

## 로봇 매니플레이터의 분산 적응제어

이용연, 신규현\*(울산대 대학원), 이수한(울산대 기계자동차 공학부)

### Decentralized Adaptive Control of Robot Manipulators

Lee, Yong Yeun, Shin, Kyu Hyeon (Graduate school of Mechanical & Automotive Eng., UOU),

Lee, Soo Han (School of Mechanical & Automotive Eng., UOU)

#### ABSTRACT

In this paper, a decentralized adaptive controller is proposed to control robot manipulators which are governed by highly nonlinear dynamic equations. The controller is computationally efficient since it does not require mathematical model or parameter values of robot manipulators. The stability of the manipulators with the controller is proved by Lyapunov theory. The results of computer simulations show that the robot manipulator system is stable, and has excellent trajectory tracking performance.

**Key Words** : Robot manipulators(로봇 매니플레이터), Adaptive control(적응제어), Decentralized control(분산제어), Lyapunov theory(리아푸노프 이론)

#### 1. 서론

로봇 매니플레이터의 운동은 복잡한 비선형항과 마찰, 외란, 하중의 변화 등과 같은 불확실한 요소들로 구성되어 있다. 또한 일부 비선형항들은 로봇의 자세, 속도에 민감하고 중력에 영향을 받으며, 관절 사이의 연성 때문에 단순한 선형 제어기로는 정밀한 제어에 한계가 있다.<sup>(1)</sup> 이러한 문제점을 해결하기 위해 여러 가지 비선형 제어기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(2,3,4,5)</sup>

이러한 비선형성과 불확실성을 가진 로봇 매니플레이터를 제어하기 위한 비선형 제어기 중 시스템의 불확실성에 초점을 둔 연구의 대표적인 것이 적응제어다. 적응제어 기법에 지능형 제어 방법인 신경망을 이용하거나 퍼지 논리를 복합적으로 이용하는 제어 방법이 많이 연구되고 있으나,<sup>(7)</sup> 간혹 적응 법칙의 복잡성 때문에 많은 양의 실시간 계산이 필요한 경우도 있다.

Seraji<sup>(8)</sup>의 분산 적응제어 연구에서는 피드백과 피드포워드 항 그리고 비례-미분 항을 복합적으로 사용하여 우수한 제어 성능을 얻었다.

본 연구에서는 계산량이 적고, 로봇 매니플레이터의 비선형성 및 연성, 시스템의 변화 등을 극복

할 수 있는 새로운 분산 적응제어기를 제안한다. 분산 적응제어기는 리아푸노프 이론을 이용하여 유도하고, 전산 모의 실험을 통해 제안한 제어기의 성능과 안정성을 검증한다.

#### 2. 제어기 설계

관절이 n 개인 로봇 매니플레이터의 운동방정식은 다음과 같은 2 차의 비선형 미분방정식으로 표현된다.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + H(\dot{\theta}) = T. \quad (1)$$

여기서,  $\theta(t)$  는 관절 변수로  $n \times 1$  벡터,  $T(t)$  는 관절에 입력되는 토크로  $n \times 1$  벡터,  $M(\theta)$  는 관성 행렬로 대칭이며 양의 한정인  $n \times n$  행렬이다.  $G(\theta)$  는 중력 항을 포함하는  $n \times 1$  벡터,  $V(\theta, \dot{\theta})$  는 코리올리력과 원심력 항을 포함하는  $n \times 1$  벡터,  $H(\dot{\theta})$  는 마찰력 항을 포함하는  $n \times 1$  벡터다.

각 관절에 대한 토크 입력을 다음과 같이 정의한다.

$$T_i = f_i + k_{p_i}e_i + k_{d_i}\dot{e}_i. \quad (2)$$

여기서,  $f_i$ 는 관절에 적용되는 적응 법칙이고,  $k_p$ 와  $k_D$ 는 비례, 미분 이득이다. 첨자  $i$ 는  $i$  번째 관절을 뜻한다.

식(2)를 식(1)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 오차 방정식으로 표현된다.

$$m_i \ddot{e}_i + k_D \dot{e}_i + k_p e_i = d_i - f_i. \quad (3)$$

여기서,

$$d_i(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) = \left[ \sum_{j=1}^n m_{ij}(\theta) \ddot{\theta}_j(t) \right] + m_i \ddot{e}_i + v_i(\theta, \dot{\theta}) + g_i(\theta) + h_i(\dot{\theta}) \quad (4)$$

이다.

