



(12) BẢN MÔ TẢ SÁNG CHẾ THUỘC BẰNG ĐỘC QUYỀN SÁNG CHẾ

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

(11)



1-0039153

(51)⁸ G05B 13/04

(13) B

(21) 1-2019-00525

(22) 03/08/2016

(86) PCT/CN2016/000424 03/08/2016

(87) WO 2018/023201 08/02/2018

(45) 25/03/2024 432

(43) 25/07/2019 376A

(76) MENG, Qiang (CN)

Room 402, Unit 2, Building 12, Jiayuan Zone 1, North Shahe Street, Changping District, Beijing 102206, China

(74) Công ty TNHH Sáng chế ACTIP (ACTIP PATENT LIMITED)

(54) PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN CHẾ ĐỘ TRƯỢT ĐẦU CUỐI THÍCH NGHI

(57) Sáng chế đề cập đến phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi, bao gồm: thiết lập các phương trình động học của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra, xác định bề mặt chế độ trượt s , đưa ra tốc độ cập nhật thích nghi n chiều $\hat{f}_{adaptive,n}$, và tính toán giá trị mô men/lực truyền động yêu cầu để dẫn động hệ thống phi tuyến, nhờ đó đảm bảo sự hội tụ và ổn định của hệ thống trong thời gian giới hạn. Phương pháp có thể làm cho sai số điều hướng của hệ thống được hội tụ về không trong thời gian giới hạn; và có thể ước lượng giá trị của cận trên bất định của hệ thống trực tuyến, nhờ đó loại bỏ hiện tượng dao động đến mức độ lớn. Phương pháp được áp dụng cho các hệ thống robot khác nhau, các hệ thống phương tiện vận chuyển, và các hệ thống ứng dụng khác có thể sử dụng các hệ thống phi tuyến/tuyến tính nhiều đầu vào-nhiều đầu ra.

Thiết lập các phương trình động học của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra

Xác định bề mặt chế độ trượt s

Đưa vào tốc độ cập nhật thích nghi n chiều

Tính toán giá trị mô men/lực truyền động đòi hỏi để dẫn động hệ thống phi tuyến

Lĩnh vực kỹ thuật được đề cập

Sáng chế liên quan đến kỹ thuật điều khiển trong lĩnh vực điều khiển tự động, và cụ thể hơn là đề cập đến phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi cho hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra.

Tình trạng kỹ thuật của sáng chế

Điều khiển chế độ trượt (Sliding mode control: SMC) là phương pháp điều khiển bền vững đơn giản và hiệu quả, đã được áp dụng thành công cho nhiều hệ thống chẳng hạn như các hệ thống robot, hệ thống tàu vũ trụ và hệ thống tương tự bởi vì có tính không nhạy cảm với tình trạng bất định của các hệ thống. Trên thực tế, hai yếu tố cơ bản tạo nên sự khác biệt của điều khiển chế độ trượt bao gồm: một là lực truyền động, yếu tố làm cho trạng thái hệ thống đạt đến và duy trì trên siêu phẳng ổn định, và hai là bề mặt trượt, yếu tố giúp đạt được sự điều khiển động học sai số lý tưởng. Nói chung, phương án điều khiển chế độ trượt thông thường có thể đạt được độ ổn định tiệm cận của hệ thống, nhưng không thể làm cho lỗi trạng thái hệ thống được hội tụ về không trong thời gian giới hạn. Để đạt được hiệu quả hội tụ lỗi trạng thái hệ thống trong thời gian giới hạn, điều khiển chế độ trượt đầu cuối (Terminal sliding mode control: TSMC hoặc terminal SMC) cho phép đạt được sự hội tụ nhanh hơn bằng cách đưa ra bề mặt chế độ trượt phi tuyến đã được phát triển.

Tuy nhiên, bởi vì TSMC thông thường có vấn đề suy biến, nên sự điều khiển chế độ trượt đầu cuối không suy biến (non-singularity terminal sliding mode control: NTSMC) được phát triển thành công để tránh vấn đề suy biến đó. Nhờ có lợi thế về tính không nhạy cảm với tình trạng bất định của các hệ thống, sự hội tụ trong thời gian giới hạn và không suy biến, NTSMC đã được áp dụng rộng rãi như là phương án cải tiến của điều khiển chế độ trượt (SMC) cho các hệ thống bất định tuyến tính và phi tuyến tính. Trong mười năm qua, phương pháp điều chỉnh này luôn là chủ đề nóng cho việc nghiên cứu và có rất nhiều khó khăn trong việc tìm cách thức thiết kế cận trên bất định của NTSMC để cho phép hệ thống giảm hiện tượng dao động và giảm các sai số điều hướng đến mức tối đa. Ngoài ra, nếu tính đến việc hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra có thể có các đặc tính động lực học khác nhau theo các hướng bậc tự do (degree of freedom: DOF) khác nhau, rất khó để thiết kế các phương pháp NTSMC có khả năng

ứng dụng.

Bản chất kỹ thuật của sáng chế

Để giải quyết vấn đề sai số trạng thái hệ thống trong điều khiển chế độ trượt (SMC) không thể được hội tụ về không trong thời gian giới hạn, trong khi điều khiển chế độ trượt đầu cuối (TSMC) thường có suy biến, và điều khiển chế độ trượt đầu cuối không suy biến (NTSMC) thì không thể điều chỉnh tự động do cận trên bất định và dẫn đến có thể gây ra dao động nghiêm trọng, sáng chế đề xuất phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi có thể làm cho sai số điều hướng của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra được hội tụ về không trong thời gian giới hạn thông qua sơ đồ điều khiển mới; và có thể ước tính giá trị của cận trên bất định của hệ thống trực tuyến, nhờ đó loại bỏ các vấn đề về dao động ở mức độ lớn. Hơn nữa, phương pháp điều khiển do sáng chế đề xuất cho các hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra với các đặc tính bậc tự do (degree of freedom: DOF) khác nhau có thể được áp dụng trực tiếp cho các hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra với các đặc tính hướng DOF tương tự/đồng nhất, và còn có thể áp dụng trực tiếp cho các hệ thống tuyến tính khác nhau, có phạm vi ứng dụng rộng rãi và các mục đích thích hợp.

Để đạt được mục đích nêu trên, sáng chế đề xuất phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi, phương pháp bao gồm bốn bước điều khiển sau:

1) bước thứ nhất, thiết lập các phương trình động học của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra

trong trường hợp tính đến các phần tử bất định, các phương trình động học của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra là như sau:

$$\dot{x}_1 = f_1 \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = f_{2,0} + G_0 u + \delta_{total,n} \quad (2)$$

trong đó, $x_1 \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ và $x_2 \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là các vector trạng thái hệ thống; $f_1 \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là phương trình trạng thái hệ thống tron tru linh hoạt; $f_{2,0} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ và $G_0 \in \mathcal{R}^{n \times n}$ là các phần tử có thể tính toán; $u \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là vector điều khiển; $*$ là đạo hàm bậc nhất của $*$, ví dụ, $\dot{x}_1$ là đạo hàm bậc nhất của x_1 ; $\delta_{total,n} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là phần tử bất định của hệ thống;

2) bước thứ hai, xác định bề mặt chế độ trượt s

khi tính đến sự chênh lệch giữa các đặc tính động học của các hướng bậc tự do DOF khác nhau, các phương trình sau đây được thiết lập:

$$s = \varepsilon_1 + D_{diag}(\lambda_i) V_{vec}(\dot{\varepsilon}_{1,i}^{p_i/q_i}) \quad (3)$$

$$\varepsilon_1 = x_1 - x_{1,d} \quad (4)$$

trong đó, $s \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là bề mặt chế độ trượt; ε_1 là vector điều hướng trạng thái của hệ thống; x_1 là trạng thái hệ thống thực tế; $x_{1,d}$ là trạng thái hệ thống mong muốn; $*_i$ là phần tử thứ i của $*$; $V_{vec}(\cdot) \in \mathcal{R}^{n \times 1} / D_{diag}(\cdot) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ là vector/ma trận bao gồm các phần tử $*$; $V_{vec}(\dot{\varepsilon}_{1,i}^{p_i/q_i})$ là vector bao gồm các phần tử $\dot{\varepsilon}_{1,i}^{p_i/q_i}$; $D_{diag}(\lambda_i)$ là ma trận bao gồm các phần tử λ_i ; p_i, q_i, λ_i ($i = 1 \dots n$) là các số dương và thỏa mãn $1 < p_i/q_i < 2$, là các giá trị thiết kế của hệ thống điều khiển;

3) bước thứ ba, đưa ra tốc độ cập nhật thích nghi n chiều $\hat{\Gamma}_{adaptive,n}$ các quy tắc cập nhật của tốc độ cập nhật thích nghi n chiều $\hat{\Gamma}_{adaptive,n}$ như sau:

$$\hat{\Gamma}_{adaptive,n,i} = \hat{b}_{1,n,i} + \hat{b}_{2,n,i} \|x_1\| + \hat{b}_{3,n,i} \|x_2\|^2 \quad (5)$$

$$\hat{b}_{1,n,i} = d_{1,n,i} \frac{p_i}{q_i} \lambda_i \|s\| \|D_{diag}(\dot{\varepsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1})\| \left\| \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right\| \quad (6)$$

$$\hat{b}_{2,n,i} = d_{2,n,i} \frac{p_i}{q_i} \lambda_i \|s\| \|D_{diag}(\dot{\varepsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1})\| \left\| \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right\| \|x_1\| \quad (7)$$

$$\hat{b}_{3,n,i} = d_{3,n,i} \frac{p_i}{q_i} \lambda_i \|s\| \|D_{diag}(\dot{\varepsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1})\| \left\| \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right\| \|x_2\|^2 \quad (8)$$

trong đó, $\hat{\Gamma}_{adaptive,n} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là giá trị ước tính của cận trên bất định của hệ thống, là vector thay đổi theo thời gian, và còn được gọi là tốc độ cập nhật thích nghi n chiều $\hat{\Gamma}_{adaptive,n}$; $\hat{b}_{1,n,i}$, $\hat{b}_{2,n,i}$ và $\hat{b}_{3,n,i}$ lần lượt là các giá trị ước tính của các tham số tương ứng của phần tử bất định $\delta_{total,n}$ của hệ thống; $d_{1,n,i}$, $d_{2,n,i}$ và $d_{3,n,i}$ là các số dương, là các giá trị thiết kế của hệ thống điều khiển; $\|\cdot\|$ là phép tính độ lớn vector; $*^2$ là phép tính trị số bình phương; và $\frac{\partial f_1}{\partial x_2}$ là đạo hàm riêng phần của f_1 đối với x_2 ;

các cận trên của các phần tử bất định của tất cả các hướng DOF của hệ thống có thể được thiết lập tương ứng theo phương trình (5);

