phát hiện lại mục tiêu hoặc đi hết năng lượng.

Ở chế độ thứ II ngư lôi chỉ chuyển động ở độ sâu chiến đấu 7 m. Ở chế độ này ngư lôi sục sạo lại theo vòng tròn khi rơle sơ cấp của chỉ báo mức công tác.

Gọi sai lệch góc hướng tại thời điểm k là Δ𝜓(k), lệnh điều khiển tạo ra quá tải η𝜓 bảo đảm đưa ngư lôi về hướng định trước trong mặt phẳng ngang theo luật điều khiển PID :

|  |  |
| --- | --- |
| η𝜓 (k) = Kp𝜓 . Δ𝜓(k) + Kd𝜓 . + Ki𝜓 . | ( . ) |

với Δ𝜓(k) = góc đặt - 𝜓(k)

=

Quá tải tạo ra thay đổi góc hướng theo quy luật như sau:

|  |  |
| --- | --- |
| 𝜓(k) = 𝜓(k-1) + . Δt | ( . ) |

với Vnl là vận tốc ngư lôi.

#### Chuyển động trong mặt phẳng đứng XZ

Khi ngư lôi ra khỏi ống phóng, ngư lôi sẽ lao theo quán tính đến khi hết cự ly hãm lái ngang thì máy điều khiển độ sâu mới bắt đầu làm việc điều khiển đưa ngư lôi về độ sâu chiến đấu. Như vậy là để đảm bảo cho con lắc cảm nhận góc nghiêng dọc trong máy điều khiển độ sâu được ổn định sau khi xảy ra va đập quán tính mạnh với mặt nước, đảm bảo lệnh điều khiển tạo ra được chính xác.

Sau khi hết cự ly hãm lái ngang, máy điều khiển độ sâu nhờ vào hoạt động của con lắc cảm nhận góc nghiêng, đưa ngư lôi về độ sâu chiến đấu H1 = 7m theo góc nghiêng xuống 30. Nhờ cảm biến áp suất lò xo thủy tĩnh, máy điều khiển độ sâu có thể cảm nhận được áp lực thủy tĩnh từ đó xác định được độ sâu của ngư lôi. Khi đạt đến độ sâu H1 ngư lôi di chuyển trên đường độ sâu H1. Nếu đặt chế độ I - sục sạo, khi hệ thống tự dẫn bước vào trạng thái công tác sau 20 - 30 giây kể từ khi có tín hiệu Dc từ máy lái hướng, ngư lôi sẽ đi về độ sâu sục sạo H2 = 14m dưới góc nghiêng xuống 30 và bắt đầu sục sạo trên đường độ sâu H2.

Khi tín hiệu mục tiêu đủ lớn, hệ thống tự dẫn sẽ tạo lệnh đưa ngư lôi về lại độ sâu chiến đấu H1 với góc nghiêng lên 10030’, và tiếp tục tự dẫn vào mục tiêu.

Tương tự như trong mặt phẳng ngang XY, ta đi xây dựng luật điều khiển PID trong mặt phẳng đứng XZ. Gọi sai lệch góc nghiêng tại thời điểm k là Δ ϑ (k), lệnh điều khiển tạo ra quá tải ηϑ bảo đảm đưa ngư lôi về hướng và độ sâu định trước trong mặt phẳng XZ:

|  |  |
| --- | --- |
| η = ηϑ1 - ηϑ2  ηϑ1 (k) = Kpϑ . Δϑ(k) + Kdϑ . + Kiϑ .  ηϑ2 (k) = Kph . ΔH(k) + Kdh . + Kih . | ( . ) |

trong đó

|  |
| --- |
| ηϑ1 là quá tải điều khiển theo góc nghiêng |
| ηϑ2 là quá tải điều khiển theo độ sâu, mang dấu âm vì khi ngư lôi được điều khiển đi xuống độ sâu lớn hơn thì giá trị góc nghiêng ϑ sẽ dương hơn còn giá trị độ sâu sẽ âm hơn dẫn đến giá trị quá tải ηϑ2 ngược dấu với ηϑ1. |
| Δϑ(k) = góc đặt - ϑ(k) |
| = |
| ΔH(k) = độ sâu đặt - H(k) |
| = |

Quá tải tạo ra thay đổi góc nghiêng theo quy luật như sau:

|  |  |
| --- | --- |
| ϑ(k) = ϑ(k-1) + . Δt | ( . ) |

với Vnl là vận tốc ngư lôi

Từ sự thay đổi góc của ngư lôi trong 2 mặt phẳng, giả sử vận tốc ngư lôi Vnl không đổi, khi đó ta xác định được tọa độ ngư lôi như sau:

|  |  |
| --- | --- |
| X(k) = X(k-1) + Vnl .cos𝜓(k).cosϑ(k). Δt  Y(k) = Y(k-1) + Vnl .sin𝜓(k). cosϑ(k). Δt  Z(k) = Z(k-1) – Vnl .sinϑ(k). Δt | ( . ) |

Từ các công thức (3.26) đến (3.29), ta cũng có được các góc Euler như sau:

Roll: γ(k) = 0

Pitch: ϑ(k) = ϑ(k-1) + . Δt

Yaw: 𝜓(k) = 𝜓(k-1) + . Δt

Mô phỏng quỹ đạo ngư lôi trên Matlab trên hình 3.7 và hình 3.8. Các tham số được chọn như sau :

Kp𝜓 = 10; Kd𝜓 = 0.5; Ki𝜓 = 0.001;

Kpϑ = 500 ; Kdϑ = 15 ; Kiϑ = 0.001;

Kph = 1; Kdh = 0.1; Kih = 0.001 ;

Vnl = 29 hải lý/h ;

(0) = 100;

⍵ = 450 ;

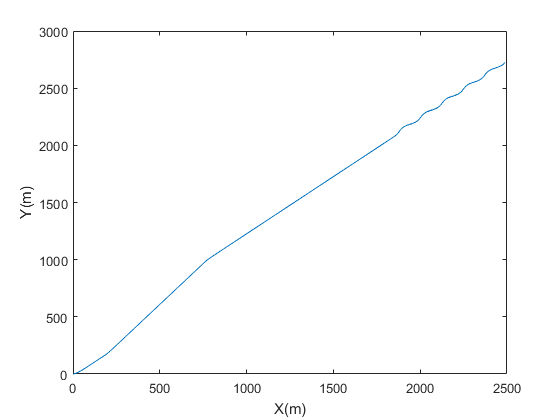
α = 100;

Dc = 1000 m;

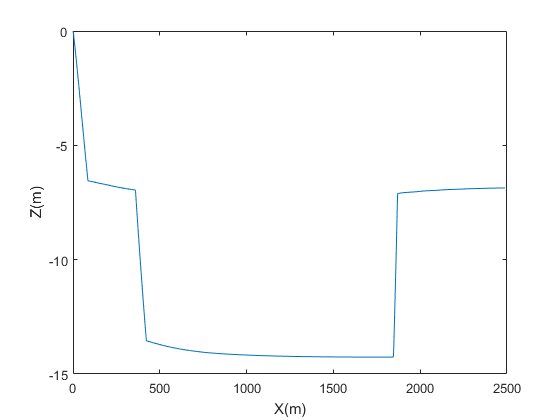
Chế độ I – sục sạo ;

Góc rắn lượn khi ngư lôi tự dẫn vào mục tiêu giả định là ±300, tốc độ góc lượn vòng 100/s ;

Cho thời điểm tự dẫn bắt được mục tiêu là 150 s kể từ khi tự dẫn bắt đầu làm việc.



Hình 3.7 Quỹ đạo ngư lôi trong mặt phẳng XY mô phỏng trên Matlab



Hình 3.8 Quỹ đạo ngư lôi trong mặt phẳng XZ mô phỏng trên Matlab

### Tính toán chuyển động ngư lôi với thuật toán dẫn đường quán tính dùng quaternion

Đầu vào cần cho cho thuật toán là các thành phần vận tốc góc của con quay tương ứng với tốc độ góc của ngư lôi trong hệ tọa độ XbYbZb - ⍵bx , ⍵by , ⍵bz dùng để cập nhật vector quay, và các thành phần gia tốc đo được từ cảm biến gia tốc abx, aby, abz sẽ được chuyển sang hệ tọa độ XYZ thông qua phép quay quaternion để tích phân và tính ra vị trí của ngư lôi trong hệ tọa độ XYZ. Các giá trị đầu vào được tạo ra như sau:

- Giả sử trong quá trình chuyển động ngư lôi sinh ra góc lắc γ nhỏ theo quy luật hình sin với biên độ 0.2 rad và chu kỳ 30 s.

|  |  |
| --- | --- |
| γ = 0.2sin( ) | ( 3.31 ) |

- Vận tốc trong hệ tọa độ XYZ

|  |  |
| --- | --- |
| =  =  = | ( . ) |

- Gia tốc trong hệ toạ độ XYZ

|  |  |
| --- | --- |
| =  =  = + g | ( . ) |

- Gia tốc trong hệ toạ độ XbYbZb

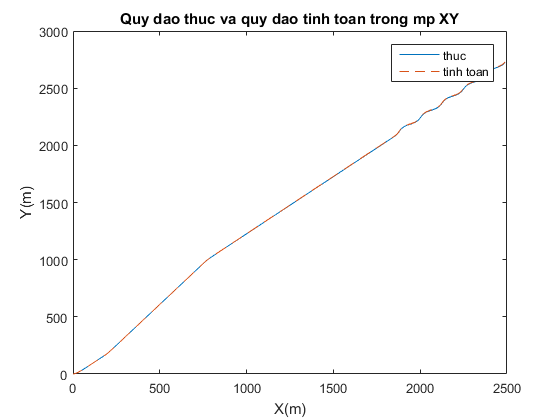
Tương tự như khi xây dựng ma trận cosin định hướng đã trình bày ở mục 3.1.2. Ta thực hiện lần lượt các phép quay góc hướng 𝜓, góc nghiêng ϑ và góc lắc γ để tính ra gia tốc đo giả định từ cảm biến abx, aby và abz­.

|  |  |
| --- | --- |
| Quay lần 1 theo góc 𝜓:  = cos𝜓 + sin𝜓  = - sin𝜓 + cos𝜓  = | ( . ) |
| Quay lần 2 theo góc ϑ:  = cosϑ - sinϑ  =  = sinϑ + ϑ | ( 3.35 ) |
| Quay lần 3 theo góc γ:  =  = γ + γ  = - γ + γ | ( 3.36 ) |

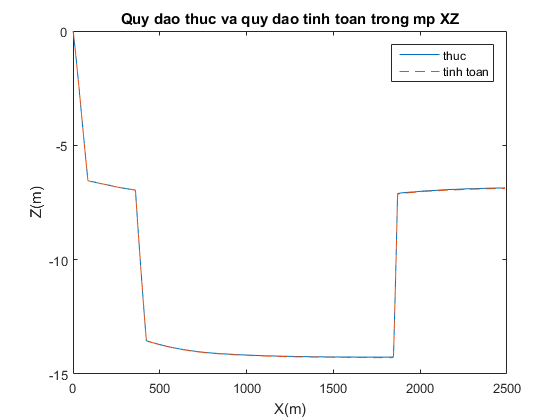
- Tốc độ góc của ngư lôi đo được trong hệ toạ độ XbYbZb

|  |  |
| --- | --- |
| ⍵bx­ = - .sinϑ +  ⍵by = .cosγ + cosϑ.sinγ  ⍵bz = - .sinγ + cosϑ.cosγ | ( . ) |

Sau khi đã tạo được tín hiệu đo giả định, áp dụng các công thức (3.12) và (3.19) đến (3.22) để cập nhật quaternion quay và tính ra trạng thái góc cùng vị trí trong hệ tọa độ XYZ. Code triển khai cụ thể trên Matlab trong phụ lục 1. Kết quả mô phỏng như các hình 3.9 đến hình 3.12