식(3)를 상태방정식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\dot{E}_i = A_i E_i + B_i \quad (5)$$

여기서,

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_p}{m_i} & -\frac{k_D}{m_i} \end{bmatrix}, E_i = \begin{bmatrix} e_{1i} \\ e_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_i \\ \dot{e}_i \end{bmatrix},$$

$$B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{d_i - f_i}{m_i} \end{bmatrix}$$

이다.

제어계의 안정성을 증명하기 위하여 아래와 같은 리아푸노프 함수 후보를 정의한다. 첨자  $i$ 는 편의상 생략한다.

$$V = E^T P E + \frac{1}{ma} (d - f + \rho r + \delta r \int r^2 dt)^2. \quad (6)$$

여기서,  $\delta, \rho, a, m$ 은 임의의 양의 상수이다.

그리고,  $p = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 \\ p_2 & p_3 \end{bmatrix}$ 는 리아푸노프 방정식

$PA + A^T P = 0$ 을 만족하는 양의 한정 대칭행렬이며,  $r$ 은 위치오차와 속도오차에 가중치를 준것으로  $r = p_2 e + p_3 \dot{e}$ 이다.

적응제어항,  $f$ 의 시간에 대한 변화율을 다음과 같이 정의한다.

$$\dot{f} = \rho \frac{d}{dt} r + \delta \frac{d}{dt} (r \int r^2 dt) + ar. \quad (7)$$

적응제어항,  $f$ 의 시간에 대한 변화율이  $d$ 의 시간 변화율에 비하여 충분히 크다면, 즉  $\dot{d} \approx 0$ 일 때, 식(8)의 식(7)에 따른 미분식과 식(9)로부터,

$$\dot{V} = -E^T Q E - 2 \frac{\rho r^2}{ma} - 2 \frac{\delta}{ma} r^2 \int r^2 dt < 0$$

이다. 이 식은  $E$ 와  $r$ 에 대해 음의 한정이므로 이 제어계는 점근 안정하다.

따라서,  $i$  번째 관절에 입력되는 토크는 다음과 같이 정의된다.

$$T_i = \rho_i r_i + \delta_i r_i \int r_i^2 dt + a_i \int r_i dt + k_{p_i} e_i + k_{D_i} \dot{e}_i. \quad (11)$$

### 3. 전산 모의 실험

제한한 제어기의 안정도와 제어 성능을 알아보기 위하여 전산 모의 실험을 실시한다. 적용한 로봇 모델은 2 관절 로봇이고, 식(1)의 운동방정식에 사용되는 행렬들은 다음과 같다.

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} M_{11}(\theta) & M_{12}(\theta) \\ M_{21}(\theta) & M_{22}(\theta) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$V(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} h \dot{\theta}_2 & h(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ -h \dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$G(\theta) = \begin{bmatrix} G_1(\theta) \\ G_2(\theta) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

여기서,

$$M_{11}(\theta) = m_1 l_{c1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos \theta_2) + I_1 + I_2,$$

$$M_{12}(\theta) = M_{21}(\theta) = m_2 (l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos \theta_2) + I_2,$$

$$M_{22}(\theta) = m_2 l_{c2}^2 + I_2,$$

$$h = -m_2 l_1 l_{c2} \sin \theta_2,$$

$$G_1(\theta) = (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) g \cos \theta_1 + m_2 l_{c2} g \cos(\theta_1 + \theta_2),$$

$$G_2(\theta) = m_2 l_{c2} g \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

이다. 식(1)의 마찰력 항은 아래와 같이 가정하였고, 외란은 포함시키지 않았다.

$$\text{관절 1; } F_j \dot{\theta} + F_v(\dot{\theta}) = 2\dot{\theta}_1 + 5.5 \text{sgn}(\dot{\theta}_1),$$

관절 2;  $F_d \dot{\theta} + F_s(\theta) = 0.2\dot{\theta}_2 + 0.1\text{sgn}(\dot{\theta}_2)$ . (16)

