

# 로봇 매니플레이터에 대한 강인한 적응 제어기의 설계

정석우, 유 준  
충남대학교 전자공학과

## Robust Adaptive Controller Design for Robot Manipulators

Seok Woo-Jung and Joon Lyou  
Dept. of Electronics Eng., Chungnam National Univ.

### Abstract

This paper presents a robust adaptive control scheme based on the Lyapunov design for robot manipulators subjected to inertial parameter uncertainties and bounded torque disturbances. The scheme is a modified version of the adaptive computed torque method which adopts a dead zone into the adaptation mechanism so as to avoid parameter drifts by disturbances. It is shown via stability analysis and computer simulations that all the signals in the overall adaptive system are bounded and tracking errors lie within a prespecified bound.

### I. 서론

로봇 매니플레이터는 널리 사용되고 있으며, 대개는 비교적 간단한 제어시스템을 갖추고 있다. 이러한 제어시스템은 경우에 따라 적절한 것으로 판명되었으나, 매니플레이터의 성능에 대한 요구가 증가됨에 따라 보다 개선된 형태의 제어기법에 대한 필요성이 대두되었다. 매니플레이터의 동적 모델은 복잡한 비선형 미분방정식으로 표현되기 때문에 모델 파라미터에 불확실성이 흔히 존재하고, 특히 부하(payload)가 빈번히 변화하는 작업을 매니플레이터가 담당하는 경우 불확실한 동적 모델을 기반으로 하는 제어방식(Computed Torque Method)으로는 정밀한 성능을 보장받기가 매우 어렵다. 근자에 로봇 모델이 未知의 관성 파라미터에 관하여 선형적으로 표현되는 점에 착안하여 파라미터 추정기구를 Computed Torque Method에 도입하려는 연구가 이루어졌다[1,2]. 이러한 연구들은 적응법칙에 따라 다소 방식을 달리하고 있으나, 가속도 정보를 필요로 하지 않는 적응기구를 됴으로써 매니플레이터가 원하는 궤적을 추종할 때 관성 파라미터의 불확실성으로 인하여 야기되는 추종오차를 현저하게 줄여 나갈 수 있음을 보였다. 다시 말하면 외란(disturbance)을 고려하지 않은 상황하에서 기준궤적을 정확히 추적할 수 있는 적응제어 기법을 제시하고 있으며, 추종오차의 광역적인 수렴성(global convergence)을 증명하였다.

일반적으로 토크(torque) 잡음과 같은 유한한(bounded) 외란이 존재할 경우 추종오차는 0이 되지 않으며, 파라미터 추정시 외란의 영향으로 추정치에 표류(drift)가 일어나 (한 쪽 방향으로 무한히 커져) 궁극적으로는 제어시스템의 안정성이 보장되지 않을 수도 있다. 실제 매니플레이터 계통에서 오차의 원인은 파라미터의 불확실성 뿐만 아니라 측정오차, 모델화될 수 없는 시변 마찰력, 토크 잡음 등이 있으므로 이러한 외란하에서도 강인하게 동작하는 적응제어기법이 요구된다. 최근 기존의 적응제어 알고리즘이 강인성을 갖도록 하는 연구가 관심있게 진행되고 있다[3]. 하지만 이들 연구의 단점은 외란 크기의 상한값을 미리 알아야 하거나, 파라미터 표류를 막기위해 변경이 가해진 조정법칙의 구현에 있어 관성 파라미터에 대한 사전 지식(normal 값)이 있어야 된다는 것이다.

본 논문에서는 관성 파라미터에 불확실성이 존재하고 유한한 토크 잡음을 받는 강체(rigid) 매니플레이터에 대해 Lyapunov 설계[1,4]에 기초를 둔 강인한 적응제어 기법을 제시한다. 이는 변형된 적응 Computed Torque Method로서 모든 관성 파라미터 및 외란의 상한값을 추정하고 이들을 토크 입력력의 계산에 반영시켜 줌으로써 추종오차를 줄이는 동시에, 추종오차가 어떤 규정된 허용 범위내에 들면 파라미터 추종을 멈추어 조정변수의 표류를 억제한다.

