

ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG ROBOT HAI CHÂN TRONG PHA MỘT CHÂN TRỤ THEO PHƯƠNG PHÁP TRƯỢT SỬ DỤNG MẠNG NƠON

NGUYỄN VĂN KHANG¹, TRỊNH QUỐC TRUNG²

¹Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội

²Trường Đại học Công nghệ - ĐHQGHN

Tóm tắt. Trong bài báo này trình bày ứng dụng phương pháp điều khiển trượt sử dụng mạng nơon để điều khiển robot hai chân trong pha bước. Bộ điều khiển này tỏ ra hiệu quả và ổn định khi so sánh với bộ điều khiển PD trong trường hợp robot hai chân có độ bất định và có nhiễu tác động lớn.

Từ khóa. Robot hai chân, động lực học ngược, điều khiển, mạng nơon.

Abstract. In this paper, an application of 5-link biped robotic control model is presented through the neural network sliding mode approach. The proposed controller shows efficiency and stability in comparison with the PD controller of biped robots with uncertainties and large noise effects.

Key words. Biped robot, inverse dynamics, control, neural networks.

1. MỞ ĐẦU

Robot dáng người (humanoid robot) là lĩnh vực khoa học đang được quan tâm nghiên cứu ở Nhật, Hàn Quốc, Mỹ, CHLB Đức, Trung Quốc và nhiều nước khác [1–11]. Một vài loại robot dáng người nổi tiếng trên thế giới là robot ASIMO của hãng HONDA, các phiên bản robot HRP của Viện AIST. Bên cạnh đó robot dáng người được nghiên cứu nhiều phục vụ trong lĩnh vực quân sự.

Về mặt cơ học robot dáng người được mô hình hóa bằng cơ hệ nhiều vật. Một dạng robot dáng người được quan tâm nghiên cứu là robot hai chân (biped robot). Mô hình robot hai chân được trình bày ở đây là mô hình robot có 5 khâu [2, 10, 11]. Đó là phần thân người và hai khâu cho mỗi chân. Phần trên của chân (upper leg) được gọi là đùi còn phần dưới của chân (lower leg) được gọi là cẳng chân. Các khâu này được nối với nhau thông qua 4 khớp quay (hai khớp hông và hai khớp đầu gối). Chuyển động của robot hai chân được chia ra làm 3 pha khác nhau. Đó là pha một chân trụ (single support phase), pha hai chân trụ (double support phase) và pha bay (air phase). Vị trí hai chân của robot đối với mặt tựa xác định robot đang ở pha nào. Người ta hay tập trung nghiên cứu về bước đi của robot và chuyển động của robot ở pha một chân trụ. Bởi lẽ khi robot bước đi các pha bước diễn ra xen kẽ nhau do đó để điều khiển được robot cần có sự chuyển mạch các phương trình vi phân chuyển động và chuyển mạch của bộ điều khiển khi tính toán lặp trong chương trình mô phỏng. Việc

* Bài báo được thực hiện với sự hỗ trợ từ Quỹ phát triển Khoa học và Công nghệ quốc gia (NAFOSTED), mã số 107.04-2012.10.

điều khiển này khá phức tạp. Nhằm hạn chế sự phức tạp này giả thiết rằng robot hai chân khi bước đi không có giai đoạn chuyển chân làm trụ (đó là thời điểm mà chân bước chạm mặt đất và chân làm trụ vẫn ở trên mặt đất). Do ta bỏ qua giai đoạn chuyển chân trụ nên do ảnh hưởng trọng trường làm tăng moment quay nhưng bù lại chương trình mô phỏng sẽ đơn giản hơn. Hơn nữa pha một chân trụ thường khó điều khiển hơn và tiêu tốn nhiều năng lượng hơn so với pha hai chân trụ nên việc bỏ qua pha hai chân trụ có thể chấp nhận được. Ngoài ra khi chuyển từ pha một chân trụ sang pha hai chân trụ cần phải nghiên cứu bài toán va chạm. Bài toán này là một bài toán phức tạp. Vì thế bước đầu ta có thể giới hạn nghiên cứu bài toán điều khiển robot hai chân trong pha một chân trụ.

Việc điều khiển robot hai chân bằng bộ điều khiển PD hoặc bộ điều khiển trượt đã được trình bày trong các tài liệu [10, 11]. Trong bài báo này, trên cơ sở mô hình động lực robot hai chân, năm khâu, chúng tôi áp dụng phương pháp mạng nơron [15, 16] nghiên cứu điều khiển chuyển động của robot hai chân.

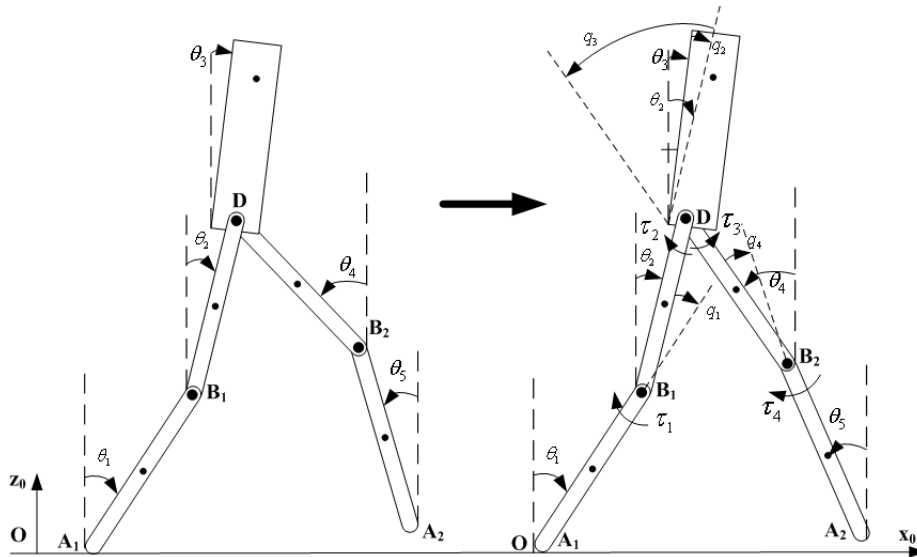
2. ĐỘNG LỰC HỌC ROBOT HAI CHÂN Ở PHA MỘT CHÂN TRỤ

Mô hình robot hai chân 5 khâu được biểu diễn bằng mô hình được minh họa trên hình 1 [2,10,11,20]. Trong đó m_i là khối lượng của khâu thứ i , l_i là chiều dài của khâu thứ i , a_i là khoảng cách từ trọng tâm của khâu thứ i tới khớp thấp hơn của khâu đó, I_i là moment quán tính của khâu với trục quay đi qua khối tâm của khâu i và vuông góc với mặt phẳng đối xứng dọc và θ_i là góc quay của khâu i so với phương thẳng đứng.

