

# PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN BỀN VỮNG CHO HỆ ROBOT CAMERA BẮM MỤC TIÊU DI ĐỘNG

PHẠM THUƠNG CÁT<sup>1</sup>, NGUYỄN TUẤN MINH<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Viện Công nghệ thông tin, Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam

<sup>2</sup>Học viện Kỹ thuật Quân sự, Bộ Quốc phòng

**Abstract.** In this paper, we propose a new method using neural network to control a robot-camera visual tracking system with dynamic and Jacobian uncertainties. The task is to control the camera in hand robot to track a moving target so that the image feature of the target image equal to desired one. The main results of this article are the new control algorithm calculating the necessary joint torques and prove of the asymptotical stability of overall tracking system by using Lyapunov stability method. Ideas in this report is the use of on-line learning neural network (NN) to approximate the uncertain components and find control scheme to ensure mismatch of image features vanishing to 0.

**Tóm tắt.** Báo cáo đề xuất một phương pháp ứng dụng mạng nơron trong điều khiển hệ thống rôbot camera có nhiều tham số bất định bám theo mục tiêu di động. Nguyên lý hoạt động dựa trên cơ sở sai lệch đặc trưng ảnh. Kết quả chính của bài báo là tìm được cấu trúc của hệ điều khiển, tính được các mômen khớp cần thiết và chứng minh được tính ổn định tiệm cận toàn cục của hệ rôbot camera bám mục tiêu bằng phương pháp ổn định Lyapunov.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Điều khiển với phản hồi hình ảnh (visual servoing) là vấn đề thời sự trong lĩnh vực rôbot vì nó đi sâu vào khám phá các nguyên lý nhận dạng và điều khiển hành vi qua thị giác của con người và động vật [1]. Các thông tin từ ảnh nhận được qua camera được sử dụng để tạo ra tín hiệu điều khiển rôbot chuyển động bám theo quỹ đạo mong muốn hoặc điều khiển rôbot cầm camera bám theo mục tiêu di động. Xử lý ảnh cho điều khiển thời gian thực có nhiều thách thức [2] đòi hỏi khả năng tính toán cao. Có nhiều phương pháp điều khiển đã được nghiên cứu phát triển trong những năm qua có thể phân vào 2 nhóm chính. Một là các phương pháp điều khiển dựa trên hệ phương trình động học của hệ Rôbot – Camera. Nguyên lý hoạt động của nhóm này là tìm được tốc độ cần thiết của các khớp rôbot bảo đảm cho sai lệch bám triệt tiêu về 0 [8, 9]. Do vậy điều kiện cần thiết là các khớp rôbot có thể điều khiển được theo các tốc độ tùy ý. Nhóm 2 dựa trên hệ phương trình động lực để tính ra mômen cần thiết cho các khớp rôbot [2, 10]. Các phương pháp điều khiển bám dựa trên hệ động lực rôbot thường cho kết quả ổn định hơn. Ta hãy điểm qua một số kết quả mới công bố liên quan trong thời gian gần đây. Loreto [4] đề xuất phương pháp sử dụng mạng nơron để xấp xỉ các thành phần bất định của ma sát và mômen gia tốc trọng trường trong

bài toán camera bám mục tiêu. Tuy nhiên sai số bám mới được giới hạn chứ chưa triệt tiêu về 0. Trong [5] các tác giả khảo sát bài toán bám trọng tâm ảnh mục tiêu và đề xuất 2 vòng điều khiển cascade. Vòng trong là vòng điều khiển khớp rôbốt và vòng ngoài là vòng điều khiển phản hồi hình ảnh trực tiếp được tách riêng ra theo hai trục  $x$  và  $y$  của ảnh. Phương pháp này bảo đảm sai số bám triệt tiêu về 0 tuy nhiên lại đòi hỏi phải biết chính xác mô hình của rôbốt. C. S. Kim và đồng nghiệp [3] khảo sát bài toán camera bám mục tiêu với giả thiết có nhiều yếu tố bất định trong cả mô hình động lực lẫn ma trận Jacobi. Các tác giả đề xuất phương pháp bù các phần bất định động lực và Jacobi riêng rẽ bằng 2 tín hiệu độc lập. Tính ổn định của hệ thống được chứng minh bằng phương pháp ổn định Lyapunov tuy nhiên vẫn chưa triệt tiêu được sai lệch bám. [6] đề xuất phương pháp nhận dạng ma trận Jacobi tổng hợp on-line bằng phương pháp lọc phi tuyến (particle filtering) và sau đó dùng phương pháp điều chỉnh tốc độ khớp cho bài toán bám.

