

Thiết kế luật điều khiển thích nghi cho hệ tích hợp rô bốt di động – pan tilt – camera để tiếp cận mục tiêu

Design adaptive control law for integrated systems of mobile robots - pan tilt - camera to reach fixed goals

Nguyễn Văn Tính*, Nguyễn Đăng Chung*, Phạm Thượng Cát*, Phạm Minh Tuấn**

*Viện Công nghệ thông tin - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

** Viện Công nghệ Vũ Trụ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

e-Mail: nvtinh@ioit.ac.vn, chungnd.auto@ioit.ac.vn, ptcat@ioit.ac.vn, pmtuan@sti.vast.vn

Tóm tắt

Bài báo này trình bày một phương pháp điều khiển mới cho hệ tích hợp tiếp cận một mục tiêu cố định. Luật điều khiển gồm hai vòng kín: vòng điều khiển động học (vòng ngoài), và vòng điều khiển động lực học (vòng trong). Vòng điều khiển động học thực hiện ba nhiệm vụ : 1 - tính các vận tốc góc các khớp pan, tilt mong muốn sao cho đặc trưng ảnh của mục tiêu tiến tiệm cận về tâm mặt phẳng ảnh; 2 - ước lượng tọa độ mục tiêu; 3 - tính vận tốc góc mong muốn của các bánh xe sao cho rô bốt di động di chuyển đến tiếp cận mục tiêu. Trong vòng điều khiển động lực học, các mô men quay được tính toán bằng một bộ điều khiển thích nghi sao cho vận tốc góc thực ở các khớp pan, tilt, các bánh xe bám theo các vận tốc góc mong muốn. Các thành phần bất định của tham số mô hình động lực học được bù bằng luật học online của bộ điều khiển thích nghi này. Tính ổn định tiệm cận của hệ thống được chứng minh bằng tiêu chuẩn Lyapunov và bổ đề Barbalat. Kết quả mô phỏng trên Matlab-Simulink đã chứng minh tính đúng đắn và hiệu quả của luật điều khiển.

Từ Khóa: Hệ tích hợp, điều khiển thích nghi, đặc trưng ảnh.

Abstract: A new visual control method for a mobile robot systems approaching a fixed target is proposed in this paper. The control law consists of two closed loops. The outer loop is the kinematic control loop, and the inner loop is the dynamic control loop. The former performs three tasks: 1 - computing desired angular velocities of pan, tilt joints so that the image feature of the target converges to the center of the image plane; 2 – estimating the position of the target; 3 – computing desired angular velocities for the mobile robot to approach the target. The latter computes desired torques of the pan, tilt joints, and wheels by an adaptive controller so that the actual velocities of the pan, tilt joints, and wheels track the desired angular velocities issued by outer loop. The uncertainties of the dynamic system are compensated by an online learning law in the adaptive controller. The stability of the whole system is proven by Lyapunov theory and Barbalat's lemma.

Ký hiệu

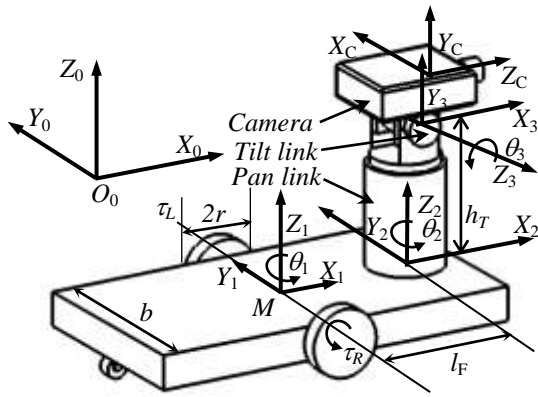
Ký hiệu	Giá trị, Đơn vị	Ý nghĩa
τ_R	N.m	Mô men quay ở bánh phải

τ_L	N.m	Mô men quay ở bánh trái
τ_2	N.m	Mô men quay ở khớp pan
τ_3	N.m	Mô men quay ở khớp tilt
m_1	22 kg	Khối lượng phần cứng của rô bốt di động
m_2	2,2 kg	Khối lượng của khối pan
m_3	0,6 kg	Khối lượng của khối tilt cộng với camera
m_w	2 kg	Khối lượng bánh xe
r	0,2 m	Bán kính bánh xe của rô bốt di động
b	0,33 m	Khoảng cách giữa bánh trái và bánh phải
l_F	0,1 m	Khoảng cách giữa trục Z_1 của hệ tọa độ $O_1X_1Y_1Z_1$ và trục Z_2 của hệ $O_2X_2Y_2Z_2$.
h_T	0,5 m	Chiều cao của khớp tilt.
$(0, l_3, 0)$	0,05 ; 0) m	Tọa độ của trọng tâm khối (tilt + camera) trong hệ tọa độ $O_3X_3Y_3Z_3$
θ_1	rad	Góc của rô bốt di động trong hệ $O_0X_0Y_0Z_0$
θ_2	rad	Góc của trục pan
θ_3	rad	Góc của trục tilt
ϕ_R	rad	Góc của bánh phải
ϕ_L	rad	Góc của bánh trái
I_w	0,005 kg.m ²	Mô men quán tính của bánh xe xung quanh trục quay của bánh xe
I_d	0,002 kg.m ²	Mô men quán tính của bánh xe xung quanh trục thẳng đứng.
I_{1zz}	0,01 kg.m ²	Mô men quán tính của phần cứng rô bốt di động quanh trục thẳng đứng
I_{2zz}	0,08 kg.m ²	Mô men quán tính của khối pan xung quanh trục quay của nó.
$I_{3xx}, I_{3yy}, I_{3zz}$	(0,001 ; 0,001 ; 0,001) kg.m ²	Các mô men quán tính của khối (tilt + camera) lần lượt quanh các trục $O_3X_3, O_3Y_3,$ và O_3Z_3 của hệ tọa độ $O_3X_3Y_3Z_3$

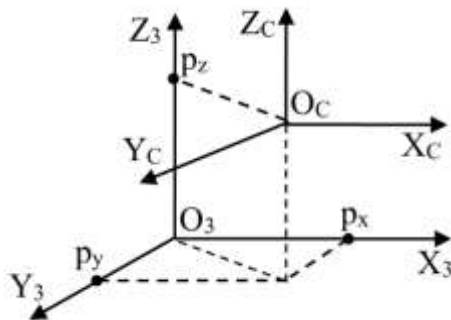
1. Phần mở đầu

Hệ tích hợp rô bốt di động, pan tilt, và camera thực chất là một hệ thống gồm rô bốt tích hợp với một tay máy hai bậc tự do cùng với camera được gắn trên

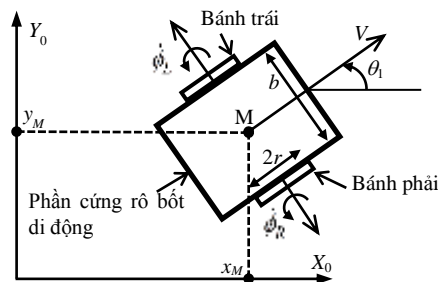
đình tay máy đó (**H. 1**). Đây là một hệ thống có cấu trúc phức



H. 1 Hệ tích hợp rô bốt di động – pan tilt – camera.



H. 2 Vị trí của hệ $O_cX_cY_cZ_c$ trong hệ $O_3X_3Y_3Z_3$ (được gắn với khớp tilt).



H. 3 Mô hình động học rô bốt di động.

tạp bởi vì nó chứa các tương tác động lực học giữa rô bốt di động và phần cứng pan tilt, các ràng buộc non-holonomic và các đặc tính phi tuyến của cả hai phần cứng này. Hệ tích hợp này có ích trong nhiều ứng dụng khác nhau như tìm kiếm vật liệu nổ, trinh sát quân sự, giám sát an ninh, khảo sát địa hình, ... trong các môi trường không cấu trúc.

