

MÔ HÌNH HÓA VÀ ĐIỀU KHIỂN ROBOT RẮN

Nguyễn Minh Tâm, Nguyễn Văn Phước

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật thành phố Hồ Chí Minh

TÓM TẮT

Trên cơ sở phương trình động lực học chuyển động của robot rắn trong hai trường hợp ma sát nhớt và ma sát Coulomb, chúng tôi nghiên cứu phương pháp điều khiển chuyển động của robot rắn và thiết kế các bộ điều khiển PID với các thông số tối ưu bằng giải thuật bầy đàn PSO. Nghiên cứu thiết kế được kiểm nghiệm bằng việc mô phỏng robot rắn gồm 6 đoạn thực hiện trên phần mềm Matlab.

Từ khóa: robot rắn, điều khiển, lực ma sát

*

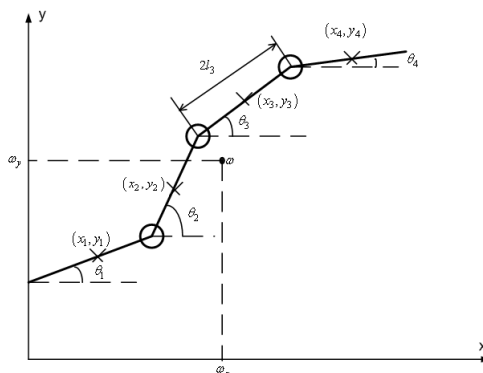
1. Đặt vấn đề

Ngày nay, hầu hết các cơ chế robot di động hiện nay có các bánh xe được điều khiển bởi các động cơ. Những cơ cấu robot có bánh xe như vậy tương đối hiệu quả, dễ dàng điều khiển và thích hợp với điều khiển tốc độ cao trên những mặt bằng phẳng. Tuy nhiên, chúng không hiệu quả trong những môi trường gồ ghề như là những địa hình lởm chởm và lấy lợi. Những robot di chuyển bằng chân đang được tích cực nghiên cứu. Chúng cho thấy tính thích nghi với địa hình cao hơn những robot di chuyển bằng bánh xe. Tính thích nghi với địa hình thậm chí còn cao hơn với những robot có nhiều đoạn có thể “bò” như rắn. Ngoài tính thích nghi với môi trường ra, những robot hình rắn còn cho thấy nhiều ưu điểm hơn những robot di chuyển bằng bánh xe và chân. Chúng có thể bơi lội hoặc trèo lên cây. Với những khả năng đó, robot rắn ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như: kiểm tra, nạo vét các đường ống, tìm kiếm nạn nhân trong các vụ hỏa hoạn, động đất, dò thám trong quân sự. Trong bài báo này chúng tôi

nghiên cứu robot rắn “không có bánh xe”. Bài báo chỉ giới hạn nghiên cứu sự di chuyển của robot rắn trong không gian hai chiều.

2. Mô hình của robot rắn

Xét robot rắn gồm n đoạn kết nối với nhau qua $(n-1)$ khớp. Giả thiết mỗi đoạn có khối lượng bằng nhau. Ở mỗi khớp có một động cơ truyền động cho robot. Bài báo này chỉ xét robot rắn di chuyển trong không gian hai chiều. Trong trường hợp này robot có $(n+2)$ bậc tự do.



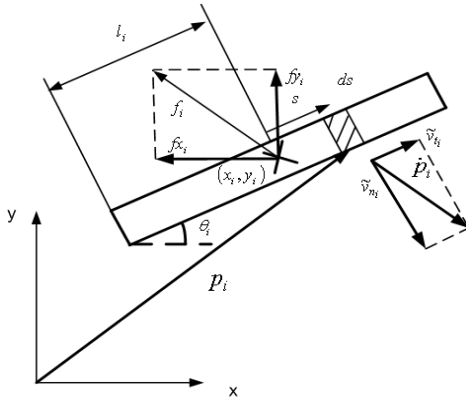
Hình 1 Robot rắn gồm n đoạn, $n-1$ khớp

Robot gồm n đoạn, tọa độ trọng tâm của mỗi đoạn là (x_i, y_i) , góc hợp bởi mỗi đoạn với phương ngang là θ_i , chiều dài của

mỗi đoạn là $2l_i$, ω_x , ω_y và lần lượt là tọa độ của điểm trọng tâm theo phương x và phương y. Bài báo này sẽ xây dựng phương trình động lực học chuyển động của robot rắn trong hai trường hợp ma sát nhớt và ma sát Coulomb.

2.1. Lực ma sát nhớt

Xét đoạn thứ i của robot rắn mô tả trong hình 1.



Hình 2: Đoạn vi phân của khâu thứ i.

Trong đó: $2l_i$ là chiều dài của đoạn thứ i; (x_i, y_i) là tọa độ của trọng tâm của đoạn thứ i; f_i là lực ma sát giữa đoạn thứ i và mặt phẳng trượt; $\dot{p}_i$ là vectơ vận tốc của đoạn vi phân ds; $\tilde{v}_{ti}$ và $\tilde{v}_{ni}$ lần lượt là vận tốc theo phương tiếp tuyến và phương pháp tuyến với đoạn thứ i; s là khoảng cách từ đoạn vi phân ds đến điểm trọng tâm của đoạn thứ i; θ_i là góc hợp bởi đoạn thứ i với trục x.

