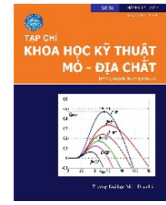




## Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <http://tapchi.humg.edu.vn/>



# Nâng cao độ chính xác hệ thống dẫn đường tích hợp GNSS/INS cùng điều kiện ràng buộc vận tốc không đổi với các hướng vuông góc với hướng di chuyển

Dương Thành Trung<sup>1,\*</sup>, Trương Minh Hùng<sup>1</sup>, Trần Trung Chuyên<sup>2</sup>, Đỗ Văn Dương<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Khoa Trắc địa-Bản đồ và Quản lý đất đai, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Việt Nam

<sup>2</sup> Khoa Công nghệ Thông tin, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Việt Nam

<sup>3</sup> Khoa Trắc địa-Bản đồ, Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Hà nội, Việt Nam

### THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:  
 Nhận bài 18/10/2016  
 Chấp nhận 10/02/2017  
 Đăng online 28/02/2017

Từ khóa:  
 INS  
 GNSS  
 NHC  
 Định vị  
 Dẫn đường

### TÓM TẮT

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. Với kích thước nhỏ, nhẹ và giá thành thấp, các cảm biến quán tính vi cơ (MEMS IMU) đang là xu hướng trong các nghiên cứu và được sử dụng cho các ứng dụng thực tế. Tuy nhiên, các nghiên cứu liên quan đã chỉ ra rằng độ chính xác của các hệ thống có sử dụng MEMS IMU vẫn còn thấp, đặc biệt là trong những điều kiện môi trường mà tín hiệu GNSS bị nhiễu, khuất. Để khắc phục vấn đề này, nghiên cứu này giới thiệu việc áp dụng điều kiện ràng buộc "Vận tốc không-NHC (Non-Holonomic Constraint)" đối với các hướng vuông góc với hướng di chuyển nhằm nâng cao độ chính xác của hệ thống dẫn đường tích hợp INS/GNSS. Hiệu quả của phương pháp đã được làm rõ ở phần thử nghiệm và phân tích kết quả của bài báo, trong đó mức cải thiện của hệ thống INS/GNSS với NHC so với không áp dụng NHC là từ 40-60% về độ chính xác vị trí và tư thế.

© 2017 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

## 1. 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 (Niu et al., 2007; Chiang et al., 2013). 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 GNSS/INS 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

\*Tác giả liên hệ

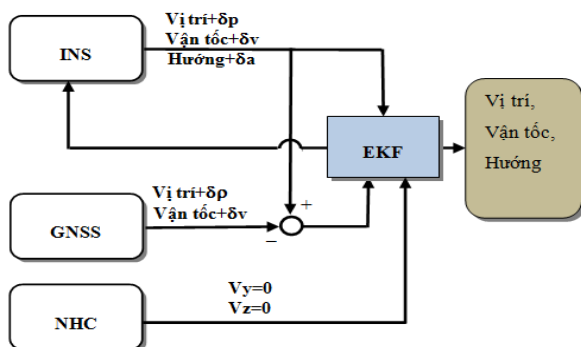
E-mail: [duongthanhtrung@humg.edu.vn](mailto:duongthanhtrung@humg.edu.vn)

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 vị - 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 GNSS/INS 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 (Nguyễn Văn Thắng, và nnk, 2012).

Việc nâng cao độ chính xác của hệ thống tích hợp GNSS/INS, có thể tích hợp thêm các cảm biến như tích hợp thêm máy đo vận tốc như đã được giới thiệu trong nghiên cứu (Niu et al., 2007), hoặc bằng các phép kiểm định trong phòng thí nghiệm để xác định và giảm bớt các nguồn sai số hệ thống như trong tài liệu (Luu Mạnh Hà và nnk, 2007; Trần Trung Chuyên và nnk, 2016). 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 trung nghiên cứu các điều kiện ràng buộc giải tích "Vận tốc không" đối với các hướng vuông góc với hướng di chuyển để nâng cao độ chính xác của các hệ thống định vị - dẫn đường tích hợp. Nội dung bài báo này trước hết sẽ giới thiệu về nguyên lý tích hợp GNSS/INS với Non-Holonomic Constraint (NHC). Tiếp đó là mô hình toán học và xử lý số liệu với phép lọc Kalman. Phần cuối là tính toán thực nghiệm và kết luận.