Báo cáo này trình bày một phương pháp mới điều khiển hệ rôbốt camera bám mục tiêu di động với giả thiết có nhiều đại lượng bất định trong hệ động lực và ma trận Jacobi của hệ. Ý tưởng chính trong báo cáo này là sử dụng mạng nơron được học on-line để xấp xỉ các thành phần bất định và tìm được thuật điều khiển bảo đảm sai lệch đặc trưng ảnh tiến đến 0. Tính ổn định tiệm cận toàn cục của hệ thống được chứng minh bằng nguyên lý ổn định Lyapunov. Bao gồm 4 phần. Phần mở đầu nêu mục tiêu của bài báo và đi qua các kết quả liên quan được công bố trên thế giới thời gian qua. Phần 2 xây dựng mô hình toán học của hệ thống Rôbốt-Camera bám mục tiêu với nhiều tham số bất định. Phần 3 giới thiệu phương pháp đề xuất và chứng minh tính ổn định tiệm cận toàn cục của hệ thống. Phần kết luận và định hướng nghiên cứu phát triển tiếp của phương pháp đề xuất.

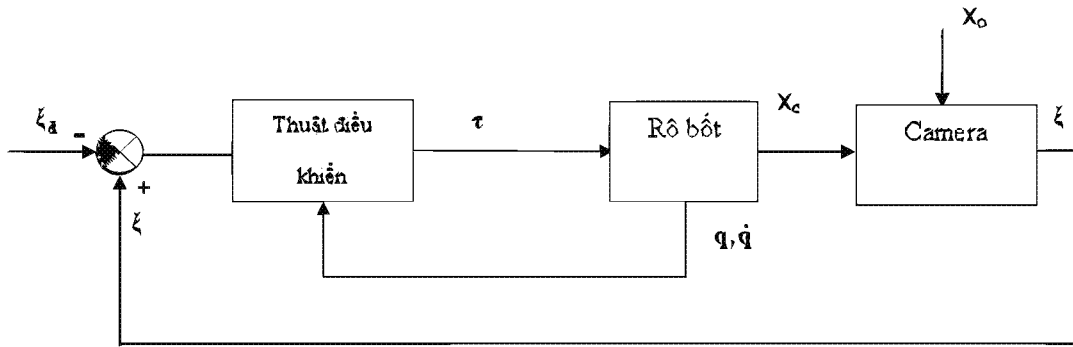
## 2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG ROBOT-CAMERA BẮM MỤC TIÊU DI ĐỘNG

Ta khảo sát hệ thống điều khiển Robot có camera được gắn ở đầu tay nắm Rôbốt (Hình 1). Với cấu trúc camera-in-hand, ảnh mục tiêu mà camera thu nhận được phụ thuộc vào chuyển động của Rôbốt. Từ ảnh của mục tiêu thu được ta tính các đặc trưng ảnh cần thiết sau đó so sánh với các đặc trưng ảnh mong muốn  $\xi_d$ . Sai lệch của đặc trưng ảnh  $e$  được sử dụng để tính ra tín hiệu điều khiển các khớp rôbốt để sai lệch này bằng 0. Hệ thống điều khiển dạng này được gọi là hệ điều khiển dựa trên đặc trưng ảnh.

Một bước cần thiết đối với bất kỳ một thuật toán điều khiển áp dụng *visual servoing* đặc biệt các hệ thống sử dụng image-based là xác định đặc trưng ảnh và quan hệ của nó đối với mô hình. Đặc trưng ảnh có thể hiểu là bất kỳ một đặc điểm nào về cấu trúc có thể trích lọc ra từ ảnh bao gồm cả các tính chất chủ yếu về đặc tính phổ, đặc tính hình học của mục tiêu. Với các giá trị thực xuất hiện trong quá trình đo đạc các đặc trưng ảnh được trích lọc ra từ một hoặc nhiều ảnh liên tiếp cho phép ta xây dựng không gian tham số đặc trưng ảnh. Đối với các vật thể rắn có cấu trúc hình học cố định (đó cũng là mục tiêu chủ yếu sử dụng trong kỹ thuật điều khiển Rôbốt) các thông số đặc trưng ảnh thường là tọa độ của các điểm

đặc trưng trên mặt phẳng ảnh  $[u, v]$ , khoảng cách giữa các điểm và tham số của các đoạn thẳng trên ảnh  $[\alpha, \beta]$ , trọng tâm và diện tích  $(S)$ , ... Tập hợp các đặc trưng ảnh tạo thành véc tơ đặc trưng ảnh ký hiệu  $\xi = [u_1, v_1, \alpha_1, \beta_1, \dots, S_1, S_2]^T$ .

Các biến  $\mathbf{x}_c$  và  $\mathbf{x}_o$  mô tả vị trí và hướng của camera và của mục tiêu trong không gian Đècac được gắn ở bộ rôtôt. Ta có  $\mathbf{x}_c = [x, y, z, \phi_x, \phi_y, \phi_z]^T$  trong đó  $(x, y, z)$  là vị trí và  $(\phi_x, \phi_y, \phi_z)$  là 3 góc quay theo 3 trục của camera nhìn trong khung tọa độ Đècac. Tương tự ta cũng có thể mô tả vị trí và hướng của mục tiêu  $\mathbf{x}_o$  bằng véc tơ  $(6 \times 1)$ . Các véc tơ  $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}$  và  $\xi$  là các véc tơ góc, vận tốc góc của các khớp của tay máy và véc tơ đặc trưng ảnh thu được qua camera. Véc tơ mômen điều khiển  $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T$  được xác định trên cơ sở sai lệch  $\mathbf{e} = \xi - \xi_d$  của đặc trưng ảnh đo được  $\xi$  từ camera và đặc trưng ảnh mong muốn  $\xi_d$ , các tín hiệu phản hồi  $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}$  nhằm mục đích đưa camera về vị trí mà tại đó các đặc trưng ảnh thu nhận được về mục tiêu tương đương với các đặc trưng ảnh mong muốn. Hình. mô tả Hệ rôtôt-camera bám mục tiêu di động.