Lực ma sát tác động lên đoạn thứ i của robot rắn:

$$\begin{bmatrix} f_{xi} \\ f_{yi} \end{bmatrix} = -m_i \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{ti} & 0 \\ 0 & c_{ni} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Tổng moment ma sát xoắn quanh trọng tâm của đoạn thứ i là:

$$\tau_i = \int_{-l_i}^{l_i} s df_{ni} = -\frac{m_i l_i^2}{3} c_{ni} \dot{\theta}_i = -c_{ni} J_i \dot{\theta}_i \quad (1.2)$$

Trong đó: c_{ti} và c_{ni} lần lượt là hệ số ma sát theo phương tiếp tuyến và phương

pháp tuyến; dm_i là khối lượng của đoạn vi phân ds (trong đó $dm_i = \frac{m_i ds}{2l_i}$); J_i là moment quán tính của đoạn thứ i.

Trong đó: $J_i = \frac{m_i l_i^2}{3}$. Chiều dương của τ_i được qui ước là chiều lượng giác (ngược chiều kim đồng hồ).

Xét toàn bộ hệ thống gồm n đoạn. Vectơ lực ma sát f và moment xoắn τ tác động lên robot được cho bởi:

$$f = -\Omega_\theta D_f \Omega_\theta^T \dot{z} \quad (1)$$

$$\tau = -D_\tau \dot{\theta} \quad (2)$$

$$\text{Trong đó: } D_f := \begin{bmatrix} C_t M & 0 \\ 0 & C_n M \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$D_\tau := C_n J \quad (4)$$

$$\Omega_\theta := \begin{bmatrix} C_\theta & -S_\theta \\ S_\theta & C_\theta \end{bmatrix}$$

$$C_t := \text{diag}(c_{t1}, \dots, c_{tn})$$

$$C_n := \text{diag}(c_{n1}, \dots, c_{nn})$$

Với: c_{ti} là hệ số ma sát theo phương tiếp tuyến; c_{ni} là hệ số ma sát theo phương pháp tuyến.

$$M = \text{diag}(m_1, \dots, m_n)$$

$$S_\theta = \text{diag}(\sin \theta_1, \dots, \sin \theta_n)$$

$$C_\theta = \text{diag}(\cos \theta_1, \dots, \cos \theta_n)$$

2.2. Trường hợp ma sát Coulomb

Lực ma sát lên đoạn thứ i được cho bởi:

$$\begin{bmatrix} f_{xi} \\ f_{yi} \end{bmatrix} = -m_i g \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{ti} & 0 \\ 0 & \mu_{ni} \end{bmatrix} \text{sat} \left(\begin{bmatrix} v_{ti} \\ v_{ni} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ l_i \dot{\theta}_i \end{bmatrix} \right)$$

$$\tau_i = -\frac{1}{2} \mu_{ni} m_i g l_i dzs(v_{ni}, l_i \dot{\theta}_i)$$

Trong đó: μ_{ti} và μ_{ni} lần lượt là các hệ số ma sát Coulomb theo hướng tiếp tuyến

và hướng pháp tuyến với đoạn thứ i , g là gia tốc trọng trường, m_i là khối lượng của đoạn vi phân.

$$dzs(v_{n_i}, l_i \dot{\theta}_i) = \frac{1}{2l_i} \int_{-l_i}^{l_i} \text{sgn}(v_{n_i} + \dot{\theta}_i s) s \cdot ds$$

$$= \begin{cases} 1 - \left(\frac{v_{n_i}}{l_i \dot{\theta}_i}\right)^2 & (l_i \dot{\theta}_i > |v_{n_i}|) \\ 0 & (|l_i \dot{\theta}_i| \leq |v_{n_i}|) \\ \left(\frac{v_{n_i}}{l_i \dot{\theta}_i}\right)^2 - 1 & (l_i \dot{\theta}_i < -|v_{n_i}|) \end{cases}$$

Xét toàn bộ hệ thống gồm n đoạn. Vectơ lực ma sát f và moment xoắn τ tác động lên robot được cho bởi:

$$f = -\Omega_\theta \Delta_f \text{sat}\left(\Omega_\theta^T \dot{z}, \begin{bmatrix} 0 \\ L \end{bmatrix} \dot{\theta}\right) \quad (5)$$

$$\tau = -\Delta_\tau dzs(\begin{bmatrix} -S_\theta & C_\theta \end{bmatrix} \dot{z}, L \dot{\theta}) \quad (6)$$

Trong đó :

$$\Delta_f := \begin{bmatrix} \mu_t Mg & 0 \\ 0 & \mu_n Mg \end{bmatrix}$$

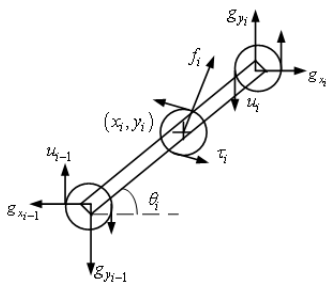
$$\Delta_\tau = \frac{1}{2} \mu_n Mg L$$

$$\mu_t := \text{diag}(\mu_{t_1}, \dots, \mu_{t_n})$$

$$\mu_n := \text{diag}(\mu_{n_1}, \dots, \mu_{n_n})$$

$$z = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

2.3. Phương trình chuyển động



Hình 3: Phân tích lực tác động lên đoạn thứ i của robot rắn

Xét khâu thứ i của robot rắn gồm n đoạn (xem hình 3).

Trong đó: f_i và τ_i là lực và moment do ma sát giữa đoạn thứ i và mặt phẳng trượt; g_i và g_{i-1} là lực tương tác do các đoạn kế cận thứ $(i-1)$ và $(i+1)$; u_i và u_{i-1} là moment của động cơ ở khớp thứ i và $i-1$; θ_i là góc hợp với phương ngang của đoạn thứ i .

