

TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT

BÁO CÁO TỔNG KẾT

ĐỀ TÀI NCKH SINH VIÊN

**Nghiên cứu và ứng dụng hệ thống dẫn đường tích hợp
INS/GNSS trong Trắc địa-Bản đồ**

Hà Nội, 5/2022

TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT

**BÁO CÁO TỔNG KẾT
ĐỀ TÀI NCKH SINH VIÊN**

**Nghiên cứu và ứng dụng hệ thống dẫn đường tích hợp
INS/GNSS trong Trắc địa-Bản đồ**

- Trưởng nhóm nghiên cứu: Nguyễn Xuân Tú, DCTD65

- Thành viên tham gia thực hiện:

Vũ Hiệp, DCTD65

Bùi Đăng Nam, DCTD65

Người hướng dẫn: TS. Dương Thành Trung

Hà Nội, 5/2022

MỤC LỤC

MỞ ĐẦU	5
Chương 1: TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG ĐỊNH VỊ - DẪN ĐƯỜNG TÍCH HỢP INS/GNSS	7
1.1. Tổng quan tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước về các hệ thống định vị - dẫn đường tích hợp INS/GNSS.....	7
1.2. Tổng quan về hệ thống dẫn đường toàn cầu GNSS	8
1.3. Hệ thống định vị quán tính.....	9
Chương 2: CÔNG NGHỆ TÍCH HỢP INS/GNSS	13
1.1. Các phương thức giao tiếp cơ bản trong hệ tích hợp	13
1.2. Cấu trúc dữ liệu trong IMU.....	14
1.3. Đọc dữ liệu từ IMU.....	14
1.4. Cấu trúc dữ liệu của máy thu GNSS	15
1.5. Phương pháp đồng bộ hóa dữ liệu INS và GNSS	16
Chương 3: CÁC PHÉP ƯỚC LƯỢNG TỐI ƯU	18
1.1. Tổng quan về phép ước lượng.....	18
1.2. Phép lọc Kalman	18
1.3. Mô hình toán học của hệ thống tích hợp INS/GNSS cho phép lọc Kalman mở rộng.....	19
1.4. Phép ước lượng phi tuyến, phi chuẩn Gauss (Ước lượng tập mẫu).....	20
1.5. Thực nghiệm mô phỏng đối với các phương pháp ước lượng.....	22
1.6. Phương pháp ước lượng trơn Rauch-Tung-Striebel.....	24
1.7. Thực nghiệm các phương pháp ước lượng	24
CHƯƠNG 4: CÁC ĐIỀU KIỆN RÀNG BUỘC GIẢI TÍCH TRONG HỆ TÍCH HỢP INS/GNSS	28
1.1. Điều kiện ràng buộc “Vận tốc không” đối với các hướng vuông góc với hướng di chuyển (Non - holonomic Constrain - NHC).....	28

1.2. Cập nhật phương vị hệ thống từ hướng chuyển động của máy thu GNSS	29
1.3. Điều kiện ràng buộc “Vận tốc không” và "hướng không đổi" khi dừng (ZUPT và ZIHR)	30
1.4. Thực nghiệm các điều kiện ràng buộc giải tích	32
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....	35
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	36

MỞ ĐẦU

Hệ thống định vị - dẫn đường tích hợp giữa hệ thống dẫn đường vệ tinh (GNSS) và dẫn đường quán tính (INS) ngày nay được sử dụng rộng rãi cho các ứng dụng định-vị dẫn đường và hệ thống thành lập bản đồ di động (Mobile Mapping System (MMS)) nhằm xác định một cách liên tục các tham số về vị trí và phương hướng của hệ thống mang. Hệ thống GNSS được sử dụng rộng rãi để xác định vị trí và vận tốc của các hệ thống có gắn máy thu GNSS ở mọi thời điểm và mọi nơi trên trái đất với độ chính xác ổn định (cỡ mét với định vị tuyệt đối và cỡ cm-dm với định vị tương đối). Tuy vậy, hệ thống GNSS phải luôn đảm bảo thông hướng đến ít nhất 4 vệ tinh để cho ra lời giải, vì vậy GNSS bị hạn chế trong những điều kiện tín hiệu GNSS bị khuất hoặc nhiễu như trong môi trường đô thị với nhiều nhà cao tầng hoặc trong đường hầm, rừng rậm. Ở mặt khác, INS có thể tự nó cung cấp các thông tin về vị trí, vận tốc và phương hướng ở tần số cao (50-200Hz so với tối đa 1Hz đối với GNSS) mà không phụ thuộc và tín hiệu từ các thiết bị khác. Tuy vậy, INS thường chịu ảnh hưởng của nhiễu nguồn sai số hệ thống và nhiễu, do vậy sai số định vị-dẫn đường của INS tích lũy và tăng rất nhanh theo thời gian. Để tận dụng những ưu điểm và hạn chế những nhược điểm của hai hệ thống GNSS và INS ở chế độ độc lập, việc tích hợp hai hệ thống trên là một giải pháp hiệu quả và đã được nghiên cứu, sử dụng cho nhiều ứng dụng như đã đề cập ở trên.

Tuy vậy, thực tế thấy rằng để đảm bảo độ chính xác định vị, định hướng của hầu hết các ứng dụng trong thực tế, giá thành cho một hệ thống tích hợp INS/GNSS hiện nay vẫn còn khá cao (từ vài chục đến vài trăm ngàn đô la Mỹ/bộ), do vậy việc nghiên cứu, sử dụng các hệ thống này vẫn còn rất hạn chế ở Việt Nam. Ngược lại, các hệ thống tích hợp sử dụng những thiết bị giá thấp (từ vài trăm đến vài nghìn đô la Mỹ/bộ) thì độ chính xác vẫn chưa đủ tin cậy cho các ứng dụng định-dẫn đường, MMS và các ứng dụng cho trắc địa, bản đồ khác, đặc biệt là trong điều kiện môi trường tín hiệu vệ tinh bị che khuất như trong đô thị hay ở khu vực đường hầm. Do vậy để cải thiện độ chính xác định vị, định hướng cho các hệ thống định vị tích hợp INS/GNSS sử dụng các thiết bị giá thành thấp (có thể chấp nhận được trong điều kiện Việt Nam) mà độ chính xác vẫn có thể đảm

bảo cho các ứng dụng định vị dẫn đường và MMS phổ biến là một vấn đề cấp thiết.

Trong thực tế, để nâng cao độ chính xác của hệ thống tích hợp INS/GNSS, có thể tích hợp thêm các cảm biến hoặc bằng các phép kiểm định trong phòng thí nghiệm để xác định và giảm bớt các nguồn sai số hệ thống. Tuy nhiên, tích hợp thêm các cảm biến hay kiểm định với các thiết bị chuyên dụng sẽ làm tăng giá thành chung của hệ thống. Vì vậy, nghiên cứu này sẽ tập chung nghiên cứu các phương pháp ràng buộc giải tích và các phương pháp ước lượng tối ưu để nâng cao độ chính xác của các hệ thống định vị-dẫn đường tích hợp.

Đề tài đã tập trung nghiên cứu các nội dung chính như sau:

- Nghiên cứu và xây dựng một hệ thống dẫn đường tích hợp INS/GNSS dựa vào cảm biến quán tính và máy thu GNSS và các thiết bị, phụ kiện khác;
- Nghiên cứu và thử nghiệm các phương pháp ước lượng nhằm xử lý số liệu tích hợp INS/GNSS và các điều kiện ràng buộc khác, từ đó đưa ra những khuyến cáo các trường hợp áp dụng phù hợp;
- Nghiên cứu và thử nghiệm các điều kiện ràng buộc giải tích nhằm làm tăng độ chính xác dẫn đường của hệ thống INS/GNSS trong các trường hợp bị khuất, nhiễu tín hiệu GNSS;
- Xây dựng hệ thống các mô đun phần mềm để xử lý số liệu tích hợp INS/GNSS và thực thi các phương pháp lý thuyết đã đề xuất.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG ĐỊNH VỊ - DẪN ĐƯỜNG TÍCH HỢP INS/GNSS

1.1. Tổng quan tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước về các hệ thống định vị - dẫn đường tích hợp INS/GNSS

Trong mục này, tác giả giới thiệu tổng quan về hệ thống GNSS, INS, phương pháp tích hợp hai hệ thống, những thách thức và các giải pháp đã được đề xuất trên thế giới và trong nước.

Hệ thống vệ tinh dẫn đường toàn cầu (GNSS) là một thuật ngữ để chỉ tất cả các hệ thống định vị, dẫn đường sử dụng công nghệ vệ tinh trên phạm vi toàn cầu bao gồm GPS (Mỹ), GLONASS (Nga), GALILEO (Liên minh châu Âu) và COMPASS (Trung quốc). Các hệ thống này hiện đã và đang được vận hành, nâng cấp và xây dựng phục vụ cho công tác định vị, dẫn đường cho các ứng dụng quân sự và dân sự [1].

Để cho ra lời giải định vị, máy thu cần thông hướng đến ít nhất 4 vệ tinh, điều này là không khả thi trong môi trường bị che khuất hoặc ngắt quãng tín hiệu như trong đường hầm, dưới nước, hay trong rừng rậm. Trong môi trường đô thị, nơi có nhiều nhà cao tầng, tín hiệu GPS bị ảnh hưởng bởi sai số đa đường dẫn (multipath) làm giảm độ chính xác định vị. Mặt khác GNSS không cung cấp thông tin về hướng xoay của máy thu [1], [2].

Hệ thống dẫn đường quán tính (INS) là một hệ thống bao gồm các cảm biến quán tính (IMU) và một khối cơ chế tính toán để tính ra lời giải định vị bao gồm vị trí, vận tốc và hướng xoay ba chiều của hệ thống dựa vào các tín hiệu đầu ra của IMU. Ưu điểm của INS là tự nó có thể cung cấp các thông tin định vị, định hướng ở tần số cao (50Hz-200Hz) mà không phụ thuộc và tín hiệu từ các thiết bị khác [3]. Tuy vậy, vấn đề chính của các hệ thống INS là sai số định vị của nó sẽ tích lũy và tăng rất nhanh theo thời gian do ảnh hưởng của các nguồn sai số hệ thống và nhiễu của IMU, đặc biệt là các INS sử dụng IMU giá rẻ. Việc tích hợp giữa INS và GNSS chính là giải pháp nhằm khắc phục những nhược điểm của cả hai hệ thống INS và GNSS ở chế độ độc lập [3], [4].

