Tạp chí Tin học và Điều khiển học, T.24, S.4 (2008), 332–341

ĐIỀU KHIỂN RÔBỐT N BẬC TỰ DO CÓ NHIỀU THAM SỐ BẤT ĐỊNH TRONG KHÔNG GIAN ĐỀ CÁC

PHẠM THƯỢNG CÁT

Viện Công nghệ thông tin, Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Abstract. The paper proposes a new method for tracking control of n-DOF robot with dynamic and Jacobian uncertainties in Cartesian space. Robot dynamics and Jacobian are highly nonlinear with many uncertainties such as static and viscous frictions, inertia matrix, center of gravity of links. So the traditional robot control methods like PD control with gravity compensation, computed torque control usually are not adequate. The paper consists of 4 parts. In the first part we raise the main purpose of the paper and give a short summary about recently published results related to the Cartesian robot controls. In the second part, the mathematical formation of the Cartesian control problem of robot manipulator with dynamic and Jacobian uncertainties is given. The 3rd part presents the proposed method. The main idea is using a neural network with on-line learning law to approximate the unknown part in the overall system model, and an adaptive signal is generated from the neural network output signals to compensate the uncertainties in the closed loop control of the robot joints torques. The asymptotical stability of the overall system is proved by Lyapunov direct method. Finally some conclusion remarks and future extensions of the idea are listed in the 4th part.

Tóm tắt. Báo cáo đề xuất phương pháp điều khiển rôbôt n bậc tự do bám theo qũy đạo mong muốn trong không gian Đề các khi không biết chính xác mô hình của rôbôt. Rôbôt là một hệ nhiều vật với hệ động lực phi tuyến có nhiều tham số bất định như ma sát tĩnh và nhớt, mômen quán tính, trọng tâm của các khớp ... Mặt khác bài tóan điều khiển bám trong không gian Đề các còn đòi hỏi phải biết chính xác hệ phương trình động học và ma trận Jacobi của rôbôt. Báo cáo gồm 4 phần. Phần mở đầu nêu ý nghĩa của bài tóan điều khiển rôbôt có nhiều tham số bất định trong không gian Đề các và tóm tắt các kết quả nghiên cứu liên quan trên thế giới. Phần 2 mô tả hệ phương trình động lực (dynamics) và động học (kinematics) của rôbôt có nhiều tham số bất định. Phần 3 đề xuất phương pháp điều khiển sử dụng mạng nơ ron được học on-line để bù các tác động của các tham số bất định. Tính ổn định tiệm cận tòan cục của hệ điều khiển được chứng minh bằng phương pháp ổn định Lyapunov. Phần kết luận nêu một số nhận xét và định hướng nghiên cứu tiếp tục.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Rôbôt được nghiên cứu phát triển và ứng dụng trong nhiều lĩnh vực kinh tế và an ninh quốc phòng. Rôbôt công nghiệp có các khớp kết nối từ bệ rôbôt đến đầu tay nắm rôbôt. Tay nắm rôbôt thường kẹp các dao cụ và tiến hành các công việc như hàn, phay, doa, sơn ... được mô tả trong không gian Đề các. Tuy nhiên rôbôt lại được điều khiển qua các động cơ chuyển động được gắn ở các khớp rôbôt. Để có thể điều khiển rôbôt chuyển động theo qũy đạo mong muốn ta phải xây dựng được mô hình tóan học chính xác của rôbôt qua các hệ phương trình động lực (dynamics) và hệ phương trình động học (kinematics) của rôbôt. Hệ phương trình động lực và động học của rôbôt n bậc tự do có tính phi tuyến cao, có các tác động xuyên chéo giữa các khớp và nhiều hàm lượng giác. Một thách thức lớn của việc xác định các hệ phương trình này là nhiều tham số động lực của rôbôt không xác định được chính xác như hệ số ma sát, mômen quán tính, trọng tâm của các khớp và các đặc tính phi tuyến của các khâu truyền động vv.. Với nhiều tham số bất định các phương pháp điều khiển rôbôt cổ điển như điều khiển PID với bù

tốc trọng trường, phương pháp tính mômen... [1, 2] thường không mang lại kết quả mong muốn.

Thời gian gần đây có nhiều tác giả đã nghiên cứu đề xuất các phương pháp nhận dạng và điều khiển rôbôt trong không gian Đềcác. Pablo và Fernando [3] đề xuất một phương pháp điều khiển rôbôt sử dụng phương pháp "*tạo hàm năng lượng*" trong không gian Đềcác để rút ra thuật điều khiển mômen ở các khớp rôbôt. Phương pháp này cho kết quả ổn định tiệm cận tuy nhiên đòi hỏi phải biết chính xác mô hình của rôbôt. D. Braganza và đồng nhiệp [4] trình bày phương pháp điều khiển tự thích nghi trên cơ sở mô tả hướng của đầu tay nắm rôbôt bằng "*4 tham số chuẩn hóa*" (unit quaternion) thay vì 3 góc Euler hay RPY. Thuật tóan điều khiển thích nghi này bảo đảm hệ thống ổn định và không đòi hỏi biết chính xác các tham số của rôbôt. Rodriguez và các cộng sự [5] giới thiệu phương pháp điều khiển dùng ma trận Jacobi chuyển vị kết hợp thuật điều khiển ổn định PID trong không gian Đềcác với thuật điều khiển tối ưu trong không gian biến trục. Phương pháp này đòi hỏi phải biết chính xác các tham số của rôbôt. Para-Vega [9] sử dụng phương pháp điều khiển trượt với phản hồi PID cho bài tóan điều khiển bám trong không gian biến trục của rôbôt có các tham số bất định.