Những năm gần đây, lĩnh vực nghiên cứu về hệ tích hợp rô bốt di động và tay máy (hay còn gọi là tay máy di động) đã được quan tâm đáng kể. Trong quá trình tiến hành nghiên cứu phát triển các luật điều khiển mới cho hệ tích hợp rô bốt di động, pan tilt, và camera, chúng tôi đã tìm kiếm và tổng hợp các tài liệu liên quan ở các tạp chí, các kỷ yếu hội nghị khoa học trong nước và quốc tế. Trong [1], một bộ điều khiển động học cho hệ tích hợp rô bốt di động, pan tilt, camera đã được đề xuất, nhằm đón bắt, chặn đối tượng di chuyển đến khi chạm mục tiêu. Để giải quyết vấn đề tương tác động lực học và động học giữa rô bốt di động và tay máy gắn trên nó, một bộ điều khiển trượt thích nghi dựa theo kỹ thuật backstepping đã

được đề xuất ở [2]. Trong [3], một bộ điều khiển phân hồi thị giác cho tay máy di động để bám mục tiêu trong không gian 3D được đề xuất. Trong hệ này, thiết kế được chia thành hai vòng điều khiển kiểu cascaded: một bộ điều khiển động học dựa theo thông tin hình ảnh camera để bám mục tiêu di động và một bộ điều khiển động lực học để tính toán các mô men quay mong muốn sao cho các vận tốc góc khớp thực bám theo các vận tốc góc mong muốn. Trong [4], một bộ điều khiển thích nghi được đề xuất để điều khiển bám đường cong và lực cho tay máy di động. Một mô hình toán học và một thuật toán thiết kế quỹ đạo cho các tay máy di động đã được đề xuất trong [5]. Với nhiều tham số bất định, [6] trình bày một phương pháp điều khiển tốc độ bộ pan tilt - camera bám mục tiêu di động. Trong [8], các tác giả đã đề xuất một luật điều khiển có sử dụng mạng nơ ron nhân tạo để bù các thành phần bất định cho một hệ tích hợp rô bốt di động – pan tilt – camera. Ở hệ tích hợp này, để mô hình động học đơn giản, các tác giả đã đưa ra giả thiết góc của hệ tọa độ camera trùng với góc của hệ tọa độ khớp tilt.

Đóng góp của bài báo này gồm:

- Xây dựng mô hình động học và động lực học của hệ tích hợp rô bốt di động – pan tilt – camera. Trong đó, góc của hệ tọa độ camera không trùng với góc của hệ tọa độ khớp tilt (H. 2).
- Thiết kế một luật điều khiển mới gồm hai vòng kín: Vòng ngoài điều khiển động học, vòng trong điều khiển động lực học. Ở vòng ngoài, có ba nhiệm vụ được thực hiện: 1 - tính toán các vận tốc góc khớp pan, tilt mong muốn sao cho đặc trưng ảnh của mục tiêu hội tụ về tâm mặt phẳng ảnh; 2 - ước lượng tọa độ mục tiêu; 3 - tính toán các vận tốc góc bánh xe mong muốn để rô bốt di động tiếp cận mục tiêu. Ở vòng trong, một bộ điều khiển thích nghi được sử dụng để tính toán các mô men quay sao cho các vận tốc góc thực bám các vận tốc góc mong muốn với các sai lệch bám tiến về không. Các thành phần bất định động lực học được bù bằng một luật học online trong bộ điều khiển thích nghi này.

Bài báo được chia thành các phần sau: phần 2. xây dựng mô hình hệ tích hợp rô bốt di động – pan tilt - camera; 3. điều khiển động học; phần 4. thiết kế luật điều khiển động lực học bằng phương pháp tính mô men; phần 5. tính ổn định của hệ thống; phần 6. các kết quả mô phỏng; phần 7. là phần kết luận.

2. Xây dựng mô hình hệ tích hợp rô bốt di động – pan tilt - camera

2.1. Mô hình động học

Từ hình H.1 ta có thể xây dựng được ma trận biến đổi đồng nhất biểu diễn hệ tọa độ camera $O_cX_cY_cZ_c$ trong hệ tọa độ gốc $O_0X_0Y_0Z_0$ là:

$$\mathbf{T}_c^0 = \begin{bmatrix} -s_{12} & -c_{12}s_3 & c_{12}c_3 & T_{14} \\ c_{12} & -s_{12}s_3 & s_{12}c_3 & T_{24} \\ 0 & c_3 & s_3 & T_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

trong đó, $c_i = \cos(\theta_i)$, $s_i = \sin(\theta_i)$, $c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$, $s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$;

$$T_{14} = c_{12}(p_x c_3 - p_y s_3) + s_{12} p_z + x_M + l_F c_1,$$

$$T_{24} = s_{12}(p_x c_3 - p_y s_3) - c_{12} p_z + y_M + l_F s_1,$$

$$T_{34} = p_x s_3 + p_y c_3 + h_T,$$

(p_x, p_y, p_z) là tọa độ của góc O_C của hệ tọa độ camera trong hệ tọa độ khớp tilt ($O_3 X_3 Y_3 Z_3$).

Vận tốc tịnh tiến và vận tốc góc của rô bốt di động lần lượt được tính theo công thức sau:

$$V = r(\dot{\phi}_R + \dot{\phi}_L)/2, \quad (2)$$

$$\omega = \dot{\theta}_1 = r(\dot{\phi}_R - \dot{\phi}_L)/b, \quad (3)$$

Do các bánh xe chỉ chuyên động quay (lăn) đơn thuần (không xảy ra trơn trượt) (xem **H.3**) nên các ràng buộc non-holonomic của rô bốt di động được biểu diễn theo các công thức sau:

$$\dot{x}_M \sin \theta_1 - \dot{y}_M \cos \theta_1 = 0, \quad (4)$$

$$\dot{x}_M \cos \theta_1 + \dot{y}_M \sin \theta_1 + \frac{b}{2} \dot{\theta}_1 = r \dot{\phi}_R, \quad (5)$$

$$\dot{x}_M \cos \theta_1 + \dot{y}_M \sin \theta_1 - \frac{b}{2} \dot{\theta}_1 = r \dot{\phi}_L, \quad (6)$$

2.2 Mô hình động lực học.

Ta sử dụng cơ học Lagrange để xác định các phương trình động lực của hệ thống. Động năng của hệ thống bao gồm động năng của thân rô bốt di động, động năng của các khối pan tilt-camera và động năng của các bánh xe. Các đại lượng này được tính toán như sau:

Động năng phần thân rô bốt di động là:

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_M^2 + \dot{y}_M^2) + \frac{1}{2} I_{1zz} \dot{\theta}_1^2 \quad (7)$$

Động năng của khối pan:

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_M^2 + \dot{y}_M^2 + l_F^2 \dot{\theta}_1^2) + \frac{1}{2} I_{2zz} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \quad (8)$$

Động năng của khối (tilt + camera) là:

$$K_3 = -m_3 l_F l_3 c_2 s_3 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) + \frac{1}{2} \left[I_{3xx} \frac{1 - \cos(2\theta_3)}{2} + I_{3yy} \frac{1 + \cos(2\theta_3)}{2} \right] (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + \frac{1}{2} (m_3 l_3^2 + I_{3zz}) \dot{\theta}_3^2 + \frac{1}{2} m_3 (\dot{x}_M^2 + \dot{y}_M^2 + l_F^2 \dot{\theta}_1^2) \quad (9)$$

Động năng của các bánh xe phải và trái lần lượt là:

$$K_R = \frac{1}{2} (m_w r^2 + I_w) \dot{\phi}_R^2 + \frac{1}{2} I_d \dot{\theta}_1^2 \quad (10)$$

$$K_L = \frac{1}{2} (m_w r^2 + I_w) \dot{\phi}_L^2 + \frac{1}{2} I_d \dot{\theta}_1^2 \quad (11)$$

Tổng động năng của hệ tích hợp này là:

$$K = K_1 + K_2 + K_3 + K_R + K_L$$

$$= \frac{1}{2} (m_1 + m_2 + m_3) (\dot{x}_M^2 + \dot{y}_M^2)$$

$$+ \frac{1}{2} (m_w r^2 + I_w) (\dot{\phi}_R^2 + \dot{\phi}_L^2) + \frac{1}{2} I_{2zz} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2$$

$$+ \frac{1}{2} \left[I_{3yy} \frac{1 + \cos(2q_7)}{2} + I_{3xx} \frac{1 - \cos(2q_7)}{2} \right] (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2$$

$$+ \frac{1}{2} [I_{1zz} + 2I_d + (m_2 + m_3) l_F^2] \dot{\theta}_1^2$$

$$- m_3 l_F l_3 c_2 s_3 (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3^2) + \frac{1}{2} (I_{3zz} + m_3 l_3^2) \dot{\theta}_3^2, \quad (12)$$

Bởi vì trọng lực của rô bốt di động và của khối pan được cân bằng bởi các phản lực từ mặt đất nên ta coi thế năng của hai khối này bằng 0. Thế năng của khối tilt được tính theo công thức: $P_3 = m_3 g l_3 \sin(\theta_3)$

