로봇 매니퓰레이터의 궤적 추종을 위한 강인한 적응제어기의 설계 및 구현

Design of a Robust Adaptive Controller and Its Implementation on Robot Manipulators for Trajectory Tracking

길 진 수, 한 상 완, 조 원 영, 홍 석 교
(Jin-Soo Gil, Sang-Wan Han, Won-Young Cho and Suk-Kyo Hong)

Abstarct : In this paper, the design and the implementation of a robust adaptive controller for trajectory tracking of robot manipulator is presented. The proposed control scheme ensures that tracking errors are converged to some boundaries in the presence of a state-dependent input disturbances as well as the ideal case without any prior knowledge of the robot manipulator parameters. The 3 DOF robot manipulator including actuator dynamics is used for the implementation of the proposed control scheme. The experimental results show that the proposed control scheme is valid for trajectory tracking of the robot manipulator.

Keywords : robot manipulator, robust adaptive controller, sliding surface

I. 서론

로봇 매니퓰레이터는 각 관절의 상태변수가 링크 상호간에 결합되고 부하 및 작업환경에 따라 파라미터값이 변하는 비선형 다변수 시스템이다. 그러나, 대다수의 산업용 로봇 매니퓰레이터에는 링크 상호간의 비선형 결합을 고려하지 않은 독립관절 제어기인 PID 제어기를 사용하고 있다. 이 PID 제어기는 용접, 조립등 부하의 변동이 작은 작업이나 저속의 반복작업에서 만족할 만한 성능을 얻을 수 있으나 비선형적 특성을 갖는 로봇 매니퓰레이터의 동력학을 고려하지 않았기 때문에 고속이나 부하의 변동이 큰 작업에서는 성능의 저하를 가져올 수 있다. PID 제어기의 단점을 보완하여 좋은 성능을 발휘할 수 있도록 로봇 매니퓰레이터의 동력학을 고려한 model-based 제어기로 computed-torque 제어방법, feed-forward 제어방법등에 대한 활발한 연구가 진행되어 좋은 성능의 제어기가 많이 제시되었다[1]. 그러나 로봇 매니퓰레이터에는 링크의 질량, 관성모멘트, 질량중심등과 같은 역학 파라메터에 대한 정확한 측정의 어려움과 부하의 변동등으로 인한 역학 파라메터의 불확실성이 존재하여 정확한 동력학 모델을 선정할 수가 없어 model-based 제어기 구현의 어려움이 되었다. 이를 극복하기 위하여 불확실성이 존재하는 역학 파라메터를 실시간으로 추정하여 안정한 제어를 구현하는 적응제어방식에 대한 많은 논문가 이루어져 왔다[2]-[4].

지금까지 Craig의 연구로부터 구체적으로 시작된 로봇 매니퓰레이터를 위한 적응제어방식은 Slotine의 연구로부터 안정화되고 이후 많은 알고리즘의 연구가 이루어져 왔는데, Slotine은 가속도 측정과 추정된 관성행렬의 역변환을 필요로 하지 않으며 전체적으로 안정한 영역내에서 측정된 오차로부터 적응법칙을 구현하는 새로운 적응제어 알고리즘을 제시하였다[2][4]. 그러나, 이 알고리즘은 외란이 존재하는 상황에서는 외란의 경계치를 알아야만 안정한 제어기의 이득을 설정할 수 있다는 단점을 내포하고 있다. 한편 Chun-Yi Su와 Yury Stepanenko는 외란의 경계치를 추정하는 적응 슬라이딩모드 제어 알고리즘을 제시하였다[5].

본 논문에서는 외란에 대해 강인하며 위치오차의 보다 빠른 수렴를 위해 Slotine이 제시한 적응제어기에 외란의 경계치 추정 알고리즘과 위치오차 비례궤환부분을 추가한 제어기를 제시한다. 실제 로봇 매니퓰레이터의 성능에는 구동기의 영향과 마찰력을 무시할 수 없으므로 직류전동기의 동력학과 기계적인 마찰력을 고려한 로봇 매니퓰레이터의 동력학모델을 세우고 본 논문에서 제시한 제어기를 적용, 실시간으로 구현하여 궤적추종에 대한 실험적 검증을 통해 제어기의 타당성을 확인한다.

접수일자 : 1997. 12. 5., 수정완료 : 1998. 6. 11.
길진수, 한상완, 홍석교 : 아주대학교 전자공학과
조원영 : 대우 고등기술연구원

II. 로봇 매니퓰레이터의 동력학

1. 매니퓰레이터의 동력학 및 특성

마찰력과 외란을 고려한 n개의 자유도를 가지는 매니퓰레이터의 역학방정식은 다음과 같은 비선형식으로 나타낼 수 있다[6].

$$M(q)\ddot{q}+V(q,\dot{q})\dot{q}+G(q)+F_v\dot{q}+F_d sgn(\dot{q})=\tau+\tau_d \quad (1)$$

$q,\ \dot{q},\ \ddot{q}$: 관절 위치벡터, 속도벡터, 가속도벡터
$M(q)$: 관성행렬 (대칭정치)
$V(q,\dot{q})$: 전향력 및 구심력 관련 행렬
$G(q)$: 중력 관련 행렬
F_v : *viscous* 마찰 계수행렬 (대각행렬)
F_d : *dynamic* 마찰 계수행렬 (대각행렬)
τ : 제어 입력 토크 벡터
τ_d : 외란

위 동력학식은 model-based 제어기의 설계에 유용한 다음과 같은 역학적 특성을 가진다.

특성 1 : 관성행렬 $M(q)$는 symmetric positive

definite 행렬이다[2].

