

XÂY DỰNG BỘ LỌC KALMAN MỞ RỘNG CHO THUẬT TOÁN ĐỊNH VỊ QUÁN TÍNH

IMPLEMENT AN EXTENDED KALMAN FILTER FOR INERTIAL NAVIGATION ALGORITHM

Phạm Duy Dưỡng¹, Đoàn Quang Vinh²

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật - Đại học Đà Nẵng; duyduongd2@gmail.com

²Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng; dqvinh@dut.udn.vn

Tóm tắt - Cảm biến quán tính (IMU) ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong ước lượng chuyển động sử dụng thuật toán định vị quán tính (INA). INA dựa trên nguyên tắc kết hợp tích phân hai lớp của gia tốc và tích phân của vận tốc góc. Tuy nhiên, việc sử dụng nguyên lý tích phân sẽ làm cho sai số ước lượng tích lũy rất nhanh theo thời gian do nhiễu của các thành phần trong cảm biến. Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất việc xây dựng INA sử dụng bộ lọc Kalman mở rộng để nâng cao độ chính xác của việc ước lượng quỹ đạo chuyển động của đối tượng. Ngoài ra, bài báo còn phân tích rõ hạn chế và giới thiệu một số phương pháp phổ biến để nâng cao độ chính xác của INA sử dụng bộ lọc Kalman mở rộng.

Từ khóa - Cảm biến quán tính; IMU; định vị quán tính; bộ lọc Kalman; Kalman mở rộng

1. Đặt vấn đề

IMU được sử dụng rộng rãi trong các hệ dẫn đường quán tính, bao gồm một cảm biến gia tốc theo 3 trục và cảm biến vận tốc góc theo 3 trục. Trước đây, IMU chủ yếu được sử dụng trong quân sự và hàng không vũ trụ. Ngày nay, cùng với sự phát triển của công nghệ vi – cơ – điện tử, IMU ngày càng được chế tạo với kích thước nhỏ và giá thành ngày càng rẻ và có thể ứng dụng vào việc ước lượng quỹ đạo chuyển động.

Nguyên lý cơ bản của việc ước lượng quỹ đạo chuyển động của IMU đó là kết hợp tích phân hai lớp của gia tốc (cho giá trị quãng đường di chuyển) và tích phân của vận tốc góc (cho giá trị là hướng di chuyển). Từ quãng đường di chuyển và hướng di chuyển ta nội suy ra được quỹ đạo di chuyển của đối tượng chuyển động (cảm biến được gắn lên đối tượng chuyển động) [1]. Đây chính là nguyên lý cơ bản của INA. Tín hiệu gia tốc và vận tốc góc được lấy từ cảm biến gia tốc và cảm biến vận tốc góc tích hợp trong IMU.

Hệ thống định vị quán tính ngày càng được sử dụng rộng rãi trong ước lượng quỹ đạo chuyển động do khắc phục được nhược điểm của hệ thống định vị dùng camera đó là không bị giới hạn bởi không gian làm việc và khắc phục được nhược điểm của hệ thống định vị toàn cầu GPS đó là làm việc được ở những nơi không có sóng GPS (hoặc sóng GPS yếu) [2].

Tuy nhiên, trong các IMU luôn tồn tại các thành phần nhiễu của giá trị đo nên khi sử dụng nguyên lý tích phân để ước lượng quỹ đạo chuyển động thì sai số sẽ bị tích lũy theo thời gian, đặc biệt là IMU dùng trong dân dụng có giá thành rẻ và độ chính xác thấp. Điều này đặt ra yêu cầu phải có các phương pháp để giảm sai số và nâng cao độ chính xác trong ước lượng. Trong đó, bộ lọc Kalman được ứng dụng để lọc nhiễu và cập nhật các giá trị đo cho việc ước lượng quỹ đạo chuyển động. Một điều cần đặc biệt chú ý là các giá trị đo được của IMU không phải là giá trị đo của

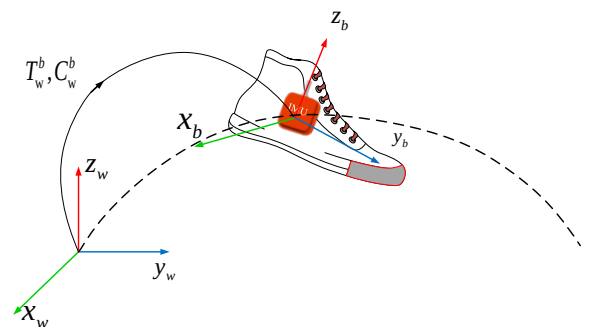
Abstract - Inertial Measurement Unit (IMU) is widely used in motion estimation based on Inertial Navigation Algorithm (INA). INA is based on the principle of combining double integration of acceleration and integration of angular velocity. However, using the integral principle will make the estimated error of accumulation very fast over time due to noise of the components in the sensor. In this paper we present the construction of INA using the extended Kalman filter to improve the accuracy of the object's motion trajectory estimation. In addition, the article also analyzes the limitations and introduces some common methods to improve the accuracy of INA using extended Kalman filter.