## 2. Tích hợp GNSS/INS với NHC

### 2.1. Thiết kế hệ thống tích hợp



Hình 1. Phương pháp tích hợp lỏng INS/GPS + NHC

Trong nghiên cứu này, một bộ tích hợp GNSS và INS với điều kiện NHC được áp dụng. Trong bộ tích hợp này, máy thu GNSS độc lập trong việc xử lý số liệu để cung cấp lời giải về vị trí và vận tốc. INS với một cơ chế xử lý số liệu từ tín hiệu đầu ra của IMU sẽ cung cấp các thông tin về vị trí, vận tốc và hướng. NHC cung cấp các điều kiện ràng buộc về vận tốc đối với các hướng vuông góc với hướng di chuyển. Các thông tin này được chuyển tới bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) nhằm ước lượng trị xác xuất nhất. Cấu trúc tích hợp được mô tả ở Hình 1.

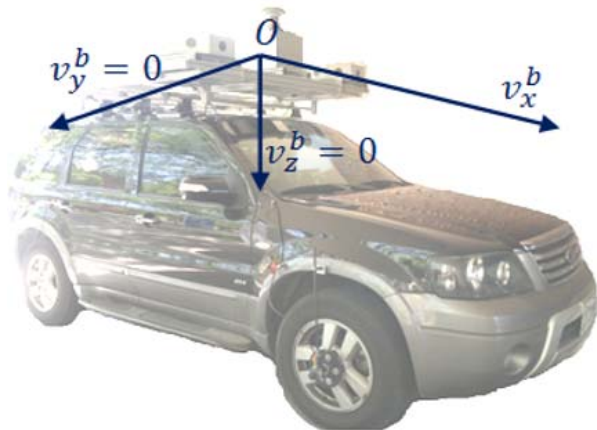
### 2.2. Điều kiện ràng buộc "Vận tốc không" đối với các hướng vuông góc với hướng di chuyển (Non - holonomic Constraint - NHC)

Dissanayake và các tác giả (Dissanayake et al., 2001) đề xuất một điều kiện ràng buộc gọi là *non - holonomic constraint (NHC)* để áp dụng đối với các ứng dụng dẫn đường mặt đất. Bản chất của phương pháp này 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. Đối với các phương tiện mặt đất, trong điều kiện bình thường, các thành phần vận tốc theo các hướng vuông góc với hướng chuyển động ( $y$  và  $z$ ) trong hệ tọa độ vật thể sẽ bằng không, như được thể hiện trong Phương trình (1) và Hình 2:

$$\begin{cases} v_y^b = 0 \\ v_z^b = 0 \end{cases} \quad (1)$$

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 (Groves, 2008).

NHC là một điều kiện ràng buộc giải tích, không cần sử dụng cảm biến phụ. Do đó, nó có thể được áp dụng cho bất kỳ hệ thống dẫn đường tích hợp trên đất liền để tăng độ chính xác của lời giải dẫn đường. Tuy vậy để phương pháp NHC phát huy được hiệu quả thì giả thiết rằng phương tiện mang không nhảy cóc khỏi mặt đất, không rơi tự do và không trượt ngang phải được thỏa mãn (Dissanayake et al., 2001).



Hình 2. Nguyên lý của điều kiện NHC

### 2.3. Xử lý số liệu với EKF

Việc ước lượng là cần thiết trong phép tích hợp INS/GPS+NHC để cung cấp các thông tin định vị, định hướng tốt nhất. Thuật toán ước lượng được sử dụng rộng rãi nhất là phép lọc EKF với cơ chế tính toán đơn giản, độ tin cậy cao. Để áp dụng phép lọc EKF, trước hết cần thiết lập các mô hình toán học.

#### 2.3.1. Mô hình hệ thống

Mô hình hệ thống được xây dựng dựa trên mô hình sai số INS, dạng liên tục theo thời gian, theo (Rogers, 2003) có dạng

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{r}^n \\ \delta \dot{v}^n \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & O_{3 \times 3} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ O_{3 \times 3} & 0 & F_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta r^n \\ \delta v^n \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ C_b^n & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & C_b^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta f^b \\ \delta \omega_{ib}^b \end{bmatrix} \quad (2)$$

Trong đó  $\delta \dot{r}^c$ ,  $\delta \dot{v}^c$ , và  $\dot{\psi}$  là đạo hàm theo thời gian của sai số vị trí, vận tốc và hướng trong hệ tọa độ vuông góc phẳng địa phương, xem định nghĩa chi tiết trong (Rogers, R.M., 2003);  $C_b^n$  là ma trận xoay từ b-frame sang n-frame;  $\delta f^b$  và  $\delta \omega_{ib}^b$  là véc tơ sai số lực quy đổi và vận tốc góc, đầu ra của IMU.

