

GIẢI PHÁP ỔN ĐỊNH HÌNH ẢNH CAMERA QUAN SÁT TRÊN BIỂN DỰA TRÊN HỆ THỐNG TỰ CÂN BẰNG SỬ DỤNG CON QUAY HỒI CHUYỂN

Phạm Minh Kha, Nguyễn Quang Thi*
Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất một phương pháp điều khiển trượt có xét đến bù ma sát giúp nâng cao khả năng tự ổn định của hệ thống bộ camera với các yêu cầu giám sát mục tiêu tầm xa và di chuyển tốc độ cao. Phương pháp này có thể được áp dụng cho các hệ thống bộ camera tầm xa đặt trên tàu để quan sát mục tiêu trên biển khi chịu sự tác động rung lắc từ thân tàu gây mất ổn định hình ảnh thu được, điều đó ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác và khả năng quan sát, giải pháp giảm rung lắc của camera dưới tác động của thân tàu giúp cho hình ảnh video rõ ràng và ổn định hơn. Thuật toán điều khiển trượt sử dụng luật tiếp cận theo cấp số nhân cho phép hệ thống nhanh chóng theo dõi tín hiệu lệnh với hiệu ứng động tốt, kết quả cho thấy hệ thống có độ chính xác định vị cao và hiệu suất tốt, có thể đáp ứng các yêu cầu thiết kế. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy, so với phương pháp điều khiển PID cổ điển, bộ điều khiển trượt có thể loại bỏ hiệu quả hiện tượng “leo” (climbing) và “đỉnh phẳng” (flat-top) do ma sát.

Từ khóa: Camera tự ổn định; mục tiêu trên biển; điều khiển trượt; ma sát; PID

Ngày nhận bài: 22/6/2020; Ngày hoàn thiện: 26/8/2020; Ngày đăng: 31/8/2020

SOLUTION FOR IMPROVING THE STABILITY OF SHIP MOUNT PTZ CAMERAS BASED ON GYROSCOPIC ACTIVE SELF-BALANCE PLATFORM

Phạm Minh Kha, Nguyen Quang Thi*
Le Quy Don Technical University

ABSTRACT

A sliding control method that takes into account mechanical friction compensation is proposed to improve the self-stabilization of the camera platform with long-range target monitoring requirements and high-speed movement of the platform. This method can be applied to long-range camera platforms on sea ships to observe sea surface targets. The ships platform is subjected to vibration from the hull which causes instability and damage the tracking accuracy and image quality when operating reduces camera shake under the action of the hull improves the quality of self-stabilization and video images. The slider control algorithm uses exponential access rules which allows the system to quickly monitor control signals with good dynamic response time, the results show that the system has high positioning accuracy and good performance and can be able to meet the practical design requirements. Simulation results and experiments demonstrate that, compared with the classical PID control methods, sliding control method can eliminate effectively “climbing” and “flat-top” phenomena due to friction.

Keywords: Self-stabilizing camera; sea surface targets; sliding control; Friction; PID

Received: 22/6/2020; Revised: 26/8/2020; Published: 31/8/2020

* Corresponding author. Email: thinq.isi@lqdtu.edu.vn

1. Giới thiệu

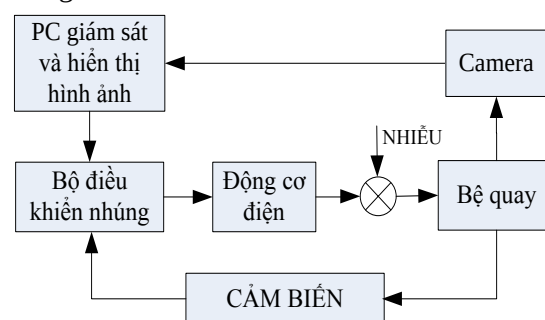
Hệ thống camera quan sát đặt trên tàu biển gồm hai bộ phận chính tạo thành là hệ thống bộ quay tầm hướng tự ổn định dùng con quay và camera quan sát được đặt lên bộ quay. Gió và sóng sẽ ảnh hưởng đến thân tàu khi đang đi trên mặt biển và khiến chúng lắc lư. Hình ảnh Camera gắn trên tàu cũng không ổn định do ảnh hưởng của nó, khiến mục tiêu khi quan sát bị dịch chuyển hoặc mất. Do đó, Camera phải được lắp đặt trên một bộ quay có khả năng tự ổn định trên tàu để bù lại cho sự dao động của tàu. Trong điều kiện hoạt động trên biển, thì ngoài sóng biển tác động làm bộ quay rung lắc, lực cản của gió, lực ma sát và lực quán tính của tự thân bộ quay, đặc biệt đối với hệ thống camera tầm xa thì vấn đề điều khiển càng thêm khó khăn, cần nghiên cứu và phân tích sâu hơn [1].

