

THIẾT KẾ ĐIỀU KHIỂN CHO XE TỰ HÀNH DỰA TRÊN BỘ ƯỚC LƯỢNG NHIỀU ĐẦU VÀO DISTURBANCE OBSERVER-BASED CONTROLLER FOR WHEEL MOBILE ROBOTS WITH INPUT DISTURBANCES

Phạm Thị Hương Sen

Trường Đại học Điện Lực

Ngày nhận bài: 08/03/2024, Ngày chấp nhận đăng: 27/06/2024, Phản biện: TS. Đào Thị Mai Phương

Tóm tắt:

Bài báo trình bày một phương pháp điều khiển xe tự hành bám quỹ đạo bằng cách sử dụng cấu trúc hai mạch vòng điều khiển phản hồi vị trí và phản hồi tốc độ; một cơ cấu ước lượng nhiễu mạch vòng động lực học. Phương pháp ước lượng nhiễu dựa trên nguyên tắc tối ưu sai lệch với mô hình mẫu. Các kết quả mô phỏng trên Matlab cho thấy hệ ổn định, chất lượng điều khiển bám tốt, loại bỏ được ảnh hưởng của nhiễu đầu vào và tham số bất định mô hình.

Từ khóa:

Xe tự hành, bám quỹ đạo, ổn định Lyapunov, ước lượng nhiễu đầu vào.

Abstract:

This paper present the trajectory tracking problem of wheel mobile robot, the control system is separated into two feedback loops, for both kinematic and dynamics, using a disturbance observer based on time receding optimal. The proposed control schema is simulated by Matlab, the results show that the system is stable and the quality is good, ability to cancel the effect of the input disturbances and system uncertainties.

Key words:

Wheel mobile robot, Trajectory tracking, Lyapunov stability, input disturbances observer.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

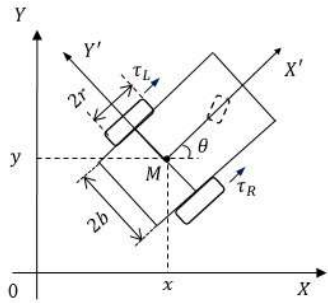
Xe tự hành (Wheel Mobile Robot -WMR) thuộc lớp đối tượng phi tuyến, thiếu cơ cấu chấp hành nonholonomic. WMR với ưu điểm là có kết cấu đơn giản, chắc chắn, hiệu suất năng lượng cao được ứng dụng ngày càng nhiều trong các lĩnh vực như: thiết bị vận chuyển hàng hóa trong nhà máy, công xưởng, xe dò đường, tìm kiếm vật liệu cháy nổ hay trong môi trường độc hại, nguy hiểm. Do đó bài toán thiết kế điều khiển cho các xe tự hành đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo độ tin cậy và chính xác cho hệ thống. Điều khiển xe tự hành bám quỹ đạo đặt là đề tài thu hút được sự

quan tâm nghiên cứu của nhiều nhà khoa học, công nghệ [1-3]. Mặc khác, điều kiện làm việc của các xe tự hành thường chịu ảnh hưởng lớn bởi các yếu tố ngoại cảnh như tham số bất định, mô hình khó xác định chính xác, điều kiện làm việc thay đổi, ngoại lực từ môi trường tác động. Khắc phục ảnh hưởng của các yếu tố trên thông thường có một số giải pháp như thiết kế bộ điều khiển có sử dụng mạng nơ ron để xấp xỉ các yếu tố bất định mô hình, điều khiển thích nghi [4-6]; sử dụng bộ ước lượng nhiễu để bù khi thiết kế bộ điều khiển. Việc thiết kế thuật toán điều khiển cũng như cơ cấu ước lượng càng đơn giản, khối lượng tính toán ít thì càng dễ thực thi và đưa vào ứng dụng trong thực tế.

Trong bài báo này, tác giả đã đề xuất một cơ cấu ước lượng có cấu trúc đơn giản, tốc độ ước lượng nhanh, hiệu quả khi hệ có thành phần bất định hoặc có nhiễu tác động vào hệ thống. Bộ điều khiển đảm bảo chất lượng ổn định bền vững với các yếu tố bất định và nhiễu tác động. Bố cục bài báo chia thành các phần: Phần đầu là giới thiệu chung, phần 2 trình bày về mô hình xe tự hành. Phần 3 thiết kế thuật toán điều khiển cho mạch vòng động học, động lực học, thiết kế bộ ước lượng nhiễu. Tiếp theo là mô phỏng phân tích kết quả và kết luận.