$$F_{11} = [-\omega_{en}^n \times]; F_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; F_{22} = [-\omega_{en}^n + 2\omega_{ie}^n \times] \quad (3)$$

$$F_{23} = [f^b \times]; F_{33} = [-\omega_{en}^n + \omega_{ie}^n] \quad (4)$$

$$F_{21} = \begin{bmatrix} -g/r_e & 0 & 0 \\ 0 & -g/r_e & 0 \\ 0 & 0 & -2g/(r_e + h) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Trong đó  $f^b$  là lực quy đổi,  $g$  là gia tốc trọng trường,  $\omega_{en}^n$  là véc tơ vận tốc quay của vật thể trong n-frame so với trái đất,  $\omega_{ie}^c$  là véc tơ vận tốc quay của trái đất so với hệ tọa độ quán tính,  $r_e$  là bán kính của trái đất,  $h$  là độ cao ellipsoid trái đất.

Công thức (2) có thể được viết lại như sau:

$$\dot{x} = Fx + Gu \quad (6)$$

Trong đó

$$x = \begin{bmatrix} \delta r^c \\ \delta v^c \\ \psi \end{bmatrix}; F = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & O_{3 \times 3} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & F_{33} \end{bmatrix}; G = \begin{bmatrix} O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ C_b^n & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & C_b^n \end{bmatrix}; u = \begin{bmatrix} \delta f^b \\ \delta \omega_{ib}^b \end{bmatrix}$$

Công thức (6) được viết dưới dạng rời rạc về thời gian như sau:

$$x(t_{k+1}) = \Phi(t_k, t_{k+1})x(t_k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} \Phi(t_{k+1}, \tau)G(\tau)w(\tau)d\tau \quad (7)$$

Hay có thể viết tắt dưới dạng:

$$x_{k+1} = \Phi_{k;k+1}x_k + w_k \quad (8)$$

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, các sai số hệ thống của cảm biến gia tốc và con quay hồi chuyển.

$\Phi_{k;k+1}$  là ma trận tính chuyển trạng thái từ thời điểm k đến k+1, và được xác định theo công thức:

$$\Phi_{k;k+1} = \exp(F(t_k)\Delta t_{k+1}) \approx I + F(t_k)\Delta t_{k+1} \quad (9)$$

$w_k$  là nhiễu quá trình của hệ thống, nó có kỳ vọng bằng không và độc lập theo thời gian, do vậy ma trận phương sai của nhiễu hệ thống được xây dựng dựa trên (Brown and Hwang, 1992,) có dạng:

$$E[w_k w_k^T] = \begin{cases} Q_k, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases} \quad (10)$$

Trong thực tế thì  $Q_k$  thường được xác định thông qua các phép kiểm định IMU.

#### 2.3.2. 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:

$$\delta z_{GNSS(k)} = [r_{INS}^e - r_{GNSS}^e] = H_{GNSS} C_n^e x_k + \eta_r \quad (11)$$

Trong đó:

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

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

$\eta_r$ : là nhiễu về vị trí của GNSS, thực tế được gán là độ lệch chuẩn về vị trí của lời giải GNSS.

### 2.3.3. Mô hình trị đo trị đo NHC

Phương trình trị đo cho EKF đối với NHC được thiết lập như sau:

$$\tilde{z}_k = \begin{bmatrix} v_y^b & -0 \\ v_z^b & -0 \end{bmatrix} = H_{NHC} C_n^b x_k + \begin{bmatrix} \varepsilon_{vy} \\ \varepsilon_{vz} \end{bmatrix} \quad (12)$$

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

$\varepsilon_{vy}$  và  $\varepsilon_{vz}$  lần lượt là nhiễu vận tốc lần lượt theo hướng y và z

$$H_{NHC} = [O_{2 \times 4} \quad I_{2 \times 2} \quad O_{2 \times 3}]$$

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

$$z_k = H_k x_k + n_k \quad (13)$$

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.