Hiện nay, các hệ thống Camera quan sát trên biển thường có trọng lượng và mô-men quán tính lớn, do vậy việc thiết kế cơ khí hệ thống bộ quay phải đảm bảo hợp lý để nâng cao độ chính xác, giảm thiểu mô-men quán tính, mặt khác cũng phải chọn phương pháp điều khiển tối ưu với mục đích cải thiện tính năng hệ thống [2]. Hệ thống ổn định được thiết kế trong khuôn khổ bài báo này là một thiết bị có thể giữ cho vật thể được ổn định dưới sự tác động từ bên ngoài nhằm duy trì hướng của nó luôn giữ cố định so với không gian quán tính hoặc thực hiện đúng theo hướng mà người điều khiển mong muốn.

Phương pháp điều khiển hiệu chỉnh miền tần số điển hình có thể đảm bảo hệ thống tương đối ổn định trong một phạm vi nhất định, nhưng mô hình chính xác của đối tượng điều khiển rất khó được xác định và những thay đổi trong điều kiện môi trường sẽ ảnh hưởng đến các đặc tính của chính hệ thống [3]. Đặc biệt là trong các thiết bị trên tàu, khi thân tàu ở các tư thế chuyển động khác nhau, trọng tâm của hệ thống sẽ thay đổi và mô-men ma sát giữa các trục cũng thay đổi xảy ra hiện tượng khi động cơ hoạt động ở tốc độ thấp thì

gây ra hiệu ứng lúc dừng, lúc chậm, lúc nhanh hay còn gọi hiệu ứng “leo” (*climbing*), khi thay đổi hướng quay thì có một khoảng trễ mà động cơ không quay gọi là hiệu ứng “đỉnh phẳng” (*flat-top*). Các yếu tố này sẽ làm cho những đặc điểm của đối tượng được điều khiển khác với các trường hợp mà trong quá trình điều chỉnh mà đặc tính của hệ thống không đổi. Do vậy, chúng tôi đề xuất phương pháp điều khiển trượt có xét đến bù ma sát và độ nhạy với các tham số được thiết kế, làm cho hệ thống có hiệu suất tốt hơn.

Để có được hình ảnh video rõ ràng, giải pháp sử dụng một cơ cấu bộ quay Camera tự ổn định dùng con quay hồi chuyển với cấu trúc cơ điện quay góc tầm và hướng. Cấu trúc Servo hai phần về cơ bản là giống nhau. Ở đây, chỉ có một hướng được sử dụng làm ví dụ. Hệ thống Servo chứa hai vòng điều chỉnh bên trong và bên ngoài: vòng phản hồi tốc độ là vòng lặp bên trong, dựa vào con quay để đo vận tốc và gia tốc góc, từ đó động cơ sẽ chạy theo hướng ngược lại để đảm bảo độ ổn định của mặt phẳng Camera, vòng phản hồi vị trí bên ngoài thu được thông tin vị trí góc thông qua chuyển đổi dữ liệu gia tốc mà cảm biến đo được. Sơ đồ khối hệ thống được hiển thị trong hình 1.



