



(12) **BẢN MÔ TẢ GIẢI PHÁP HỮU ÍCH THUỘC BẰNG ĐỘC QUYỀN  
GIẢI PHÁP HỮU ÍCH**

(19) **Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam (VN)**  
**CỤC SỞ HỮU TRÍ TUỆ**

(11)   
**2-0002130**

(51)<sup>7</sup> **G01C 9/08**

(13) **Y**

(21) 2-2010-00105

(22) 11.05.2010

(45) 25.10.2019 379

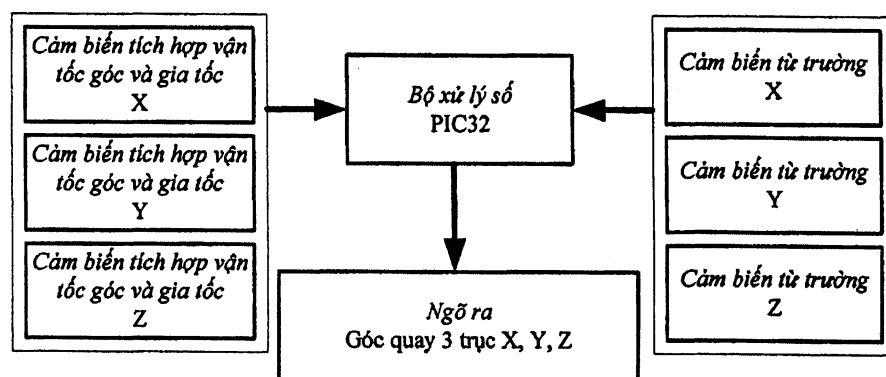
(43) 25.02.2016 335

(73) **ĐẠI HỌC QUỐC GIA THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH (VN)**  
Phường Linh Trung, quận Thủ Đức, thành phố Hồ Chí Minh

(72) **Chung Tấn Lâm (VN)**

(54) **CẢM BIẾN TÍCH HỢP QUÁN TÍNH ĐO GÓC**

(57) Giải pháp hữu ích đề xuất cảm biến tích hợp quán tính đo góc xoay theo ba trục X, Y, và Z trong không gian. Với khả năng đo được các đại lượng trong không gian như vậy, bộ cảm biến tích hợp này có thể được sử dụng trong các hệ thống điều khiển lái tự động cho máy bay không người lái (AUV, Air Unmanned Vehicles), tàu lặn (ROV, Remoted Operation Vehicle), tàu thủy, cũng như các phương tiện di chuyển trên mặt đất (ground vehicles), và từ đó đưa đến nhiều ứng dụng thực tế cho loại cảm biến này đặc biệt là trên các hệ thống không người lái cần sự cân bằng ổn định khi di chuyển ở chế độ lái bằng tay và lái tự động. Trong tài liệu này, cảm biến tích hợp này được gọi là bộ cảm biến tích hợp quán tính đo góc (IMU, Inertial Measurement Unit).



### **Lĩnh vực kỹ thuật được đề cập**

Giải pháp hữu ích thuộc lĩnh vực cơ điện tử, cụ thể là đề cập đến cảm biến tích hợp đo góc ba trục dựa trên quán tính và từ tính.

### **Tình trạng kỹ thuật của giải pháp hữu ích**

Cảm biến tích hợp quán tính đo góc được nghiên cứu phát triển từ lâu trên thế giới. Nó là một thành phần cảm biến chính trên các loại máy bay, tàu lặn, xe để định hướng cho các thiết bị này. Hiện nay việc nghiên cứu chế tạo cảm biến quán tính đo góc dùng quán tính trên thế giới cho ra các dòng cảm biến tích hợp quán tính đo góc dùng các thành phần dạng vi cơ điện tử (MEMS) có kích thước và khối lượng rất nhỏ, giá thành rẻ, độ chính xác cao, tiêu hao ít năng lượng.