### II. 문제 기술

$n$ 개의 관절을 갖는 매니플레이터의 동역학 모델은 다음의 비선형 벡터 미분방정식으로 표현된다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q, \dot{q}) = \tau + \tau_d \quad (1)$$

여기서

$q, \dot{q}, \ddot{q}$  :  $n$ 차원의 각위치, 각속도, 각가속도 벡터

$\tau$  : 관절에 가해지는  $n$ 차원의 토크 벡터

$\tau_d$  :  $n$ 차원의 토크 잡음

$M(q)$  : 대칭·정칙인(symmetric positive-definite)

$n \times n$  차원의 관성행렬

$C(q, \dot{q})\dot{q}$  :  $n$ 차원의 원심력 및 코리올리스(Coriolis)력 벡터

$g(q, \dot{q})$  :  $n$  차원의 중력 및 마찰력 벡터

위치벡터  $q$ 와 속도벡터  $\dot{q}$ 는 측정가능하고,  $M, C, \dot{q}$ 의 구조는 알려져 있지, 이들에 속한 관성 파라미터들의 값은 모른다 고 가정한다. 또한 토크 잡음( $\tau_d$ )는 유한하지만, 외란 크기의 상한값은 알려져 있지 않다. 즉

$$\|\tau_d\| < \rho, \quad \rho \text{는 미지의 양의 상수} \quad (2)$$

모델 (1)은 이외에 다음과 같은 성질을 갖는다[1].

i) 관절 좌표계의 적절한 선택을 통하여

$\{ \hat{M}(q) - 2C(q, \dot{q}) \}$ 은 왜대칭(skew symmetric) 행렬이 된다.

ii) linear parameterization :

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + g = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\theta$$

여기서  $Y$ 는  $n \times m$ 개의 신호로 구성된 행렬이고,  $\theta$ 는  $m$ 개의 관성 파라미터들로 이루어진 열(column) 벡터이다.

매니플레이터의 관절공간 제어기 설계 문제는 주어진 관절공간 궤적을 충실히 추적할 수 있도록 관절에 가해질 토크 벡터  $\tau$ 를 구하는 것이다. 매니플레이터의 관절이 추종할 원하는 궤적이  $(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d)$ 로 주어졌을 때 위치, 속도, 가속도 오차와 제어가 활용하게 될 신호들을 다음과 같이 정의하자.

$$\begin{aligned} \bar{q} &= q - q_d, \quad \dot{\bar{q}} = \dot{q} - \dot{q}_d, \quad \ddot{\bar{q}} = \ddot{q} - \ddot{q}_d \\ v &= \dot{q}_d - \Lambda \bar{q}, \quad a = \ddot{q}_d - \Lambda \dot{\bar{q}}, \quad s = \dot{\bar{q}} + \Lambda \bar{q} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $\Lambda = \lambda I$ 로서  $I$ 는 단위행렬이고  $\lambda$ 는 양의 상수로 선정되는 설계변수이다. (3)의 정의를 이용하여 동역학 방정식 (1)은 다음과 같이 변형될 수 있다.

$$M(q)\dot{s} + C(q, \dot{q})s = -Y(q, \dot{q}, v, a)\theta + \tau + \tau_d \quad (4)$$

여기서

$$M(q)a + C(q, \dot{q})v + g(q) = Y(q, \dot{q}, v, a)\theta$$

이제 문제는 위의 가정아래서 매니플레이터 시스템 (6)이

관성 파라미터  $\theta$ 의 불확실성 뿐만 아니라 유한한 크기의 외란  $\tau_d$ 의 영향을 받음에도 불구하고, 원하는 기준궤적  $(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d)$ 을 가능한 적은 오차 범위를 가지고 추적 할 수 있도록 (시스템내의 모든 신호가 유한하면서 추적 오차를 어떤 규정된 범위안에 머물도록) 관절 토크  $\tau$ 를 결정하는 일이다. 이를 위하여 강인한 적응제어기를 설계하는 방법을 제시하고 제어기를 포함한 전체 폐루프 시스템이 안정함을 보여주기로서 한다.