Hình 1. Sơ đồ hệ thống Camera tự ổn định

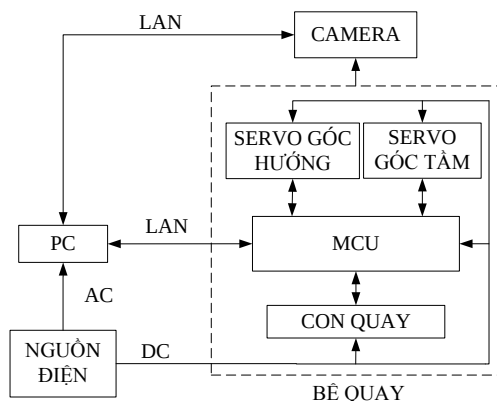
2. Thiết kế hệ thống tự ổn định

2.1. Phần cứng

Hệ thống điều khiển bộ camera tự ổn định trong nghiên cứu này chủ yếu bao gồm máy tính chủ PC, bộ điều khiển trung tâm MCU, con quay hồi chuyển, bộ driver điều khiển động cơ, động cơ, các bộ cảm biến vị trí và phần cơ khí của bộ quay.

Nguyên lý làm việc của hệ thống tự ổn định như sau: con quay phát hiện vận tốc góc và độ lệch góc tại thời gian thực của Camera, sau khi tín hiệu từ con quay được lọc và xử lý thì được gửi đến bộ điều khiển trung tâm. Bộ điều khiển trung tâm nhận được tín hiệu phản hồi từ con quay kết hợp với tín hiệu điều khiển từ máy tính giao diện người dùng PC sẽ tính toán và đưa ra lệnh điều khiển đến bộ chấp hành động cơ. Động cơ được điều khiển theo hướng triệt tiêu dao động của thân tàu, giúp cho hình ảnh thu được từ camera ổn định trong quá trình hoạt động.

Tất cả các cơ cấu chấp hành phải được lắp đặt trên một cơ cấu cơ khí đòi hỏi thiết kế tối ưu và chính xác nhằm đảm bảo cho hệ thống khi vận hành đạt được kết quả như mong muốn. Sơ đồ thiết kế mạch như trong hình 2.

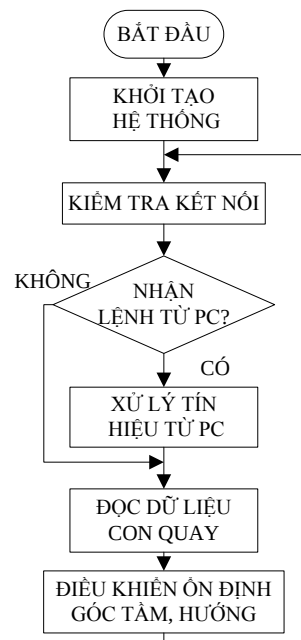


Hình 2. Cấu trúc hệ thống Camera tự ổn định

2.2. Thiết kế phần mềm nhúng cho bộ điều khiển trung tâm

Cùng với việc thiết kế phần cứng cho hệ thống thì việc thiết kế phần mềm đóng vai trò quan trọng. Một mặt, thuật toán điều khiển của hệ thống và mạch phần cứng phải được hiện thực hóa bằng thiết kế phần mềm. Mặt khác, tất cả các chức năng, phần mềm được thiết kế phải có độ tin cậy cao để đảm bảo hệ thống hoạt động ổn định và đáng tin cậy. Phần này kết hợp thiết kế phần cứng của hệ thống điều khiển để thiết kế phần mềm bộ điều khiển trung tâm.

Để thuận tiện cho việc gỡ lỗi và bảo trì hệ thống, phần mềm cho bộ điều khiển trung tâm sẽ được phát triển dựa trên phần mềm tích hợp μ Vision IDE của bộ vi điều khiển MCU, sử dụng ngôn ngữ lập trình C và thiết kế thành các mô-đun để phân chia theo chức năng hệ thống. Các bước thiết kế chương trình như sau: nắm rõ các chức năng tổng thể của hệ thống và các đặc điểm của hệ thống phần cứng liên quan đến từng mô-đun; phân tách thành các mô-đun phần mềm độc lập theo các chức năng đã thực hiện; vẽ sơ đồ chương trình của từng mô-đun và viết chương trình con theo sơ đồ; gỡ lỗi mô phỏng của từng mô-đun. Lưu đồ phần mềm điều khiển bộ quay trên bộ điều khiển trung tâm như trong hình 3.