Ở Việt Nam, có một số nhóm đã nghiên cứu công nghệ cảm biến tích hợp này. Trong cuộc thi Nhân tài Đất Việt 2008 nhóm tác giả Nguyễn Văn Chúc thuộc Trung tâm Khoa học kỹ thuật và Công nghệ Quân sự đưa ra một sản phẩm mẫu kết hợp giữa cảm biến đo góc quán tính và hệ thống định vị toàn cầu (GPS - Global Position System) để định vị cho các vật thể chuyển động. Một cảm biến đo góc khác được phát triển cho đề tài “Nghiên cứu, thiết kế và chế tạo mô hình máy bay lên thẳng bốn chong chóng có khả năng tự cân bằng và di chuyển trong nhà” của chủ nhiệm đề tài Th.S Lê Công Danh. Tuy nhiên, trong các nghiên cứu trên còn một số thiếu sót như sau: chưa giải quyết sự ảnh hưởng của gia tốc các chuyển động thẳng gây sai lệch góc đo, không đo được góc xoay toàn vòng, và chưa giải quyết điểm gốc bị trôi gây sai số góc.

### **Bản chất kỹ thuật của giải pháp hữu ích**

Mục đích của giải pháp này là tạo ra một cảm biến quán tính đo góc khắc phục được những thiếu sót trên. Để đạt được mục đích đó giải pháp hữu ích đề xuất một kiến trúc cảm biến và phương pháp xử lý dữ liệu để tăng chỉ tiêu kỹ thuật của cảm biến như sau:

Giải quyết một số điểm kĩ dị đề cảm biến tích hợp đo góc đo được góc toàn vòng (360 độ) theo ba trục;

Hạn chế nhiễu trên cảm biến gia tốc để cho số đo góc chính xác;

Giải quyết vấn đề cảm biến Gyro bị trôi điểm phân cực.

Giải pháp đưa ra bộ cảm biến quán tính đo góc được tích hợp trên ba loại cảm biến MEMS là cảm biến Gyro, cảm biến gia tốc, và cảm biến từ trường cùng một bộ xử lý tín hiệu số. Tín hiệu từ cảm biến Gyro, gia tốc và từ trường được truyền về bộ xử lý tín hiệu số thông qua giao tiếp SPI (Giao diện ngoại vi nối tiếp -Serial Peripheral Interface). Các giá trị thu được sẽ được bộ xử lý tín hiệu số tổng hợp dùng bộ phi tuyến Kalman để cho ra tín hiệu góc xoay chính xác tương ứng theo ba trục X,Y, và Z.

### **Mô tả vắn tắt các hình vẽ**

Hình 1 mô tả sơ đồ xử lý tín hiệu của cảm biến tích hợp quán tính; và

Hình 2 mô tả cấu trúc của bộ lọc Kalman.

### **Mô tả chi tiết giải pháp hữu ích**

Cấu trúc cảm biến tích hợp đo góc quán tính.

Bộ cảm biến quán tính đo góc được tích hợp trên ba loại cảm biến MEMS là cảm biến Gyro, cảm biến gia tốc, và cảm biến từ trường cùng một bộ xử lý tín hiệu số PIC32MX360F512L (Hình 1). Tín hiệu từ cảm biến Gyro và gia tốc được truyền về bộ xử lý tín hiệu số thông qua giao tiếp SPI (Giao diện ngoại vi nối tiếp - Serial Peripheral Interface); tương tự, đối với cảm biến từ trường ta cũng thu được từ trường của trái đất. Các giá trị thu được này sẽ được bộ xử lý tín hiệu số tổng hợp dùng bộ phi tuyến Kalman để cho ra tín hiệu góc xoay chính xác tương ứng theo ba trục X,Y, và Z .

Phương pháp xử lý tín hiệu trong cảm biến.