Ngày nay, các hệ thống INS sử dụng các cảm biến MEMS IMU giá thấp được ưu tiên lựa chọn cho các ứng dụng định vị, dẫn đường dân sự. Tuy vậy, vấn đề đang

đặt ra cho các hệ thống giá thấp là sai số vị trí tăng rất nhanh theo thời gian khi tín hiệu GNSS bị mất hoặc ngắt quãng. Để giải quyết vấn đề này, có 3 hướng tiếp cận chính:

- (1) Cải thiện phương pháp tích hợp
- (2) Tích hợp thêm cảm biến và các điều kiện ràng buộc phụ trợ
- (3) Cải tiến thuật toán trong việc xử lý số liệu tích hợp

Từ việc phân tích tổng quan tình hình nghiên cứu trong nước, chúng tôi thấy rằng các nghiên cứu trong nước vẫn chưa tập chung nghiên cứu, phân tích tính hiệu quả của các điều kiện ràng buộc giải tích và các phương pháp ước lượng phi tuyến, phi chuẩn Gauss đối với hệ thống dẫn đường tích hợp INS/GNSS.

1.2. Tổng quan về hệ thống dẫn đường toàn cầu GNSS

1.2.1. Hệ thống GPS

Hệ thống GPS được chính phủ Mỹ xây dựng từ năm 1973. Hiện có 30 vệ tinh đang trong quỹ đạo, độ chính xác định vị tuyệt đối từ 2-10m.

1.2.2. Hệ thống GLONASS

Hệ thống GLONASS của Nga đã được phát triển từ năm 1982 và vận hành với 24 vệ tinh từ năm 1996. Độ chính xác định vị tuyệt đối từ 5-8m

1.2.3. Hệ thống GALILEO

Hệ thống định vị vệ tinh GALILEO được khởi xướng vào năm 1999 bởi Liên minh Châu Âu (EU) và Cơ quan vũ trụ Châu Âu (ESA). Khi đi vào hoạt động, hệ thống định vị toàn cầu Galileo sẽ có 30 vệ tinh hoạt động ở độ cao 23222km (tức bán kính quỹ đạo 26900km). Độ chính xác của định vị tuyệt đối sau khi đủ 30 vệ tinh là 1m.

1.2.4. Hệ thống BẮC ĐẪU và COMPASS

Hệ thống định vị vệ tinh Bắc Đẩu (hay còn gọi là Beidou 1) được phát triển bởi Trung Quốc. Vệ tinh đầu tiên đã được đưa vào sử dụng cuối năm 2000 và hoạt động đầy đủ vào năm 2020. Độ chính xác của định vị tuyệt đối dự kiến là 10m.

1.2.5. Tín hiệu GPS

Tất cả các vệ tinh đều sử dụng hai tần số sóng tải là L1, L2. Sóng tải L1 có tần số 1.57452 GHz, có bước sóng $\lambda_1 = 19.032\text{cm}$. Sóng tải L2 có tần số 1.2276 GHz, có bước sóng $\lambda_2 = 24.42\text{cm}$. Các vệ tinh GPS sử dụng C/A – code, P – code, Y – code và M – code phục vụ cho các mục đích khác nhau.

1.2.6. Trị đo GPS

a. Khoảng cách giả

Được ước lượng dựa trên tín hiệu C/A code. Khoảng cách giả ước lượng bằng thời gian truyền sóng nhân với tốc độ ánh sáng trong môi trường chân không

b. Trị đo pha

Là hiệu pha giữa tín hiệu pha được tạo bởi máy thu và tín hiệu pha được phát ra từ vệ tinh tại thời điểm thu.

c. Trị đo Doppler (Doppler shift)

Là hiệu tần số giữa tần số phát ra từ vệ tinh và tần số nhận được tại máy thu, trích từ Misra and Enge (2001).

1.2.7. Các nguồn sai số trong GNSS

Các nguồn sai số trong GNSS bao gồm sai số đồng bộ vệ tinh, Sai số quỹ đạo vệ tinh, Ảnh hưởng của độ hình vệ tinh, Ảnh hưởng của tầng điện ly, Ảnh hưởng của tầng đối lưu, Ảnh hưởng do đa đường dẫn, Sai số do đồng hồ máy thu, Sai số do lệch tâm pha ante, Sai số do nhiễu tín hiệu.

1.2.8. Xử lý số liệu GNSS

Xử lý số liệu GNSS là công việc nhằm xác định các tham số định vị như vị trí, vận tốc và thời gian của máy thu. Trong thực tế, có thể chia thành hai phương pháp định vị chính là định vị tuyệt đối (SPP) với độ chính xác từ 2 – 10m và định vị tương đối (DGNSS) với độ chính xác cỡ dm trong trường hợp đo tương đối động và đến cỡ cm đến mm khi đo tương đối tĩnh.

1.3. Hệ thống định vị quán tính

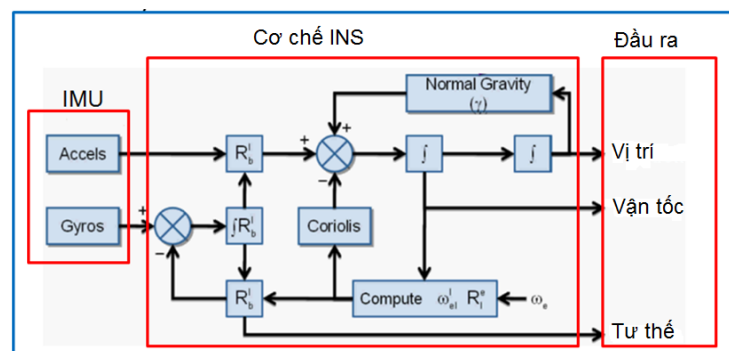
1.3.1. Nguyên lý cấu tạo của hệ thống INS

INS là một hệ thống bao gồm các cảm biến quán tính (IMU) và một cơ chế tính toán để cho ra lời giải định vị bao gồm vị trí, vận tốc và tư thế của phương tiện mang.

Nguyên lý hoạt động của INS là tổng hợp các tín hiệu đo được cung cấp bởi một cơ cấu đo lường quán tính IMU (Inertial measurement units), để cho biết trạng thái hiện thời của hệ thống, sau đó sử dụng phương pháp dead – reckoning để ước lượng trạng thái kế tiếp của hệ thống. IMU được cấu tạo từ các cảm biến gia tốc (Accelerometer) và các cảm biến Gyro. Tín hiệu gia tốc dài được đọc về bởi Accelerometer, còn tín hiệu vận tốc góc được đo bởi Gyro.

1.3.2. Cơ chế tính toán trong INS

Cơ chế tính toán trong INS thường để chỉ công tác tính toán từ đầu ra của các cảm biến để cho ra lời giải về vị trí, vận tốc và hướng xoay của khối đo lường quán tính trong một hệ quy chiếu nhất định. Nguyên lý và các công thức chi tiết của các cơ chế INS được trình bày trong các tài liệu [1]. Các bước tính toán trên có thể được mô tả thông qua sơ đồ sau



1.3.3. Các loại sai số trong INS, cách phát hiện và khắc phục

INS tồn tại hai loại sai số chủ yếu là sai số hệ thống và sai số ngẫu nhiên hay nhiễu.

Sai số hệ thống bao gồm: Sai số hình học, Độ lệch hệ thống đầu ra và sai số tỷ lệ. Để khắc phục các loại sai số này, kiểm định máy móc là việc cần thiết. Ngoài ra, có thể sử dụng các phương pháp tích hợp IMU với các cảm biến hỗ trợ hoặc các phương pháp tính toán thích hợp để loại bỏ và hạn chế sai số hệ thống.

Sai số ngẫu nhiên hay nhiễu. Là lỗi ngẫu nhiên sinh ra trong đo lường. Để hạn chế nhiễu, các phương pháp tính xử lý số liệu dựa trên các phương pháp ước lượng

thông kê được áp dụng. Để xử lý nhiễu, trước hết mô hình sai số được xây dựng. Sau đó các phương pháp ước lượng như phép lọc Kalman. Các phép làm trơn được áp dụng để xử lý đồng thời sai số hệ thống và sai số ngẫu nhiên.

1.3. Hệ thống dẫn đường tích hợp INS/GNSS

Việc tích hợp GNSS và INS nhằm mục đích phát huy những ưu điểm và hạn chế những nhược điểm của từng hệ thống GNSS và INS ở chế độ độc lập.

Ưu, nhược điểm của các hệ thống

Tên hệ thống	Ưu điểm	Nhược điểm
GNSS	<ul style="list-style-type: none"> - Độ chính xác độc lập với thời gian vận hành - Dễ dàng vận hành và sử dụng - Ảnh hưởng ít đối với thể trọng trường 	<ul style="list-style-type: none"> - Không có hoặc nhiễu thông tin về hướng xoay - Tần số đầu ra thấp (1Hz) - Phụ thuộc vào môi trường
INS	<ul style="list-style-type: none"> - Cung cấp - Tần số đầu ra cao (50-200Hz) - Độc lập với môi trường 	<ul style="list-style-type: none"> - Sai số tích lũy theo thời gian vận hành - Nhạy cảm với thể trọng trường
Hệ tích hợp INS/GNSS	<ul style="list-style-type: none"> - Độ chính xác ổn định theo thời gian - Thông tin hướng xoay chính xác - Tần số đầu ra cao (50-200Hz) - Vận hành trong mọi điều kiện môi trường 	<ul style="list-style-type: none"> - Vận hành và xử lý số liệu phức tạp - Giá thành cao

Ở cấp độ người dùng, việc tích hợp GNSS và INS thường sử dụng phương pháp tích hợp khác nhau (tích hợp lỏng, tích hợp chặt và tích hợp đa cảm biến).