Key words - Inertial sensor; IMU; Inertial Navigation Algorithm; Kalman Filter; extend Kalman Filter

bộ lọc Kalman mà là thông số mô hình của bộ lọc. Thực vậy, giá trị ước lượng của bộ lọc là quỹ đạo chuyển động bao gồm vị trí và hướng, trong khi giá trị đo của IMU là gia tốc và vận tốc góc. Hơn nữa, mô hình bộ lọc khi sử dụng các biến trạng thái là các giá trị ước lượng cuối cùng của INA (vị trí và hướng của chuyển động) là phi tuyến. Do vậy, đặt ra nhu cầu cần phải xây dựng bộ lọc Kalman mở rộng để ước lượng quỹ đạo của chuyển động.

Trong bài báo này, nhóm tác giả đề xuất xây dựng INA và bộ lọc Kalman mở rộng để ước lượng quỹ đạo chuyển động của đối tượng có gắn IMU. Ngoài ra, nhóm tác giả còn xây dựng các phương trình cập nhật cho bộ lọc Kalman để nâng cao độ chính xác trong một số trường hợp đơn giản minh chứng cho hoạt động và độ chính xác của thuật toán xây dựng.

2. Xây dựng INA



Hình 1. Ước lượng chuyển động bàn chân sử dụng IMU

Để giám sát chuyển động của một đối tượng, một IMU được gắn cố định lên đối tượng đó. Lúc này quỹ đạo chuyển động của đối tượng được xem như trùng với quỹ đạo chuyển động của IMU. Hình 1 thể hiện ứng dụng định vị quán tính để phân tích chuyển động của bàn chân. Trong

đó, quỹ đạo chuyển động của bàn chân chính là vị trí và hướng của hệ trục tọa độ gắn với bàn chân (BCS – Body Coordinate System) trong hệ tọa độ định vị (WCS – World Coordinate System). Vị trí và hướng này chính là vector tịnh tiến T_w^b và ma trận quay C_w^b chuyển từ hệ trục WCS sang BCS. BCS thường được chọn trùng với hệ trục tọa độ vật lý của IMU. Gốc của WCS thường được chọn trùng với BCS tại thời điểm đầu của chuyển động, trục z_w hướng thẳng đứng lên trên.

Trong INA, nhóm tác giả đặt $v \in \mathbb{R}^3$ và $r \in \mathbb{R}^3$ là vận tốc và vị trí của IMU trong WCS. Đặt $C(q) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là ma trận quay từ WCS sang BCS tương ứng với quaternion [3] $q \in \mathbb{R}^4$. Lúc này $r \equiv T_w^b$ và $C(q) \equiv C_w^b$. Việc thực hiện phép quay trong không gian có thể được xác định theo nhiều cách khác nhau như ma trận quay DCM, quaternion, phương pháp Euler. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả xây dựng hướng của BCS theo phương pháp quaternion.

2.1. Xây dựng phương trình các vi phân cho định vị quán tính

Quaternion q là phép quanh một vector đơn vị u một góc ϕ được định nghĩa như sau:

$$q = \left[\cos \frac{\phi}{2} \quad \sin \frac{\phi}{2} u \right] \in \mathbb{R}^4 \quad (1)$$

Do WCS cố định trong khi BCS thay đổi theo thời gian nên ta có thể biểu diễn quaternion q tại thời điểm t

$$q_w^b(t) = q_w^{b(t)} \quad (2)$$

Tương tự áp dụng (2) tại $t + dt$ ta có:

$$q_w^b(t + dt) = q_w^{b(t+dt)} \quad (3)$$

Mặt khác

$$q_w^{b(t+dt)} = q_w^{b(t)} q_{b(t)}^{b(t+dt)} \quad (4)$$

Kết hợp (3) và (4) ta có:

$$q_w^b(t + dt) = q_w^{b(t)} q_{b(t)}^{b(t+dt)} \quad (5)$$

Trong khoảng thời gian $[t, t + dt]$, giả sử vận tốc góc của BCS là ω (được đo bởi cảm biến vận tốc góc). Lúc này BCS đã quay một góc $\phi = \|\omega\|_2 dt$ quanh trục quay $u = \frac{\omega}{\|\omega\|_2}$. Theo định nghĩa phép quay quaternion q ta có:

$$q_w^{b(t+dt)} = \left[\cos \frac{\phi}{2} \quad \sin \frac{\phi}{2} \frac{\omega}{\|\omega\|_2} \right] \quad (6)$$

Do dt là rất nhỏ nên $\phi = \|\omega\|_2 dt$ cũng rất nhỏ. Như vậy, ta có thể xấp xỉ phương trình (6) bằng cách cho $\cos \frac{\phi}{2} = 1$ và $\sin \frac{\phi}{2} = \frac{\phi}{2}$ như sau:

$$q_w^{b(t+dt)} = \left[1 \quad \frac{\omega dt}{2} \right] \quad (7)$$

Từ (5) và (7) ta có:

$$q_w^b(t + dt) = q_w^{b(t)} + q_w^{b(t)} \left[0 \quad \frac{\omega dt}{2} \right] \quad (8)$$

Biến đổi phương trình (8) ta có:

$$\frac{q_w^b(t + dt) - q_w^b(t)}{dt} = q_w^{b(t)} \left[0 \quad \frac{\omega}{2} \right] \quad (9)$$

$$\text{Khi } dt \rightarrow 0 \text{ ta có: } \dot{q}_w^b(t) = \frac{1}{2} q_w^b(t) \begin{bmatrix} 0 & \omega \end{bmatrix} \quad (10)$$

Sử dụng tính chất phép nhân quaternion $q_w^b(t) \begin{bmatrix} 0 & \omega \end{bmatrix}$, phương trình (10) được viết lại như sau:

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \Omega q \quad (11)$$

với

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix}$$

và $\omega = [\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]$ là vận tốc góc của BCS trong WCS.