Thành phần thuộc về trọng lực  $G_f$  thu được bởi tín hiệu của gia tốc  $A_s$  qua một bộ lọc thông thấp; tương tự, tín hiệu của cảm biến từ trường  $M_s$  cũng được lọc để tối thiểu hiệu ứng nhiễu của tần số cao với tín hiệu sóng điện từ xung quanh có được  $M_f$ . Tín hiệu  $G_f$  và  $M_s$  được xử lý thêm qua mô hình đo tương ứng, nó đo vectơ đã được hiệu chỉnh  $Z_A$  và  $Z_M$ . Sau đó,  $Z_A$  và  $Z_M$  được kết hợp chung với nhau bằng cách sử dụng động hình học của hệ

trục tọa độ đã được hiệu chỉnh của trái đất để tạo nên vectơ Quaternion QM. Số đo Quaternion này là thông tin tham chiếu độc lập trong hệ trục tọa độ định hướng của trái đất. Thông tin tham chiếu này kết hợp với số đo của Gyro bằng cách sử dụng bộ lọc Kalman như trên Hình 2.

Hệ trục tọa độ vật.

Là hệ trục tọa độ gắn với vật chuyển động với trục X hướng về phía trước cùng chiều chuyển động của đối tượng, trục Y hướng sang bên phải còn trục Z hướng theo chiều tuân theo quy tắc bàn tay phải. Cảm biến Gyro và cảm biến gia tốc đo các đại lượng theo hệ trục tọa độ này.

Hệ trục tọa độ định hướng.

Hệ trục tọa độ định hướng là hệ trục tọa độ có trục X hướng về hướng Bắc của trái đất, trục Y hướng về phía Đông, và trục Z hướng về tâm trái đất. Đây chính là hệ trục tọa độ tuyệt đối sử dụng để điều khiển các đối tượng trong không gian thực tế.

Giải quyết một số điểm kĩ thuật để cảm biến đo được góc toàn vòng (360 độ) theo ba trục.

Ta đặt các vectơ sau:

$(p \ q \ r)^T$ : vectơ vận tốc góc của vật đo được từ cảm biến Gyro;

$(a_x \ a_y \ a_z)^T$ : vectơ gia tốc của vật đo được từ cảm biến gia tốc;

Ma trận chuyển đổi từ hệ tọa độ vật sang hệ tọa độ định hướng như sau:

$$C_{bn} = R(\phi, \theta, \psi) = R(\phi)R(\theta)R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\cos \phi \sin \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \cos \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & -\sin \phi \cos \psi + \cos \phi \sin \theta \sin \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

trong đó :

$R(\phi)$ : ma trận góc quay quanh trục X (góc roll) của hệ tọa độ vật;

$R(\theta)$ : ma trận góc quay quanh trục Y (góc pitch) của hệ tọa độ vật;

$R(\psi)$ : ma trận góc quay quanh trục Z (góc yaw) của hệ tọa độ vật.

Ta có phương trình chuyển đổi vận tốc góc từ hệ trục tọa độ vật sang hệ trục tọa độ định hướng như sau:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R(\phi) \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + R(\phi)R(\theta) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2)$$

suy ra:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \cos\theta & \cos\theta \sin\phi \\ -\sin\phi & 0 & \cos\theta \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Như vậy, ta tính được các góc quay theo vectơ vận tốc góc từ cảm biến Gyro như sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi \sec\theta & \cos\phi \sec\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad \text{với } \sec\theta = \frac{1}{\cos\theta} \quad (4)$$

Vấn đề nảy sinh ở đây là khi góc  $\theta \approx 90$  thì  $\sec\theta$  sẽ không xác định. Đây chính là điểm kì dị mà cảm biến Gyro sẽ không đo được trong giai đoạn này. Để giải quyết vấn đề này, ta sẽ sử dụng vectơ quaternion đối với ma trận  $C_{bn}$ .

Ta có vectơ Quaternion như sau:

$$e_0 = \cos\left(\frac{\mu}{2}\right), \quad e_1 = \alpha \sin\left(\frac{\mu}{2}\right), \quad e_2 = \beta \sin\left(\frac{\mu}{2}\right), \quad e_3 = \gamma \sin\left(\frac{\mu}{2}\right) \quad (5)$$