특성 2 : $V(q,\dot{q})$의 각 요소들을 다음과 같이 정의하면 $(\dot{M}-2V)$는 skew-symmetric 행렬이 된다[2].

$$V_{ij}=\frac{1}{2}[\dot{q}^T\frac{\partial M_{ij}}{\partial q}+\sum_{k=1}^{n}(\frac{\partial M_{ik}}{\partial q_j}-\frac{\partial M_{jk}}{\partial q_i})\dot{q}_k] \quad (2)$$

특성 3 : 역학 파라메터들은 기구학적인 정보에 대하여 다음과 같은 선형 관계식이 성립한다[2].

$$M(q)\ddot{q}+V(q,\dot{q})\dot{q}+G(q)+F(\dot{q})=Y(q,\dot{q},\ddot{q})\alpha \quad (3)$$

$$\begin{cases} Y & : \text{기구학 정보 행렬} \quad (n\times m) \\ \alpha & : \text{역학 파라메터 벡터} \quad (m\times 1) \end{cases}$$

2. 직류전동기의 동력학

영구 자석을 사용하는 직류전동기는 다음과 같은 전기적인 부분과 기계적인 부분으로 구성된 동력학으로 표현된다[10].

$$\begin{aligned} u_k &= R_k i_{ak}+L_k\frac{di_{ak}}{dt}+K_{bk}\dot{q}_{mk} \\ \tau_{mk} &= K_{mk}i_{ak} \\ \tau_{mk} &= J_{mk}\ddot{q}_{mk}+B_{mk}\dot{q}_{mk}+F_{mdk}sgn(\dot{q}_{mk})+\tau_{lk} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{cases} u_k & = \text{입력 전압} \\ i_{ak} & = \text{아마추어 전류} \\ \tau_{mk} & = \text{발생 토크} \\ \tau_{lk} & = \text{출력 토크} \\ q_{mk} & = \text{전동기의 회전각} \\ K_{bk} & = \text{역기전력계수} \\ K_{mk} & = \text{토크상수} \\ R_k & = \text{전동기 저항} \\ L_k & = \text{전동기 인덕턴스} \\ J_{mk} & = \text{회전자 관성모멘트} \\ B_{mk} & = \textit{Damping} \text{ 계수} \\ F_{mdk} & = \textit{Dynamic} \text{ 마찰계수} \end{cases}$$

매니퓰레이터 각 관절의 구동기로 직류전동기를 사용할 경우, 기계적 시상수가 전기적 시상수보다 상당히 크므로 직류전동기의 인덕턴스성분을 무시할 수 있다. 이 경우 k번째 직류전동기의 입력전압 $u_k(t)$에 대한 출력토크 $\tau_{lk}(t)$와 회전각 $q_{mk}(t)$의 관계식은 다음과 같은 2계 미분 방정식의 형태로 나타낼 수 있다[4].

$$\begin{aligned} &J_{mk}\ddot{q}_{mk}(t)+(B_{mk}+\frac{K_{bk}K_{mk}}{R_k})\dot{q}_{mk}(t) \\ &+F_{mdk}sgn(\dot{q}_{mk})+\tau_{lk}(t)=\frac{K_{mk}}{R_k}u_k(t) \end{aligned} \quad (5)$$

3. 구동기를 고려한 매니퓰레이터의 동력학

매니퓰레이터의 관절과 전동기가 감쇠비 r_m인 감속기로 연결된 경우, 관절변수 q_k 와 모터변수 q_{mk} 그리고 관절 토크 τ_k와 직류전동기의 출력토크 τ_{lk} 에 대하여 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$q_{mk} = r_k q_k \quad (k=1,2,3,\cdots,n) \quad (6)$$

$$\tau_k = r_k \tau_{lk} \quad (k=1,2,3,\cdots,n) \quad (7)$$

(1)과 (5)로부터 n개의 관절를 가지는 로봇의 구동기를 고려한 역학방정식은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\{r^2J_M+M(q)\}\ddot{q}+\{r^2B_M+V(q,\dot{q})\}\dot{q}+G(q) \\ &+F_v\dot{q}+\{rF_{Md}+F_d\}sgn(\dot{q})=rKu+\tau_a \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{cases} J_M & = diag\{J_{mk}\} \\ B_M & = diag\left\{B_{mk}+\dfrac{K_{bk}K_{mk}}{R_k}\right\} \\ K & = diag\left\{\dfrac{K_{mk}}{R_k}\right\} \\ F_{Md} & = diag\{F_{mdk}\} \\ F_v & = diag\{F_{vk}\} \\ F_d & = diag\{F_{dk}\} \end{cases}, \quad (k=1,\ldots,n)$$

위 (8)를 간략하게 표시하면 다음과 같다.

$$M'(q)\ddot{q}+V'(q,\dot{q})\dot{q}+G(q)+F'(\dot{q})=K'(u+u_d) \quad (9)$$

$$\begin{cases} M' & = r^2J_M+M(q) \\ V' & = r^2B_M+V(q,\dot{q}) \\ F' & = F_v\dot{q}+\{rF_{Md}+F_d\}sgn(\dot{q}) \\ K' & = rK \\ u_d & = \dfrac{\tau_d}{rK} \end{cases}$$

직류전동기를 포함한 로봇 매티퓰레이터의 동력학 방정식[(9)]은 (1)의 역학적 특성을 유지하여 다음과 같은 역학적 특성을 가진다.

특성 1 : 관성행렬 $M'(q)$는 symmetric positive definite 행렬이다.

특성 2 : $(\dot{M}'-2V')$는 skew-symmetric 행렬이다.

특성 3 : 역학 파라메터들은 기구학적인 정보에 대하여 다음과 같은 선형 관계식이 성립한다.

$$\begin{aligned} &M'(q)\ddot{q}+V'(q,\dot{q})\dot{q}+G(q)+F'(\dot{q}) \\ &=K'Y(q,\dot{q},\ddot{q})\alpha \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{cases} Y & : \text{기구학 정보 행렬} \quad (n\times m) \\ \alpha & : \text{역학 파라메터 벡터} \quad (m\times 1) \end{cases}$$