Phương trình động lực học robot hai chân 5 khâu ở pha một chân trụ với các góc và kí hiệu như trên được biểu diễn bằng hệ phương trình vi phân chuyển động sau [2, 20]

$$\mathbf{M}_\theta(\theta)\ddot{\theta} + \mathbf{C}_\theta(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + \mathbf{g}_\theta(\theta) + \mathbf{d}_\theta(\theta, \dot{\theta}) = \tau_\theta, \quad (1)$$

trong đó $\mathbf{M}_\theta(\theta)$ là ma trận khối lượng suy rộng, $\mathbf{C}_\theta(\theta, \dot{\theta})$ là ma trận ly tâm và coriolis, $\mathbf{g}_\theta(\theta)$ là vec tơ gia tốc trọng trường và τ_θ là vec tơ moment tác động lên khớp.



Hình 1. Mô hình robot hai chân 5 khâu

Phương trình (1) là phương trình động lực học robot hai chân trong hệ tọa độ khớp tuyệt đối. Liên hệ giữa các góc khớp tuyệt đối và góc khớp tương đối (hình 1) được biểu diễn như sau

$$q_0 = \theta_1; q_1 = \theta_1 - \theta_2; q_2 = \theta_2 - \theta_3; q_3 = -\theta_3 + \theta_4; q_4 = -\theta_4 + \theta_5. \quad (2)$$

Gọi \mathbf{R} là ma trận chuyển từ hệ tọa độ khớp tương đối sang hệ tọa độ khớp tuyệt đối

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Ta có quan hệ $\theta = \mathbf{R}\mathbf{q}$. Khi đó phương trình vi phân chuyển động của robot hai chân trong hệ tọa độ khớp tương đối được biểu diễn dưới dạng

$$\mathbf{M}_q(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_q(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}_q(\mathbf{q}) + \mathbf{d}_q(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau}_q, \quad (4)$$

trong đó $\mathbf{M}_q(\mathbf{q}) = \mathbf{R}^T \mathbf{M}_\theta(\mathbf{R}\mathbf{q}) \mathbf{R}$, $\mathbf{C}_q(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{R}^T \mathbf{C}_\theta(\mathbf{R}\mathbf{q}, \mathbf{R}\dot{\mathbf{q}}) \mathbf{R}$, $\mathbf{g}_q(\mathbf{q}) = \mathbf{R}^T \mathbf{g}_\theta(\theta) = \mathbf{R}^T \mathbf{g}_\theta(\mathbf{R}\mathbf{q})$, $\boldsymbol{\tau}_q = \mathbf{R}^T \boldsymbol{\tau}_\theta$. với $\boldsymbol{\tau}_q = [0, \tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4]^T$ với τ_i ($i = \overline{1, 4}$) là các mô men phát động. Phương trình đầu tiên của hệ (4) được gọi là phương trình liên kết động lực học

$$\sum_{i=0}^4 m_{1,i+1}^q(\mathbf{q})\ddot{q}_i + \sum_{i=0}^4 c_{1,i+1}^q(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{q}_i + g_1^q(\mathbf{q}) + d_1^q(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = 0. \quad (5)$$

Chú ý rằng đối tượng được nghiên cứu ở đây khi xét pha bước có 5 bậc tự do nhưng số động cơ được lắp cho mô hình robot này chỉ là 4 (hai động cơ lắp ở hông và hai động cơ lắp ở đầu gối). Như thế, số bậc tự do của cơ hệ lớn hơn số động cơ. Một hệ như vậy được gọi là hệ hụt dẫn động (underactuated mechanical system). Do đó có 4 góc khớp điều khiển được và một góc khớp không điều khiển được.

Một cách tổng quát tọa độ suy rộng $\mathbf{q} \in \mathbf{R}^n$ được tách thành $\mathbf{q}_x \in \mathbf{R}^m$ là các tọa độ suy rộng không điều khiển và $\mathbf{q}_y \in \mathbf{R}^l$ là các tọa độ suy rộng điều khiển, $n = m + l$. Phương trình vi phân chuyển động của hệ hụt dẫn động có thể viết dưới dạng tổng quát như sau

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{xx} & \mathbf{M}_{xy} \\ \mathbf{M}_{yx} & \mathbf{M}_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_x \\ \ddot{\mathbf{q}}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{xx} & \mathbf{C}_{xy} \\ \mathbf{C}_{yx} & \mathbf{C}_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_x \\ \dot{\mathbf{q}}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{g}_x(\mathbf{q}) \\ \mathbf{g}_y(\mathbf{q}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{d}_x(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \\ \mathbf{d}_y(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Hệ phương trình vi phân chuyển động (6) sẽ được sử dụng cho bài toán điều khiển được nêu ở mục dưới đây.