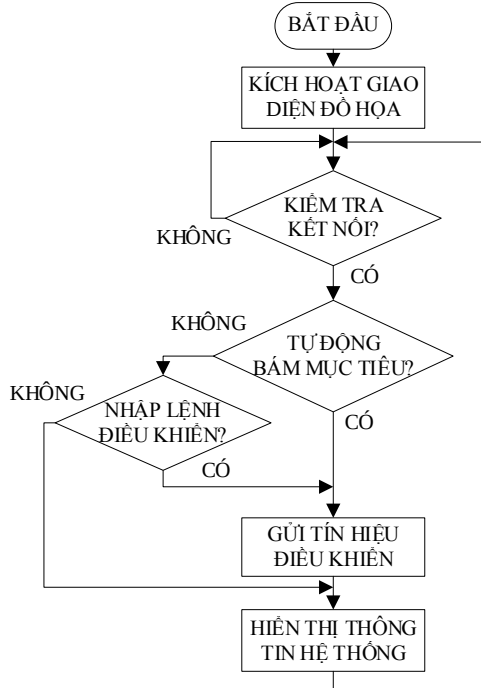


Hình 3. Lưu đồ thuật toán điều khiển bộ quay trên bộ điều khiển trung tâm

2.3. Thiết kế phần mềm giao diện điều khiển

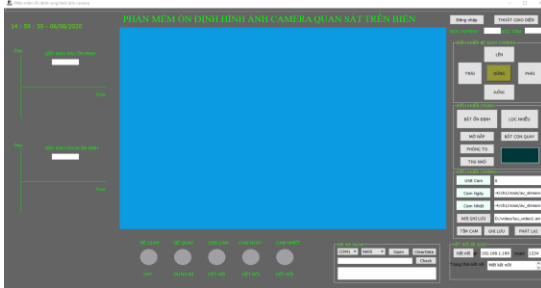
Phần mềm máy tính chủ là một cửa sổ để nhận ra sự tương tác giữa người với máy tính, thuận tiện cho việc kiểm soát và thử nghiệm hệ thống camera tự ổn định, đưa ra tín hiệu đầu vào hệ thống và hiển thị trạng thái của hệ thống camera tự ổn định trong thời gian thực. Phần mềm máy tính chủ dựa trên nền tảng hệ điều hành Windows, lập trình môi trường

Visual C++, sử dụng công nghệ lập trình đa tác vụ đa luồng, lưu đồ phần mềm được thể hiện trong hình 4.



Hình 4. Lưu đồ thuật toán hệ thống điều khiển bệ quay trên PC

Chức năng chính của phần mềm trên PC là quản lý và điều khiển bệ quay Camera và nhận tín hiệu hình ảnh từ Camera, sử dụng công nghệ lập trình đa tác vụ đa luồng, giao diện hệ thống đơn giản và đẹp mắt, thao tác đơn giản trong chương trình được thể hiện như hình 5.



Hình 5. Giao diện phần mềm quản lý người dùng trên PC

3. Mô hình hóa và thiết kế điều khiển trượt dựa trên bù ma sát

Ma sát tồn tại trong tất cả các chuyển động và là một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến bệ quay khi hoạt động ở tốc độ thấp. Nó không

chỉ gây ra lỗi trạng thái ổn định của hệ thống, mà còn gây ra hiện tượng mất ổn định trong chuyển động của hệ thống [4]. Để giảm các tác động bất lợi gây ra bởi các liên kết ma sát trong hệ thống Servo cơ học, hệ thống ổn định Camera có thể áp dụng phương pháp điều khiển trượt. Điều khiển trượt có cấu trúc đơn giản, hiệu quả, vì vậy nó thường được sử dụng như một phương pháp tốt với điều kiện mất ổn định và nhiễu của các hệ phi tuyến. Nghiên cứu xem xét các đặc điểm ma sát của hệ thống để nó có thể phản ánh chân thực vai trò của bộ điều khiển được thiết kế.