Mỗi khâu thứ i có khối lượng là m_i , chiều dài là $2l_i$. Moment quán tính tác

động lên đoạn thứ i là $J_i = \frac{m_i l_i^2}{3}$

Áp dụng định luật II Newton phân tích từng đoạn sau đó tổng hợp lại ta có:

$$F \ddot{\theta} + C \dot{\theta}^2 = D^T u + \tau + \xi^T f \quad (7)$$

$$m \ddot{w} = E^T f \quad (8)$$

Tổng hợp (1),(2), (7) và (8) ta có phương trình chuyển động của robot rắn:

$$\begin{bmatrix} F & 0 \\ 0 & mI \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C \dot{\theta}^2 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R & S \\ S^T & Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D^T \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (9)$$

Trong đó, góc tuyệt đối:

$$\theta = [\theta_1 \quad \dots \quad \theta_n]^T$$

Vị trí của trọng tâm của robot rắn:

$$\omega := \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n m_i x_i \\ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n m_i y_i \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} e^T Mx \\ e^T My \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} R & S \\ S^T & Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_\tau & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi^T \\ E^T \end{bmatrix} \Omega_\theta D_f \Omega_\theta^T \begin{bmatrix} \xi & E \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & 1 & 1 \end{bmatrix} \in R^{(n-1) \times n}$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & -1 & & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & 1 & -1 \end{bmatrix} \in R^{(n-1) \times n}$$

$$E = \begin{bmatrix} e & 0 \\ 0 & e \end{bmatrix}, e = [1 \quad \dots \quad 1]^T \in R^n$$

$$m = \sum_{i=1}^n m_i$$

$$S_\theta = \text{diag}(\sin \theta_1, \dots, \sin \theta_n)$$

$$C_\theta = \text{diag}(\cos \theta_1, \dots, \cos \theta_n)$$

$$L = \text{diag}(l_1, \dots, l_n), \text{ với } l_i \text{ là } \frac{1}{2} \text{ chiều}$$

dài của đoạn thứ i.

$J = \text{diag}(J_1, \dots, J_n)$, với J_i là moment quán tính của đoạn thứ i.

$M = \text{diag}(m_1, \dots, m_n)$, với m_i là khối lượng của đoạn thứ i.

$$F = J + S_\theta H S_\theta + C_\theta H C_\theta$$

$$\mathcal{E} = \begin{bmatrix} S_\theta N^T & -C_\theta N^T \end{bmatrix}^T$$

$$N = M^{-1} D^T (D M^{-1} D^T)^{-1} A L$$

$$H = L A^T (D M^{-1} D^T)^{-1} A L$$

$$C = S_\theta H C_\theta - C_\theta H S_\theta$$

$$D_f := \begin{bmatrix} C_t M & 0 \\ 0 & C_n M \end{bmatrix}$$

$$D_\tau := C_n J$$

$$\Omega_\theta := \begin{bmatrix} C_\theta & -S_\theta \\ S_\theta & C_\theta \end{bmatrix}$$

$$C_t = \text{diag}(c_{t_1}, \dots, c_{t_n})$$

$$C_n = \text{diag}(c_{n_1}, \dots, c_{n_n})$$

2.4. Phân li động lực học (Dynamic Decoupling)

Trong phần này, chúng ta tách phương trình chuyển động đã xây dựng ở trên ra hai phần: đó là hình dạng chuyển động (moment xoắn ở khớp $\rightarrow$ góc ở khớp) và sự di động quán tính (góc ở khớp $\rightarrow$ vị trí và hướng quán tính). Việc phân li này làm đơn giản việc phân tích và tổng hợp chuyển động hình rắn.

Phương trình chuyển động của robot rắn đã phân li có dạng như sau:

$$\begin{bmatrix} \rho & 0 \\ 0 & mI \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\psi} \\ \ddot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\rho^T \text{Re}_\rho & e_\rho^T S \\ S^T e_\rho & Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\rho^T R \\ S^T \end{bmatrix} K \dot{\phi} = 0 \quad (10)$$

$$\ddot{\phi} + D F^{-1} (C \dot{\theta}^2 + R \dot{\theta} + S \dot{\omega}) = B u \quad (11)$$

Trong đó:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} D \\ e^T F \end{bmatrix} \dot{\theta}$$

ϕ là vectơ của góc tương đối giữa đoạn kế cận và ψ là động lượng góc trung bình.

$$\dot{\theta} = K \dot{\phi} + e_\rho \dot{\psi}$$

$$B = D F^{-1} D^T$$

$$K = F^{-1} D^T B^{-1}; \rho = \frac{1}{e^T F e}; e_\rho = \rho e$$

Với phương trình chuyển động đã phân li, có thể xây dựng phương pháp điều khiển sao cho: (1) moment xoắn ở khớp u điều khiển hình dáng ϕ của robot rắn; (2) hình dáng ϕ điều khiển ψ và ω của robot rắn.

3. Phương pháp điều khiển chuyển động của robot rắn

Khi hình dạng ϕ của robot rắn thay đổi, lực f và moment xoắn τ được tạo ra do ma sát giữa robot và bề mặt trượt. Kết quả là vị trí của trọng tâm ω và động lượng góc của toàn bộ cơ thể ψ thay đổi. Phương trình (10) cho thấy có thể điều khiển các biến ψ và $\dot{\omega}$ dùng tín hiệu điều khiển là ϕ . Bằng cách tác động vào ϕ ta có thể điều khiển robot rắn chuyển động. Mục tiêu của phần này là xác định phương pháp điều khiển ϕ để robot rắn chuyển động theo một hướng định trước ở một tốc độ định trước với hiệu suất chuyển động tối ưu.