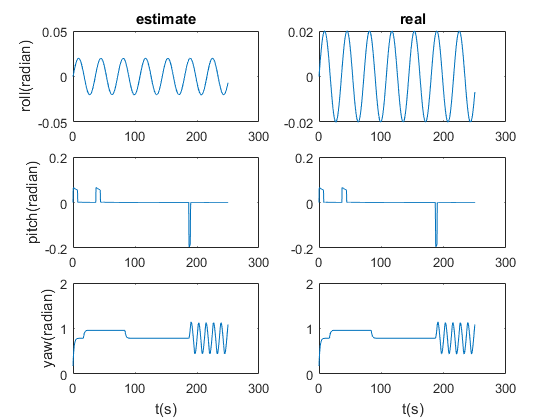


a) Quỹ đạo trong mặt phẳng XY

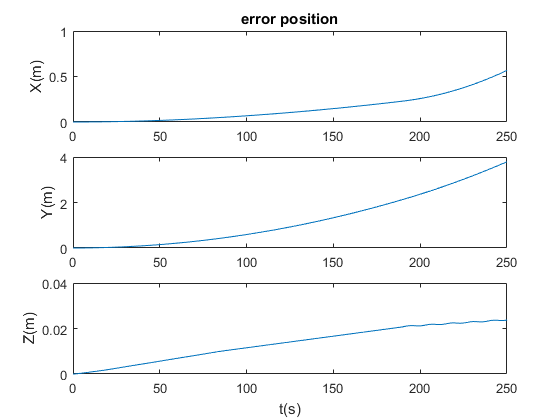


b) Quỹ đạo trong mặt phẳng XZ

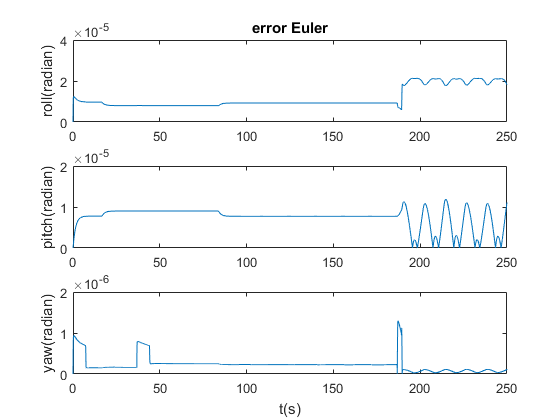
Hình 3.9 Quỹ đạo thực và tính toán gần trùng nhau khi mô phỏng trên Matlab



Hình 3.10 Các góc Euler tính toán và thực tế rất giống nhau



Hình 3.11 Sai số vị trí của thuật toán



Hình 3.12 Sai số góc Euler của thuật toán

Từ kết quả trên ta thấy thuật toán dẫn đường quán tính hoạt động rất tốt trong trường hợp lý tưởng không có nhiễu đo.

Trong chương tới ta sẽ tiến hành triển khai thực tế thuật toán dẫn đường quán tính dùng quaternion trong điều kiện có nhiễu.

**KẾT LUẬN CHƯƠNG 3**

Trong chương 3 đã giới thiệu về cơ sở để xây dựng thuật toán dẫn đường quán tính, đồng thời mô phỏng hoạt động của thuật toán với một chuyển động giả định trên Matlab.

Sau khi đã trang bị về cơ sở lý thuyết, trong chương tiếp theo sẽ tiến hành triển khai thực tế thuật toán, từ đó tạo ra cái nhìn rõ ràng hơn về ứng dụng của thuật toán cũng như những vấn đề khi triển khai.

# THỬ NGHIỆM THUẬT TOÁN DẪN ĐƯỜNG QUÁN TÍNH XÁC ĐỊNH THAM SỐ CHUYỂN ĐỘNG CỦA NGƯ LÔI

## . Tổng quan về mô hình thử nghiệm

Với những điều kiện hạn chế, đồ án chỉ đưa ra một mô hình triển khai thuật toán ở mức độ tương đối, với mục đích tạo tiền đề để phát triển thêm về sau, do đó mô hình thiết bị đưa ra sẽ chưa thể đạt được độ chính xác mong muốn.

Việc lấy dữ liệu sẽ được thực hiện nhờ cảm biến quán tính 6 trục mpu6050 có khả năng đo được vận tốc góc và gia tốc thẳng trên 3 trục trực giao Xb,Yb,Zb. Sau đó dữ liệu đo được truyền đến vi điều khiển STM32F407VET6 qua giao tiếp I2C. Tại đây, thuật toán dẫn đường quán tính được triển khai.

Để tiện cho quan sát, kết quả thuật toán được truyền đến máy tính thông qua giao tiếp không dây TCP/IP. Giao tiếp được đảm nhiệm bởi module ESP8266. Tại máy tính nhận, một phần mềm nhận sẽ tạo server cho mạng TCP/IP và hiển thị kết quả.



Hình 4.1 Tổng quan về thiết bị

Lưu đồ thuật toán triển khai trên stm32f407vet6 như sau:



Hình 4.2 Thuật toán dẫn đường quán tính dùng quaternion

## . Thiết kế phần cứng và phần mềm

### . Mạch điện tử

Mạch điện tử được xây dựng gồm các khối cơ bản sau:

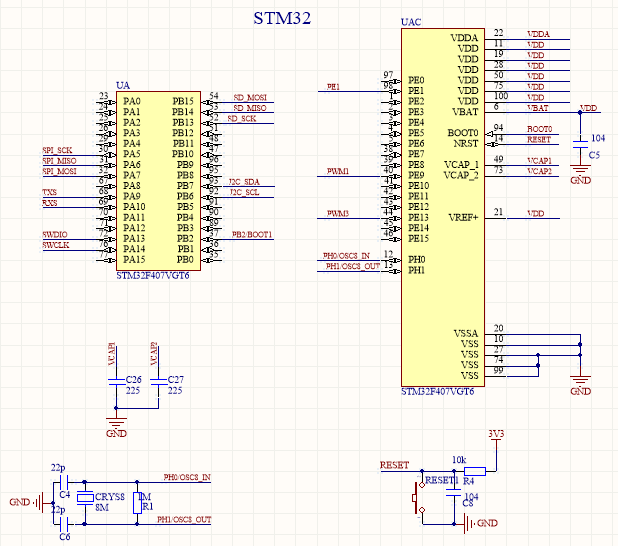
- Khối vi điều khiển STM32F407VET6;

- Khối ESP8266 để giao tiếp giữa vi điều khiển với máy tính qua giao thức TCP/IP;

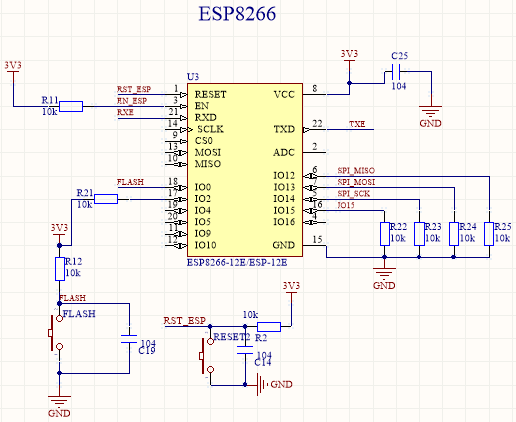
- Module MPU6050;

- Khối nguồn.

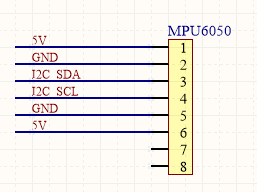
Ngoài ra còn có thêm một số thành phần bổ trợ khác.



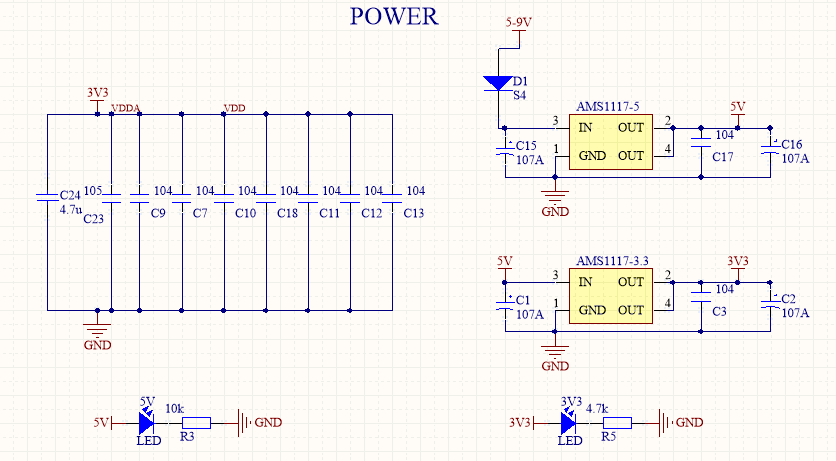
Hình 4.3 STM32F407VET6



Hình 4.4 ESP8266



Hình 4.5 Chân cắm cho module MPU6050



Hình 4.6 Khối nguồn

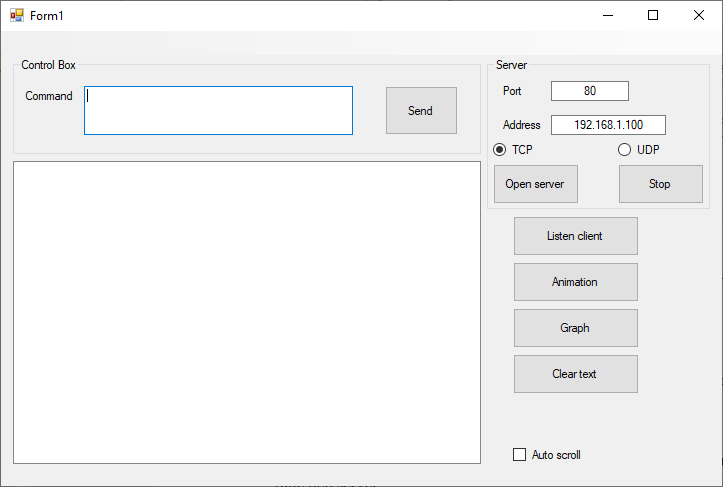


Hình 4.7 Hình ảnh sản phẩm sau khi hoàn thành

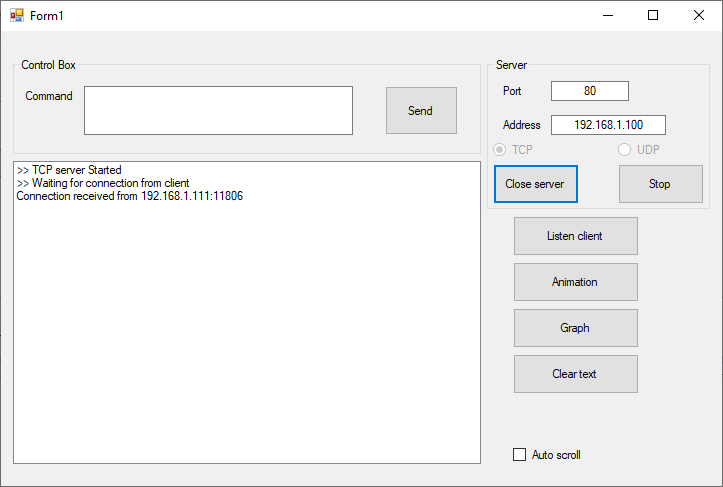
### . Các chức năng cơ bản của chương trình nhúng và phần mềm điều khiển trên máy tính

Giao diện phần mềm cơ bản như hình 4.7. Để sử dụng trước tiên máy tính cần phải kết nối với một Access Point (điểm truy cập), ví dụ như modem, router WIFI,… Lưu ý cả thiết bị và máy tính phải kết nối cùng một mạng. Sau đó ấn “Open server” trên phần mềm và đóng công tắc nguồn trên thiết bị. Đợi thiết bị kết nối thành công sẽ có thông báo như trên hình 4.8.