3.1. Giới thiệu mô hình ma sát

Có một vùng chết ma sát lớn giữa các mặt tiếp xúc của cấu trúc cơ khí trong bộ quay, đó là giao thoa phi tuyến chính trong dải tần số thấp của hệ thống. Tính phi tuyến của đối tượng được điều khiển làm cho hệ thống bị lệch và rung. Rất khó cho các phương pháp điều khiển truyền thống để đạt được điều khiển có độ chính xác cao. Có nhiều mô hình ma sát, mô hình ma sát Stribeck phổ biến hơn được sử dụng ở đây.

Khi $|\dot{\theta}(t)| < \alpha$, ma sát tĩnh được biểu diễn bởi:

$$F_f(t) = \begin{cases} -F_m & F(t) > F_m \\ -F(t) & -F_m < F(t) < F_m \\ F_m & F(t) < -F_m \end{cases} \quad (1)$$

Khi $|\dot{\theta}(t)| > \alpha$, ma sát động được biểu diễn bởi:

$$F_f(t) = [F_c + (F_m - F_c)e^{-\alpha_1|\dot{\theta}(t)|}] \text{sgn}(\dot{\theta}(t)) \quad (2)$$

$$F(t) = J\ddot{\theta}(t) \quad (3)$$

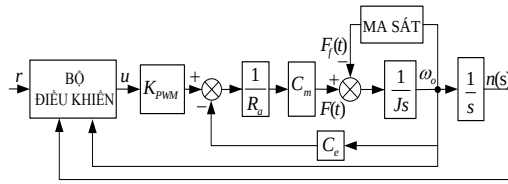
Trong số đó, $F(t)$ là mô-men xoắn dẫn động, F_m là mô-men ma sát tĩnh cực đại, F_c là mô-men ma sát Coulomb, $\dot{\theta}(t)$ là tốc độ góc quay; α và α_1 là một số thực rất nhỏ, $\text{sgn}(\dot{\theta}(t))$ là một hàm tượng trưng.

3.2. Mô hình hóa phương pháp điều khiển trượt

Điều khiển theo nguyên lý trượt, hay còn gọi là điều khiển trượt là một phương pháp điều khiển bền vững cho hệ phi tuyến. Bộ điều

hiển trượt kinh điển được biết đến với nhiều những ứng dụng trong điều khiển tác động nhanh [5].

Đặt r là tín hiệu vị trí mong muốn, θ_o là tín hiệu tốc độ góc đầu ra thực tế, ω_o là tín hiệu tốc độ góc đầu ra thực tế. Để làm cho vấn đề đơn giản, độ tự cảm phản ứng của động cơ được bỏ qua. Cấu trúc hệ thống dựa trên điều khiển cấu trúc biến như trong hình 6.



Hình 6. Sơ đồ khối của hệ thống điều khiển trượt

Hình 6 có thể được mô tả bằng phương trình sai khác như sau:

$$\dot{\theta}_o = \omega_o \quad (4)$$

$$\dot{\omega}_o = -\frac{C_m C_e}{J R_a} \omega_o + \frac{K_{PWM} C_m}{J R_a} u - \frac{F_f}{J} \quad (5)$$

Trong công thức, u là đối tượng điều khiển, C_m là hệ số mô-men xoắn của động cơ, C_e là hệ số lực điện động ngược của động cơ, K_{PWM} là các hệ số của mạch điều chế độ rộng xung (Pulse Width Modulation, PWM). R_a là điện trở của cuộn dây phản ứng, J là tổng của mô-men quán tính.