### 2.3.4. Tính toán với EKF

Dựa vào mô hình toán học hệ thống trong công thức (8), Véc tơ trạng thái và ma trận hiệp phương sai tương ứng ở thời điểm k được ước tính dựa trên các tham số đó ở thời điểm k-1.

$$\begin{aligned} \hat{x}_k^- &= \Phi_{k-1;k} \hat{x}_{k-1} \\ P_k^- &= \Phi_{k-1;k} P_{k-1} \Phi_{k-1;k}^T + Q_k \end{aligned} \quad (14)$$

Khi có các trị đo hỗ trợ, véc tơ trạng thái và ma trận hiệp phương sai được cập nhật dựa theo

công thức sau:

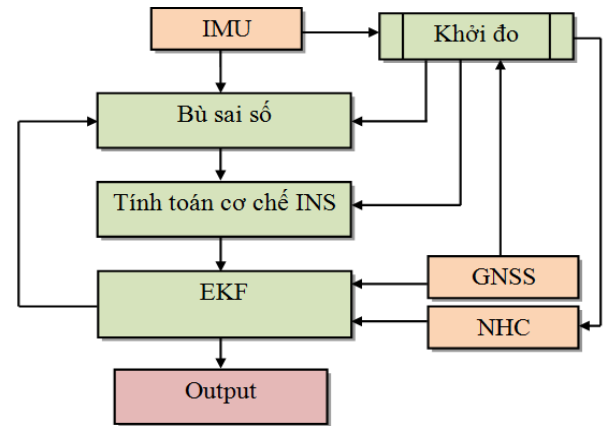
$$K_k = P_k^- H_k^T [H_k P_k^- H_k^T + R_k]^{-1} \quad (15)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H_k \hat{x}_k^-) \quad (16)$$

$$P_k = P_k^- - K_k H_k P_k^- \quad (17)$$

Trong đó:  $\hat{x}_{k-1}, P_{k-1}, \hat{x}_k^-, P_k^-, \hat{x}_k, P_k$  lần lượt là véc tơ trạng thái và ma trận hiệp phương sai tại thời điểm k-1, dự đoán sai tại thời điểm k, cập nhật tại thời điểm k,  $R_k$  là ma trận hiệp phương sai của nhiễu trị đo.

## 3. Tính toán thực nghiệm



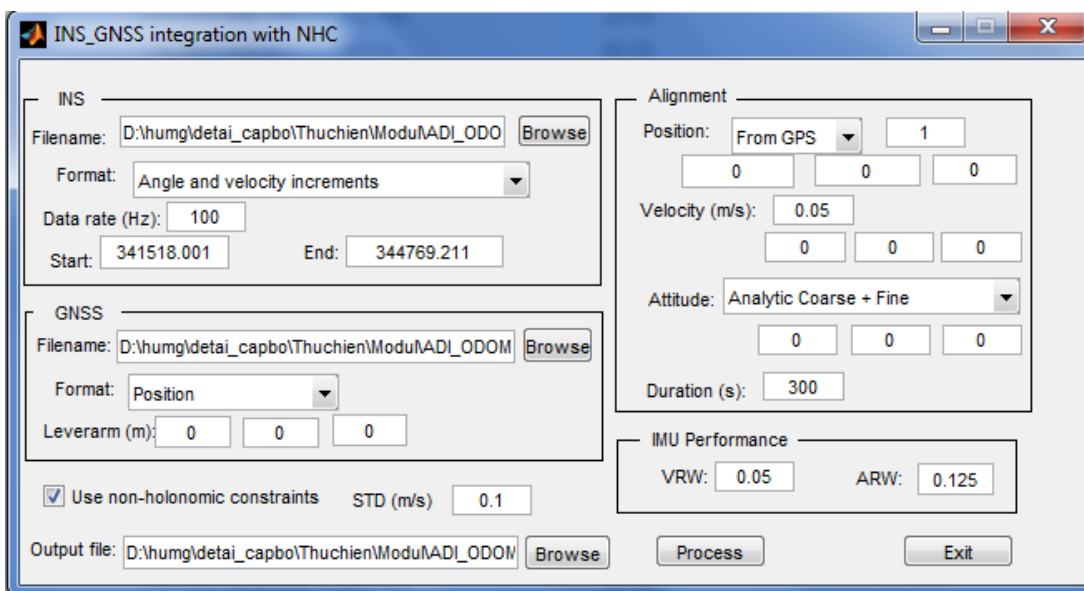
Hình 3. Sơ đồ khối hệ tích hợp INS/GNSS+NHC

Để thử nghiệm lý thuyết đã trình bày ở các phần trên, một mô đun phần mềm được lập dựa trên ngôn ngữ lập trình Matlab. Sơ đồ khối của mô đun phần mềm được trình bày ở Hình 3 và giao diện của chương trình được thiết kế như ở Hình 4.

