

TỔNG HỢP BỘ QUAN SÁT VẬN TỐC GÓC VÀ GIA TỐC GÓC TRONG HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN ỔN ĐỊNH ĐƯỜNG NGẮM CHO BỆ PAN-TILT

OBSERVER-BASED ESTIMATION OF ANGULAR VELOCITY AND ACCELERATION FOR LINE-OF-SIGHT STABILIZATION IN PAN-TILT PLATFORMS

Trương Tất Thuận^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huinh5804.2025.280>

TÓM TẮT

Việc ước lượng chính xác vận tốc góc và gia tốc góc từ các phép đo mã hóa bị nhiễu đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo khả năng điều khiển bền vững cho các hệ thống pan-tilt, đặc biệt trong các ứng dụng ổn định đường ngắm. Nghiên cứu này trình bày một phân tích so sánh chuyên sâu về hiệu suất của hai bộ quan sát tiên tiến: Bộ quan sát chế độ trượt (Sliding Mode Observer - SMO) và Bộ quan sát độ lợi cao xếp chồng (Cascaded High-Gain Observer - CHGO). Cả hai được thiết kế để ước lượng các trạng thái vị trí, vận tốc và gia tốc trong hệ thống điều khiển ổn định đường ngắm cho bộ pan-tilt hai bậc tự do. SMO khai thác các kỹ thuật chế độ trượt để đạt được độ bền vững cao trước nhiễu bất định và động lực học phi tuyến, trong khi CHGO tận dụng phản hồi độ lợi cao để đảm bảo hội tụ nhanh trong điều kiện nhiễu Gaussian. Qua các mô phỏng độ chính xác cao, nghiên cứu đánh giá hiệu quả của hai bộ quan sát trong các kịch bản nhiễu đa dạng. Kết quả cho thấy SMO vượt trội về độ bền vững đối với nhiễu không Gaussian và bất định mô hình, trong khi CHGO thể hiện tốc độ hội tụ và độ chính xác vượt trội trong môi trường lý tưởng. Những phát hiện này cung cấp cơ sở khoa học quan trọng để lựa chọn bộ quan sát phù hợp cho các ứng dụng robot thực tế, đồng thời mở ra hướng nghiên cứu về các phương pháp lai nhằm tối ưu hóa hiệu suất trong các điều kiện vận hành phức tạp.

Từ khóa: Bộ quan sát, SMO, HGO, pan-tilt, vận tốc góc, gia tốc.

ABSTRACT

Accurate estimation of angular velocity and angular acceleration from noisy encoder measurements is pivotal for ensuring robust control in pan-tilt systems, particularly in line-of-sight stabilization applications. This study presents an in-depth comparative analysis of the performance of two advanced observers: the Sliding Mode Observer (SMO) and the Cascaded High-Gain Observer (CHGO). Both are designed to estimate position, velocity, and acceleration states in a line-of-sight stabilization control system for a two-degree-of-freedom pan-tilt platform. The SMO leverages sliding mode techniques to achieve high robustness against non-Gaussian noise and nonlinear dynamics, while the CHGO employs high-gain feedback to ensure rapid convergence under Gaussian noise conditions. Through high-fidelity simulations, the study evaluates the effectiveness of these observers across diverse noise scenarios. Results demonstrate that the SMO excels in robustness to non-Gaussian noise and model uncertainties, whereas the CHGO exhibits superior convergence speed and accuracy in ideal conditions. These findings provide a critical scientific foundation for selecting appropriate observers for practical robotic applications and pave the way for future research into hybrid approaches to optimize performance in complex operating environments.

Keywords: Observer, SMO, HGO, pan-tilt, angular velocity, acceleration.

¹Viện Tự động hóa Kỹ thuật quân sự, Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự

*Email: thuan.truongtat@gmail.com

Ngày nhận bài: 06/5/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 16/6/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/7/2025

1. GIỚI THIỆU

Các hệ thống pan-tilt, được sử dụng rộng rãi trong robot cho các nhiệm vụ như giám sát, theo dõi và ổn định camera, phụ thuộc rất nhiều vào việc ước lượng trạng thái chính xác để đạt được hiệu suất điều khiển tối ưu. Các phép đo mã hóa, cung cấp dữ liệu góc khớp, thường bị nhiễu và sai lệch, làm phức tạp việc suy ra vận tốc góc và gia tốc góc thông qua phép vi phân số học. Vấn đề khuếch đại nhiễu trong vòng điều khiển, đòi hỏi các thiết kế bộ quan sát tiên tiến để trích xuất các ước lượng trạng thái đáng tin cậy từ dữ liệu bị nhiễu. Nhiều phương pháp dựa trên bộ quan sát đã được đề xuất để giải quyết thách thức này. Các bộ quan sát tuyến tính, như bộ quan sát Luenberger, đơn giản nhưng gặp khó khăn với động lực học phi tuyến và nhiễu đáng kể [1]. Bộ lọc Kalman cung cấp các ước lượng tối ưu trong giả định nhiễu Gaussian nhưng không hiệu quả khi đặc tính nhiễu lệch khỏi mô hình này [2]. Bộ quan sát độ lợi cao (HGO) đạt được sự hội tụ nhanh cho các hệ thống phi tuyến, nhưng độ nhạy của chúng với nhiễu đo lường hạn chế độ bền vững hoặc hiện tượng peaking [3]. Ngược lại, bộ quan sát chế độ trượt (SMO) nổi trội với khả năng chống lại sự không chắc chắn của mô hình và nhiễu, khiến chúng phù hợp cho các hệ thống robot thực tế với động lực học phức tạp [4]. Trong bối cảnh này, cấu trúc bộ quan sát xếp chồng độ lợi cao và bộ quan sát chế độ trượt tỏ ra hiệu quả trong các giải pháp ước lượng vận tốc góc, gia tốc góc cho hệ thống pan-tilt. Bộ quan sát độ lợi cao xếp chồng (CHGO), được giới thiệu bởi Han và Unel [5], sử dụng phương pháp độ lợi cao hai tầng để ước lượng vị trí, vận tốc và gia tốc từ dữ liệu mã hóa, đạt được sự hội tụ nhanh trong điều kiện được kiểm soát. Ngược lại, bộ quan sát chế độ trượt (SMO) sử dụng khung chế độ trượt tới bậc 2 để đảm bảo ước lượng trạng thái bền vững với nhiễu và tính phi tuyến của hệ thống, tận dụng tính ổn định vốn có của điều khiển chế độ trượt.

Bài báo này nghiên cứu so sánh hiệu suất của SMO và CHGO trong việc ước lượng trạng thái của một bộ điều khiển trượt ổn định đường ngầm cho bộ pan-tilt 2 DOF trong các điều kiện nhiễu khác nhau. Thông qua các mô phỏng độ chính xác cao, chúng tôi đánh giá độ chính xác, tốc độ hội tụ và độ bền vững của chúng đối với nhiễu Gaussian. Những đóng góp của nghiên cứu này bao gồm: (1) so sánh chi tiết hiệu suất của hai thiết kế bộ quan sát này, (2) hiệu quả của các bộ quan sát trong việc ứng dụng trong bài toán điều khiển ổn định đường ngầm cho bộ pan-tilt thực tế.