Tổng thế năng của cả hệ là: $P = P_3 = m_3 g l_3 \sin(\theta_3)$

Gọi $\mathbf{q} = [x_M, y_M, \theta_1, \phi_R, \phi_L, \theta_2, \theta_3]^T$ là véc tơ tọa độ suy rộng của hệ tích hợp. Phương trình Lagrange [9] cho hệ tích hợp là:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \mathbf{q}} + \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{N} \cdot \boldsymbol{\tau} - \mathbf{A}^T(\mathbf{q}) \boldsymbol{\lambda} \quad (13)$$

Thay thế các đại lượng động năng (12) và thế năng vào phương trình Lagrange (13), ta được:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{N} \cdot \boldsymbol{\tau} - \mathbf{A}^T(\mathbf{q}) \boldsymbol{\lambda} \quad (14)$$

Trong đó $\boldsymbol{\tau} = [\tau_R, \tau_L, \tau_2, \tau_3]^T$, $\boldsymbol{\lambda}$ là véc tơ của các nhân tử Lagrange chưa biết biểu thị các lực ràng buộc, $\mathbf{A}^T(\mathbf{q})$ là ma trận Jacobi tương ứng với các lực ràng buộc, tất cả các ràng buộc non-holonomics của hệ thống có thể được biểu diễn bởi phương trình (15):

$$\mathbf{A}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \quad (15)$$

trong đó

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \text{ là ma trận đầu vào.} \quad (16)$$

Kết hợp (15) với (4), (5), và (6), ta có:

$$\mathbf{A}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} s_1 & -c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_1 & s_1 & b/2 & -r & 0 & 0 & 0 \\ c_1 & s_1 & -b/2 & 0 & -r & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Mặt khác ta có thể biểu diễn mối quan hệ tốc độ và gia tốc suy rộng qua các biểu thức sau:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{S}(\mathbf{q}) \mathbf{v}, \quad (18)$$

$$\text{Với } \mathbf{v} = [\dot{\phi}_R, \dot{\phi}_L, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3]^T \quad (19)$$

$$\mathbf{S}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} c_1 & \frac{r}{2} s_1 & \frac{r}{b} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{r}{2} c_1 & \frac{r}{2} s_1 & -\frac{r}{b} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (20)$$

$$\ddot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{S}}(\mathbf{q}) \mathbf{v} + \mathbf{S}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{v}} \quad (21)$$

$$\text{Ta dễ thấy rằng, } \mathbf{A}(\mathbf{q})\mathbf{S}(\mathbf{q}) = \mathbf{0} \quad (22)$$

$$\text{Và } \mathbf{S}^T(\mathbf{q})\mathbf{N} = \mathbf{I} \quad (23)$$

với \mathbf{I} là ma trận đơn vị 4x4.

Để khử véc tơ của các nhân tử Lagrange λ , ta nhân cả 2 vế của (14) với $\mathbf{S}^T(\mathbf{q})$ và kết hợp với (21), (22), và (23) ta có được hệ động lực của hệ rô bốt di động tích hợp bệ pan-til-camera như sau :

$$\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{v}} + \bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}, \mathbf{v})\mathbf{v} + \bar{\mathbf{g}}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}, \quad (24)$$

$$\text{Trong đó } \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) = \mathbf{S}^T(\mathbf{q})\mathbf{M}(\mathbf{q})\mathbf{S}(\mathbf{q}), \quad (25)$$

$$\bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}, \mathbf{v}) = \mathbf{S}^T(\mathbf{q})[\mathbf{M}\dot{\mathbf{S}}(\mathbf{q}) + \mathbf{B}(\mathbf{q}, \mathbf{v})\mathbf{S}(\mathbf{q})]\mathbf{v}, \quad (26)$$

$$\bar{\mathbf{g}}(\mathbf{q}) = \mathbf{S}^T(\mathbf{q})\mathbf{g}(\mathbf{q}), \quad (27)$$

Các ma trận $\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}), \bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}, \mathbf{v})$ được tính như sau:

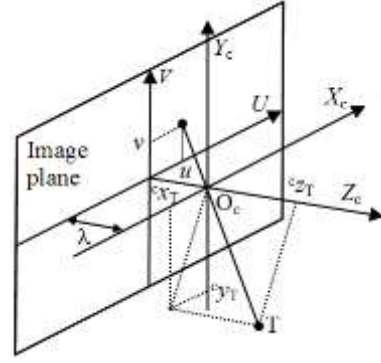
$$\bar{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} \bar{m}_{11} & \bar{m}_{12} & \bar{m}_{13} & 0 \\ \bar{m}_{21} & \bar{m}_{22} & \bar{m}_{23} & 0 \\ \bar{m}_{31} & \bar{m}_{32} & \bar{m}_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{m}_{44} \end{bmatrix}, \text{ trong đó} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \bar{m}_{11} &= \bar{m}_{22} \\ &= 0.25(m_1 + m_2 + m_3)r^2 + m_w r^2 + I_w \\ &+ 0.5\{I_{3yy}[1 + \cos(2\theta_3)] + I_{3xx}[1 - \cos(2\theta_3)]\} \frac{r^2}{b^2} \\ &+ [2I_d + I_{1zz} + I_{2zz} + (m_2 + m_3)l_F^2] \frac{r^2}{b^2} \\ &+ [m_1 l_M^2 - 2m_3 l_F l_3 c_2 s_3] \frac{r^2}{b^2}, \\ \bar{m}_{12} &= \bar{m}_{21} = 0.25(m_1 + m_2 + m_3)r^2 \\ &- \frac{1}{2}\{I_{3yy}[1 + \cos(2\theta_3)] + I_{3xx}[1 - \cos(2\theta_3)]\} \frac{r^2}{b^2} \\ &- [2I_d + I_{1zz} + I_{2zz} + (m_2 + m_3)l_F^2] \frac{r^2}{b^2} \\ &+ [m_1 l_M^2 - 2m_3 l_F l_3 c_2 s_3] \frac{r^2}{b^2}, \\ \bar{m}_{13} &= \bar{m}_{31} = -\bar{m}_{23} = -\bar{m}_{32} = [I_{2zz} - m_3 l_F l_3 c_2 s_3] \frac{r}{b} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \left[I_{3yy} \frac{1 + \cos(2\theta_3)}{2} + I_{3xx} \frac{1 - \cos(2\theta_3)}{2} \right] \frac{r}{b}, \\ \bar{m}_{33} &= I_{2zz} + I_{3yy} \frac{1 + \cos(2\theta_3)}{2} + I_{3xx} \frac{1 - \cos(2\theta_3)}{2}, \\ \bar{m}_{44} &= (I_{3zz} + m_3 l_3^2). \\ \bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}, \mathbf{v}) &= \begin{bmatrix} \bar{b}_{11} & \bar{b}_{12} & \bar{b}_{13} & \bar{b}_{14} \\ \bar{b}_{21} & \bar{b}_{22} & \bar{b}_{23} & \bar{b}_{24} \\ \bar{b}_{31} & \bar{b}_{32} & \bar{b}_{33} & \bar{b}_{34} \\ \bar{b}_{41} & \bar{b}_{42} & \bar{b}_{43} & 0 \end{bmatrix}, \text{ trong đó} \quad (29) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{b}_{11} &= \bar{b}_{22} = -\bar{b}_{21} = -\bar{b}_{12} = \\ &0.5(I_{3xx} - I_{3yy})\sin(2\theta_3)\dot{\theta}_3 (r/b)^2 \\ &+ m_3 l_F l_3 (s_2 s_3 \dot{\theta}_2 - l_F l_3 c_2 c_3 \dot{\theta}_3) (r/b)^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{b}_{13} &= -\bar{b}_{23} = \frac{1}{2}(I_{3xx} - I_{3yy})\sin(2\theta_3)\dot{\theta}_3 \frac{r}{b} \\ &+ m_3 l_F l_3 [s_2 s_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) - c_2 c_3 \dot{\theta}_3] \frac{r}{b}, \\ \bar{b}_{14} &= -\bar{b}_{24} = -\bar{b}_{41} = \bar{b}_{42} \\ &= \left[\frac{1}{2}(I_{3xx} - I_{3yy})\sin(2\theta_3)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) - m_3 l_F l_3 c_2 c_3 \dot{\theta}_1 \right] \frac{r}{b}, \end{aligned}$$



H. 4 Mô hình tạo ảnh của camera.

$$\begin{aligned} \bar{b}_{31} &= -\bar{b}_{32} = \\ &\left[\frac{1}{2}(I_{3xx} - I_{3yy})\sin(2\theta_3)\dot{\theta}_3 - m_3 l_F l_3 s_2 s_3 \dot{\theta}_3 \right] \frac{r}{b}, \\ \bar{b}_{34} &= -\bar{b}_{43} = \\ &\frac{1}{2}(I_{3xx} - I_{3yy})\sin(2\theta_3)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) - m_3 l_F l_3 c_2 c_3 \dot{\theta}_1, \\ \bar{b}_{33} &= \frac{1}{2}(I_{3xx} - I_{3yy})\sin(2\theta_3)\dot{\theta}_3, \\ \mathbf{g}(\mathbf{q}) &= [0, 0, 0, m_3 g l_3 \cos(\theta_3)]^T. \quad (30) \end{aligned}$$

Hệ động lực (24) có các tính chất cơ bản sau:

Tính chất 1: $\bar{\mathbf{M}}$ là một ma trận đối xứng và xác định dương.