Sau khi đã kết nối, ấn nút “Listen client” để nhận dữ liệu từ thiết bị. Mặc định thiết bị sẽ chạy thuật toán dẫn đường quán tính dùng quaternion về gửi kết quả trạng thái không gian và tọa độ tính được.



Hình 4.8 Giao diện phần mềm điều khiển



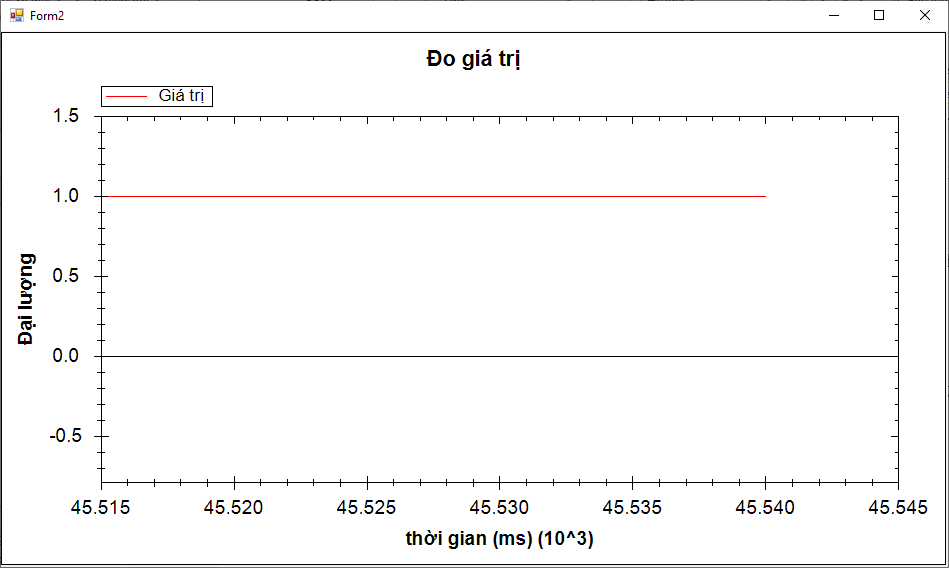
Hình 4.9 Thông báo kết nối thiết bị thành công

#### Gửi số liệu đo từ cảm biến MPU6050 đến server

Để kiểm tra hoạt động của cảm biến MPU6050, thiết bị sẽ được thiết đặt chức năng gửi dữ liệu thu được từ cảm biến đến server.

Sử dụng chức năng này bằng cách gõ lệnh “mi” hoặc “Mi” với i = 0…5 lần lượt tương ứng với abx, aby, abz, ⍵bx, ⍵by, ⍵bz. Sau đó ấn “Send” để gửi lệnh đến thiết bị.

Để quan sát kết quả thu về ấn “Graph”. Đồ thị thu về như hình 4.10.



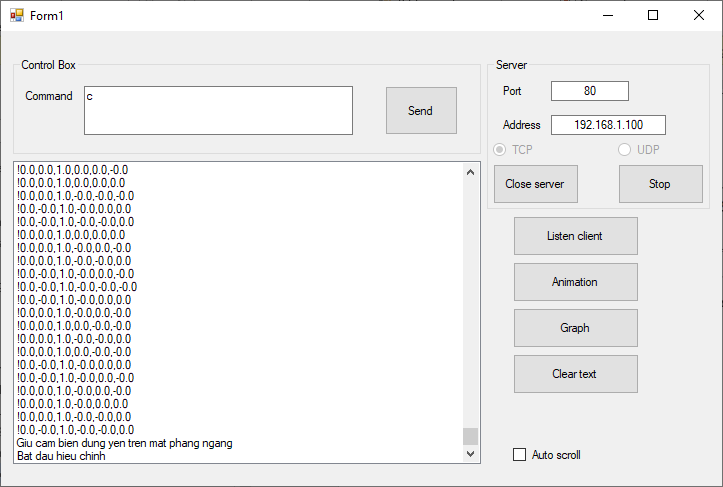
Hình 4.10 Đồ thị kết quả quan sát gia tốc trục Zb khi thiết bị đứng yên trên mặt phẳng ngang bằng 1g

#### Hiệu chỉnh tự động cảm biến MPU6050

Chức năng hiệu chỉnh thực hiện thông qua lệnh “c” hoặc “C” được truyền đến thiết bị.

Để kết quả được tốt nên chuẩn bị một mặt phẳng chuẩn vuông góc với vector trọng trường g. Sau khi gửi lệnh chỉnh thì thiết bị sẽ tiến hành đo 20000 mẫu giá trị và tính ra sai số trung bình của các giá trị đo được và lưu lại các giá trị sai số trung bình đó vào flash của STM32F407VET6. Kết quả đo được từ cảm biến MPU6050 sẽ được trừ cho lượng sai số trung bình đã tính được.

Thông báo vào chế độ hiệu chỉnh như hình 4.11.



Hình 4.11 Giao diện hiệu chỉnh thiết bị

#### Thực hiện thuật toán dẫn đường quán tính và truyền kết quả theo thời gian thực đến server

Đây là chức năng chính của thiết bị. Kết quả sẽ được biểu diễn dưới dạng đồ thị tọa độ trong mặt phẳng XY và dạng minh họa tư thế 3D của ngư lôi.

Chức năng này được thực hiện bằng lệnh “q” hoặc “Q” + mode, với mode là 0 – không dùng bộ lọc, 1 – dùng bộ lọc. Ấn “Send” để truyền lệnh.

Ấn “Graph” để xem đồ thị tọa độ hoặc các giá trị góc của thiết bị tính được. Các lệnh gồm “q” hoặc “Q” kết hợp với:

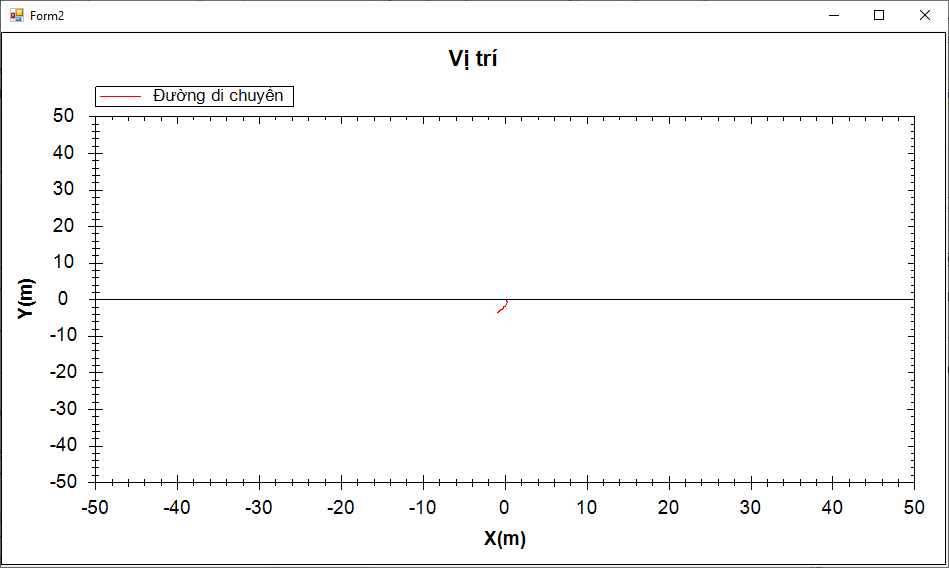
- không thêm ký tự nào: đồ thị tọa độ XY

- “p” hoặc “P” : góc nghiêng

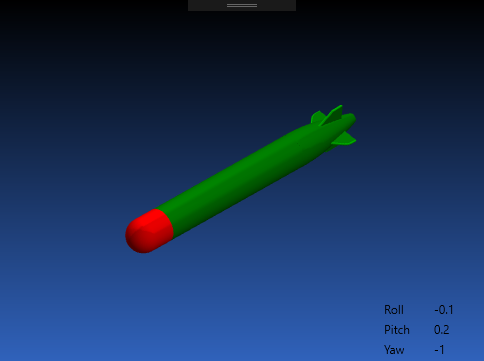
- “r” hoặc “R” : góc lắc

- “y” hoặc “Y”: góc hướng

Dưới đây là đồ thị 2D và 3D mô tả kết quả tính toán.



Hình 4.12 Đồ thị tọa độ XY



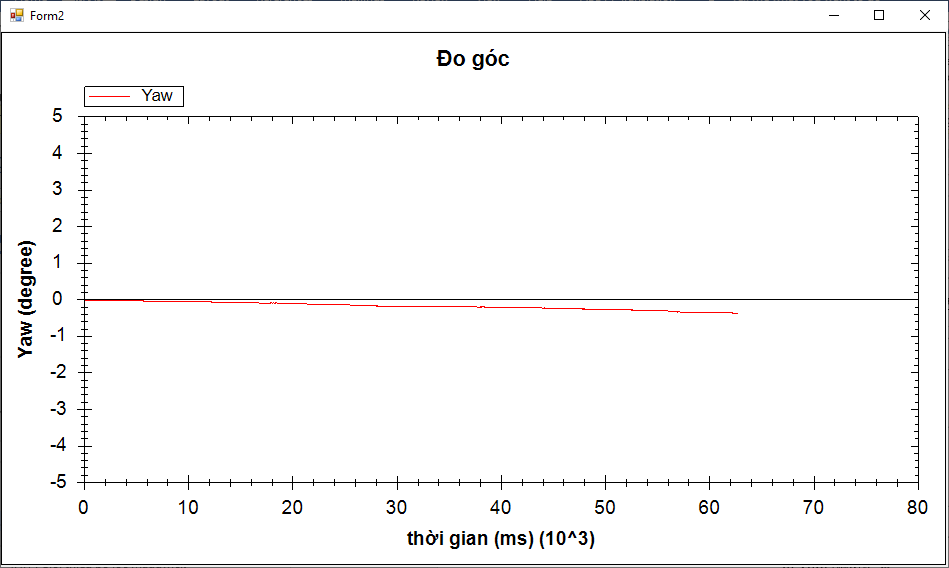
Hình 4.13 Đồ thị 3D

## . Thử nghiệm với mô hình đơn giản không áp dụng các bộ lọc nhiễu

Sử dụng lệnh “q0” để thiết bị thực hiện thuật toán dẫn đường quán tính, không áp dụng bộ lọc.