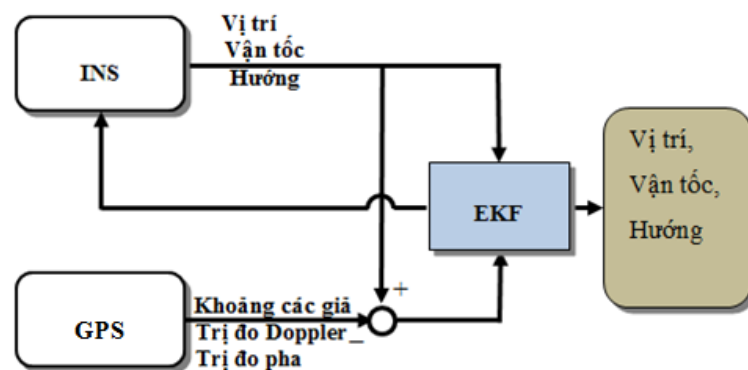
1.4.1. Tích hợp lỏng

Trong phương pháp tích hợp này, hệ thống xử lý dữ liệu GNSS tính toán tọa độ và vận tốc của máy thu, sau đó gửi kết quả đến bộ lọc Kalman mở rộng (EKF). Bằng việc tính toán gia số giữa kết quả định vị cung cấp bởi INS và GNSS, các tham số định vị được ước lượng một cách tin cậy nhất. Ưu điểm chính của tích hợp lỏng là nó có cấu trúc đơn giản, không cần những hiểu biết sâu về việc xử lý số liệu GNSS. Nhược

điểm của phương pháp tích hợp này là các trị đo cập nhật từ GNSS chỉ được cung cấp khi có ít nhất 4 vệ tinh được quan sát.

1.4.2. Tích hợp chặt

Để khắc phục những nhược điểm của tích hợp lỏng, phương pháp tích hợp chặt đã được đề xuất. Trong phương pháp tích hợp chặt các trị đo GNSS như trị đo khoảng cách giả, trị đo pha hay tín hiệu Doppler được sử dụng trực tiếp trong bộ lọc EKF. Ưu điểm của phương pháp tích hợp này là trị đo thô GNSS có thể được sử dụng để cập nhật cho hệ thống INS khi ít hơn 4 vệ tinh được quan sát, Cấu trúc này đặc biệt hữu ích trong môi trường bị hạn chế tầm nhìn như trong đô thị



1.4.3. Tích hợp đa cảm biến

Thực tế thấy rằng việc cải tiến phương pháp tích hợp chỉ có ý nghĩa trong môi trường bị nhiễu tín hiệu GNSS. Trong trường hợp tín hiệu GNSS bị mất hoàn toàn, không có trị đo cập nhật từ GNSS, sai số vị trí của hệ thống sẽ tăng rất nhanh theo thời gian. Để khắc phục tình trạng này, các giải pháp với các cảm biến phụ trợ như là bàn điện tử, cảm biến độ cao, hoặc cảm biến vận tốc đã được đề xuất và áp dụng nhằm nâng cao độ chính xác của hệ thống.

CHƯƠNG 2: CÔNG NGHỆ TÍCH HỢP INS/GNSS

Để có thể tích hợp và đồng bộ hóa các loại cảm biến khác nhau, phương thức giao tiếp và cấu trúc dữ liệu của từng loại cảm biến phải được nghiên cứu. Trong chương này, các phương thức giao tiếp cơ bản có liên quan trong hệ thống tích hợp INS/GPS được nghiên cứu, tiếp đó là mô tả cấu trúc dữ liệu của IMU và máy thu GPS.

1.1. Các phương thức giao tiếp cơ bản trong hệ tích hợp

1.1.1. Giao tiếp RS-232

Vấn đề giao tiếp giữa PC và vi điều khiển rất quan trọng trong các ứng dụng điều khiển, đo lường... Ghép nối qua cổng nối tiếp RS232 là một trong những kỹ thuật được sử dụng rộng rãi để ghép nối các thiết bị ngoại vi với máy tính. Nó là một chuẩn giao tiếp nối tiếp dùng định dạng không đồng bộ, kết nối nhiều nhất là 2 thiết bị, chiều dài kết nối lớn nhất cho phép để đảm bảo dữ liệu là 12.5 đến 25.4m, tốc độ 20kbit/s đôi khi là tốc độ 115kbit/s với một số thiết bị đặc biệt.

Có hai phiên bản RS232 được lưu hành trong thời gian tương đối dài là RS232B và RS232C. Nhưng cho đến nay thì phiên bản RS232B cũ thì ít được dùng còn RS232C hiện vẫn được dùng và tồn tại thường được gọi là tên ngắn gọn là chuẩn RS232. Các máy tính thường có 1 hoặc 2 cổng nối tiếp theo chuẩn RS232C được gọi là cổng Com. Chúng được dùng ghép nối cho chuột, modem, thiết bị đo lường... Trên main máy tính có loại 9 chân hoặc lại 25 chân tùy vào đời máy và main của máy tính. Việc thiết kế giao tiếp với cổng RS232 cũng tương đối dễ dàng, đặc biệt khi chọn chế độ hoạt động là không đồng bộ và tốc độ truyền dữ liệu thấp.

1.1.2. Giao tiếp I²C

Chuẩn giao tiếp I²C (Inter-Integrated Circuit) là một loại bus nối tiếp hai chiều với hai dây tín hiệu được phát triển bởi hãng sản xuất linh kiện điện tử Philips (nay là hãng NXP Semiconductors) cho quá trình giao tiếp giữa các IC. Đây là 1 trong các chuẩn giao tiếp vi điều khiển thường gặp. Giao tiếp I²C là quá trình truyền thông đồng bộ nối tiếp, hỗ trợ nhiều master (thiết bị chủ) và slave (thiết bị tớ) trên đường truyền. I²C phù hợp với các ngoại vi mà sự ưu tiên về kết nối đơn giản và chi phí sản xuất thấp quan trọng hơn là yêu cầu về tốc độ truyền như giao tiếp giữa vi điều khiển và mảng cảm biến, các thiết bị hiển thị, thiết bị IoT, EEPROMs, v.v ...

1.1.3. Giao tiếp SPI

Giao tiếp ngoại vi nối tiếp hoặc SPI (Serial Peripheral Interface) là một chuẩn đồng bộ nối tiếp để truyền dữ liệu ở chế độ song công toàn phần (full – duplex) tức trong cùng một thời điểm có thể xảy ra đồng thời quá trình truyền và nhận.

Giao tiếp ngoại vi nối tiếp (SPI) là một loại giao thức kiểu Master – Slave cung cấp một giao diện chi phí đơn giản và chi phí thấp giữa vi điều khiển và các thiết bị ngoại vi của nó.

Bus giao tiếp SPI thường được sử dụng để giao tiếp vi xử lý hoặc vi điều khiển với bộ nhớ như EEPROM, RTC (Đồng hồ thời gian thực), ADC (Analog to Digital Converter – Bộ chuyển đổi tương tự sang số), DAC (Digital-to-Analog Converter – Bộ chuyển đổi số sang tương tự), thiết bị hiển thị như màn hình LCD, IC âm thanh, các loại cảm biến như nhiệt độ và áp suất, thẻ nhớ như MMC hoặc thẻ SD hoặc thậm chí các bộ vi điều khiển khác.

1.1.4. Giao tiếp USB

USB, viết tắt của cụm từ **Universal Serial Bus**, là cổng kết nối cấp tiêu chuẩn cho máy tính cá nhân và những thiết bị điện tử tiêu dùng. Nói một cách khác, cổng USB cho phép các thiết bị có trang bị cổng USB được kết nối với nhau và truyền dữ liệu kỹ thuật số qua cáp USB, thậm chí có thể truyền năng lượng điện cho những thiết bị cần điện để hoạt động.

Cổng kết nối USB có 2 loại: loại có dây và loại không có dây, nhưng phổ biến vẫn là cổng USB có dây

1.2. Cấu trúc dữ liệu trong IMU

Trong thực tế, các loại IMU có các phương pháp mã hóa, lưu trữ và cung cấp các cấu trúc dữ liệu, đơn vị đo khác nhau. Tuy nhiên về cơ bản dữ liệu đầu ra của IMU bao gồm mốc thời gian, 3 thành phần của con quay hồi chuyển và 3 thành phần của cảm biến gia tốc. Các dữ liệu đầu ra có thể được lưu trữ dưới dạng mã ASCII hoặc mã hóa dạng mã nhị phân (Binary).

1.3. Đọc dữ liệu từ IMU

1.3.1. Giới thiệu IMU ADIS 16405

IMU ADIS16405 là một hệ cảm biến quán tính hoàn chỉnh bao gồm một cảm biến con quay hồi chuyển ba trục, một cảm biến gia tốc ba trục, một cảm biến từ trường ba trục và cảm biến nhiệt độ. Các giá trị đầu ra từ IMU ADIS 16405 được đọc, xử lý và hiệu chỉnh trước khi đưa ra cho người dùng thông qua giao thức SPI.

1.3.2 Các thanh ghi dữ liệu của IMU ADIS 16405

Sau khi khởi động, IMU sẽ tự động thu thập dữ liệu từ các cảm biến thành phần với tần số lấy mẫu mặc định là 819.2 SPS. Sau mỗi lần lấy mẫu, dữ liệu cảm biến được ghi vào các thanh ghi đầu ra và xung trên chân DIO1 được xuất. Xung này có nhiệm vụ báo hiệu rằng dữ liệu đã sẵn sàng để đọc, hệ thống đọc tín hiệu có thể sử dụng xung này để kích hoạt các hàm ngắt đọc dữ liệu cảm biến.

1.3.3. Đọc và xử lý dữ liệu từ IMU ADIS 16405

Kết nối IMU ADIS 16405 với mạch vi điều khiển: IMU và vi điều khiển được kết nối với nhau qua theo chuẩn giao tiếp SPI. Sau khi dữ liệu được đọc về vi điều khiển (từng byte), nó sẽ được chuyển đổi thành dữ liệu có nghĩa (có đơn vị).

1.4. Cấu trúc dữ liệu của máy thu GNSS

Các máy thu GNSS thường cho ra hai dạng dữ liệu, bao gồm lời giải GNSS dưới dạng NMEA và dữ liệu thô. Trong khi dữ liệu NMEA được mã hóa dưới khuôn dạng ASCII, có thể dễ dàng lấy ra các thông tin về thời gian, vị trí hay vận tốc của máy thu thì dữ liệu thô được mã hóa phức tạp hơn, phải thông qua các bước chuyển đổi và được xử lý bằng các phần mềm chuyên dụng để có thể cho ra lời giải định vị.