III. 적응제어기의 설계

1. Slotine의 적응제어기

Craig의 적응 computed-torque 제어기는 가속도의 측정과 추정된 관성행렬의 역변환을 필요로 하였다[3]. 그러나, 대다수의 산업용 매니퓰레이터에는 엔코더와 같은 센서만을 가지고 있어 가속도의 측정이 어려우며 속도측정치로부터 가속도의 추정 또한 많은 오차를 유발한다. 더욱이, 미지의 부하를 다루는 경우 추정된 관성행렬의 역변환을 보장하는 것에도 상당한 어려움이 있었다. 이 제어기의 단점을 개선하기 위하여 매니퓰레이터의 역학적 특성을 고려한 적응제어기에 대한 많은 연구가 이루어졌으며 Slotine과 Li는 역학 파라메터의 변동과 불확실성에 대처하여 위치 및 속도오차를 0으로 수렴하도록 하는 동력학 보상부분, 역학 파라메터 추정부분과 비례미분 궤환부분으로 구성된 적응제어기를 제시하게 되었다. 이 구조에서 Lyapunov 안정도 판별법에 따라 시스템 오

차의 함수로 Lyapunov function $V(t)$를 정의하여 시스템의 안정도를 보장하도록 제어법칙과 적응법칙을 유도하였으며 슬라이딩 평면을 (12)와 같이 정의하여 오차궤적이 이 평면을 따라 원점으로 움직이도록 제어법칙을 유도하여 정상상태 위치오차의 수렴성을 보장하였다[2].

위치오차 e, 속도오차 $\dot{e}$ 및 슬라이딩 평면 ($s=0$)을 다음과 같이 정의하였으며

$$e = q - q_d, \quad \dot{e} = \dot{q} - \dot{q}_d \tag{11}$$

$$s = \dot{e} + \Lambda e, \quad \Lambda = diag\{\text{양의 상수}\} \tag{12}$$

제어법칙을 유도하기 위해 가상의 참조궤적을 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} \dot{q}_r &= \dot{q}_d - \Lambda e, & s &= \dot{q} - \dot{q}_r \\ \ddot{q}_r &= \ddot{q}_d - \Lambda \dot{e}, & \dot{s} &= \ddot{q} - \ddot{q}_r \end{aligned} \tag{13}$$

위 (10)의 특징에 의해 구동기를 포함한 매니퓰레이터의 동력학 방정식은 다음과 같이 미지의 역학 파라메터에 대해 선형적으로 분리되어질 수 있다.

$$\begin{aligned} M'(q)\ddot{q}_r + V'(q,\dot{q})\dot{q}_r + G(q) + F'(\dot{q}) \\ = K'Y(q,\dot{q},q_r,\dot{q}_r)\alpha \end{aligned} \tag{14}$$

여기서, 역학 파라메터를 시불변으로 가정하여 다음과 같이 역학 파라메터의 추정값 및 추정오차를 정의하였다.

$$\tilde{\alpha} = \hat{\alpha} - \alpha, \quad \dot{\tilde{\alpha}} = \dot{\hat{\alpha}}$$

$$\begin{cases} \alpha & : \text{역학 파라메터의 실제값(상수)} \\ \hat{\alpha} & : \text{역학 파라메터의 추정값} \\ \tilde{\alpha} & : \text{역학 파라메터의 추정오차} \end{cases} \tag{15}$$

Slotine은 [2]에서 다음과 같은 제어법칙을 제시하였다

$$\begin{aligned} u &= Y(q,\dot{q},\dot{q}_r,\ddot{q}_r)\hat{\alpha} - K_1 s - K_2 sgn(s) \\ \dot{\hat{\alpha}} &= -\Gamma^{-1}Y^T(q,\dot{q},\dot{q}_r,\ddot{q}_r)\, s \end{aligned} \tag{16}$$

또한 시스템의 안정도를 보장하기 위하여 Lyapunov 함수를 다음과 같이 정의 하였다.

$$V(t) = \frac{1}{2}[s^T K'^{-1} M' s + \tilde{\alpha}^T \Gamma \tilde{\alpha}] \tag{17}$$

Lyapunov 함수의 도함수를 구하여 제어법칙 및 적응법칙을 적용하면

$$\dot{V}(t) = -s^T K_1 s - K_2 \|s\|_1 + s^T u_d \tag{18}$$

과 같이 되어 외란이 없을때는 $\dot{V}(t) \le 0$가 되어 시스템이 안정하게 되지만 외란이 존재할때는 $\dot{V}(t) \le 0$이 만족되도록 이득 K_1과 K_2를 설정하여야하며 이는 외란의 크기를 사전에 고려하여야 하는 단점이 있음을 의미한다. $\dot{V}(t) \le 0$이 만족하게 되면 시스템의 오차는 슬라이딩 평면 ($s = \dot{e} + \Lambda e$)을 따라 0으로 수렴하게 된다. 이때 오차궤적이 슬라이딩 평면을 교차하면서 채터링이 발생하게 되는데, 이는 불연속 함수 $sgn(\cdot)$에 의한 것으로 채터링을 억제하기 위해 $sgn(s)$는 $sat(s/\delta)$로 대치할 수 있다. 이 경우 δ는 슬라이딩 평면부근의 경계영역의 폭을 의미하며 이로 인해 약간의 시스템 오차가 존재하게 된다.

2. 수정된 적응제어기

Slotine이 제시한 제어법칙은 비례미분 궤환부분의 이득이 고정되어 있어 외란이 존재하는 상황에서는 시스템의 안정을 보장할 수 없다. 이를 개선하기 위하여 본 논문에서는 Slotine의 적응제어기에 제시한 외란에 대한 이득 추정방법을 도입하였고, 위치오차에 대한 비례궤환부분을 추가하여 외란에 강인하며 궤적추종 성능을 향상시킬 수 있는 제어기를 제시하였다.

제어 법칙 유도를 위해 목표궤적과 외란에 대해 다음과 같이 가정한다.

가정 1 : 목표궤적 q_d, 목표속도 $\dot{q}_d$, 목표가속도 $\ddot{q}_d$는 모두 경계된 값이다.

