

2-링크 로봇 매니플레이터의 적응 임피던스 제어 Adaptive Impedance Control for 2-link Robot Manipulator

*김한메¹, #박경택², 이창돈², 김석준¹

*H. M. Kim¹, #K. T. Park(ktpark@kimm.re.kr)², C. D. Lee², S. J. Kim¹

¹한국기계연구원 플라즈마자원 연구실, ²한국기계연구원 로봇지능기계 연구실

Key words : Impedance control, back-stepping control, 2-link robot manipulator, adaptive control

1. 서론

다양한 작업 환경에 노출되어 있는 산업용 로봇 매니플레이터의 말단장치(end-effector)는 계획된 경로의 추적 기능뿐만 아니라 동시에 말단장치에 가해지는 힘을 제어하는 기능이 요구된다. 이처럼 동시에 로봇의 위치와 힘을 효과적으로 제어하는 기법으로 임피던스 제어기법(Impedance control)이 있다.

본 논문에서는 시스템의 안정성을 보장하기 위해 작업공간에서의 로봇 모델식과 임피던스 기준 모델식을 기반으로 주 제어기법으로 백스테핑 제어기법(Back-stepping control)과 임피던스 파라미터들을 추정하는 적응 제어기법(Adaptive control)이 제안되었다.

2. 로봇 매니플레이터 동역학

그림 1의 2-링크 로봇 매니플레이터는 다음과 같은 동역학 식으로 나타낼 수 있다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + J^T(q)F_{env} + \tilde{F}(t) = \tau \quad (1)$$

여기서 q 는 $n \times 1$ 의 조인트 변위 벡터, τ 는 조인트 토크, $M(q)$ 는 관성행렬, $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 은 코리올리 및 원심력 벡터, F_{env} 는 로봇의 말단부의 상호작용력을 J 는 작업공간(workspace)에서 비특이(non-singular)행렬로 가정된 자코비안 행렬(Jacobian matrix)이다.

자코비안 행렬은 다음과 같다.

$$J(q) = \partial x(q) / \partial q \quad (2)$$

여기서 x 는 로봇 말단부의 위치와 자세 벡터를 나타낸다.

작업 구간의에서의 로봇 동역학은 자코비안 행렬 식을 통해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$M_r \ddot{x} + C_r \dot{x} + G_r = J^{-T} \tau + f \quad (3)$$

여기서

$$M_r = J^{-T} M J^{-1}, \quad C_r = J^{-T} (M \dot{J}^{-1} + C J^{-1}),$$

$$G_r = J^{-T} G \text{의 관계를 가진다}[1][2].$$

3. 제어기 설계

로봇 동역학에 대한 백스테핑 제어기를 유도하기 위해 식 (3)은 다음과 같은 상태공간 모델로 나타낼 수 있다[3].

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -M_r^{-1}(C_r x_2 - G_r + J^{-T} \tau + f) \end{cases} \quad (4)$$

식 (4)에 대해 새로운 상태변수를 다음과 같이 정의 한다.

$$z_1 = x_1 - x_d \quad (5)$$

$$z_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (6)$$

여기서 α_1 은 백스테핑 제어기 설계과정에서 유도되는 가상제어(virtual control)입력이다.

우선, 리아프노프 제어함수(Lyapunov control function)를 다음과 같이 정의한다.

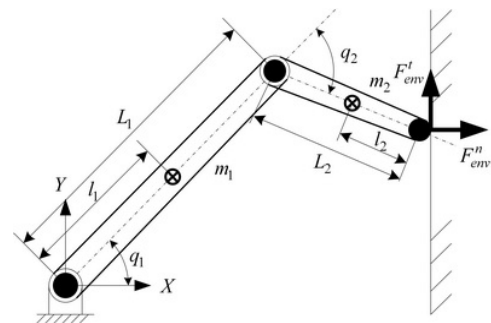


Fig. 1 Schematic diagram of the 2-link manipulator.

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^T z_1 \quad (7)$$

식 (7)의 도함수는 다음과 같다.

$$\dot{V}_1 = z_1^T \dot{z}_1 = z_1^T z_2 + z_1^T (\alpha_1 - \dot{x}_d) \leq 0 \quad (8)$$

식 (8)로부터 가상제어입력은 다음과 같다.

$$\alpha_1 = -\kappa z_1 + \dot{x}_d \quad (9)$$

여기서 $\kappa \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 인 양의 한정 대각행렬이다.