Kết hợp phương trình vi phân của quaternion (11) với tính chất đạo hàm của vị trí là vận tốc và đạo hàm của vận tốc là gia tốc ta có phương trình quan hệ giữa r, v và q như sau [4]:

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \frac{1}{2} \Omega q \\ \dot{v} &= C^T(q) [a]_b \\ \dot{r} &= v \end{aligned} \quad (12)$$

Trong đó, $[a]_b \in \mathbb{R}^3$ là gia tốc tịnh tiến của BCS trong BCS.

Giá trị đầu ra của cảm biến vận tốc góc ($y_g \in \mathbb{R}^3$) và cảm biến gia tốc ($y_a \in \mathbb{R}^3$) được cho bởi công thức:

$$\begin{aligned} y_g &= \omega + v_g + b_g \\ y_a &= [a]_b + C(q) [\tilde{g}]_w + v_a + b_a \end{aligned} \quad (13)$$

Trong đó, $[\tilde{g}]_w \in \mathbb{R}^3$ là vector gia tốc trọng trường trong WCS. $b_g \in \mathbb{R}^3$ và $b_a \in \mathbb{R}^3$ là thành phần nhiễu thay đổi chậm của cảm biến vận tốc góc và cảm biến gia tốc. v_g và v_a là thành phần nhiễu trắng của cảm biến vận tốc góc và cảm biến gia tốc.

Thuật toán tích phân để lấy tích phân công thức (12) (thay $[a]_b$ bằng $y_a - C(q) \tilde{g}$ và thay ω bằng y_g) được thể hiện trong trong Mục 2.2.

2.2. Thuật toán tích phân trong định vị quán tính

Thuật toán tích phân nhằm xác định các giá trị của vị trí, vận tốc và quaternion theo thời gian sử dụng triển khai Taylor đối với vị trí, vận tốc và quaternion. Triển khai Taylor cho hàm $q(x)$ tại thời điểm $x = (k + 1)T$ và $a = kT$. Khi sử dụng xấp xỉ bậc 2 ta có kết quả như sau:

$$q_{k+1} = q_k + \dot{q}_k T + \frac{\ddot{q}_k T^2}{2} \quad (14)$$

Khai triển phương trình (14) sử dụng công thức đầu tiên trong phương trình (12) ta có:

$$q_{k+1} = \left(I + \frac{1}{2} \Omega_k T + \frac{1}{8} \Omega_k^2 T^2 + \frac{1}{4} \dot{\Omega}_k T^2 \right) q_k \quad (15)$$

Trong đó, Ω có các tính chất sau

$$\begin{aligned} \Omega^2 &= -\|\omega\|_2^2 I \\ \Omega^3 &= -\|\omega\|_2^2 \Omega \\ \dot{\Omega}_k &= \frac{\Omega_k - \Omega_{k-1}}{T} \end{aligned} \quad (16)$$

Triển khai (15) sử dụng các tính chất (16) ta có:

$$q_{k+1} = \left(I + \frac{3}{4} \Omega_k T - \frac{1}{4} \Omega_{k-1} T - \frac{1}{8} \|\omega\|_2^2 T^2 \right) q_k \quad (17)$$

Triển khai xấp xỉ Taylor bậc 3 sử dụng kết quả xấp xỉ Taylor bậc 2 trong (17) ta có:

$$q_{k+1} = \left(I + \frac{3}{4}\Omega_k T - \frac{1}{4}\Omega_{k-1}T - \frac{1}{6}\|\omega\|_2^2 T^2 - \frac{1}{24}\Omega_k\Omega_{k-1}T^2 - \frac{1}{48}\|\omega\|_2^2\Omega_k T^3 \right) q_k \quad (18)$$

Triển khai Taylor bậc 1 để tính vận tốc v_{k+1} sử dụng phương trình thứ 2 trong (12) ta có:

$$v_{k+1} = v_k + C^T(q_k)(ya_k - C(q_k)[\tilde{g}]_w)T \quad (19)$$

Triển khai phương trình (19) ta có:

$$v_{k+1} = v_k + C^T(q_k)ya_k T - [\tilde{g}]_w T \quad (20)$$

Xấp xỉ (19) sử dụng tín hiệu đầu ra của cảm biến ta có:

$$v_{k+1} \approx v_k + \frac{1}{2}(C^T(q_{k+1})ya_{k+1} + C^T(q_k)ya_k)T - [\tilde{g}]_w T \quad (21)$$