Bố cục của bài báo được tổ chức như sau: Phần 1: Giới thiệu tổng quan, Phần 2 mô tả mô hình động học, động

hình học của hệ thống pan-tilt và bộ mã hóa góc. Phần 3 phân tích thiết kế của SMO và CHGO. Phần 4 trình bày tổng hợp bài toán ổn định đường ngầm cho bộ pantilt sử dụng kỹ thuật điều khiển trượt, Phần 5 trình bày chi tiết thiết kế mô phỏng, kết quả mô phỏng. Cuối cùng, Phần 6 kết luận bài báo với các phát hiện chính và định hướng nghiên cứu tương lai.

2. MÔ HÌNH HÓA HỆ THỐNG

2.1. Mô hình động lực học bộ pan-tilt

Động lực học của một bộ điều khiển pan-tilt 2 DOF là nền tảng để đánh giá hiệu suất của các bộ quan sát được đề xuất. Theo công thức Euler-Lagrange [5], mô hình động lực học phi tuyến của hệ thống được biểu diễn như sau:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F_v\dot{q} + F_s * \text{sgn}(\dot{q}) = \tau \quad (1)$$

Trong đó:

- q : $q = [q_1, q_2]^T$ biểu thị các góc khớp pan và tilt
- $\dot{q}$: là đạo hàm bậc nhất của q theo thời gian, biểu diễn vận tốc góc của hệ pan-tilt.
- $\ddot{q}$: Vectơ gia tốc góc, là đạo hàm bậc hai của q theo thời gian.
- $M(q)$: Ma trận quán tính (inertia matrix), phụ thuộc vào cấu hình q . Ma trận này biểu diễn quán tính của hệ thống và thường là một ma trận đối xứng, xác định dương.
- $C(q, \dot{q})$: Ma trận đại diện cho lực Coriolis và ly, phụ thuộc vào q và $\dot{q}$. Ma trận này mô tả các lực quán tính phát sinh do chuyển động quay.
- $G(q)$: Vectơ đại diện lực hấp dẫn (gravity vector), phụ thuộc vào q . Vectơ này biểu diễn các lực do trọng trường tác động lên hệ.
- F_v : Ma trận đại diện cho tác động của ma sát nhớt (viscous friction coefficient matrix). Ma trận này mô tả lực ma sát tỷ lệ với vận tốc $\dot{q}$.
- F_s : Vectơ đại diện cho ma sát Coulomb (Coulomb friction coefficient vector). Vectơ này mô tả lực ma sát không đổi, không phụ thuộc vào vận tốc nhưng phụ thuộc vào hướng chuyển động.
- $\text{sgn}(\dot{q})$: Hàm dấu của vận tốc $\dot{q}$, xác định hướng của lực ma sát Coulomb (thường là +1, -1, hoặc 0).
- τ : Vectơ mô-men hoặc lực tổng quát (generalized torque/force vector), đại diện cho các lực hoặc mô-men ngoại lực tác động lên hệ, chẳng hạn như lực điều khiển.

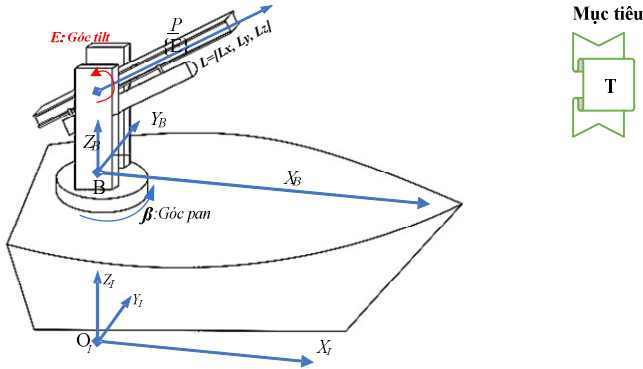
Trong trường hợp lý tưởng, coi khối lượng phân bố đồng đều trên các trục pan và tilt, bỏ qua các lực tác động colioris ta sẽ có mô hình hai kênh tằm và hướng như sau:

$$\begin{cases} j_\beta \ddot{\beta} + b_\beta \dot{\beta} = u_\beta \\ j_\varepsilon \ddot{\varepsilon} + b_\varepsilon \dot{\varepsilon} = u_\varepsilon \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó:

- + β : thông số góc của kênh pan (kênh phương vị).
- + ε : Thông số góc của kênh tilt (kênh tầm).

2.2. Động hình học cho bài toán ổn định đường ngắm



Hình 1. Vector đường ngắm trong các hệ trục tọa độ khác nhau

Quy định các hệ trục tọa độ:

a) Hệ tọa độ quán tính (Inertial Frame):

○ **Định nghĩa:** Hệ tham chiếu cố định, thường gắn với Trái đất (hệ ENU).

○ **Trục:**

- $x_{inertial}$: Hướng đông.
- $y_{inertial}$: Hướng bắc.
- $z_{inertial}$: Hướng lên (up).

b) Hệ tọa độ thân của bộ (Body Frame):

○ **Định nghĩa:** Hệ tọa độ gắn với bộ (platform), nơi IMU được đặt. Hệ này chuyển động cùng bộ.

○ **Trục:**

- x_{body} : Hướng về phía trước của bộ.
- y_{body} : Hướng sang trái của bộ.
- z_{body} : Hướng lên trên của bộ.

○ **Ý nghĩa:** IMU đo vận tốc góc ω và gia tốc tuyến tính a trong hệ body frame.

c) Góc Elevation (ε) - Góc nâng-tilt, Góc Azimuth (β)- Góc phương vị-pan

• ε : Góc tilt (elevation), quay quanh trục y_B , biểu thị độ nâng/hạ của đường ngắm ta quy ước Góc nâng ($Z_B > 0$) là góc dương.

• β : Góc pan (azimuth), quay quanh trục z_B , biểu thị hướng trái/phải trong mặt phẳng $x_B y_B$. Chiều của góc pan ta quy ước (quay sang trái $y_B > 0$ là góc dương).

d) Mối quan hệ giữa ε và β trong L

• Vector đường ngắm L trong hệ tọa độ bộ được xác định bởi cả hai góc:

- ε (elevation) kiểm soát độ nghiêng dọc (trục Z).
- β (azimuth) kiểm soát hướng ngang (trên mặt phẳng xy).

• Kết hợp:

- Khi $\varepsilon = 0$, $L = [\cos\beta, \sin\beta, 0]^T$, chỉ phụ thuộc vào β .
- Khi $\beta = 0$, $L = [\cos\varepsilon, 0, \sin\varepsilon]^T$, chỉ phụ thuộc vào ε .

• Hình học:

- ε xác định góc giữa L và mặt phẳng xy.
- β xác định góc giữa hình chiếu của L lên mặt phẳng xy và trục x.

$$L = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon * \cos \beta \\ \cos \varepsilon * \sin \beta \\ \sin \varepsilon \end{bmatrix} \quad (3)$$

e) Đường ngắm L , L_{des} , $L_{inertial}$

+ L - Đường ngắm hiện tại:

○ **Hệ tọa độ:** L nằm trong hệ thân của bộ (Body Frame).