Đặt $x_1 = \theta_o$, $x_2 = \omega_o$, khi đó công thức (4) và công thức (5) được viết dưới dạng phương trình trạng thái:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{C_e C_m}{J R_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_{PWM} C_m}{J R_a} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J} \end{bmatrix} F_f \quad (6)$$

x_1 và x_2 tương ứng là tín hiệu vị trí góc và tín hiệu tốc độ góc.

$$\dot{x}_2 = -\frac{C_e C_m}{J R_a} x_2 + \frac{K_{PWM} C_m}{J R_a} u - \frac{F_f}{J} \quad (7)$$

Đặt tín hiệu lệnh thành r , độ sai lệch vị trí:

$$e = r - x_1 \quad (8)$$

Độ sai lệch vận tốc góc:

$$\dot{e} = \dot{r} - x_2 \quad (9)$$

Đặt $C = [c \ 1]$ và $E = [e \ \dot{e}]^T$

Thực hiện việc chuyển mạch:

$$s = CE = ce + \dot{e} = c(r - x_1) + \dot{r} - x_2 \quad (10)$$

Sử dụng luật tiếp cận theo cấp số nhân sau:

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \quad (11)$$

Trong số đó, $\varepsilon > 0$, $k > 0$, $\operatorname{sgn}(s)$ là một hàm tượng trưng.

Xem xét tác động của các yếu tố ma sát hệ thống:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= c\dot{e} + \ddot{e} = c\dot{e} + \ddot{r} - \dot{x}_2 \\ &= c\dot{e} + \ddot{r} - \left(-\frac{C_m C_e}{J R_a} x_2 + \frac{K_{PWM} C_m}{J R_a} u - \frac{F_f}{J}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

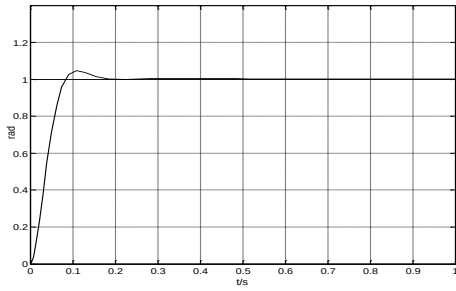
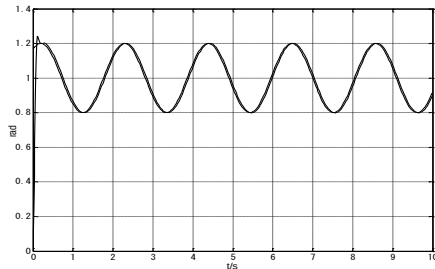
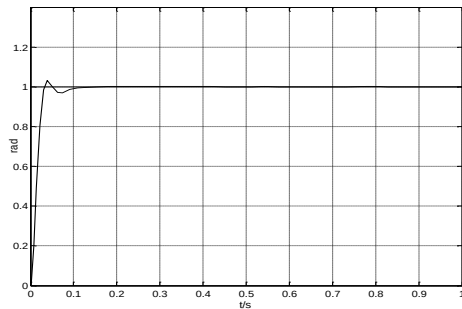
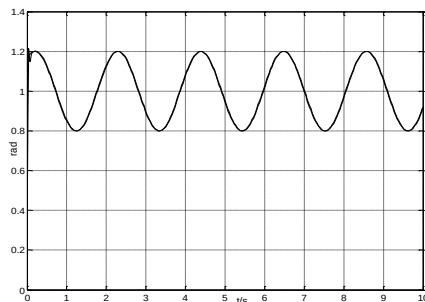
Khi hệ thống ở trên bề mặt chế độ trượt, nếu $\dot{s} = 0$, thì:

$$u = \frac{J R_a}{K_{PWM} C_m} (c\dot{e} + \ddot{r} + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + ks) + \frac{C_m C_e}{J R_a} x_2 + \frac{\hat{F}_f}{J} \quad (13)$$

Mô phỏng hệ thống điều khiển trượt

Các tham số của mô hình hệ thống và mô hình ma sát như sau: $R_a = 7.77 \Omega$, $C_m = 6 \text{ Nm/A}$, $J = 0.6 \text{ kgm}^2$, $K_{PWM} = 11$, $\alpha = 0.01$, $C_e = 1.2 \text{ V / (radgs}^{-1})$, $F_m = 20 \text{ Nm}$, $F_c = 15 \text{ Nm}$, $c = 30$, $k = 5$, $\varepsilon = 10$. Lệnh được đặt thành tín hiệu hình sin $r = 0.2 \sin 2\pi t + 1$.