가정 2 : 외란 u_d는 다음 관계를 만족한다고 가정한다.

$$\|u_d\| \le \gamma + \beta\|s\| \tag{19}$$

여기서, ($\beta \ge 0, \gamma \ge 0$)이다. 물리적으로 추종 가능한 모든 궤적은 가정 1을 만족시킨다. 또한, 외란은 시스템의 오차를 유발시키므로 가정 2의 (19)에 의한 경계치 β와 γ가 존재하게 된다. 수정된 제어기의 제어법칙과 적응법칙은 다음과 같다.

$$u = Y(q,\dot{q},\dot{q}_r,\ddot{q}_r)\hat{\alpha} - \hat{\beta}s - \hat{\gamma}sat(s/\delta) - Pe \tag{20}$$

$$\dot{\hat{\alpha}} = -\Gamma^{-1}Y^T(q,\dot{q},\dot{q}_r,\ddot{q}_r)\, s \tag{21}$$

$$\dot{\hat{\beta}} = \mu\|s\|^2 \tag{22}$$

$$\dot{\hat{\gamma}} = \nu\|s\| \tag{23}$$

$P = diag\{\text{양의 상수}\}$

$\Gamma =$ 양의 한정 상수행렬

$\mu, \nu =$ 양의 상수

$$sat(s/\delta) = \begin{cases} 1, & s/\delta > 1 \\ s/\delta, & |s/\delta| < 1 \\ -1, & s/\delta < -1 \end{cases} \tag{24}$$

수정된 제어기의 $Y(q,\dot{q},\dot{q}_r,\ddot{q}_r)\hat{\alpha}$는 링크 상호간의 비선형 결합을 보상하기 위한 부분이며 $-\hat{\beta}s$과 $-\hat{\gamma}sat(s/\delta)$는 위치 및 속도오차의 0으로의 수렴을, 그리고 $-Pe$는 위치오차의 수렴속도을 개선하기 위한 부분이다. $\hat{\beta}$와 $\hat{\gamma}$는 외란에 대한 경계조건의 계수에 대한 추정치이며 위치오차 비례궤환부분과 함께 제어기가 외란에 대한 강인성을 가지게 한다.

3. 수정된 적응제어기의 안정도 해석

안정도 해석을 위한 Lyapunov candidate function $V(t)$를 다음과 같이 시스템의 오차, 위치오차, 역학 파라메터 추정오차 및 외란 경계치 추정오차의 함수로 정의하였다.

$$\begin{aligned} V(t) = \frac{1}{2}s^T K'^{-1}M's + \frac{1}{2}\tilde{\alpha}^T\Gamma\tilde{\alpha} + \frac{1}{2}e^T Pe \\ + \frac{1}{2\mu}(\beta - \hat{\beta})^2 + \frac{1}{2\nu}(\gamma - \hat{\gamma})^2 \end{aligned} \tag{25}$$

$V(t)$의 도함수 $\dot{V}(t)$를 구하면 다음과 같다.

$$\dot{V}(t) = s^T[K'^{-1}M'\dot{s} + \frac{1}{2}K'^{-1}\dot{M}'s] + \tilde{\alpha}^T\Gamma\dot{\hat{\alpha}} + e^TP\dot{e} - \frac{(\beta-\hat{\beta})\dot{\hat{\beta}}}{\mu} - \frac{(\gamma-\hat{\gamma})\dot{\hat{\gamma}}}{\nu} \quad (26)$$

$$= s^T[K'^{-1}M'\ddot{q} - K'^{-1}M'\ddot{q}_r + K'^{-1}V's] + \tilde{\alpha}^T\Gamma\dot{\hat{\alpha}} + e^TPs - e^TP\Lambda e - \frac{(\beta-\hat{\beta})\dot{\hat{\beta}}}{\mu} - \frac{(\gamma-\hat{\gamma})\dot{\hat{\gamma}}}{\nu} \quad (27)$$

$$= s^T[u + u_d - K'^{-1}V'\dot{q} - K'^{-1}G - K'^{-1}F' - K'^{-1}M'\ddot{q}_r + K'^{-1}V'(\dot{q}-\dot{q}_r)] + \tilde{\alpha}^T\Gamma\dot{\hat{\alpha}} + e^TPs - e^TP\Lambda e - \frac{(\beta-\hat{\beta})\dot{\hat{\beta}}}{\mu} - \frac{(\gamma-\hat{\gamma})\dot{\hat{\gamma}}}{\nu} \quad (28)$$

$$= s^T[Y\hat{\alpha} - Y\alpha + u_d - \hat{\beta}s - \hat{\gamma}sat(s/\delta) - Pe] + \tilde{\alpha}^T\Gamma\dot{\hat{\alpha}} + e^TPs - e^TP\Lambda e - \frac{(\beta-\hat{\beta})\dot{\hat{\beta}}}{\mu} - \frac{(\gamma-\hat{\gamma})\dot{\hat{\gamma}}}{\nu} \quad (29)$$

$$= s^TY\tilde{\alpha} + \tilde{\alpha}^T\Gamma\dot{\hat{\alpha}} + s^Tu_d - s^T\hat{\beta}s - s^T\hat{\gamma}sat(s/\delta) - e^TP\Lambda e - \frac{(\beta-\hat{\beta})\dot{\hat{\beta}}}{\mu} - \frac{(\gamma-\hat{\gamma})\dot{\hat{\gamma}}}{\nu} \quad (30)$$

(20), (21)의 적응법칙과 (19)의 외란 경계조건을 적용하면 Lyapunov의 도함수는 다음 부등식을 만족하게 된다.

$$\dot{V}(t) \le \|s\|\|u_d\| - \hat{\beta}\|s\|^2 - s^T\hat{\gamma}sat(s/\delta) - e^TP\Lambda e - \frac{(\beta-\hat{\beta})\dot{\hat{\beta}}}{\mu} - \frac{(\gamma-\hat{\gamma})\dot{\hat{\gamma}}}{\nu} \quad (31)$$

$$\le \gamma\|s\| - \hat{\gamma}s^Tsat(s/\delta) - e^TP\Lambda e - \frac{(\gamma-\hat{\gamma})\dot{\hat{\gamma}}}{\nu} \quad (32)$$

㉮ $\forall i,\ |s_i| \ge \delta$인 경우, $s^Tsat(s/\delta) = \|s\|_1 \ge \|s\|$와 (23)에 의하여

$$\dot{V}(t) \le -e^TP\Lambda e \le 0 \quad (33)$$

㉯ $|s_i| \ge \delta$ & $|s_j| < \delta$ $(i = 1, \cdots, j-1, j+1, \cdots, n)$ 인 경우

$$\dot{V}(t) \le \hat{\gamma}(\|s\| + |s_j| - \|s\|_1 - s_j^2/\delta) - e^TP\Lambda e \quad (34)$$

㉰ $\forall i,\ |s_i| < \delta$인 경우에는 $s^Tsat(s/\delta) = \|s\|^2/\delta$와 (18)에 의하여

$$\dot{V}(t) \le \gamma\|s\| - \frac{\hat{\gamma}\|s\|^2}{\delta} - e^TP\Lambda e - (\gamma-\hat{\gamma})\|s\| \quad (35)$$

$$\le (1 - \frac{\|s\|}{\delta})\hat{\gamma}\|s\| - e^TP\Lambda e \quad (36)$$

과 같은 부등식을 만족시킨다.