Tính chất 2: $\dot{\bar{\mathbf{M}}} - 2\bar{\mathbf{B}}$ là một ma trận đối xứng lệch, tức:

$$\mathbf{x}^T (\dot{\bar{\mathbf{M}}} - 2\bar{\mathbf{B}})\mathbf{x} = 0 \text{ với } \forall \mathbf{x} \in \mathbf{R}^{4 \times 1}. \quad (31)$$

3. Điều khiển động học

3.1 Tính vận tốc góc mong muốn cho các khớp pan, tilt.

Véc tơ tọa độ \mathbf{i} của đặc trưng ảnh của mục tiêu được tính như sau:

$$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = -\frac{\lambda}{c_z} \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix} \quad (32)$$

Trong đó, ${}^c \mathbf{r} = [{}^c x, {}^c y, {}^c z]^T$ là tọa độ của mục tiêu trong hệ tọa độ camera $O_c X_c Y_c Z_c$, λ là tiêu cự của camera (H. 2). Gọi sai lệch tọa giữa đặc trưng ảnh thực và tâm của mặt phẳng ảnh là:

$$\boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = -\frac{\lambda}{c_z} \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix} \quad (33)$$

Gọi vận tốc tịnh tiến và vận tốc góc, được biểu diễn trong hệ tọa độ camera, của camera lần lượt là

$${}^c\mathbf{T} = [{}^cT_x, {}^cT_y, {}^cT_z]^T \quad \text{và} \quad {}^c\boldsymbol{\omega} = [{}^c\omega_x, {}^c\omega_y, {}^c\omega_z]^T.$$

Vì mục tiêu cố định nên đạo hàm của đặc trưng ảnh là:

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_i \begin{bmatrix} {}^c\mathbf{T} \\ {}^c\boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} \quad (34)$$

Trong đó

$$\begin{bmatrix} {}^c\mathbf{T} \\ {}^c\boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{\text{sys}} [\dot{x}_M, \dot{y}_M, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3]^T, \quad (35)$$

$$\mathbf{J}_i = \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{c_z} & 0 & \frac{u}{c_z} & -\frac{uv}{\lambda} & \frac{\lambda^2 + u^2}{\lambda} & v \\ 0 & \frac{\lambda}{c_z} & \frac{v}{c_z} & -\frac{\lambda^2 + v^2}{\lambda} & \frac{uv}{\lambda} & -u \end{bmatrix}$$

là ma trận Jacobi ảnh của camera,

$$\mathbf{J}_{\text{sys}} = \begin{bmatrix} -s_{12} & c_{12} & p_x c_3 - p_y s_3 + l_F c_2 & p_x c_3 - p_y s_3 & 0 \\ -c_{12} s_3 & -s_{12} s_3 & -p_z s_3 - l_F s_2 s_3 & -p_z s_3 & p_x \\ c_{12} c_3 & s_{12} c_3 & p_z c_3 + l_F s_2 c_3 & p_z c_3 & -p_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & c_3 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & s_3 & s_3 & 0 \end{bmatrix}$$

$(p_x, p_y, p_z)^T$ là tọa độ của gốc O_c trong hệ $O_3 X_3 Y_3 Z_3$ như H. 2.

Kết hợp (34) và (35), ta được:

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = \frac{1}{c_z} \mathbf{J}_{xy} \begin{bmatrix} \dot{x}_M \\ \dot{y}_M \end{bmatrix} + (\mathbf{J}_{23} + \mathbf{J}_{au}) \begin{bmatrix} \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v \\ -u \end{bmatrix} s_3 \dot{\theta}_2 + \mathbf{J}_1 \dot{\theta}_1 \quad (36)$$

Với

$$\mathbf{J}_{23} = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} (\lambda^2 + u^2) c_3 & uv \\ uv c_3 & \lambda^2 + v^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{xy} = \begin{bmatrix} (-\lambda s_{12} + u c_{12} c_3) & (-\lambda c_{12} + u s_{12} c_3) \\ (-\lambda c_{12} s_3 + v c_{12} c_3) & (-\lambda s_{12} s_3 + v s_{12} c_3) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_1 = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} \left(\frac{\lambda^2}{c_z} (p_z c_3 - p_y s_3 + l_F c_2) + \frac{u \lambda}{c_z} (p_z c_3 + l_F s_2 c_3) \right) \\ \left(\lambda^2 + u^2 \right) c_3 + \lambda v s_3 + \frac{l_F}{c_z} (\lambda c_2 - u s_2 c_3) \\ \left(\frac{\lambda^2}{c_z} (-p_z s_3 - l_F s_2 s_3) + \frac{v \lambda}{c_z} (p_z c_3 + l_F s_2 c_3) \right) \\ \left(uv c_3 - \lambda u s_3 + \frac{l_F s_2}{c_z} (-\lambda s_3 + v c_3) \right) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{au} = \frac{1}{c_z} \begin{bmatrix} \lambda (p_x c_3 - p_y s_3) + p_z c_3 u & -p_y u \\ p_z (-\lambda + v) & p_x \lambda \end{bmatrix}$$

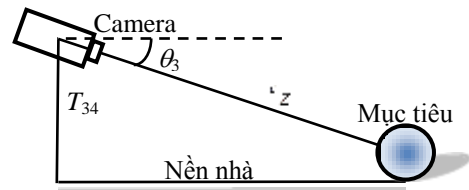
Với chu kỳ trích mẫu đủ nhỏ để đảm bảo tính thời gian thực, ta có thể xấp xỉ (36) như sau:

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = \frac{1}{c_z} \mathbf{J}_{xy} \begin{bmatrix} \dot{x}_M \\ \dot{y}_M \end{bmatrix} + \mathbf{J}_{23} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \mathbf{J}_{au} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_2^{la} \\ \dot{\theta}_3^{la} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v \\ -u \end{bmatrix} s_3 \dot{\theta}_2 + \mathbf{J}_1 \dot{\theta}_1. \quad (37)$$

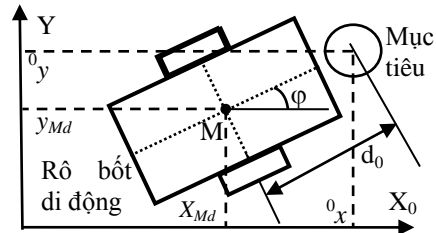
Trong đó $\dot{\theta}_2^{la}, \dot{\theta}_3^{la}$ lần lượt là các giá trị (đo được từ cảm biến) của các vận tốc góc của khớp pan, tilt ở thời điểm trích mẫu mới nhất; c_z là giá trị ước lượng của c_z và sẽ được xác định sau.

Ta tính định thức: $\det(\mathbf{J}_{23}) = (\lambda^2 + u^2 + v^2) c_3$. Dễ thấy rằng nếu $|\theta_3| < \pi/2$ thì \mathbf{J}_{23} luôn khả nghịch.