Triển khai Taylor bậc 1 để tính vị trí r_{k+1} sử dụng phương trình thứ 3 trong (12) ta có:

$$r_{k+1} = r_k + \frac{1}{2}(v_{k+1} + v_k)T \quad (22)$$

3. Xây dựng bộ lọc Kalman mở rộng cho INA

Đặt $\hat{q}$, $\hat{r}$ và $\hat{v}$ là giá trị tích phân của quaternion, vị trí và vận tốc của IMU. Gọi $\bar{q} \in R^3$, $\bar{r} \in R^3$ và $\bar{v} \in R^3$ là sai số của quaternion, vị trí và vận tốc của IMU:

$$\begin{aligned} \bar{q} &= [0_{3 \times 1} \quad I_3] (\hat{q}^* \otimes q) \\ \bar{r} &= r - \hat{r} \\ \bar{v} &= v - \hat{v} \end{aligned}$$

Trong đó, $\otimes$ là phép nhân quaternion và q^* là quaternion liên hợp của q .

Phương trình này biểu diễn 3 thành phần của sai số quaternion $\bar{q} \in R^3$ (thay vì dùng 4 thành phần) vì khi thời gian lấy mẫu $dt \rightarrow 0$ thì góc quay ϕ quanh trục u là rất nhỏ, lúc này thành phần đầu tiên trong quaternion theo định nghĩa trong công thức (1) là $\cos \frac{\phi}{2} \approx 1$ [5].

Biến trạng thái được đưa vào bộ lọc Kalman như sau:

$$x = \begin{bmatrix} \bar{q} \\ \bar{r} \\ \bar{v} \end{bmatrix} \in R^9$$

Phương trình trạng thái cho bộ lọc Kalman có dạng:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + w(t) \quad (23)$$

Xác định ma trận $A(t)$ và $w(t)$ xuất phát từ việc tính các đạo hàm các biến trạng thái thành phần trong x .

Quaternion q được tính theo công thức đầu tiên trong (12). Gọi $\hat{q}$ là giá trị tính được từ công thức

$$\dot{\hat{q}} = \frac{1}{2}\Omega(y_g)\hat{q} \quad (24)$$

Do y_g chứa các thành phần nhiễu trắng v_g và nhiễu chậm thay đổi b_g nên $y_g \neq \omega_b$. Điều này dẫn đến $\hat{q} \neq q$. Tồn tại q_e là sai số của của $\hat{q}$, trong đó

$$q = \hat{q} \otimes q_e \quad (25)$$

Trong đó, q_e có giá trị nhỏ và có thể được xấp xỉ như sau:

$$q_e \approx \begin{bmatrix} 1 \\ \bar{q} \end{bmatrix}$$

Đạo hàm q theo công thức (25) ta có:

$$\dot{q} = \dot{\hat{q}} \otimes q_e + \hat{q} \otimes \dot{q}_e \quad (26)$$

Triển khai phương trình (26) ta có:

$$\frac{1}{2}q \otimes \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_b \end{bmatrix} = \frac{1}{2}\hat{q} \otimes \begin{bmatrix} 0 \\ y_g \end{bmatrix} \otimes q_e + \hat{q} \otimes \dot{q}_e \quad (27)$$

Sử dụng quaternion liên hợp cho 2 vế của (27) ta có:

$$\dot{q}_e = \frac{1}{2}q_e \otimes \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_b \end{bmatrix} - \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 0 \\ y_g \end{bmatrix} \otimes q_e \quad (28)$$

Sử dụng tính chất $a \otimes b = b \otimes a + 2 \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{a} \times \bar{b} \end{bmatrix}$ cho phương trình (28) ta có:

$$\dot{q}_e = \frac{1}{2}q_e \otimes \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_b - y_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \times y_g \end{bmatrix} \quad (29)$$

Từ đó ta tính được $\bar{q}$ như sau:

$$\dot{\bar{q}} = \frac{1}{2}(\omega_b - y_g) + \frac{1}{2}\bar{q} \times (\omega_b - y_g) - y_g \times \bar{q} \quad (30)$$

Do $\bar{q}$ và $\omega_b - y_g$ là rất nhỏ nên chúng ta có thể bỏ qua trong công thức (30), do vậy ta có:

$$\dot{\bar{q}} = -y_g \times \bar{q} + \frac{1}{2}\bar{q} - \frac{1}{2}(v_g + b_g) \quad (31)$$

Trong đó chú ý rằng, b_g đã được loại bỏ ở giai đoạn tiền xử lý, do vậy ta có thể viết lại công thức (31) như sau:

$$\dot{\bar{q}} = [-y_g \times] \bar{q} + \frac{1}{2}\bar{q} - \frac{1}{2}v_g \quad (32)$$

Chúng ta sử dụng các phương trình thứ 2 trong (12) để xây dựng nên $\bar{v}$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{v}} &= C^T(\hat{q})y_a - \hat{g} \\ \dot{v} &= C^T(q)[a]_b \end{aligned} \quad (33)$$