2. MÔ HÌNH XE TỰ HÀNH

Hình 1 minh họa mô hình xe tự hành ba bánh với các thông số: r là bán kính bánh xe, b là một nửa của khoảng cách giữa 2 bánh sau của xe. Xe gắn trên hệ tọa độ cố định OXY, M_{xy} là hệ tọa độ cục bộ đặt trên thân xe. Góc θ là góc quay của trục X' so với trục X , gọi là góc hướng của xe. Như vậy, vị trí của xe được xác định bởi vector tọa độ $\underline{q} = [x \ y \ \theta]^T$.



Hình 1. Mô hình xe tự hành ba bánh

Gọi v là vận tốc tịnh tiến và ω là vận tốc quay, phương trình động học của xe [11]:

$$\dot{\underline{q}} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = S(\underline{q}) \underline{v} \quad (1)$$

Khi xe chuyển động lăn không trượt thì điều kiện ràng buộc nonholonomic là:

$$\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = 0 \quad (2)$$

Mô hình động lực học của WMR [11]:

$$\begin{cases} m\ddot{x} - \lambda \sin \theta - \frac{1}{r}(\tau_R + \tau_L) \cos \theta = 0 \\ m\ddot{y} + \lambda \cos \theta - \frac{1}{r}(\tau_R + \tau_L) \sin \theta = 0 \\ J\ddot{\theta} - \frac{b}{r}(\tau_R - \tau_L) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó: m, J lần lượt là khối lượng và mô men quán tính tương ứng của xe.

τ_R, τ_L : momen của động cơ bánh phải, bánh trái. Hệ số lực ràng buộc Lagrange $\lambda = -m\dot{\theta}(\dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta)$. Biểu diễn dưới dạng vector:

$$M\ddot{\underline{q}} = E(\underline{q})\underline{\tau} - A^T(\underline{q})\lambda \quad (4)$$

Với các ma trận:

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & J \end{bmatrix}, \quad A^T(\underline{q}) = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$E(\underline{q}) = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \theta \\ \sin \theta & \sin \theta \\ b & -b \end{bmatrix}, \quad \underline{\tau} = [\tau_R \ \tau_L]^T$$

Đạo hàm 2 vế phương trình (1) ta có:

$$\ddot{\underline{q}} = \dot{S}(\underline{q})\underline{v} + S(\underline{q})\dot{\underline{v}} \quad (5)$$

Thay (5) vào công thức (4), nhân 2 vế với $S^T(\underline{q})$:

$$\begin{aligned} S^T(\underline{q})M\dot{S}(\underline{q})\underline{v} + S^T(\underline{q})M\dot{S}(\underline{q})\underline{v}\dot{\underline{q}} \\ = S^T(\underline{q})E(\underline{q})\underline{\tau} - S^T(\underline{q})A^T\lambda \end{aligned} \quad (6)$$

Do: $S^T(\underline{q})M\dot{S}(\underline{q}) = 0; S^T(\underline{q})A^T(\underline{q}) = 0$, rút gọn

(6) và đặt: $\bar{M} = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & j \end{bmatrix}; \bar{E} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ b & -b \end{bmatrix}$, ta được:

$$\dot{\underline{v}} = \bar{M}^{-1} \bar{E} \underline{\tau} \quad (7)$$

Xe hoạt động trong môi trường thực tế cần tính đến các yếu tố bất định như thay đổi về khối lượng, mô

men; nhiễu ngoài tác động do ma sát, sai lệch mô hình. Giả sử τ_d là tập hợp thành phần nhiễu và bất định của hệ thì mô hình động lực học của xe được biểu diễn như sau:

$$\dot{v} = \bar{M}^{-1} \bar{E}(\tau + \tau_d) \quad (8)$$

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

Điều khiển xe tự hành sử dụng cấu trúc hai mạch vòng điều khiển: mạch vòng ngoài là động học điều khiển vị trí, mạch vòng động lực học bên trong điều khiển bám tốc độ. Tín hiệu điều khiển cho từng mạch vòng điều khiển được thiết kế để đảm bảo tính ổn định Lyapunov.