㉮의 경우, $\dot{V}(t) \le 0$이므로 시스템은 안정하며 시스템의 오차상태는 $s=0$인 슬라이딩 평면을 향하게되어 결국 ㉯,㉰의 경우가 발생하게 된다. ㉯,㉰의 경우는 $\dot{V}(t) \le 0$을 보장할 수 없으므로 $V(t)$가 증가될 수도 있다. $V(t)$가 증가하게되면 다시 ㉮의 경우가 되므로 위치오차와 속도오차는 슬라이딩 평면 부근을 따라 감소하게 된다. 결국, 수정된 제어기는 외란의 존재시에도 시스템의 안정을 유지하며 시스템의 오차는 globally uniformly ultimately bound된다. 또, ㉰의 경우 s가 0으로 수렴하지 못하므로 역학 파라메터의 추정치가 발산하는 것을 방지하기 위하여 $\forall i,\ |s_i| < \delta$인 동안은 파라메터의 적응을 중지시켜야 한다. 제어법칙의 블럭도는 그림1과 같다.

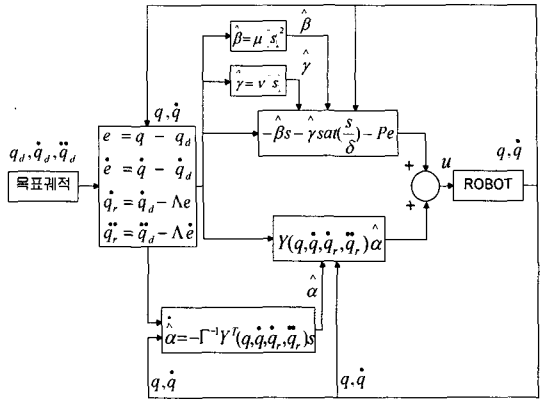

그림 1. 적응제어기의 블록도.
Fig. 1. Block diagram of the adaptive controller.

Ⅳ. 적응제어기의 구현

1. 실험 환경

실험에 사용된 로봇 매니퓰레이터는 그림 2와 같은 5축 수직 다관절형인 SCORBOT ER-7을 대상으로 하였다. 로봇 매니퓰레이터로 각 관절이 직류전동기와 감속기, 광학적 엔코더로 구성되어 있다. 감속기는 감쇠비 160 : 1의 하모닉 드라이브와 감쇠비 3 : 1의 타이밍 벨트로 구성되어 있으며, 엔코더의 1회전 펄스는 500개로 4체배 회로를 통해 2000개로 증가시켜 사용하였다. 전동기축에 대한 분해능은 0.18 deg/pulse, 로봇 관절축에 대한 분해능은 0.000375 deg/pulse 이다.

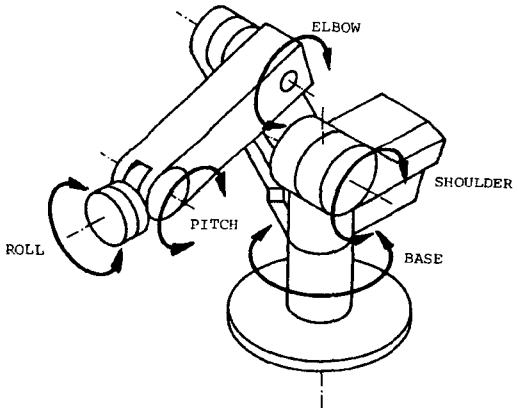

그림 2. SCORBOT ER-7.
Fig. 2. SCORBOT ER-7.

본 실험에서는 로봇 시스템의 하단부 3축에 대하여 제어기를 구현하였다. 제어기로 PC를 사용하였다. 직류전동기를 구동하기 위해 전압제어형 PWM 증폭기를 제작하였고 PWM 증폭기의 출력을 조절하기 위한 12bit D/A 변환기, 위치궤환을 위하여 4체배 회로와 16bit up/down counter, 인터럽트를 발생시키기 위한 timer회로로 구성된 인터페이스 회로를 제작하였다.

2. 실험 방법

제어기의 타당성을 조사하기 위하여 관절공간에서 3축 동시 위치제어를 수행하였다. 적응법칙에 의해 추정되는 역학 파라메터의 초기값은 사전지식이 전혀 없는 것으로

가정하여 모두 0으로 설정하였고, $\hat{\beta}$와 $\hat{\gamma}$ 는 각각 15, 15로 설정하였으며 $P=5500I$, $\Lambda=20I$, $\delta=0.2$, 적응법칙 이득으로 $\Gamma=0.9I$, $\mu=2.5$, $\nu=2.5$을 사용하여 실험하였다. 위 설정값들은 시뮬레이션에 의해 결정되었다. 제어법칙의 계산시간은 1.9ms가 소요되었으며 샘플링 시간은 5ms로 하였고 그림 3(a), (b)와 같이 각 관절의 목표궤적은 사다리꼴 가감속 속도궤적을 사용하여 각각 0° → 30° → -30° → 0° 로 하였다. 로봇 매니퓰레이터의 초기위치(0°, 0°, 0°)는 팔을 수평으로 편 상태이다. 속도궤환은 위치궤환으로부터 위치보간법을 이용하여 구하였다. 실험은 무부하의 경우와 부하로 end-effector에 길이 20cm의 끈으로 500g의 추를 달은 경우에 대하여 행하였으며, 끈에 추를 달은 부하의 경우는 외란에 대한 제어기의 성능을 확인하기 위한 것으로 각 관절이 움직임에 따라 추가 흔들려 불규칙한 부하로 작용하게 된다.