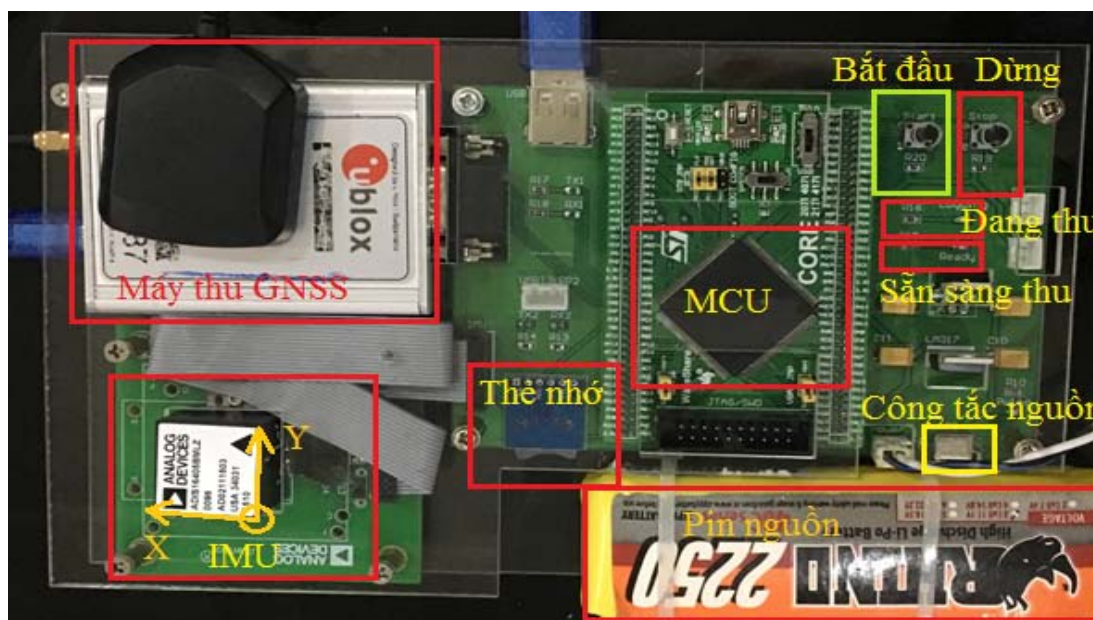
Bộ dữ liệu được thu thập với hệ thống tích hợp bao gồm cảm biến quán tính vi cơ IMU ADS-16405 (ADIS, Mỹ) và máy thu GNSS một tần U-blox EVK-6T (U-blox, Thụy sĩ), được phát triển bởi nhóm nghiên cứu tại đại học Mỏ-Địa chất. Tần số đầu ra của IMU là 50Hz và tần số đầu ra của máy thu GNSS là 1Hz. Hình ảnh hệ thống được trình bày ở Hình 5.

Khu thử nghiệm được tiến hành tại khu độ thị Resco, thuộc huyện Bắc Từ Liêm, Hà Nội (Hành trình tuyến thử nghiệm được thể hiện ở Hình 6).

Hành trình chuẩn được lấy là dữ liệu tích hợp INS với GNSS ở chế độ đo tương đối đồng thời gian thực bằng máy thu GNSS hai tần Trimble R7-GNSS (Mỹ). Dữ liệu chuẩn được xử lý với ước lượng tron