1.4.1. Định dạng NMEA

NMEA (National Marine Electronics Association) là một chuẩn dữ liệu do tổ chức điện tử hàng hải Mỹ đưa ra. Chuẩn này ra đời để truyền dữ liệu giữa các thiết bị hàng hải nhằm trao đổi thông tin. Các máy thu GPS có thể tính toán lời giải từ tín hiệu GPS và lưu trữ hoặc truyền đi lời giải định vị ở dạng mã hóa NMEA.

1.4.2. Cấu trúc mã hóa RINEX

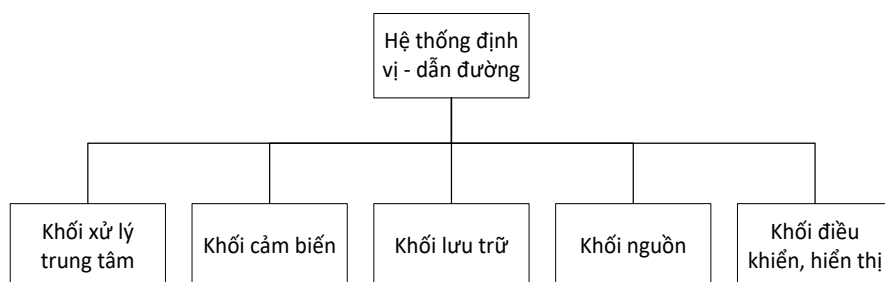
RINEX là thuật ngữ viết tắt của cụm từ Định dạng trao đổi máy thu độc lập, nguyên bản tiếng Anh là "Receiver Independent Exchange Format", được phát triển bởi Viện thiên văn thuộc Đại học Berne, Đức nhằm dễ dàng trao đổi các dữ liệu GNSS giữa các máy thu từ các hãng sản xuất khác nhau.

1.5. Phương pháp đồng bộ hóa dữ liệu INS và GNSS

Đồng bộ thời gian giữa hệ thống GNSS và INS là việc gắn các mốc thời gian cho các bản ghi dữ liệu từ đầu ra của GNSS và INS trong cùng một hệ thống thời gian. Do máy thu GNSS và hệ thống INS thường là độc lập nhau và tần số đầu ra cũng khác nhau nên việc đồng bộ là cần thiết trong việc xử lý số liệu tích hợp. Trong đề tài này, phương pháp đồng bộ phần cứng được áp dụng, trong đó tín hiệu một xung trên giây (1PPS) từ GNSS sẽ được dùng để gắn các mốc thời gian cho tín hiệu đầu ra của IMU, vì vậy dữ liệu IMU được đồng bộ thời gian với dữ liệu GNSS. Trong trường hợp không có tín hiệu xung từ GPS, thời gian của dữ liệu IMU được nội suy dựa mà mốc thời gian trước đó và tần số đầu ra của IMU đã biết.

1.5.1. Giới thiệu các thành phần của hệ thống

Hệ thống định vị - dẫn đường được cấu tạo bởi 5 thành phần chính, bao gồm khối xử lý trung tâm, khối cảm biến (IMU và máy thu GNSS), khối lưu trữ, khối nguồn và khối điều khiển, hiển thị như mô tả ở hình 2.1



Hình 2.1. Các thành phần chính của hệ thống

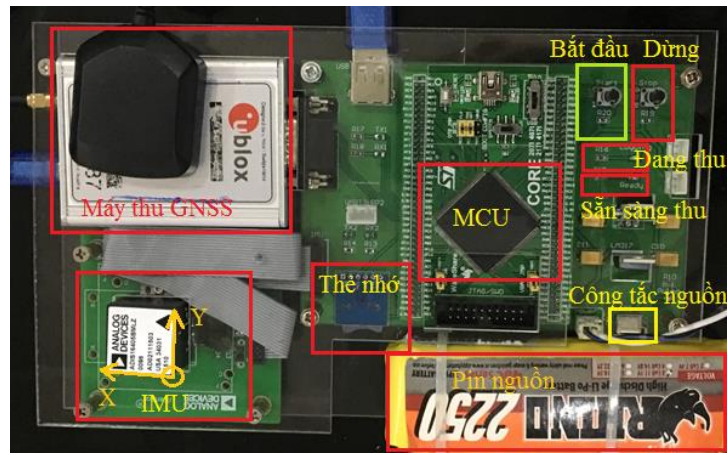
1.5.2. Mô tả các thành phần chính hệ thống

1) IMU ADIS16405 **MBLZ**: Được sử dụng để thu tín hiệu IMU bao gồm vận tốc góc và gia tốc chuyển động.

2) Máy thu GNSS U-blox EVK-6T: Được sử dụng để thu tín hiệu và cung cấp lời giải GNSS.

3) Vi điều khiển STM32F407IGT6: Được sử dụng để đồng bộ hóa IMU và máy thu GNSS, điều khiển việc đọc và lưu trữ dữ liệu.

Hệ thống tích hợp INS/GNSS sau khi đã lắp ráp được thể hiện ở hình 2.2. Thống số kỹ thuật của hệ thống được trình bày ở bảng 2.1



Hình 2.2. Hệ thống tích hợp INS/GNSS

Bảng 2.1. Các thông số kỹ thuật của hệ thống INS/GNSS

STT	Thông số	Giá trị	Đơn vị đo
1	Kích thước	21 x 13 x 2	cm
2	Khối lượng	0.6	kg
3	Điện áp hoạt động	7.5	Vol
4	Công suất	1.5	wat
5	Dung lượng thẻ nhớ	8	GB
6	Độ chính xác vị trí	0.5-5	mét
7	Độ chính xác tư thế	0.2-3.0	Độ

CHƯƠNG 3: CÁC PHÉP ƯỚC LƯỢNG TỐI ƯU

1.1. Tổng quan về phép ước lượng

Ước lượng là một dạng xử lý số liệu nhằm tìm các giá trị có độ tin cậy cao nhất của các đại lượng cần xác định. Bản chất của việc ước lượng là xác hàm phân phối xác suất, từ đó xác định ước lượng tốt nhất của các đại lượng cần xác định. Để giải quyết vấn đề này, các mô hình toán học hệ thống với luật phân phối xác suất $P(x_k | x_{k-1}, z_{1:k-1})$ và mô hình trị đo với luật phân phối xác suất $P(z_k | x_k)$ được xây dựng như công thức (3.1) và (3.2).

$$x_k = f_k(x_{k-1}, w_k) \quad (3.1)$$

$$z_k = h_k(x_k, v_k) \quad (3.2)$$

Trong đó, $x_k \in R^{n_x}$ là véc tơ trạng thái ở thời điểm k ; $w_k \in R^{n_w}$ là nhiễu hệ thống; $z_k \in R^{n_z}$ là trị đo hồi trợ; $v_k \in R^{n_v}$ là nhiễu trị đo; $f_k : R^{n_x} \times R^{n_w} \rightarrow R^{n_x}$ và $h_k : R^{n_x} \times R^{n_v} \rightarrow R^{n_z}$ là các hàm của véc tơ trạng thái và véc tơ trị đo.

Nếu xác định được hàm phân phối xác suất (PDF) $P(x_k | z_{1:k})$ thì có thể xác định được trị xác suất nhất của véc tơ trạng thái x_k và ma trận hiệp phương sai tương ứng P_k .

Để đạt mục đích này, các phương pháp ước lượng như phép lọc Kalman, phép ước lượng phi tuyến, phi chuẩn Gauss và phép ước lượng tron được nghiên cứu và thử nghiệm trong đề tài này.

1.2. Phép lọc Kalman

Phép lọc Kalman (KF) [5] được sử dụng rộng rãi trong việc xử lý số tín hiệu số và dữ liệu đa cảm biến. Mục đích của KF là xác định ước lượng tin cậy nhất của các đại lượng cần xác định dựa trên nguyên lý tối thiểu hóa ma trận hiệp phương sai tương ứng.

1.2.1. Cơ sở toán học của phép lọc Kalman

Trong trường hợp hàm hệ thống và hàm trị đo có dạng tuyến tính, công thức (3.1) và (3.2) trở thành:

$$x_k = \Phi_{k-1;k} x_{k-1} + w_{k-1} \quad (3.4)$$

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (3.5)$$

Trong đó $\Phi_{k-1;k}$ là ma trận tính chuyển trạng thái từ thời điểm $k - 1$ đến k ; H_k là ma trận hệ số biểu diễn mối quan hệ giữa trị đo hỗ trợ và véc tơ trạng thái.

Trong KF, nhiều được giả thiết rằng tuân theo luật phân bố chuẩn với kỳ vọng “0”

Phân tích dựa trên nguyên lý tối thiểu hóa phương sai, các bước tính toán của KF được trình bày dưới đây

Tiên đoán

$$\hat{x}_k^- = \Phi_{k-1;k} \hat{x}_{k-1} \quad (3.6)$$

$$P_k^- = \Phi_{k-1;k} P_{k-1} \Phi_{k-1;k}^T + Q_k \quad (3.7)$$

Với \hat{x}_k^- và P_k^- là véc tơ trạng thái và ma trận hiệp phương sai tiên đoán

Cập nhật:

$$K_k = P_k^- H_k^T [H_k P_k^- H_k^T + R_k]^{-1} \quad (3.8)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H_k \hat{x}_k^-) \quad (3.9)$$

$$P_k = P_k^- - K_k H_k P_k^- \quad (3.10)$$

Trong đó \hat{x}_k và P_k véc tơ trạng thái và ma trận hiệp phương sai cập nhật.

KF được biết đến như một công cụ ước lượng tối ưu trong việc xử lý số liệu vì tính đơn giản mà hiệu quả của nó. Tuy vậy KF thuần túy chỉ có thể áp dụng đối với các hàm tuyến tính. Trong trường hợp hàm phi tuyến, cần có những cải tiến để phù hợp như được trình bày ở các mục sau.