Hình 1. Hệ rôtôt-camera bám mục tiêu di động

Ta xây dựng hệ phương trình động học vị trí của rôtôt mô tả quan hệ giữa  $\mathbf{x}_c$  và  $\mathbf{q}$  như sau:

$$\mathbf{x}_c = \mathbf{p}(\mathbf{q}) \tag{1}$$

Đạo hàm theo thời gian  $t$  ta có quan hệ tốc độ

$$\dot{\mathbf{x}}_c = \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{q}} \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} = \mathbf{J}_r \dot{\mathbf{q}} \tag{2}$$

Trong đó  $\dot{\mathbf{x}}_c$  là tốc độ dài và tốc độ góc của camera nhìn trong khung tọa độ Đècac và  $\mathbf{J}_r$  là ma trận Jacobi của rôtôt. Hệ phương trình động lực của rôtôt  $n$  bậc tự do được mô tả bằng hệ phương trình vi phân sau:

$$\tau = \mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \tag{3}$$

trong đó  $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$  là véc tơ góc của các khớp rôtôt,  $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T$  là véc tơ mômen các khớp,  $\mathbf{H}(\mathbf{q})$  là ma trận quán tính  $[n \times n]$  đối xứng xác định dương và véc tơ  $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  là véc tơ tổng hợp các mômen Coriolis, lực ly tâm, trọng lực và ma sát phụ thuộc phi tuyến vào góc  $\mathbf{q}$ , vận tốc góc  $\dot{\mathbf{q}}$ . Khi camera gắn trên tay robot hướng về mục tiêu và thu nhận

được ảnh của mục tiêu nếu các khớp của robot chuyển động sẽ làm cho vị trí của vật trên ảnh cũng bị thay đổi theo. Như vậy véc tơ đặc trưng ảnh  $\xi$  phụ thuộc vào vị trí và hướng của camera, trong khi vị trí và hướng của camera lại phụ thuộc vào góc quay của các khớp rôbốt  $\mathbf{q}$ . Các đặc trưng ảnh được định nghĩa trong không gian ảnh 2 chiều (2D). Giả sử ta có  $m$  đặc trưng ảnh thì véc tơ đặc trưng ảnh  $\xi$  sẽ có  $2m$  phần tử. Ta hãy khảo sát mối quan hệ giữa các đại lượng này. Gọi  $\partial\xi$  là sự thay đổi vi phân của đặc trưng ảnh khi vị trí và hướng của camera thực hiện một dịch chuyển vi phân  $\partial\mathbf{x}_c$  ta có :

$$\partial\xi = \mathbf{J}_f \partial\mathbf{x}_c \quad (4)$$

trong đó ma trận  $\mathbf{J}_f$  được Weiss đưa ra [1] gọi là ma trận Jacobi của đặc trưng ảnh. Từ (2) ta có thể tính được  $\partial\mathbf{x}_c = \mathbf{J}_r \partial\mathbf{q}$ , và thay vào (4) ta nhận được sự biến thiên của đặc trưng ảnh  $\partial\xi$  theo các biến trong của robot  $\partial\mathbf{q}$  như sau:

$$\partial\xi = \mathbf{J}_f \mathbf{J}_r \partial\mathbf{q} \quad (5)$$

Hay viết (4) dưới dạng quan hệ tốc độ ta có :

$$\dot{\xi} = \mathbf{J}_f \mathbf{J}_r \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}} \quad (6)$$

trong đó  $\mathbf{J}(\xi, \mathbf{q}) = \mathbf{J}_f \mathbf{J}_r$  là ma trận Jacobi tổng hợp chỉ mối quan hệ giữa tốc độ biến của đặc trưng ảnh  $\dot{\xi}$  với tốc độ các khớp  $\dot{\mathbf{q}}$ .