3. ĐIỀU KHIỂN ROBOT HAI CHÂN Ở PHA MỘT CHÂN TRỤ THEO NGUYÊN LÝ TRƯỢT SỬ DỤNG MẠNG NƠN

3.1. Điều khiển robot dạng chuỗi theo nguyên lý trượt sử dụng mạng nơon

Phương trình vi phân chuyển động của hệ nhiều vật có cấu trúc mạch vòng f bậc tự do có dạng thu gọn như sau

$$\hat{\mathbf{M}}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{g}}(\mathbf{q}) + \mathbf{d}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \hat{\boldsymbol{\tau}}. \quad (7)$$

Theo [15] ta có

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= \hat{\tau} \\
 \mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) &= \tau \\
 \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) &= \Delta \mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \Delta \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} + \Delta \mathbf{g} + \mathbf{d}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \\
 \hat{\tau} &= \tau + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})
 \end{aligned} \tag{8}$$

Trong đó ma trận $\hat{\mathbf{M}}(\mathbf{q})$, $\hat{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, $\hat{\mathbf{g}}(\mathbf{q})$ có thể xác định được gần đúng, $\mathbf{M}(\mathbf{q})$, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ là các ma trận hoặc vectơ chính xác của hệ, còn $\Delta \mathbf{M}(\mathbf{q})$, $\Delta \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, $\Delta \mathbf{g}(\mathbf{q})$ là các ẩn biểu thị sai số. Ta chấp nhận giả thiết sau $\Delta \mathbf{M}(\mathbf{q}) \leq m_0$, $\Delta \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \leq c_0$, $\Delta \mathbf{g}(\mathbf{q}) \leq g_0$.

Giả sử \mathbf{q}_d là vectơ chuyển động mong muốn. Sai lệch vị trí được định nghĩa $\mathbf{e}(t) = \mathbf{q}(t) - \mathbf{q}_d(t)$ và mặt trượt được chọn dưới dạng PD như sau

$$\mathbf{v}(t) = \dot{\mathbf{e}}(t) + \Lambda \mathbf{e}(t) \tag{9}$$

trong đó tính bất định của hàm $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})$ chính là nguyên nhân làm giảm chất lượng của quá trình điều khiển. Nếu chúng ta thực hiện bù thành phần phi tuyến bất định này thì chất lượng của quá trình điều khiển có thể được cải thiện. Theo định lý Stone - Weierstrass ta có thể chọn được một mạng nơron nhân tạo có khả năng xấp xỉ một hàm phi tuyến với độ chính xác cho trước. Để xấp xỉ hàm $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})$ ta chọn cấu trúc mạng như sau

$$\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) = \mathbf{W}\sigma + \varepsilon = \hat{\mathbf{h}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) + \varepsilon \tag{10}$$

trong đó $\hat{\mathbf{h}} = [\hat{h}_1, \hat{h}_2, \dots, \hat{h}_n] = \mathbf{W}\sigma$ là xấp xỉ của $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})$ và ε là sai số xấp xỉ. Nếu $\|\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})\| \leq h_0$ thì ta có thể có $\|\varepsilon\| \leq \varepsilon_0$. Gọi \mathbf{w}_i là vec tơ cột thứ i của ma trận \mathbf{W} ta có

$$\hat{\mathbf{h}} = \mathbf{W}\sigma = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_n] \sigma. \tag{11}$$

Trong tài liệu này mạng nơron nhân tạo được chọn sử dụng là mạng nơron RBF (Radial Basis Function) [15]. Cấu trúc này đã được chứng minh có khả năng xấp xỉ một hàm phi tuyến và đạt độ chính xác ε cho trước với số nút nơron hữu hạn.

Chọn hàm tác động σ_i dạng phân bố Gauss ta có

$$\sigma_i = \exp \left[-\frac{(s_i - c_i)^2}{\lambda_i^2} \right], \tag{12}$$

trong đó c_i là trọng tâm, λ_i là tham số chuẩn hóa có thể tùy chọn của hàm Gauss σ_i .

Định lý. Quỹ đạo $\mathbf{q}(t)$ của hệ động lực (7) với mạng nơron và (11) và (12) và mặt trượt (9) sẽ bám theo quỹ đạo mong muốn $\mathbf{q}_d(t)$ với sai số $\mathbf{e} \rightarrow \mathbf{0}$. Nên ta chọn luật điều khiển $\mathbf{u}(t)$ và thuật học mạng nơron như sau

$$\mathbf{u} = \mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{g} - \mathbf{M}\Lambda\dot{\mathbf{e}} - \mathbf{C}\Lambda\mathbf{e} - \mathbf{K}\mathbf{v} - \gamma \frac{\mathbf{v}}{\|\mathbf{v}\|} + (1 + \eta) \mathbf{W}\sigma, \tag{13}$$

$$\dot{\mathbf{w}}_i = -\eta \mathbf{v} \sigma_i \tag{14}$$

trong đó ma trận \mathbf{K} là ma trận đối xứng xác định dương với các tham số tự chọn $\gamma, \eta > 0$.

3.2. Điều khiển robot hai chân theo nguyên lý trượt sử dụng mạng nơron

Xét hệ phương trình vi phân rút ra từ hệ (6)

$$\mathbf{M}_{yy}\ddot{\mathbf{q}}_y + \mathbf{C}_{yy}\dot{\mathbf{q}}_y + \mathbf{g}_y(\mathbf{q}) + \mathbf{C}_{yx}\dot{\mathbf{q}}_x + \mathbf{h}_y(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) + \mathbf{M}_{yx}\ddot{\mathbf{q}}_x = \hat{\tau}. \quad (15)$$

Như đã nói ở trên \mathbf{q}_x là thành phần không điều khiển, hệ phương trình vi phân chuyển động (15) viết lại như sau

$$\mathbf{M}_{yy}\ddot{\mathbf{q}}_y + \mathbf{C}_{yy}\dot{\mathbf{q}}_y + \mathbf{C}_{yx}\dot{\mathbf{q}}_x + \mathbf{g}_y(\mathbf{q}) + \mathbf{h}^*(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) = \hat{\tau}, \quad (16)$$

trong đó $\mathbf{h}^*(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) = \mathbf{h}_y(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) + \mathbf{M}_{yx}\ddot{\mathbf{q}}_x$ là thành phần bất định. Ma trận \mathbf{M}_{yy} và \mathbf{C}_{yy} thoả mãn đầy đủ tính chất của ma trận \mathbf{M} và \mathbf{C} . Đó là

- Ma trận \mathbf{M}_{yy} là ma trận đối xứng xác định dương.
- Ma trận $\dot{\mathbf{M}}_{yy} - 2\mathbf{C}_{yy}$ là ma trận đối xứng lệch.