1.2.2. Phép lọc Kalman mở rộng (EKF)

Để khắc phục các hạn chế của KF, EKF đã được đề xuất. Trong EKF, Các hàm được tuyến tính hóa bằng khai triển Taylor và giữ lại các thành phần bậc nhất. Các bước tính toán tương tự như trong KF.

1.3. Mô hình toán học của hệ thống tích hợp INS/GNSS cho phép lọc Kalman mở rộng

1.3.1. Mô hình hệ thống

Mô hình hệ thống được xây dựng dựa trên mô hình sai số INS theo tài liệu [1] có dạng:

$$x_k = \Phi_{k-1;k} x_{k-1} + w_k \quad (3.11)$$

Trong đó: $x = [\delta r \ \delta v \ \delta \psi]^T_{9 \times 1}$ là véc tơ trạng thái, các thành phần của nó bao gồm sai số vị trí, vận tốc và hướng xoay; $\Phi_{k-1;k}$ là ma trận tính chuyển trạng thái từ thời điểm $k - 1$ đến k , w_k là nhiễu của hệ thống.

1.3.2. Mô hình trị đo GNSS

Trị đo GNSS là vị trí của máy thu trong hệ tọa độ địa tâm (e-frame) được viết dưới dạng hàm của véc tơ trạng thái như sau:

$$\delta z_{GPS(k)} = [r_{INS}^e - r_{GNSS}^e] = H_{GNSS} C_n^e x_k + \eta_r \quad (3.12)$$

Trong đó:

r_{INS} và r_{GNSS} là ký hiệu véc tơ vị trí được cung cấp bởi hệ thống INS và GNSS

$H_{GNSS} = [I_{3 \times 3} \quad O_{3 \times 12}]$ là ma trận hệ số, biểu diễn mối liên hệ giữa véc tơ trị đo và véc tơ trạng thái.

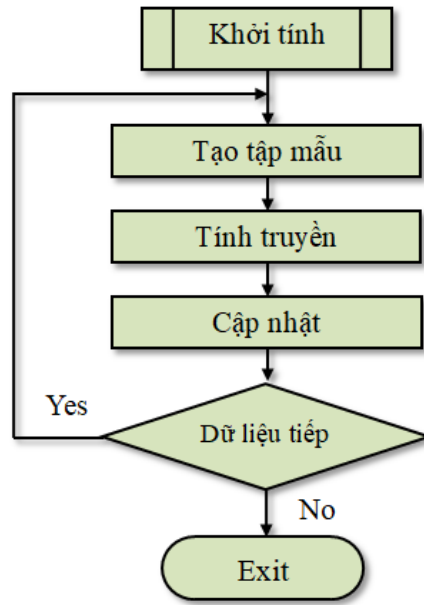
C_n^e là ma trận chuyển đổi từ hệ tọa độ độ phẳng địa phương sang hệ tọa độ địa tâm.

v_r, v_v : là nhiễu về vị trí và vận tốc.

1.4. Phép ước lượng phi tuyến, phi chuẩn Gauss (Ước lượng tập mẫu)

1.4.1. Phép lọc Unscented Kalman (UKF)

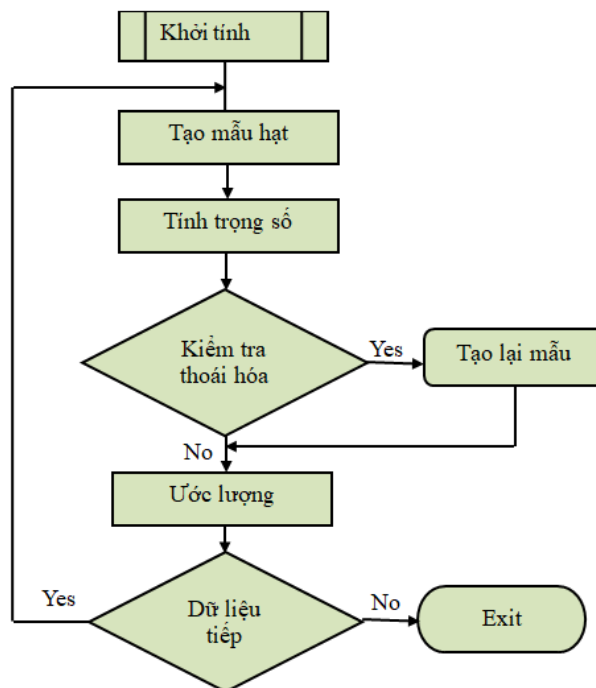
Năm 1997, Julier và Uhlman [6] đã đề xuất ra một phương pháp ước lượng mà không dựa vào cách làm gần đúng tuyến tính mô hình phi tuyến như truyền thống. Phương pháp được dựa trên thuật toán cơ bản của luật truyền sai số (Unscented transform), và phương pháp có tên Unscented Kalman filter (UKF). Theo đó, thay vì việc tuyến tính hóa hàm số, giá trị kỳ vọng và phương sai hậu nghiệm được tính bởi số lượng mẫu điểm (sigma-points) nhất định được truyền qua hàm phi tuyến. Độ chính xác của phương pháp này tương đương với phương pháp Kalman suy rộng nếu sử dụng đến các hệ số bậc hai từ khai triển Taylor [6]. Nhược điểm của (UKF) là thời gian tính toán lâu hơn do phải tính nhiều mẫu điểm. Thuật toán (UKF) có thể được mô tả theo quy trình như sau:



Hình 3.1. Sơ đồ tính toán trong UKF

1.4.2. Phép lọc hạt (Particle Filter)

Cơ sở của phép lọc hạt dựa trên lý thuyết của kỹ thuật Monte Carlo để ước lượng biến trạng thái. Hàm mật độ phân bố xác suất (posterior probability density function) của vector trạng thái được xác định dựa trên thuật toán ước lượng tối ưu đệ quy Bayes khi biết hàm tiên mật độ phân bố xác suất (prior probability density function). Như vậy phép lọc hạt cho phép áp dụng trực tiếp trên hàm phi tuyến với mọi luật phân bố của nhiễu. Phép lọc hạt dựa trên phương pháp tái lấy mẫu SIR được trình bày như sơ đồ sau



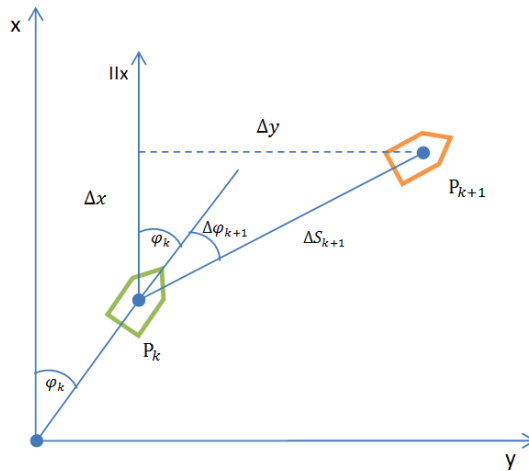
Hình 3.2. Sơ đồ tính toán trong PF

1.5. Thực nghiệm mô phỏng đối với các phương pháp ước lượng

1.5.1. Thiết kế mô hình hệ thống

Mô hình hệ thống động được tạo nên bằng cách mô phỏng chuyển động của một vật thể trên một quỹ đạo đã biết (Hình 3.3). Vector trạng thái bao gồm hai thành phần của tọa độ mặt phẳng x và y , vận tốc v , góc định hướng φ và góc xoay $\Delta\varphi$ như sau (Schweitzer, 2012)[10]:

$$y = [x \quad y \quad \varphi \quad v \quad \Delta\varphi]^T, \quad (3.13)$$



Hình 3.3. Mô hình hệ thống động

Giả thiết rằng vật chuyển động (xe) di chuyển theo một đường thẳng giữa hai điểm đo liên tiếp và thời điểm đo đặc được tiến hành trùng khớp với thời điểm dự đoán từ mô hình hệ thống.

1.5.2. Kết quả thực nghiệm

Mục đích của thực nghiệm nhằm so sánh kết quả của các phép lọc nêu đã nêu trong mục 3, 4, 5 trên hai mặt (1) về độ chính xác và (2) về thời gian tính toán.

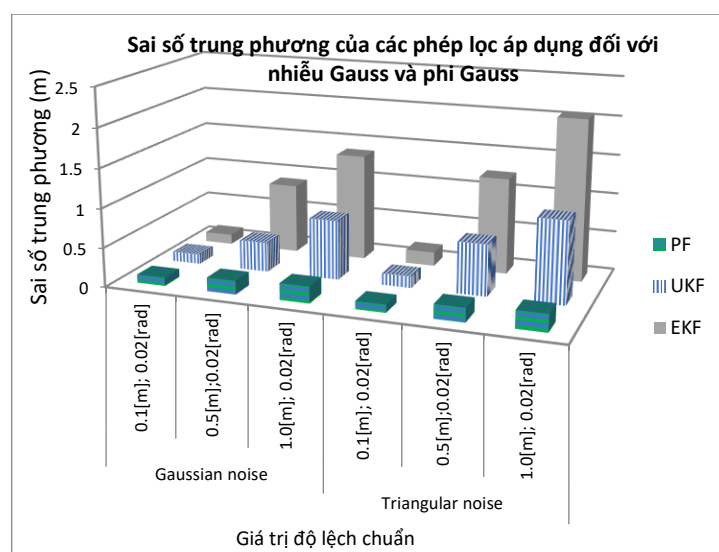
a. So sánh độ chính xác ước lượng

Bảng 3.1. Sai số trung phương của các phép lọc sử dụng phân bố chuẩn Gauss

Độ lệch chuẩn của trị đo cạnh và góc	Sai số trung phương RMSE (m)		
	PF	UKF	EKF
$\sigma_s=0,1\text{m};\sigma_\varphi=0,02\text{rad}$	0,106	0,127	0,126
$\sigma_s=0,5\text{m};\sigma_\varphi=0,02\text{rad}$	0,174	0,379	0,892
$\sigma_s=1,0\text{m};\sigma_\varphi=0,02\text{rad}$	0,212	0,761	1,368

Bảng 3.2. Sai số trung phương của các phép lọc sử dụng phân bố tam giác (triangular distribution)