Sự chuyển động của robot rắn có thể thực hiện thông qua việc thay đổi hình dạng ϕ của robot rắn để hình thành những đường cong serpenoid.

3.1. Đường cong serpenoid

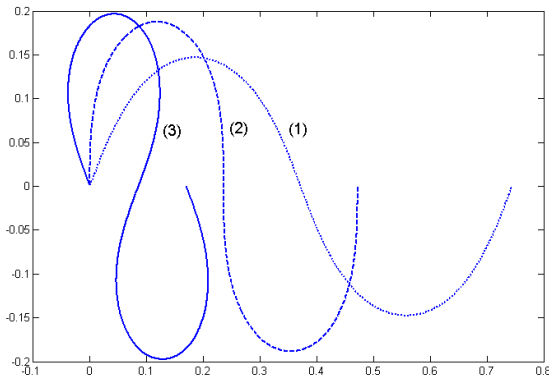
Định nghĩa: Đường cong serpenoid là đường cong có tọa độ xác định bởi:

$$x(s) = \int_0^s \cos(\xi_\sigma) d\sigma \quad (12)$$

$$y(s) = \int_0^s \sin(\xi_\sigma) d\sigma \quad (13)$$

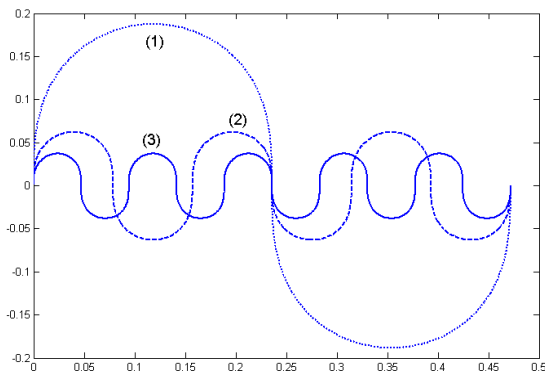
$$\xi_\sigma := a \cos(b\sigma) + c\sigma \quad (14)$$

Trong đó: a , b và c là các hằng số xác định hình dạng của đường cong serpenoid, và s là chiều dài cung từ gốc tọa độ tới điểm xét.



Hình (4a) Đường cong serpenoid với $b = 2\pi$ và $c = 0$

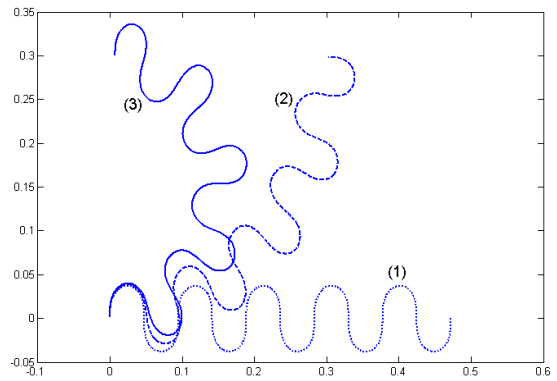
$$(1) a = \frac{\pi}{3}; (2) a = \frac{\pi}{2}; (3) a = \frac{2\pi}{3}$$



Hình (4b): Đường cong serpenoid với $a = \frac{\pi}{2}$ và

$$c = 0$$

$$(1) b = 2\pi; (2) b = 6\pi; (3) b = 10\pi$$



Hình (4c): Đường cong serpenoid với $a = \frac{\pi}{2}$ và $b = 10\pi$

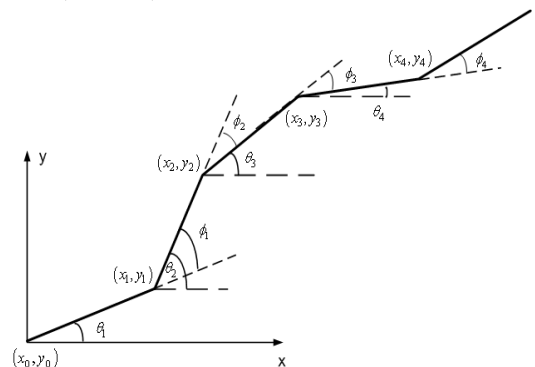
$$(1) c = 0; (2) c = \frac{\pi}{2}; (3) c = \pi$$

Hình 4 (a, b, c) trình bày các đường cong serpenoid với các thông số a , b và c khác nhau. Nếu xấp xỉ đường cong serpenoid dưới dạng n đoạn thẳng kết nối với nhau. Phương trình (12) và (13) có thể xấp xỉ bởi:

$$x_i = \sum_{k=1}^i \frac{1}{n} \cos\left(a \cos\left(\frac{kb}{n}\right) + \frac{kc}{n}\right)$$

$$y_i = \sum_{k=1}^i \frac{1}{n} \sin\left(a \cos\left(\frac{kb}{n}\right) + \frac{kc}{n}\right)$$

Khi đó đường cong serpenoid ban đầu được xấp xỉ bởi n đoạn thẳng kết nối với nhau (hình 5).