L biểu diễn hướng thực tế của LOS, được xác định bởi góc β và ε của pan-tilt, và pan-tilt nằm trên bộ.

$$L = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon * \cos \beta \\ \cos \varepsilon * \sin \beta \\ \sin \varepsilon \end{bmatrix}$$

Đây là vector trong hệ thân, vì β và ε điều khiển hướng LOS tương ứng với các trục của bộ.

+ L_{des} - Đường ngắm mong muốn:

○ **Hệ tọa độ:** Hệ thân của bộ (Body Frame).

L_{des} là hướng mà pan-tilt cần nhắm tới để ổn định, nên nó phải được biểu diễn trong cùng hệ tọa độ với L (hệ thân) để tính sai số $e = L - L_{des}$.

f) Mối quan hệ giữa L , $\dot{L}$ và IMU

○ $\dot{L}$ - Đạo hàm thời gian của L :

○ Tốc độ thay đổi của L : $\dot{L} = \omega \times L$

▪ $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ từ IMU, nên:

$$\dot{L} = \begin{bmatrix} \omega_y L_z - \omega_z L_y \\ \omega_z L_x - \omega_x L_z \\ \omega_x L_y - \omega_y L_x \end{bmatrix}$$

▪ $\dot{L}$ cho biết tốc độ lệch của LOS do chuyển động của bộ.

g) Ổn định đường ngắm (hướng ngắm)

Yêu cầu: Cần điều chỉnh ε và β để bù hoàn toàn chuyển động của bộ ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$) giữ cho hai góc yaw ($\psi_{inertial}$) và pitch ($\theta_{inertial}$) cố định.

Đạo hàm thời gian của $\mathbf{L}$ trong hệ quán tính là tổng của sự thay đổi của $\mathbf{L}$ do bộ quay ($\omega \times \mathbf{L}$) cộng với sự thay đổi của $\mathbf{L}$ do góc pan, góc tilt thay đổi $\left(\frac{d\mathbf{L}}{dt}\right)_{\text{body}}$ theo tài liệu tham khảo [6, 7] ta sẽ có:

$$\left(\frac{d\mathbf{L}}{dt}\right)_{\text{inertial}} = \left(\frac{d\mathbf{L}}{dt}\right)_{\text{pan_tilt}} + \left(\frac{d\mathbf{L}}{dt}\right)_{\text{body frame}} \quad (4)$$

Trong đó:

$$\left(\frac{d\mathbf{L}}{dt}\right)_{\text{pan_tilt}} = \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \varepsilon} \dot{\varepsilon} + \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \theta_z} \dot{\theta}_z$$

$$\left(\frac{d\mathbf{L}}{dt}\right)_{\text{body}} = \omega \times \mathbf{L}$$

$\mathbf{L}_{\text{inertial}}$ không đổi tương đương với:

$$\left(\frac{d\mathbf{L}}{dt}\right)_{\text{inertial}} = 0$$

Tương đương với:

$$\left(\frac{d\mathbf{L}}{dt}\right)_{\text{body}} = - \left(\frac{d\mathbf{L}}{dt}\right)_{\text{pan_tilt}}$$

Điều này ngụ ý rằng $\mathbf{L}$ phải triệt tiêu ảnh hưởng của ω để giữ $\mathbf{L}_{\text{inertial}}$ không đổi (giới hạn góc Pitch và góc Yaw).

• Tương đương:

$$-\omega \times \mathbf{L} = \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \varepsilon} \dot{\varepsilon} + \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \beta} \dot{\beta}$$

• Đạo hàm riêng:

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \varepsilon} = \begin{bmatrix} -\sin \varepsilon * \cos \beta \\ -\sin \varepsilon * \sin \beta \\ \cos \varepsilon \end{bmatrix}, \quad \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \beta} = \begin{bmatrix} -\cos \varepsilon * \sin \beta \\ \cos \varepsilon * \cos \beta \\ 0 \end{bmatrix}$$

• $-\omega \times \mathbf{L}$:

$$-\omega \times \mathbf{L} = \begin{bmatrix} -\omega_y \sin \varepsilon + \omega_z * \sin \beta * \cos \varepsilon \\ -\omega_z \cos \beta * \cos \varepsilon + \omega_x \sin \varepsilon \\ -\omega_x \sin \beta * \cos \varepsilon + \omega_y \cos \beta * \cos \varepsilon \end{bmatrix}$$

• So sánh và giải hệ phương trình

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \varepsilon} \dot{\varepsilon} + \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \beta} \dot{\beta} = -\omega \times \mathbf{L}$$

Thay vào:

$$\begin{bmatrix} -\sin \varepsilon * \cos \beta * \dot{\varepsilon} - \cos \varepsilon * \sin \beta * \dot{\beta} \\ -\sin \varepsilon * \sin \beta * \dot{\varepsilon} + \cos \varepsilon * \cos \beta * \dot{\beta} \\ \cos \varepsilon * \dot{\varepsilon} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_y \sin \varepsilon + \omega_z * \sin \beta * \cos \varepsilon \\ -\omega_z \cos \beta * \cos \varepsilon - \omega_x \sin \varepsilon \\ -\omega_x \sin \beta * \cos \varepsilon + \omega_y \cos \beta * \cos \varepsilon \end{bmatrix}$$

Kết quả cuối cùng: Mối liên hệ giữa $\dot{\varepsilon}$, $\dot{\beta}$ và ω :

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon} = -\omega_x \sin \beta + \omega_y \cos \beta \\ \dot{\beta} = \omega_x \tan \varepsilon * \cos \beta + \omega_y \tan \varepsilon * \sin \beta - \omega_z \end{cases} \quad (5)$$

2.3. Mô hình hóa bộ mã hóa

Các phép đo góc khớp được lấy từ mã hóa, vốn đưa nhiễu và sai lệch vào dữ liệu. Đầu ra mã hóa đo được y được mô hình hóa như sau:

$$y = q + b + n \quad (6)$$

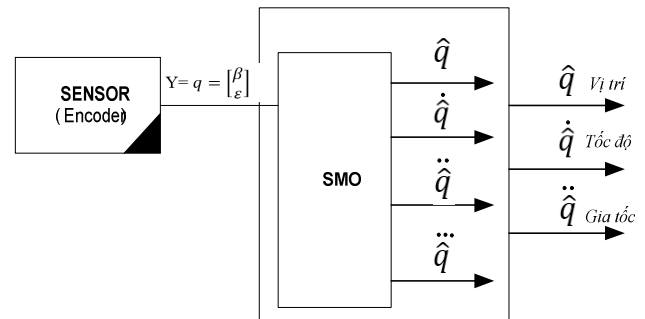
trong đó, q là góc khớp thực, b biểu thị sai lệch cố định do lỗi lắp đặt hoặc khuyết tật cảm biến, và n biểu thị nhiễu cộng thêm. Trong nghiên cứu này, n được xem xét trong hai kịch bản: (1) nhiễu Gaussian trắng với giá trị trung bình bằng 0 và phương sai σ^2 .

3. THIẾT KẾ BỘ QUAN SÁT

Phần này trình bày thiết kế của bộ quan sát trượt (SMO) và bộ quan sát độ lợi cao xếp chồng (CHGO) để ước lượng vị trí, vận tốc và gia tốc từ các phép đo mã hóa bị nhiễu.