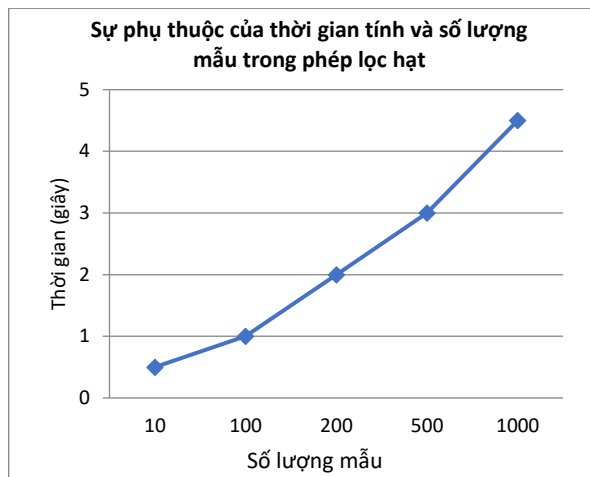
Độ lệch chuẩn của trị đo cạnh và góc	Sai số trung phương RMSE (m)		
	PF	UKF	EKF
$\sigma_s=0,1\text{m};\sigma_\varphi=0,02\text{rad}$	0,103	0,150	0,178
$\sigma_s=0,5\text{m};\sigma_\varphi=0,02\text{rad}$	0,180	0,659	1,233
$\sigma_s=1,0\text{m};\sigma_\varphi=0,02\text{rad}$	0,225	1,050	2,062



Hình 3.4. So sánh sai số trung phương trong trường hợp sử dụng nhiễu Gauss và phi Gauss

b. So sánh về mặt thời gian tính toán

Thời gian thực hiện tính đối với EKF là $7,5 \times 10^{-4}$ giây, đối với UKF là $5,0 \times 10^{-3}$ giây, đối với PF được khảo sát sự phụ thuộc của thời gian tính đối với số lượng mẫu và được thể hiện chi tiết trong hình 3.5. Ở đây, sử dụng phần mềm MATLAB phiên bản R2014 chạy trên nền Windows XP service Pack 3 có tốc độ tính 2,66 GHz Intel Dual Core và bộ nhớ RAM là 4GB.



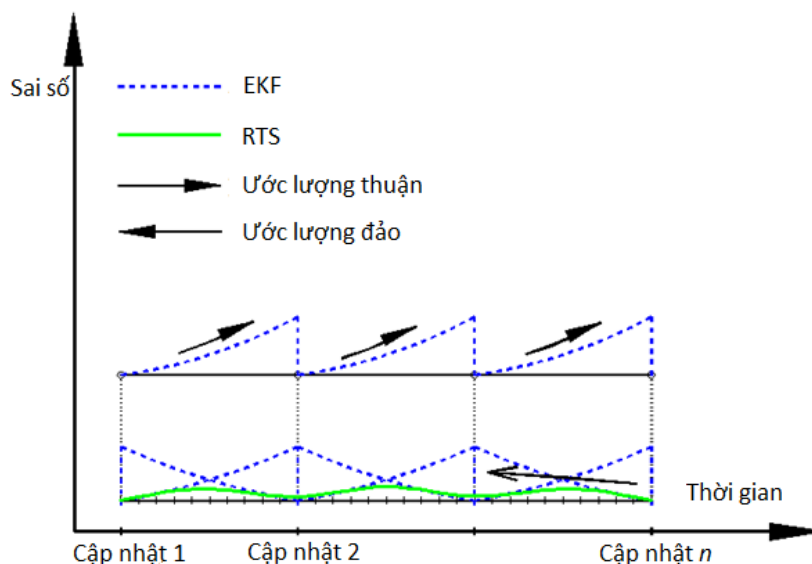
Hình 3.5. Thời gian tính của PF đối với sự thay đổi của số lượng mẫu

1.6. Phương pháp ước lượng tron Rauch-Tung-Striebel

Mặc dù các phép lọc không ngừng được cải tiến, chúng vẫn có hạn chế là chỉ cho ước lượng tốt nhất khi có các trị đo bổ sung. Trong trường hợp không có trị đo bổ sung, các phép lọc hoàn toàn dựa vào mô hình hệ thống, điều này làm giảm tính tin cậy của phép ước lượng. Để khắc phục tình trạng này phép làm tron Rauch-Tung-Striebel [8] đã được đề xuất với nội dung như sau.

Phép ước lượng tron RTS sử dụng ước lượng thuận và đảo để tính ước lượng tối ưu. Ước lượng thuận chính là phép lọc KF và ước lượng đảo được dựa trên nguyên lý xác suất cực đại.

Sơ đồ của phép ước lượng tron RTS có thể được mô tả bởi hình 3.6



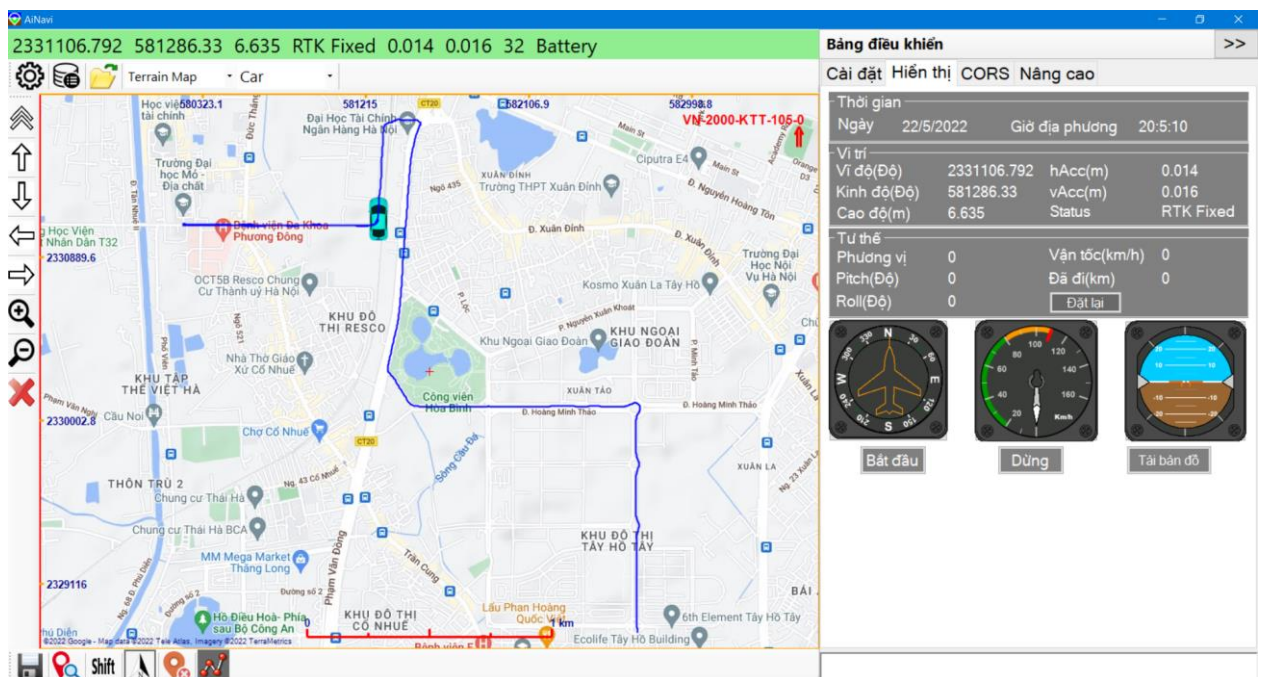
Hình 3.6. Sơ đồ của phép ước lượng tron RTS

1.7. Thử nghiệm các phương pháp ước lượng

1.7.1. Thu thập dữ liệu

Bộ dữ liệu được thu thập với hệ thống tích hợp bao gồm cảm biến quán tính vi cơ IMU ADS-16405 (ADIS, Mỹ) và máy thu GNSS một tần U-blox EVK-6T (U-blox, Thụy sĩ), được phát triển bởi nhóm nghiên cứu tại đại học Mỏ-Địa chất. Tần số đầu ra của IMU là 50Hz và tần số đầu ra của máy thu GNSS là 1Hz.

Dữ liệu được thu thập ở khu vực Công viên Hòa Bình và gầm cầu Thăng Long thuộc phường Xuân Đình, Bắc Từ Liêm, Hà Nội như hình 3.7. Để đánh giá tính hiệu quả của các phương pháp ước lượng, dữ liệu, dữ liệu chuẩn là dữ liệu tích hợp INS/GNSS với đầy đủ tín hiệu GNSS với tần số 1 Hz (1 giây cho 1 lời giải). Dữ liệu được sử dụng để đánh giá là dữ liệu tích hợp INS/GNSS trong đó dữ liệu GNSS đã bị cắt bỏ bớt xuống còn 0.2Hz (5 giây cho 1 lời giải). Ngoài ra, dữ liệu GNSS đưa vào xử lý còn bị cố tình cắt bớt 60 giây ở hai đoạn để tạo khoảng mất tín hiệu, nhờ đó sẽ có đánh giá tốt hơn về các phương pháp ước lượng.