3.1. Mạch vòng động học

Nhiệm vụ bộ điều khiển mạch vòng ngoài là triệt tiêu sai lệch vị trí, đưa ra tín hiệu đặt cho mạch vòng điều khiển tốc độ bên trong. Phương trình sai số quỹ đạo [11]:

$$\underline{e}_q = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

Với $\underline{q}_r = [x_r \ y_r \ \theta_r]^T$ là tọa độ quỹ đạo mong muốn, và v_r, ω_r là tốc độ mong muốn tương ứng.

Lấy đạo hàm hai vế phương trình (9) và thực hiện một vài phép biến đổi ta có:

$$\dot{\underline{e}}_q = \begin{bmatrix} v_r \cos e_3 \\ v_r \sin e_3 \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & e_2 \\ 0 & -e_1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (10)$$

Thiết kế bộ điều khiển cho mạch vòng động học dựa trên hàm điều khiển Lyapunov. Chọn hàm Lyapunov xác định dương:

$$V = \frac{1}{2}(e_1^2 + e_2^2) + \frac{1 - \cos e_3}{k_2} \quad (11)$$

Đạo hàm theo thời gian hàm V:

$$\dot{V} = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 + \frac{\dot{e}_3 \sin e_3}{k_2} \quad (12)$$

Thay (10) vào (12):

$$\begin{aligned} \dot{V} = & e_1(v_r \cos e_3 - v) + e_2(\omega_r - \omega) \\ & + e_3(v_r \sin e_3 - e_1 \omega) + \frac{\sin e_3}{k_2}(\omega_r - \omega) \end{aligned} \quad (13)$$

Chọn tín hiệu điều khiển $\underline{v}_c$ của mạch vòng ngoài như sau:

$$\underline{v}_c = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos e_3 + k_1 e_1 \\ \omega_r + k_2 v_r e_2 + k_3 v_r \sin e_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Thay (14) vào công thức (13) ta thấy:

$$\dot{V} = -k_1 e_1^2 - \frac{k_3 v_r \sin^2 e_3}{k_2} \leq 0 \quad (15)$$

Với các tham số k_1, k_2, k_3 là các hằng số dương thì hệ kín ổn định Lyapunov, các biến sai lệch vị trí khi đó sẽ hội tụ về 0: $\lim_{t \rightarrow \infty} \underline{e}_q(t) = 0$.

3.2. Mạch vòng động lực học

Thiết kế bộ điều khiển cho mạch vòng điều khiển động lực học khi hệ chịu tác động của nhiễu. Gọi $\underline{e}_v$ là vector sai lệch tốc độ, có phương trình sai lệch tốc độ:

$$\dot{\underline{e}}_v = \dot{v} - \dot{\underline{v}}_c = \bar{M}^{-1} \bar{E}(\tau + \tau_d) - \dot{\underline{v}}_c \quad (16)$$

$$\dot{\underline{e}}_v = B(\tau + \tau_d) - \dot{\underline{v}}_c \quad (17)$$

Với $B = \bar{M}^{-1} \bar{E}$, và $\dot{\underline{v}}_c$ là tín hiệu đặt từ mạch vòng điều khiển ngoài. Chọn tín hiệu điều khiển cho mạch vòng trong như sau:

$$\tau = -B^{-1}(K \underline{e}_v - \dot{\underline{v}}_c) - \hat{\tau}_d \quad (18)$$

Trong đó $\hat{\tau}_d$ là giá trị ước lượng thành phần nhiễu τ_d như sơ đồ Hình 2. Thay (18) vào (17), ta có được:

$$\begin{aligned}\dot{\underline{e}}_v &= B(-B^{-1}(K\underline{e}_v - \dot{\underline{v}}_c) - \hat{\underline{\tau}}_d + \underline{\tau}_d) - \dot{\underline{v}}_c \\ \dot{\underline{e}}_v &= -K\underline{e}_v - \hat{\underline{\tau}}_d + \underline{\tau}_d\end{aligned}\quad (19)$$

Với K là ma trận hằng số xác định dương.