### III. 제어기 설계

시스템 (4)를 안정화 시키기 위하여 (시스템내의 모든 신호를 유한하게 하고 추종오차를 줄이기 위하여) Lyapunov 설계법[1,4]에 입각한 적응제어기를 다음과 같이 제시한다.

$$\tau = Y(q, \dot{q}, v, a)\hat{\theta}(t) - p(t) - Ks \quad (5)$$

또는

$$\tau = \hat{M}(q)a + \hat{C}(q, \dot{q})v + \hat{g}(q, \dot{q}) - p(t) - Ks \quad (5.a)$$

$$p = \begin{cases} \hat{p}(t) \frac{s}{\|s\|}, & \|s\| > \lambda \epsilon \\ \hat{p}(t) \frac{s}{\lambda \epsilon}, & \|s\| \leq \lambda \epsilon \end{cases} \quad (6)$$

$$\hat{\theta} = \begin{cases} -\Gamma Y^T s, & \|s\| > \lambda \epsilon \\ 0, & \|s\| \leq \lambda \epsilon \end{cases} \quad (7)$$

$$\dot{\hat{p}} = \begin{cases} \gamma \|s\|, & \|s\| > \lambda \epsilon \\ 0, & \|s\| \leq \lambda \epsilon \end{cases} \quad (8)$$

여기서  $\hat{\theta}$ 와  $\dot{\hat{p}}$ 는 각각  $\theta$ 와  $p$ (외란 크기의 상한값)의 추정치로서 적응기구 (7)와 (8)을 통하여 매순간 생성된다.  $\epsilon$ 는 추종오차의 허용범위를 규정하는 설계변수이며,  $\Gamma$ 는 대칭·정칙인 가중 행렬,  $\gamma$ 는 양의 가중치이다. (5)의  $K$ 는 정칙·대각인 비례·미분(PD) 이득행렬로서 추종오차의 과도특성을 개선하기 위하여 첨가되었다. (5)의 보조 입력신호  $p$ 는 유한한 토크 잡음의 영향을 상쇄시키기 위하여 도입되었고, (7)과 (8)에서  $\|s\|$ 이  $\lambda \epsilon$ 보다 작을 때 (추종오차가 설정오차 이하가 되면) 파라미터 추정을 멈추는 이유는  $\hat{\theta}$ 와  $\dot{\hat{p}}$ 의 표류를 억제하기 위함이다. 이 두 측면이 외란을 고려하지 않은 Slotine 방식 [1]과의 차이점이다.

식 (5)~(8)으로 이루어지는 본 강인제어기는 그림 1과 같이 편성된다.

$$\dot{\hat{p}}_i = \begin{cases} \gamma_i |s_i|, & |s_i| > \lambda \epsilon \\ 0, & |s_i| \leq \lambda \epsilon \end{cases} \quad (8.a)$$

여기서 아래첨자  $i$ 는 벡터의  $i$ 번째 원소를 가리킨다.

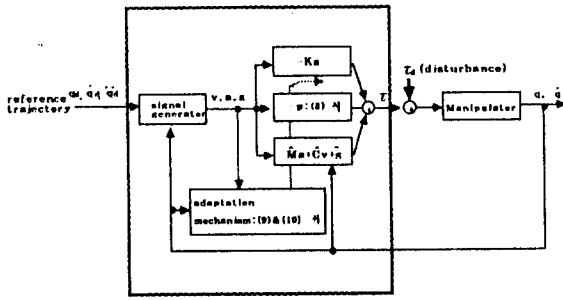


그림 1. 본 강인 적응제어기의 구조

참고 1 :  $n$ 차원의 외란 벡터  $\tau_d$ 의 크기( $\|\tau_d\|$ )를 하나의 조정 변수  $\hat{\rho}$ 로 추정하는 것은  $\hat{\rho}$ 가 필요이상으로 크게 되는 결과를 초래할 수 있다. 따라서 각 관절마다 토오크 잡음의 크기를 분리하여 생각하고, 즉  $|\tau_{di}| < \rho_i$ , 모든 상한값  $\rho_i$ 의 추정치  $\hat{\rho}_i$ 를 구하는 것이 바람직하다.