Đặt thiết bị đứng yên trên một mặt phẳng cố định và quan sát sự thay đổi của các góc Euler và vị trí đo được. Kết quả các góc như hình 4.13.

|  |  |
| --- | --- |
| a) Góc lắc γ | b) Góc nghiêng ϑ |

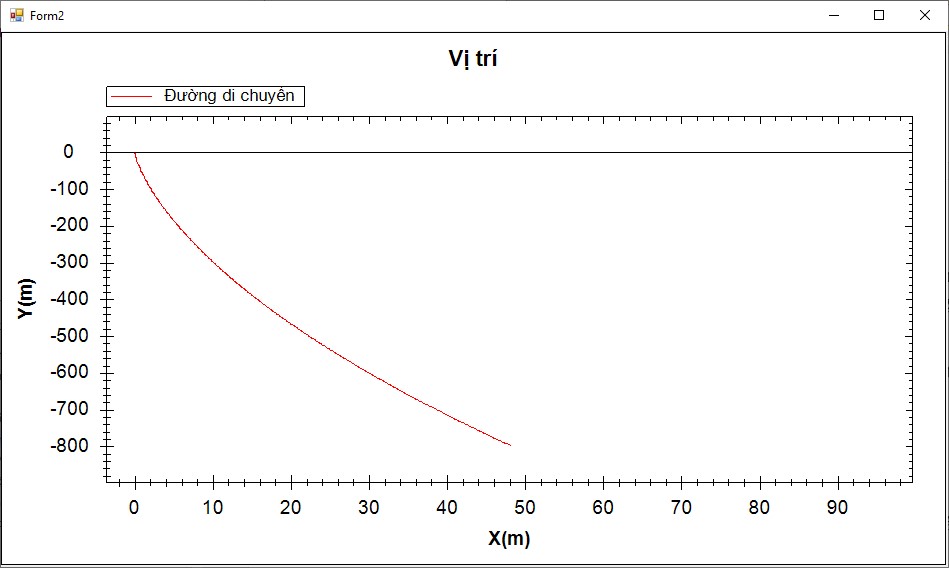


c) Góc hướng 𝜓

Hình 4.14 Các góc Euler (độ) bị trôi khi thiết bị đang đứng yên

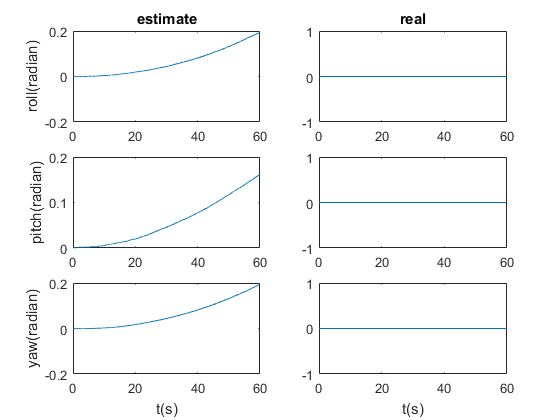
Có thể thấy rằng kết quả về góc có độ trôi nhất định. Quan sát thêm mô phỏng Matlab ở hình 4.16 khi cho thêm nhiễu với một độ trôi con quay nhỏ vào mô hình ở mục 3.2 trong trường hợp thiết bị đứng yên (Vnl = 0). Kết quả mô phỏng trong 60 s ta cũng có được độ trôi góc tương tự.

Kết quả vị trí tính toán trong mặt phẳng XY khi thiết bị đứng yên như hình 4.15.

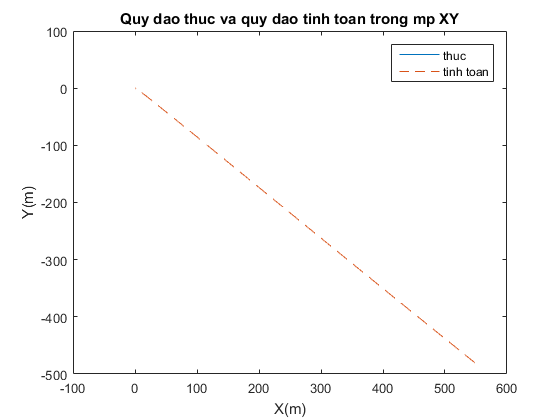


Hình 4.15 Vị trí tính toán bị trôi với tốc độ khá nhanh khi thiết bị đứng yên

Đối với kết quả tính toán vị trí trong mặt phẳng XY như trên hình 4.15, ta thấy tốc độ trôi vị trí khá nhanh. Tương tự mô phỏng trên matlab có kết quả như hình 4.17.

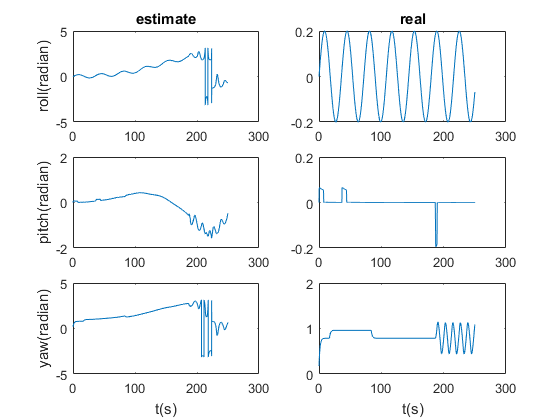


Hình 4.16 Mô phỏng các góc Euler với nhiễu và độ trôi con quay trên Matlab khi thiết bị đứng yên

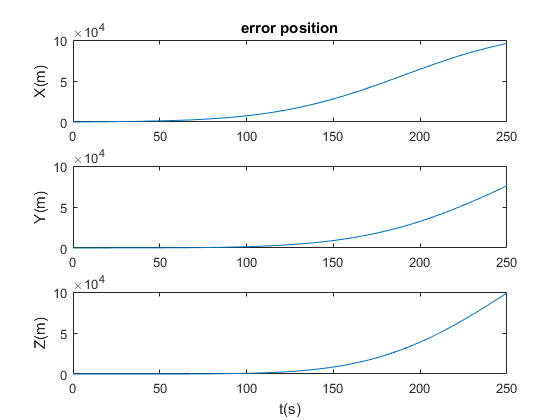


Hình 4.17 Mô phỏng vị trí trong mặt phẳng XY với nhiễu và độ trôi con quay trên Matlab khi thiết bị đứng yên

Mô phỏng Matlab đối với quỹ đạo ngư lôi như mô tả ở mục 3.2 khi cho thêm nhiễu với một độ trôi con quay nhỏ, các góc Euler thu được như hình 4.18 và sai số vị trí ở hình 4.19.



Hình 4.18 Các góc Euler với chuyển động mô phỏng của ngư lôi trong điều kiện có nhiễu



Hình 4.19 Sai số vị trí tính toán với chuyển động mô phỏng của ngư lôi trong điều kiện có nhiễu

## . Áp dụng bộ lọc Magdwick để lọc nhiễu cho con quay hồi chuyển

### . Giới thiệu bộ lọc Magdwick

Bộ lọc Magdwick do tiến sĩ Sebastian O.H. Madgwick đề xuất, là một bộ lọc hướng kết hợp sử dụng con quay và các bộ đo khác như bộ đo gia tốc, bộ đo từ trường trái đất,… để hiệu chỉnh kết quả đo góc. Đây là một phiên bản đơn giản hơn của bộ lọc Kalman mở rộng nhưng hiệu quả lại không kém hiệu quả, đặc biệt phù hợp để triển khai trên những nền tảng nhúng, ít tài nguyên như vi điều khiển vì khối lượng tính toán ít hơn so với bộ lọc Kalman mở rộng.

Thiết bị được xây dựng chỉ có 1 cảm biến 6 trục đo gồm 3 trục gia tốc và 3 trục tốc độ góc, do đó trong đồ án này sẽ đi xây dựng mô hình bộ lọc Madgwick cho con quay kết với bộ đo gia tốc.

Với một bộ đo gia tốc 3 trục sẽ đo được biên độ và hướng của trọng trường trong hệ tọa độ cảm biến cộng với gia tốc tuyến tính do chuyển động của bộ đo. Trong phần bộ lọc Magdwick này, ta giả sử rằng gia tốc chuyển động tuyến tính nhỏ so với gia tốc trọng trường, coi như ngư lôi chuyển động đều với vận tốc không đổi, và bộ đo gia tốc xem như chỉ đo gia tốc trọng trường.

Nếu biết hướng của một trường trái đất trong hệ tọa độ dẫn đường (XYZ), đồng thời đo được hướng của trường đó trong hệ tọa độ liên kết cảm biến (XbYbZb), ta cũng sẽ tính ra vector quay tương ứng của hệ tọa độ XbYbZb so với hệ tọa độ XYZ. Tuy nhiên, bất kỳ phép đo nào cũng sẽ không đưa ra một hướng cảm biến duy nhất, thay vào đó sẽ có vô số hướng khả thi đạt được bằng cách quay một hướng đúng bất kỳ xung quanh một trục song song với trường trái đất đang xét. Trong một số ứng dụng, có thể chấp nhận sử dụng biểu diễn góc Euler cho phép một nghiệm không đầy đủ dưới dạng hai góc Euler đã biết và một góc chưa biết; góc chưa biết là chuyển động quay quanh trục song song với hướng của trường chuẩn đã biết (trong trường hợp này là vector gia tốc trọng trường). Một quaternion thì lại yêu cầu một nghiệm hoàn chỉnh đủ 3 góc Euler. Điều này có thể đạt được thông qua việc xây dựng một bài toán tối ưu trong đó đi tìm hướng của cảm biến, sao cho sự sai lệch hướng tham chiếu của một trường xác định trước trong hệ tọa độ XYZ, dN, thông qua phép quay được mô tả bởi phương trình (3.7) so với hướng đo được của trường này trong hệ tọa độ XbYbZb, sb, là nhỏ nhất. Do đó có thể tìm thấy là nghiệm của bài toán tối ưu (4.1), trong đó phương trình (4.2) xác định hàm mục tiêu. Các thành phần của mỗi vectơ được xác định trong phương trình (4.3) đến (4.5).

|  |  |
| --- | --- |
| dN , sb) | ( . ) |
| dN , sb) = \* \* dN \* - sb | ( . ) |
| = [ q0 q1 q2 q3 ] | ( . ) |
| dN = [ 0 dx dy dz ] | ( . ) |
| sb = [ 0 sx sy sz ] | ( . ) |

Có nhiều thuật toán để giải bài toán tối ưu trên nhưng gradient descent là một trong những thuật toán đơn giản nhất cho cả triển khai và tính toán. Phương trình (4.6) mô tả thuật toán gradient descent cho n bước lặp để tính quaternion từ một quaternion ban đầu (0) với bước lặp μ. Biểu thức (4.7) tính gradient của mặt cong hàm mục tiêu được xác định bởi chính hàm mục tiêu và Jacobian J(,) của nó.

|  |  |
| --- | --- |
| (k+1) = (k) - μ , k = 0,1,…,n | ( . ) |
| ) = (,) | ( . ) |

Giả sử rằng gia tốc trọng trường theo phương thẳng đứng ( song song với trục Z của hệ tọa XYZ). Thay dN và sb trong (4.1) đến (4.7) lần lượt bởi gia tốc trọng trường trong hệ tọa độ XYZ - gN (4.8) và kết quả đo từ bộ đo gia tốc - ab (4.9), ta thu được một bài toán tối ưu tương đối đơn giản với hàm mục tiêu cho bởi (4.10) và Jacobian của nó cho bởi (4.11).

|  |  |
| --- | --- |
| gN = [ 0 0 0 1] | ( . ) |
| ab = [0 abx aby abz ] | ( . ) |
| = | ( . ) |
| () = | ( . ) |

Phương trình (4.12) tính hướng dự đoán (k) tại thời điểm k dựa trên ước lượng hướng trước đó (k-1) và gradient hàm mục tiêu được xác định bởi phép đo cảm biến ab được lấy mẫu tại thời điểm k. Ký hiệu chỉ ra rằng quaternion được tính bằng cách sử dụng gradient descent.

|  |  |
| --- | --- |
| (k) = (k-1) - μ | ( . ) |

Giá trị tối ưu của μ được xác định sao cho bảo đảm tốc độ hội tụ của được giới hạn ở tốc độ thay đổi hướng vật lý (tính theo biểu thức (3.12)) để tránh hiện tượng vọt lố do một bước tính lớn không cần thiết. Do đó µ có thể được tính như phương trình (4.13), trong đó ∆t là chu kỳ lấy mẫu và ,⍵ là tốc độ thay đổi hướng vật lý được đo bởi con quay hồi chuyển, còn α là một đối số của µ để tính nhiễu trong các phép đo gia tốc kế và từ kế.