Đề đặc trưng ảnh của mục tiêu tiến tiệm cận về tâm mặt phẳng ảnh, ta chọn vận tốc góc mong muốn của các khớp pan và tilt là:



H. 5 Giải tam giác để ước lượng c_z của mục tiêu.



H. 6 Vị trí và hướng mong muốn của rô bốt di động.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{2d} \\ \dot{\theta}_{3d} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{23}^{-1} \left(-\mathbf{K} \boldsymbol{\xi} - \gamma \frac{\boldsymbol{\xi}}{\|\boldsymbol{\xi}\|} \right) - \mathbf{J}_{23}^{-1} \left(\frac{1}{c_z} \mathbf{J}_{xy} \begin{bmatrix} \dot{x}_M \\ \dot{y}_M \end{bmatrix} + \mathbf{J}_1 \dot{\theta}_1 + \mathbf{J}_{au} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_2^{la} \\ \dot{\theta}_3^{la} \end{bmatrix} \right) \quad (38)$$

Trong (37), thay $[\dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3]^T$ bởi $[\dot{\theta}_{2d}, \dot{\theta}_{3d}]^T$, ta được:

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = -\mathbf{K} \boldsymbol{\xi} - \gamma \frac{\boldsymbol{\xi}}{\|\boldsymbol{\xi}\|} + \Delta \mathbf{z} + \begin{bmatrix} v \\ -u \end{bmatrix} s_3 \dot{\theta}_{2d} \quad (39)$$

Trong đó, $\Delta \mathbf{z} = \frac{c_z - c_z}{c_z c_z} \mathbf{J}_{xy} \begin{bmatrix} \dot{x}_M \\ \dot{y}_M \end{bmatrix}$, bởi vì $c_z > 0$, $c_z > 0$ và tất cả $c_z, c_z, \mathbf{J}_{xy}, \dot{x}_M, \dot{y}_M$ đều bị chặn nên $\Delta \mathbf{z}$ cũng luôn bị chặn và $\|\Delta \mathbf{z}\| \leq Z$ với Z là giá trị chặn trên của $\|\Delta \mathbf{z}\|$.

3.2 Ước lượng tọa độ mục tiêu.

Nếu đặc trưng ảnh \mathbf{i} của mục tiêu tiến về tâm mặt phẳng ảnh, thì theo (32) ta có thể kết luận: $[{}^c x, {}^c y] \rightarrow [0, 0]$. Tức là mục tiêu nằm trên trục quang Z_c của camera (H.5). Khi đó, theo (1), tọa độ của mục tiêu trong hệ tọa độ gốc được tính theo công thức:

$$\begin{bmatrix} {}^0\hat{x} \\ {}^0\hat{y} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s_{12} & -c_{12}s_3 & c_{12}c_3 & T_{14} \\ c_{12} & -s_{12}s_3 & s_{12}c_3 & T_{24} \\ 0 & c_3 & s_3 & T_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ {}^c\hat{z} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (40)$$

Với ${}^c\hat{z} = -T_{34} / \sin(\theta_3)$.

3.3 Tính các vận tốc góc mong muốn cho các bánh xe.

Khi đã ước lượng được vị trí của mục tiêu như (40) thì để tiếp cận mục tiêu, ta sẽ xác vị trí và hướng mong muốn, $(x_{Md}, y_{Md}, \varphi)$, của rô bốt di động như sau (xem **H.6**):

$$\varphi = \text{atan2}({}^0\hat{y} - y_M, {}^0\hat{x} - x_M), \quad (41)$$

$$x_{Md} = {}^0\hat{x} - d_0 \cos \varphi, \quad (42)$$

$$y_{Md} = {}^0\hat{y} - d_0 \sin \varphi, \quad (43)$$

Trong đó, d_0 là khoảng cách mong muốn từ điểm M đến mục tiêu.

Sai lệch vị trí và hướng mong muốn được quan sát trong hệ tọa độ $O_1X_1Y_1Z_1$ như sau :

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{Md} - x_M \\ y_{Md} - y_M \\ \varphi - \theta_1 \end{bmatrix}, \quad (44)$$

Đạo hàm (41), (42), (43), ta được:

$$\dot{\varphi} = V(\varepsilon_2 + d_0 \sin \varepsilon_3) / \beta^2, \quad (45)$$

$$\dot{x}_{Md} = (d_0 \sin \varphi) \dot{\varphi}, \quad (46)$$

$$\dot{y}_{Md} = -(d_0 \cos \varphi) \dot{\varphi}, \quad (47)$$

Trong đó $\beta = \sqrt{({}^0\hat{x} - x_M)^2 + ({}^0\hat{y} - y_M)^2}$.

Đạo hàm (44), ta được:

$$\dot{\mathbf{e}} = \begin{bmatrix} \omega \varepsilon_2 - V + (d_0 \sin \varepsilon_3) \dot{\varphi} \\ -\omega \varepsilon_1 - \frac{(V d_0 \cos \varepsilon_3) \varepsilon_2}{\beta^2} - V d_0^2 \frac{\sin(2\varepsilon_3)}{2\beta^2} \\ \dot{\varphi} - \omega \end{bmatrix}, \quad (48)$$

Các giá trị mong muốn của (V, ω) lần lượt là (V_d, ω_d) được tính như sau :

$$V_d = n_1 \varepsilon_1, \quad (49)$$

$$\omega_d = n_3 \varepsilon_3 + \dot{\varphi} - \frac{V d_0^2 \sin(2\varepsilon_3)}{\beta^2 (2\varepsilon_3)} \varepsilon_2 + d_0 \dot{\varphi} \varepsilon_1 \frac{\sin \varepsilon_3}{\varepsilon_3}, \quad (50)$$

với n_1, n_3 đều là các hằng số dương. Nếu $\varepsilon_3 \rightarrow 0$ thì $\frac{\sin \varepsilon_3}{\varepsilon_3} \rightarrow 1$, và $\frac{\sin(2\varepsilon_3)}{2\varepsilon_3} \rightarrow 1$. Do đó, ω_d luôn hữu hạn.

Trong (48), thay (V, ω) bằng (V_d, ω_d) ta được:

$$\dot{\mathbf{e}} = \begin{bmatrix} \omega_d \varepsilon_2 - n_1 \varepsilon_1 + (d_0 \sin \varepsilon_3) \dot{\varphi} \\ -\omega_d \varepsilon_1 - \frac{(V d_0 \cos \varepsilon_3) \varepsilon_2}{\beta^2} - V d_0^2 \frac{\sin(2\varepsilon_3)}{2\beta^2} \\ -n_3 \varepsilon_3 + \frac{V d_0^2 \sin(2\varepsilon_3)}{\beta^2 (2\varepsilon_3)} \varepsilon_2 - d_0 \dot{\varphi} \varepsilon_1 \frac{\sin \varepsilon_3}{\varepsilon_3} \end{bmatrix}, \quad (51)$$

Kết hợp với (36), (37), ta có vận tốc góc mong muốn $\dot{\phi}_{Rd}, \dot{\phi}_{Ld}$ của các bánh xe là:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_{Rd} \\ \dot{\phi}_{Ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r/2) & (r/2) \\ (r/b) & -(r/b) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_d \\ \omega_d \end{bmatrix} \quad (52)$$

4. Thiết kế luật điều khiển động lực học bằng phương pháp tính mô men.

Kết hợp (38) với (52), ta có được véc tơ vận tốc góc mong muốn như sau : $\mathbf{v}_d = [\dot{\phi}_{Rd}, \dot{\phi}_{Ld}, \dot{\theta}_{2d}, \dot{\theta}_{3d}]^T$ (53)

Từ mô hình động lực học của hệ tích hợp:

$$\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{v}} + \bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}, \mathbf{v}) \mathbf{v} + \bar{\mathbf{g}}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (54)$$

Ta sẽ định nghĩa các ma trận $\mathbf{Y}(\mathbf{v}, \mathbf{v}_d, \dot{\mathbf{v}}_d)$,

$\mathbf{Z}(\mathbf{v}, \mathbf{v}_d, \dot{\mathbf{v}}_d)$ thỏa mãn phương trình sau:

$$\begin{aligned} & \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{v}}_d + \bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}, \mathbf{v}) \mathbf{v}_d + \bar{\mathbf{g}}(\mathbf{q}) \\ & = \mathbf{Y}(\mathbf{v}, \mathbf{v}_d, \dot{\mathbf{v}}_d) \mathbf{a} + \mathbf{Z}(\mathbf{v}, \mathbf{v}_d, \dot{\mathbf{v}}_d), \end{aligned} \quad (55)$$

Trong đó $\mathbf{a} = [2I_d + I_{1zz}, I_{2zz}, I_{3xx}, I_{3yy}, I_{3zz}]^T$. Ma trận

\mathbf{Y}, \mathbf{Z} được biểu diễn chi tiết trong phần **PHỤ LỤC**.