Hình 5 Đường cong serpenoid được xấp xỉ bởi 4 đoạn thẳng

Trên hình 5, θ_i là góc của đoạn thứ i hợp với trục x . Chiều dương qui ước của θ_i

là chiều lượng giác (ngược chiều kim đồng hồ). Khi đó ta có: $\theta_i = a \cos\left(\frac{ib}{n}\right) + \frac{ic}{n}$

Định nghĩa:

$$\phi_i = \theta_i - \theta_{i+1} = \alpha \sin\left(i\beta + \frac{\beta}{2}\right) + \gamma$$

ϕ_i là góc tương đối xác định hình dạng của đường cong serpenoid rời rạc (hình 5)

Trong đó:

$$\alpha := a \left| \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \right|, \quad \beta = \frac{b}{n}, \quad \gamma = -\frac{c}{n}$$

Như vậy, góc tương đối ϕ_i thay đổi theo dạng hình sin với biên độ α và độ lệch γ . Hai góc kế nhau có sự chênh lệch bằng β .

3.2. Sự di chuyển hình rắn

Chuyển động trường của một con rắn có thể được bắt chước bởi việc thay đổi góc tương đối của robot rắn theo qui luật sau:

$$\phi_i(t) = \alpha \sin(\omega t + (i-1)\beta) + \gamma, \quad (i=1, \dots, n-1) \quad (14)$$

Trong đó α, β , và γ là những thông số xác định hình dạng của đường cong serpenoid, và ω xác định tốc độ lan truyền sóng hình rắn dọc theo cơ thể.

Giả thiết của chúng ta là khi điều khiển ϕ thay đổi như trong (14) kết hợp với ma sát của môi trường thì Robot sẽ di chuyển theo dạng hình rắn. Chúng ta sẽ dùng mô phỏng để kiểm chứng giả thiết. Trong phần này ta mô phỏng robot rắn với những thông số sau: $n=6$, $m_i = 1kg$, $l_i = 1m$, $c_{ti} = 0.1$, $c_{ni} = 10$

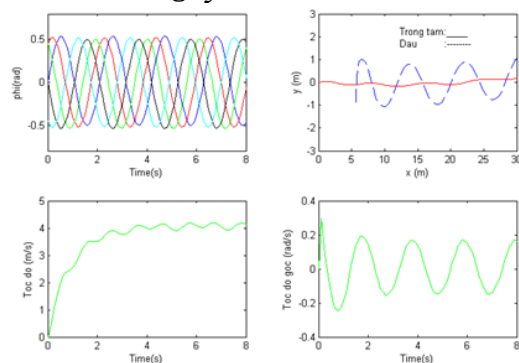
$$\alpha = \frac{\pi}{6} \text{ rad/s}, \quad \beta = \frac{\pi}{3} \text{ rad/s}, \quad \omega = 3 \text{ rad/s}$$

Kết quả mô phỏng chuyển động của robot rắn được trình bày trong hình 6 (với $\gamma = 0$) và hình 7 (với $\gamma = 10 \text{ deg}$).

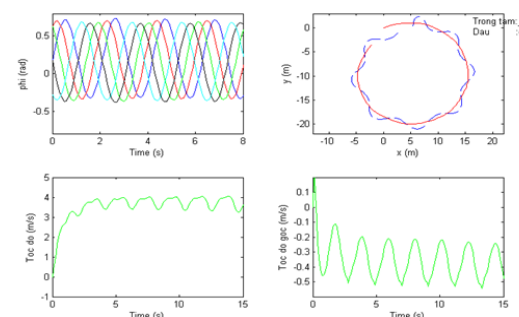
Trong đó:

$$v = \dot{\omega}_x \cos \xi + \dot{\omega}_y \sin \xi; \quad \xi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i$$

Với ξ là thông số mô tả hướng của toàn bộ robot rắn và v là tốc độ của trọng tâm theo hướng ξ .



Hình 6: Chuyển động hình rắn ($\gamma = 0$)



Hình 7: Chuyển động hình rắn ($\gamma = 10 \text{ deg}$)

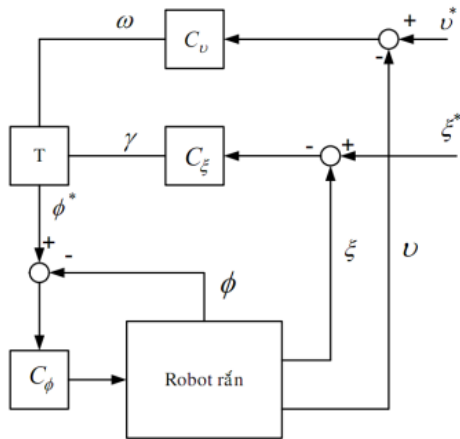
Từ kết quả mô phỏng ở hình 6 và hình 7 ta thấy rằng khi $\gamma = 0$ thì robot rắn di chuyển theo đường thẳng và khi $\gamma \neq 0$ thì robot rắn di chuyển theo một đường tròn.