Nhìn vào phương trình (19) ta thấy khi thành phần ước lượng $\hat{\underline{\tau}}_d \approx \underline{\tau}_d$ thì $\lim_{t \rightarrow \infty} \underline{e}_v(t) = 0$, sai lệch tốc độ sẽ về không, đảm bảo tính ổn định cho mạch vòng trong. Bây giờ chỉ cần xác định được thành phần $\hat{\underline{\tau}}_d$.

Thiết kế bộ ước lượng thành phần nhiễu cho hệ có mô hình (17) dựa trên nguyên tắc tối ưu sai lệch với mô hình mẫu thuật toán như sau [12]:

- Chia các khoảng dịch chuyển cách đều nhau T_s trên trục thời gian t : $t_k = kT_s, k = 0, 1, \dots$

Tại những thời điểm xấp xỉ thành phần nhiễu $\hat{\underline{\tau}}_{d_k} \approx \underline{\tau}_d(t_k)$, để đảm bảo $t_k = kT_s$ điều kiện: $|\hat{\underline{\tau}}_{d_k} - \underline{\tau}_d(t_k)| \rightarrow \min$

Theo phương trình Euler: $\dot{\underline{v}}(t_k) \approx \frac{\underline{v}(t_k) - \underline{v}(t_{k-1})}{T_s}$, từ phương trình (8) ta có:

$$\frac{\underline{v}_k - \underline{v}_{k-1}}{T_s} \approx B(\underline{\tau} + \underline{\tau}_{d_k} - \hat{\underline{\tau}}_{d_{k-1}}) \quad (20)$$

$$\underline{v}_k \approx \underline{v}_{k-1} + T_s B(\underline{\tau} + \underline{\tau}_{d_k} - \hat{\underline{\tau}}_{d_{k-1}}) \quad (21)$$

- Chọn mô hình mẫu: $\dot{\underline{z}} = B(\underline{\tau} - \hat{\underline{\tau}}_d)$

$$\underline{z}_k = \underline{z}_{k-1} + T_s B(\underline{\tau} - \hat{\underline{\tau}}_{d_{k-1}}) \quad (22)$$

- Sai lệch giữa mô hình thực và mô hình mẫu khi đó sẽ là:

$$\underline{v}_k - \underline{z}_k \approx \underline{v}_{k-1} - \underline{z}_{k-1} + T_s B \underline{\tau}_{d_k} \quad (23)$$

Đặt:

$$\underline{\delta}_k = \underline{v}_{k-1} - \underline{z}_{k-1} + T_s B \underline{\tau}_{d_k} \approx 0 \quad (24)$$

Với mục tiêu mong muốn sai lệch $\underline{\delta}_k$ là nhỏ nhất, tức là bình phương sai lệch cũng là nhỏ nhất, ta đặt:

$$\begin{aligned}J_k &= \underline{\delta}_k^T \underline{\delta}_k \\ &= (\underline{v}_{k-1} - \underline{z}_{k-1} + T_s B \underline{\tau}_{d_k})^T (\underline{v}_{k-1} - \underline{z}_{k-1} + T_s B \underline{\tau}_{d_k}) \\ &= \underline{\tau}_{d_k}^T (T_s^2 B^T B) \underline{\tau}_{d_k} - 2(\underline{v}_{k-1} - \underline{z}_{k-1})^T T_s B \underline{\tau}_{d_k} \\ &\quad + (\underline{v}_{k-1} - \underline{z}_{k-1})^T (\underline{v}_{k-1} - \underline{z}_{k-1})\end{aligned}\quad (25)$$

Tiếp theo cần tìm $\hat{\underline{\tau}}_{d_k}$ để J_k là nhỏ nhất. Tức là: $\hat{\underline{\tau}}_{d_k} = \arg \min J_k$, khi đó đưa về bài toán tìm nghiệm tối ưu và tìm xác định được thành phần ước lượng là:

$$\hat{\underline{\tau}}_{d_k} = (T_s B^T B)^{-1} B^T (\underline{v}_{k-1} - \underline{z}_{k-1}) \quad (26)$$

Các bước thực hiện thuật toán ước lượng như sau [13]:

B.1: Ma trận $B(\underline{v})$ là ma trận đủ tại mọi điểm trạng thái, tức là luôn thỏa mãn: $\text{rank} B(\underline{v}_k) = n$. Tại các thời điểm $t_k = kT_s$ là lúc $\underline{\tau}_d$ sẽ được ước lượng xấp xỉ thành $\hat{\underline{\tau}}_{d_k} \approx \underline{\tau}_d(t_k)$.