|  |  |
| --- | --- |
| μ = α∆t , α > 1 | ( . ) |

Ước lượng hướng của cảm biến so với hệ tọa độ XYZ, ,est, thu được thông qua sự kết hợp của các phép tính vector quay, ,⍵ và tương ứng được tính theo các phương trình (3.13) và (4.12). Sự kết hợp của ,⍵ và ,▽ được mô tả bởi phương trình (4.13), trong đó ξ và (1 - ξ) là trọng số được áp dụng cho mỗi phép tính định hướng.

|  |  |
| --- | --- |
| ,est(k) = ξ,▽(k) + (1 - ξ),⍵(k), 0 ≤ ξ ≤ 1 | ( . ) |

Giá trị tối ưu của ξ có thể được xác định là giá trị đảm bảo sự phân kỳ trọng số của bằng sự hội tụ trọng số của ,▽. Điều này được thể hiện bằng phương trình (4.14), trong đó là tốc độ hội tụ của ,▽, còn β là tốc độ phân kỳ của ,⍵ - thể hiện độ lớn của đạo hàm quaternion ứng với sai số con quay hồi chuyển (do con quay có độ trôi). Phương trình (4.14) có thể được sắp xếp lại để xác định ξ như phương trình (4.15).

|  |  |
| --- | --- |
| (1 - ξ)β = ξ | ( . ) |
| ξ = | ( .6 ) |

Phương trình (4.14) và (4.16) đảm bảo sự kết hợp tối ưu của ,⍵ và ,▽ giả thiết rằng tốc độ hội tụ của là phụ thuộc vào α bằng hoặc lớn hơn . Do đó α không có cận trên. Nếu α được giả định là rất lớn thì µ được xác định bởi (4.13) cũng trở nên rất lớn và các phương trình của bộ lọc hướng sẽ được đơn giản hóa. Với µ rất lớn trong phương trình (4.12) thì trở nên không đáng kể và phương trình có thể được viết lại thành phương trình (4.17).

|  |  |
| --- | --- |
| (k) = - μ | ( . ) |

ξ trong biểu thức (4.16) cũng đơn giản hóa khi số hạng β ở mẫu số trở nên không đáng kể và biểu thức có thể được viết lại dưới dạng (4.18). Từ biểu thức (4.18) cũng có thể giả sử rằng ξ ≈ 0.

|  |  |
| --- | --- |
| ξ = | ( . ) |

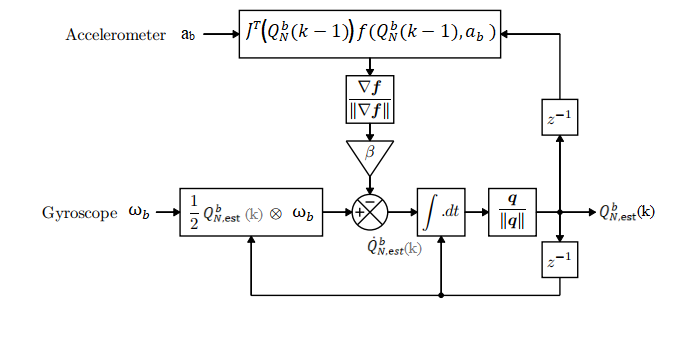
Thay (3.13). (4.17) và (4.18) vào (4.14) thu được phương trình (4.19). Cần chú ý rằng trong phương trình (4.19), ξ đầu tiên được thay bởi (4.18) và ξ thứ hai cho bằng 0.

|  |  |
| --- | --- |
| (k) = (- μ + (1 - 0) | ( . ) |

Phương trình (4.19) có thể được đơn giản hóa thành phương trình (4.20), trong đó là ước lượng tốc độ thay đổi hướng được xác định bởi phương trình (4.21) và là hướng của sai số của được xác định bởi phương trình (4.22).

|  |  |
| --- | --- |
| (k) = + (k). | ( . ) |
| (k) = - β(k) | ( . ) |
| (k) = | ( . ) |

Có thể thấy từ phương trình (4.20) đến (4.22) bộ lọc đã tính toán hướng bằng cách tích phân ước lượng . Bộ lọc tính toán như là tốc độ thay đổi hướng được đo bởi con quay hồi chuyển với độ lớn của sai số đo con quay hồi chuyển là β được loại bỏ theo hướng của sai số ước lượng, được tính toán từ phép đo gia tốc (4.22). Hình 4.20 là lưu đồ biểu diễn việc triển khai bộ lọc định hướng kết hợp bộ đo gia tốc cho IMU.



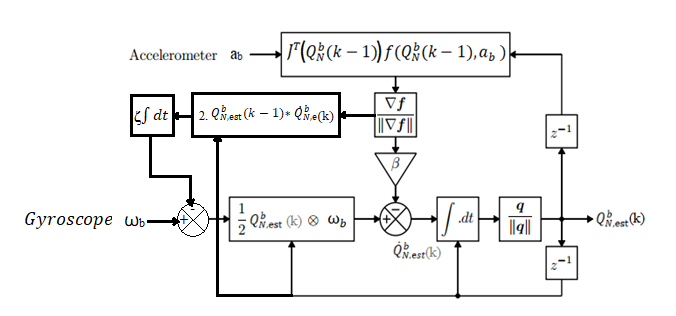
Hình 4.20 Thuật toán bộ lọc Magdwick kết hợp con quay và bộ đo gia tốc

Độ lệch 0 của con quay hồi chuyển sẽ trôi theo thời gian, theo nhiệt độ và theo chuyển động. Bất kỳ sự triển khai thực tế nào của cảm biến IMU phải tính đến điều này. Một lợi thế của các phương pháp tiếp cận dựa trên Kalman là chúng có thể ước tính độ trôi của con quay hồi chuyển như một trạng thái bổ sung trong mô hình trạng thái hệ thống. Tuy nhiên, tốc độ trôi con quay hồi chuyển cũng có thể được bù bằng các bộ lọc định hướng đơn giản hơn thông qua phản hồi tích phân của sai số tốc độ thay đổi hướng. Một cách tiếp cận như vậy sẽ được sử dụng ở trong đồ án này.

Hướng chuẩn hóa của sai số ước lượng tốc độ thay đổi hướng, , có thể được biểu thị bằng sai số góc trên mỗi trục con quay bằng cách sử dụng phương trình (4.23) - có được từ việc đảo lại mối quan hệ được xác định trong phương trình Pausson (3.12). Độ lệch con quay hồi chuyển, ⍵bias , biểu diễn bởi thành phần một chiều của ⍵e và do đó có thể bị loại bỏ dưới dạng tích phân của ⍵e có trọng số bằng một hệ số ζ thích hợp. Điều này sẽ giúp các phép đo con quay hồi chuyển được bù trôi, ⍵c , như thể hiện trong phương trình (4.24 và (4.25). Phần tử đầu tiên của ⍵c luôn được giả sử là 0.

|  |  |
| --- | --- |
| ⍵e(k) = 2.\*(k) | ( . ) |
| ⍵bias(k) = ζ. | ( . ) |
| ⍵c(k) = ⍵b(k) - ⍵bias(k) | ( . ) |

Các kết quả đo con quay hồi chuyển được bù, ⍵c , sau đó có thể được sử dụng thay cho các phép đo lấy trực tiếp từ các con quay, ⍵b , trong phương trình (3.12). Độ lớn sai số góc của mỗi trục, ⍵e , bằng đạo hàm quaternion có độ dài đơn vị, do đó, độ lợi tích phân ζ xác định trực tiếp tốc độ hội tụ của độ lệch con quay ước tính, ⍵bias , được biểu thị như độ lớn của một đạo hàm quaternion. Hình 3 mô tả sơ đồ khối của việc triển khai bộ lọc cho cảm biến IMU.



Hình 4.21 Lưu đồ thuật toán bộ lọc Magdwick kết hợp con quay và bộ đo gia tốc được bù độ trôi con quay

Độ lợi β đại diện cho tất cả các sai số đo với kỳ vọng bằng không của con quay hồi chuyển, được biểu thị bằng độ lớn của đạo hàm quaternion. Các nguồn sai số bao gồm: nhiễu cảm biến, tín hiệu răng cưa, lỗi định lượng, lỗi hiệu chuẩn, sai lệch cảm biến, trục cảm biến không trực giao và đặc tính đáp ứng tần số. Độ lợi ζ đại diện cho tốc độ hội tụ để loại bỏ các sai số đo con quay mà có kỳ vọng khác 0, cũng được biểu thị bằng độ lớn của đạo hàm quaternion. Những sai số này đại diện độ lệch con quay. Rất thuận tiện để xác định β và ζ bằng cách sử dụng các đại lượng góc tương ứng là ⍵β và ξ , trong đó ⍵β đại diện cho sai số đo con quay có kỳ vọng ước lượng bằng 0 của mỗi trục và ξ đại diện cho ước lượng tốc độ trôi của con quay trong mỗi trục. β có thể được xác định bởi phương trình (4.26) trong đó q là quaternion đơn vị bất kỳ. Tương tự, ζ có thể được mô tả bằng phương trình (4.27).

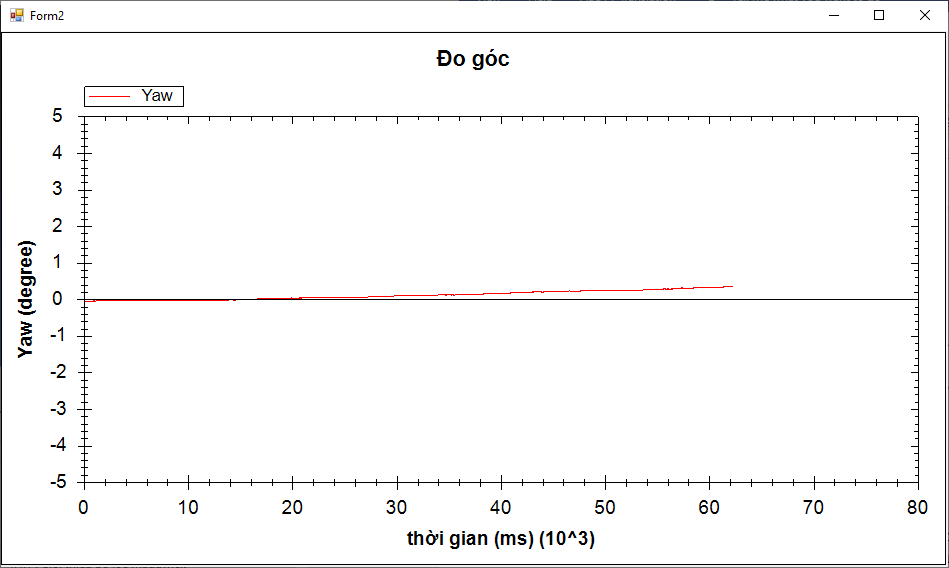
|  |  |
| --- | --- |
| = | ( . ) |
| ζ = | ( . ) |

### . Thử nghiệm thuật toán dẫn đường quán tính với bộ lọc Madgwick

Sử dụng lệnh “q1” để thiết bị thực hiện thuật toán dẫn đường quán tính, áp dụng bộ lọc hướng Madgwick.

Đặt thiết bị đứng yên trên một mặt phẳng cố định và quan sát sự thay đổi của các góc Euler và vị trí đo được. Kết quả quan sát các góc trong 60 s như hình 4.22.