Hình 3.7 . Sơ đồ tuyến thử nghiệm

1.7.2. Xử lý dữ liệu và phân tích kết quả

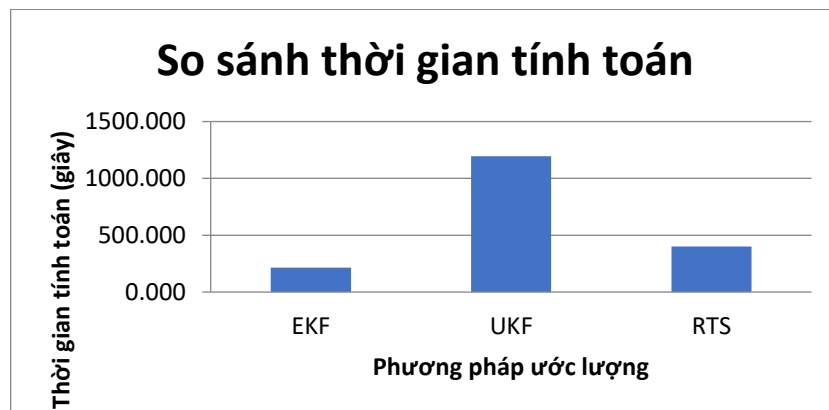
Các modul phần mềm bao gồm ước lượng Kalman mở rộng (EKF), Ước lượng tập mẫu (UKF) và ước lượng tron RTS được sử dụng để tính toán. Kết quả tính toán sau đó được so sánh với số liệu chuẩn để đánh giá về độ chính xác. Thời gian tính toán cũng được so sánh để đánh giá tính hiệu quả. Kết quả tính toán bao gồm vị trí, và tư thế trong các trường hợp được so sánh với dữ liệu chuẩn để có những phân tích

Bảng 3.3. So sánh sai số trung phương các phương án ước lượng

RMSE	EKF	UKF	RTS
North (m)	6.444	6.342	1.535
East (m)	4.537	3.971	0.349
Up (m)	3.621	2.177	0.592
3D (m)	8.673	7.793	1.682
Mức cải thiện (%)	-	10	81
Roll (°)	0.952	0.649	0.071
Pitch (°)	1.365	1.252	0.171
Heading (°)	1.997	1.230	0.370
3D (°)	2.600	1.871	0.414
Mức cải thiện (%)	-	28	84

Bảng 3.4: So sánh thời gian tính toán

	EKF	UKF	RTS
Thời gian tính(s)	214.690	1194.600	401.434
Mức so sánh (%)		556	187



Hình 3.8. Đồ thị so sánh thời gian tính toán

Từ kết quả tính toán có thể thấy rằng độ chính xác ước lượng của UKF có tốt hơn EKF nhưng không đáng kể, mức độ cải thiện trung bình vào khoảng 10%. Tuy vậy, thời gian tính toán của UKF tăng lên khoảng 450% so với EKF. Ở mặt khác, độ chính xác ước lượng phương pháp ước lượng tron RTS vượt trội so với hai phương pháp còn lại, vào khoảng 80%, trong khi thời gian tính toán vào khoảng 190% so với EKF và chỉ bằng xấp xỉ 34% so với UKF. Mặc dù vậy, một trong những nhược điểm của RTS là nó

chỉ có thể áp dụng cho các ứng dụng xử lý sau do nó chỉ được thực hiện sau khi EKF hoàn tất việc ước lượng theo chiều thuận cho toàn bộ chuỗi dữ liệu. Như vậy, đối với các ứng dụng xử lý sau ước lượng tron RTS là phương pháp tối ưu nhất. Trong các giải pháp xử lý thời gian thực, EKF sẽ là giải pháp tốt hơn. Trong trường hợp tốc độ xử lý của máy tính là không đáng lưu tâm thì các phương pháp ước lượng phi tuyến, phi chuẩn Gauss như UKF có thể được xem xét.

CHƯƠNG 4: CÁC ĐIỀU KIỆN RÀNG BUỘC GIẢI TÍCH TRONG HỆ TÍCH HỢP INS/GNSS

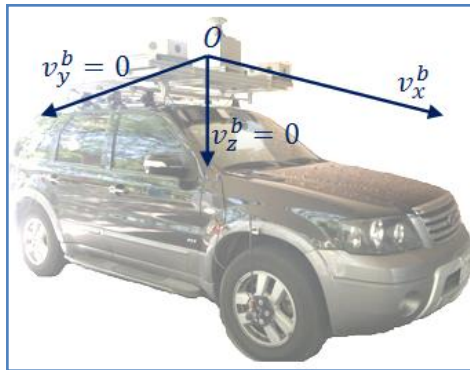
1.1. Điều kiện ràng buộc “Vận tốc không” đối với các hướng vuông góc với hướng đi chuyển (Non - holonomic Constraint - NHC)

1.1.1. Cơ sở lý thuyết của phương pháp ràng buộc NHC

Bản chất của phương pháp ràng buộc NHC xuất phát từ hiện tượng thực tế rằng đối với các phương tiện mặt đất trong điều kiện vận hành thông thường, các vector vận tốc theo hướng vuông góc với hướng chuyển động sẽ có giá trị “không”. Giả định này sẽ trở thành một điều kiện ràng buộc cho các ứng dụng định vị trên mặt đất. Với điều kiện ràng buộc này, các véc tơ vận tốc (y và z) trong hệ tọa độ vật thể sẽ bằng không, như được thể hiện trong phương trình (4.1) và hình 4.1:

$$\begin{cases} v_y^b = 0 \\ v_z^b = 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

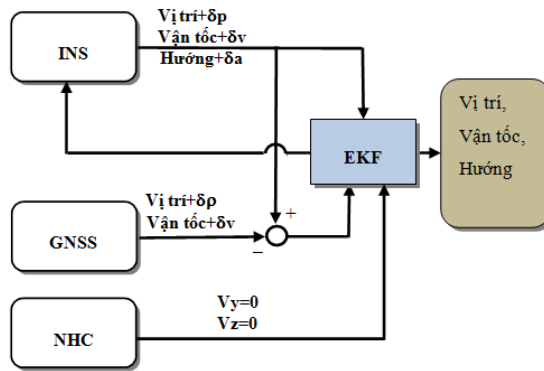
Ở đây kí hiệu (b) biểu thị hệ tọa độ vật thể, trong đó tâm là tâm của IMU, trục x trùng với hướng chuyển động về phía trước, trục z hướng xuống phía dưới (thường trùng với hướng của véc tơ gia tốc trọng trường), trục y vuông góc với hai trục còn lại theo quy tắc bàn tay trái [1].



Hình 4.1. Nguyên lý của điều kiện NHC

1.1.2. Thiết kế hệ thống tích hợp

Cấu trúc tích hợp INS/GNSS với điều kiện ràng buộc NHC được mô tả ở hình 4.2.



Hình 4.2. Phương pháp tích hợp lỏng INS/GPS + NHC

1.1.3. Xây dựng mô hình toán học để xử lý số liệu với EKF

Mô hình trị đo cho EKF đối với NHC được thiết lập như sau:

$$\delta z_k = \begin{bmatrix} v_y^b & -0 \\ v_z^b & -0 \end{bmatrix} = H_{NHC} C_n^b x_k + \begin{bmatrix} \varepsilon_{vy} \\ \varepsilon_{vz} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Trong đó :

v_y^b, v_z^b là vận tốc theo chiều y và z trong hệ tọa độ vật thể

C_n^b là ma trận chuyển đổi từ hệ tọa độ phẳng địa phương sang hệ tọa độ vật thể

ε_{vy} và ε_{vz} lần lượt là nhiễu vận tốc lần lượt theo hướng y và z

$$H_{NHC} = \begin{bmatrix} O_{2 \times 4} & I_{2 \times 2} & O_{2 \times 3} \end{bmatrix}$$

Phương trình (11) và (12) có thể viết dưới dạng tổng quát như sau:

$$z_k = H_k x_k + n_k \quad (4.3)$$

Trong đó: z_k là véc tơ trị đo, H_k là ma trận hệ số biểu diễn mối quan hệ giữa trị đo hỗ trợ và véc tơ trạng thái, n_k là nhiễu của trị đo hỗ trợ tại thời điểm k.

1.2. Cập nhật phương vị hệ thống từ hướng chuyển động của máy thu GNSS

Thực tế là phương vị đo có thể được tính toán dựa vào hai máy thu GNSS tại cùng một thời điểm hoặc một máy thu ở hai thời điểm khác nhau khi chúng ở các vị trí khác nhau. Giá trị phương vị này có thể được sử dụng để tích hợp nhằm nâng cao độ chính xác định hướng của hệ thống tích hợp INS/GNSS

1.2.1. Tính toán phương vị từ máy thu GNSS.

Trong nghiên cứu này, một số phương pháp được sử dụng để tính Cập nhật phương vị hệ thống từ hướng chuyển động của máy thu GNSS dựa trên nghiên cứu của Huang (2010) [9].

Các vị trí liên tiếp của máy thu GNSS trong các thời điểm liên tiếp trong hành trình chuyển động được sử dụng để tính toán phương vị tức thời của hệ thống theo công thức sau:

$$\theta_{GNSS,P}(t) = \tan^{-1} \left(\frac{E_{GNSS}(t+1) - E_{GNSS}(t)}{N_{GNSS}(t+1) - N_{GNSS}(t)} \right) + C \quad (4.4)$$

Trong đó, $E_{GNSS}(t+1)$, $E_{GNSS}(t)$, $N_{GNSS}(t+1)$, $N_{GNSS}(t)$ là tọa độ của máy thu GNSS theo các hướng đông và hướng bắc ở các thời điểm t và $t+1$ tương ứng.

1.2.2. Thiết kế cấu trúc cập nhật phương vị từ véc tơ chuyển động của GNSS.

Từ công thức (4.4), Phương trình trị đo cho EKF đối với phương vị cung cấp bởi GNSS được thiết lập như sau:

$$\delta z_k = \theta_{INS} - \theta_{GNSS} = H_{PV} x_k + n_{vp} \quad (4.5)$$

Trong đó:

$$H_{PV} = [O_{1 \times 5} \quad 1 \quad O_{1 \times 3}]$$

n_{vp} là nhiễu phương vị cung cấp bởi GNSS

Như vậy từ cơ sở toán học là công thức (4.4) và (4.5), các phương vị được tính toán bởi GNSS được cập nhật để tăng độ chính xác của hệ thống.

1.3. Điều kiện ràng buộc “Vận tốc không” và “hướng không đổi” khi dừng (ZUPT và ZIHR)

1.3.1. Cơ sở lý thuyết của ZUPT và ZIHR

ZUPT là việc hệ thống tạm dừng thường xuyên trong khoảng thời gian ngắn để tính toán các lỗi hệ thống và cho phép hạn chế các lỗi cảm biến quán tính. Khi phương tiện dừng, vận tốc theo các hướng bằng không. Khi đưa ra xem xét giả định trên, phương trình trị đo đối với ZUPT được như sau.

$$\delta z = \begin{bmatrix} \hat{v}_N^n & -0 \\ \hat{v}_E^n & -0 \\ \hat{v}_D^n & -0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta v_x \\ \delta v_y \\ \delta v_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{vx} \\ n_{vy} \\ n_{vz} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Trong đó n_{vx} , n_{vy} , n_{vz} là các hướng bắc, đông và dưới của vector vận tốc được ước tính trong hệ tọa độ địa phương, n_{vi} là độ nhiễu vận tốc theo hướng i .