4) bước cuối cùng, tính toán giá trị mô men/lực truyền động yêu cầu để dẫn động hệ thống phi tuyến

các phương trình để tính toán mô men/lực truyền động là như sau:

$$\mathbf{u}_{avntsmc,n} = - \left(\frac{\partial \mathbf{f}_1}{\partial \mathbf{x}_2} \mathbf{G}_0 \right)^+ \left(\kappa \|\mathbf{s}\| \mathbf{D}_{\text{diag}} \left(\dot{\hat{\epsilon}}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right) \left\| \frac{\partial \mathbf{f}_1}{\partial \mathbf{x}_2} \right\| \hat{\mathbf{F}}_{\text{adaptive},n} + \frac{\partial \mathbf{f}_1}{\partial \mathbf{x}_1} \mathbf{f}_1 + \frac{\partial \mathbf{f}_1}{\partial \mathbf{x}_2} \mathbf{f}_{2,0} \right. \\ \left. + \mathbf{D}_{\text{diag}}^{-1} (p_i / q_i) \mathbf{D}_{\text{diag}}^{-1} (\lambda_i) \mathbf{V}_{\text{vec}} \left(\dot{\hat{\epsilon}}_{1,i}^{2-p_i/q_i} \right) - \ddot{\mathbf{x}}_{1,d} \right) \quad (9)$$

$$\kappa = \mathbf{D}_{\text{diag}} \left(\frac{\left[\begin{matrix} s_i \dot{\hat{\epsilon}}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \end{matrix} \right]^T}{\left| s_i \dot{\hat{\epsilon}}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right|^2} \right) \quad (10)$$

trong đó, $\mathbf{u}_{avntsmc,n} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là mô men/lực truyền động của phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi theo sáng chế; κ là biến số trung gian tùy chỉnh; $\frac{\partial \mathbf{f}_1}{\partial \mathbf{x}_1}$ là đạo hàm riêng phần của $\mathbf{f}_1$ đối với $\mathbf{x}_1$; $*$ là đạo hàm bậc hai của $*$; $*^+$ là nghịch đảo suy rộng của $*$; $*^{-1}$ là nghịch đảo của $*$; $\mathbf{V}_{\text{vec}}(*) \in \mathcal{R}^{n \times 1} / \mathbf{D}_{\text{diag}}(*) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ là vectơ/mã trận bao gồm các phần tử $*$; và $*^T$ là hoán vị của $*$;

bằng cách dẫn động hệ thống phi tuyến sử dụng mô men/lực truyền động $\mathbf{u}_{avntsmc,n}$, sai số điều hướng của hệ thống có thể được hội tụ về không trong thời gian giới hạn.

Trong phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi, quy trình thiết lập cụ thể của phương trình động học của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra được thể hiện như sau:

1) Các phương trình động học và động hình học của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra được thể hiện như sau:

$$\dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{f}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \quad (11)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{f}_2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) + \mathbf{G}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{u} \quad (12)$$

trong đó, $\mathbf{x}_1 \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ và $\mathbf{x}_2 \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là các vectơ trạng thái hệ thống; $\mathbf{u} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là vectơ điều khiển; $\mathbf{f}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ và $\mathbf{f}_2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là các phương trình trạng thái hệ thống tron tru linh hoạt; $\mathbf{G}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ là ma trận đầu vào không suy biến;

2) Khi tính đến các phần tử bất định, ví dụ, các động lực bất định, các dao động tham số và giao thoa bên ngoài, phương trình động học (12) của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra có thể được biểu diễn như:

$$\dot{x}_2 = f_{2,0} + \Delta_{f2} + (G_0 + \Delta_g)u \quad (13)$$

trong đó, $f_{2,0}$ và G_0 là các phần tử có thể tính toán; Δ_{f2} và Δ_g là các phần tử bất định;

3) Khi tiếp tục tính đến ảnh hưởng của lỗi của cơ cấu chấp hành, phương trình động học (13) của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra có thể được biểu diễn như:

$$\dot{x}_2 = f_{2,0} + \Delta_{f2} + (G_0 + \Delta_g)\delta_a(u + \delta_f) \quad (14)$$

trong đó, $\delta_a \in \mathcal{R}^{n \times n}$ là lỗi nhân bội của cơ cấu chấp hành hệ thống; $\delta_f \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là lỗi cộng thêm của cơ cấu chấp hành hệ thống;

4) Khi tính đến các phần tử bất định, ví dụ, các động lực bất định, các dao động tham số và giao thoa bên ngoài, phương trình động học của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra có thể được viết lại như sau:

$$\dot{x}_1 = f_1 \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = f_{2,0} + G_0 u + \delta_{total,n} \quad (2)$$

$$\delta_{total,n} = \Delta_{f2} + (G_0 + \Delta_g)\delta_a(u + \delta_f) - G_0 u \quad (15)$$

trong đó, f_1 là dạng rút gọn của $f_1(x_1, x_2)$; $\delta_{total,n}$ là phần tử bất định của hệ thống.

Theo phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi: để tính đến sự chênh lệch giữa các đặc tính động học của các hướng DOF khác nhau, giả sử rằng cận trên của phần tử bất định $\delta_{total,n}$ của hệ thống thỏa mãn bất phương trình (16):

$$\left\| \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right\| (b_{1,n,i} + b_{2,n,i} \|x_1\| + b_{3,n,i} \|x_2\|^2) > \left| \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2} \delta_{total,n} \right)_i \right| \quad (16)$$

trong đó, $b_{1,n,i}$, $b_{2,n,i}$ và $b_{3,n,i}$ là các số dương nhỏ nhất thỏa mãn bất phương trình (16); $|*|$ là phép tính các giá trị tuyệt đối; $\|*\|$ là phép tính độ lớn vector; $*^2$ là phép tính trị số bình phương; và $\frac{\partial f_1}{\partial x_2}$ là đạo hàm riêng phần của f_1 đối với x_2 ;

các cận trên của các phần tử bất định của tất cả các hướng DOF của hệ thống có thể được thiết lập tương ứng theo bất phương trình (16).

Theo phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi, trong phương pháp thiết kế bề mặt chế độ trượt xác định s , bằng cách thiết đặt phần tử p_i, q_i, λ_i khác nhau cho các hướng DOF khác nhau của hệ thống, các đặc tính hội tụ của các hướng DOF khác nhau của hệ thống có thể được thiết đặt tương ứng, các đặc tính hội tụ bao gồm tốc độ hội tụ và thời gian hội tụ.

Trong phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi, bằng cách thiết lập các phương trình động học và động hình học của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra, các giá trị thời gian hội tụ của các hướng DOF khác nhau được tính toán, và trị số cực đại của giá trị thời gian hội tụ của mỗi hướng DOF được chọn, do đó, có thể thu được thời gian hội tụ giới hạn t_f của hệ thống, và sai số điều hướng của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra có thể được hội tụ về không trong thời gian hội tụ giới hạn t_f .

Theo phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi, phương pháp tính toán của thời gian hội tụ giới hạn t_f là như sau:

nếu $s_i \neq 0$, phương trình sau đây được xác định:

$$\min \left(\frac{p_i}{q_i} \lambda_i \left\| D_{\text{diag}} \left(\dot{\varepsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right) \left\| \left(\left\| \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right\| \left(b_{1,n,i} + b_{2,n,i} \|x_1\| + b_{3,n,i} \|x_2\|^2 \right) - \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2} \delta_{\text{total},n} \right)_i \right) \right\| \right) \right) = \eta_{2,i} > 0 \quad (17)$$

trong đó, $\eta_{2,i}$ là một số dương; $\min *$ là trị số nhỏ nhất của $*$;

dưới tác động của phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi, thời gian hội tụ giới hạn của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra là:

$$t_f = \max(t_{f,i}) = \max(t_{r,i} + t_{s,i}) \quad (18)$$

$$t_{s,i} = \lambda_i^{q_i/p_i} \left(\frac{p_i}{p_i - q_i} \right) \left| \varepsilon_{1,i}^{1-q_i/p_i}(t_{r,i}) \right| \quad (19)$$

$$t_{r,i} \leq -\frac{|s_i(0)|}{\eta_{2,i}} \quad (20)$$

trong đó, $\max *$ là trị số cực đại của $*$; t_f là thời gian hội tụ giới hạn của hệ thống

phi tuyến; $t_{f,i}$ là thời gian hội tụ giới hạn của giá trị phần tử thứ i của hệ thống phi tuyến; $t_{r,i}$ là khoảng thời gian cho hệ thống đi đến bề mặt chế độ trượt từ thời điểm ban đầu, $s_i = 0$; $t_{s,i}$ là khoảng thời điểm từ $s_i = 0$ đến $\varepsilon_{1,i} = 0$; $s_i(0)$ là giá trị phần tử thứ i của bề mặt chế độ trượt s tại thời điểm ban đầu; $\varepsilon_{1,i}^{1-q_i/p_i}(t_{r,i})$ là giá trị của $\varepsilon_{1,i}^{1-q_i/p_i}$ tại thời điểm $t_{r,i}$; $\eta_{2,i}$ là số dương thỏa mãn phương trình (17).

Theo phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi, sử dụng tốc độ cập nhật thích nghi chiều $\hat{\Gamma}_{adaptive,n}$, bằng cách đặt các quy tắc cập nhật của các hướng DOF khác nhau, dao động gây ra bởi sự chênh lệch giữa các đặc tính động học khác nhau của các hướng DOF khác nhau của hệ thống phi tuyến có thể được giảm xuống; cận trên bất định của hệ thống có thể được ước tính trực tuyến linh hoạt bằng các quy tắc điều chỉnh tốc độ cập nhật thích nghi n chiều, và cường độ dao động có thể được giảm hơn nữa.

Theo phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi, để tiếp tục loại bỏ hiện tượng dao động của hệ thống, hệ số κ trong phương trình (9) để tính mô men/lực truyền động thường được sửa đổi, các phương pháp sửa đổi có sẵn bao gồm nhưng không giới hạn ở các phương pháp sau đây:

phương pháp sửa đổi 1: κ_1 được xác định như sau:

$$\kappa_1 = D_{\text{diag}} \left(\frac{\left[s_i \dot{\varepsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right]^T}{\left(\left| s_i \dot{\varepsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right| + \varsigma_{1,i} \right)^2} \right) \quad (21)$$

trong đó $\varsigma_{1,i}$ là số dương nhỏ tùy chỉnh; $D_{\text{diag}}(*) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ là ma trận bao gồm các phần tử $*$; κ_1 là ma trận thay thế xác định, được sử dụng để thay thế κ trong phương trình tính toán mô men/lực truyền động, tức là phương trình (9);

phương pháp sửa đổi 2: κ_2 được xác định như sau:

$$\kappa_2 = \begin{cases} \mathbf{D}_{\text{diag}} \left(\frac{\left[\begin{matrix} s_i \dot{\varepsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \end{matrix} \right]^T}{\left| s_i \dot{\varepsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right|^2} \right) & \left| s_i \dot{\varepsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right| \geq \varsigma_{2,i} \\ \mathbf{D}_{\text{diag}} \left(\frac{\left[\begin{matrix} s_i \dot{\varepsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \end{matrix} \right]^T}{\left(\varsigma_{2,i} \right)^2} \right) & \left| s_i \dot{\varepsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right| < \varsigma_{2,i} \end{cases} \quad (22)$$

trong đó, $\varsigma_{2,i}$ là số dương nhỏ tùy chỉnh; $\mathbf{D}_{\text{diag}}(*) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ là ma trận bao gồm các phần tử *; κ_2 là ma trận thay thế xác định, được sử dụng để thay thế κ trong phương trình tính toán mô men/lực truyền động, tức là phương trình (9).