Hình 4. Giao diện mô đun chương trình

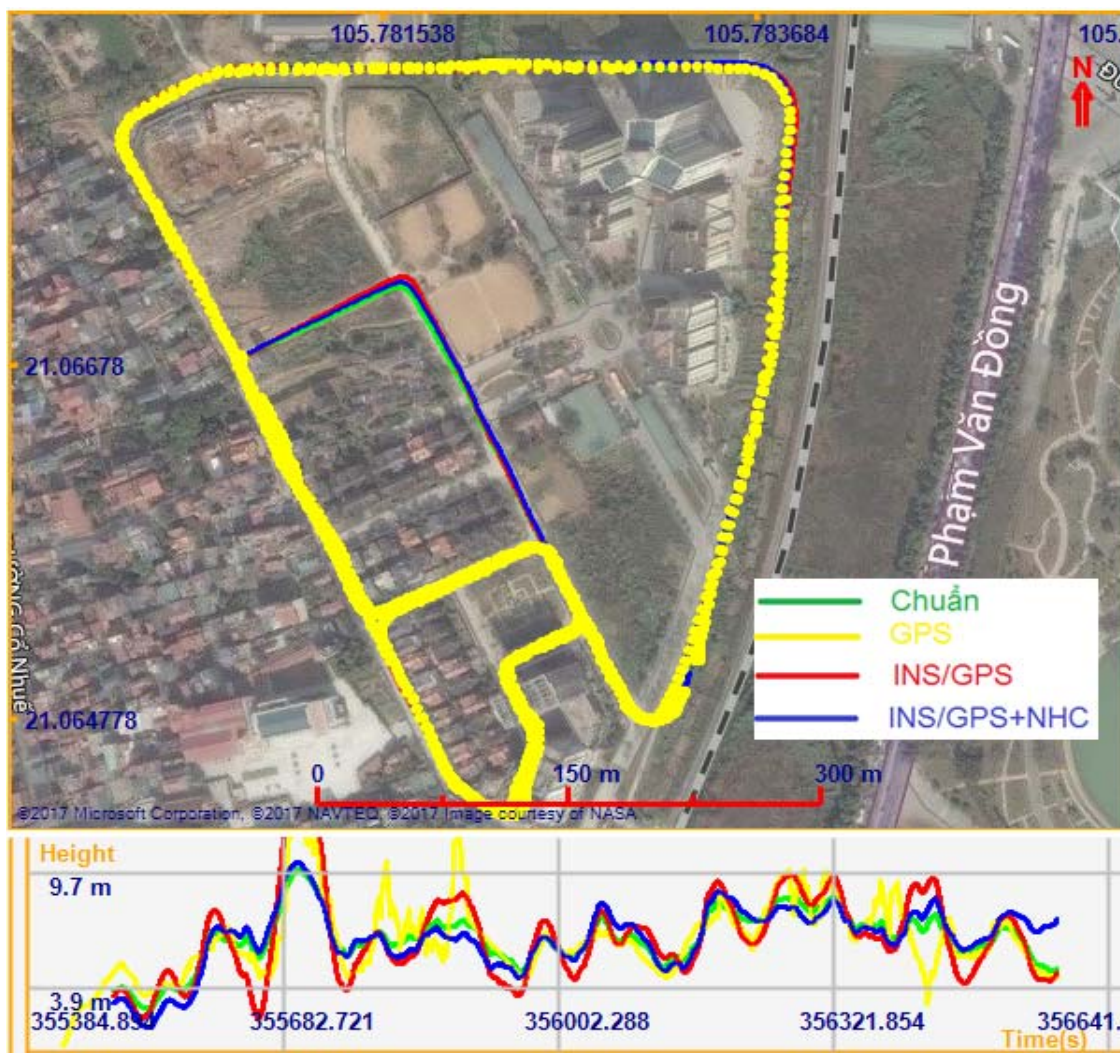


Hình 5. Hệ thống tích hợp INS/GNSS

(đường màu xanh cây). Hành trình thử nghiệm là hành trình bị cắt bớt dữ liệu GPS để cố tình tạo ra những đoạn không có GPS với các khoảng thời gian là 30 giây và 60 giây. Sau đó tiến hành phân tích các trường hợp: không áp dụng NHC và có áp dụng NHC. Kết quả so sánh về sai số vị trí và tư thế được thể hiện ở các hình 7, 8, và bảng 1. Mức cải thiện của về độ chính xác của NHC ( $RMSE_{INS/GNSS+NHC}$ ) so với INS/GNSS thuần túy ( $RMSE_{INS/GNSS}$ ) được xác định theo công thức:

$$\text{Mức cải thiện (\%)} = \frac{(RMSE_{INS/GNSS} - RMSE_{INS/GNSS+NHC})}{RMSE_{INS/GNSS}} * 100 \quad (18)$$