Trong bài toán điều khiển camera bám mục tiêu (visual servoing) ma trận  $\mathbf{J}(\xi, \mathbf{q})$  có thể được xác định bằng nhiều phương pháp khác nhau [1, 2]. Ta khảo sát bài toán điều khiển camera bám mục tiêu trong vùng hoạt động mà ma trận  $\mathbf{J}(\xi, \mathbf{q})$  không bị suy biến (đủ hạng). Trong trường hợp mục tiêu không chuyển động đặc trưng ảnh của mục tiêu chỉ còn phụ thuộc vào các biến  $\mathbf{q}$  của robot.

$$\xi = \varphi(\mathbf{q}) \quad (7)$$

Trong thực tế ta khó có thể xác định được chính xác mô hình rôbốt. Hệ phương trình động lực (3) và ma trận Jacobi tổng hợp  $\mathbf{J}(\xi, \mathbf{q})$  của rôbốt  $n$  bậc tự do có tính phi tuyến cao, có các tác động xuyên chéo giữa các khớp và nhiều hàm lượng giác. Một thách thức lớn của việc xác định các hệ phương trình này là nhiều tham số động lực của rôbốt không xác định được chính xác như hệ số ma sát, mômen quán tính, trọng tâm của các khớp và các đặc tính phi tuyến của các khâu truyền động vv.. Với nhiều tham số bất định này các phương pháp điều khiển camera bám mục tiêu di động cổ điển [1] thường không mang lại kết quả mong muốn. Vì vậy điều khiển camera bám mục tiêu di động có nhiều tham số bất định là vấn đề thực tiễn. Giả thiết các đại lượng bất định của rôbốt được mô tả như sau:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(\mathbf{q}) &= \hat{\mathbf{H}}(\mathbf{q}) + \Delta\mathbf{H}(\mathbf{q}) \\ \mathbf{h}(\mathbf{q}) &= \hat{\mathbf{h}}(\mathbf{q}) + \Delta\mathbf{h}(\mathbf{q}) \\ \mathbf{J}(\xi, \mathbf{q}) &= \hat{\mathbf{J}}(\xi, \mathbf{q}) + \Delta\mathbf{J}(\xi, \mathbf{q}) \end{aligned} \quad (8)$$

trong đó  $\hat{\mathbf{H}}(\mathbf{q})$ ,  $\hat{\mathbf{h}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ ,  $\hat{\mathbf{J}}(\xi, \mathbf{q})$  là các phần biết,  $\Delta\mathbf{H}(\mathbf{q})$ ,  $\Delta\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ ,  $\Delta\mathbf{J}(\xi, \mathbf{q})$  là các phần không biết. Thay thế (8) vào (3) và (6) ta có :

$$\tau = \mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{h}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \Delta\mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \Delta\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (9)$$

$$\dot{\xi} = \hat{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}} + \Delta\mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} \quad (10)$$

Từ (10) rút ra:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \hat{\mathbf{H}}^{-1}(\mathbf{q})\tau - \hat{\mathbf{H}}^{-1}\hat{\mathbf{h}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \hat{\mathbf{H}}^{-1}[\Delta\mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \Delta\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})] \quad (11)$$

Định nghĩa biến véc tơ  $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^n$  mô tả sai lệch đặc trưng ảnh

$$\mathbf{z} = \mathbf{G}e = \mathbf{G}(\xi - \xi_d) \quad (12)$$

trong đó  $\mathbf{G}$  là ma trận hằng số  $[n \times 2m]$  phần tử có hạng bằng  $n$ . Như vậy nếu  $\mathbf{z} \rightarrow \mathbf{0}$  thì ta có  $e \rightarrow \mathbf{0}$ . Lấy đạo hàm bậc một và hai của  $\mathbf{z}$  theo thời gian  $t$  ta được:

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{G}(\dot{\xi} - \dot{\xi}_d) = \mathbf{G}\dot{\xi} = \mathbf{G}\hat{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}\Delta\mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} \quad (13)$$

$$\ddot{\mathbf{z}} = \mathbf{G}\ddot{\xi} = \mathbf{G}\hat{\mathbf{J}}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}\dot{\hat{\mathbf{J}}}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}\Delta\dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}\Delta\mathbf{J}\ddot{\mathbf{q}} \quad (14)$$

Thay (11) vào (14) và sau khi rút gọn ta có

$$\tau = \hat{\mathbf{H}}(\mathbf{G}\hat{\mathbf{J}})^{-1}\ddot{\mathbf{z}} - \hat{\mathbf{H}}(\mathbf{G}\hat{\mathbf{J}})^{-1}\mathbf{G}\dot{\hat{\mathbf{J}}}\dot{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{h}} + \mathbf{f}_1 \quad (15)$$

Trong đó thành phần không biết  $\mathbf{f}_1$  có dạng

$$\mathbf{f}_1 = (\Delta\mathbf{H} + \mathbf{G}\Delta\mathbf{J})\ddot{\mathbf{q}} - \hat{\mathbf{H}}(\mathbf{G}\hat{\mathbf{J}})^{-1}\mathbf{G}\Delta\dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}} + \Delta\mathbf{h} \quad (16)$$

Đặt

$$\Psi = \hat{\mathbf{H}}(\mathbf{G}\hat{\mathbf{J}})^{-1} \quad (17)$$

$$\gamma = -\hat{\mathbf{H}}(\mathbf{G}\hat{\mathbf{J}})^{-1}\mathbf{G}\dot{\hat{\mathbf{J}}}\dot{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{h}} \quad (18)$$

Thay (18), (17) vào (16) ta có

$$\tau = \Psi\ddot{\mathbf{z}} + \gamma + \mathbf{f}_1 \quad (19)$$

Bài toán điều khiển camera bám mục tiêu di động có thể rút gọn lại là tìm mômen khớp  $\tau$  của hệ (19) điều khiển rôbot sao cho  $\mathbf{z}$  của (13) tiến về  $\mathbf{0}$  tức là sai lệch đặc trưng ảnh bằng  $\mathbf{0}$ .