So với các giải pháp kỹ thuật đã có, phương pháp theo sáng chế có các đặc tính và hiệu quả thuận lợi sau:

① Bằng phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi, bề mặt chế độ trượt có thể thiết lập các đặc tính hội tụ của các hướng DOF khác nhau của hệ thống tương ứng.

② Bằng phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi, bề mặt chế độ trượt n chiều và tốc độ cập nhật thích nghi n chiều được thiết kế, có tính đến các đặc tính động học khác nhau của các hướng DOF khác nhau của hệ thống, và giảm dao động gây ra bởi sự chênh lệch giữa các đặc tính động học của các hướng DOF khác nhau của hệ thống;

③ Bằng phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi, cận trên bất định của hệ thống có thể được ước tính trực tuyến linh hoạt bằng các quy tắc điều chỉnh tốc độ cập nhật thích nghi n chiều, và cường độ dao động có thể được giảm thêm;

④ Bằng phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi, có thể tránh được vấn đề suy biến, và có thể đảm bảo rằng sai số trạng thái hệ thống được hội tụ về không trong thời gian giới hạn;

⑤ Phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi đặc biệt phù hợp với các hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra có sự chênh lệch giữa các đặc tính động học của các hướng DOF; tuy nhiên, phương pháp cũng có thể được áp dụng trực tiếp cho các hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra có các đặc tính tương tự/đồng nhất của các hướng DOF khác nhau, và cũng có thể được áp dụng trực tiếp cho các hệ

thông tuyến tính khác nhau, có phạm vi ứng dụng rộng rãi và mục đích thích hợp, tức là, sáng chế được áp dụng cho các hệ thống robot khác nhau, và các hệ thống ứng dụng khác nữa có thể được mô tả sử dụng các hệ thống phi tuyến/tuyến tính nhiều đầu vào-nhiều đầu ra.

Sáng chế được mô tả chi tiết hơn dưới đây kết hợp với các hình vẽ và các phương án cụ thể kèm theo, nhưng sáng chế không giới hạn ở đây.

Mô tả vắn tắt các hình vẽ

Fig.1 là sơ đồ khối thể hiện quá trình thực hiện phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi theo sáng chế;

Fig.2 là sơ đồ đơn giản của cánh tay máy 2 bậc tự do (Degree of Freedom: DOF) theo phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi của phương án theo sáng chế;

Fig.3 là các đồ thị thể hiện sai số điều hướng và mô men điều khiển của cánh tay máy 2 bậc tự do (DOF) theo phương án của sáng chế dưới tác động của phương pháp điều chỉnh trượt đầu cuối không suy biến (non-singularity terminal sliding mode control: NTSMC) thông thường "C1";

Fig.4 là các đồ thị thể hiện sai số điều hướng và mô men điều khiển của cánh tay máy 2 bậc tự do (DOF) theo phương án của sáng chế dưới tác động của phương pháp NTSMC thông thường "C2"; và

Fig.5 là các đồ thị thể hiện sai số điều hướng và mô men điều khiển của cánh tay máy 2 bậc tự do (DOF) theo phương án của sáng chế dưới tác động của phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi "C3" theo sáng chế.

Mô tả chi tiết sáng chế

Phương pháp thực hiện cụ thể của sáng chế được mô tả dưới đây dựa trên các hình vẽ và các phương án thực hiện.

Tham chiếu trên Fig.1, Fig.1 là sơ đồ khối thể hiện quá trình thực hiện phương pháp theo sáng chế. Các bước thực hiện cụ thể theo sáng chế như sau:

1) bước thứ nhất: thiết lập các phương trình động học của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra

$$\dot{x}_1 = f_1 \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = f_{2,0} + G_0 u + \delta_{total,n} \quad (2)$$

trong đó, $x_1 \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ và $x_2 \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là các vector trạng thái hệ thống; $f_1 \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là phương trình trạng thái hệ thống tron tru linh hoạt; $f_{2,0} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ và $G_0 \in \mathcal{R}^{n \times n}$ là các phần tử có thể tính toán; $u \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là vector điều khiển; $*$ là đạo hàm bậc nhất của $*$, ví dụ, $\dot{x}_1$ là đạo hàm bậc nhất của x_1 ; $\delta_{total,n} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là phần tử bất định của hệ thống;

2) bước thứ hai: xác định bề mặt chế độ trượt s

khi tính đến sự chênh lệch giữa các đặc tính động học của các hướng bậc tự do (Degree of Freedom: DOF) khác nhau, các phương trình dưới đây được thiết lập:

$$s = \varepsilon_1 + D_{diag}(\lambda_i) V_{vec}(\dot{\varepsilon}_{1,i}^{p_i/q_i}) \quad (3)$$

$$\varepsilon_1 = x_1 - x_{1,d} \quad (4)$$

trong đó, $s \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là bề mặt chế độ trượt; ε_1 là vector điều hướng trạng thái của hệ thống; x_1 là trạng thái hệ thống thực tế; $x_{1,d}$ là trạng thái hệ thống mong muốn; $*_i$ là phần tử thứ i của $*$; $V_{vec}(\varepsilon_{1,i}^{p_i/q_i}) \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là vector bao gồm các phần tử $\varepsilon_{1,i}^{p_i/q_i}$; $D_{diag}(\lambda_i)$ là ma trận bao gồm các phần tử λ_i ; p_i, q_i, λ_i ($i = 1 \dots n$) là các số dương và thỏa mãn $1 < p_i/q_i < 2$, là các giá trị thiết kế của hệ thống điều khiển;

trong phương pháp thiết kế bề mặt chế độ trượt xác định s , bằng cách thiết đặt phần tử p_i, q_i, λ_i khác nhau cho các hướng DOF khác nhau của hệ thống, các đặc tính hội tụ của các hướng DOF khác nhau của hệ thống có thể được đặt tương ứng, các đặc tính hội tụ bao gồm tốc độ hội tụ và thời gian hội tụ;

3) bước thứ ba, đưa ra tốc độ cập nhật thích nghi n chiều $\hat{\Gamma}_{adaptive,n}$ các quy tắc cập nhật của tốc độ cập nhật thích nghi n chiều $\hat{\Gamma}_{adaptive,n}$ là như sau:

$$\hat{\Gamma}_{adaptive,n,i} = \hat{b}_{1,n,i} + \hat{b}_{2,n,i} \|x_1\| + \hat{b}_{3,n,i} \|x_2\|^2 \quad (5)$$

$$\hat{b}_{1,n,i} = d_{1,n,i} \frac{p_i}{q_i} \lambda_i \|s\| \|D_{diag}(\dot{\varepsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1})\| \left\| \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right\| \quad (6)$$

$$\hat{b}_{2,n,i} = d_{2,n,i} \frac{p_i}{q_i} \lambda_i \|s\| \|D_{diag}(\dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1})\| \left\| \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right\| \|x_1\| \quad (7)$$

$$\hat{b}_{3,n,i} = d_{3,n,i} \frac{p_i}{q_i} \lambda_i \|s\| \|D_{diag}(\dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1})\| \left\| \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right\| \|x_2\|^2 \quad (8)$$

trong đó, $\hat{\Gamma}_{adaptive,n} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là giá trị ước tính của cận trên bất định của hệ thống là vector thay đổi theo thời gian, và còn được gọi là tốc độ cập nhật thích nghi n chiều $\hat{\Gamma}_{adaptive,n}$; $\hat{b}_{1,n,i}$, $\hat{b}_{2,n,i}$ và $\hat{b}_{3,n,i}$ lần lượt là các giá trị ước tính của các tham số tương ứng của phần tử bất định $\delta_{total,n}$ của hệ thống; $d_{1,n,i}$, $d_{2,n,i}$ và $d_{3,n,i}$ là các số dương là các giá trị thiết kế của hệ thống điều khiển; $\|*\|$ là phép tính độ lớn vector; $*^2$ là phép tính trị số bình phương; và $\frac{\partial f_1}{\partial x_2}$ là đạo hàm riêng phần của f_1 đối với x_2 ;

các cận trên của các phần tử bất định của tất cả các hướng DOF của hệ thống có thể được đặt tương ứng trong phương trình (5);

sử dụng tốc độ cập nhật thích nghi n chiều $\hat{\Gamma}_{adaptive,n}$, bằng cách thiết đặt các quy tắc cập nhật của các hướng DOF khác nhau, dao động gây ra bởi sự chênh lệch giữa các đặc tính động học của các hướng DOF khác nhau của hệ thống phi tuyến có thể giảm xuống; cận trên bất định của hệ thống có thể được ước tính trực tuyến linh hoạt sử dụng các quy tắc điều chỉnh của tốc độ cập nhật thích nghi n chiều, và cường độ dao động có thể được giảm thêm;

4) bước cuối cùng: tính toán giá trị mô men/lực truyền động cần có để dẫn động hệ thống phi tuyến

các phương trình để tính toán mô men/lực truyền động như sau:

$$\mathbf{u}_{avntsmc,n} = - \left(\frac{\partial f_1}{\partial \mathbf{x}_2} \mathbf{G}_0 \right)^+ \left(\kappa \|s\| \|D_{diag}(\dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1})\| \left\| \frac{\partial f_1}{\partial \mathbf{x}_2} \right\| \hat{\Gamma}_{adaptive,n} + \frac{\partial f_1}{\partial x_1} f_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2} f_{2,0} \right. \\ \left. + D_{diag}^{-1}(p_i / q_i) D_{diag}^{-1}(\lambda_i) V_{vec}(\dot{\epsilon}_{1,i}^{2-p_i/q_i}) - \ddot{\mathbf{x}}_{1,d} \right) \quad (9)$$

$$\kappa = D_{diag} \left(\frac{\left[S_i \dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right]^T}{\left| S_i \dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right|^2} \right) \quad (10)$$

trong đó, $\mathbf{u}_{avntsmc,n} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là mô men/lực truyền động của phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi theo sáng chế; κ là biến số trung gian tùy chỉnh; $\frac{\partial f_1}{\partial x_1}$ là

đạo hàm riêng phần của f_1 đối với x_1 ; $*$ là đạo hàm bậc hai của $*$; $*^+$ là nghịch đảo suy rộng của $*$; $*^{-1}$ là nghịch đảo của $*$; $V_{vec}(*) \in \mathcal{R}^{n \times 1}/D_{diag}(*) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ là vectơ/ma trận bao gồm các phần tử $*$; và $*^T$ là hoán vị của $*$;

để tiếp tục loại bỏ hiện tượng dao động của hệ thống, hệ số κ trong phương trình (9) tính toán mô men/lực truyền động thường được sửa đổi, các phương pháp sửa đổi sẵn có bao gồm nhưng không giới hạn ở các phương pháp sau đây:

phương pháp sửa đổi 1: κ_1 được xác định như sau:

$$\kappa_1 = D_{diag} \left(\frac{\left[s_i \dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right]^T}{\left(\left| s_i \dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right| + \varsigma_{1,i} \right)^2} \right) \quad (21)$$

trong đó, $\varsigma_{1,i}$ là số dương nhỏ tùy chỉnh; $D_{diag}(*) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ là ma trận bao gồm các phần tử $*$; κ_1 là ma trận thay thế xác định, được sử dụng để thay thế κ trong phương trình tính toán mô men/lực truyền động, tức là phương trình (9);

phương pháp sửa đổi 2: κ_2 được xác định như sau:

$$\kappa_2 = \begin{cases} D_{diag} \left(\frac{\left[s_i \dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right]^T}{\left| s_i \dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right|^2} \right) & \left| s_i \dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right| \geq \varsigma_{2,i} \\ D_{diag} \left(\frac{\left[s_i \dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right]^T}{\left(\varsigma_{2,i} \right)^2} \right) & \left| s_i \dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right| < \varsigma_{2,i} \end{cases} \quad (22)$$

trong đó, $\varsigma_{2,i}$ là số dương nhỏ tùy chỉnh; $D_{diag}(*) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ là ma trận bao gồm các phần tử $*$; κ_2 là ma trận thay thế xác định, được sử dụng để thay thế κ trong phương trình tính toán mô men/lực truyền động, tức là phương trình (9).

Phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi được thể hiện trong phương trình (9) có thể thực hiện kiểm tra ổn định nghiêm ngặt dựa trên định lý Lyapunov, và có thể đảm bảo sự hội tụ tăng dần của hệ thống trong thời gian giới hạn. Thông thường, trong ứng dụng kỹ thuật thực tế, điều khiển chế độ mô phỏng trượt được đưa vào để tiếp tục loại bỏ các vấn đề dao động, tức là phương pháp điều khiển để giới

hạn sự điều hướng chuyển động của hệ thống trong miền lân cận nhất định của chế độ trượt lý tưởng. Đối với phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi được đề xuất bởi sáng chế, nguyên lý cốt lõi của điều khiển chế độ tựa trượt là: “trong phương trình (10), khi mẫu số là 0 hoặc rất gần 0, đặt mẫu số thành số dương nhỏ mà không phải là không”. Dựa trên nguyên lý này, sáng chế đề xuất hai phương pháp sửa đổi bên trên để thay thế cụ thể.

Tham chiếu trên Fig.2, Fig.2 là sơ đồ đơn giản của cánh tay máy 2 bậc tự do (DOF) theo phương án của sáng chế; các hình vẽ Fig.3, Fig.4 và Fig.5 là các đồ thị thể hiện sai số điều hướng và mô men điều khiển của cánh tay máy 2 DOF dưới tác động của các phương pháp điều khiển khác nhau. Tham chiếu trên các hình vẽ Fig.3, Fig.4 và Fig.5, bằng cách lấy ứng dụng cụ thể của phương án thực hiện của cánh tay máy 2 DOF làm ví dụ, các bước áp dụng cụ thể của sáng chế sẽ được mô tả như sau:

1) Thiết lập phương trình động học của cánh tay máy 2 DOF

phương trình động học của cánh tay máy 2 DOF được thể hiện như sau

$$\begin{aligned}
 M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) &= \tau \\
 M(q) &= \begin{bmatrix} k_1 + 2k_2 \cos(\theta_2) & k_3 + k_2 \cos(\theta_2) \\ k_3 + k_2 \cos(\theta_2) & k_3 \end{bmatrix} \\
 C(q, \dot{q}) &= \begin{bmatrix} -k_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2 & -k_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2 \\ k_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix} \\
 g(q) &= \begin{bmatrix} k_4 \sin(\theta_1) + k_5 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ k_5 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (23)$$

trong đó, $q = [\theta_1, \theta_2]^T$ là vector tọa độ suy rộng của cánh tay máy; $\dot{q}$ và $\ddot{q}$ lần lượt là vector vận tốc suy rộng và vector gia tốc suy rộng của cánh tay máy; $M(q)$ là ma trận khối lượng của cánh tay máy; $C(q, \dot{q})$ là ma trận hệ số hướng tâm/Coriolis của cánh tay máy; $g(q)$ là vector biểu thị trọng lực của cánh tay máy; τ là vector điều khiển của cánh tay máy; θ_1 và θ_2 lần lượt là các góc quay của cánh tay 1 và cánh tay 2 của cánh tay máy; k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 là các tham số động học của cánh tay máy, độ lớn của chúng phụ thuộc vào khối lượng, các giá trị quán tính và chiều dài của các cánh tay máy; $\cos *$ là giá trị hàm lượng giác cosin của *; $\sin *$ là giá trị hàm lượng giác sin của *;

phương trình (23) có thể được viết như sau:

$$\ddot{q} = M^{-1}(q)(\tau - C(q, \dot{q})\dot{q} - g(q)) \quad (24)$$

theo phương trình (24), phương trình động học của cánh tay máy 2 DOF có thể được thể hiện thành các dạng phương trình (25) – (26) như sau

$$\dot{x}_{1,rob} = f_{1,rob}(x_{1,rob}, x_{2,rob}) = x_{2,rob} \quad (25)$$

$$\dot{x}_{2,rob} = f_{2,rob}(x_{1,rob}, x_{2,rob}) + G_{rob}(x_{1,rob}, x_{2,rob})u_{rob} \quad (26)$$

trong đó,

$$x_{1,rob} = q = [\theta_1, \theta_2]^T \quad (27)$$

$$x_{2,rob} = \dot{q} = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2]^T \quad (28)$$

$$f_{1,rob}(x_{1,rob}, x_{2,rob}) = x_{2,rob} \quad (29)$$

$$f_{2,rob}(x_{1,rob}, x_{2,rob}) = -M^{-1}(x_{1,rob}) \left(C(x_{1,rob}, x_{2,rob})x_{2,rob} + g(x_{1,rob}) \right) \quad (30)$$

$$G_{rob}(x_{1,rob}, x_{2,rob}) = M^{-1}(x_{1,rob}) \quad (31)$$

$$u_{rob} = \tau \quad (32)$$

trong đó, $x_{1,rob} \in \mathcal{R}^{2 \times 1}$ và $x_{2,rob} \in \mathcal{R}^{2 \times 1}$ là các vector trạng thái cánh tay máy; $f_{1,rob}(x_{1,rob}, x_{2,rob}) \in \mathcal{R}^{2 \times 1}$ và $f_{2,rob}(x_{1,rob}, x_{2,rob}) \in \mathcal{R}^{2 \times 1}$ là các phương trình trạng thái cánh tay máy tron tru linh hoạt; $G_{rob}(x_{1,rob}, x_{2,rob}) \in \mathcal{R}^{2 \times 2}$ là ma trận đầu vào cánh tay máy không suy biến; $u_{rob} \in \mathcal{R}^{2 \times 1}$ là cánh tay máy vector điều khiển; $*$ là đạo hàm bậc nhất của $*$; $f_{1,rob}(x_{1,rob}, x_{2,rob})$, $f_{2,rob}(x_{1,rob}, x_{2,rob})$ và $G_{rob}(x_{1,rob}, x_{2,rob})$ trong các phương trình có thể được thể hiện đơn giản sử dụng $f_{1,rob}$, $f_{2,rob}$ và G_{rob} ;

khi tính đến các phần tử bất định, ví dụ, các động lực bất định, các dao động tham số, giao thoa bên ngoài và lỗi thao tác, các phương trình động học của cánh tay máy 2 DOF có thể được viết lại như sau:

$$\dot{x}_{1,rob} = f_{1,rob} \quad (33)$$

$$\dot{x}_{2,rob} = f_{2,0,rob} + G_{0,rob}u_{rob} + \delta_{total,n,rob} \quad (34)$$

trong đó, $f_{1,rob}$ là dạng rút gọn của $f_{1,rob}(x_{1,rob}, x_{2,rob})$; $f_{2,0,rob}$ và $G_{0,rob}$ là các phần tử có thể tính toán của $f_{2,rob}$ và G_{rob} ; $\delta_{total,n,rob}$ là phần tử bất định của cánh tay máy;

có thể thấy từ các phương trình (3) - (34) là phần tử bất định $\delta_{total,n,rob}$ trong

phương trình động học của cánh tay máy 2 DOF có thể ảnh hưởng đến độ lớn của các tham số k_1, k_2, k_3, k_4 và k_5 . Trong phương án này, khi tính đến ảnh hưởng của tính bất định, các giá trị của các tham số k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 lần lượt là 8,77, 0,51, 0,76, 74,48, 6,174; các phân tử có thể tính toán $k_{1,0}, k_{2,0}, k_{3,0}, k_{4,0}, k_{5,0}$ trong các tham số k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 lần lượt là 8,77, 0,51, 0,76, 97, 6,174;

2) Xác định bề mặt chế độ trượt s

khi tính đến sự chênh lệch giữa các đặc tính động học của các hướng DOF khác nhau, các phương trình sau đây được thiết kế:

$$s_{rob} = \varepsilon_{rob} + D_{diag}(\lambda_{rob,i}) V_{vec} \left(\dot{\varepsilon}_{1,rob,i}^{p_{rob,i}/q_{rob,i}} \right) \quad (35)$$

$$\varepsilon_{rob} = x_{1,rob} - x_{1,d,rob} \quad (36)$$

trong đó, $s_{rob} \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ là bề mặt chế độ trượt; ε_{rob} là vector sai số điều hướng trạng thái của cánh tay máy; $x_{1,rob}$ là trạng thái thực của cánh tay máy; $x_{1,d,rob}$ là trạng thái mong muốn của cánh tay máy; $*$ là phần tử thứ i của $*$; $V_{vec}(\cdot) \in \mathbb{R}^{2 \times 1} / D_{diag}(\cdot) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ là vector/ma trận bao gồm các phần tử $*$; $V_{vec}(\dot{\varepsilon}_{1,rob,i}^{p_{rob,i}/q_{rob,i}})$ là vector bao gồm các phần tử $\dot{\varepsilon}_{1,rob,i}^{p_{rob,i}/q_{rob,i}}$; $D_{diag}(\lambda_{rob,i})$ là ma trận bao gồm các phần tử $\lambda_{rob,i}$; $p_{rob,i}, q_{rob,i}, \lambda_{rob,i}$ ($i = 1, 2$) là các số dương và thỏa mãn điều kiện $1 < p_{rob,i} / q_{rob,i} < 2$, là các giá trị thiết kế của cánh tay máy điều khiển;