Lấy (54) trừ (55), về theo về ta được:

$$\begin{aligned} & \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{e}} + \bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}, \mathbf{v}) \mathbf{e} \\ & = \boldsymbol{\tau} - \mathbf{Y}(\mathbf{v}, \mathbf{v}_d, \dot{\mathbf{v}}_d) \mathbf{a} - \mathbf{Z}(\mathbf{v}, \mathbf{v}_d, \dot{\mathbf{v}}_d) \end{aligned} \quad (56)$$

Trong đó: $\mathbf{e} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_d$

Bởi vì rất khó để xác định chính xác các tham số $I_d, I_{1zz}, I_{2zz}, I_{3xx}, I_{3yy}, I_{3zz}$ nên ta chỉ có thể dùng các giá trị ước lượng của chúng để thiết kế luật điều khiển. Ta chọn véc tơ mô men $\boldsymbol{\tau}$ như các tín hiệu điều khiển như sau:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} & = \mathbf{Y} \hat{\mathbf{a}} + \mathbf{Z} - \mathbf{H} \mathbf{e} \\ & = (\mathbf{Y} \mathbf{a} + \mathbf{Y} \tilde{\mathbf{a}}) + \mathbf{Z} - \mathbf{H} \mathbf{e} \end{aligned} \quad (57)$$

Trong đó, $\hat{\mathbf{a}}$ là véc tơ ước lượng của \mathbf{a} và $\tilde{\mathbf{a}} = \hat{\mathbf{a}} - \mathbf{a}$

Thay thế (57) vào (56), ta được :

$$\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{e}} + \bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}, \mathbf{v}) \mathbf{e} = \mathbf{Y} \tilde{\mathbf{a}} - \mathbf{H} \mathbf{e} \quad (58)$$

5. Tính ổn định của hệ thống

Để xét tính ổn định của cả hệ thống, trước tiên ta chọn hàm xác định dương sau:

$$Y = \frac{1}{2} \boldsymbol{\xi}^T \boldsymbol{\xi} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\varepsilon} + \frac{1}{2} \mathbf{e}^T \bar{\mathbf{M}} \mathbf{e} + \tilde{\mathbf{a}}^T \Gamma^{-1} \tilde{\mathbf{a}} \quad (59)$$

Với Γ là ma trận hằng xác định dương

Đạo hàm hai vế (59), ta được:

$$\dot{Y} = \boldsymbol{\xi}^T \dot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \mathbf{e}^T \left(\bar{\mathbf{M}} \dot{\mathbf{e}} + \frac{1}{2} \dot{\bar{\mathbf{M}}} \mathbf{e} \right) + \tilde{\mathbf{a}}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{a}}} \quad (60)$$

Theo (60) và kết hợp tính chất đối xứng lệch (31):

$\mathbf{e}^T \left(\dot{\bar{\mathbf{M}}} - 2\bar{\mathbf{B}} \right) \mathbf{e} = 0$, ta có:

$$\dot{Y} = \boldsymbol{\xi}^T \dot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \mathbf{e}^T \mathbf{Y} \tilde{\mathbf{a}} - \mathbf{e}^T \mathbf{H} \mathbf{e} + \tilde{\mathbf{a}}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{a}}}$$

$$\dot{Y} = -\boldsymbol{\xi}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\xi} - \gamma \|\boldsymbol{\xi}\| + \boldsymbol{\xi}^T \Delta \mathbf{z} + [u, v] \begin{bmatrix} v \\ -u \end{bmatrix} s_3 \dot{\theta}_{2d} + \omega_d \varepsilon_1 \varepsilon_2$$

$$-n_1 \varepsilon_1^2 + \varepsilon_1 (d_0 \sin \varepsilon_3) \dot{\varphi} - \omega_d \varepsilon_1 \varepsilon_2 - \frac{V_d d_0 \cos \varepsilon_3}{\beta^2} \varepsilon_2^2$$

$$-V_d d_0^2 \frac{\sin(2\varepsilon_3)}{2\beta^2} \varepsilon_2 - n_3 \varepsilon_3^2 + \frac{V_d d_0^2 \sin(2\varepsilon_3)}{2\beta^2} \varepsilon_2 - (d_0 \sin \varepsilon_3) \dot{\varphi} \varepsilon_1 + \mathbf{e}^T \mathbf{Y} \tilde{\mathbf{a}} - \mathbf{e}^T \mathbf{H} \mathbf{e} + \tilde{\mathbf{a}}^T \Gamma^{-1} \hat{\mathbf{a}}, \quad (61)$$

$$\dot{Y} = -\xi^T \mathbf{K} \xi - \gamma \|\xi\| + \xi^T \Delta \mathbf{z} - n_1 \varepsilon_1^2 - \frac{V_d d_0 \cos \varepsilon_3}{\beta^2} \varepsilon_2^2 - n_3 \varepsilon_3^2 + \mathbf{e}^T \mathbf{Y} \tilde{\mathbf{a}} - \mathbf{e}^T \mathbf{H} \mathbf{e} + \tilde{\mathbf{a}}^T \Gamma^{-1} \hat{\mathbf{a}},$$

Chọn luật học online cho luật điều khiển thích nghi là $\hat{\mathbf{a}} = -\Gamma \mathbf{Y}^T \mathbf{e}$ ta được:

$$\dot{Y} = -\xi^T \mathbf{K} \xi - \gamma \|\xi\| + \xi^T \Delta \mathbf{z} - \frac{V_d d_0 \cos \varepsilon_3}{\beta^2} \varepsilon_2^2 - n_1 \varepsilon_1^2 - n_3 \varepsilon_3^2 - \mathbf{e}^T \mathbf{H} \mathbf{e}$$

Trong (62), $\xi^T \Delta \mathbf{z} \leq Z \|\xi\|$ và $V_d = n_1 \varepsilon_1 = n_1 (\beta - d_0) \cos \varepsilon_3$, đồng thời ta chọn $\gamma = \alpha + Z$, $\alpha > 0$, nên ta có:

$$\dot{Y} \leq -\xi^T \mathbf{K} \xi - \alpha \|\xi\| - \frac{(\beta - d_0) d_0 \cos^2 \varepsilon_3}{\beta^2} \varepsilon_2^2 - n_1 \varepsilon_1^2 - n_3 \varepsilon_3^2 - \mathbf{e}^T \mathbf{H} \mathbf{e}, \quad (63)$$

Tiếp tục đạo hàm hai vế của (62), ta được:

$$\ddot{Y} = -2\xi^T \mathbf{K} \dot{\xi} - \gamma \frac{\xi^T \dot{\xi}}{\|\xi\|} + \xi^T \frac{d\Delta \mathbf{z}}{dt} + (\Delta \mathbf{z})^T \dot{\xi} - 2n_1 \varepsilon_1 \dot{\varepsilon}_1 - 2n_3 \varepsilon_3 \dot{\varepsilon}_3 - \frac{d}{dt} \left(\frac{V_d d_0 \cos \varepsilon_3}{\beta^2} \varepsilon_2^2 \right) - 2\mathbf{e}^T \mathbf{H} \dot{\mathbf{e}}. \quad (64)$$

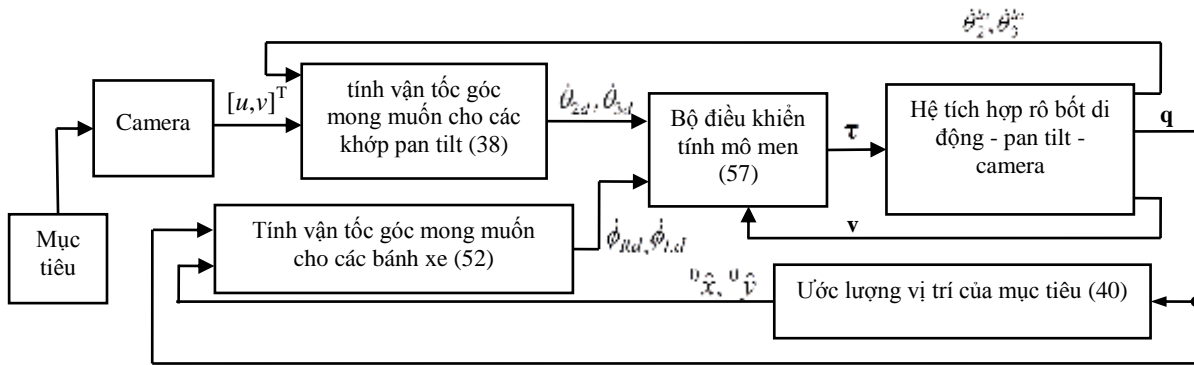
Hơn nữa, $\beta \geq d_0$, nên $\dot{Y} < 0 \quad \forall \xi \neq \mathbf{0}, \varepsilon \neq \mathbf{0}, \mathbf{e} \neq \mathbf{0}$, và $\dot{Y} = 0$ khi và chỉ khi đồng thời $\xi = \mathbf{0}, \varepsilon = \mathbf{0}, \mathbf{e} = \mathbf{0}$. Mặt khác, \dot{Y} trong (64) là hữu hạn nên \dot{Y} luôn liên tục. Theo bổ đề Barbalat, $\dot{Y} \rightarrow 0$. Tức là đồng thời xảy ra: $\xi \rightarrow \mathbf{0}, \varepsilon \rightarrow \mathbf{0}, \mathbf{e} \rightarrow \mathbf{0}$.