### 3. THIẾT KẾ HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN CAMERA BÁM MỤC TIÊU DI ĐỘNG SỬ DỤNG MẠNG NƠN

Phương pháp đề xuất của báo cáo này được phát triển tiếp từ các kết quả điều khiển chuyển động rôbot có nhiều tham số bất định trong không gian Đècac [7, 8]. Bài toán điều

khiến hệ rôbot camera bám mục tiêu di động sử dụng thông tin hình ảnh có độ phức tạp hơn nhiều so với bài toán bám quỹ đạo thông thường. Lúc này ngoài hệ phương trình động lực của rôbot còn có ma trận Jacobi ảnh của rôbot. Ta chọn mômen  $\tau$  điều khiển các khớp rôbot như sau:

$$\tau = \tau_0 + \tau_1 \quad (20)$$

$$\tau_0 = \Psi(-\mathbf{K}_D \dot{\mathbf{z}} - \mathbf{K}_P \mathbf{z}) + \gamma \quad (21)$$

trong đó  $\tau_1$  là tín hiệu điều khiển bù các thành phần bất định sẽ được xác định sau.

Thay thế (20),(21) vào (19) ta có hệ động lực sai số bám như sau

$$\ddot{\mathbf{z}} - \mathbf{K}_D \dot{\mathbf{z}} - \mathbf{K}_P \mathbf{z} = \Psi^{-1}(\tau_1 - \mathbf{f}_1) \quad (22)$$

Nếu các thành phần bất định  $\mathbf{f}_1$  bằng 0 và chọn  $\tau_1 = 0$  thì ta sẽ có phương trình sai lệch bám dạng:

$$\ddot{\mathbf{z}} - \mathbf{K}_D \dot{\mathbf{z}} - \mathbf{K}_P \mathbf{z} = \mathbf{0} \quad (23)$$

Hệ thống sẽ ổn định tiệm cận  $\mathbf{z} \rightarrow \mathbf{0}$  và có tác động nhanh, không bị quá điều chỉnh nếu các hệ số  $\mathbf{K}_D, \mathbf{K}_P$  được chọn phù hợp chẳng hạn như theo phương pháp chọn điểm cực. Trường hợp các thành phần bất định  $\mathbf{f}_1$  khác 0 thì ta cần xác định  $\tau_1$  sao cho hệ (23) ổn định tiệm cận.

Đặt

$$\tau' = \Psi^{-1} \tau_1 \quad (24)$$

$$\mathbf{f}' = \Psi^{-1} \mathbf{f}_1 \quad (25)$$

Thay vào (22) ta có

$$\ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{K}_D \dot{\mathbf{z}} + \mathbf{K}_P \mathbf{z} = \tau' - \mathbf{f}' \quad (26)$$

Ta sẽ xây dựng mạng nơron với tìm thuật học phù hợp để mạng xấp xỉ  $\mathbf{f}'$  và xác định tín hiệu điều khiển  $\tau'$  sao cho hệ (26) ổn định tiệm cận.

Ta chọn  $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_n]^T$  là biến phụ như sau:

$$\mathbf{s} = \dot{\mathbf{z}} + \mathbf{C} \mathbf{z} \quad (27)$$

trong đó ma trận  $\mathbf{C}$  được chọn là ma trận đối xứng xác định dương. Lúc này nếu ta bảo đảm  $\mathbf{s} \rightarrow \mathbf{0}$  thì  $\mathbf{z}$  cũng sẽ tự động trượt về gốc tọa độ :  $\mathbf{z} \rightarrow \mathbf{0}$  .

Với biến  $\mathbf{s}$  là hàm của  $\dot{\mathbf{z}}, \mathbf{z}$  phụ thuộc vào vị trí và tốc độ của các khớp  $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}$  ta có thể mô tả  $\mathbf{f}'(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  như hàm véc tơ của biến  $\mathbf{s}$ :  $\mathbf{f}'(\mathbf{s})$ . Mạng nơron nhân tạo để xấp xỉ các thành phần bất định  $\mathbf{f}'$  của hệ robot-camera được chọn dưới dạng mạng RBF như sau:

$$\mathbf{f}'(\mathbf{s}) = \mathbf{W} \sigma + \varepsilon = \hat{\mathbf{f}} + \varepsilon \quad (28)$$

$$\hat{\mathbf{f}}(\mathbf{s}) = \mathbf{W} \sigma \quad (29)$$

trong đó:

$\mathbf{W}$  là ma trận trọng số của mạng được cập nhật on-line;