3) Đưa ra tốc độ cập nhật thích nghi n chiều $\hat{\Gamma}_{adaptive,rob}$

các quy tắc cập nhật của tốc độ cập nhật thích nghi n chiều $\hat{\Gamma}_{adaptive,rob}$ là như sau:

$$\hat{\Gamma}_{adaptive,rob,i} = \hat{b}_{1,rob,i} + \hat{b}_{2,rob,i} \|x_{1,rob}\| + \hat{b}_{3,rob,i} \|x_{2,rob}\|^2 \quad (37)$$

$$\hat{b}_{1,rob,i} = d_{1,rob,i} \frac{p_{rob,i}}{q_{rob,i}} \lambda_{rob,i} \|s_{rob}\| \left\| D_{diag} \left(\dot{\varepsilon}_{rob,i}^{p_{rob,i}/q_{rob,i}-1} \right) \right\| \quad (38)$$

$$\hat{b}_{2,rob,i} = d_{2,rob,i} \frac{p_{rob,i}}{q_{rob,i}} \lambda_{rob,i} \|s_{rob}\| \left\| D_{diag} \left(\dot{\varepsilon}_{rob,i}^{p_{rob,i}/q_{rob,i}-1} \right) \right\| \|x_{1,rob}\| \quad (39)$$

$$\hat{b}_{3,rob,i} = d_{3,rob,i} \frac{p_{rob,i}}{q_{rob,i}} \lambda_{rob,i} \|s_{rob}\| \left\| D_{diag} \left(\dot{\varepsilon}_{rob,i}^{p_{rob,i}/q_{rob,i}-1} \right) \right\| \|x_{2,rob}\|^2 \quad (40)$$

trong đó, $\hat{r}_{\text{adaptive,rob}} \in \mathcal{R}^{2 \times 1}$ là giá trị ước tính của cận trên bất định của cánh tay máy, là vector thay đổi theo thời gian, và còn được gọi là tốc độ cập nhật thích nghi 2 chiều $\hat{r}_{\text{adaptive,rob}}$; $\hat{b}_{1,rob,i}$, $\hat{b}_{2,rob,i}$ và $\hat{b}_{3,rob,i}$ lần lượt là các giá trị ước tính của các tham số tương ứng của phần tử bất định $\delta_{\text{total},n,rob}$ của hệ thống; $d_{1,rob,i}$, $d_{2,rob,i}$ và $d_{3,rob,i}$ là các số dương, là các giá trị thiết kế của hệ thống điều khiển; $\|\cdot\|$ là phép tính độ lớn vector; $*$ ² là phép tính toán trị số bình phương;

các cận trên của các phần tử bất định của tất cả các hướng DOF của hệ thống có thể được đặt tương ứng trong công thức (37);

4) Tính toán giá trị mô men/lực truyền động yêu cầu để truyền động cánh tay máy theo phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối không suy biến thích nghi theo sáng chế, các giá trị mô men/lực truyền động có thể được tính như sau:

$$\tau_{\text{avntsmc,rob}} = -G_{0,\text{rob}}^+ \left(\kappa_{\text{rob}} \|s_{\text{rob}}\| \left\| D_{\text{diag}} \left(\dot{\epsilon}_{\text{rob},i}^{p_{\text{rob},i}/q_{\text{rob},i}-1} \right) \right\| \hat{r}_{\text{adaptive,rob}} + f_{2,0,\text{rob}} + D_{\text{diag}}^{-1} \left(p_{\text{rob},i} / q_{\text{rob},i} \right) D_{\text{diag}}^{-1} \left(\lambda_{\text{rob},i} \right) V_{\text{vec}} \left(\dot{\epsilon}_{\text{rob},i}^{2-p_{\text{rob},i}/q_{\text{rob},i}} \right) - \ddot{x}_{1,d,\text{rob}} \right) \quad (41)$$

$$\kappa_{\text{rob}} = D_{\text{diag}} \left(\frac{\left[s_{\text{rob},i} \dot{\epsilon}_{\text{rob},i}^{p_{\text{rob},i}/q_{\text{rob},i}-1} \right]^T}{\left| s_{\text{rob},i} \dot{\epsilon}_{\text{rob},i}^{p_{\text{rob},i}/q_{\text{rob},i}-1} \right|^2} \right) \quad (42)$$

trong đó, $\tau_{\text{avntsmc,rob}} \in \mathcal{R}^{2 \times 1}$ là mô men/lực truyền động của phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi theo sáng chế; κ_{rob} là biến số trung gian tùy chỉnh; $*$ là đạo hàm bậc hai của $*$; $*$ ⁺ là nghịch đảo suy rộng của $*$; $*$ ⁻¹ là nghịch đảo của $*$; $V_{\text{vec}}(*) \in \mathcal{R}^{2 \times 1} / D_{\text{diag}}(*) \in \mathcal{R}^{2 \times 2}$ là vectơ/ma trận bao gồm các phần tử $*$; $*$ ^T là hoán vị của $*$;

bằng cách truyền động cánh tay máy sử dụng mô men/lực truyền động trong phương trình (41), sai số điều hướng của cánh tay máy may được hội tụ về không trong thời gian giới hạn.

Hiệu quả đạt được của phương pháp theo sáng chế được phân tích như sau:

Phương pháp NTSMC thông thường được thiết kế như sau:

$$\tau_{\text{ntsmc,rob}} = -G_{0,\text{rob}}^+ \left(r_{\text{rob}} \|s_{\text{rob}}\| \left\| D_{\text{diag}} \left(\dot{\epsilon}_{\text{rob},i}^{p_{\text{rob},i}/q_{\text{rob},i}-1} \right) \right\| \left(b_{1,\text{rob}} + b_{2,\text{rob}} \|x_{1,\text{rob}}\| + b_{3,\text{rob}} \|x_{2,\text{rob}}\|^2 \right) + f_{2,0,\text{rob}} + D_{\text{diag}}^{-1} \left(p_{\text{rob},i} / q_{\text{rob},i} \right) D_{\text{diag}}^{-1} \left(\lambda_{\text{rob},i} \right) V_{\text{vec}} \left(\dot{\epsilon}_{\text{rob},i}^{2-p_{\text{rob},i}/q_{\text{rob},i}} \right) - \ddot{x}_{1,d,\text{rob}} \right) \quad (43)$$

$$\Upsilon_{rob} = V_{vec} \left(\frac{\left[s_{rob,i} \dot{\tilde{e}}_{rob,i}^{p_{rob,i}/q_{rob,i}-1} \right]^T}{\left| s_{rob,i} \dot{\tilde{e}}_{rob,i}^{p_{rob,i}/q_{rob,i}-1} \right|^2} \right) \quad (44)$$

trong đó, $\tau_{ntsmc,rob} \in \mathcal{R}^{2 \times 1}$ là mô men/lực truyền động của của phương pháp NTSMC thông thường; $b_{1,rob}$, $b_{2,rob}$ và $b_{3,rob}$ là các tham số thiết kế của các giá trị ước tính các cận trên bất định của cánh tay máy; Υ_{rob} là biến số trung gian tùy chỉnh;

để giải thích tính ưu việt của phương pháp theo sáng chế, ba sơ đồ điều khiển được thiết kế, các kết quả của chúng được thể hiện trên các hình vẽ Fig.3, Fig.4 và Fig.5 tương ứng: phương pháp NTSMC "C1" dựa trên phương trình (43) với $b_{1,rob}$, $b_{2,rob}$, $b_{3,rob}$ lần lượt là các giá trị nhỏ nhất; phương pháp NTSMC "C2" dựa trên phương trình (43) với $b_{1,rob}$, $b_{2,rob}$, $b_{3,rob}$ lần lượt là các giá trị lớn nhất; phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi "C3" theo sáng chế dựa trên phương trình (41), tức là phương pháp của sáng chế.

Đối với phương pháp NTSMC thông thường "C1", các giá trị của $b_{1,rob}$, $b_{2,rob}$, $b_{3,rob}$ lần lượt là 0,8, 1,8, 0,09; đối với phương pháp NTSMC thông thường "C2", các giá trị của $b_{1,rob}$, $b_{2,rob}$, $b_{3,rob}$ lần lượt là 2,4, 5,4, 0,27; và đối với phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi "C3" theo sáng chế, các tham số thiết kế của giá trị ước tính của các cận trên bất định của các cánh tay máy lần lượt là $d_{1,rob,1} = 10$; $d_{1,rob,2} = 1,8$; $d_{2,rob,1} = 17$; $d_{2,rob,2} = 2$; $d_{3,rob,1} = 0,001$; $d_{3,rob,2} = 0,001$; $\hat{b}_{1,rob,1,0} = 1$; $\hat{b}_{1,rob,2,0} = 0,1$; $\hat{b}_{2,rob,1,0} = 1$; $\hat{b}_{2,rob,2,0} = 0,1$; $\hat{b}_{3,rob,1,0} = 0,1$, $\hat{b}_{3,rob,2,0} = 0,1$, trong đó $\hat{b}_{1,rob,1,0}$, $\hat{b}_{1,rob,2,0}$, $\hat{b}_{2,rob,1,0}$, $\hat{b}_{2,rob,2,0}$, $\hat{b}_{3,rob,1,0}$, $\hat{b}_{3,rob,2,0}$ là các giá trị ban đầu của $\hat{b}_{1,rob,1}$, $\hat{b}_{1,rob,2}$, $\hat{b}_{2,rob,1}$, $\hat{b}_{2,rob,2}$, $\hat{b}_{3,rob,1}$, $\hat{b}_{3,rob,2}$.

Để loại bỏ vấn đề dao động hệ thống $\kappa_{rob,1}$ và $\Upsilon_{rob,1}$ được xác định để thay thế tương ứng κ_{rob} và Υ_{rob} trong phương trình (41) và phương trình (43)

$$\kappa_{rob,1} = D_{diag} \left(\frac{\left[s_{rob,i} \dot{\tilde{e}}_{rob,i}^{p_{rob,i}/q_{rob,i}-1} \right]^T}{\left(\left| s_{rob,i} \dot{\tilde{e}}_{rob,i}^{p_{rob,i}/q_{rob,i}-1} \right| + \varsigma_{rob,i} \right)^2} \right) \quad (45)$$

$$\mathbf{Y}_{rob,1} = V_{\text{vec}} \left(\frac{\left[s_{rob,i} \dot{\mathbf{e}}_{rob,i}^{p_{rob,i}/q_{rob,i}-1} \right]^T}{\left(\left| s_{rob,i} \dot{\mathbf{e}}_{rob,i}^{p_{rob,i}/q_{rob,i}-1} \right| + \varsigma_{rob,i} \right)^2} \right) \quad (46)$$

trong đó, $\varsigma_{rob,i}$ là số dương nhỏ tùy chỉnh; $D_{diag}(\ast) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ là ma trận bao gồm các phần tử $(\ast)$; $\mathbf{K}_{rob,1}$ là ma trận thay thế xác định được sử dụng để thay thế $\mathbf{K}_{rob}$ trong phương trình tính toán mô men/lực truyền động, tức là phương trình (41); $\mathbf{Y}_{rob,1}$ là ma trận thay thế xác định được sử dụng để thay thế $\mathbf{Y}_{rob}$ trong phương trình tính toán mô men/lực truyền động, tức là phương trình (43).