6. Các kết quả mô phỏng

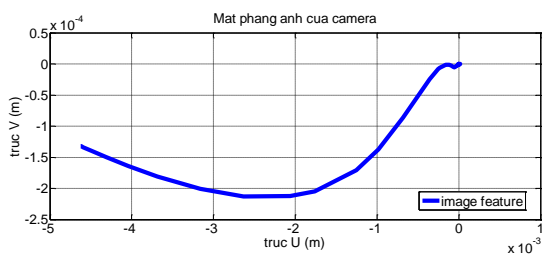
Ta sẽ tiến hành mô phỏng với mục tiêu cố định có tọa độ $(X_t = 4\text{m}; Y_t = 4\text{m})$; khoảng cách mong muốn giữa rô bốt di động và mục tiêu là $d_0 = 0,5\text{m}$; tiêu cự camera $\lambda = 0,05\text{m}$. Các tham số bộ điều khiển là:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}; \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}; \mathbf{K} = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$$

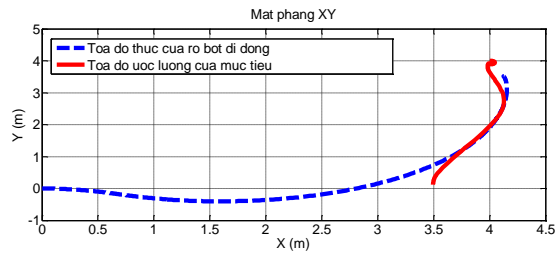
$n_1 = 2; n_3 = 2$. Tiến hành mô phỏng trên Matlab-simulink ta thu được kết quả như các đồ thị **H. 8, H. 9, H. 10, H. 11, H. 12**.



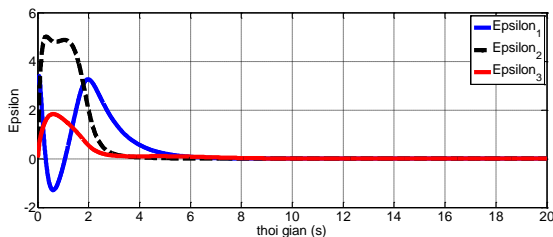
H. 7 Sơ đồ khối hệ thống điều khiển.



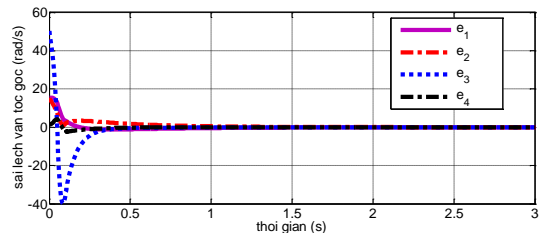
H. 8 Quỹ đạo đặc trưng ảnh của mục tiêu trên mặt phẳng ảnh.



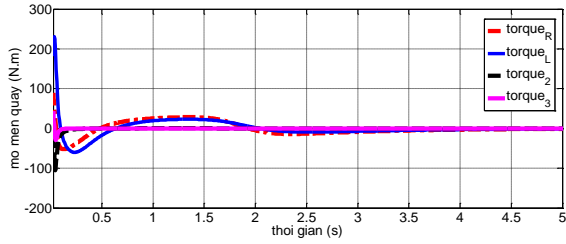
H. 10 Tọa độ ước lượng của mục tiêu và quỹ đạo thực của rô bốt di động tiếp cận mục tiêu.



H. 9 Đồ thị sai lệch ε



H. 11 Đồ thị sai lệch $\mathbf{e} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_d$



H. 12 Đồ thị mô men quay của các bánh xe và các khớp pan, tilt.

H. 8 Minh họa quỹ đạo của đặc trưng ảnh tiến về tâm mặt phẳng ảnh và đã chứng minh tính đúng đắn của luật điều khiển (38).

H. 9 Minh họa đồ thị sai lệch $\epsilon \rightarrow 0$ theo đường tiệm cận. Điều này chứng tỏ luật điều khiển (49), (50), (52) là đúng đắn.

H. 10 Minh họa quỹ đạo thực của rô bốt di động và tọa độ được ước lượng của mục tiêu.

H. 11 Minh họa sai lệch điều khiển vận tốc góc các bánh xe và các khớp pan, tilt.

H. 12 Minh họa đồ thị mô men quay ở các bánh xe và các khớp. Các mô men quay luôn liên tục và hữu hạn.

7. Kết luận

Trong bài báo này, chúng tôi đã xây dựng mô hình động học và động lực học của hệ tích hợp rô bốt di động, pan tilt, camera. Sau đó, chúng tôi đề xuất một phương pháp điều khiển mới. Sơ đồ điều khiển **H.7** gồm hai vòng kín: vòng ngoài là vòng điều khiển động học, vòng trong là để điều khiển động lực học. Các thành phần bất định tham số được bù bằng một luật học online trong bộ điều khiển thích nghi. Tính ổn định tiệm cận của hệ thống được chứng minh bằng tiêu chuẩn Lyapunov. Các kết quả mô phỏng đã kiểm chứng tính hiệu quả của phương pháp điều khiển của chúng tôi.

PHỤ LỤC

$$\mathbf{Y}(\mathbf{v}, \mathbf{v}_d, \dot{\mathbf{v}}_d) = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{25} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} & y_{35} \\ y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} & y_{45} \end{bmatrix}$$

$$y_{11} = (\dot{v}_{1d} - \dot{v}_{2d}) \left(\frac{r}{b} \right)^2;$$

$$y_{12} = (\dot{v}_{1d} - \dot{v}_{2d}) \left(\frac{r}{b} \right)^2 + \dot{v}_{3d} \frac{r}{b};$$

$$y_{13} = \frac{1 - \cos(2\theta_3)}{2} \frac{r}{b} \left[(\dot{v}_{1d} - \dot{v}_{2d}) \frac{r}{b} + \dot{v}_{3d} \right] + \frac{1}{2} \frac{r}{b} \sin(2\theta_3) \dot{\theta}_3 \left[(v_{1d} - v_{2d}) \frac{r}{b} + v_{3d} \right] + \frac{1}{2} \frac{r}{b} \sin(2\theta_3) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) v_{4d};$$

$$y_{14} = \frac{1 + \cos(2\theta_3)}{2} \frac{r}{b} \left[(\dot{v}_{1d} - \dot{v}_{2d}) \frac{r}{b} + \dot{v}_{3d} \right] - \frac{1}{2} \frac{r}{b} \sin(2\theta_3) \dot{\theta}_3 \left[(v_{1d} - v_{2d}) \frac{r}{b} + v_{3d} \right] - \frac{1}{2} \frac{r}{b} \sin(2\theta_3) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) v_{4d};$$

$$y_{15} = 0;$$

$$y_{21} = -y_{11}; y_{22} = -y_{12}; y_{23} = -y_{13};$$

$$y_{24} = -y_{14}; y_{25} = 0;$$

$$y_{31} = 0;$$

$$y_{32} = (\dot{v}_{1d} - \dot{v}_{2d}) \frac{r}{b} + \dot{v}_{3d};$$

$$y_{33} = \frac{1 - \cos(2\theta_3)}{2} \left[\frac{r}{b} (\dot{v}_{1d} - \dot{v}_{2d}) + \dot{v}_{3d} \right] + \frac{1}{2} \sin(2\theta_3) \left[\dot{\theta}_3 \frac{r}{b} (v_{1d} - v_{2d}) \right] + \frac{1}{2} \sin(2\theta_3) \left[\dot{\theta}_3 v_{3d} + (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) v_{4d} \right];$$

$$y_{34} = \frac{1 + \cos(2\theta_3)}{2} \left[\frac{r}{b} (\dot{v}_{1d} - \dot{v}_{2d}) + \dot{v}_{3d} \right] - \frac{1}{2} \sin(2\theta_3) \left[\dot{\theta}_3 \frac{r}{b} (v_{1d} - v_{2d}) \right] - \frac{1}{2} \sin(2\theta_3) \left[\dot{\theta}_3 v_{3d} + (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) v_{4d} \right];$$

$$y_{35} = 0;$$

$$y_{41} = 0;$$

$$y_{42} = 0;$$

$$y_{43} = -\frac{1}{2} \sin(2\theta_3) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \frac{r}{b} (v_{1d} - v_{2d}) - \frac{1}{2} \sin(2\theta_3) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) v_{3d};$$

$$y_{44} = \frac{1}{2} \sin(2\theta_3) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \frac{r}{b} (v_{1d} - v_{2d}) + \frac{1}{2} \sin(2\theta_3) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) v_{3d};$$

$$y_{45} = \dot{v}_{4d};$$

$$\mathbf{Z}(\mathbf{v}, \mathbf{v}_d, \dot{\mathbf{v}}_d) = [Z_1, Z_2, Z_3, Z_4]^T$$