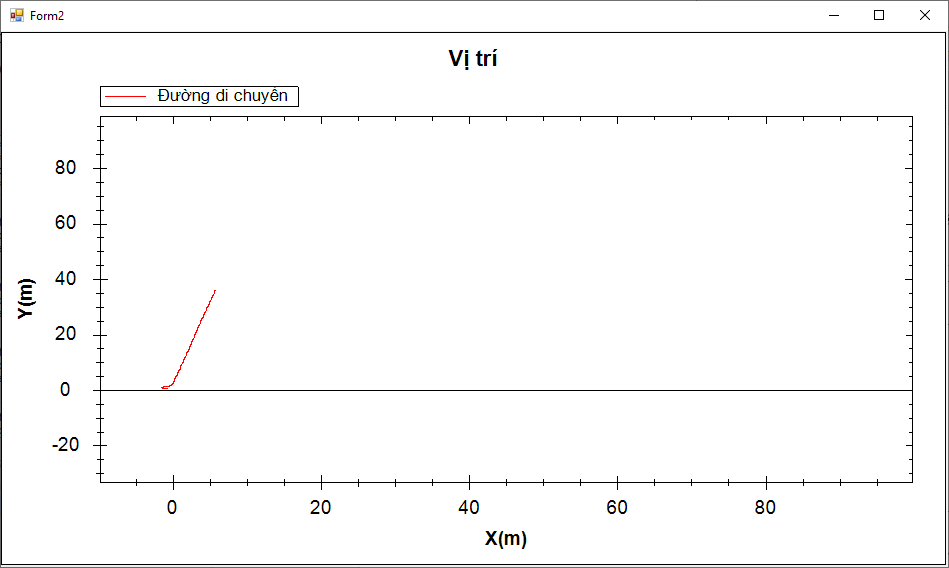
|  |  |
| --- | --- |
| a) Góc nghiêng ϑ | b) Góc lắc γ |



c) Góc hướng 𝜓

Hình 4.22 Các góc Euler khi thiết bị đang đứng áp dụng bộ lọc Magdwick

Kết quả quan sát vị trí tính toán trong mặt phẳng XY trong 60 s khi thiết bị đứng yên như hình 4.23.



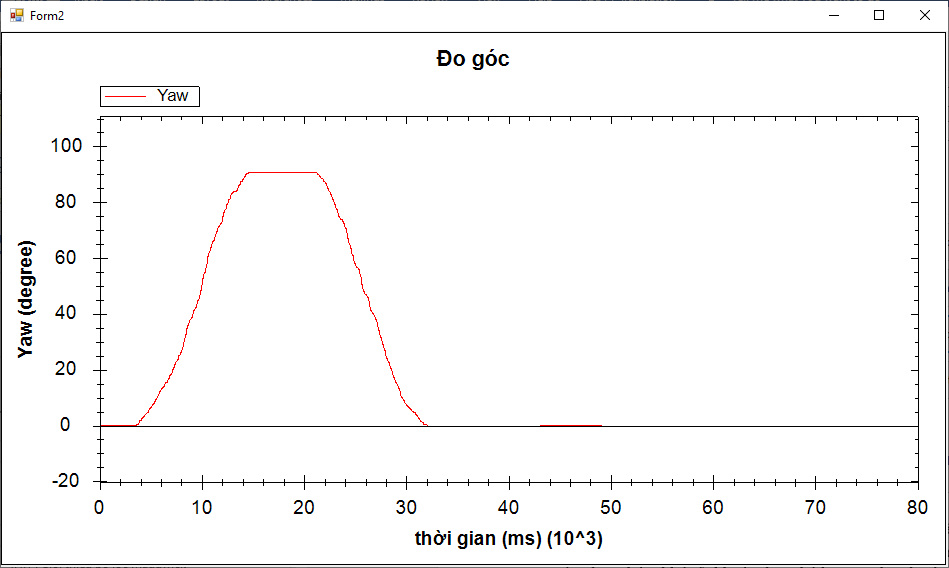
Hình 4.23 Vị trí tính toán bị trôi khi thiết bị đứng yên áp dụng bộ lọc Magdwick

Từ quan sát kết quả thử nghiệm có thể thấy độ trôi góc đã được khử khá tốt, tuy nhiên kết quả đánh giá vị trí dù độ trôi đã giảm nhưng vẫn bị trôi khá nhiều.

Trong hình 4.22 có một khoảng thời gian ban đầu khoảng 10 s góc nghiêng ϑ và góc lắc γ có sự dao động khá lớn là do thuật toán lọc cần thời gian để đạt đến trạng thái ổn định. Hệ số β trong phương trình (4.21) ban đầu được chọn khá lớn giúp thuật toán lọc nhanh chóng đi đến trạng thái ổn định, sau đó được giảm lại nhỏ lại để tránh dao động góc lớn. Hệ số ζ trong biểu thức (4.24) ban đầu được cho bằng 0 trong khoảng thời gian ban đầu để tránh việc đánh giá góc đang dao động khá lớn gây ra sai số bù độ trôi lớn, sau đó tăng lên để thực hiện bù khử độ trôi con quay khi bộ lọc đã vào trạng thái ổn định. Qua thử nghiệm, hệ số β được chọn bằng 0.033 và ζ chọn bằng 0.015 cho kết quả tốt nhất.

Tiếp tục quan sát các kết quả đo khi xoay thiết bị lần lượt theo các trục đo từ 00 đến 900 rồi về lại 00. Kết quả như hình 4.24, ta thấy rằng kết quả các góc Euler thu được khá tốt, sát với thực tế. Tuy nhiên như trên hình 4.22, ta thấy góc 𝜓 vẫn bị trôi một lượng nhỏ.

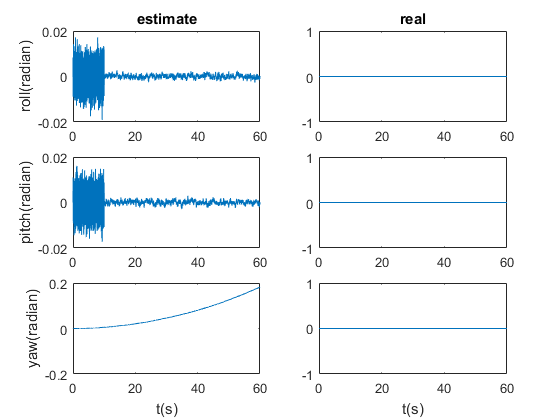
|  |  |
| --- | --- |
| a) Góc nghiêng ϑ | b) Góc lắc γ |



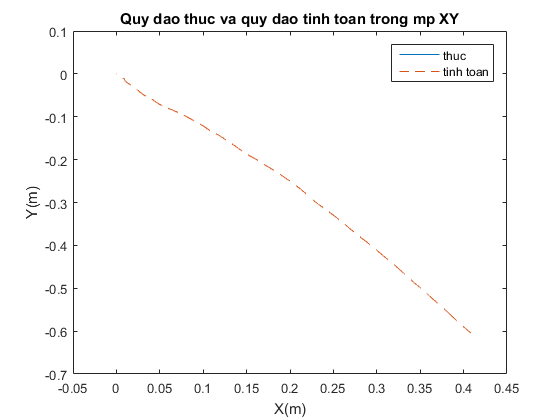
c) Góc hướng 𝜓

Hình 4.24 Các góc Euler khi xoay thiết bị 900 lần lượt theo các trục đo áp dụng bộ lọc Magdwick

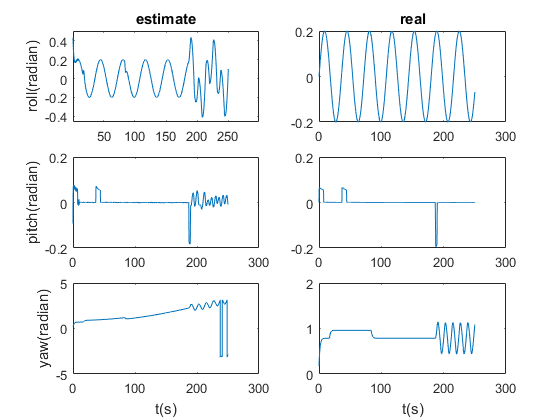
Mô phỏng thiết bị khi đứng yên trên Matlab kết quả như hình 4.23 và hình 4.24 (code triển khai cụ thể ở phụ lục 2). Góc nghiêng ϑ và góc lắc γ đều cho kết quả rất tốt, còn góc hướng 𝜓 vẫn bị trôi. Điều này là do bộ lọc hướng đã sử dụng gia tốc trọng trường làm vector tham chiếu để hiệu chỉnh, như vậy thực ra chỉ có độ trôi của góc nghiêng ϑ và góc lắc γ được bù chính xác, còn lượng bù độ trôi góc hướng 𝜓 thì hầu như không đáng kể. Quan sát các hình 4.27 và hình 4.29, mô phỏng trên Matlab với quỹ đạo chuyển động ngư lôi như mô tả ở mục 3.2, có thể thấy kết quả góc ϑ và γ được bám khá tốt khi áp dụng bộ lọc Magdwick, còn góc 𝜓 bị sai lệch nhiều.



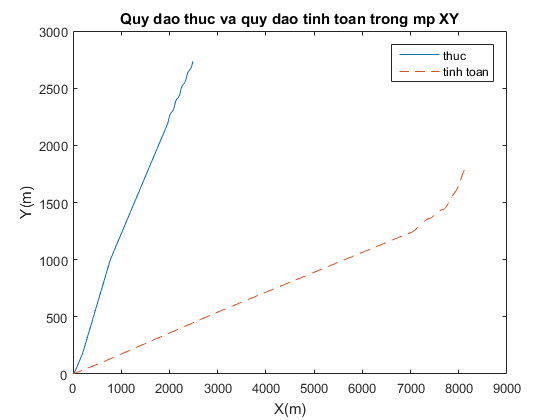
Hình 4.25 Các góc Euler áp dụng bộ lọc Madgwick mô phỏng trên Matlab khi thiết bị đứng yên



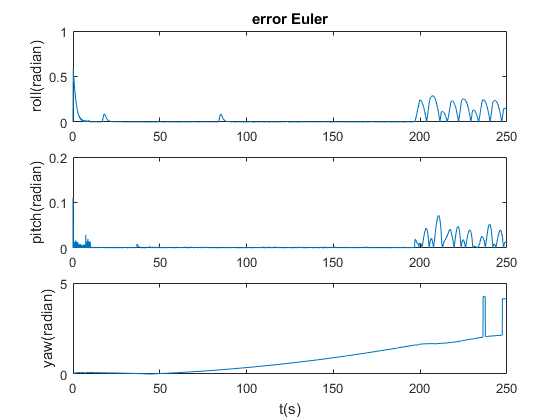
Hình 4.26 Vị trí tính toán áp dụng bộ lọc Madgwick mô phỏng trên Matlab khi thiết bị đứng yên



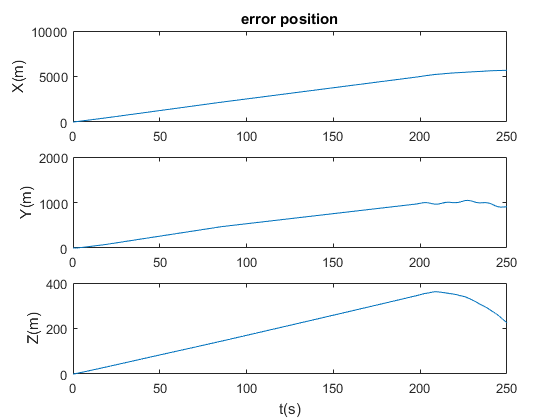
Hình 4.27 Các góc Euler khi áp dụng bộ lọc Madgwick với chuyển động mô phỏng của ngư lôi



Hình 4.28 Vị trí tính toán trong mặt phẳng XY khi áp dụng bộ lọc Madgwick với chuyển động mô phỏng của ngư lôi



Hình 4.29 Sai số đánh giá góc



Hình 4.30 Sai số đánh giá vị trí

So với kết quả thực tế trên hình 4.23 thì mô phỏng vị trí trên Matlab ở hình 4.26 có độ trôi khá nhỏ, nguyên nhân do nhiễu ngẫu nhiên trong thực tế khác với mô phỏng, đồng thời thời gian lấy mẫu trên mô phỏng cũng nhỏ hơn giúp tăng độ chính xác. Trên hình 4.28 và 4.30 thể hiện sai lệch vị trí tính toán khá lớn so với vị trí thật.