기준 궤적은 아래와 같이 사이클로이드 함수를 선택하였다.

$$\theta_1(t) = \theta_1(0) + \frac{\theta_1(t_c) - \theta_1(0)}{2\pi} (\omega t - \sin \omega t), (0 \leq t \leq t_c)$$

$$\theta_1(t) = \theta_1(t_c), (t_c \leq t)$$

$$\theta_2(t) = \theta_2(0) + \frac{\theta_2(t_c) - \theta_2(0)}{2\pi} (\omega t - \sin \omega t), (0 \leq t \leq t_c)$$

$$\theta_2(t) = \theta_2(t_c). (t_c \leq t)$$

여기서,  $t_c = 1\text{sec}$ ,  $\theta_1(t_c) = 0$ ,  $\theta_2(t_c) = \pi/4$  이고  $\omega = 2\pi/t_c$  이다. 또, 초기위치 및 속도는  $\theta_1(0) = -\pi/2$ ,  $\dot{\theta}_1(0) = 0$ ,  $\theta_2(0) = \dot{\theta}_2(0) = 0$  로 하였다.

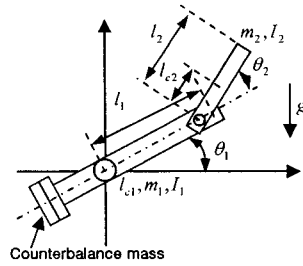


Fig. 1 Two-link robot manipulator

제한한 제어기의 성능 비교를 위해 다음과 같은 PD 제어기를 선정한다.

$$T_i = k_{p_i} e_i + k_{d_i} \dot{e}_i. (17)$$

로봇 모델의 주요 변수를 Table 1에 나타내었다. 여기서, Link 1은 카운터밸런스 질량을 이용하여 질량중심과 회전중심을 일치시켰다고 가정한다.

Table 1 Parameters of the robot manipulators

	Link 1	Link 2
질량 ( $m$ )	48 kg	5 kg
회전중심에서 끝 단까지의 길이 ( $l$ )	0.6 m	0.4 m
회전중심에서 질량 중심까지의 길이 ( $l_c$ )	0 m	0.2 m
너비 ( $b$ )	0.125 m	0.05 m
질량중심에서의 질량관성모멘트 ( $I$ )	3.60 kgm <sup>2</sup>	0.068 kgm <sup>2</sup>

Fig. 2는 부하 질량이 없는 경우의 결과이다. 기준 궤적에 대한 로봇 매니퓰레이터의 추종 궤적은 Fig. 2 (a), (b)와 같다. Fig. 2 (c), (d)에서 PD 제어기의 최대 위치오차는 관절 1, 관절 2에서 각각 7.529°, 1.470° 이고, 반면에 제안한 제어기는 최대 위치오차가 각각 0.1779°, 0.0310° 이다. 또한 PD 제어기는 정상상태 위치오차가 관절 1, 2에서 각각 4.2255°, 0.8622° 인 반면에 제안한 제어기의 정상상태 위치오차는 각각 영으로 수렴하였다. Fig. 2 (e), (f)에서 제어력을 보면 PD 제어기와 제안한 제어기에 가해진 토크의 크기는 거의 같음을 알 수 있다.

Fig. 3은 로봇의 끝에 부하 질량 5kg을 가했을 경우의 결과이다. PD 제어기의 최대 위치오차는 관절 1, 관절 2에서 각각 12.680°, 3.042° 이고, 반면에 제안한 제어기는 최대 위치오차가 각각 0.259°, 0.066° 이다. 또한 PD 제어기는 정상상태 위치오차가 관절 1, 2에서 각각 8.520°, 1.850° 인 반면에 제안한 제어기의 정상상태 위치오차는 각각 영으로 수렴하였다. 이 결과로부터 제안한 제어기는 로봇의 변수들이 변해도 강인하게 제어함을 알 수 있다.

본 연구에서 제안한 분산 적응제어기는 전산 모의 실험에서도 안정함을 보였고, PD 제어기에 비하여 성능이 월등함을 알 수 있었다. 하지만, 제어기의 성능은 제어기의 이득에 따라 달라질 수 있다.