4. Thiết kế hệ thống điều khiển

Trong phần trước, ta thấy ω và γ lần lượt là hai thông số xác định tốc độ và hướng của robot rắn. Do đó, ta cố định α, β và sử dụng ω và γ để điều khiển tốc độ và hướng của robot rắn. Trong phần này, ta xây dựng mô hình robot rắn với 6 đoạn ($n=6$), khối lượng mỗi đoạn $m_i = 1kg$, chiều dài mỗi đoạn $l_i = 1m$, $c_{ni}=0.1$,

$$c_{ti} = 10, \quad \alpha = \frac{\pi}{6} \quad \text{và} \quad \beta = \frac{\pi}{3}.$$

Hình 8 trình bày sơ đồ khối của hệ thống điều khiển robot rắn. Bộ điều khiển bao gồm 2 cấp điều khiển:



Hình 8: Sơ đồ khối hệ thống điều khiển robot rắn

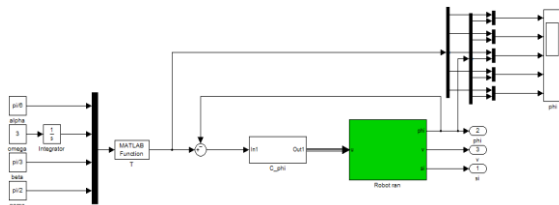
4.1. Bộ điều khiển địa phương:

Chúng ta sẽ dùng 5 bộ điều khiển PID cho bộ điều khiển địa phương $C_\phi(s)$ có nhiệm vụ tạo ra tín hiệu điều khiển của động cơ ở các khớp, nhằm mục đích điều khiển tạo ra moment u sao cho tín hiệu hồi tiếp ϕ bám theo tín hiệu đặt ϕ^* . Tín hiệu ϕ^* lấy từ bộ biến đổi T với :

$$\phi^* = \alpha \sin(\omega t + (i-1)\beta) + \gamma; i = 1, \dots, 5$$

Hàm truyền của mỗi bộ điều khiển

$$C_\phi(s) \text{ như sau: } C_\phi(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s$$



Hình 9 Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển C_ϕ của robot trên phần mềm Matlab

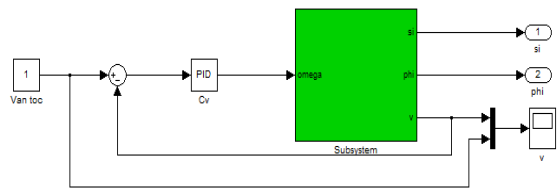
4.2. Bộ điều khiển vòng ngoài:

Bộ điều khiển tốc độ và hướng của robot rắn sử dụng hai bộ điều khiển C_v và C_ξ để thực hiện chuyển động mong muốn v^* và ξ^* . Các bộ điều khiển C_v và C_ξ được sử dụng là hai bộ điều khiển PID với:

4.2.1. Bộ điều khiển vận tốc

Hàm truyền C_v

$$C_v(s) = K_{P1} + \frac{K_{I1}}{s} + K_{D1}s$$

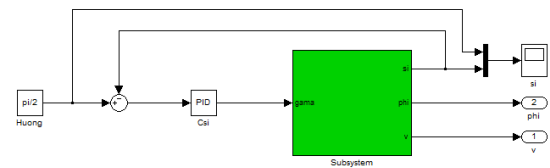


Hình 10 Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển vận tốc (C_v) của robot rắn

4.2.2. Bộ điều khiển hướng

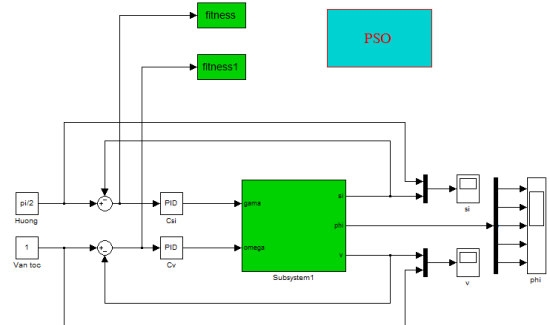
Hàm truyền C_ξ

$$C_\xi(s) = K_{P2} + \frac{K_{I2}}{s} + K_{D2}s$$



Hình 11 Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển vận tốc (C_{si}) của robot rắn

4.2.3. Bộ điều khiển toàn hệ thống



Hình 12: Sơ đồ mô phỏng toàn bộ hệ thống

Các thông số K_P , K_I , K_D , K_{P1} , K_{I1} , K_{D1} , K_{P2} , K_{I2} và K_{D2} của các bộ điều khiển PID của bộ điều khiển C_ϕ , C_v và C_ξ tối ưu thông số sử dụng giải thuật PSO: $n=50$ (kích thước quần thể), $bird_step=3$ (kích thước tìm kiếm); $dim = 9$ (số biến K_P , K_I , K_D của 3 bộ PID); $c_1 = 0.1$; $c_2 = 0.2$ (hệ số gia tốc); $w = 0.2$; trọng số PSO.

$$\text{Hàm thích nghi } fitness = \int_0^{+\infty} e^2(t) dt$$

Quá trình cập nhập particles dựa theo công thức (15), (16)

$$v_{i,m}^{(k+1)} = w.v_{i,m}^{(k)} + c_1 * rand() * (Pbest_{i,m} - x_{i,m}^{(k)}) + c_2 * Rand() * (Gbest_m - x_{i,m}^{(k)}) \quad (15)$$

$$x_{i,m}^{(k+1)} = x_{i,m}^{(k)} + v_{i,m}^{(k+1)}; i=1,...,n; m=1,...,d \quad (16)$$

Trong đó: P_{best} là giá trị tốt nhất cho đến thời điểm hiện tại của cá thể thứ i trong quần thể; G_{best} là vị trí tốt nhất của cá quần thể tại thời điểm hiện tại; k là số lần lặp lại; $v_{i,m}^{(k)}$: Vận tốc của cá thể thứ i tại thế hệ thứ k ; $rand()$ là một số ngẫu nhiên trong khoảng $(0,1)$; $x_{i,m}^{(k)}$ là vị trí cá thể thứ i tại thế hệ thứ k ; khởi động quần thể đầu tiên: khởi động ngẫu nhiên.