Do $C^T(q) \neq C^T(\hat{q})ya - \hat{g}$ nên $v \neq \hat{v}$. Đặt $\bar{v}$ là sai số vận tốc được định nghĩa như sau:

$$\bar{v} \triangleq v - \hat{v} \quad (34)$$

Lấy đạo hàm 2 vế của (34) ta có:

$$\dot{\bar{v}} = \dot{v} - \dot{\hat{v}} \quad (35)$$

Thay $\dot{v}$ và $\dot{\hat{v}}$ từ (33) vào (35) ta có:

$$\dot{\bar{v}} = C^T(q)a_b - C^T(\hat{q})y_a + \hat{g} \quad (36)$$

Thay $a_b = y_a - C(q)g - b_a - v_a$ vào (36) ta có:

$$\dot{\bar{v}} = C^T(q)(y_a - C(q)g - b_a - v_a) - C^T(\hat{q})y_a + \hat{g} \quad (37)$$

Biến đổi phương trình (37) ta có:

$$\dot{\bar{v}} = (C^T(q) - C^T(\hat{q}))y_a - C^T(q)(b_a + v_a) + \hat{g} - g \quad (38)$$

Sử dụng công thức xấp xỉ $C(q) \approx C(\hat{q}) - 2K(\bar{q})C(\hat{q})$ cho phương trình (38) ta có:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{v}} &\approx -(2K(\bar{q})C(\hat{q}))^T y_a - C^T(\hat{q})(b_a + v_a) \\ &\quad + (2K(\bar{q})C(\hat{q}))^T (b_a + v_a) + \hat{g} - g \end{aligned} \quad (39)$$

Sử dụng tính chất $K(a)b = -K(b)a$ ta có:

$$\dot{\bar{v}} \approx -2C^T(\hat{q})K(y_a)\bar{q} + C^T(q)(-b_a - v_a) \quad (40)$$

Thành phần nhiễu chậm thay đổi thường được khử ở quá trình tiền xử lý nên ta có thể lược bỏ trong phương trình (40).

Từ phương trình thứ 3 trong (12) ta có:

$$\dot{\hat{r}} = \dot{r} - \hat{\dot{r}} \quad (41)$$

Thay $\dot{r} = v$, $\hat{\dot{r}} = \hat{v}$ và $\bar{v} = v - \hat{v}$ ta có:

$$\dot{\hat{r}} = \bar{v} \quad (42)$$

Các thành phần b_a và b_g là nhiễu chậm thay đổi của cảm biến gia tốc và cảm biến vận tốc góc, thành phần đạo hàm $\dot{b}_a$ và $\dot{b}_g$ được đại diện bởi các nhiễu trắng w_{ba} và w_{bg}

Vậy các ma trận trong mô hình của bộ lọc Kalman cho định vị quán tính trong (23) như sau:

$$A(t) = \begin{bmatrix} [-y_g \times] & -\frac{1}{2}I & 0 \\ 0 & 0 & I \\ [-2C^T(\hat{q})[y_a \times] & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$w(t) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}v_g \\ 0 \\ -C^T(\hat{q})v_a \end{bmatrix}$$

$[a \times] \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là ma trận đối xứng lệch tương ứng với vector $a \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$.

4. Xây dựng phương trình cập nhật cho bộ lọc Kalman

Do sự tồn tại của thành phần nhiễu trong IMU và việc sử dụng nguyên lý tích phân của INA nên sai số của việc ước lượng quỹ đạo chuyển động sẽ tích lũy và tăng lên rất nhanh theo thời gian, đặc biệt là các cảm biến giá rẻ dùng trong dân dụng. Do vậy, việc xây dựng các phương trình cập nhật cho bộ lọc Kalman là rất cần thiết để đảm bảo độ chính xác của việc ước lượng. Việc xây dựng các phương trình này tùy thuộc vào đặc trưng riêng của từng đối tượng và tính chất của chuyển động. Trong bài báo này, nhóm tác giả xây dựng phương trình cập nhật trong tình huống cụ thể là IMU đặt trên chiếc giày như trong Hình 1 để làm thí nghiệm minh chứng cho hoạt động của INA và hiệu quả của các phương trình cập nhật.

Trong quá trình bước đi, có những khoảng thời gian bàn chân chạm đất lúc này vận tốc của bàn chân có thể xem bằng không và độ cao của bàn chân cũng được xem là bằng không (nếu di chuyển trên mặt sàn phẳng nằm ngang). Khoảng thời gian này thường được gọi là ZVI (Zero Velocity Interval).

Trong [6], các ZVI này có thể được phát hiện trực tiếp bởi cảm biến vận tốc Doppler. Tuy nhiên, chúng ta có thể phát hiện các ZVI gián tiếp bằng cách sử dụng thuật toán phát hiện vận tốc bằng 0 [7, 9].

Trong bài báo này, nhóm tác giả sử dụng một thuật toán phát hiện ZVI đơn giản. Nếu những điều kiện dưới đây được thỏa mãn thì thời điểm gián đoạn m phải thuộc ZVI

$$y_{g,i} \leq B_g, \quad m - \frac{N_g}{2} \leq i \leq m + \frac{N_g}{2} \quad (43)$$

$$y_{a,i} - y_{a,i-1} \leq B_a, \quad m - \frac{N_a}{2} \leq i \leq m + \frac{N_a}{2}$$

trong đó N_g và N_a là các số nguyên. B_g, B_a là các giá trị ngưỡng đặt trước.