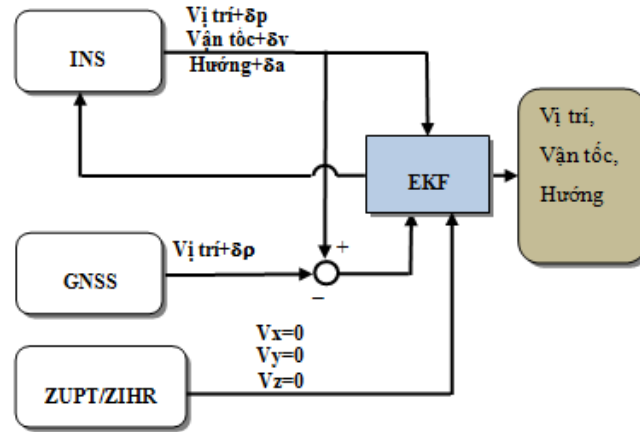
ZIHR là điều kiện ràng buộc góc định hướng khi phương tiện dừng. Về lý thuyết, khi phương tiện dừng thì góc định hướng sẽ không đổi trong suốt quá trình dừng, khi đó, phương trình trị đo ràng buộc về hướng có dạng như sau:

$$\delta z_k = [\psi_{first-stored}] = [0 \ 0 \ 1] \delta a + n_{az} \quad (4.7)$$

Trong đó $\phi_{first-stored}$ là góc định hướng tức thời khi xe dừng, δa là vector trạng thái lỗi, n_{az} là định hướng nhiễu.

1.3.2. Thiết kế hệ thống tích hợp

Cấu trúc tích hợp INS/GNSS với điều kiện ràng buộc ZUPT/ZIHR được mô tả ở hình 4.3.



Hình 4.3. Phương pháp tích hợp lỏng INS/GPS + ZUPT/ZIHR

1.3.3. Mô hình trị đo trị đo ZUPT

Từ công thức (4.6), Phương trình trị đo cho EKF đối với ZUPT được thiết lập như sau:

$$\delta z_k = \begin{bmatrix} \hat{v}_N^n & -0 \\ \hat{v}_E^n & -0 \\ \hat{v}_D^n & -0 \end{bmatrix} = H_{ZUPT} x_k + \begin{bmatrix} n_{vx} \\ n_{vy} \\ n_{vz} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Trong đó:

$$H_{ZUPT} = [O_{3 \times 3} \quad I_{3 \times 3} \quad O_{3 \times 6}]$$

1.3.4. Mô hình trị đo trị đo ZIHR

Từ công thức (4.7), Phương trình trị đo cho EKF đối với ZUPT được thiết lập như sau:

$$\delta z_k = [\psi_{first-stored}] = H_{ZIHR} x_k + n_{ax} \quad (4.9)$$

Trong đó :

$$H_{ZIHR} = [O_{1 \times 5} \quad 1 \quad O_{1 \times 6}]$$

Phương trình (4.8) và (4.9) có thể viết dưới dạng tổng quát như sau:

$$z_k = H_k x_k + n_k \quad (4.10)$$

Trong đó: z_k là véc tơ trị đo, H_k là ma trận hệ số biểu diễn mối quan hệ giữa trị đo hỗ trợ và véc tơ trạng thái, n_k là nhiễu của trị đo hỗ trợ tại thời điểm k .

1.4. Thử nghiệm các điều kiện ràng buộc giải tích

Bộ dữ liệu trong thử nghiệm được thu thập với hệ thống tích hợp bao gồm cảm biến quán tính vi cơ IMU ADS-16488 (ADIS, Mỹ) và máy thu GNSS một tần U-blox Neo-M8U được phát triển bởi nhóm nghiên cứu tại Viện Kỹ thuật cơ giới quân sự. Tần số đầu ra của IMU là 50Hz và tần số đầu ra của máy thu GNSS là 1Hz.

Khu thử nghiệm được tiến hành tại khu đô thị Resco, thuộc huyện Bắc Từ Liêm, Hà Nội (Hành trình tuyến thử nghiệm được thể hiện ở hình 4.5).



Hình 4.5. Thử nghiệm thực địa hệ thống



Hình 4.5. Hành trình tuyến thử nghiệm

Hành trình chuẩn được lấy là dữ liệu tích hợp INS với GNSS ở chế độ đo tương đối động thời gian thực bằng máy thu GNSS hai tần Trimble R2-GNSS (Mỹ). Dữ liệu chuẩn được xử lý với ước lượng trơn (đường màu xanh cây). Hành trình thử nghiệm là hành trình bị cắt bớt dữ liệu GNSS để cố tình tạo ra những đoạn không có GNSS với các khoảng thời gian là 30 giây và 60 giây. Sau đó tiến hành phân tích các trường hợp: INS/GNSS thuần túy, INS/GNSS với NHC và INS/GNSS với NHC+ZUPT. Mức cải thiện của về độ chính xác của NHC

Bảng 4.1. So sánh sai số trung phương các phương án ước lượng

RMSE	INS/GNSS	INS/GNSS+NHC	INS/GNSS+NHC+ZUPT
North (m)	1.100	1.022	0.924
East (m)	0.809	0.342	0.499
Up (m)	1.424	0.639	0.196
3D (m)	1.973	1.253	1.068

Mức cải thiện (%)		37	46
Roll (°)	0.161	0.074	0.047
Pitch (°)	0.518	0.482	0.052
Heading (°)	1.238	0.365	0.278
3D (°)	1.352	0.609	0.287
Mức cải thiện (%)		55	79

Kết quả thử nghiệm cho thấy rằng, việc áp dụng các điều kiện ràng buộc rải tích giúp cải thiện đáng kể về độ chính xác định vị và tư thế, đặc biệt là trong những khoảng thời gian tín hiệu GPS bị mất, điều này có thể thấy rõ ở hình 6. Về thống kê tổng thể, NHC giúp cải thiện độ khoảng từ 40-60% độ chính xác về vị trí và tư thế so với không sử dụng NHC. Khi áp dụng ZUPT, mức cải thiện về độ chính xác tăng thêm chút ít, khoảng từ 50-80% so với INS/GNSS thuần túy như thể hiện ở bảng 4.1.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết luận

Sau quá trình nghiên cứu và thực hiện đề tài, nhóm nghiên cứu có một số kết luận như sau:

Đề tài đã tìm hiểu và thử nghiệm hệ thống tích hợp INS/GNSS dựa vào cảm biến quán tính và máy thu GNSS cùng các phụ kiện khác và một hệ thống phần mềm chuyên dụng để xử lý số liệu tích hợp INS/GNSS. Thử nghiệm trên hệ thống cho thấy rằng một hệ thống tích hợp INS/GNSS có thể cung cấp các thông tin về vị trí, vận tốc và tư thế một cách liên tục ở tần số cao (50Hz) và có thể khắc phục được những nhược điểm của từng hệ thống INS hay GNSS khi hoạt động ở chế độ độc lập như giúp ổn định về độ chính xác ngay cả trong những môi trường gián đoạn hoặc khuất, nhiễu tín hiệu GNSS.

Đề tài cũng đã nghiên cứu và thử nghiệm các phương pháp ràng buộc giải tích nhằm cải thiện độ chính xác của hệ thống tích hợp. Thử nghiệm cho thấy rằng các phương pháp ràng buộc giải tích giúp cải thiện đáng kể độ chính xác của hệ thống INS/GNSS thuần túy, đặc biệt là trong những điều kiện mà GNSS bị gián đoạn hoặc khuất, nhiễu tín hiệu. Một trong những ưu điểm của các phương pháp ràng buộc giải tích được áp dụng trong nghiên cứu này là chúng không cần phải mất thêm chi phí cho những phần cứng hay cảm biến phụ trợ mà được thực thi, áp dụng thông qua công tác xử lý bằng trên phần mềm.

Kiến nghị

Cần tiếp tục khai thác và ứng dụng hệ thống dẫn đường tích hợp INS/GNSS vào các ứng dụng cụ thể như định vị, định hướng trong hầm lò, các công trình ngầm. Ngoài ra, thông tin về tư thế cung cấp bởi hệ thống INS/GNSS cũng có thể được sử dụng trong các ứng dụng quan trắc độ ổn định các công trình xây dựng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Groves, P. D., 2008. Principles of GNSS, inertial, and multi-sensor integrated navigation systems, Artech House, Boston, USA.
- [2] Chiang, K.-W., Duong, T.T. and Liao, J.-K., 2013. The Performance Analysis of a Real-Time Integrated INS/GPS Vehicle Navigation System with Abnormal GPS Measurement Elimination. *Sensors*, 13, pp. 10599–10622.
- [3] Titterton, D.H., Weston, J.L., 2004. Strapdown inertial navigation technology, second edition, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, USA.
- [4] George T. Schmidt; INS/GPS Technology trends, RTO-EN-SET-064, 2003
- [5]. Kalman, R.E. A new research approach to Linear Filtering and Prediction Problem. *Journal of Basic Engineering*, 1960, Vol.82, Series D, 35-45.
- [6]. Julier, S., Uhlmann, K., 2004. Unscented filtering and nonlinear estimation. *Proceedings of the IEEE*, 92(3), pp. 401-422
- [7] Schweitzer, J., 2012. Modular Positioning using Different Motion Models. Stuttgart, Germany, In the Proceedings on 3rd International Conference on Machine Control and Guidance.
- [8]. Rauch, H.; Tung, F. and Striebel, C. Maximum likelihood estimates of linear dynamic systems, *AIAA J.*, 1965, Vol.3, No.8, 1445-1450.
- [9] Y. W. Huang a, *, C. Y. Li a, H. W. Wu a, H. W. Chang a, H. W. Hu a, and K. W. Chiang a., Improving the attitude accuracy of a low cost MEM IMU/GPS integrated system using GPS heading sensors, *ISPRS Archives – Volume XXXVIII - Part 1*, 2010.
- [10] Schweitzer, J., 2012. Modular Positioning using Different Motion Models. Stuttgart, Germany, In the Proceedings on 3rd International Conference on Machine Control and Guidance.