3.1. Bộ quan sát chế độ trượt (SMO)

Để quan sát các tín hiệu góc, vận tốc góc, gia tốc góc của hệ pan-tilt ta xây dựng bộ quan sát SMO (Sliding Mode Observer) thực hiện quan sát góc ($\hat{\beta}$, $\hat{\varepsilon}$), vận tốc góc ($\hat{\dot{\beta}}$, $\hat{\dot{\varepsilon}}$) và ($\hat{\ddot{\beta}}$, $\hat{\ddot{\varepsilon}}$) của hệ thống pantilt từ tín hiệu đo lường là góc pantilt (β , ε), với giả thiết độ giật không đổi ($\ddot{\beta} = \text{const}$, $\ddot{\varepsilon} = \text{const}$). Sau đây ta sẽ thực hiện từng bước và chứng minh tính hội tụ của phương pháp.



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc bộ quan sát chế độ trượt SMO

Từ phương trình động học của hệ thống ta thấy, tín hiệu đầu vào của bộ quan sát là tín hiệu góc, tín hiệu tác động lên phương trình động học là moment điều khiển u_β và u_ε .

$+ y = q + b_e + \mu_e$: Tín hiệu vị trí đo được từ encoder (là tín hiệu thực vị trí + nhiễu)

$$+ \mathbf{x}_{01} = \mathbf{q}$$

$$+ \mathbf{x}_{02} = \dot{\mathbf{q}}$$

$$+ \mathbf{x}_{03} = \ddot{\mathbf{q}}$$

$$+ \mathbf{e} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{q}} = \mathbf{q} + \delta_b + \boldsymbol{\eta} - \hat{\mathbf{q}} = \mathbf{e}_q + \delta_b + \boldsymbol{\eta}; \text{ Sai số đo lường.}$$

$$+ \mathbf{e}_q = \mathbf{q} - \hat{\mathbf{q}}; \text{ Sai số ước lượng góc.}$$

Giả sử hệ thống cơ học cho góc pan-tilt có dạng:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_{01} = \mathbf{x}_{02} \\ \dot{\mathbf{x}}_{02} = \mathbf{\Psi}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}) \end{cases} \quad (7)$$

Trong đó:

$\mathbf{x}_{01}, \mathbf{x}_{02}, \mathbf{x}_{03}$: Vector góc, vận tốc góc và gia tốc góc của góc pan, tilt.

Tham số cần ước lượng cho bộ SMO:	Tham số đo lường cho bộ SMO:
Giá trị: góc $\hat{\mathbf{q}}$, vận tốc góc $\hat{\dot{\mathbf{q}}}$, gia tốc góc $\hat{\ddot{\mathbf{q}}}$	$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \beta \\ \varepsilon \end{bmatrix}$

Thiết kế bộ quan sát trượt SMO:

Cấu trúc thuật toán **Super-Twisting** trượt SMO

Thuật toán **Super-Twisting** được sử dụng để điều khiển sai số quan sát hội tụ về 0 trong thời gian hữu hạn mà không gây chattering quá mức. Trong Super-Twisting, một hệ thống sai số bậc 2, sai số $\mathbf{e}_q$ và $\mathbf{e}_{\dot{q}}$ được điều chỉnh bằng hai thành phần:

+ **Thành phần phi tuyến**: $|\mathbf{e}|^{1/2} \text{sgn } \mathbf{e}$ giúp tăng tốc độ hội tụ và giảm chattering.

+ **Thành phần tích phân**: $\int \text{sgn } \mathbf{e} \, dt$ đảm bảo điều khiển liên tục và bù đắp nhiễu hoặc bất định.

Tuy nhiên, trong bộ quan sát, các trạng thái được ước lượng theo thứ tự (từ $\mathbf{q}$ đến $\dot{\mathbf{q}}$, rồi $\ddot{\mathbf{q}}$), và mỗi trạng thái có vai trò khác nhau trong động lực học sai số.

Ta xây dựng bộ quan sát trượt như sau để ước lượng góc $\hat{\mathbf{q}}$, vận tốc góc $\hat{\dot{\mathbf{q}}}$, gia tốc góc $\hat{\ddot{\mathbf{q}}}$

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}_{01} = \hat{\mathbf{x}}_{02} + \mathbf{z}_1 = \hat{\mathbf{x}}_{02} + \mathbf{K}_1 * |\mathbf{e}|^{1/2} * \text{sgn}(\mathbf{e}) + \mathbf{K}_2 * \int \text{sgn}(\mathbf{e}) d(t) \\ \hat{\mathbf{x}}_{02} = \mathbf{\Psi}(\hat{\mathbf{x}}_0, \mathbf{u}) + \mathbf{z}_2 \\ = \mathbf{\Psi}(\hat{\mathbf{x}}_0, \mathbf{u}) + \mathbf{K}_3 * |\mathbf{e}|^{1/2} * \text{sgn}(\mathbf{e}) + \mathbf{K}_4 * \int \text{sgn}(\mathbf{e}) d(t) \\ \hat{\mathbf{x}}_{03} = \mathbf{z}_3 = \mathbf{K}_5 * |\mathbf{e}|^{1/2} * \text{sgn}(\mathbf{e}) + \mathbf{K}_6 * \int \text{sgn}(\mathbf{e}) d(t) \end{cases} \quad (8)$$

Trong đó:

- $\begin{cases} \mathbf{z}_1 = \mathbf{K}_1 * |\mathbf{e}|^{1/2} * \text{sgn}(\mathbf{e}) + \mathbf{K}_2 \int \text{sign}(\mathbf{e}) \, dt, \\ \mathbf{z}_2 = \mathbf{K}_3 * |\mathbf{e}|^{1/2} * \text{sgn}(\mathbf{e}) + \mathbf{K}_4 \int \text{sign}(\mathbf{e}) \, dt, \\ \mathbf{z}_3 = \mathbf{K}_5 * |\mathbf{e}|^{1/2} * \text{sgn}(\mathbf{e}) + \mathbf{K}_6 \int \text{sign}(\mathbf{e}) \, dt, \end{cases}$
- $\mathbf{\Psi}(\hat{\mathbf{x}}_0, \mathbf{u})$: Mô hình danh định của hệ thống, có thể đơn giản ($\mathbf{\Psi} = 0$) nếu không biết chính xác.
- $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \mathbf{K}_3, \mathbf{K}_4, \mathbf{K}_5, \mathbf{K}_6$: Các hệ số khuếch đại, được chọn để đảm bảo hội tụ.
- $\text{sgn}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{x}}_{01})$: là hàm quan sát của sai số quan sát $\mathbf{e} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{x}}_{01}$.