Từ đây ta có mối liên hệ giữa góc Euler và góc Quaternion như sau:

$$\begin{aligned} e_0 &= \cos\frac{\phi}{2} \cos\frac{\theta}{2} \cos\frac{\psi}{2} + \sin\frac{\phi}{2} \sin\frac{\theta}{2} \sin\frac{\psi}{2} \\ e_1 &= \sin\frac{\phi}{2} \cos\frac{\theta}{2} \cos\frac{\psi}{2} - \cos\frac{\phi}{2} \sin\frac{\theta}{2} \sin\frac{\psi}{2} \\ e_3 &= \cos\frac{\phi}{2} \sin\frac{\theta}{2} \cos\frac{\psi}{2} + \sin\frac{\phi}{2} \cos\frac{\theta}{2} \sin\frac{\psi}{2} \\ e_4 &= \cos\frac{\phi}{2} \cos\frac{\theta}{2} \sin\frac{\psi}{2} - \sin\frac{\phi}{2} \sin\frac{\theta}{2} \cos\frac{\psi}{2} \end{aligned} \quad (6)$$

Ma trận  $C_{bn}$  chuyển sang vector Quaternion như sau:

$$C_{bn} = \begin{bmatrix} (e_0^2 + e_1^2 - e_2^2 - e_3^2) & 2(e_1e_2 - e_0e_3) & 2(e_1e_3 + e_0e_2) \\ 2(e_1e_2 + e_0e_3) & (e_0^2 - e_1^2 + e_2^2 - e_3^2) & 2(e_2e_3 - e_0e_1) \\ 2(e_1e_3 + e_0e_2) & 2(e_2e_3 + e_0e_1) & (e_0^2 - e_1^2 - e_2^2 + e_3^2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Cập nhật góc Quaternion trong khoảng thời gian rời rạc ta có:

$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}_{n+1} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -p\Delta t & -q\Delta t & -r\Delta t \\ p\Delta t & 1 & r\Delta t & -q\Delta t \\ q\Delta t & -r\Delta t & 1 & p\Delta t \\ r\Delta t & -q\Delta t & -p\Delta t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}_n \quad (8)$$

Từ đây ta có thể tính sang góc Euler bằng công thức:

$$\phi = \arctan\left(\frac{2(e_0e_1 + e_2e_3)}{e_0^2 - e_1^2 - e_2^2 + e_3^2}\right) = \arctan\left(\frac{2(e_0e_1 + e_2e_3)}{1 - 2(e_1^2 - e_2^2)}\right) \quad (9)$$

$$\theta = \arcsin(-2(e_1e_3 - e_0e_2)) \quad (10)$$

$$\psi = \arctan\left(\frac{2(e_0e_3 + e_1e_2)}{e_0^2 + e_1^2 - e_2^2 - e_3^2}\right) = \arctan\left(\frac{2(e_0e_3 + e_1e_2)}{1 - 2(e_2^2 + e_3^2)}\right) \quad (11)$$

$$\text{với } e_0^2 + e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 = 1$$

Như vậy ba góc xoay theo ba trục được tính theo các vector Quaternion chấp nhận mọi giá trị của tham số arctan, và vấn đề điểm kỳ dị được giải quyết.

Hạn chế nhiều trên cảm biến gia tốc để cho số đo góc chính xác.

Đối với cảm biến gia tốc không đo chính xác gia tốc của vật mà đo luôn cả gia tốc trọng trường, gia tốc hướng tâm, gia tốc Coriolis và nhiễu. Ta có phương trình như sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{IMUx} \\ a_{IMUy} \\ a_{IMUz} \end{bmatrix} + Noise \quad (12)$$

trong đó:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} : \text{ giá trị đo được từ cảm biến gia tốc; } \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} : \text{ giá trị đo được từ cảm biến gyro.}$$

$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$ : gia tốc Coriolis;  $\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}$ : gia tốc của vật;  $\begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix}$ : gia tốc trọng trường được chuyển sang hệ tọa

độ vật bằng ma trận  $C_{bn}$ .