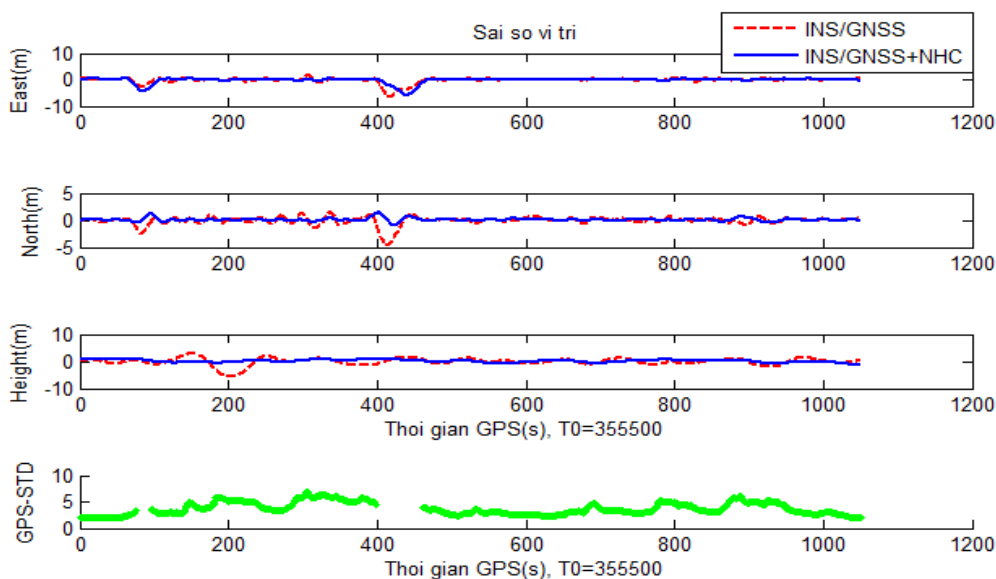
Kết quả thử nghiệm cho thấy rằng, việc áp dụng NHC giúp cải thiện đáng kể về độ chính xác định vị và tư thế, đặc biệt là trong những khoảng thời gian tín hiệu GPS bị mất, điều này có thể thấy rõ ở hình 6. Về tổng kê tổng thể, NHC giúp cải thiện độ khoảng từ 40-60% độ chính xác về vị trí và tư thế so với không sử dụng NHC.



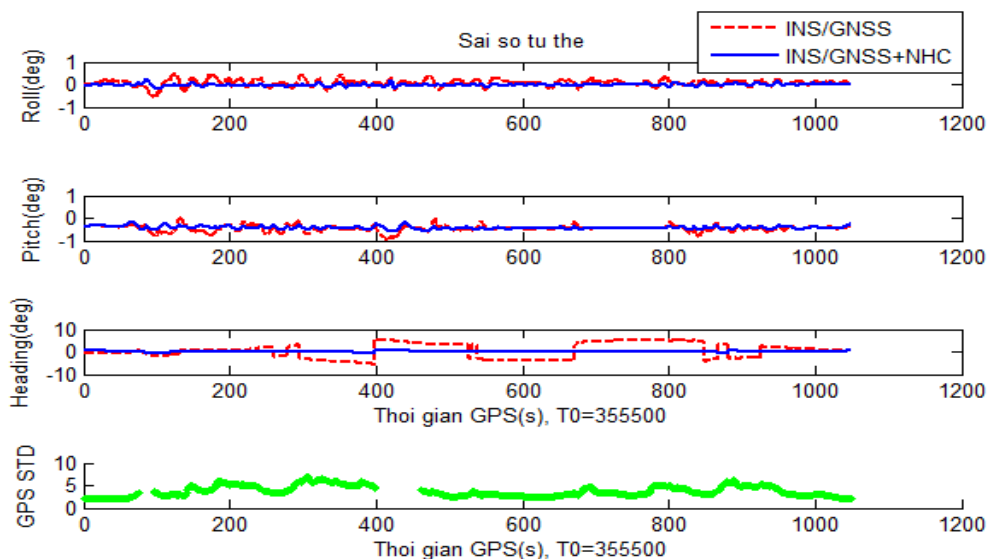
Hình 6. Tuyến thử nghiệm thực địa

Bảng 1. So sánh sai số vị trí và tư thế

RMSE	INS/GNSS	INS/GNSS+NHC
Độ chính xác vị trí		
East (m)	1.08	1.02
North (m)	0.76	0.28
Up (m)	1.35	0.49
3D (m)	1.89	1.17
Mức cải thiện(%)	-	38
Độ chính xác về tư thế		
Roll (°)	0.16	0.06
Pitch (°)	0.47	0.43
Heading (°)	1.31	0.27
3D (°)	1.34	0.51
Mức cải thiện(%)	-	62



Hình 7. So sánh về sai số vị trí



Hình 8. So sánh về sai số tư thế

### 6. Kết luận:

Bài báo đã giới thiệu cơ sở lý thuyết của hệ thống dẫn đường tích hợp INS/GPS với điều kiện điều kiện ràng buộc “Vận tốc không” đối với các hướng vuông góc với hướng di chuyển, nhằm nâng cao độ chính xác của hệ thống dẫn đường tích hợp INS/GPS sử dụng cảm biến quán tính vi cơ IMU giá thấp. Mô hình toán học cho phép lọc Kalman đã được giới thiệu và áp dụng vào xây dựng mô đun phần mềm thử nghiệm. Từ kết quả thực nghiệm và các phép phân tích kết quả cho

thấy rằng với điều kiện ràng buộc NHC, độ chính xác về vị trí và hướng được cải thiện một cách đáng kể so với hệ thống INS/GPS thuần túy.