B.2: Tự chọn $\underline{z}_{-1}$ và $\hat{\underline{\tau}}_{d_{-1}}$, gán $\underline{v}_{-1} = 0, k = 0$

B.3: Đo trạng thái $\underline{v}_k = \underline{v}(t_k)$ từ hệ thống và tính:

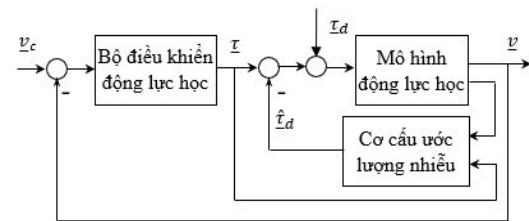
$$A_k^v = I_{2n}, A_k^z = I_{2n}$$

$$B_k = T_s B(\underline{v}_{k-1}), \underline{z}_k = A_k^z \underline{z}_{k-1} + B_k (\underline{\tau} - \hat{\underline{\tau}}_{d_{k-1}})$$

$$\hat{\underline{\tau}}_{d_k} = [B_k^T B_k]^{-1} B_k^T (\underline{v}_k - \underline{z}_k + A_k^z \underline{z}_{k-1} - A_k^v \underline{v}_{k-1})$$

B.4: Đưa $\underline{\tau} - \hat{\underline{\tau}}_{d_k}$ vào mạch vòng điều khiển, với $\underline{\tau}$ là tín hiệu điều khiển đã được chọn trong công thức (21). Như vậy, sau khi có khâu bù thì tín hiệu đưa vào mạch vòng động lực học chính là: $\underline{\tau} - \hat{\underline{\tau}}_d + \underline{\tau}_d$

B.5: Gán: $k = k + 1$ và quay về B.3.



Hình 2. Cấu trúc điều khiển mạch vòng động lực học có bù nhiễu

Cấu trúc điều khiển toàn bộ hệ thống được mô tả trong Hình 7.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Chọn các thông số của xe tự hành như sau:

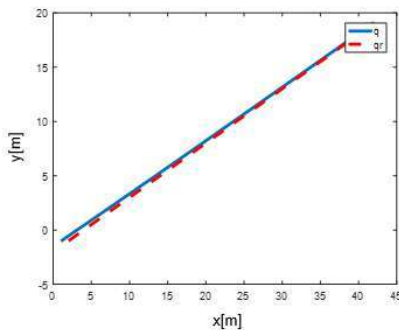
$$r = 0.025m, b = 0.075m,$$

$$m = 1.08kg, J = 0.818 \text{ kg} / m^2$$

Thực hiện mô phỏng trên phần mềm Matlab/Simulink để kiểm chứng thuật toán với hai trường hợp quỹ đạo khác nhau, tác động tín hiệu nhiễu đầu vào là $\underline{\tau}_d = [20\sin 3t, 20\cos 3t]^T$; tham số bộ điều khiển: $k_1 = 0.001; k_2 = 3; k_3 = 1000$

$$K = [1000 \quad 0; 0 \quad 50]$$

- Thử nghiệm với quỹ đạo thẳng: $\underline{q}_r = [2+2t, -1+t, 0]^T$, điểm ban đầu $\underline{q}_0 = [1, -1, 0]^T$. Đường đặc tính quỹ đạo thực (đường nét liền màu xanh) bám sát quỹ đạo đặt (đường nét đứt màu đỏ) như ở Hình 3, như vậy xe di chuyển luôn bám sát với quỹ đạo đặt trước.