Ngoài ra, để so sánh rõ ràng các ưu và nhược điểm của ba phương pháp điều khiển nêu trên, các tham số thiết đặt khác của phương pháp NTSMC là các trị số tương tự như phương pháp của sáng chế. Giá trị hệ số bão hòa của mô men đầu vào cánh tay máy được thiết đặt là 80 Nm; $\lambda_{rob,1} = \lambda_{rob,2} = 1$, $p_{rob,1} = p_{rob,2} = 9$, $q_{rob,1} = q_{rob,2} = 5$; $\varsigma_{rob,1} = \varsigma_{rob,2} = 0,001$.

Các quỹ đạo vị trí ban đầu và mong muốn được lần lượt thể hiện trong các phương trình sau:

$$\mathbf{x}_{1,d,rob} = [\sin(\pi t), \sin(\pi t)]^T \quad (47)$$

$$\mathbf{x}_{1,0,rob} = [0,5,0,5]^T, \dot{\mathbf{x}}_{1,0,rob} = [2,2,0]^T \quad (48)$$

trong đó, $\mathbf{x}_{1,d,rob}$ là giá trị mong muốn của vector trạng thái cánh tay máy $\mathbf{x}_{1,rob}$; $\mathbf{x}_{1,0,rob}$ là giá trị ban đầu của vector trạng thái cánh tay máy $\mathbf{x}_{1,rob}$; $\dot{\mathbf{x}}_{1,0,rob}$ là giá trị ban đầu của đạo hàm bậc nhất $\dot{\mathbf{x}}_{1,rob}$ của vector trạng thái cánh tay máy $\dot{\mathbf{x}}_{1,rob}$; $\sin \ast$ là giá trị hàm lượng giác sin của $\ast$; và π là tỷ lệ của chu vi với đường kính.

Dưới tác động của ba phương pháp điều khiển này, cánh tay máy có thể đạt được việc điều hướng trong thời gian giới hạn, tức là 1,5 giây. Tuy nhiên, bởi vì cận trên bất định được đặt nhỏ hơn độ bất định hệ thống thực tế, cánh tay máy dưới tác động của phương pháp NTSMC thông thường "C1" có thể có sai số điều hướng đáng kể. Ngoài ra, bởi vì cận trên bất định được đặt ở mức lớn, vị trí thực tế của cánh tay máy dưới tác động của phương pháp NTSMC truyền thống "C2" có thể có sự vượt quá tầm lớn. Cánh

tay máy dưới tác động của phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi "C3" theo sáng chế có thể đạt được kết quả điều hướng thỏa mãn và có thể không có sự vượt quá tầm. Do đó, khi chỉ tính đến đặc tính điều hướng quỹ đạo, phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi "C3" theo sáng chế có hiệu quả điều hướng tốt nhất, phương pháp NTSMC thông thường "C2" đứng vị trí thứ hai, và phương pháp NTSMC thông thường "C1" có hiệu quả điều hướng tệ nhất.

Từ các đặc tính trơn tru linh hoạt của lực/mô men, các mô men đầu vào của phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi "C3" theo sáng chế và phương pháp NTSMC thông thường "C1" là rất trơn tru linh hoạt, trong khi mô men đầu vào của phương pháp NTSMC thông thường "C2" có sự dao động nghiêm trọng.

Tóm lại, so với phương pháp NTSMC thông thường, phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi theo sáng chế có ưu điểm rõ ràng ở chỗ độ chính xác điều hướng quỹ đạo và độ trơn tru linh hoạt đầu vào mô men/lực có thể được đảm bảo đồng thời. Sáng chế sẽ được mô tả chi tiết hơn bên dưới dựa trên các hình vẽ kèm theo:

Trên Fig.3, "C1_eq1" như được thể hiện bằng nét liền là đường cong sai số điều hướng của khớp nối cánh tay máy 1 dưới tác động của phương pháp điều khiển trượt đầu cuối không suy biến thông thường "C1"; "C1_eq2" như được thể hiện bằng nét đứt là đường cong sai số điều hướng của đầu nối cánh tay máy 2 dưới tác động của phương pháp điều khiển trượt đầu cuối không suy biến thông thường "C1"; "C2_u1" là đường cong mô men điều khiển của phương pháp điều khiển trượt đầu cuối không suy biến thông thường "C1" tại khớp nối cánh tay máy 1; và "C2_u2" là đường cong mô men điều khiển của phương pháp điều khiển trượt đầu cuối không suy biến thông thường "C1" tại khớp nối cánh tay máy 2.

Lưu ý rằng dưới tác động của phương pháp điều khiển trượt đầu cuối không suy biến thông thường "C1", cánh tay máy có thể đạt được sự điều hướng trong thời gian giới hạn, tức là 1,5 giây. Tuy nhiên, bởi vì cận trên bất định được thiết đặt nhỏ hơn độ bất định hệ thống thực tế, cánh tay máy dưới tác động của phương pháp NTSMC thông thường "C1" có thể có sai số điều hướng đáng kể. Ngoài ra, từ các đặc tính trơn tru linh hoạt của lực/mô men, mô men đầu vào của phương pháp NTSMC thông thường "C1" là rất trơn tru linh hoạt.

Trên Fig.4, "C2_eq1" được thể hiện bằng nét liền là đường cong sai số điều hướng

của đầu nối cánh tay máy 1 dưới tác động của phương pháp điều khiển trượt đầu cuối không suy biến thông thường "C2"; "C2_eq2" được thể hiện bằng nét đứt là đường cong sai số điều hướng của đầu nối cánh tay máy 2 dưới tác động của phương pháp điều khiển trượt đầu cuối không suy biến thông thường "C2"; "C2_u1" là đường cong mô men điều khiển của phương pháp điều khiển trượt đầu cuối không suy biến thông thường "C2" tại đầu nối cánh tay máy 1; và "C2_u2" là đường cong mô men điều khiển của phương pháp điều khiển trượt đầu cuối không suy biến thông thường "C2" tại đầu nối cánh tay máy 2.

Dưới tác động của phương pháp điều khiển trượt đầu cuối không suy biến thông thường "C2", cánh tay máy có thể đạt được sự điều hướng trong thời gian giới hạn, tức là từ 0-1,5 giây. Tuy nhiên, trong quá trình cánh tay máy đạt được sự điều hướng quỹ đạo từ trạng thái ban đầu, tức là từ 0-1,5 giây, vị trí thực tế của cánh tay máy có thể vượt quá nhiều. Sau khi cánh tay máy đạt đến trạng thái ổn định, tức là sau 1,5 giây, hiệu quả điều hướng của phương pháp NTSMC thông thường "C2" được thỏa mãn. Hơn nữa, từ các đặc tính trơn tru linh hoạt của lực/mô men, mô men đầu vào của phương pháp NTSMC thông thường "C2" có sự dao động nghiêm trọng.

Trên Fig.5, "C3_eq1" được thể hiện bằng nét liền là đường cong sai số điều hướng của đầu nối cánh tay máy 1 dưới tác động của phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi "C3" theo sáng chế; "C3_eq2" được thể hiện bằng nét đứt là đường cong sai số điều hướng của đầu nối cánh tay máy 2 dưới tác động của phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi "C3" theo sáng chế; "C3_u1" là đường cong mô men điều khiển của phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi "C3" theo sáng chế tại đầu nối cánh tay máy 1; và "C3_u2" là đường cong mô men điều khiển của phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi "C3" theo sáng chế tại đầu nối cánh tay máy 2.

Lưu ý rằng dưới tác động của phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi "C3" theo sáng chế, cánh tay máy có thể đạt được các kết quả điều hướng rất thỏa đáng, và có thể không bị vượt quá. Ngoài ra, từ các đặc tính trơn tru linh hoạt của lực/mô men, mô men đầu vào của phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi "C3" theo sáng chế là rất trơn tru linh hoạt.

Sáng chế được mô tả chi tiết dựa trên các ví dụ thực hiện. Tuy nhiên, người có hiểu

biết trung bình trong cùng lĩnh vực kỹ thuật có thể thực hiện các thay đổi khác nhau dựa trên nguyên lý cơ bản và phạm vi bảo hộ của sáng chế, toàn bộ các thay đổi này đều nằm trong phạm vi bảo hộ của sáng chế.

Khả năng áp dụng công nghiệp

Sáng chế đề cập đến phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi để điều khiển điều hướng quỹ đạo của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra bất định, thiết kế cận trên bất định của hệ thống của vector và đưa ra tốc độ cập nhật thích nghi, xem xét đầy đủ sự chênh lệch giữa các đặc tính động học của các hướng bậc tự do (DOF) khác nhau, và giảm đáng kể hiện tượng dao động của điều khiển chế độ trượt, làm cho hiệu quả điều hướng của các hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra bất định ổn định và đáng tin cậy. Các hiệu quả thuận lợi được chia thành năm điểm sau đây:

① Bằng phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi, bề mặt chế độ trượt có thể thiết đặt các đặc tính hội tụ của các hướng DOF khác nhau của hệ thống tương ứng.

② Bằng phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi, bề mặt chế độ trượt n chiều và tốc độ cập nhật thích nghi n chiều được thiết kế, có tính đến các đặc tính động học khác nhau của các hướng DOF khác nhau của hệ thống, và giảm dao động gây ra bởi sự chênh lệch giữa các đặc tính động học của các hướng DOF khác nhau của hệ thống;

③ Bằng phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi, cận trên bất định của hệ thống có thể được ước tính trực tuyến linh hoạt bằng các quy tắc điều chỉnh tốc độ cập nhật thích nghi n chiều, và cường độ dao động có thể được giảm thêm;

④ Bằng phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi, có thể tránh được vấn đề suy biến, và có thể đảm bảo rằng sai số trạng thái hệ thống được hội tụ về không trong thời gian giới hạn;

⑤ Phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi đặc biệt thích hợp cho các hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra có sự chênh lệch giữa các đặc tính động học của các hướng DOF; tuy nhiên, phương pháp còn có thể được áp dụng trực tiếp cho các hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra với các đặc tính tương tự/đồng nhất của các hướng DOF khác nhau, và cũng có thể được áp dụng trực tiếp có

các hệ thống tương tự khác, có ứng dụng rộng rãi và mục đích phù hợp, tức là, sáng chế được áp dụng cho các hệ thống robot khác nhau, các hệ thống phương tiện vận chuyển, và các hệ thống ứng dụng khác có thể sử dụng các hệ thống phi tuyến/tuyến tính nhiều đầu vào-nhiều đầu ra.