Bên cạnh đó, cũng do việc sử dụng gia tốc để làm tham chiếu hiệu chỉnh vector quay quaternion, kết quả là dẫn đến việc gia tốc đo được từ MPU6050 không còn khách quan để dùng cho việc đánh giá vị trí. Tuy nhiên, đây chỉ là một ví dụ về việc áp dụng bộ lọc Magdwick. Nếu như bộ lọc Magdwick được kết hợp với các bộ đo khá như bộ đo từ trường trái đất để hiệu chỉnh góc hướng 𝜓, bộ đo vận tốc riêng của ngư lôi để hiệu chỉnh vị trí,… thì kết quả nhận được sẽ tốt hơn rất nhiều.

**KẾT LUẬN CHƯƠNG 4**

Trong chương 4 đã thử nghiệm thuật toán dẫn đường quán tính trên một thiết bị tự thiết kế và giới thiệu phương pháp lọc nhiễu nhờ bộ lọc hướng kết hợp Magdwick. Ưu điểm nổi bật của bộ lọc này là có thể giảm đi khối lượng tính toán rất nhiều so với bộ lọc Kalman mà vẫn cho hiệu quả tốt.

Tuy kết quả nhận được còn nhiều thiếu sót, nhưng vẫn có thể cải thiện bằng cách kết hợp thêm nhiều bộ đo khác. Kết quả thử nghiệm, sẽ là cơ sở để có thể phát triển và hoàn thiện hơn thuật toán đánh giá chuyển động ngư lôi, từ đó có thể phát triển thành thiết bị sử dụng được cho nhiệm vụ kiểm tra, thử nghiệm hệ thống điều khiển chuyển động ngư lôi.

# **KẾT LUẬN**

Qua quá trình nghiên cứu, đồ án đã đưa ra một phương pháp giải quyết bài toán kiểm tra, đánh giá chất lượng hệ thống điều khiển ngư lôi. Đồ án tập trung vào tìm hiểu, nghiên cứu về thuật toán dẫn đường quá tính và đã sử dụng phương pháp vector quay quaternion đã áp dụng vào giải quyết bài toán mà đồ án đặt ra.

Với những khó khăn, hạn chế nhất định, nhưng quá trình thực hiện đồ án cũng đã đưa ra được một mô hình sản phẩm thử nghiệm phương án đã nêu ra. Tuy còn nhiều thiếu xót, nhưng trong điều kiện thời gian cho phép và khả năng của bản thân, người thực hiện cũng đã đưa ra những giải pháp nhất định để giải quyết những vấn đề thực tế gặp phải khi thực hiện hóa thuật toán dẫn đường quán tính dùng vector quay quaternion đã trình bày, trong đó có vấn đề về nhiễu và đồ án cũng đã giới thiệu một phương pháp hiệu quả cho việc lọc nhiễu đó là sử dụng bộ lọc hướng Magdwick. Từ những kết quả thu được, hoàn toàn có cơ sở để có thể phát triển, hoàn thiện hơn thiết bị kiểm tra, đánh giá chuyển động ngư lôi trong tương lai, giúp giải quyết hiệu quả hơn nhiệm vụ thử nghiệm, đánh giá chất lượng hệ thống điều khiển ngư lôi.

Đồ án vẫn còn nhiều điểm hạn chế cần phải giải quyết để đạt được kết quả mong muốn. Tuy nhiên hoàn toàn có thể cải thiện được bằng các giải pháp bổ sung như thêm các bộ đo khác để hiệu chỉnh kết quả đánh giá như bộ đo từ trường trái đất, bộ đo vận tốc riêng ngư lôi, bộ đo áp suất thủy tĩnh,… Bên cạnh đó có thể sử dụng những loại con quay và bộ đo gia tốc có độ chính xác cao hơn, tần số lấy mẫu lớn hơn, áp dụng thêm bộ lọc Kalman cho đánh giá vị trí khi có các bộ đo phù hợp.

Cuối cùng, tôi xin gửi lời cảm ơn sâu sắc đến Tiến sỹ, Trung tá Hoàng Mạnh Tưởng đã nhiệt tình giúp đỡ, hướng dẫn trong quá trình thực hiện nhiệm vụ đồ án của mình cũng như sự quan tâm, tạo điều kiện của các đồng chí giảng viên bộ môn Tên lửa.

# PHỤ LỤC 1

Mô phỏng thuật toán dẫn đường dùng quaternion không kết hợp bộ lọc

clear all;

% init

g = 9.8; %m/s2

% real

% gyroscope

wbx = 0; wby = 0; wbz = 0; %rad/s: roll - pitch - yaw

% ab, aN

abx = 0; aby = 0; abz = g; %m/s2

aNx = 0; aNy = 0; aNz = g; %m/s2

% Position

X(1) = 0; Y(1) = 0; Z(1) = 0;

% V0

Vx(1) = 0; Vy(1) = 0; Vz(1) = 0;

% Euler

r(1) = 0; p(1) = 0; y(1) = 0;

% measure

wmx = 0; wmy = 0; wmz = 0; %rad/s: roll - pitch - yaw

amx = 0; amy = 0; amz = 0; %m/s2

bwx = 0; bwy = 0; bwz = 0; %rad/s

% estimate

aex = 0; aey = 0; aez = 0; %m/s2

eX(1) = 0; eY(1) = 0; eZ(1) = 0;

Vex(1) = 0; Vey(1) = 0; Vez(1) = 0;

ep(1) = 0; er(1) = 0; ey(1) = 0;

% simulate motion

T = 0.001;

prompt = 'simulating motion of torpedo';

input(prompt);

prompt = 'simulation time '; % s

t\_max = input(prompt);

t = 0:T:t\_max;

prompt = 'goc dan phong (do) ? ';

y(1) = input(prompt)\*pi/180;

ey(1) = y(1);

prompt = 'goc phong ban dau (do) ? '; % +-170 do

omega = input(prompt)\*pi/180;

prompt = 'goc tach dan (do) ? '; % +-170 do

alpha = input(prompt)\*pi/180;

prompt = 'cu ly tach dan (m) ? '; % MAX = 14500

Dc = input(prompt);

prompt = 'van toc NL (M/h) ? '; % 29 M/h

Vnl = input(prompt)\*1852/3600;

e = 250; %m - cu ly truoc khi quay goc alpha

gdd = 0; % giai doan 0 dieu khien trong mp dung

gdn = 0; % giai doan 0 dieu khien trong mp ngang

quangduong = 0;

deltaY\_ = 0;

Iy = 0;

Kpy = 10; Kdy = 0.5; Kiy = 0.001;

deltaP\_ = 0;

Ip = 0;

Kpp = 500; Kdp = 15; Kip = 0.001;

deltaS\_ = 0;

Is = 0;

Kps = 1; Kds = 0.1; Kis = 0.001;

chieuLuonVong = 1;

tocDoQuat = 10\*pi/180; % rad/s

t\_temp = 0;

if Vnl ~= 0

for i = 2:length(t)

if gdn == 0 % quay huong omega lan 1

dosauDat = -7; % m

gocNghieng = 3\*pi/180;

gocHuong = omega;

if quangduong >= e % lenh Dc

t\_temp = t(i);

gdn = 1;

gdd = 1;

quangduong = 0;

end

end

if gdn == 1 % doan thuc hien tach dan

gocHuong = omega + alpha; % quay huong alpha

if quangduong >= Dc

gocHuong = omega; % quay huong omega lan 2

gdn = -1;

end

end

if gdd == 1

if t(i) - t\_temp > 20 % tu dan lam viec

t\_temp = t(i);

dosauDat = -14;

gocNghieng = 3\*pi/180;

gdd = 2;

end

end

if gdd == 2

if t(i) - t\_temp > 150 % tu dan bat duoc muc tieu

dosauDat = -7;

gocNghieng = -10.5\*pi/180;

gdn = 2;

end

end

if gdn == 2 % bam muc tieu theo duong ran luon

gocHuong = gocHuong + chieuLuonVong\*tocDoQuat\*T;

if gocHuong > omega + 30\*pi/180

chieuLuonVong = -1;

end

if gocHuong < omega - 30\*pi/180

chieuLuonVong = 1;

end

end

if abs(Z(i-1) - dosauDat) < 0.5

gocNghieng = 0;

end

deltaY = gocHuong - y(i-1);

deltaP = gocNghieng - p(i-1);

deltaS = dosauDat - Z(i-1);

d\_deltaY = (deltaY - deltaY\_)/T;

d\_deltaP = (deltaP - deltaP\_)/T;

d\_deltaS = (deltaS - deltaS\_)/T;

deltaY\_ = deltaY;

deltaP\_ = deltaP;

deltaS\_ = deltaS;

Iy = Iy + Kiy\*deltaY\*T;

Ip = Ip + Kip\*deltaP\*T;

Is = Is + Kis\*deltaS\*T;

quataiY = Kpy\*deltaY + Kdy\*d\_deltaY + Iy;

quataiP = Kpp\*deltaP + Kdp\*d\_deltaP + Ip - (Kps\*deltaS + Kds\*d\_deltaS + Is);

if quataiY > 10

quataiY = 10;

elseif quataiY < -10

quataiY = -10;

end

if quataiP > 10

quataiP = 10;

elseif quataiP < -10

quataiP = -10;

end

p(i) = p(i-1) + (quataiP/Vnl)\*T;

y(i) = y(i-1) + (quataiY/Vnl)\*T;

r(i) = 0.2\*sin(10\*pi\*t(i)/180);

X(i) = X(i-1) + Vnl\*cos(y(i))\*cos(p(i))\*T;

Y(i) = Y(i-1) + Vnl\*sin(y(i))\*cos(p(i))\*T;

Z(i) = Z(i-1) - Vnl\*sin(p(i))\*T;

quangduong = quangduong + Vnl\*T;

end

else

X = 0\*t; Y = 0\*t; Z = 0\*t;

r = 0\*t; p = 0\*t; y = 0\*t;

end

% Init quaternion

cy = cos(y(1) \* 0.5);

sy = sin(y(1) \* 0.5);

cp = cos(p(1) \* 0.5);

sp = sin(p(1) \* 0.5);

cr = cos(r(1) \* 0.5);

sr = sin(r(1) \* 0.5);

qw = cr \* cp \* cy + sr \* sp \* sy;

qx = sr \* cp \* cy - cr \* sp \* sy;

qy = cr \* sp \* cy + sr \* cp \* sy;

qz = cr \* cp \* sy - sr \* sp \* cy;

% Algorith

% kalman coefficients

Dw = 1000\*ones(3,1); Da = 1000\*ones(3,1);

Qs = 0.13; Rs = 1;

wKx = 0; wKy = 0; wKz = 0;

aKx = 0; aKy = 0; aKz = 0;

prompt = 'noise coefficient? ';

c = input(prompt);

prompt = 'simple kalman: 1 / no kalman: 0 ';

f = input(prompt);

for i = 2:length(t)

% simulate sensor measure

% accelerometer

Vx(i) = (X(i) - X(i-1))/T;

Vy(i) = (Y(i) - Y(i-1))/T;

Vz(i) = (Z(i) - Z(i-1))/T;

aNx = (Vx(i) - Vx(i-1))/T;

aNy = (Vy(i) - Vy(i-1))/T;

aNz = (Vz(i) - Vz(i-1))/T + g;

a1x = aNx\*cos(y(i)) + aNy\*sin(y(i));

a1y = -aNx\*sin(y(i)) + aNy\*cos(y(i));

a1z = aNz;

a2x = a1x\*cos(p(i)) - a1z\*sin(p(i));

a2y = a1y;

a2z = a1x\*sin(p(i)) + a1z\*cos(p(i));

abx = a2x;

aby = a2y\*cos(r(i)) + a2z\*sin(r(i));

abz = -a2y\*sin(r(i)) + a2z\*cos(r(i));