$\varepsilon$  là sai số xấp xỉ và bị chặn  $\|\varepsilon\| \leq \varepsilon_0$ . Mạng nơron RBF xấp xỉ hàm  $\mathbf{f}(\mathbf{s})$  là mạng 3 lớp. Ta biết rằng cấu trúc của mạng RBF thỏa mãn định lý Stone-Weierstrass [12] khẳng định điều kiện để mạng nơron có số nút hữu hạn có thể xấp xỉ được một hàm phi tuyến không biết cấu trúc. Ở đây ta chọn lớp đầu vào của mạng nơron là  $n$  thành phần của mặt trượt. Lớp ra có  $n$  nơron tuyến tính. Lớp ẩn là các nơron có hàm phân bố Gauss dạng:

$$\sigma_j = \exp - \frac{(s_j - c_j)^2}{\lambda_j^2}; j = 1, 2, \dots, n \quad (30)$$

trong đó  $c_j, \lambda_j$  là kỳ vọng và phương sai của hàm phân bố Gauss có thể tự chọn. Ta phải chọn các tham số  $c_j, \lambda_j$  khác nhau và phủ hết dải thay đổi cả về biên độ và dải tần của hàm bất định  $\mathbf{f}(\mathbf{s})$ . Đầu ra của mạng là giá trị xấp xỉ của  $\mathbf{f}(\mathbf{s})$ .

**Định lý 1.** Hệ robot-camera  $n$  bậc tự do có nhiều tham số bất định (3),(7) với mạng nơron (29),(30) và mặt trượt (27) sẽ bám theo mục tiêu di động với sai số  $\mathbf{e} \rightarrow \mathbf{0}$  nếu ta chọn thuật điều khiển  $\tau$  và thuật học  $\dot{\mathbf{W}}_i$  của mạng nơron như sau:

$$\tau = \Psi(-\mathbf{K}_D \dot{\mathbf{z}} + \mathbf{K}_P \mathbf{z}) + \gamma + \tau_1 \quad (31)$$

$$\tau_1 = \Psi[(1 + \eta)\mathbf{W}\sigma - \delta \frac{\mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|}] \quad (32)$$

$$\dot{\mathbf{W}} = -\eta \mathbf{s} \sigma^T \quad (33)$$

trong đó các tham số tự chọn  $\mathbf{K}_D = \mathbf{D} + \mathbf{C}, \mathbf{K}_P = \mathbf{D}\mathbf{C}$  với  $\mathbf{D}$  là ma trận đối xứng xác định dương, các hệ số  $\eta, \delta > 0$ .

Cấu trúc của hệ điều khiển có thể mô tả theo sơ đồ trên Hình. 2. Mômen  $\tau$  gồm hai thành phần chính:  $\tau_0$  là thành phần phản hồi và bù các thành phần phi tuyến,  $\tau_1$  là thành phần có mạng nơron với thuật học on-line để xấp xỉ các thành phần bất định. Định lý này được chứng minh bằng phương pháp ổn định Lyapunov đảm bảo tính ổn định tiệm cận toàn cục của cả hệ thống như sau:

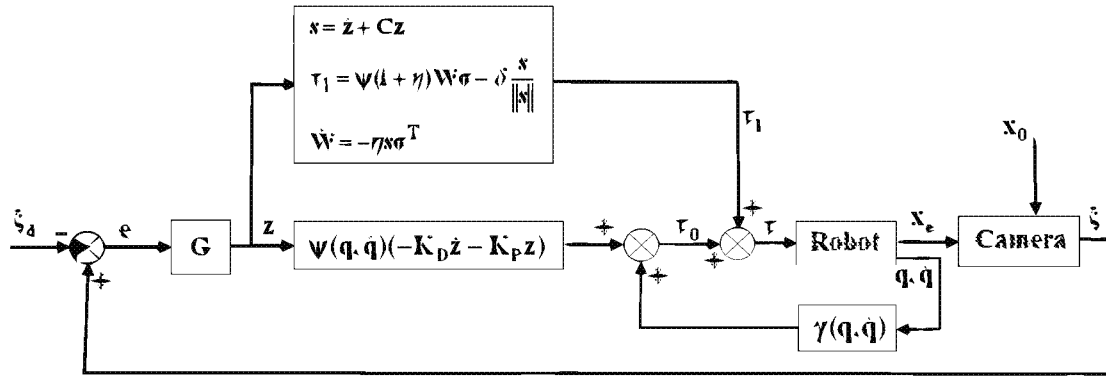
*Chứng minh:*

Chọn hàm  $V$  xác định dương như sau:

$$V = \frac{1}{2} \left( \mathbf{s}^T \mathbf{s} + \sum_{i=1}^n \mathbf{w}_i^T \mathbf{w}_i \right) \quad (34)$$

Ta có  $V > 0$  khi  $\mathbf{s}, \mathbf{w}_i \neq \mathbf{0}$ ;  $V = 0$  khi và chỉ khi  $\mathbf{s}, \mathbf{w}_i = \mathbf{0}; i = 1, 2, \dots, n$ ;  $V \rightarrow \infty$  khi  $\mathbf{s}, \mathbf{w}_i \rightarrow \infty$ . Lấy đạo hàm  $V$  theo  $t$  ta có

$$\dot{V} = \mathbf{s}^T \dot{\mathbf{s}} + \sum_{i=1}^n \mathbf{w}_i^T \dot{\mathbf{w}}_i \quad (35)$$