Đầu tiên, điều khiển PID được sử dụng. Kết quả mô phỏng cho thấy do ma sát, quá trình điều khiển bám có "đỉnh phẳng" và hiện tượng "vùng chết", quá trình ổn định mất tới 0.2s để đạt tới mục tiêu. Hệ thống điều khiển PID không thể đạt được độ chính xác cao và độ ổn định cao, kết quả như trong hình 7 và hình 8.

**Hình 7.** Điều khiển vị trí khi dùng PID**Hình 8.** Điều khiển bám vị trí khi dùng PID**Hình 9.** Kết quả khi dùng điều khiển trượt**Hình 10.** Kết quả mô phỏng điều khiển bám vị trí khi dùng phương pháp điều khiển trượt

Sử dụng lại bộ điều khiển trượt có được ở trên, sử dụng Simulink để thiết kế chương trình chính và sử dụng S-Function để mô tả đối tượng được điều khiển và bộ điều khiển. Các kết quả mô phỏng được hiển thị trong hình 9 và hình 10.

Như có thể thấy, từ kết quả mô phỏng, điều khiển này có thể hạn chế rất tốt hiện tượng

"đỉnh phẳng" và "vùng chết" do ma sát. Hệ điều khiển nhanh chóng bám theo tín hiệu mong đợi và điều khiển trượt bằng cách sử dụng luật tiếp cận theo cấp số nhân có thể làm cho hệ thống dần ổn định và tiếp tục di chuyển ở trạng thái trượt, với hiệu ứng động tốt, quá trình ổn định chỉ mất 0.1s đạt tới mục tiêu.

4. Kết luận

Trong hệ thống bộ Camera ổn định trên tàu, điều khiển trượt dựa trên luật tiếp cận theo cấp số nhân được thiết kế dựa trên thực tế là mô hình hệ thống và các tham số không chính xác với chuyển động của bộ quay chịu tác động của ma sát và nhiễu bên ngoài. Bởi vì điều khiển trượt được dựa trên trạng thái hiện tại của hệ thống (như độ lệch và các dẫn xuất khác nhau) trong quy trình động để thực hiện thay đổi tham số điều khiển, buộc hệ thống phải di chuyển theo quỹ đạo của chế độ trượt được xác định trước. Hệ thống không nhạy cảm với các tham số và nhiễu, không yêu cầu một mô hình động chính xác. Giải pháp được đề xuất có thể khắc phục ảnh hưởng của ma sát và cải thiện độ chính xác khi bám theo mục tiêu của hệ thống Servo. Các thí nghiệm và mô phỏng cho thấy rằng phương pháp điều khiển trượt tốt hơn so với điều khiển PID truyền thống và hiệu ứng động của bộ điều khiển có thể được đánh giá dựa trên mô hình ma sát. Điều này có ý nghĩa nhất định cho việc thiết kế và lựa chọn bộ điều khiển.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1]. L. Jin-yi, "Research on Use Method of Speed Gyro," *Measurement Control and Communication*, vol. 14, no.3, pp. 1-11, 2006.
- [2]. J. Wei, L. Qi, Y. Hai-feng, and X. Bo, "Design and servo control for precision opto-electronic tracking turntable," *Opto-Electronic Engineering*, vol. 33, no. 3, pp. 14-15, March 2006.
- [3]. W. Yuhui, and Z. Zailong, "Research of variable structure control considering friction based on shipboard stabilized platform," *Application of Electronic Technique*, vol. 41, no. 7, pp. 54-56, April 2015.
- [4]. J. M. Hilkert, "Inertially Stabilized Platform Technology, Concepts and Principles," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 28, no. 1, pp. 26-46, February 2008.
- [5]. D. P. Nguyen, X. M. Phan, and T. T. Han, *Theories for Nonlinear Control Systems*, Science and Technics Publishing House, 2008.