Do điều kiện ràng buộc NHC cũng có những nhược điểm như đã đề cập ở mục 2.2, không nên áp dụng NHC trong những trường hợp mà giả thiết ràng buộc của nó bị phá vỡ, khi đó NHC không những không làm cải thiện mà còn làm giảm độ chính xác của hệ thống như trong trường hợp của máy bay lên thẳng hay vận hành bằng cầu thang máy, hoặc khi vận hành trong điều kiện đường xá trơn trượt. Thêm vào đó, trong điều kiện

tín hiệu GNSS tốt, trị đo cập nhật từ GNSS sẽ cho kết quả tốt hơn NHC, do vậy NHC chỉ nên được áp dụng trong điều kiện nhiễu hoặc khuất tín hiệu GNSS.

Trong các nghiên cứu tới, Việc cải thiện thuật toán ước lượng cũng sẽ tiếp tục được nghiên cứu để cải thiện hơn nữa độ chính xác về vị trí và phương hướng của hệ thống dẫn đường tích hợp

### Tài liệu tham khảo

- Chiang, K.W., Duong, T.T. and Liao, J.K., 2013. The Performance Analysis of a Real-Time 8 Integrated INS/GPS Vehicle Navigation System with Abnormal GPS Measurement Elimination. *Sensors* 13, 10599-10622.
- Dissanayake, G., Sukkarieh, S., Nebot, E., and Durrant, W.H., 2001. The aiding of a low cost, strapdown inertial unit using modeling constraints in land vehicle applications. *IEEE Transaction on Robotics and Automation* 17, 731-747.
- Groves, P. D., 2008. *Principles of GNSS, inertial, and multi-sensor integrated navigation systems*. Artech House, Boston, USA.
- Luu Manh Ha, Tran Duc Tan, Nguyen Thanh Long, Nguyen Dinh Duc, Nguyen Phu Thuy, 2007. Errors Determination of The MEMS IMU. *Journal of Science VNUH* 4, 6-14.
- Niu, X.; Nassar, S. and El-Sheimy, N., 2007. An accurate land-vehicle MEMS IMU/GPS navigation system using 3D auxiliary velocity updates, *Journal of the Institute of Navigation* 54(3), 177-188.
- Nguyen Van Thang, Pham Manh Thang, Tran Duc Tan, 2012. The performance improvement of a low cost INS/GPS integration system using the street return algorithm. *Vietnam Journal of Mechanics* 34(4), 271-280.
- Rogers, R.M., 2003. *Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems*. Second Edition, AIAA, Virginia, USA.
- Trần Trung Chuyên, Nguyễn Thị Mai Dung, Lê Hồng Anh, Nguyễn Trường Xuân, Đào Ngọc Long, 2016. Phân tích và mô hình hóa dữ liệu cảm biến quán tính của iPhone sử dụng phương sai Allan. *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất* 55, 97-104.

## ABSTRACT

### Improving the Accuracy of the INS/GNSS Integrated Navigation System with Non-Holonomic Constraint

Trung Thanh Duong<sup>1</sup>, Hung Minh Truong<sup>1</sup>, Chuyen Trung Tran<sup>2</sup>, Duong Van Do<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Geomatics and Land Administration, Hanoi University of Mining and Geology, Vietnam

<sup>2</sup> Faculty of Information Technology, Hanoi University of Mining and Geology, Vietnam

<sup>3</sup> Faculty of Surveying and Mapping, Hanoi University of Natural Resources and Environment, Vietnam

The integration of Global Navigation Satellite System (GNSS) and Inertial Navigation System (INS) is now widely used for navigation applications and Mobile Mapping System (MMS) to seamlessly determining position, velocity and attitude of the mobile platform. With low cost, small size, light weight, The Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) IMU is now the trend in research and using for many applications. However, researchs in the literature indicated that the performance of the low cost MEMS IMU systems is still poor, particularly, in case of GNSS - noise and - denied environment. To overcome this problem, this research apply an analytic constraint called Non-holonomic constraint in the data fusion engine such as Extended Kalman Filter to improve the performance of the system. The benefit of the proposed method will be demonstrated through experiments and data analysis.

Keywords: INS, GNSS, NHC, positioning, navigation, Kalman filter