YÊU CẦU BẢO HỘ

1. Phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi, trong đó phương pháp bao gồm bốn bước:

1) bước thứ nhất, thiết lập các phương trình động học của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra

trong trường hợp có tính đến các phần tử bất định, các phương trình động học của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra là như sau:

$$\dot{x}_1 = f_1 \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = f_{2,0} + G_0 u + \delta_{total,n} \quad (2)$$

trong đó, $x_1 \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ và $x_2 \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là các vector trạng thái hệ thống; $f_1 \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là phương trình trạng thái hệ thống tron tru linh hoạt; $f_{2,0} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ và $G_0 \in \mathcal{R}^{n \times n}$ là các phần tử có thể tính toán; $u \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là vector điều khiển; $*$ là đạo hàm bậc nhất của $*$, $\dot{x}_1$ là đạo hàm bậc nhất của x_1 ; $\delta_{total,n} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là phần tử bất định của hệ thống;

2) bước thứ hai, xác định bề mặt chế độ trượt s

khi tính đến sự chênh lệch giữa các đặc tính động học của các hướng bậc tự do (degree of freedom: DOF) khác nhau, các phương trình sau đây được thiết kế:

$$s = \varepsilon_1 + D_{diag}(\lambda_i) V_{vec}(\dot{\varepsilon}_{1,i}^{p_i/q_i}) \quad (3)$$

$$\varepsilon_1 = x_1 - x_{1,d} \quad (4)$$

trong đó, $s \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là bề mặt chế độ trượt; ε_1 là vector điều hướng trạng thái của hệ thống; x_1 là trạng thái hệ thống thực tế; $x_{1,d}$ là trạng thái hệ thống mong muốn; $*_i$ là phần tử thứ i của $*$; $V_{vec}(\dot{\varepsilon}_{1,i}^{p_i/q_i}) \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ / $D_{diag}(\lambda_i) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ là vectơ/ma trận bao gồm các phần tử $*$; $V_{vec}(\dot{\varepsilon}_{1,i}^{p_i/q_i})$ là vectơ bao gồm các phần tử $\dot{\varepsilon}_{1,i}^{p_i/q_i}$; $D_{diag}(\lambda_i)$ là ma trận bao gồm các phần tử λ_i ; p_i, q_i, λ_i ($i = 1 \dots n$) là các số dương và thỏa mãn $1 < p_i/q_i < 2$ là các giá trị thiết kế của hệ thống điều khiển;

3) bước thứ ba, đưa ra tốc độ cập nhật thích nghi n chiều $\hat{\Gamma}_{adaptive,n}$

các quy tắc cập nhật của tốc độ cập nhật thích nghi n chiều $\hat{\Gamma}_{adaptive,n}$ là như sau:

$$\hat{f}_{adaptive,n,i} = \hat{b}_{1,n,i} + \hat{b}_{2,n,i} \|x_1\| + \hat{b}_{3,n,i} \|x_2\|^2 \quad (5)$$

$$\hat{b}_{1,n,i} = d_{1,n,i} \frac{p_i}{q_i} \lambda_i \|s\| \|D_{diag}(\dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1})\| \left\| \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right\| \quad (6)$$

$$\hat{b}_{2,n,i} = d_{2,n,i} \frac{p_i}{q_i} \lambda_i \|s\| \|D_{diag}(\dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1})\| \left\| \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right\| \|x_1\| \quad (7)$$

$$\hat{b}_{3,n,i} = d_{3,n,i} \frac{p_i}{q_i} \lambda_i \|s\| \|D_{diag}(\dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1})\| \left\| \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right\| \|x_2\|^2 \quad (8)$$

trong đó, $\hat{f}_{adaptive,n} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là giá trị ước tính của cận trên bất định của hệ thống, là vector thay đổi theo thời gian, và còn được gọi là tốc độ cập nhật thích nghi n chiều $\hat{f}_{adaptive,n}$; $\hat{b}_{1,n,i}$, $\hat{b}_{2,n,i}$ và $\hat{b}_{3,n,i}$ tương ứng là các giá trị ước tính của các tham số tương ứng của phần tử bất định $\delta_{total,n}$ của hệ thống; $d_{1,n,i}$, $d_{2,n,i}$ và $d_{3,n,i}$ là các số dương là các giá trị thiết kế của hệ thống điều khiển; $\|*\|$ là phép tính độ lớn vector; $*^2$ là phép tính trị số bình phương; và $\frac{\partial f_1}{\partial x_2}$ là đạo hàm riêng phần của f_1 đối với x_2 ;

các cận trên của các phần tử bất định của tất cả các hướng DOF của hệ thống có thể được đặt tương ứng trong phương trình (5);

4) bước cuối cùng, tính toán giá trị mô men/lực truyền động yêu cầu để dẫn động hệ thống phi tuyến

các phương trình để tính toán mô men/lực truyền động là như sau:

$$\mathbf{u}_{avntsmc,n} = - \left(\frac{\partial f_1}{\partial \mathbf{x}_2} \mathbf{G}_0 \right)^+ \left(\kappa \|s\| \|D_{diag}(\dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1})\| \left\| \frac{\partial f_1}{\partial \mathbf{x}_2} \right\| \hat{f}_{adaptive,n} + \frac{\partial f_1}{\partial \mathbf{x}_1} f_1 + \frac{\partial f_1}{\partial \mathbf{x}_2} f_{2,0} \right. \\ \left. + D_{diag}^{-1}(p_i/q_i) D_{diag}^{-1}(\lambda_i) V_{vec}(\dot{\epsilon}_{1,i}^{2-p_i/q_i}) - \ddot{\mathbf{x}}_{1,d} \right) \quad (9)$$

$$\kappa = D_{diag} \left(\frac{\begin{bmatrix} s_i \dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \end{bmatrix}^T}{|s_i \dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1}|^2} \right) \quad (10)$$

trong đó, $\mathbf{u}_{avntsmc,n} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là mô men/lực truyền động của phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi; κ là biến số trung gian tùy chỉnh; $\frac{\partial f_1}{\partial \mathbf{x}_1}$ là đạo hàm riêng phần của f_1 đối với $\mathbf{x}_1$; $*$ là đạo hàm bậc hai của $*$; $*^+$ là nghịch đảo suy rộng của $*$; $*^{-1}$ là nghịch đảo của $*$; $V_{vec}(\cdot) \in \mathcal{R}^{n \times 1} / D_{diag}(\cdot) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ là vectơ/ma trận bao gồm các phần tử $*$; và $*^T$ là hoán vị của $*$;

bằng cách truyền động hệ thống phi tuyến sử dụng mô men/lực truyền động $u_{avntsmc,n}$, sai số điều hướng của hệ thống có thể được hội tụ về không trong thời gian giới hạn.

2. Phương pháp theo điểm 1, trong đó quy trình thiết lập cụ thể của phương trình động học của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra được thể hiện như sau:

1) các phương trình động học và động hình học của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra được thể hiện như sau:

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2) \quad (11)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + G(x_1, x_2)u \quad (12)$$

trong đó, $x_1 \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ và $x_2 \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là các vector trạng thái hệ thống; $u \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là vector điều khiển; $f_1(x_1, x_2) \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ và $f_2(x_1, x_2) \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là các phương trình trạng thái hệ thống tron tru linh hoạt; và $G(x_1, x_2) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ là ma trận đầu vào không suy biến;

2) khi tính đến các phân tử bất định như các động lực bất định, các dao động tham số và giao thoa bên ngoài, phương trình động học (12) của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra có thể biểu diễn như sau:

$$\dot{x}_2 = f_{2,0} + \Delta_{f2} + (G_0 + \Delta_g)u \quad (13)$$

trong đó, $f_{2,0}$ và G_0 là các phân tử có thể tính toán; Δ_{f2} và Δ_g là các phân tử bất định;

3) khi tiếp tục tính đến ảnh hưởng của lỗi của cơ cấu chấp hành, phương trình động học (13) của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra có thể được biểu diễn như sau:

$$\dot{x}_2 = f_{2,0} + \Delta_{f2} + (G_0 + \Delta_g)\delta_a(u + \delta_f) \quad (14)$$

trong đó, $\delta_a \in \mathcal{R}^{n \times n}$ là lỗi nhân bội của cơ cấu chấp hành hệ thống; $\delta_f \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ là lỗi cộng thêm của cơ cấu chấp hành hệ thống;

4) khi tính đến các phân tử bất định như các động lực bất định, các dao động tham số, giao thoa bên ngoài, lỗi thao tác, phương trình động học của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra có thể được viết lại như sau:

$$\dot{x}_1 = f_1 \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = f_{2,0} + G_0 u + \delta_{total,n} \quad (2)$$

$$\delta_{total,n} = \Delta_{f2} + (G_0 + \Delta_g) \delta_a(u + \delta_f) - G_0 u \quad (15)$$

trong đó, f_1 là dạng rút gọn của $f_1(x_1, x_2)$; $\delta_{total,n}$ là phần tử bất định của hệ thống.

3. Phương pháp theo điểm 1, trong đó phương pháp này có tính đến sự chênh lệch giữa các đặc tính động học của các hướng DOF khác nhau, giả sử rằng cận trên của phần tử bất định $\delta_{total,n}$ của hệ thống thỏa mãn bất phương trình (16):

$$\left\| \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right\| (b_{1,n,i} + b_{2,n,i} \|x_1\| + b_{3,n,i} \|x_2\|^2) > \left| \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2} \delta_{total,n} \right)_i \right| \quad (16)$$

trong đó, $b_{1,n,i}$, $b_{2,n,i}$ và $b_{3,n,i}$ là các số dương nhỏ nhất thỏa mãn bất phương trình (16); $|*|$ là phép tính các giá trị tuyệt đối; $\|*\|$ là phép tính độ lớn vector; 2 là phép tính trị số bình phương; và $\frac{\partial f_1}{\partial x_2}$ là đạo hàm riêng phần của f_1 đối với x_2 ;

các cận trên của các phần tử bất định của tất cả các hướng DOF của hệ thống có thể được đặt tương ứng trong bất phương trình (16).

4. Phương pháp theo điểm 1, trong đó trong phương pháp thiết kế bề mặt chế độ trượt xác định s , bằng cách thiết đặt các phần tử p_i , q_i , λ_i khác nhau cho các hướng DOF khác nhau của hệ thống, các đặc tính hội tụ của các hướng DOF khác nhau của hệ thống có thể được thiết đặt tương ứng, các đặc tính hội tụ bao gồm tốc độ hội tụ và thời gian hội tụ.

5. Phương pháp theo điểm 1, trong đó bằng cách thiết lập các phương trình động học và động hình học của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra, các giá trị thời gian hội tụ của các hướng DOF khác nhau được tính toán, và trị số cực đại của giá trị thời gian hội tụ của mỗi hướng DOF được chọn, do đó, có thể thu được thời gian hội tụ giới hạn t_f của hệ thống, và sai số điều hướng của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra có thể hội tụ về không trong thời gian hội tụ giới hạn t_f .