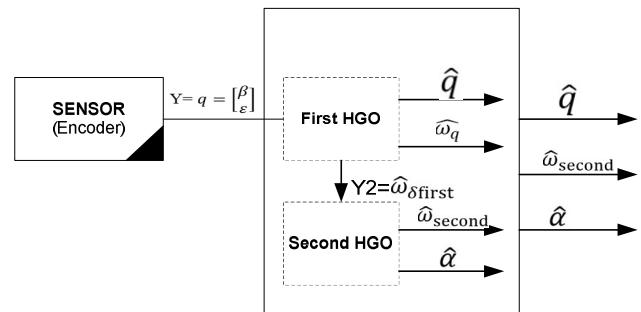
Nguyên lý hoạt động:

- Ước lượng trạng thái: SMO không cần đo lường moment vì nó sử dụng sai lệch giữa vị trí thực và vị trí ước lượng thông qua $\mathbf{K}_1 * |\mathbf{e}|^{1/2} * \text{sgn}(\mathbf{e}) + \mathbf{K}_2 * \int \text{sgn}(\mathbf{e}) d(t), \mathbf{K}_3 * |\mathbf{e}|^{1/2} * \text{sgn}(\mathbf{e}) + \mathbf{K}_4 * \int \text{sgn}(\mathbf{e}) d(t)$ và $\mathbf{K}_5 * |\mathbf{e}|^{1/2} * \text{sgn}(\mathbf{e}) + \mathbf{K}_6 * \int \text{sgn}(\mathbf{e}) d(t)$ để hiệu chỉnh $\hat{\mathbf{x}}_{01}, \hat{\mathbf{x}}_{02}, \hat{\mathbf{x}}_{03}$ hội tụ về giá trị thực $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$.

- Bộ quan sát SMO tận dụng tính chất bền vững của cơ chế trượt để xử lý nhiễu và bất định trong hệ thống nhờ hệ số khuếch đại $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \mathbf{K}_3, \mathbf{K}_4, \mathbf{K}_5, \mathbf{K}_6 > 0$ và đủ lớn.

- Ở đây ta xây dựng mô hình ước lượng với gia tốc góc của hệ pantilt thay đổi chậm ($\ddot{\mathbf{q}} = \text{const}$). Bộ quan sát hoạt động nhờ cơ chế phản hồi sai số.

3.2. Bộ quan sát độ lợi cao xếp chồng



Hình 3. Sơ đồ cấu trúc bộ quan sát độ lợi cao xếp chồng (CHGO)

CHGO, được giới thiệu trong [5], sử dụng cấu trúc độ lợi cao xếp chồng để ước lượng trạng thái nhanh chóng trong điều kiện nhiễu Gaussian. Bộ quan sát đầu tiên (CHGO1) ước lượng vị trí $\mathbf{q}$ và vận tốc $\dot{\mathbf{q}}$, trong khi bộ thứ hai (CHGO2) ước lượng gia tốc $\ddot{\mathbf{q}}$. Động lực học của CHGO1 là:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{q}}} &= \hat{\omega} + \frac{\alpha_1}{\gamma} (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{q}}) \\ \dot{\hat{\omega}} &= \mathbf{f}(\hat{\mathbf{q}}, \hat{\omega}) + \mathbf{g}(\hat{\mathbf{q}})\tau + \frac{\alpha_2}{\gamma^2} (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{q}}) \end{aligned} \quad (9)$$

trong đó, $\gamma > 0$, và các hệ số là α_1, α_2 , với α_1 và α_2 được chọn để đảm bảo hội tụ. Đối với CHGO2, động lực học là:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\omega}} &= \hat{\alpha} + \frac{\rho_1}{\gamma} (\hat{\omega} - \hat{\omega}) \\ \dot{\hat{\alpha}} &= \frac{\rho_2}{\gamma^2} (\hat{\omega} - \hat{\omega}) \end{aligned} \quad (10)$$

$\hat{\omega}$: Giá trị quan sát tốc độ góc ở tầng số 2.

trong đó, $\hat{\omega}$ từ CHGO1, và ρ_1, ρ_2 là tham số có thể điều chỉnh. Thiết kế độ lợi cao đảm bảo hội tụ nhanh nhưng có thể khuếch đại nhiễu hoặc biểu hiện hiện tượng peaking, được quản lý bằng cách bão hòa đầu vào điều khiển [5].

4. TỔNG HỢP HỆ THỐNG ỔN ĐỊNH ĐƯỜNG NGẮM

Trong hệ thống ổn định đường ngắm, vận tốc góc của đường ngắm hay vận tốc góc của bộ gắn thiết bị theo các

trục phải được duy trì sao cho đường ngắm trong không gian quán tính được ổn định. Mô hình động học hệ thống ổn định đường ngắm được mô tả bằng phương trình:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \xi_2 \\ \dot{\xi}_2 = k\xi_2 + bu + f \end{cases} \quad (11)$$

Với $\xi_1, \xi_2, \dot{\xi}_2$ thứ tự là vị trí góc q , vận tốc góc $\dot{q}$ và gia tốc góc $\ddot{q}$ của hệ truyền động, k là hệ số ma sát nhớt, b là hệ số tỷ lệ nghịch với mô men quán tính của hệ, u là lệnh điều khiển hay mô men chủ động được đưa vào hệ thống, f là tổng sai số mô hình cũng như các thành phần bất định khác tác động vào hệ thống quy ra đầu vào hệ thống.

Trong chế độ ổn định, giá trị góc mong muốn, vận tốc góc mong muốn và gia tốc góc mong muốn thứ tự ký hiệu là $q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$.

Đặt $x_1 = q - q_d; x_2 = \dot{q} - \dot{q}_d$, phương trình động học (11) trở thành:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = kx_2 + bu + f + d \end{cases} \quad (12)$$

Có thể sử dụng điều khiển thích nghi để tổng hợp hệ thống ổn định đường ngắm cho camera trên phương tiện cơ động, tuy nhiên nó có những nhược điểm như: với hệ thống có tham số bất định, biến đổi nhanh như sự thay đổi của bề xe mang trong điều kiện hoạt động trên địa hình phức tạp thì chất lượng điều khiển thích nghi không đảm bảo. Vì vậy dưới đây sẽ đề xuất phương pháp điều khiển trượt trên cơ sở các phương pháp nhận dạng được các thành phần bất định đã được xây dựng [9].

Với $d = k\theta_d - \ddot{\theta}_d$ là thành phần đầu vào, được xác định theo các công thức (5), f là thành phần bất định, f có thể được nhận dạng bằng mạng nơ ron nhân tạo [17] với sai số nhỏ tùy chọn:

$$f = \hat{f} + \tilde{f} \text{ với } |\tilde{f}| \leq \sigma \quad (13)$$

Với $\hat{f}$ là ước lượng của f và $\tilde{f}$ là sai số ước lượng, $|\tilde{f}| \leq \sigma$ với σ là số dương nhỏ tùy ý, $\sigma > 0$.

Khi đó, đối với hệ (12) với phương pháp ước lượng nhiều với sai số ước lượng đủ nhỏ, bị chặn (13), chế độ trượt được áp dụng để tổng hợp lệnh điều khiển. Phương trình mặt trượt:

$$s = cx_1 + x_2 \quad (14)$$

Lệnh điều khiển được chọn như sau:

$$u = -\frac{1}{b}[(c+k)x_2 + \hat{f} + d + (\sigma + \varepsilon) \operatorname{sgn} s] \quad (15)$$

Với ε là số dương nhỏ tùy ý. Với lệnh điều khiển (15), hệ sẽ ổn định tiệm cận. Điều này có thể kiểm chứng bằng phương pháp Lyapunov. Chọn hàm Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2}s^2$$

$$\text{Khi đó: } \dot{V} = s\dot{s} = s(cx_2 + kx_2 + bu + f + d) \quad (16)$$

Thay giá trị u từ (15) vào (4.6) nhận được:

$$\dot{V} = s\dot{s} = s(-\sigma \operatorname{sgn} s + \tilde{f} - \varepsilon \operatorname{sgn} s) \quad (17)$$

Kết hợp với (13) nhận được

$$\dot{V} = s\dot{s} \leq s(-\varepsilon \operatorname{sgn}(s)) \leq 0 \quad (18)$$

Như vậy, hệ (12) ổn định.