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= (m_1 + m_2 + m_3) \frac{r^2}{4} (\dot{v}_{1d} + \dot{v}_{2d}) + (m_w r^2 + I_w) \dot{v}_{1d} \\
 &+ \left[(m_2 + m_3) l_F^2 - 2m_3 l_F l_3 c_2 s_3 \right] \left(\frac{r}{b} \right)^2 (\dot{v}_{1d} - \dot{v}_{2d}) \\
 &- m_3 l_F l_3 c_2 s_3 \frac{r}{b} \dot{v}_{3d} \\
 &+ m_3 l_F l_3 (s_2 s_3 \dot{\theta}_2 - c_2 c_3 \dot{\theta}_3) \left(\frac{r}{b} \right)^2 (v_{1d} - v_{2d}) \\
 &+ m_3 l_F l_3 \frac{r}{b} (s_2 s_3 \dot{\theta}_2 - c_2 c_3 \dot{\theta}_3) v_{3d} \\
 &+ m_3 l_F l_3 \frac{r}{b} \dot{\theta}_1 (s_2 s_3 v_{3d} - c_2 c_3 v_{4d}); \\
 Z_3 &= -m_3 l_F l_3 c_2 s_3 \frac{r}{b} (\dot{v}_{1d} - \dot{v}_{2d}) \\
 &- m_3 l_F l_3 s_2 s_3 \dot{\theta}_1 \frac{r}{b} (v_{1d} - v_{2d}) - m_3 l_F l_3 c_2 c_3 \dot{\theta}_1 v_{4d}; \\
 Z_4 &= m_3 l_3^2 \dot{v}_{4d} + m_3 l_F l_3 c_2 c_3 \dot{\theta}_1 \frac{r}{b} (v_{1d} - v_{2d}) \\
 &+ m_3 l_F l_3 c_2 c_3 \dot{\theta}_1 v_{3d}; \\
 Z_2 &= (m_1 + m_2 + m_3) \frac{r^2}{4} (\dot{v}_{1d} + \dot{v}_{2d}) + (m_w r^2 + I_w) \dot{v}_{2d} \\
 &- \left[(m_2 + m_3) l_F^2 - 2m_3 l_F l_3 c_2 s_3 \right] \left(\frac{r}{b} \right)^2 (\dot{v}_{1d} - \dot{v}_{2d}) \\
 &+ m_3 l_F l_3 c_2 s_3 \frac{r}{b} \dot{v}_{3d} \\
 &- m_3 l_F l_3 (s_2 s_3 \dot{\theta}_2 - c_2 c_3 \dot{\theta}_3) \left(\frac{r}{b} \right)^2 (v_{1d} - v_{2d}) \\
 &- m_3 l_F l_3 \frac{r}{b} (s_2 s_3 \dot{\theta}_2 - c_2 c_3 \dot{\theta}_3) v_{3d} \\
 &- m_3 l_F l_3 \frac{r}{b} \dot{\theta}_1 (s_2 s_3 v_{3d} - c_2 c_3 v_{4d});
 \end{aligned}$$

Tài liệu tham khảo

- [1] L. Freda, G. Oriolo, Vision-based interception of a moving target with a nonholonomic mobile robot, *Robotics and Autonomous Systems* 55 (2007) 419–432.
- [2] N. Chen, F. Song, G. Li, X. Sun, and C. Ai, An adaptive sliding mode backstepping control for the mobile manipulator with nonholonomic constraints, *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, 18 (2013) 2885–2899.
- [3] V. Andaluz, R. Carelli, L. Salinas, J. M. Toibero, F. Roberti, Visual control with adaptive dynamical compensation for 3D target tracking by mobile manipulators, *Mechatronics* 22 (2012) 491–502.
- [4] W. Dong, On trajectory and force tracking control of constrained mobile manipulators with parameter uncertainty, *Automatica* 38 (2002) 1475 – 1484.

- [5] M. H. Korayem, H.N. Rahimi, A. Nikoobin, Mathematical modeling and trajectory planning of mobile manipulators with flexible links and joints, *Applied Mathematical Modelling* 36 (2012) 3229–324.

- [6] Nguyễn Tiến Kiệm, Phạm Thượng Cát “Điều khiển tốc độ bộ pan-tilt-camera bám mục tiêu di động với nhiều tham số bất định”, hội nghị Cơ Điện Tử Toàn Quốc lần thứ 6, Hà Nội tháng 12/2012, số 167, trang 187-194.



- [7] Nguyễn Trần Hiệp, Phạm Thượng Cát, “Optimal Neuro Control of Manipulator with parameter uncertainties” Proceedings of the 2011 11th International Conference on Control, Automation and Systems Oct. 26-29, 2011 in KINTEX, Gyeonggi-do, Korea, pp. 84-87.

- [8] N. Tinh, P. Cat, P. Tuan, B. Quyen, *Visual Control of Integrated Mobile Robot-Pan Tilt-Camera System for Tracking a Moving Target*, Proceedings of the 2014 IEEE International Conference of on Robotics and Biomimetics, December 5-10, Bali, Indonesia.



- [9] Phillip John McKerrow, *Introduction to Robotics*, University of Wollongong, Australia.

Nguyễn Văn Tinh nhận bằng đại học Bách Khoa Hà Nội năm 2008, chuyên ngành Kỹ sư Điều khiển tự động. Từ năm 2008 đến

này, anh đang làm cán bộ nghiên cứu tại phòng Công nghệ tự động hóa – Viện Công nghệ thông tin, Viện Hàn lâm Khoa học và công nghệ Việt Nam.

Nguyễn Đăng Chung nhận bằng đại học Bách Khoa Hà Nội năm 2010, chuyên ngành Kỹ sư Điều khiển tự động. Từ năm 2010 đến nay, anh đang làm cán bộ nghiên cứu tại phòng Công nghệ tự động hóa – Viện Công nghệ thông tin, Viện Hàn lâm Khoa học và công nghệ Việt Nam.



Phạm Thuong Cat is a Honorary Research Professor in Computational Sciences of Computer and Automation Research Institute of the Hungarian Academy of Sciences. He is the Editor-in-Chief of the Journal of Computer Science and

Cybernetics of the Vietnamese Academy of Science and Technology (VAST) and a Senior Researcher of the Institute of Information Technology of VAST. He is a Vice President of the Vietnamese Association of Mechatronics. His research interests include robotics, control theory, cellular neural networks and embedded control systems. He co-authored 4 books and published over 170 papers on national and international journals and conference proceedings.

Phạm Minh Tuấn nhận bằng Thạc sĩ và Tiến sĩ về Kỹ thuật điều khiển tương ứng vào các năm 2002 và 2006 tại trường Đại học Công nghệ Nanyang, Singapore. Hiện tại, ông đang là Phó giám đốc Trung tâm Điều khiển và Khai thác Vệ tinh nhỏ thuộc Viện Công nghệ vũ trụ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam (VAST). Đồng thời, ông kiêm nhiệm Phó Trưởng ban Quản lý dự án vệ tinh nhỏ của VAST. Lĩnh vực nghiên cứu của ông bao gồm các hệ thống vệ tinh quan sát Trái đất, điều khiển tự thế, điều khiển quỹ đạo, vị trí vệ tinh, nghiên cứu về xe tự hành, rô-bốt di động. Ông là tác giả và đồng tác giả của trên 40 bài báo tạp chí và hội nghị quốc tế và trong nước.