Từ đó áp dụng nguyên lý điều khiển trượt sử dụng mạng nơron cho robot hai chân như sau.

$$\mathbf{u} = \mathbf{M}_{yy}\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{C}_{yy}\dot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{C}_{yx}\dot{\mathbf{q}}_x + \mathbf{g}_y - \mathbf{M}_{yy}\Lambda\dot{\mathbf{e}} - \mathbf{C}_{yy}\Lambda\mathbf{e} - \mathbf{K}\mathbf{v} - \gamma\frac{\mathbf{v}}{\|\mathbf{v}\|} + (1 + \eta)\mathbf{W}\sigma \quad (17)$$

với thuật học

$$\dot{\mathbf{w}}_i = -\eta\mathbf{v}\sigma_i. \quad (18)$$

Ta sẽ chứng minh định lý này bằng cách áp dụng phương pháp trực tiếp Lyapunov về ổn định tiệm cận. Chọn hàm xác định dương

$$V(t) = \frac{1}{2} \left(\mathbf{v}^T \mathbf{M}_{yy} \mathbf{v} + \sum_{i=1}^n \mathbf{w}_i^T \mathbf{w}_i \right) > 0 \quad (\mathbf{v}^T, \mathbf{w}^T) \neq 0 \quad (19)$$

$$V(t) = 0 \quad (\mathbf{v}^T, \mathbf{w}^T) = 0.$$

Đạo hàm hàm $V(t) = 0$ theo thời gian ta được

$$\dot{V}(t) = \mathbf{v}^T \mathbf{M}_{yy} \dot{\mathbf{v}} + \frac{1}{2} \mathbf{v}^T \dot{\mathbf{M}}_{yy} \mathbf{v} + \sum_{i=1}^n \mathbf{w}_i^T \dot{\mathbf{w}}_i. \quad (20)$$

Sử dụng tính chất đối xứng lệch của ma trận $\dot{\mathbf{M}}_{yy} - 2\mathbf{C}_{yy}$ ta có

$$\mathbf{v}^T (\mathbf{M}_{yy} - 2\mathbf{C}_{yy}) \mathbf{v} = 0 \Leftrightarrow \mathbf{v}^T \dot{\mathbf{M}}_{yy} \mathbf{v} = 2\mathbf{v}^T \mathbf{C}_{yy} \mathbf{v}. \quad (21)$$

Thế (21) vào phương trình (20) ta được

$$\dot{V}(t) = \mathbf{v}^T (\mathbf{M}_{yy} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{yy} \mathbf{v}) + \sum_{i=1}^n \mathbf{w}_i^T \dot{\mathbf{w}}_i. \quad (22)$$

Chú ý đến quan hệ (9) ta có

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{yy} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{yy} \mathbf{v} &= \mathbf{M}_{yy} (\ddot{\mathbf{e}} + \Lambda\dot{\mathbf{e}}) + \mathbf{C}_{yy} (\dot{\mathbf{e}} + \Lambda\mathbf{e}) = \\ &= \mathbf{M}_{yy} (-\ddot{\mathbf{q}}_d + \Lambda\dot{\mathbf{e}}) + \mathbf{C}_{yy} (-\dot{\mathbf{q}}_d + \Lambda\mathbf{e}) + \mathbf{C}_{yy} \dot{\mathbf{q}}_y + \mathbf{M}_{yy} \ddot{\mathbf{q}}_y \end{aligned} \quad (23)$$

Từ hệ phương trình (16) ta có

$$\mathbf{C}_{yy}\dot{\mathbf{q}}_y + \mathbf{M}_{yy}\ddot{\mathbf{q}}_y = \hat{\tau} - \mathbf{g}_y(\mathbf{q}) - \mathbf{C}_{yx}\dot{\mathbf{q}}_x - \mathbf{h}^*(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}). \quad (24)$$

Thay (24) vào (23) ta được

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{yy}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{yy}\mathbf{v} &= \mathbf{M}_{yy}(-\ddot{\mathbf{q}}_d + \Lambda\dot{\mathbf{e}}) + \mathbf{C}_{yy}(-\dot{\mathbf{q}}_d + \Lambda\mathbf{e}) \\ &\quad + \hat{\tau} - \mathbf{g}_y(\mathbf{q}) - \mathbf{C}_{yx}\dot{\mathbf{q}}_x - \mathbf{h}^*(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}). \end{aligned} \quad (25)$$

Thế phương trình (25) vào phương trình (20) ta có

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{v}^T [\mathbf{M}_{yy}(-\ddot{\mathbf{q}}_d + \Lambda\dot{\mathbf{e}}) + \mathbf{C}_{yy}(-\dot{\mathbf{q}}_d + \Lambda\mathbf{e}) + \hat{\tau} \\ &\quad - \mathbf{g}_y(\mathbf{q}) - \mathbf{C}_{yx}\dot{\mathbf{q}}_x - \mathbf{W}\sigma - \varepsilon] + \sum_{i=1}^n \mathbf{w}_i^T \dot{\mathbf{w}}_i. \end{aligned} \quad (26)$$

Chọn $\mathbf{u}(t)$ theo (17) và cho $\mathbf{u} = \hat{\tau}$ từ phương trình (26) ta có

$$\dot{V} = \mathbf{v}^T \left[-\mathbf{K}\mathbf{v} - \gamma \frac{\mathbf{v}}{\|\mathbf{v}\|} + \eta \mathbf{W}\sigma - \varepsilon \right] + \sum_{i=1}^n \mathbf{w}_i^T \dot{\mathbf{w}}_i. \quad (27)$$

Chú ý đến thuật học (18) thành phần cuối trong (27) có dạng

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{w}_i^T \dot{\mathbf{w}}_i = -\eta \sum_{i=1}^n \mathbf{w}_i^T \mathbf{v}\sigma_i = -\eta \mathbf{v}^T \mathbf{W}\sigma. \quad (28)$$

Thay (28) vào (27) ta được

$$\dot{V} = -\mathbf{v}^T \mathbf{K}\mathbf{v} - \gamma \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{v}}{\|\mathbf{v}\|} - \mathbf{v}^T \varepsilon. \quad (29)$$