$\begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} = C_{bm}^T \begin{bmatrix} 0 & 0 & g_e \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 2(e_1 e_3 - e_0 e_2) \\ 2(e_0 e_1 + e_2 e_3) \\ e_0 - e_1^2 - e_2^2 + e_3^2 \end{bmatrix} g_e$ ;  $\begin{bmatrix} a_{IMUx} \\ a_{IMUy} \\ a_{IMUz} \end{bmatrix}$ : gia tốc hướng tâm khi cảm biến đặt lệch khỏi trọng

tâm của gia tốc trọng trường (ở đây giả sử =0).

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -w & v \\ w & 0 & -u \\ -v & u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} \quad (13)$$

Để tăng độ chính xác cho các cảm biến, các giá trị đo từ cảm biến thường bị trôi điếm phân cực vì vậy để loại bỏ phân cực ta sử dụng công thức (công thức chung để loại bỏ phân cực của các cảm biến) như sau:

$$v = sf(1 + sfe)(m - b) \quad (14)$$

trong đó:

$v$ : là giá trị mong muốn,

$sf$ : là hệ số nhân,

$sf_e$ : là sai số của hệ số  $sf$ , (tham khảo datasheet của cảm biến Gyro),

$m$ : giá trị đo được,

$b$ : giá trị phân cực.

Theo lý thuyết giá trị phân cực được cập nhật theo thời gian như sau:

Giá trị cập nhật đối với cảm biến gia tốc:

$$\delta b_{accj} = SF_{accj}^{-1} \left( n_{accj} \cdot g_e - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N m_{accj}[i] \right) \quad (15)$$

Giá trị cập nhật đối với cảm biến Gyro:

$$\delta b_{gyroj} = SF_{gyroj}^{-1} \left( 0 - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N m_{gyroj}[i] \right) \quad (16)$$

$$\text{với } SF^{-1} = \frac{1}{(sf(1+sf\epsilon))}.$$

Như vậy ta loại bỏ được phân cực  $b$  từ giá trị đo  $m$  để có được giá trị chính xác là  $v$ .  
Sau đó ta sử dụng thêm bộ lọc Kalman để lọc nhiễu.

Sử dụng bộ lọc Kalman để lọc nhiễu.

+ Đối với cảm biến gia tốc:

Ta có phương trình không gian trạng thái như sau:

$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}_{n+1} = F \cdot \begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}_n + Q \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix}_{n+1} = - \begin{bmatrix} 2(e_1 e_3 - e_0 e_2) \\ 2(e_0 e_1 + e_2 e_3) \\ e_0^2 - e_1^2 - e_2^2 + e_3^2 \end{bmatrix} g_e + R = H \begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} + R \quad (18)$$

trong đó:

$Q$ : nhiễu môi trường (phân cực, nhiệt độ,...),  $R$  là nhiễu đo (gia tốc coriolis, gia tốc dài, và các loại nhiễu khác).

Giả sử ta có không gian trạng thái như sau:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Fx + Q \\ z &= Hx + R \end{aligned} \quad (19)$$

trong đó:

$$F(k) = \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -p\Delta t & -q\Delta t & -r\Delta t \\ p\Delta t & 1 & r\Delta t & -q\Delta t \\ q\Delta t & -r\Delta t & 1 & p\Delta t \\ r\Delta t & -q\Delta t & -p\Delta t & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$H(k) = \frac{\partial h}{\partial x} = \begin{bmatrix} 2e_2 & -2e_3 & 2e_0 & -2e_1 \\ -2e_1 & -2e_0 & -2e_3 & -2e_2 \\ -2e_0 & 2e_1 & 2e_2 & -2e_3 \end{bmatrix} \quad (21)$$



Tiến trình cho bộ lọc Kalman để lọc nhiễu cho không gian trạng thái (19) như sau:

- Giai đoạn tiên đoán (Predict):

$$\begin{aligned}\hat{x}_{k+1} &= F_k \cdot x_k \\ \hat{P}_{k+1} &= F_k \cdot P_k \cdot F_k^T + Q_k\end{aligned}\quad (22)$$