Tuy nhiên, vì đây là hệ ổn định cho các thiết bị quang học, nên hiện tượng chattering là một tác động xấu cần loại bỏ. Để khắc phục hiện tượng này, thay vì sử dụng thành phần hàm dấu trong lệnh điều khiển, hàm phi tuyến $\arctg(\cdot)$ sẽ được sử dụng. Khi đó (15) được viết lại thành:

$$u = -\frac{1}{b}[(c+k)x_2 + \hat{f} + d + \alpha \arctg(\gamma s)] \quad (19)$$

Khi đó, (18) trở thành:

$$\dot{V} = s\dot{s} = s(-\alpha \arctg(\gamma s) + \tilde{f}) \quad (20)$$

$$\dot{V} \leq 0 \text{ khi } \alpha \arctg(\gamma |s|) > \sigma, \text{ hay } |s| > \sigma/\alpha\gamma. \quad (21)$$

Không mất tính tổng quát, chọn $\alpha\gamma = 1$, khi đó $\dot{V} \leq 0$ nếu $s > \sigma$, nói cách khác,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |s| \leq \sigma, \quad (22)$$

Có nghĩa là s sẽ nằm trong lân cận σ của 0, ký hiệu là $0(\sigma)$. Từ khi s tiến tới $0(\sigma)$, với điều kiện (22), sai số tốc độ góc tối đa được tính như sau:

$$\text{Chọn hàm Lyapunov } V_2 = \frac{1}{2}x_1^2 \quad (23)$$

$$\text{Khi đó: } \dot{V}_2 = x_1 x_2 = x_1(s - cx_1) \quad (24)$$

$$\text{Từ (24) dễ dàng nhận thấy, } \dot{V}_2 \leq 0 \text{ khi } |x_1| > \frac{|s|}{c} \quad (25)$$

Điều kiện (25) đồng nghĩa với việc x_1 nằm trong lân cận $\frac{|s|}{c}$, kết hợp với (22) x_1 sẽ nằm trong lân cận σ/c , có nghĩa là đường ngắm sẽ bị trôi trong không gian quán tính với vận tốc tối đa là σ/c . Trong bài toán kết hợp ổn định và bắt bám mục tiêu tự động, độ trôi này sẽ được bù bằng hệ thống điều khiển bám.

Để kiểm chứng kết quả trên, dưới đây tác giả sẽ trình bày kết quả mô phỏng chi tiết.

5. MÔ PHỎNG, TÍNH TOÁN, THẢO LUẬN

Mô phỏng thực hiện bằng MATLAB/Simulink với 02 nội dung:

Nội dung 1: So sánh hiệu suất bộ quan sát SMO Với bộ quan sát CHGO trong việc ước lượng trạng thái của một hệ pan-tilt 2 DOF.

Nội dung 2: So sánh chất lượng bộ điều khiển ổn định đường ngắm khi sử dụng bộ quan sát SMO với bộ quan sát CHGO trong việc ước lượng trạng thái tín hiệu góc pan-tilt 2 DOF.

5.1. Nội dung 1: Mục tiêu chính là đánh giá độ chính xác, tốc độ hội tụ và độ bền vững của SMO và CHGO trong việc ước lượng góc khớp (q), vận tốc góc ($\dot{q}$), và gia tốc góc ($\ddot{q}$) từ các phép đo mã hóa bị nhiễu.

Thông số mô phỏng: Do hai kênh tương đương nhau nên ta sẽ mô phỏng với 1 kênh, để đơn giản ta chọn: $q_{1d}(t) = \sin(t)$, Hàm nhiễu gaussian: $b = 0,01\text{rad}$, $n \sim \mathcal{N}(0; 0,001)$.

Triển khai bộ quan sát:

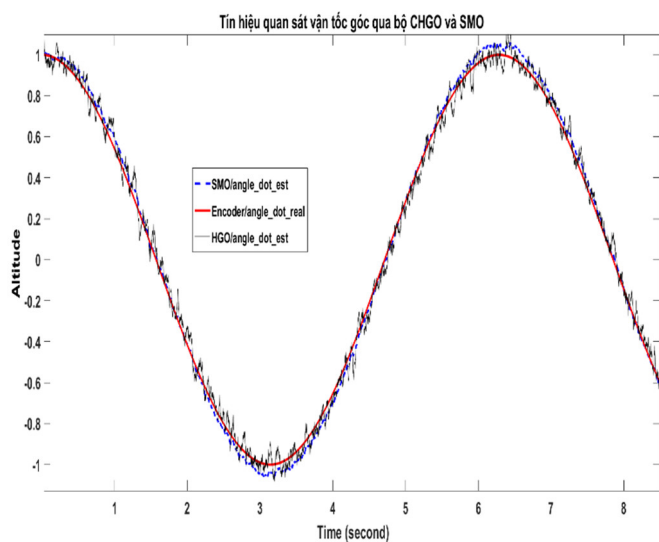
• **SMO:** Được triển khai như mô tả trong Phần 3.1, với các hệ số $k_1 = 4, k_2 = 1, k_3 = 28, k_4 = 1, k_5 = 80, k_6 = 1,2$. Các giá trị này được điều chỉnh để đảm bảo hội tụ nhanh trong khi giảm thiểu chattering.

• CHGO:

Được triển khai theo Phần 3.2, với các hệ số $\rho_1 = 1, \rho_2 = 1, \gamma = 0,03$ (cho CHGO1), và $\rho_3 = 1, \rho_4 = 0,1, \gamma = 0,03$ (cho CHGO2). Các hệ số được chọn để cân bằng giữa tốc độ hội tụ và độ nhạy nhiễu.

Kết quả mô phỏng so sánh hai bộ SMO và CHGO:

- Tín hiệu của hai bộ quan sát tương đồng nhau và bám sát tín hiệu thực.



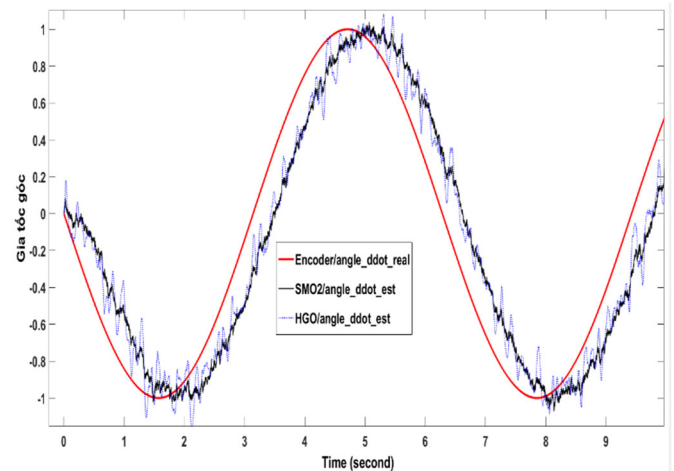
Hình 4. Tín hiệu quan sát vận tốc góc thông qua bộ CHGO và SMO

Nhận xét: (Tín hiệu thực màu đỏ, SMO màu xanh blue, CHGO màu tím)

Bộ quan sát CHGO và bộ SMO có chất lượng bám tốt cũng như đáp ứng tương đương nhau, tuy nhiên SMO có đặc tính mịn hơn, CHGO cho biên độ dao động quanh tín

hiệu thực lớn, khó sử dụng trong các ứng dụng thực tế (dù đã điều chỉnh các tham số tối ưu).