Tại các ZVI này, ta có:

$$v = 0_{3 \times 1} \quad (44)$$

$$r(3) = 0$$

Do vậy ta có phương trình cập nhật vận tốc và độ cao cho bộ lọc Kalman như sau:

$$\begin{bmatrix} z_v \\ z_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_v \\ H_r \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} v_v \\ v_r \end{bmatrix} \quad (45)$$

trong đó

$$z_r = 0_{3 \times 1} - \hat{v}$$

$$z_r = 0 - \hat{r}(3)$$

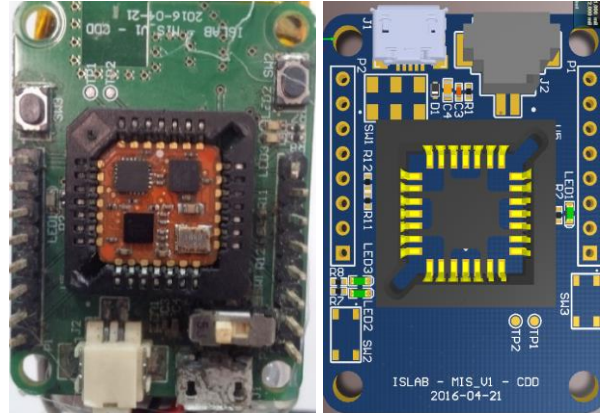
$$H_v = [0_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3} \quad I_3]$$

$$H_r = [0_{1 \times 5} \quad I_1 \quad 0_{3 \times 3}]$$

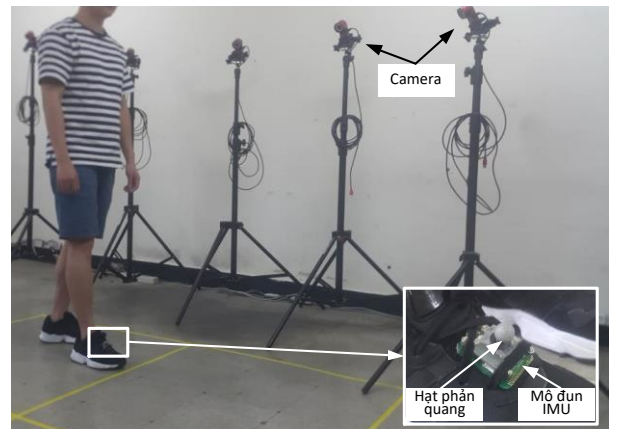
với v_v và v_r là nhiễu thể hiện việc vận tốc và độ cao của khung tập đi gần bằng không chứ không hoàn toàn bằng không.

5. Thí nghiệm và kết quả

Để tiến hành thí nghiệm minh chứng kết quả, nhóm tác giả đã chế tạo mô đun thu thập dữ liệu gồm một IMU Mti-1 của hãng Xsens và thẻ nhớ Micro SD như trong Hình 2. Trong đó Mti-1 có tần số lấy mẫu là 100 Hz, thẻ nhớ Micro SD được dùng để lưu trữ dữ liệu trong quá trình thực hiện thí nghiệm.



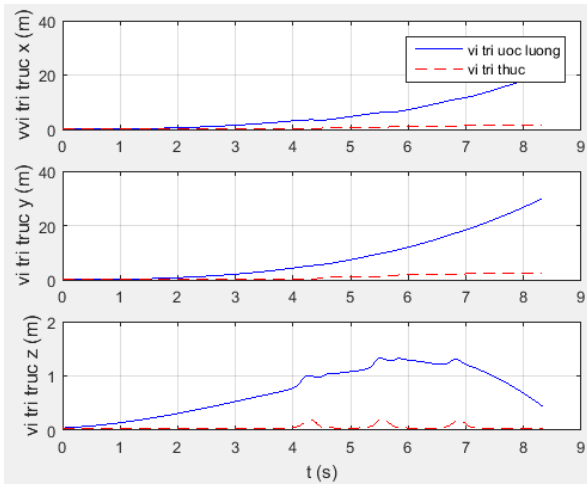
Hình 2. Mô đun thu thập dữ liệu (trái) và bản thiết kế (phải)



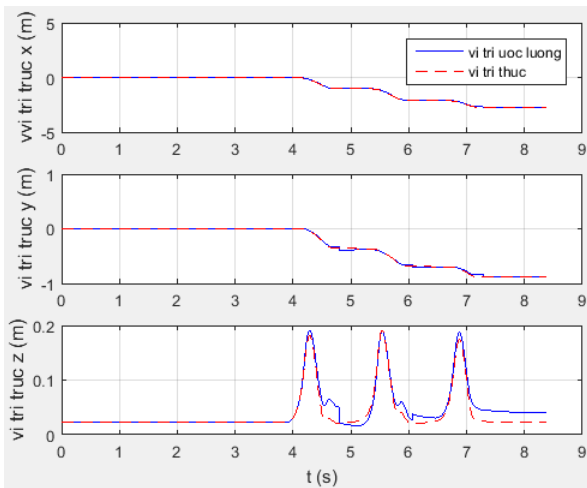
Hình 3. Mô đun thu thập dữ liệu gắn trên bàn chân