Bài báo đề xuất một phương pháp điều khiển rôbôt n bậc tự do có nhiều tham số bất định bám theo qũy đạo mong muốn trong không gian Đềcác sử dụng mạng nơ ron. Mômen của các khớp được điều chỉnh gồm hai phần. Phần phản hồi tuyến tính và bù phi tuyến với các đại lượng biết trước. Phần thứ hai là một mạng nơ ron có các trọng số được học on-line để bù tác động của các tham số bất định. Tính ổn định tiệm cận của toàn hệ thống được chứng minh bằng phương pháp ổn định Lyapunov.

2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC CỦA RÔBÔT CÓ NHIỀU THAM SỐ BẤT ĐỊNH

Mô hình tóan học của một hệ rôbôt n bậc tự do có thể được mô tả bằng các hệ phương trình vi phân phi tuyến dạng vector như sau.

Hệ phương trình động lực

$$\hat{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \hat{\boldsymbol{B}}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \hat{\boldsymbol{g}}(\boldsymbol{q}) + \boldsymbol{d}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) = \boldsymbol{\tau}. \tag{1}$$

Hệ phương trình động học

$$x = \hat{\boldsymbol{h}}(\boldsymbol{q}), \tag{2}$$

trong đó, $\boldsymbol{q} = [q_1, q_2, ..., q_n]^T$, $\dot{\boldsymbol{q}} = [\dot{q}_1, \dot{q}_2, ..., \dot{q}_n]^T$, $\ddot{\boldsymbol{q}} = [\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, ..., \ddot{q}_n]^T$ là các vectơ $n \times 1$ biểu diễn vị trí, vận tốc và gia tốc góc của các khớp tương ứng.

$\boldsymbol{x} = [x, y, z, \Phi_x, \Phi_y, \Phi_z]^T$ là vectơ 6×1 biểu diễn vị trí và hướng của đầu tay nắm rôbôt trong không gian Đềcác.

$\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, ..., \tau_n]^T$ là vectơ $n \times 1$ biểu diễn momen tác động lên các khớp.

$\hat{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{q}) \in \boldsymbol{R}^{n\times n}$ là ma trận quán tính đối xứng và xác định dương.

$\hat{\boldsymbol{B}}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) \in \boldsymbol{R}^{n\times n}$ là thành phần Viscosity, lực/mômen Coriolis và lực hướng tâm.

$\hat{\boldsymbol{g}}(\boldsymbol{q}) \in \boldsymbol{R}^{n\times 1}$ là thành phần gia tốc trọng trường.

$\boldsymbol{d}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) \in \boldsymbol{R}^{n\times 1}$ là thành phần lực ma sát và nhiễu tác động lên các khớp của rôbôt.

$\hat{\boldsymbol{h}}(\boldsymbol{q}) \in R^{6\times 1}$ là hàm véc tơ động học mô tả mối quan hệ vị trí và hướng của đầu tay nắm rôbôt với vị trí (góc quay) của các khớp rôbôt.

Trong phương trình (1) và (2) do tính bất định của mô hình rôbôt, các đại lượng $\hat{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{q}), \hat{\boldsymbol{B}}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}), \hat{\boldsymbol{g}}(\boldsymbol{q})$ có thể được mô tả như sau:

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{q}) &= \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}) + \Delta\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}), \\ \hat{\boldsymbol{B}}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) &= \boldsymbol{B}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) + \Delta\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}), \\ \hat{\boldsymbol{g}}(\boldsymbol{q}) &= \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) + \Delta\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}), \end{aligned} \tag{3}$$

$$\hat{\boldsymbol{h}}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}) + \Delta\boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}),$$

trong đó $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}), \boldsymbol{B}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}), \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}), \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q})$ là các thành phần được xác định chính xác. Ta giả thiết $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})$ vẫn bảo tồn được tính chất cơ bản của ma trận mômen quán tính là đối xứng xác định dương. $\Delta\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}), \Delta\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}), \Delta\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}), \Delta\boldsymbol{h}(\boldsymbol{q})$ biểu diễn sai lệch do tính bất định của mô hình rôbôt. Đối với rôbôt công nghiệp các đại lượng không biết này thường nằm trong một giới hạn có thể xác định được $\|\Delta\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}) < m_0, \|\Delta\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\| < b_0, \|\Delta\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})\| < g_0, \|\Delta\boldsymbol{h}(\boldsymbol{q})\| < h_0$, $(m_0, b_0, g_0, h_0$ là các giá trị được biết). Từ hệ động học (2) ta có quan hệ tốc độ và gia tốc $(\dot{\boldsymbol{x}}, \ddot{\boldsymbol{x}})$ của đầu tay nắm rôbôt trong không gian Đềcác với tốc độ góc và gia tốc góc $(\dot{\boldsymbol{q}}, \ddot{\boldsymbol{q}})$ của các khớp rôbôt như sau:

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \hat{\boldsymbol{J}}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}, \tag{4}$$

$$\ddot{\boldsymbol{x}} = \hat{\boldsymbol{J}}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \dot{\hat{\boldsymbol{J}}}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}. \tag{5}$$