- Giai đoạn Quan sát (Observation):

$$\text{Tính } Inno = z_k - H_k \hat{x}_{k+1} \quad (23)$$

- Giai đoạn Ước lượng (Estimation):

$$\begin{aligned}K_k &= \hat{P}_{k+1} \cdot H_k^T \cdot (H_k \hat{P}_{k+1} H_k^T + R_k)^{-1} \\ x_{k+1} &= \hat{x}_{k+1} + K_k \cdot Inno = \hat{x}_{k+1} + K_k \cdot (z_k - H_k \hat{x}_{k+1}) \\ P_{k+1} &= (I - K_k H_k) \cdot \hat{P}_k\end{aligned}\quad (24)$$

trong đó  $\hat{x}_k = \begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}$

+ Hiệu chỉnh sai số giữa cảm biến Gyro từ cảm biến từ trường:

Từ cảm biến từ trường ta suy ra góc Yaw  $\psi$  theo công thức như sau:

$$\psi = \arctan\left(\frac{Y_h}{X_h}\right) \quad (25)$$

Trong đó lực từ theo hai phương X,Y được tính như sau:

$$\begin{aligned}X_h &= X \cdot \cos(\phi) + Y \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) - Z \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \\ Y_h &= Y \cdot \cos(\theta) + Z \cdot \sin(\theta)\end{aligned}\quad (26)$$

trong đó:

$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$  : lực từ theo 3 phương đo từ cảm biến từ

Áp dụng bộ lọc Kalman như trên với ngõ ra đo  $Z$  chính là góc  $\psi$ . Từ đây ta tính được ma trận  $H$  như sau:

$$H(0) = \frac{\partial \psi}{\partial q_{m0}} = \frac{[1-2(e_2^2 + e_3^2)]^2}{[1-2(e_2^2 + e_3^2)]^2 + [2(e_0e_3 + e_1e_2)]^2} \frac{2e_3[1-2(e_2^2 + e_3^2)]}{[1-2(e_2^2 + e_3^2)]^2} \quad (27)$$

$$H(1) = \frac{\partial \psi}{\partial q_{m1}} = \frac{[1-2(e_2^2 + e_3^2)]^2}{[1-2(e_2^2 + e_3^2)]^2 + [2(e_0e_3 + e_1e_2)]^2} \frac{2e_2[1-2(e_2^2 + e_3^2)]}{[1-2(e_2^2 + e_3^2)]^2} \quad (28)$$

$$H(2) = \frac{\partial \psi}{\partial q_{m2}} = \frac{[1-2(e_2^2 + e_3^2)]^2}{[1-2(e_2^2 + e_3^2)]^2 + [2(e_0e_3 + e_1e_2)]^2} \frac{2(e_1[1-2(e_2^2 + e_3^2)] + 2e_2[2(e_0e_3 + e_1e_2)])}{[1-2(e_2^2 + e_3^2)]^2} \quad (29)$$

$$H(3) = \frac{\partial \psi}{\partial q_{m3}} = \frac{[1-2(e_2^2 + e_3^2)]^2}{[1-2(e_2^2 + e_3^2)]^2 + [2(e_0e_3 + e_1e_2)]^2} \frac{2(e_0[1-2(e_2^2 + e_3^2)] + 2e_2[2(e_0e_3 + e_1e_2)])}{[1-2(e_2^2 + e_3^2)]^2} \quad (30)$$

trong đó:

$$\psi = \arctan\left(\frac{2(e_0e_3 + e_1e_2)}{e_0^2 + e_1^2 - e_2^2 - e_3^2}\right) = \arctan\left(\frac{2(e_0e_3 + e_1e_2)}{1-2(e_2^2 + e_3^2)}\right)$$

$$H(k) = \frac{\partial \psi}{\partial q} \text{ với } \frac{d}{dx}(\arctan(x)) = \frac{1}{x^2 + 1}$$

Các giá trị này xác định được ma trận  $H$  dùng bộ lọc Kalman để cập nhật chính các giá trị Quaternion.