두 제어기의 성능을 비교하기 위하여 각각 무부하 및 추 부하의 상태에서 실험을 실시하였다.

1) Slotine의 적응제어기 (채터링 억제를 위해 $sgn()\rightarrow sat()$)

$$u = Y(q, \dot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r)\hat{\alpha} - 15s - 15\,sat(s/\delta) \quad (37)$$

2) 수정된 적응제어기

$$u = Y(q, \dot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r)\hat{\alpha} - \hat{\beta}s - \hat{\gamma}sat(s/\delta) - 5500e \quad (38)$$

또한, 수정된 적응제어기의 위치오차 비례궤환부분이 제어 결과에 미치는 영향에 알아보기 위한 실험도 실시하였다.

3. 실험 결과

무부하시 Slotine의 적응제어기와 수정된 적응제어기의 실험 결과는 각각 그림 4, 6과 그림 5, 7과 같으며 그림 4, 5는 목표 궤적에 대한 추종오차이며 그림 6, 7은 제어기의 출력전압이다. 무부하시의 두 제어기의 궤적추종 그래프를 살펴보면 두 제어기 모두 비교적 잘 목표궤적을 추종하고 있으나, 궤적추종 오차그래프를 보면 수정된 제어기쪽이 현저히 적은 오차를 나타내고 있다.

추 부하시 Slotine의 적응제어기와 수정된 적응제어기의 실험 결과는 각각 그림 8, 10과 그림 9, 11과 같으며 그림 8, 9는 목표궤적에 대한 추종 오차이며 그림 10, 11은 제어기의 출력전압이다. 외란이 존재하는 상황으로 추 부하시의 제어 결과를 보면 (37)의 제어기의 경우는 궤적추종오차가 증가하며 추의 흔들림의 영향을 보이고 있으나 수정된 제어기의 경우에는 무부하시와 거의 같은 오차를 나타내고 있음을 알 수 있다.

표 1과 표 2는 각각 무부하시 오차궤적의 RMS값, 추 부하시 오차궤적의 RMS값을 나타내며 이 결과값을 비교해 보아도 수정된 제어기가 보다 우수한 궤적추종성능을 가짐을 알 수 있다. 수정된 적응제어기[(20)]의 위치오차 비례궤환부분의 영향을 알아보기 위하여 제어입력을 다음과 같이 결정한 경우의 실험 결과는 그림 12와 같다.

$$u = Y(q, \dot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r)\hat{\alpha} - \hat{\beta}s - \hat{\gamma}sat(s/\delta) \quad (39)$$

그림 5와 12를 비교해 보면 위치오차 비례궤환부분이 있는 수정된 제어기가 보다 작은 위치오차를 나타내고 있으며 이는 수정된 적응제어기의 위치오차 비례궤환부분이 위치오차 감소에 상당한 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 그림 13는 수정된 적응제어기의 δ의 값에 변화에 따른 실험 결과이며 δ가 증가함에 따라 채터링이 감소하고 오차는 증가하고 있다. 이 실험결과를 통하여 슬라이딩 평면의 경계영역 폭이 채터링과 오차와 관련이 있음을 알 수 있다.

표 1. 무부하시 오차궤적의 RMS값.
Table 1. RMS values of the tracking error without loads.

		Slotine의 제어기 [(37)]	수정된 제어기 [(38)]
위치	1 축	0.358148	0.090272
	2 축	0.355269	0.088968
	3 축	0.328567	0.083779
속도	1 축	0.866058	0.433205
	2 축	0.872976	0.436407
	3 축	0.746179	0.363964

표 2. 부하시 오차궤적의 RMS값.
Table 2. RMS values of the tracking error with loads.

		Slotine의 제어기 [(37)]	수정된 제어기 [(38)]
위치	1 축	0.366413	0.089308
	2 축	0.388890	0.092781
	3 축	0.348486	0.085858
속도	1 축	0.897251	0.423319
	2 축	1.047641	0.470234
	3 축	0.787629	0.376149

V. 결론

본 논문에서는 Slotine의 적응제어법칙의 단점을 보완하여 외란에 대한 강인성과 궤적추종 오차의 수렴 속도를 향상시키기 위하여 비례궤환부분의 이득을 추정하도록 수정하였으며 위치오차에 대한 비례궤환부분을 추가한 제어기를 제시하였다. 또한, 보다 정밀한 제어를 위하여 구동기의 동력학을 포함한 로봇 매니퓰레이터 동력학식을 세웠으며 이 동력학식에 수정된 제어법칙을 적용하여 실험을 하였다. 실험 결과를 통하여 수정된 적응제어기가 Slotine의 적응제어기보다 적은 추종 오차를 가지며 외란에 강인한 성능을 가짐을 확인 할 수 있었다. 그러나, 본 논문에서는 감속비가 높은 기어를 사용한 로봇 매니퓰레이터를 실험 대상으로 사용하므로써 각 링크의 비선형 상호작용을 보상하는 model-based 제어기의 장점을 최대한 살릴 수는 없었다. 추후 논문과제로는 수정

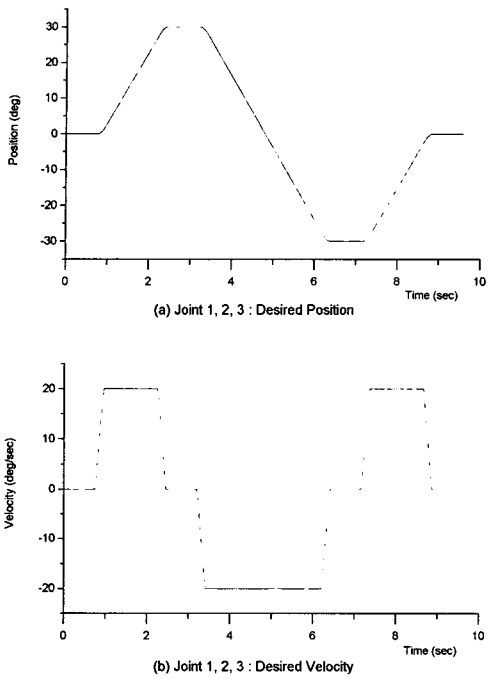

그림 3. 목표 궤적.