- Bộ quan sát SMO cho tín hiệu trơn, sai số nhỏ tuy nhiên có độ lag nhất định so với tín hiệu thực.



Hình 5. Tín hiệu quan sát gia tốc góc thông qua bộ CHGO và SMO

Nhận xét: (Tín hiệu thực màu đỏ, CHGO màu tím, SMO màu xanh blue)

Giai đoạn đầu cả hai cùng mắc sai số quan sát (quá chỉnh). Sau đó hệ thống bám tốt.

CHGO bám nhanh nhưng độ dao động lớn, sai số lớn, bộ SMO cho kết quả mịn hơn, sai số nhỏ hơn nhưng có độ trễ nhỏ, độ trễ này có thể xử lý được nhờ bộ điều khiển preview (bộ điều khiển xem trước) với tham số xem trước nhiễu.

5.2. Nội dung 02

Các tham số mô phỏng của hệ thống:

$$\omega_B = \begin{bmatrix} 0,2 \sin 0,02t & 0,02 \sin 0,5t & 0,13 \sin \frac{t}{3} \end{bmatrix}^T$$

$$\varepsilon(0) = \frac{\pi}{6}, \quad \beta(0) = \frac{\pi}{4}.$$

$$\hat{f} = 0,015 \sin t, \quad \tilde{f} = 0,001 \sin t + \frac{5\pi}{2},$$

$$c = 10, \alpha = \frac{0,2u_{\max}}{\pi}, \gamma = \frac{10\pi}{2u_{\max}},$$

$$u_{\max} = 1,5, b = \frac{1}{10}, k = -15, \sigma = 0,002$$

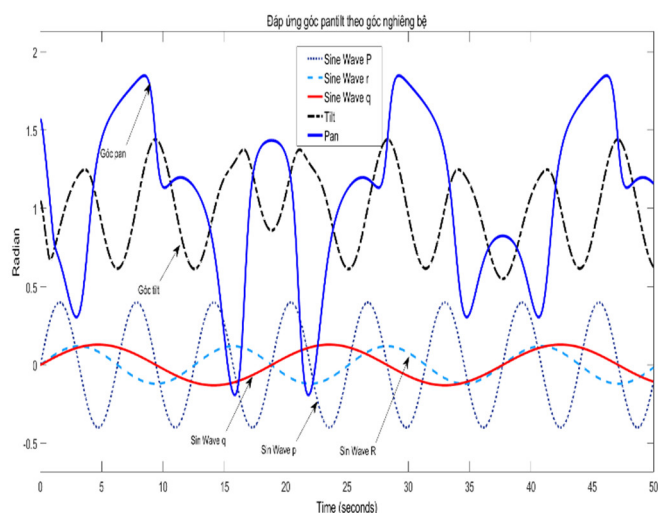
- Lệnh điều khiển được tổng hợp theo (19):

$$u = -\frac{1}{b} \left[(c + k)x_2 + \hat{f} + d + \alpha \arctg(\gamma s) \right]$$

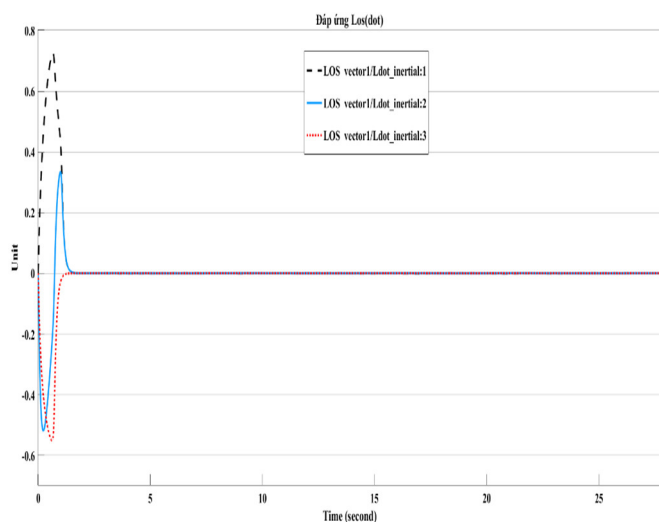
- Hệ số của các bộ SMO và CHGO tương tự như nội dung 1.

Kết quả mô phỏng:

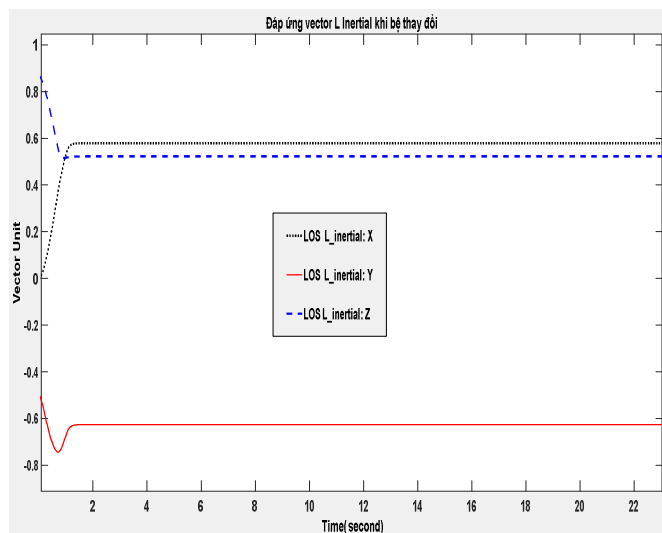
+ Đáp ứng của hệ thống khi tín hiệu phản hồi về là lý tưởng (1:1):



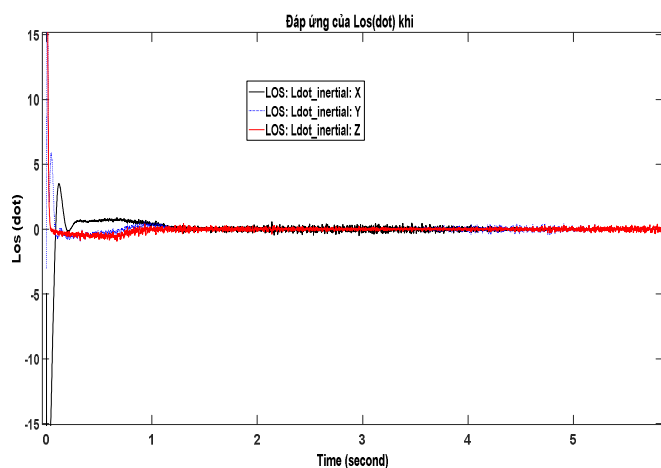
Hình 6. Đáp ứng góc pan, góc tilt khi bệ thay đổi