Để kiểm định độ chính xác của phép đo các góc của cảm biến quán tính này, một thiết bị thử nghiệm có tác dụng như một khớp cầu có ba trục quay đồng quy được chế tạo tương ứng với ba trục  $X$ ,  $Y$  và  $Z$ . Các trục quay được gắn bộ mã hóa vòng quay (Encoder) để xác định góc quay chuẩn của từng trục. Cảm biến tích hợp quán tính được gắn tại tâm khớp cầu này để đo góc quay tương ứng của từng trục, và sau đó số liệu góc xoay thu nhận được từ cảm biến được so sánh với số liệu góc xoay của bộ mã hóa vòng quay (Encoder). Kết quả đạt được:

- Số liệu thực nghiệm góc xoay của trục  $X$  và sai số góc xoay trục  $X$ : giá trị sai lệch

thay đổi xung quanh giá trị 0 và sai lệch lớn nhất khoảng 2 độ.

- Số liệu thực nghiệm góc xoay của trục Y và sai số góc xoay trục Y: sai lệch dao động xung quanh giá trị 0 và giá trị sai lệch lớn nhất khoảng 2 độ.
- Số liệu thực nghiệm góc xoay của trục Z và sai số góc xoay trục Z: sai lệch dao động xung quanh giá trị 0 và sai lệch lớn nhất khoảng 6 độ.

Qua phân tích trên ta thấy rằng cảm biến đạt được kết quả như mong muốn là giá trị góc xoay bám giá trị góc xoay đưa về từ bộ mã hóa vòng quay (Encoder ) với sai lệch chấp nhận được cho các ứng dụng.

Cảm biến đo được các đại lượng góc quay ba trục (trục X, trục Y và trục Z) trong không gian tương ứng với các góc nghiêng (roll), góc ngóc (pitch), góc xoay (yaw) trong các ứng dụng điều khiển các đối tượng di động. Cảm biến được cài đặt các giải thuật xử lý tín hiệu số bộ lọc Kalman mở rộng có tác dụng giảm thiểu nhiễu từ các cảm biến, nhiễu hệ thống và loại bỏ hiện tượng trôi phân cực đối với tốc độ góc làm tăng độ chính xác đo góc cho cảm biến này.

### YÊU CẦU BẢO HỘ

1. Cảm biến tích hợp quán tính đo góc gồm cảm biến từ trường, gia tốc, cảm biến Gyro và một bộ xử lý tín hiệu số, trong đó:

giải quyết một số điểm kì dị để cảm biến tích hợp quán tính đo góc đo được góc toàn vòng (360 độ) theo 3 trục thì cảm biến tích hợp quán tính sử dụng vectơ Quaternion đối với ma trận chuyển đổi từ hệ tọa độ vật sang hệ tọa độ định hướng theo công thức (7)

$$C_{bn} = \begin{bmatrix} (e_0^2 + e_1^2 - e_2^2 - e_3^2) & 2(e_1e_2 - e_0e_3) & 2(e_1e_3 + e_0e_2) \\ 2(e_1e_2 + e_0e_3) & (e_0^2 - e_1^2 + e_2^2 - e_3^2) & 2(e_2e_3 - e_0e_1) \\ 2(e_1e_3 + e_0e_2) & 2(e_2e_3 + e_0e_1) & (e_0^2 - e_1^2 - e_2^2 + e_3^2) \end{bmatrix}$$

với  $e_0 = \cos\left(\frac{\mu}{2}\right)$ ,  $e_1 = \alpha \sin\left(\frac{\mu}{2}\right)$ ,  $e_2 = \beta \sin\left(\frac{\mu}{2}\right)$ ,  $e_3 = \gamma \sin\left(\frac{\mu}{2}\right)$ ;

có tác dụng giúp ba góc xoay theo ba trục được tính theo các vectơ Quaternion chấp nhận mọi giá trị của tham số arctan;

giải quyết hạn chế nhiều trên cảm biến gia tốc để cho số đo góc chính xác thì cảm biến tích hợp quán tính dùng công thức (14)  $v = sf(1 + sfe)(m - b)$  để loại bỏ phân cực cho cảm biến gia tốc; trong đó  $v$  là giá trị mong muốn,  $sf$  là hệ số nhân,  $sf_e$  là sai số của hệ số  $sf$ ,  $m$  là giá trị đo được,  $b$  là giá trị phân cực;

giải quyết vấn đề cảm biến Gyro bị trôi điếm phân cực thì cảm biến tích hợp quán tính đo góc sử dụng thêm bộ lọc Kalman để lọc nhiễu theo hai biểu thức sau:

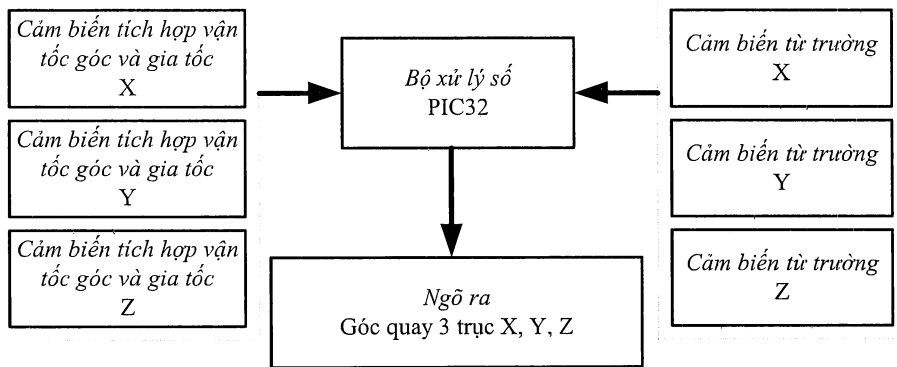
$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}_{n+1} = F \cdot \begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}_n + Q \quad (17) \quad \text{và} \quad \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix}_{n+1} = - \begin{bmatrix} 2(e_1e_3 - e_0e_2) \\ 2(e_0e_1 + e_2e_3) \\ e_0^2 - e_1^2 - e_2^2 + e_3^2 \end{bmatrix} g_e + R = H \begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} + R \quad (18)$$

trong đó  $Q$ : nhiễu môi trường (phân cực, nhiệt độ,...),  $R$  là nhiễu đo (gia tốc coriolis, gia

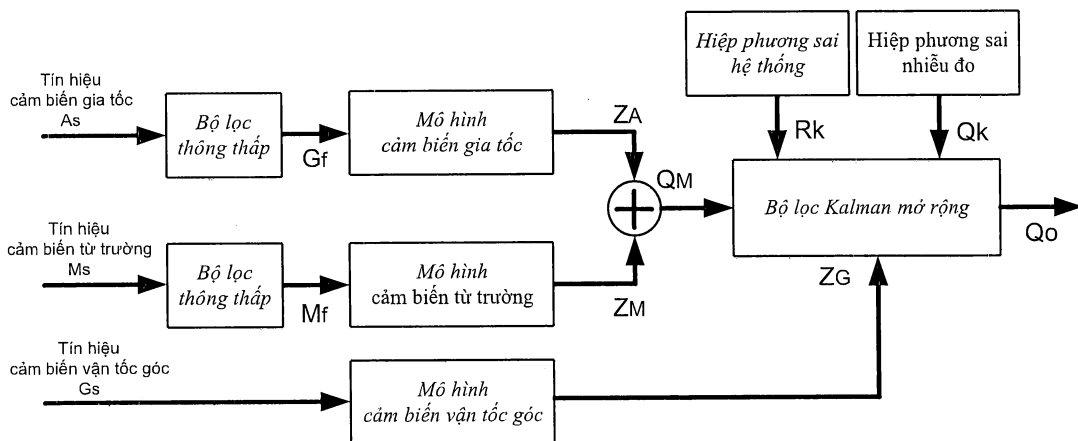
tốc dài, và các loại nhiễu khác);  $\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix}$ : giá trị đo được từ cảm biến gia tốc  $\begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}_{n+1}$  là cập nhật

góc Quaternion trong khoảng khoảng thời gian rời rạc;

với việc cập nhật giá trị phân cực dựa trên giá trị trung bình không đạt độ chính xác cao, loại bỏ được các loại nhiễu bao gồm cả việc loại bỏ triệt để trôi phân cực của cảm biến Gyro.



Hình 1



Hình 2