Hình 2. Cấu trúc của hệ visual servoing điều khiển camera bám mục tiêu di động có nhiều tham số bất định

Từ (26) ,(27) và các tham số  $\mathbf{K}_D = \mathbf{D} + \mathbf{C}$ ,  $\mathbf{K}_P = \mathbf{D}\mathbf{C}$  ta nhận được:

$$\dot{\mathbf{s}} = \boldsymbol{\tau}' - \mathbf{f}' - (\mathbf{K}_D - \mathbf{C})\dot{\mathbf{e}} - \mathbf{K}_P\mathbf{e} = \boldsymbol{\tau}' - \mathbf{f}' - \mathbf{D}\mathbf{s} \quad (36)$$

Thay (36) vào (35) đạo hàm  $V$  theo  $t$  có dạng:

$$\dot{V} = -\mathbf{s}^T\mathbf{D}\mathbf{s} + \mathbf{s}^T(\boldsymbol{\tau}' - \mathbf{f}') + \sum_{i=1}^n \mathbf{w}_i^T \dot{\mathbf{w}}_i \quad (37)$$

Với thuật học on-line (33) ta có :

$$\dot{\mathbf{w}}_i = -\eta \mathbf{s} \sigma_i; i = 1, 2, \dots, n; \quad (38)$$

trong đó  $\mathbf{w}_i$  là cột  $i$  của ma trận  $\mathbf{W}$ , ta có thể xác định được:

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{w}_i^T \dot{\mathbf{w}}_i = \sum_{i=1}^n -\eta \mathbf{w}_i^T \mathbf{s} \sigma_i = -\eta \mathbf{s}^T \sum_{i=1}^n \mathbf{w}_i \sigma_i = -\eta \mathbf{s}^T \mathbf{W} \boldsymbol{\sigma} \quad (39)$$

Thay (39) và (28) vào (37) ta có :

$$\dot{V} = -\mathbf{s}^T\mathbf{D}\mathbf{s} + \mathbf{s}^T(\boldsymbol{\tau}' - \mathbf{f}') + \sum_{i=1}^n \mathbf{w}_i^T \dot{\mathbf{w}}_i = -\mathbf{s}^T\mathbf{D}\mathbf{s} + \mathbf{s}^T(\boldsymbol{\tau}' - (1 + \eta)\mathbf{W}\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\varepsilon}) \quad (40)$$

Chọn

$$\boldsymbol{\tau}' = (1 + \eta)\mathbf{W}\boldsymbol{\sigma} - \delta \frac{\mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|}; \delta > 0 \quad (41)$$

Thay (41) vào (40) ta được:

$$\dot{V} = -\mathbf{s}^T\mathbf{D}\mathbf{s} + \mathbf{s}^T\left(-\delta \frac{\mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|} - \boldsymbol{\varepsilon}\right) \leq -\mathbf{s}^T\mathbf{D}\mathbf{s} - \delta\|\mathbf{s}\| + \|\mathbf{s}\| \cdot \|\boldsymbol{\varepsilon}\| \leq -\mathbf{s}^T\mathbf{D}\mathbf{s} - \delta\|\mathbf{s}\| + \|\mathbf{s}\|\varepsilon_0 \quad (42)$$

Nếu chọn  $\delta = \varepsilon_0 + \mu$ ;  $\mu > 0$ , ta có :

$$-\delta\|\mathbf{s}\| + \|\mathbf{s}\|\varepsilon_0 \leq -\mu\|\mathbf{s}\| \quad (43)$$



Thay (43) vào (42) ta nhận được:

$$\dot{V} \leq -\mathbf{s}^T \mathbf{D} \mathbf{s} - \mu \|\mathbf{s}\| \leq 0 \quad (44)$$

Ta thấy  $\dot{V} < 0$  khi  $\mathbf{s} \neq \mathbf{0}$  và  $\dot{V} = 0$  khi và chỉ khi  $\mathbf{s} = \mathbf{0}$ . Theo nguyên lý ổn định Lyapunov ta có  $\mathbf{s} \rightarrow \mathbf{0}$  và sai số  $\mathbf{z} \rightarrow \mathbf{0}$ . Như vậy hệ (28) là ổn định tiệm cận  $\xi(\mathbf{t}) \rightarrow \xi_{\mathbf{d}}$  hay nói cách khác camera bám theo mục tiêu di động với sai lệch đặc trưng ảnh bằng 0. Định lý 1 cũng như tính ổn định tiệm cận toàn cục của hệ rôbot - camera bám mục tiêu sử dụng mạng nơon mô tả trong Hình 2 đã được chứng minh. ■