Hàm truyền của bộ điều khiển C_ϕ , C_v và C_ξ sau khi tự chỉnh định dùng giải thuật PSO:

$$C_\phi(s) = 48.5536 + 14.7446s$$

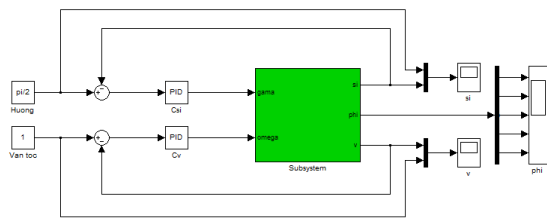
$$C_v(s) = 1.9219 + \frac{0.72078}{s} + 0.42089s$$

$$C_\xi(s) = 0.79193 + 0.3998s$$

5. Kết quả mô phỏng

Trong mô phỏng dưới đây, chúng ta sẽ mô phỏng với những thông số như sau: $n = 6$, $m_i = 1kg$ và $l_i = 1m$, $c_{t_i} = 0.1$,

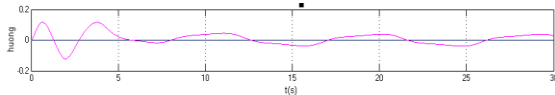
$$c_{n_i} = 10, \alpha = \frac{\pi}{6} \text{ rad và } \beta = \frac{2\pi}{6} \text{ rad.}$$



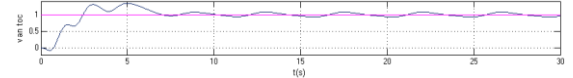
robot rắn trên phần mềm matlab

Kết quả mô phỏng với $\alpha = \frac{\pi}{6}$ rad,

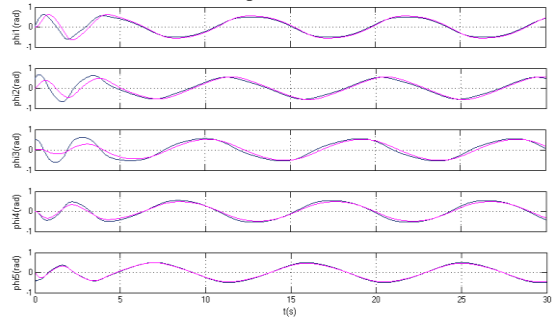
$$\beta = \frac{2\pi}{6} \text{ rad và } \xi^* = 0 \text{ (rad), } v^* = 1(m/s)$$



Hình 14: Đồ thị góc hướng ξ

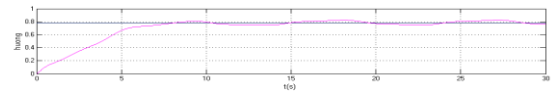


Hình 15: Đồ thị vận tốc v

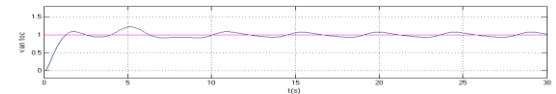


Hình 16: Đồ thị góc ϕ

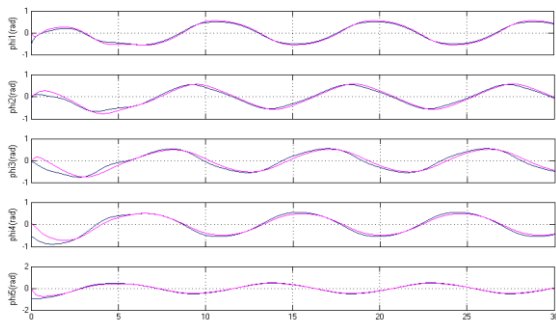
Kết quả mô phỏng với $\alpha = \frac{\pi}{6}$ rad, $\beta = \frac{2\pi}{6}$ rad và $\xi^* = \pi/4$ (rad), $v^* = 1(m/s)$



Hình 17: Đồ thị góc hướng ξ



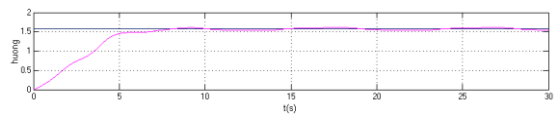
Hình 18: Đồ thị vận tốc v



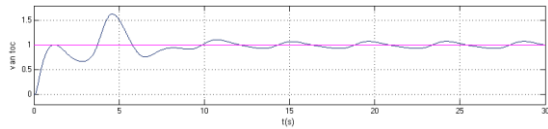
Hình 19 Đồ thị góc ϕ

Kết quả mô phỏng với $\alpha = \frac{\pi}{6}$ rad,

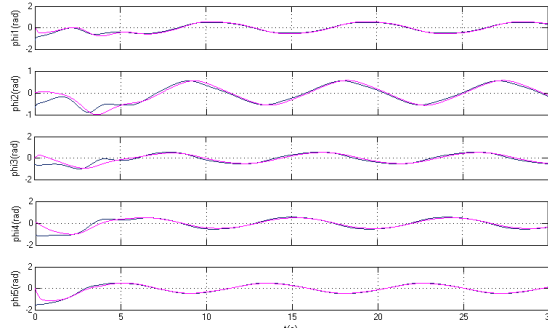
$$\beta = \frac{2\pi}{6} \text{ rad và } \xi^* = \pi/2 \text{ (rad), } v^* = 1(m/s)$$



Hình 20: Đồ thị hướng ξ



Hình 21: Đồ thị vận tốc v



Hình 22: Đồ thị góc ϕ

4. Kết luận

- Trên cơ sở phương trình động lực học chuyển động của robot rắn trong hai trường hợp ma sát nhớt và ma sát Coulomb, với phương trình chuyển động đã phân li, có thể xây dựng phương pháp điều khiển sao cho: (1) moment xoắn ở khớp u điều khiển

hình dáng ϕ của robot rắn; (2) hình dáng ϕ điều khiển ψ và ω của robot rắn.