% gyroscope

dp = p(i) - p(i-1);

dy = y(i) - y(i-1);

dr = r(i) - r(i-1);

wbx = (-dy\*sin(p(i)) + dr)/T ;

wby = (dy\*cos(p(i))\*sin(r(i)) + dp\*cos(r(i)))/T;

wbz = (dy\*cos(p(i))\*cos(r(i)) - dp\*sin(r(i)))/T;

% measure

wdf = 0.0001; %rad/s2 - gyro bias drift

bwx = bwx + wdf\*T;

bwy = bwy + wdf\*T;

bwz = bwz + wdf\*T;

wmx = wbx + c\*random('norm',0,0.01) + c\*bwx;

wmy = wby + c\*random('norm',0,0.01) + c\*bwy;

wmz = wbz + c\*random('norm',0,0.01) + c\*bwz;

amx = abx + c\*random('norm',0,0.1);

amy = aby + c\*random('norm',0,0.1);

amz = abz + c\*random('norm',0,0.1);

% Simple kalman filter

if f == 1

[wKx, Dw(1)] = simple\_kalman(wKx, Dw(1), wmx, Qs, Rs);

[wKy, Dw(2)] = simple\_kalman(wKy, Dw(2), wmy, Qs, Rs);

[wKz, Dw(3)] = simple\_kalman(wKz, Dw(3), wmz, Qs, Rs);

[aKx, Da(1)] = simple\_kalman(aKx, Da(1), amx, Qs, Rs);

[aKy, Da(2)] = simple\_kalman(aKy, Da(2), amy, Qs, Rs);

[aKz, Da(3)] = simple\_kalman(aKz, Da(3), amz, Qs, Rs);

wmx = wKx;

wmy = wKy;

wmz = wKz;

amx = aKx;

amy = aKy;

amz = aKz;

end

% Update Qb

q1w = 1; q1x = wmx\*T/2; q1y = wmy\*T/2; q1z = wmz\*T/2;

[qw,qx,qy,qz] = Mulquat(qw,qx,qy,qz,q1w,q1x,q1y,q1z);

% normalize

q0 = sqrt(qw^2 + qx^2 + qy^2 + qz^2);

qw = qw/q0; qx = qx/q0; qy = qy/q0; qz = qz/q0;

% Qb to Euler

% estimate Euler

% roll (x-axis rotation)

sinr\_cosp = 2 \* (qw \* qx + qy \* qz);

cosr\_cosp = 1 - 2 \* (qx \* qx + qy \* qy);

er(i) = atan2(sinr\_cosp, cosr\_cosp);

% pitch (y-axis rotation)

sinp = 2 \* (qw \* qy - qz \* qx);

if abs(sinp) >= 1

ep(i) = sign(sinp)\*pi/2; % use 90 degrees if out of range

else

ep(i) = asin(sinp);

end

% yaw (z-axis rotation)

siny\_cosp = 2 \* (qw \* qz + qx \* qy);

cosy\_cosp = 1 - 2 \* (qy \* qy + qz \* qz);

ey(i) = atan2(siny\_cosp, cosy\_cosp);

% estimate V

[wt,xt,yt,zt] = Mulquat(qw,qx,qy,qz,0,amx,amy,amz);

[wN,aex,aey,aez] = Mulquat(wt,xt,yt,zt,qw,-qx,-qy,-qz);

Vex(i) = Vex(i-1) + aex\*T;

Vey(i) = Vey(i-1) + aey\*T;

Vez(i) = Vez(i-1) + (aez-g)\*T;

% estimate position

eX(i) = eX(i-1) + Vex(i)\*T;

eY(i) = eY(i-1) + Vey(i)\*T;

eZ(i) = eZ(i-1) + Vez(i)\*T;

end

figure;

subplot(3,2,1)

plot(t,er);

ylabel('roll(radian)');

title('estimate');

subplot(3,2,2)

plot(t,r);

title('real');

subplot(3,2,3)

plot(t,ep);

ylabel('pitch(radian)')

subplot(3,2,4)

plot(t,p);

subplot(3,2,5)

plot(t,ey);

ylabel('yaw(radian)')

xlabel('t(s)')

subplot(3,2,6)

plot(t,y);

xlabel('t(s)')

figure;

plot(X,Y,'-',eX,eY,'--');

xlabel('X(m)');

ylabel('Y(m)');

legend('thuc','tinh toan');

title('Quy dao thuc va quy dao tinh toan trong mp XY');

figure;

plot(X,Z,'-',X,eZ,'--');

xlabel('X(m)');

ylabel('Z(m)');

legend('thuc','tinh toan');

title('Quy dao thuc va quy dao tinh toan trong mp XZ');

% sai lech

deltaX = abs(X - eX);

deltaY = abs(Y - eY);

deltaZ = abs(Z - eZ);

deltap = abs(p - ep);

deltar = abs(r - er);

deltay = abs(y - ey);

figure;

subplot(3,1,1)

plot(t,deltar);

ylabel('roll(radian)');

title('error Euler');

subplot(3,1,2)

plot(t,deltap);

ylabel('pitch(radian)')

subplot(3,1,3)

plot(t,deltay);

ylabel('yaw(radian)')

xlabel('t(s)')

figure;

subplot(3,1,1)

plot(t,deltaX);

ylabel('X(m)');

title('error position');

subplot(3,1,2)

plot(t,deltaY);

ylabel('Y(m)')

subplot(3,1,3)

plot(t,deltaZ);

ylabel('Z(m)')

xlabel('t(s)')

# PHỤ LỤC 2

Mô phỏng thuật toán dẫn đường dùng quaternion kết hợp bộ lọc Magdwick

% Madgwick

beta = 2.5;

zeta = 0;

qest(1) = qw; qest(2) = qx;

qest(3) = qy; qest(4) = qz;

swe = zeros(1,4);

for i=2:length(t)

if t(i) > 10

beta = 0.033;

zeta = 0.015;

end

% simulate sensor measure

% accelerometer

Vx(i) = (X(i) - X(i-1))/T;

Vy(i) = (Y(i) - Y(i-1))/T;

Vz(i) = (Z(i) - Z(i-1))/T;

aNx = (Vx(i) - Vx(i-1))/T;

aNy = (Vy(i) - Vy(i-1))/T;

aNz = (Vz(i) - Vz(i-1))/T + g;

a1x = aNx\*cos(y(i)) + aNy\*sin(y(i));

a1y = -aNx\*sin(y(i)) + aNy\*cos(y(i));

a1z = aNz;

a2x = a1x\*cos(p(i)) - a1z\*sin(p(i));

a2y = a1y;

a2z = a1x\*sin(p(i)) + a1z\*cos(p(i));

abx = a2x;

aby = a2y\*cos(r(i)) + a2z\*sin(r(i));

abz = -a2y\*sin(r(i)) + a2z\*cos(r(i));

% gyroscope

dp = p(i) - p(i-1);

dy = y(i) - y(i-1);

dr = r(i) - r(i-1);

wbx = (-dy\*sin(p(i)) + dr)/T ;

wby = (dy\*cos(p(i))\*sin(r(i)) + dp\*cos(r(i)))/T;

wbz = (dy\*cos(p(i))\*cos(r(i)) - dp\*sin(r(i)))/T;

% measure

wdf = 0.0001; %rad/s2 - gyro bias drift

bwx = bwx + wdf\*T;

bwy = bwy + wdf\*T;

bwz = bwz + wdf\*T;

wmx = wbx + c\*random('norm',0,0.01) + c\*bwx;

wmy = wby + c\*random('norm',0,0.01) + c\*bwy;

wmz = wbz + c\*random('norm',0,0.01) + c\*bwz;

amx(i) = abx + c\*random('norm',0,0.1);

amy(i) = aby + c\*random('norm',0,0.1);

amz(i) = abz + c\*random('norm',0,0.1);

% Simple kalman filter

if f == 1

[wKx, Dw(1)] = simple\_kalman(wKx, Dw(1), wmx, Qs, Rs);

[wKy, Dw(2)] = simple\_kalman(wKy, Dw(2), wmy, Qs, Rs);

[wKz, Dw(3)] = simple\_kalman(wKz, Dw(3), wmz, Qs, Rs);

[aKx, Da(1)] = simple\_kalman(aKx, Da(1), amx(i), Qs, Rs);

[aKy, Da(2)] = simple\_kalman(aKy, Da(2), amy(i), Qs, Rs);

[aKz, Da(3)] = simple\_kalman(aKz, Da(3), amz(i), Qs, Rs);

wmx = wKx;

wmy = wKy;

wmz = wKz;

amx(i) = aKx;

amy(i) = aKy;

amz(i) = aKz;

end

% Madgwick

% qdotError

a(1) = amx(i); a(2) = amy(i); a(3) = amz(i);

a = a/norm(a);

F = ErrF(qest,a);

J = JacobianF(qest);

qdote = (J.')\*F;

qdote = qdote/norm(qdote);

% Gyro bias drift

[swerr(1),swerr(2),swerr(3),swerr(4)] = Mulquat(qest(1),-qest(2),-qest(3),-qest(4),qdote(1),qdote(2),qdote(3),qdote(4));

swerr = 2\*swerr;

% qdotGyro

swe = swe + zeta\*swerr\*T;

qww = - swe(1); qwx = wmx - swe(2);

qwy = wmy - swe(3); qwz = wmz - swe(4);

[qdotw(1),qdotw(2),qdotw(3),qdotw(4)] = Mulquat(qest(1),qest(2),qest(3),qest(4),qww,qwx,qwy,qwz);

qdotw = qdotw/2;

% qdotEstimate

qdotest = qdotw - beta\*qdote.';

% qEstimate

qest = qest + qdotest\*T;

qest = qest/norm(qest);

% Qb to Euler

qw = qest(1); qx = qest(2);

qy = qest(3); qz = qest(4);

% estimate Euler

% roll (x-axis rotation)

sinr\_cosp = 2 \* (qw \* qx + qy \* qz);

cosr\_cosp = 1 - 2 \* (qx \* qx + qy \* qy);

er(i) = atan2(sinr\_cosp, cosr\_cosp);

% pitch (y-axis rotation)

sinp = 2 \* (qw \* qy - qz \* qx);

if abs(sinp) >= 1

ep(i) = sign(sinp)\*pi/2; % use 90 degrees if out of range

else

ep(i) = asin(sinp);

end

% yaw (z-axis rotation)

siny\_cosp = 2 \* (qw \* qz + qx \* qy);

cosy\_cosp = 1 - 2 \* (qy \* qy + qz \* qz);

ey(i) = atan2(siny\_cosp, cosy\_cosp);

% estimate V

[wt,xt,yt,zt] = Mulquat(qw,qx,qy,qz,0,amx(i),amy(i),amz(i));

[wN,aex(i),aey(i),aez(i)] = Mulquat(wt,xt,yt,zt,qw,-qx,-qy,-qz);

Vex(i) = Vex(i-1) + aex(i)\*T;

Vey(i) = Vey(i-1) + aey(i)\*T;

Vez(i) = Vez(i-1) + (aez(i)-g)\*T;

% estimate position

eX(i) = eX(i-1) + Vex(i)\*T;

eY(i) = eY(i-1) + Vey(i)\*T;

eZ(i) = eZ(i-1) + Vez(i)\*T;

end

# TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Giáo trình Cấu tạo ngư lôi - HVHQ

2. Hệ thống điều khiển ngư lôi - Tập 1, Tập 2- Đại tá, Ths Nguyễn Xuân Phú

3. Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions – Oleg S.Salychev, 2004

4. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays -Sebastian O.H. Madgwick, April 30, 2010