Nếu chọn $\gamma = \delta + \varepsilon$ với $\delta > 0$ ta có

$$\dot{V}(t) = -\mathbf{v}^T \mathbf{K}\mathbf{v} - \delta \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{v}}{\|\mathbf{v}\|} - \left(\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{v}}{\|\mathbf{v}\|} \varepsilon + \varepsilon_0 \right). \quad (30)$$

Do $\|\varepsilon\| \leq \varepsilon_0$ nên $\dot{V}(t) < 0$ với mọi $\mathbf{v} \neq \mathbf{0}$. Và $\dot{V}(t) = 0$ khi và chỉ khi $\mathbf{v} = \mathbf{0}$. Theo định lý Liapunov là ổn định thì $\mathbf{v} \rightarrow \mathbf{0}$, $\mathbf{e}(t) = \mathbf{q}(t) - \mathbf{q}_d(t) \rightarrow \mathbf{0}$.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG SỐ

Để có thể mô phỏng số, cần biết các tham số động học và động lực học của robot. Giá trị của các tham số này được chọn như trong các tài liệu [10, 11] và cho dưới dạng như bảng 1. Mô phỏng bộ điều khiển neuron theo nguyên lý trượt được thực hiện bằng công cụ SIMULINK của MATLAB, các giá trị góc khớp tương đối mong muốn được trình bày như trong [20], kết quả mô phỏng cho một bước đi ổn định. Giả sử độ bất định của mô hình là 30%: $\Delta \mathbf{M} = 30\% \mathbf{M}$, $\Delta \mathbf{C} = 30\% \mathbf{C}$, $\Delta \mathbf{g} = 30\% \mathbf{g}$.

Bộ điều khiển PD: Chọn các tham số $\lambda_i = 100$ thì $\mathbf{K}_D = \text{diag}([200, 200, 200, 200])$,

Bảng 1. Các thông số của robot hai chân

Khâu	Chỉ số	Khối lượng m_i [kg]	Chiều dài l_i [m]	Vị trí trọng tâm a_i [m]	Moment quán tính I_i [kgm ²]
Thân trên	3	14.79	0.486	0.282	3.3×10^{-2}
Đùi	2,4	5.28	0.302	0.236	3.3×10^{-2}
Chân	1,5	2.23	0.332	0.189	3.3×10^{-2}

$$\mathbf{K}_P = \text{diag}([1000, 1000, 1000, 1000]).$$

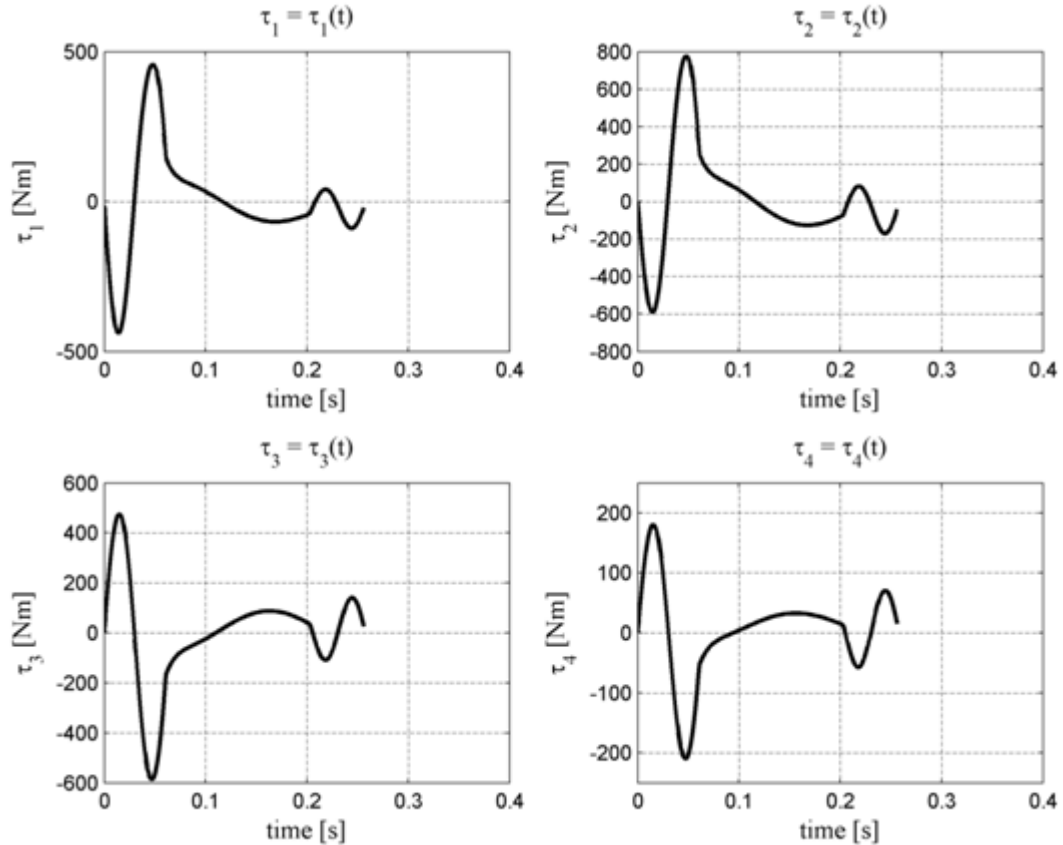
Bộ điều khiển trượt: Chọn các tham số như sau $\mathbf{K}_{ps} = \text{diag}([10, 10, 10, 10])$,

$$\mathbf{K}_s = \text{diag}([5000, 5000, 5000, 5000]) \text{ và } \Lambda = \text{diag}([10, 10, 10, 10]).$$

Bộ điều khiển nơron: Chọn các tham số $\lambda_i = 10$, $c_i = 0.1$, $\gamma = 1$, $\eta = 700$,

$$\Lambda = \text{diag}([5, 5, 5, 5]), \mathbf{K} = \text{diag}([400, 400, 400, 400]).$$

Một phần các kết quả mô phỏng số được trình bày trên các hình từ hình 2 đến hình 7. Trong đó hình 2, hình 4 và hình 6 là đồ thị mô men phát động của các bộ điều khiển. Các hình 3, 5 và 7 cho biết độ chính xác của các phương pháp điều khiển. Qua các kết quả tính ta thấy: khi độ bất định của mô hình lớn, độ chính xác của phương pháp PD kém hơn hẳn, độ chính xác của phương pháp điều khiển nơron tốt nhất trong ba phương pháp.