- Sự chuyển động của robot rắn có thể thực hiện thông qua việc thay đổi việc thay đổi hình dạng ϕ của robot rắn để hình thành những đường cong serpenoid.

- Từ mô hình robot rắn với 6 đoạn ($n=6$), khối lượng mỗi đoạn $m_i = 1kg$, chiều dài mỗi đoạn $l_i = 1m$, $c_{ni} = 0.1$, $c_{ti} = 10$, $\alpha = \frac{\pi}{6}$

và $\beta = \frac{\pi}{3}$ thiết kế hệ thống điều khiển

bao gồm bộ điều khiển địa phương và bộ điều khiển vòng ngoài.

- Ứng dụng phương pháp giải thuật bầy đàn PSO để xác định các thông số của các bộ điều khiển PID.

- Mô phỏng hệ thống điều khiển trên Matlab, kiểm tra chất lượng và tính bền vững của hệ thống điều khiển.

*

THE MODELING AND OPERATION OF SOLID ROBOT

Nguyen Minh Tam, Nguyen Van Phuoc

University of Technical Education Ho Chi Minh City

ABSTRACT

On the base of the kinetic equation of the solid robot's movement in two cases: viscous friction and Coulomb friction, we study the method of controlling the solid robot's movement and design the PID control with optimal parameters by PSO swarm algorithm. The design study is tested by the simulation of the solid robot in the Matlab software.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. SAITO, M. FUKAYA AND T. IWASAKI (2002), "Serpentine locomotion with robotic snake", IEEE Control Systems Magazine, vol.22, No.1, pp.64-81.
- [2] P. PRAUTSCH, T. MITA, AND T. IWASAKI (2000), "Analysis and control of a gait of snake robot", Transactions of IEEJ, Industry Applications Society, vol.120-D, No.3, pp.372-381.
- [3] Y. SHAN AND Y. KOREN (1993), "Design and motion planning of a mechanical snake", IEEE Trans. Sys. Man Cyb., vol.23, no.4, pp.1091-1100.
- [4] M. NILSSON (1998), "Snake robot free climbing", IEEE Control Systems Magazine, vol.18, no.1, pp.21-26.
- [5] HASSAN K.KHALIL (2002), "Nonlinear Systems", Prentice-Hall.

- [6] JEAN – JACQUES E.SLOTINE AND WEIPING LI (1991), “*Applied Nonlinear Control*”, Prentice-Hall.
- [7] MORARI AND ZAFIRION (1989), “*Robust Process Control*”, Prentice-Hall.
- [8] H.DATE, Y. HOSHI AND M. SAMPEI (2000), *Locomotion control of a snake-like robot based on dynamic manipulability*, In IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, page 2236 – 2241.
- [9] H.DATE, Y. HOSHI AND M. SAMPEI (2001), *Control of a Snake Robot in Consideration of Constraint Force*, In IEEE Int. Conference on Control Applications, page 966 – 971.
- [10] H.DATE, Y. HOSHI AND M. SAMPEI (2001), *Locomotion control of a Snake Robot Constraint Force Attenuation*, Proceedings of the American Control Reference, Arlington VA June 25 – 27, page 113 – 118.
- [11] F. MATSUNO AND K. MOGI (2000), *Redundancy Controllable System and Control of Snake Robot Based on Kinematic Model*, In IEEE Int. Conference on Decision and Control, page 4791 – 4796.
- [12] NGUYỄN VĂN GIÁP (2000), *Ứng dụng Matlab trong điều khiển tự động*, NXB Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh.
- [13] NGUYỄN DOÃN PHƯỚC (2002), *Lí thuyết điều khiển tuyến tính*, NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2002.
- [14] NGUYỄN THỊ PHƯƠNG HÀ (2003), *Lí thuyết điều khiển tự động*, NXB Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh.
- [15] SHUGEN MA, NAOKY TADOKORO, BINLI, KOUSUKE INOUE (2003), “*Analysis of Creeping Locomotion of a Snake Robot on a Slope*”, in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics & Auto., Taipei, Taiwan, page 2073 – 2078.
- [16] JIM OSTROWSKI, JOEL BURDICK (1996), “*Gait Kinematics for a Serpentine Robot*”, in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics & Auto., Minneapolis, Minnesota, page 2073 – 2078.
- [17] JIM OSTROWSKI, JOEL BURDICK (2001), “*Development of a Creeping Snake-Robot*”, in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics & Auto., Banff, Alberta, Canada, page 77 – 82.
- [18] S. MA (1999), “*Analysis of snake movement forms for realization of snake-like robot*”, in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics & Auto., Detroit, MI, pp.3007–3013.
- [19] JIM OSTROWSKI, JOEL BURDICK (2002), “*Improvement of Manipulability for Locomotion of a Snake Robot by Mass Distribution*”, in SICE 2002, Aug, OSAKA, page 2214 – 2217.
- [20] YANSONG SHAN AND YORAM KOREN (1993), “*Design and Motion Planning of a Mechanical Snake*”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 23, No 4, page 1091 - 1100.
- [21] N. PILLAY (2008), *A Particle swarm optimization approach for tuning of SISO PID control loops* 2008.