백스테핑 제어법칙을 얻기 위해 새로운 리아프노프 제어 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^T z_2 \quad (10)$$

식 (10)의 도함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -z_1^T \kappa z_1 + z_2^T (z_1 - M_r^{-1} C_r x_2 - M_r^{-1} G_r \\ & + M_r^{-1} J^{-T} \tau + M_r^{-1} f - \dot{\alpha}_1) \leq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

조건 식 (11)로부터 시스템을 안정하게 할 수 있는 제어입력은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \tau = & J(-M_r z_1 + C_r x_2 + G_r - f \\ & + M_r \dot{\alpha}_1 - M_r \varphi z_2) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 $\varphi \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 인 양의 한정 대각행렬이다.

기존 임피던스 제어에 있어서 바람직한 임피던스는 다음과 같이 선정될 수 있다[4].

$$\begin{aligned} F_{env} - F_d = & M_m (\dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1) + D_m (x_2 - \alpha_1) \\ & + K_m (x_1 - x_d) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 M_m , D_m 그리고 K_m 은 각각 관성, 감쇠 그리고 스프링 상수 행렬을 나타내며, F_d 는 바람직한 제한력(Constrained force)을 나타낸다. 그리고 상호작용력 F_{env} 는 다음과 같이 모델링된다.

$$F_{env} = K_e (x_e - x_1) \quad (14)$$

여기서 K_e 는 강성행렬을, x_e 는 구속된 위치를 나타낸다.

식 (13)에 식 (5), (6) 그리고 (14)를 대입하여 정리함으로써 z_1 과 z_2 에 대한 다음과 같은 오차동역학 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{z}_2 + \hat{A} z_2 + \hat{B} z_1 = \hat{C} \quad (15)$$

여기서 $\hat{A} = M_m^{-1} K_m$, $B = M_m^{-1} K_m$ 그리고

$$\hat{C} = M_m^{-1} \{K_e (x_e - x_1) - F_d\}.$$

적응 룰을 얻기 위해 위치 추적 오차 z_m 에 관한 기준 모델을 다음과 같이 정의한다[5].

$$\dot{z}_{2m} + A_m z_{2m} + B_m z_{1m} = 0 \quad (16)$$

식 (15)와 (16)은 다음과 같이 새로운 오차 변수 ε 에 의해 다음과 같이 기술된다.

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_2 + A_m \varepsilon_2 + B_m \varepsilon_1 \\ = (A_m - \hat{A}) z_2 + (B_m - \hat{B}) z_2 + \hat{C} \end{aligned} \quad (17)$$

식 (17)로부터 $t \rightarrow \infty$ 일 때 $z \rightarrow 0$ 이 되는 적응 룰은 다음과 같다.

$$\hat{A} = \hat{A}(0) + \Phi_2 \left(\int_0^t \Xi(\tau) z_2^T(\tau) d\tau + \Xi z_2^T \right) \quad (18)$$

$$\hat{B} = \hat{B}(0) + \Phi_2 \left(\int_0^t \Xi(\tau) z_1^T(\tau) d\tau + \Xi z_1^T \right) \quad (19)$$

$$\hat{C} = \hat{C}(0) - \Phi_3 \left(\int_0^t \Xi(\tau) d\tau + \Xi \right) \quad (20)$$

4. 결론

백스테핑 제어기법이 로봇 동역학 식을 기반으로 유도되었고 백스테핑 제어기법과 임피던스 기준 모델로부터 시스템의 안정성을 보장할 수 있는 적응 제어기법이 유도되었다.

후기

본 논문은 지식경제지원부 산업원천기술개발사업(10035163)의 지원을 받아 작성되었다.

참고문헌

1. Ge, S. S., Hang, C. C., Woon, L. C., and Chen, X. Q., "Impedance control of robot manipulator using adaptive neural networks," International Journal of Intelligence Control and Systems, 2(3), pp. 433-452, 1998.
2. Ge, S. S., Huang, L., and Harris, C. J., Adaptive Neural Network Control of Robotic Manipulators, World Scientific, London, 1998.
3. Krstic, M., Kanellakopoulos, I., and Kokotovic, P., Nonlinear and adaptive control design, John Wiley & Sons, 1995.
4. Canudas de Wit, C., Siciliano, B., and Bastin, G., Theory of Robot Control, Springer, 1996.
5. Huang, L., Ge, S. S., and Lee, T. H., "An adaptive impedance control scheme for constrained robots," International Journal of Computers, Systems and Signals, 5(2), 2004, pp. 17-26.