Hình 3. Xe bám quỹ đạo thẳng

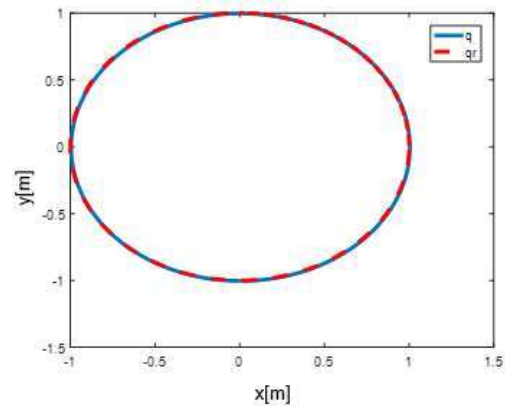
- Thử nghiệm với quỹ đạo tròn:

$$\underline{q}_r = \left[\cos 0.125\pi t, \sin 0.125\pi t, \frac{\pi}{2} + 0.125\pi t \right]^T$$

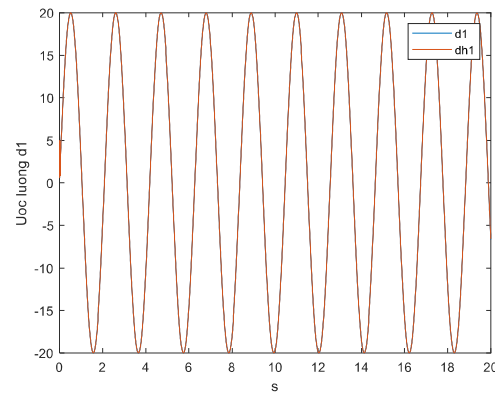
Đặc tính quỹ đạo Hình 4 cho thấy với điểm đặt ban đầu $\underline{q}_0 = [x_0, y_0, \theta_0]^T = [1, 0, \pi/2]^T$ thì đường đặc tính quỹ đạo của xe nằm chồng kín lên đặc tính quỹ đạo đặt. Khi đưa một tín hiệu nhiễu đầu

vào dạng hình sin thì bộ điều khiển của hai mạch vòng trong công thức (14) và (18) vẫn đảm bảo xe bám quỹ đạo tốt, gần như không bị ảnh hưởng bởi nhiễu tác động.

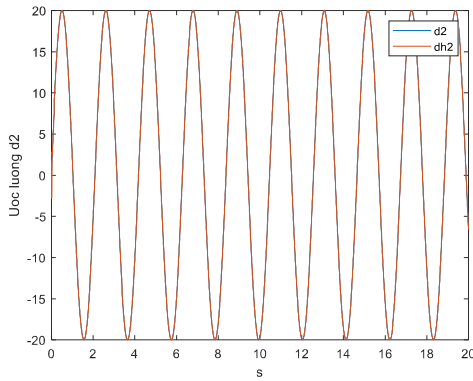
Tiến hành thử nghiệm tăng dần biên độ nhiễu thì chất lượng bám vẫn tốt, hệ ổn định bền vững. Tương tự như vậy, khi thay đổi thông số (khối lượng, mô men) của WMR, quỹ đạo xe vẫn bám quỹ đạo đặt như cũ, bộ điều khiển đáp ứng các chỉ tiêu chất lượng.



Hình 4. Xe bám quỹ đạo tròn



Hình 5. Nhận dạng thành phần nhiễu τ_{d1}



Hình 6. Nhận dạng thành phần nhiễu τ_{d2}

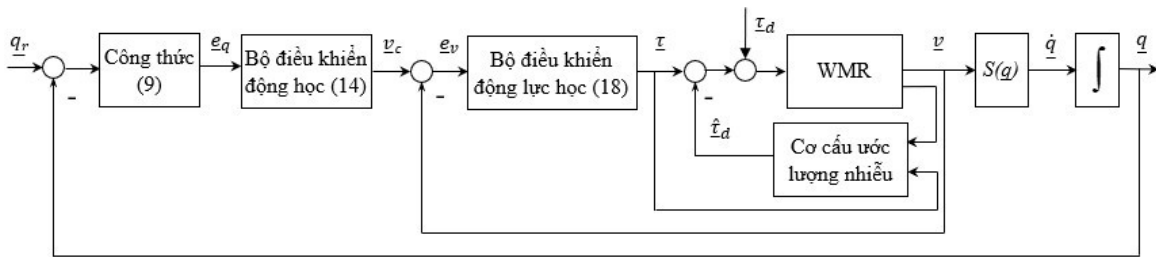
5. KẾT LUẬN

Bộ điều khiển đề xuất trong bài báo kết hợp với bộ ước lượng thành phần nhiễu đầu vào cho chất