6. Phương pháp theo điểm 5, trong đó phương pháp tính toán của thời gian hội tụ giới hạn t_f là như sau:

nếu $s_i \neq 0$, phương trình sau được xác định:

$$\min \left(\frac{p_i}{q_i} \lambda_i \left\| \mathbf{D}_{\text{diag}} \left(\dot{\varepsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right) \left\| \left(\left\| \frac{\partial f_1}{\partial \mathbf{x}_2} \right\| \left(b_{1,n,i} + b_{2,n,i} \|\mathbf{x}_1\| + b_{3,n,i} \|\mathbf{x}_2\|^2 \right) - \left(\frac{\partial f_1}{\partial \mathbf{x}_2} \delta_{\text{total},n} \right)_i \right) \right\| \right) = \eta_{2,i} > 0 \quad (17)$$

trong đó, $\eta_{2,i}$ là số dương; $\min *$ là trị số nhỏ nhất của $*$;

dưới tác động của phương pháp điều khiển chế độ trượt đầu cuối thích nghi, thời gian hội tụ giới hạn của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra là:

$$t_f = \max(t_{f,i}) = \max(t_{r,i} + t_{s,i}) \quad (18)$$

$$t_{s,i} = \lambda_i^{q_i/p_i} \left(\frac{p_i}{p_i - q_i} \right) \left| \varepsilon_{1,i}^{1-q_i/p_i}(t_{r,i}) \right| \quad (19)$$

$$t_{r,i} \leq -\frac{|s_i(0)|}{\eta_{2,i}} \quad (20)$$

trong đó, $\max *$ là trị số cực đại của $*$; t_f là thời gian hội tụ giới hạn của hệ thống phi tuyến; $t_{f,i}$ là thời gian hội tụ giới hạn của giá trị phần tử thứ i của hệ thống phi tuyến; $t_{r,i}$ là khoảng thời gian cho hệ thống đi đến tại bề mặt chế độ trượt từ thời điểm ban đầu, $s_i = 0$; $t_{s,i}$ là khoảng thời điểm từ $s_i = 0$ đến $\varepsilon_{1,i} = 0$; $s_i(0)$ là giá trị phần tử thứ i của bề mặt chế độ trượt s tại thời điểm ban đầu; $\varepsilon_{1,i}^{1-q_i/p_i}(t_{r,i})$ là giá trị của $\varepsilon_{1,i}^{1-q_i/p_i}$ tại thời điểm $t_{r,i}$; và $\eta_{2,i}$ là số dương thỏa mãn phương trình (17).

7. Phương pháp theo điểm 1, trong đó phương pháp này sử dụng tốc độ cập nhật thích nghi n chiều $\hat{\Gamma}_{\text{adaptive},n}$, bằng cách thiết đặt các quy tắc cập nhật của các hướng DOF khác nhau, dao động gây ra bởi sự chênh lệch giữa các đặc tính động học của các hướng DOF khác nhau của hệ thống phi tuyến có thể giảm xuống; cận trên bất định của hệ thống có thể được ước tính trực tuyến linh hoạt bằng các quy tắc điều chỉnh tốc độ cập nhật thích nghi n chiều, và cường độ dao động có thể được giảm thêm.

8. Phương pháp theo điểm 1, trong đó để tiếp tục loại bỏ hiện tượng dao động của hệ thống, hệ số κ trong phương trình (9) để tính mô men/lực truyền động thường được sửa đổi, các phương pháp sửa đổi sẵn có bao gồm:

phương pháp sửa đổi 1: κ_1 được xác định như sau:

$$\kappa_1 = D_{\text{diag}} \left(\frac{\left[s_i \dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right]^T}{\left(\left| s_i \dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right| + \varsigma_{1,i} \right)^2} \right) \quad (21)$$

trong đó, $\varsigma_{1,i}$ là số dương nhỏ tùy chỉnh; $D_{\text{diag}}(*) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ là ma trận bao gồm các phần tử *; κ_1 là ma trận thay thế xác định, được sử dụng để thay thế κ trong phương trình tính toán mô men/lực truyền động (9);

phương pháp sửa đổi 2: κ_2 được xác định như sau:

$$\kappa_2 = \begin{cases} D_{\text{diag}} \left(\frac{\left[s_i \dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right]^T}{\left| s_i \dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right|^2} \right) & \left| s_i \dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right| \geq \varsigma_{2,i} \\ D_{\text{diag}} \left(\frac{\left[s_i \dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right]^T}{(\varsigma_{2,i})^2} \right) & \left| s_i \dot{\epsilon}_{1,i}^{p_i/q_i-1} \right| < \varsigma_{2,i} \end{cases} \quad (22)$$

trong đó, $\varsigma_{2,i}$ là số dương nhỏ tùy chỉnh; $D_{\text{diag}}(*) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ là ma trận bao gồm các phần tử *; κ_2 là ma trận thay thế xác định được sử dụng để thay thế κ trong phương trình tính toán mô men/lực truyền động (9).

Thiết lập các phương trình động học của hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào-nhiều đầu ra

Xác định bề mặt chế độ trượt s

Đưa vào tốc độ cập nhật thích nghi n chiều

Tính toán giá trị mô men/lực truyền động đòi hỏi để dẫn động hệ thống phi tuyến

Fig.1

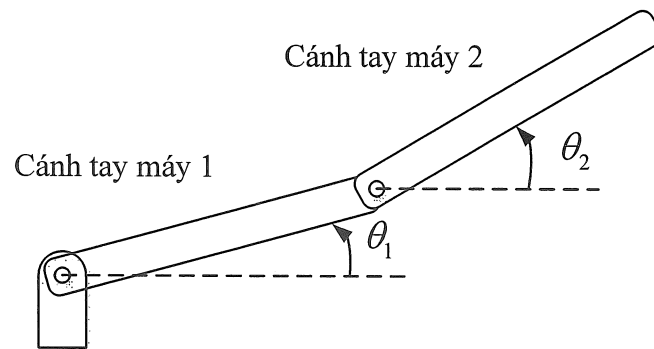


Fig.2

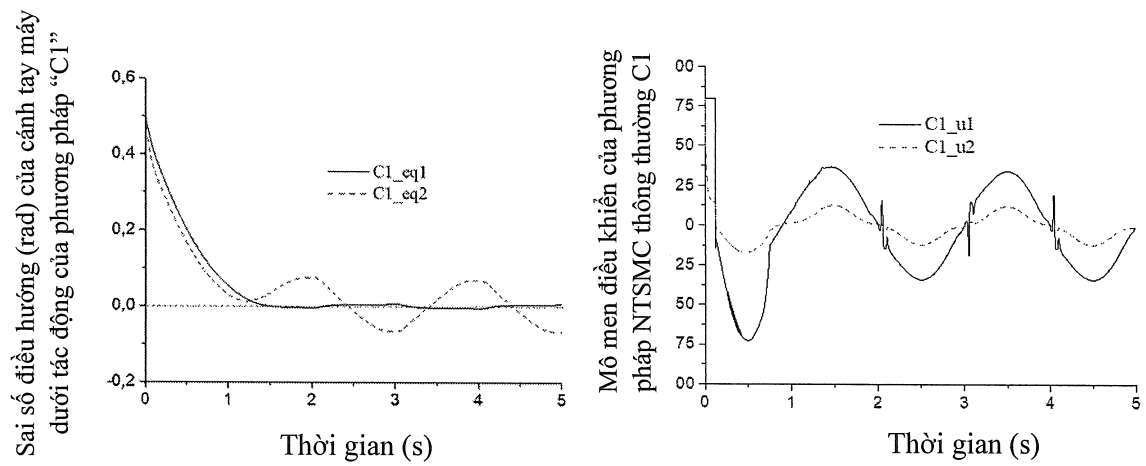


Fig.3

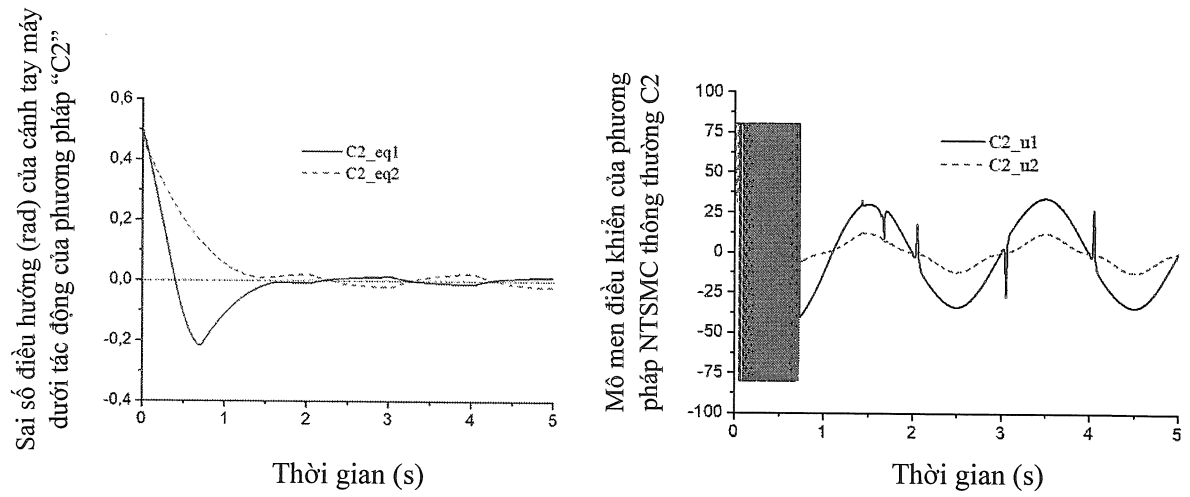


Fig.4

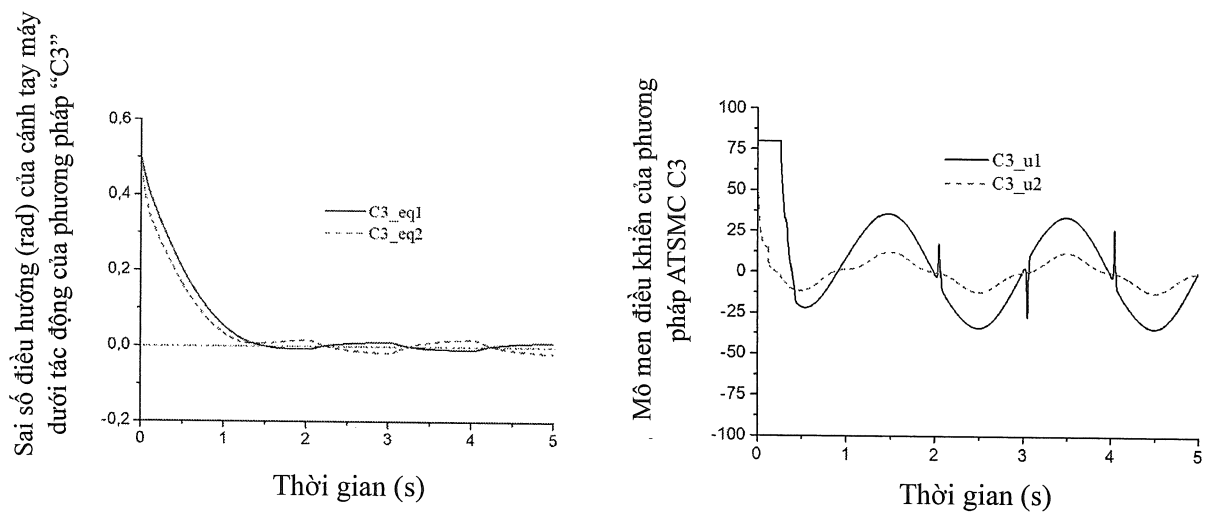


Fig.5