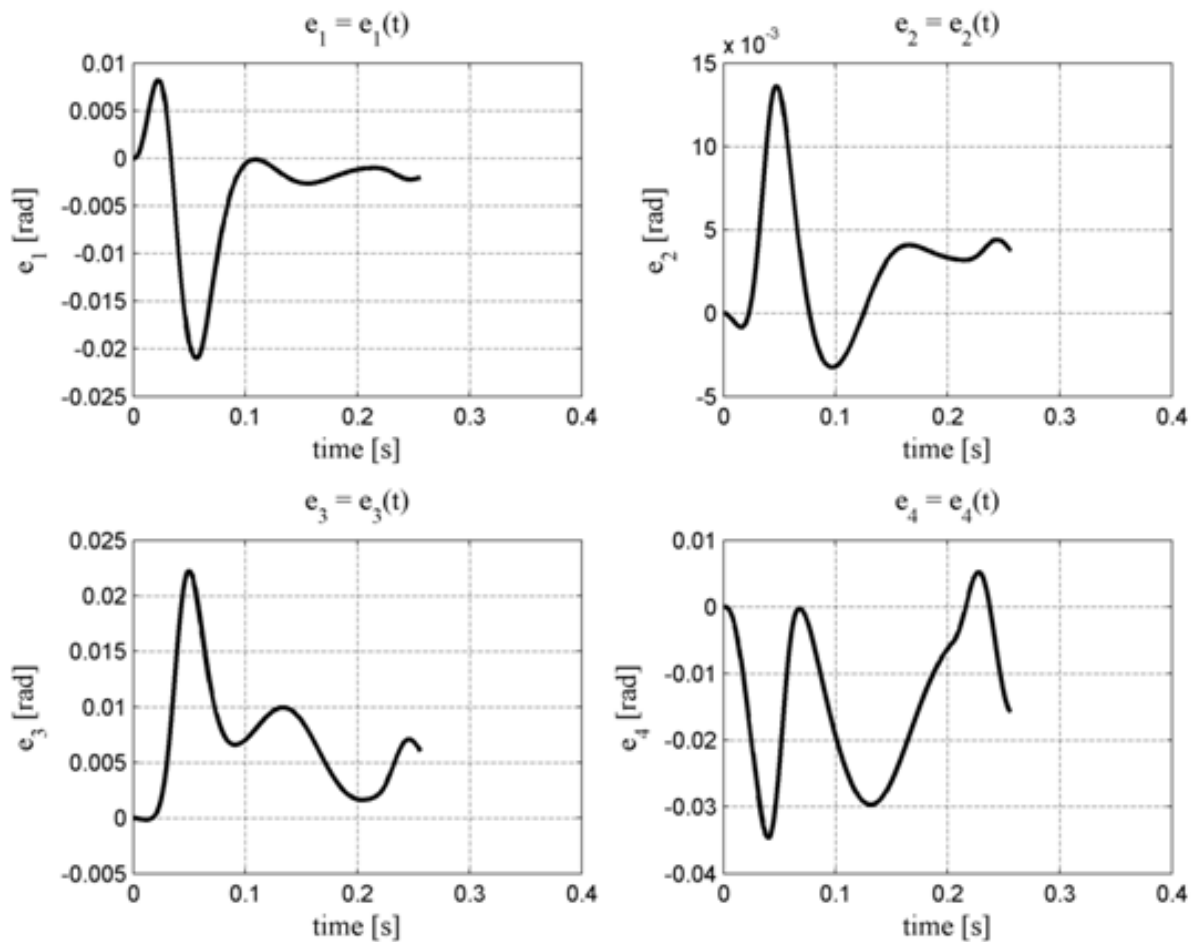
Hình 2. Đồ thị mô men phát động bộ điều khiển PD

5. KẾT LUẬN

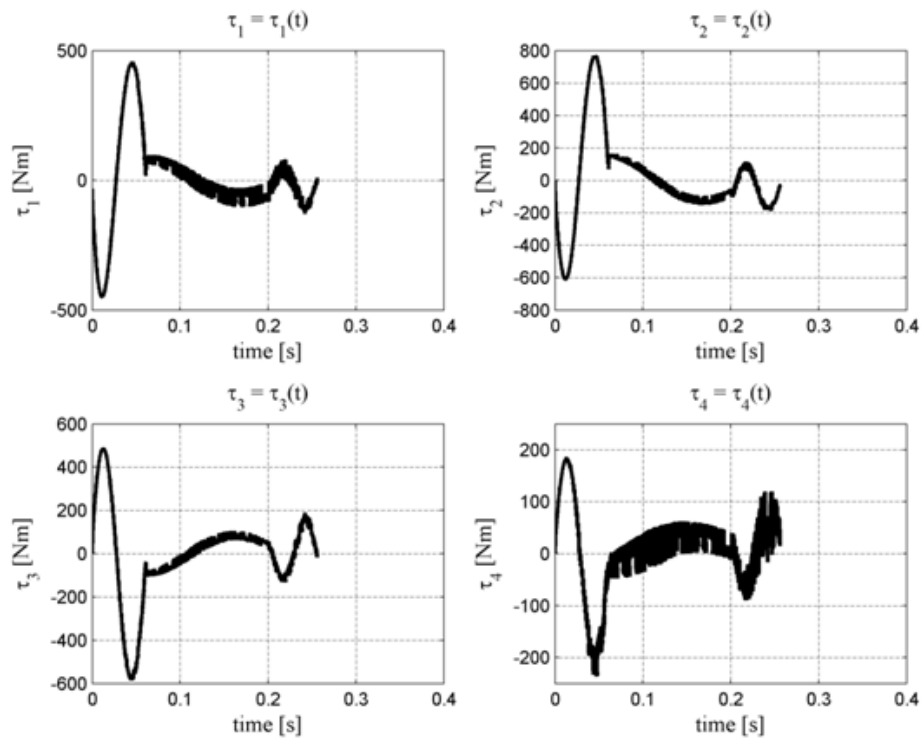
Việc nghiên cứu chế tạo robot dáng người đang được quan tâm ở một vài trường đại học ở nước ta. Tuy nhiên, việc nghiên cứu động học, động lực học và điều khiển robot dáng người là bài toán còn ít được quan tâm nghiên cứu. Mô hình động lực của robot hai chân là hệ nhiều vật có cấu trúc thay đổi. Trong đó ta cũng phải quan tâm đến bài toán va chạm và tiếp xúc.