Fig. 3. Desired trajectory.

□ 무부하시

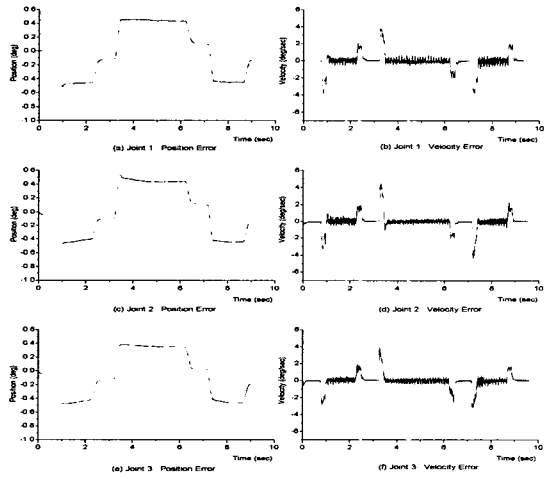

그림 4. Slotine 적응제어기[(37)]의 오차궤적.

Fig. 4. Tracking error graphs of Slotine's adaptive controller without loads.

된 적응제어기를 직접 구동형 로봇 매니퓰레이터에 적용하여 비선형 상호작용이 큰 상황에서의 성능을 확인하여야 할것이며 본 논문에서는 모든 역학 파라메터에 대하여 사전 정보가 없는 것을 가정하였으나 비교적 정확히 알 수 있는 역학 파라메터를 분리하여 필요한 역학 파라메터만을 적응 시킴으로서 제어기의 계산시간을 단축시켜도록 개선하여야 할 것이다. 수정된 제어법칙는 정상상태의 위치 오차가 정확히 0으로 수렴하지는 않고 어느 정도의 위치 오차를 유지하는 단점이 있는데, 이는 채터링을 억제하기 위해 사용한 포화함수 $sat()$에 인한 것으로 이 또한 개선되어야 할 점이다.

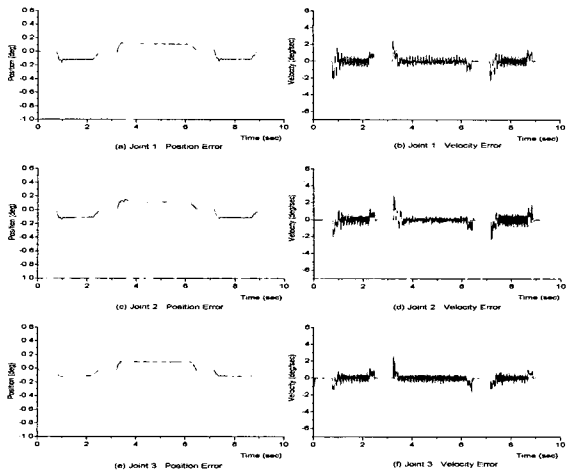

그림 5. 수정된 적응제어기[(38)]의 오차궤적.

Fig. 5. Tracking error graphs of a modified adaptive controller.

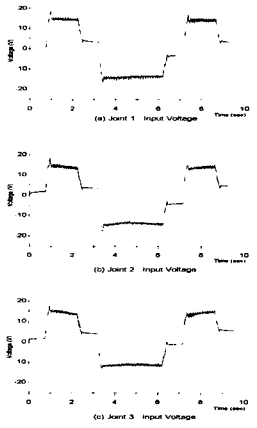

그림 6. Slotine 적응제어기의 입력전압.

Fig. 6. Input voltage graphs of Slotine's adaptive controller.

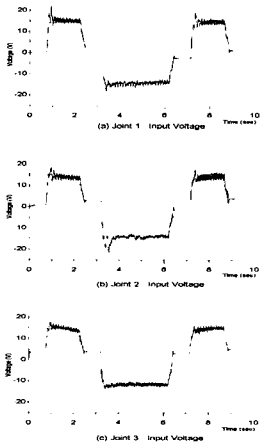

그림 7. 수정된 적응제어기의 입력전압.

Fig. 7. Input voltage graphs of modified adaptive controller.

□ 20cm길이의 500g 추 부하시

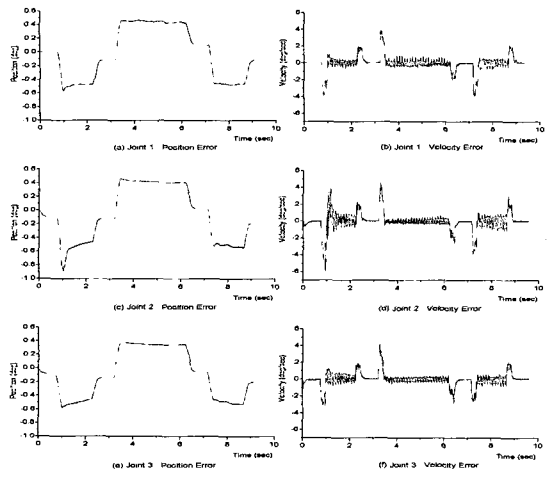

그림 8. Slotine 적응제어기[(37)]의 오차궤적.
Fig. 8. Tracking error graphs of Slotine's adaptive controller.

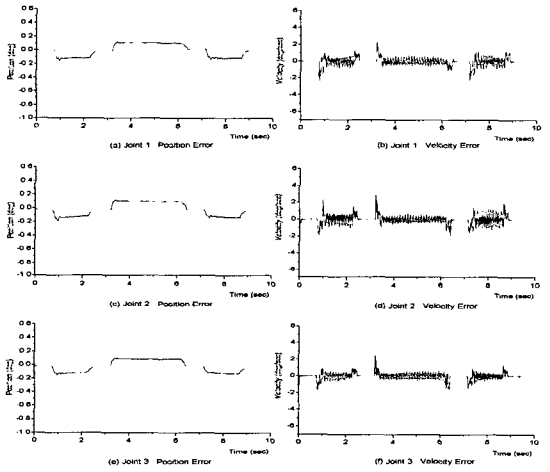

그림 9. 수정된 적응제어기[(38)]의 오차궤적.
Fig. 9. Tracking error graphs of modified adaptive controller with loads.