lượng điều khiển bám tốt với cả hai trường hợp quỹ đạo thẳng và quỹ đạo tròn. Bộ điều khiển thiết kế đáp ứng tính ổn định cho toàn hệ thống, ổn định bền vững với sự thay đổi của các yếu tố bất định. Bên cạnh đó việc chỉnh định tham số bộ điều khiển cũng đơn giản. Cơ cấu ước lượng nhận dạng nhiễu nhanh, chính xác, đã loại bỏ được ảnh hưởng của nhiễu cả khi có biên độ lớn.

XÁC NHẬN

Công trình nghiên cứu này đã được Trường Đại học Điện lực tài trợ thông qua đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường năm 2023, mã số đề tài: ĐTKHCN.07/2023.



Hình 7. Sơ đồ khối cấu trúc hai mạch vòng điều khiển

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Pliego-Jiménez, Javier, et al. "Trajectory tracking of wheeled mobile robots using only Cartesian position measurements." *Automatica* 133, 2021 109756.
- [2]. Khalaji, Ali Keymasi, and Mostafa Jalalnezhad. "Robust forward\backward control of wheeled mobile robots." *ISA transactions* 115, 2021, pp.32-45.
- [3]. Rubio, F., Valero, F., & Llopis-Albert, C. "A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications". *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16(2), 2019, 1729881419839596.
- [4]. S. J. Yoo, "Adaptive neural tracking and obstacle avoidance of uncertain mobile robots with unknown skidding and slipping," *Inf. Sci. (Ny).*, vol. 238, pp. 176-189, 2013.
- [5]. T. Nguyen and L. Le, "Neural network-based adaptive tracking control for a nonholonomic wheeled mobile robot with unknown wheel slips, model uncertainties, and unknown bounded disturbances," *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 26, no. 1, pp. 378-392, 2018.

- [6]. Li, Shu, et al. "Adaptive neural network tracking control-based reinforcement learning for wheeled mobile robots with skidding and slipping." *Neurocomputing* 283, pp.20-30, 2018.
- [7]. Hongjiu Yang, Xiaozhao Fan, Yuanqing Xia, Changchun Hua, "Robust tracking control for wheeled mobile robot based on extended state observer," *Advanced Robotics*, vol. 30, no. 1, 2016, pp. 68-78.
- [8]. Huang, Dawei, et al. "Disturbance observer-based robust control for trajectory tracking of wheeled mobile robots." *Neurocomputing*, 198, 2016, pp.74-79.
- [9]. Li, Li, et al. "Trajectory tracking control for wheeled mobile robots based on nonlinear disturbance observer with extended Kalman filter." *Journal of the Franklin Institute*, 357.13, 2020, pp.8491-8507.
- [10]. Miranda-Colorado, Roger. "Observer-based proportional integral derivative control for trajectory tracking of wheeled mobile robots with kinematic disturbances." *Applied Mathematics and Computation* 432, 2022, 127372.
- [11]. Klancar, Gregor, et al. *Wheeled mobile robotics: from fundamentals towards autonomous systems*. Butterworth-Heinemann, 2017.
- [12]. Nguyen Phuoc Doan, and Nam Hoai Nguyen. "Adaptive control for nonlinear non-autonomous systems with unknown input disturbance." *International Journal of Control* 95.12, 2022, pp. 3416-3426.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả Phạm Thị Hương Sen tốt nghiệp kỹ sư ngành Điều khiển tự động trường Đại học Bách Khoa Hà Nội năm 2004, Thạc sỹ chuyên ngành Điều khiển và Tự động hoá năm 2008, nhận bằng tiến sĩ chuyên ngành Điều khiển và Tự động hoá năm 2022 tại trường trường Đại học Bách Khoa Hà Nội.

Lĩnh vực nghiên cứu: Điều khiển phi tuyến, Điều khiển quá trình công nghệ, Điều khiển chuyển động.