Trong bài báo này, sử dụng mô hình hệ 5 vật rắn, chúng tôi đã thiết lập phương trình vi phân chuyển động của robot hai chân. Sau đó tiến hành điều khiển robot hai chân trong pha một chân trụ bằng phương pháp sử dụng mạng nơron. Bài toán điều khiển ở đây là điều khiển robot hệt dẫn động.

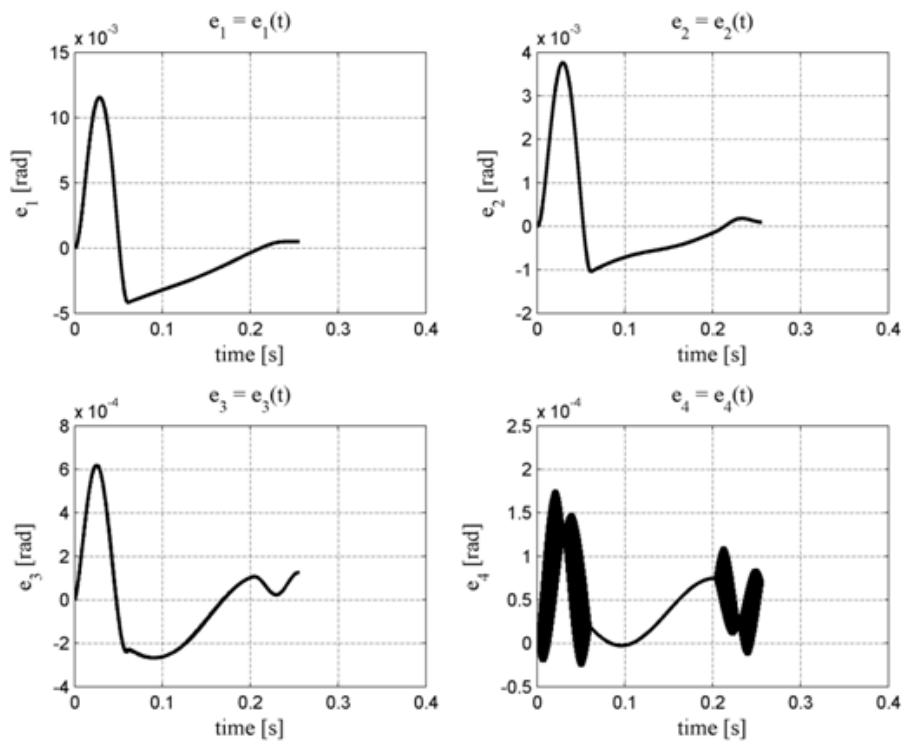
Việc điều khiển robot trong pha hai chân trụ và pha bay là những bài toán đang được nghiên cứu tiếp.



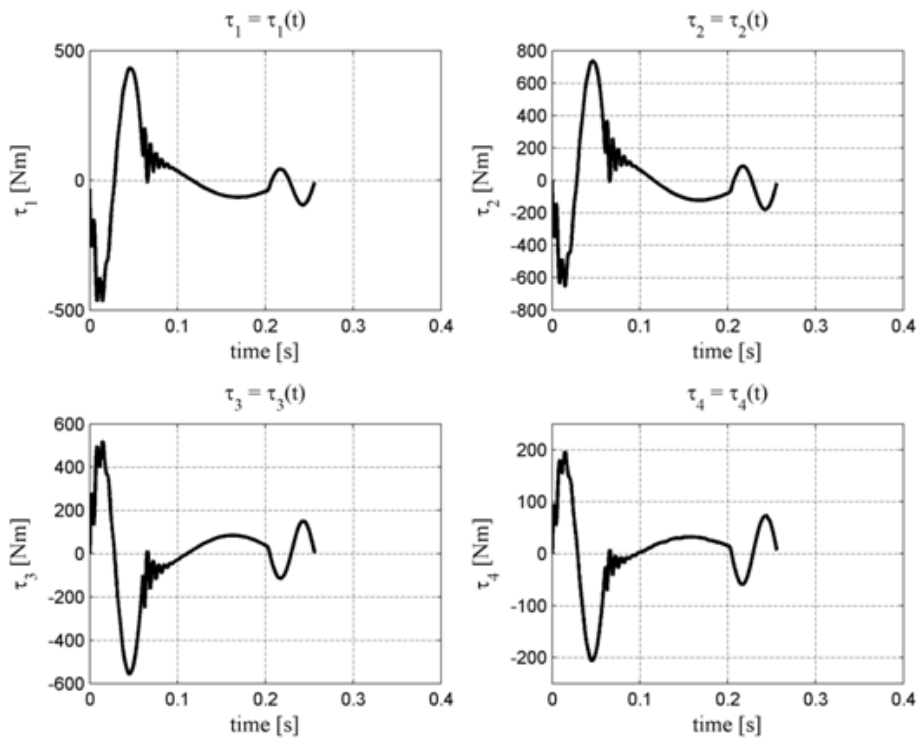
Hình 3. Đồ thị sai số góc khớp tương đối với bộ điều khiển PD