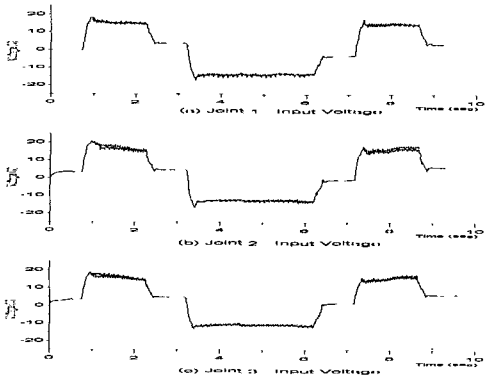

그림 10. Slotine 적응제어기의 입력전압.
Fig. 10. Input voltage graphs of Slotine's adaptive controller.

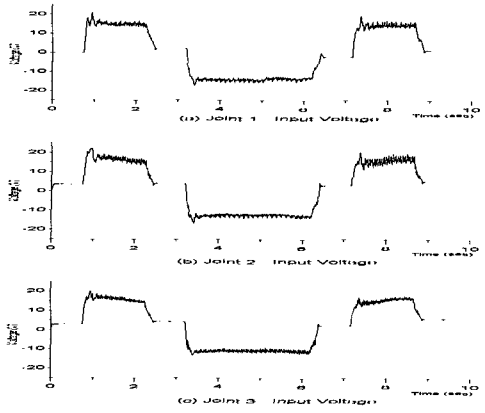

그림 11. 수정된 적응제어기의 입력전압.
Fig. 11. Input voltage graphs of modified adaptive controller.

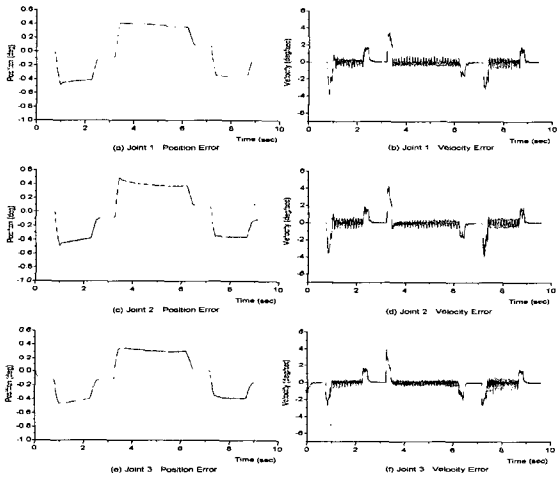

그림 12. 수정된 적응제어기의 비례궤환부분이 없을때.
Fig. 12. In case of no propotional feedback part of the modified adadptive controller.

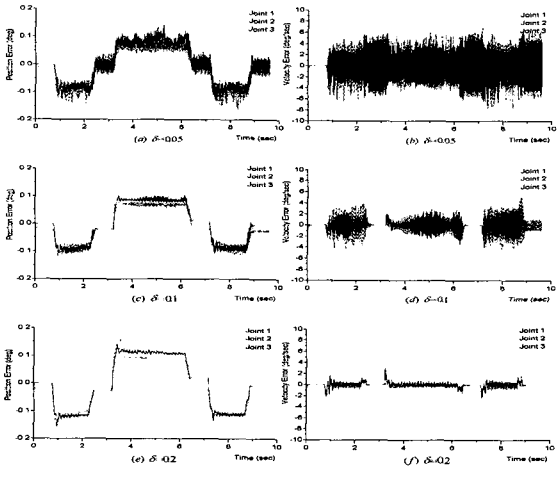

그림 13. 수정된 적응제어기 : sat()의 δ에 따른 오차.
Fig. 13. A modified adadptive controller : errors of sat() with respect to δ.

참고문헌

[1] C. H. An, C. G. Atkeson, J. M. Hollerbach, "Experimental evaluation of feedforward and computed torque control," *IEEE Conf. Robotics and Automation,* vol. 2, pp. 165-168, 1987.

[2] J. J. E. Slotine, W. Li, "On the adaptive control of robot manipulators," *Int. J. Robotics Res.*, pp. 49-59, June, 1987.

[3] J. J. Craig, P. Hsu, S. S. Sastry, "Adaptive control of mechanical manipulators," *Int. Journal of Robotics Reaserch,* vol. 6, no. 2, pp. 16-28, Summer, 1987.

[4] J. J. E. Slotine, W. Li, "Adaptive manipulator control : A case study," *IEEE Trans. Automatic Control,* vol. 33, no. 11, pp. 995-1003, Nov., 1988.

[5] C. Y. Su, Y. Stepanonko, "Adaptive sliding mode control of robot manipulators with general sliding manifold," *Pro. IEEE Con. Int. Robots and Systems,* pp. 1255-1259, 1993.

[6] F. L. Lewis, C. T. Abdallah, D. M. Dawson, *Control of Robot Manipulators*, Macmillan Pub., 1993.

[7] M. W. Spong, M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*, Wiley, 1989.

[8] J. J. Slotine, *Applied Nonlinear Control,* Prentice-Hall, 1991.

[9] M. Vidyasagar, *Nonlinear Systems Analysis,* Prentice-Hall, 1993.

[10] B. C. Kuo, *Incremental Motion Control DC Motors*, SRL PUB, 1978.

길 진 수

1990년 아주대학교 제어공학과 졸업(공학사). 1992년 아주대학교 대학원 제어공학과 졸업(공학석사). 1995년 아주대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료. 현재 NAVTRON 선임연구원. 주관심분야는 로보틱스응용 및 제어, 관성항법 시스템(INS), GPS 엔진 및 S/W개발.

한 상 완

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 3권 제 6호 참조.

조 원 영

1993년 아주대학교 제어계측공학과 졸업(공학사). 1995년 아주대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(공학석사). 1995년~현재 대우 고등기술연구원 생산기술연구실 주임연구원. 주관심분야는 로보틱스응용 및 자동화, 시스템제어.

홍 석 교

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 3권 제 6호 참조.