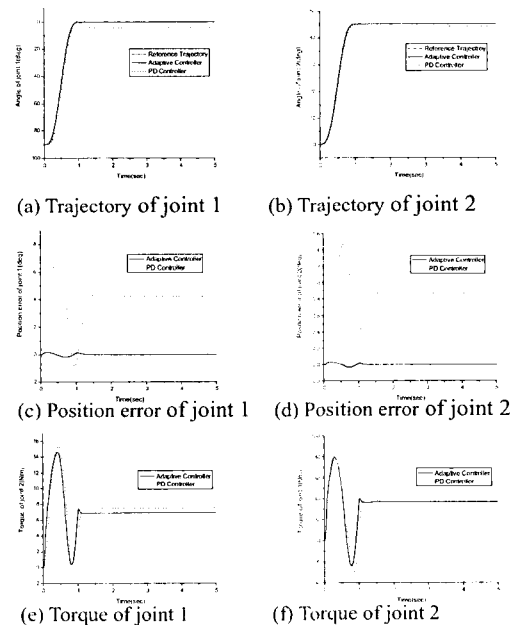


Fig. 2 Trajectory tracking performance without payload

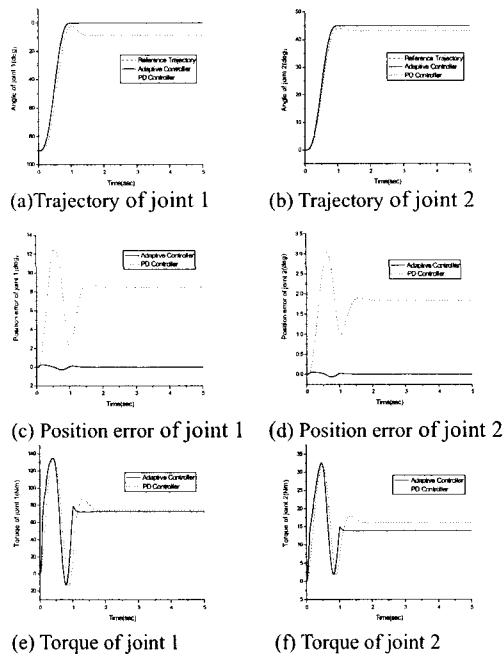


Fig.3 Trajectory tracking performance with 5kg payload

#### 4. 결론

로봇 매니플레이터는 매우 복잡한 비선형 운동을 하므로 선형 제어기로 로봇을 정확히 제어하기에는 한계가 있다. 이러한 점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 계산량이 비교적 적은 분산 적응제어를 제안하였다. 제안한 제어기는 리아푸노프 이론으로 접근 안정함을 증명하였고, 전산 모의 실험을 통하여 제안한 제어기가 PD 제어기에 비하여 궤적 추적 제어 성능도 우수함을 보였다.

#### 참고문헌

1. F. L. Lewis, C. T. Abdallah and D. M. Dawson, "Control of Robot Manipulators," Macmillan Publishing Company, 1993.
2. S. S. Ge, "Advanced Control Techniques of Robotic Manipulator," Proc. Amer. Control Conf., pp. 2185 ~ 2199, June 1998.
3. C. Ham and Z. Qu, "A New Nonlinear Learning Control for Robotic Manipulators," Advanced Robotics, Vol. 10, No. 5, pp. 1 ~ 15, 1996.
4. John J. Craig, "Adaptive Control of Mechanical Manipulators," Addison-Wesley Publishing Company,

Inc., 1988.

5. V. I. Utkin, J. Guldner and J. Shi, "Sliding Mode Control in Electromechanical Systems," Taylor & Francis, Inc., 1999.
6. Narendra, K.S. and Valavani, L.S., "Stable Adaptive Controller Design Direct Control," IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. AC-23, No. 4, pp. 570 ~ 583, 1978.
7. Jin, Yaochu., "Decentralized Adaptive Fuzzy Control of Robot Manipulators," IEEE Trans. System, Man & Cyber. Part B Cybern., Vol. 28, No. 1, pp. 47 ~ 57, 1998.
8. Seraji, H., "Decentralized Adaptive Control of Manipulators: Theory, Simulation, and Experimentation," IEEE Trans. on Robotics & Auto., Vol. 5, No. 2, pp. 183 ~ 201, 1989.