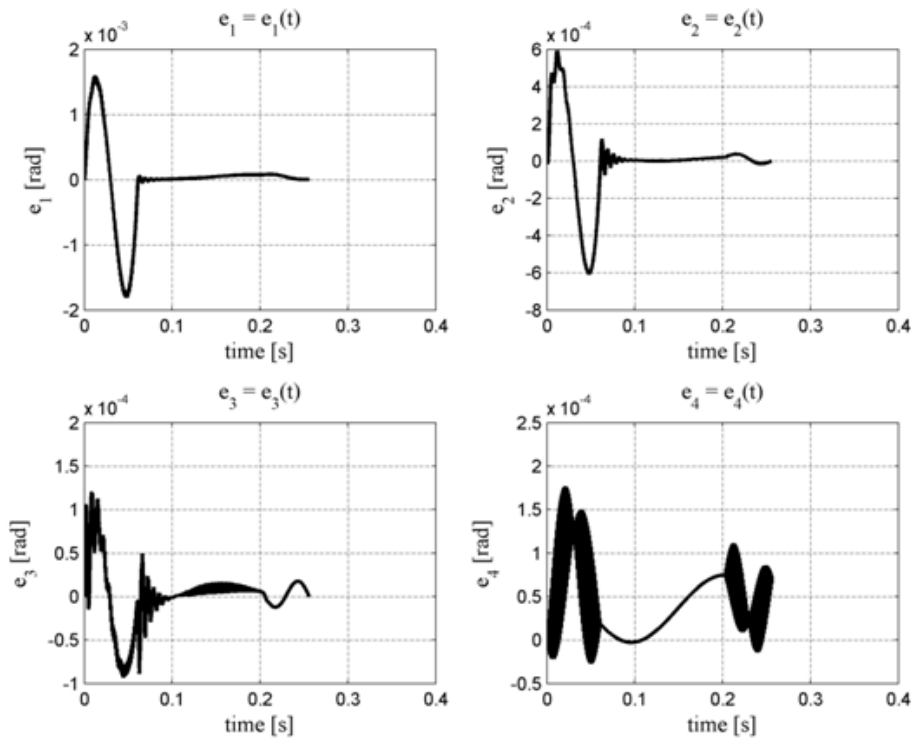
Hình 4. Đồ thị mômen phát động bộ điều khiển trượt



Hình 5. Đồ thị sai số góc khớp tương đối với bộ điều khiển trượt



Hình 6. Đồ thị mô men phát động bộ điều khiển nơon



Hình 7. Đồ thị sai số góc khớp tương đối với bộ điều khiển nơon

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] C. Shih, Gait synthesis for a biped robot, *Robotica* **15** (1997) 599–607.
- [2] J. Gao, “Ein Beitrag zur stoßfreien Gehbewegung”, PhD Thesis, University of Stuttgart, VDI Verlag, Düsseldorf, 1992.
- [3] S. Gruber, “Zur Dynamics und Regelung zweibeiniger Gehmaschinen”, PhD Thesis, University of stuttgart, VDI Verlag, Düsseldorf, 2004.
- [4] M. Ackermann, “Dynamics and Energetics of Walking with Protheses”, PhD Thesis, Institute of Engineering and Computational Mechanics, Univesity of Stuttgart, 2007.
- [5] M. H. Raibert, *Legged Robots that Balance*, MIT Press, Cambridge, MA, 1986.
- [6] M. H. P. Dekker, *Zero-moment point method for stable biped walking*, Eindhoven, 2009.
- [7] Vukobratović M., Borovac B., Note on the article zero-moment point-thirty five years of its life, *Int. J. Humanoid Robotics* **1** (2004) 161–162.
- [8] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi and H. Hirukawa, Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point, *Proceedings of the 2003 IEEE, International Conference on Robotics & Automation*, Taipei, Taiwan, September 14-19, 2003.
- [9] Qiang Huang, Kazuhito Yokoi, Shuuji Kajita, Kenji Kaneko, Hirohiko Arai, Noriho Koyachi, Kazuo Tanie, Planning walking patterns for a biped robot, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **17** (2001) 280–289.
- [10] S. Tzafestas, M. Raibert, C. Tzafestas, Robust sliding mode control applied to a 5-link biped robot, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* **15** (1996) 67–133.
- [11] H. K. Lum, M. Zribi, Y. C. Soh, Planning and control of a biped robot, *International Journal of Engineering Science* **37** (1999) 1319–1349.
- [12] Nguyen Van Khang, Consistent definition of partial derivatives of matrix functions in dynamics of mechanical systems, *Mechanism and Machine Theory* **45** (2010) 981–988.
- [13] Nguyen Van Khang, Kronecker Product and a new matrix form of Lagrangian equations with multipliers for constrained multibody systems, *Mechanics Research Communications* **38** (2011) 294–299.
- [14] V. L. Utkin, *Sliding Mode in Control and Optimization*, Springer Verlag, NewYork, 1992.
- [15] Cat, P. T., Hiep, N. T., Robust PID sliding mode control of robot manipulators with online learning neural networks, *Proc. of the European Control Conference*, Budapest, Hungary, August 23-26, 2009 (2187–2192).
- [16] Phạm Thượng Cát, *Một số phương pháp điều khiển hiện đại cho robot công nghiệp*, Nhà xuất bản Đại học Thái Nguyên, 2009.
- [17] Nguyễn Văn Khang, *Động lực học hệ nhiều vật*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội 2007.
- [18] Nguyễn Văn Khang, Chu Anh Mỹ, *Cơ sở robot công nghiệp*, Nhà xuất bản Giáo dục Việt Nam, Hà Nội 2010.
- [19] Nguyễn Văn Khang, Nguyễn Quang Hoàng, Lê Đức Đạt, Trần Hoàng Nam, Về một thuật toán điều khiển trượt robot dư dẫn động, *Tạp chí Tin học và Điều khiển học* **24** (3) (2008) 269–280.
- [20] Trịnh Quốc Trung, “Động lực học và điều khiển robot đi hai chân”, Luận văn Thạc sỹ khoa học, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, 2013.

Ngày nhận bài 20 - 6 - 2013

Nhận lại sau sửa ngày 07 - 4 - 2014