Để thực hiện thí nghiệm đánh giá INA, nhóm tác giả tiến hành thí nghiệm ước lượng chuyển động bàn chân theo ý tưởng trong Hình 1. Quá trình thí nghiệm được tiến hành như trong Hình 3. Trong đó, mô đun thu thập dữ liệu của IMU được đặt trên mu bàn chân. Đây là điểm rất thuận lợi để đặt cảm biến vì vị trí ổn định trong quá trình bàn chân

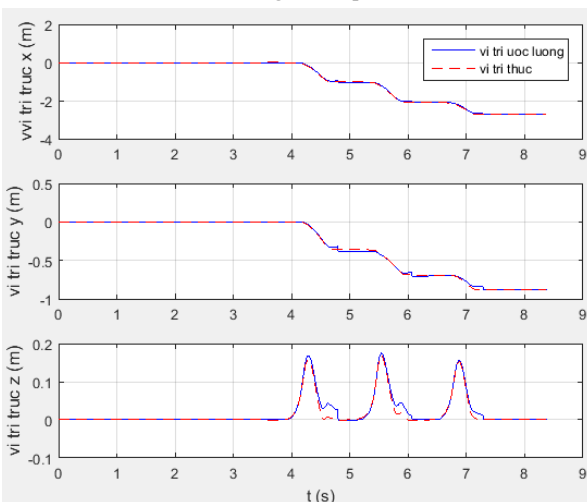
chạm đất. Người dùng tiến hành đi 3 bước thẳng về trước dưới sự giám sát của hệ thống camera Optitrack Flex 13. Hệ thống camera này ghi lại chuyển động của hạt phản quang gắn trên mô đun IMU với độ chính xác là 0,2 mm. Do vậy, quỹ đạo chuyển động của hạt phản quang do hệ thống camera ghi lại được xem là quỹ đạo thực của bàn chân người dùng.



Hình 4. Vị trí bàn chân sử dụng INA không cập nhật



Hình 5. Vị trí bàn chân sử dụng INA cập nhật vận tốc tại điểm ZVI



Hình 6. Vị trí bàn chân sử dụng INA cập nhật vận tốc và độ cao tại điểm ZVI

Về mặt định tính, Hình 4, Hình 5 và Hình 6 thể hiện vị trí của bàn chân theo 3 trục x , y và z trong quá trình bước đi theo thời gian trong trường hợp sử dụng INA mà không có cập nhật (Hình 4), có cập nhật vận tốc tại ZVI (Hình 5) và có cập nhật vận tốc kết hợp với cập nhật độ cao tại ZVI (Hình 6). Trong đó, trục z chính là độ cao của bàn chân, đường nét liền màu xanh thể hiện vị trí ước lượng và đường màu đỏ nét đứt thể hiện vị trí thực của bàn chân được ghi lại bởi hệ thống camera. Như có thể thấy trong Hình 4, khi không có cập nhật thì sai số của ước lượng tăng lên rất nhanh (tức đường ước lượng bị phân kỳ rất nhanh so với đường thực). Cụ thể, chỉ sau 8 giây ước lượng thì sai số tăng lên đến gần 20 m đối với trục x , gần 30 m đối với trục y và khoảng 1 m đối với trục z . Đây chính là nhược điểm lớn nhất của IMU, nhiệm vụ của các nghiên cứu là xây dựng và đề xuất các giải pháp để tăng độ chính xác của việc ước lượng. Khi sử dụng phương trình cập nhật vận tốc (xem Hình 5) ta thấy kết quả hoàn toàn khác so với Hình 4. Lúc này đường ước lượng đã bám theo đường thực. Tuy nhiên, vẫn còn sai lệch đáng kể theo phương z (độ cao của bàn chân). Khi áp dụng tiếp phương trình cập nhật độ cao bàn chân ta có kết quả như trong Hình 6. Lúc này, sai lệch theo phương z đã được cập nhật sau mỗi bước đi. Việc phân tích về mặt định tính này cho thấy rõ vai trò của việc xây dựng các phương trình cập nhật cho INA, đặc biệt là các phương trình cập nhật tại ZVI.