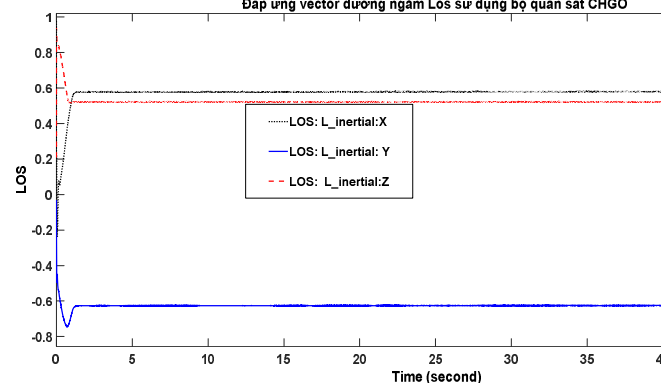
Hình 7. Đáp ứng vector Los(dot) khi góc nghiêng bệ thay đổi

Hình 8. Đáp ứng vector $L_{inertial}$ khi góc nghiêng bệ thay đổi

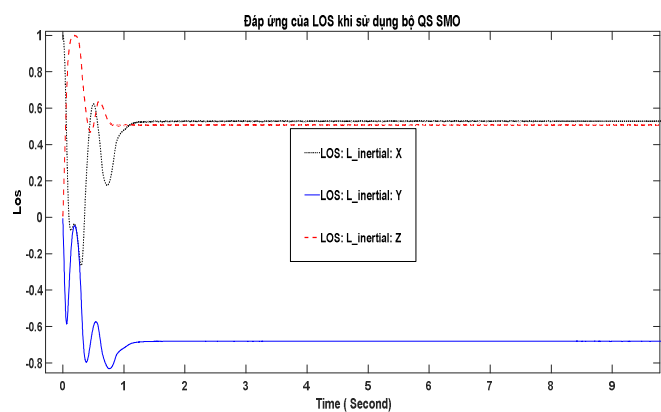
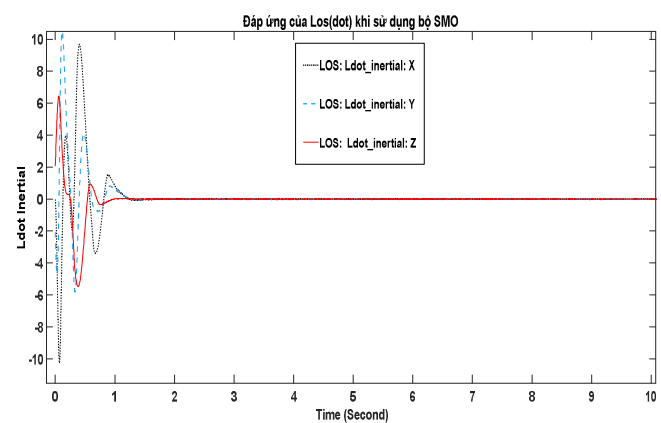
+ Đáp ứng của hệ thống khi tín hiệu phản hồi về được tính toán qua bộ quan sát (SMO và CHGO):



Đáp ứng vector đường ngắm Los sử dụng bộ quan sát CHGO



Hình 9. Đáp ứng Los(dot) và Los khi sử dụng bộ quan sát CHGO



Hình 10. Đáp ứng Los(dot) và Los khi sử dụng bộ quan sát SMO

Nhận xét: Bộ điều khiển sử dụng bộ quan sát SMO cho đặc tính ổn định hơn và trơn hơn mịn hơn, Bộ điều khiển sử dụng bộ quan sát CHGO bị hiện tượng peaking làm độ quá điều chỉnh lớn (-100 đến 20) trong khi độ quá chỉnh của SMO chỉ là (-11 đến +11).

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã thực hiện so sánh chi tiết giữa Bộ Quan sát Chế độ siêu trượt (SMO) và Bộ Quan sát Độ lợi Cao xếp chồng (CHGO) trong việc ước lượng vị trí, vận tốc góc và gia tốc góc cho hệ thống pan-tilt 2 bậc tự do (DOF), đồng thời tích hợp phương pháp điều khiển trượt để ổn định đường ngắm. Kết quả mô phỏng cho thấy SMO vượt trội về độ bền vững khi đối mặt với nhiễu và sự không chắc chắn của mô hình, cung cấp các ước lượng trạng thái mượt mà với sai số nhỏ, dù tồn tại một độ trễ nhất định. Ngược lại, CHGO thể hiện tốc độ hội tụ nhanh và độ chính xác cao trong điều kiện lý tưởng, nhưng nhạy hơn với nhiễu, dẫn đến dao động lớn hơn trong ước lượng. Về mặt điều khiển, hệ thống sử dụng SMO kết hợp với điều khiển trượt cho thấy đặc tính ổn định và trơn tru hơn, đặc biệt trong việc triệt tiêu chuyển động của bệ để giữ đường ngắm cố định trong không gian quán tính.

Những phát hiện này định hướng rõ ràng cho ứng dụng thực tế: SMO phù hợp với các hệ thống pan-tilt hoạt động trong môi trường phức tạp, như robot giám sát ngoài trời, nhờ khả năng chống nhiễu bền vững và hiệu quả trong ổn định đường ngắm. CHGO với tốc độ phản hồi nhanh, lý tưởng cho các ứng dụng trong điều kiện được kiểm soát, như ổn định camera trong nhà. Để cải thiện hiệu suất, nghiên cứu tương lai có thể khám phá các phương pháp lai, kết hợp độ bền vững của SMO và tốc độ hội tụ của CHGO, đồng thời tích hợp các kỹ thuật giảm độ trễ, chẳng hạn như điều khiển dự đoán. Việc triển khai các bộ quan sát và thuật toán điều khiển trên phần cứng thực tế sẽ là bước tiến quan trọng đưa các giải pháp này vào ứng dụng thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. D. G. Luenberger, "Observing the state of a linear system," *IEEE Trans. Mil. Electron.*, 8, 2, 74-80, 1964.
- [2]. R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems," *J. Basic Eng.*, 82, 1, 35-45, 1960.
- [3]. H. K. Khalil, "High-gain observers in nonlinear feedback control," *Int. J. Robust Nonlinear Control*, 24, 6, 993-1015, 2014.
- [4]. V. I. Utkin, "Sliding mode control design principles and applications to electric drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 40, 1, 23-36, 1993.
- [5]. S. E. Han, M. Unel, "A novel adaptive controller for periodic disturbance rejection," in *Proc. 11th Asian Control Conf. (ASCC)*, Gold Coast, Australia, pp. 1035-1040, Dec. 2017.
- [6]. R. P. G. Collinson, *Introduction to Avionics Systems*, 3rd Edition. New York, NY, USA: Springer, 2011.
- [7]. H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, 3rd Edition. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2002.
- [8]. Ngô Trí Nam Cường, "Một phương pháp nhận dạng và bù trừ các thành phần bất định cho một lớp đối tượng phi tuyến," *Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Quân sự*, 17, 53-61, 2017.

AUTHOR INFORMATION

Trương Tat Thuan

Control, Automation in Production and Improvement of Technology Institute,
Institute of Military Science and Technology, Vietnam