#### 4. KẾT LUẬN

Trong thực tế ta không thể biết chính xác mô hình động lực (dynamics) cũng như mô hình động học (kinematics) của rôbot. Do vậy điều khiển rôbot với nhiều đại lượng bất định là vấn đề thực tế. Sử dụng thông tin hình ảnh (camera) trong bài toán bám mục tiêu đang là vấn đề thời sự, tuy nhiên có rất nhiều thách thức nhất là khi mục tiêu cơ động nhanh. Báo cáo đề xuất một phương pháp mới cho bài toán điều khiển camera bám mục tiêu di động theo sai lệch đặc trưng ảnh khi có nhiều bất định trong hệ động lực rôbot và trong ma trận Jacobi tổng hợp. Ưu điểm của phương pháp là tính bền vững cao, đảm bảo sai lệch bám triệt tiêu về 0 trong khi độ bất định lớn. Bài báo đã sử dụng một mạng nơon RBF hữu hạn có cấu trúc thỏa mãn định lý Stone-Weierstrass để xấp xỉ hàm tổng các tác động bất định. Mạng nơon được học on-line do vậy hệ thống có tính tự thích nghi. Kết quả chính của bài báo là tìm được cấu trúc của hệ điều khiển, tính được các mômen khớp cần thiết và chứng minh được tính ổn định tiệm cận toàn cục của hệ rôbot camera bám mục tiêu bằng phương pháp ổn định Lyapunov. Các mô phỏng trên Matlab cho các kết quả minh chứng rất khả quan và phù hợp với lý thuyết. Sai số bám bị triệt tiêu về 0 trong khi giả thiết độ bất định của hệ động lực và ma trận Jacobi lên đến 15%. Một số vấn đề liên quan còn bỏ ngỏ như khả năng xử lý ảnh và tính toán thời gian thực của phương pháp; Phương pháp chọn các tham số  $\mathbf{C}, \mathbf{D}, \delta, \lambda_i, c_i, \eta$  tối ưu. Một hướng giải quyết cho tính toán thời gian thực của phương pháp đề xuất là dùng camera mạng nơon tế bào, trong đó các tính toán xử lý ảnh có thể sử dụng chip CNN xử lý song song và các tính toán phức tạp của mômen khớp rôbot có thể được thực hiện trên DSP.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Seth Hutchinson, Gregory D. Hager, and Peter I. Corke, A tutorial on visual servo control, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **12** (5) (October 1996).
- [2] F. Chaumette, S. Hutchinson, Visual servo control. II. advanced approaches (Tutorial), *Robotics and Automation Magazine, IEEE* **14** (1) (March 2007) 109–118.
- [3] Chin-Su Kim, Eun-Jong Mo, Sung-Min Han, Min-Seok Jie, and Kang-Woong Lee, Image-based robust control of robot manipulators with image Jacobian and dynamics uncertainties, *4<sup>th</sup> IEEE*

- Conference on Automation Science and Engineering Key Bridge Marriott*, Washington DC, USA, August 23-26, 2008 (723–737).
- [4] G. Loreto and R. Garrido, Stable Neurovisual Servoing for Robot Manipulators *IEEE Transactions On Neural Networks* **17** (4) (July 2006) 183–188.
- [5] Luis Hernandez , Rene Gonzalez, Hichem Sahli, Ernesto Rubio and Yoani Guerra, A decoupled control for Visual Servoing of camera-in-hand robot with 2D movement, *Proceedings of The Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference 2008, CERMA08*, Cuernavaca, Mexico, Sep 30-Oct 3, 2008 (301–304).
- [6] Qingjie Zhao , Liqun Zhang, Yunjiao Chen, Online estimation technique for jacobian matrix in robot visual servo systems, *Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2008*, Singapore. 3<sup>rd</sup> IEEE Conference on 3-5 June 2008 (1270–1275).
- [7] Guillaume Allibert, Estelle Courtial and Youssoufi Tour, Visual predictive control for manipulators with catadioptric camera, *Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, May 19-23, 2008 (510–515).
- [8] Kwang-Hee Lee, Do-Eun Kim, Sang Hwa Lee, Young-Ho Lee, and Tae-Yong Kuc, Visual servoing of 8-dof arm for mobile robot platform, *Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems 2008*, COEX, Seoul, Korea, Oct. 14-17, 2008 (2176–2180).
- [9] Gianluca Antonelli, Stability analysis for prioritized closed-loop inverse kinematic algorithms for redundant robotic systems, *2008 IEEE International Conference of Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, May 19-23, 2008 (1993–1999).
- [10] Hesheng Wang and Yun-Hui Liu, Uncalibrated dynamic visual tracking of manipulators, *2007 IEEE International Conference on, Robotics and Automation*, Roma, Italy, April 10-14, 2007 (3198–3203).
- [11] O. Alkkiomaki, V. Kyrki, H. Kalviainen, Yong Liu; H. Handroos, Challenges of vision for real-time sensor based control, *Computer and Robot Vision, CRV '08, Canadian Conference*, Windsor, Ontario, Canada, May 28-30, 2008 (42–49).
- [12] N.E Cotter, The stone- weierstrass and its application to neural networks, *IEEE Tran on Neural Networks* **1** (4) (1990) 290–295.

*Nhận bài ngày 18 - 11 - 2009*