Bảng 1. Sai số vị trí theo các trục khi sử dụng cập nhật vận tốc tại ZVI (m)

TT	RMSE x	RMSE y	RMSE z	Tổng
1	0,0183	0,0121	0,0112	0,0416
2	0,0252	0,0178	0,0207	0,0637
3	0,0153	0,0133	0,0104	0,0391
4	0,0276	0,0201	0,0151	0,0627
TB	0,0216	0,0158	0,0144	0,0518

TT: thứ tự thí nghiệm; TB: trung bình

Bảng 2. Sai số vị trí theo các trục khi sử dụng cập nhật vận tốc và cập nhật độ cao tại ZVI (m)

TT	RMSE x	RMSE y	RMSE z	Tổng
1	0,0187	0,0121	0,0083	0,0391
2	0,0249	0,0167	0,0086	0,0502
3	0,0155	0,0130	0,0089	0,0374
4	0,0223	0,0190	0,0105	0,0519
TB	0,0204	0,0152	0,0091	0,0447

Về mặt định lượng, kết quả thí nghiệm khi sử dụng cập nhật vận tốc tại ZVI được liệt kê trong Bảng 1; cập nhật vận tốc và độ cao tại ZVI được liệt kê trong Bảng 2. Trong đó, tiêu chí căn bậc hai của trung bình bình phương sai số (RMSE) được sử dụng để đánh giá độ chính xác. Lúc này tổng sai số theo các phương khoảng 5 cm trên tổng số 3 bước đi với độ dài 2 m. Như vậy, độ chính xác của việc ước lượng vị trí sử dụng INA đã được nâng cao lên rất nhiều khi sử dụng các phương trình cập nhật tại các điểm ZVI. Nếu xét riêng cho từng bước đi thì sai số ước lượng khoảng 1,7 cm. Đây là sai số hoàn toàn chấp nhận được trong việc ước lượng thông số bước đi của người dùng. So sánh giữa hai Bảng 1 và 2 ta thấy, khi sử dụng phương trình

cập nhật độ cao chỉ các tác dụng nâng cao độ chính xác của việc ước lượng theo phương đứng. Kết quả cũng tương tự trong trường hợp nhóm tác giả thử nghiệm kết quả trong trường hợp chỉ sử dụng cập nhật độ cao.

6. Kết luận

Bài báo đã xây dựng INA và bộ lọc Kalman mở rộng cho INA nhằm nâng cao độ chính xác của việc ước lượng quỹ đạo chuyển động sử dụng IMU. Đây là phương pháp mới để ước lượng quỹ đạo chuyển động khắc phục một số nhược điểm của hệ thống giám sát chuyển động dùng camera và GPS.

Ngoài ra, bài báo còn xây dựng một số phương trình cập nhật phổ biến cho INA gồm cập nhật vận tốc và độ cao tại các điểm ZVI. Những phương trình cập nhật này góp phần rất quan trọng trong việc nâng cao độ chính xác và giúp loại bỏ đáng kể sai số tích lũy theo thời gian của INA.

Bài báo đã xây dựng mô đun thu thập dữ liệu sử dụng cảm biến IMU và tiến hành thí nghiệm trong trường hợp cảm biến đặt trên bàn chân để phân tích hoạt động của thuật toán INA và các phương trình cập nhật.

Kết quả thí nghiệm về mặt định tính và định lượng cho thấy việc sử dụng các phương trình cập nhật xuyên suốt trong quá trình chuyển động là rất cần thiết góp phần nâng cao độ chính xác cho INA. Riêng trong trường hợp cảm biến đặt trên bàn chân thì sai số của việc ước lượng cho mỗi bước đi khoảng 1,7 cm. Đây là sai số hoàn toàn chấp nhận được trong các ứng dụng ước lượng thông số bước đi cho người dùng.

Lời cảm ơn: Bài báo này được tài trợ bởi Đề tài NCKH cấp bộ với mã số B2018.DNA.07 (KYTH-45). Chủ nhiệm đề tài: PGS. TS Đoàn Quang Vinh, Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Pham, D.D.; Suh, Y.S., “Foot Pose Estimation Using an Inertial Sensor Unit and Two Distance Sensors”. *Sensors*, 2015, 15. 15888-15902.
- [2] Pham, D.D.; Suh, Y.S., “Pedestrian Navigation Using Foot-Mounted Inertial Sensor and LIDAR”. *Sensors (Basel)*. 2016;16(1):120.
- [3] Kuipers, J.B. “Quaternions and rotation sequences: a primer with applications to orbits, aerospace, and virtual reality”; *Princeton University Press: New Jersey*, 1999.
- [4] Nam, C.N.K.; Kang, H.J.; Suh, Y.S. “Golf Swing Motion Tracking Using Inertial Sensors and a Stereo Camera”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 2014, 63, 943–952.
- [5] Markley, F.L. “Multiplicative vs. Additive Filtering for Spacecraft Attitude Determination”. *Proc. of 6th Cranfield Conference on Dynamics and Control of Systems and Structures in Space*, 2004, pp. 467–474.
- [6] Jackson A B, “Outcome measures for gait and ambulation in the spinal cord injury population” *The journal of spinal cord medicine*, 2008.
- [7] Hawkinson W, et al. “Geospatial Location, Accountability, and Navigation System For Emergency Responders”. *In Proceedings of the Position Location and Navigation Symposium*, Myrtle Beach, SC, 2012.
- [8] Park S.K, Suh YS, “Zero Velocity Detection Algorithm Using Inertial Sensors for Pedestrian Navigation Systems”. *Sensors*, 2010.
- [9] Skog I, Nilsson JO, Handel P “Evaluation of zero velocity detectors for foot-mounted inertial navigation systems”. *In Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Zurich, Switzerland, 2010.

(BBT nhận bài: 03/7/2019, hoàn tất thủ tục phản biện: 26/8/2019)