#### IV. 안정 해석

(5)의 제어입력을 플랜트 (4)에 인가하여 형성되는 폐루프 오차 시스템은 다음과 같이 유도된다.

$$M(q)s + C(q, \dot{q})s + Ks = -Y(q, \dot{q}, v, a)\hat{\theta} + \tau_d - p \quad (9)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = \dot{\theta} \quad (7.a)$$

$$\dot{\hat{\rho}} = \dot{\rho} \quad (8.a)$$

여기서  $\dot{\theta} = \dot{\hat{\theta}} - \dot{\theta}$ ,  $\dot{\rho} = \dot{\hat{\rho}} - \dot{\rho}$  (파라미터 오차)이고,  $p$ 는 (6)에 주어져 있다.

식 (6)~(9)로 주어지는 오차시스템의 안정성은 다음의 정리를 통하여 보장된다.

정리 1 : 2장에 기술한 가정들 아래서 형성된 적응시스템 (6)~(9)의 모든 신호들은 임의의 유한한 초기치 및 모든  $t$ 에 대해 유한하다 (*globally uniformly bounded*).

(증명) : Lyapunov 함수를 이차(quadratic) 형태로 다음과 같이 선정하자.

$$V(t) = \frac{1}{2} s^T M(q)s + \bar{q}^T \Lambda^T K \bar{q} + \frac{1}{2} \bar{\theta}^T \Gamma^{-1} \bar{\theta} + \frac{1}{2} \bar{\rho}^T \Gamma^{-1} \bar{\rho} \quad (10)$$

$V$ 를 시간에 대해서 미분하고 (6)~(8)식을 따라 평가하면 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s^T M(q)\dot{s} + \frac{1}{2} s^T \dot{M}(q)s + 2\bar{q}^T \Lambda^T K \dot{\bar{q}} \\ &\quad + \bar{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\bar{\theta}} + \bar{\rho}^T \Gamma^{-1} \dot{\bar{\rho}} \\ &= s^T \{-C(q, \dot{q})s - Ks + Y(q, \dot{q}, v, a)\bar{\theta} + \tau_d - p\} \\ &\quad + \frac{1}{2} s^T \dot{M}(q)s + 2\bar{q}^T \Lambda^T K \dot{\bar{q}} + \bar{\theta}^T \dot{\bar{\theta}} + \bar{\rho}^T \dot{\bar{\rho}} \\ &= -s^T Ks + 2\bar{q}^T \Lambda^T K \dot{\bar{q}} \\ &\quad + \frac{1}{2} s^T (M - 2C)s \\ &\quad + s^T Y \bar{\theta} + \bar{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\bar{\theta}} \\ &\quad + s^T \tau_d - s^T p + \bar{\rho}^T \Gamma^{-1} \dot{\bar{\rho}} \end{aligned} \quad (11)$$

이후의 수식 전개를 위해 (11)의 각항을 분리하여 살펴보기로 하자.

$$\begin{aligned} \text{①항} &= -\bar{q}^T K \dot{\bar{q}} - \bar{q}^T \Lambda^T K \Lambda \dot{\bar{q}} \\ &= -x^T Q x \leq \lambda_m(Q) \|\bar{q}\|^2 \end{aligned}$$

여기서  $x \triangleq [\bar{q}^T, \dot{\bar{q}}^T]^T$ ,  $Q = \text{block diag} \{ \Lambda^T K \Lambda, K \}$

이고  $\lambda_m(Q)$ 는 행렬  $Q$ 의 최소 고유치를 의미한다.

②항은 행렬  $(M - 2C)$ 의 왜대칭 성질에 의해 소거된다.

③항은 (7)식으로부터 다음의 두 경우로 나누어진다.

i)  $\|\bar{q}\| > \lambda \epsilon$ 인 경우

$$\text{③항} = s^T Y \bar{\theta} - \bar{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\bar{\theta}} = 0$$

ii)  $\|\bar{q}\| \leq \lambda \epsilon$ 인 경우

$$\text{③항} = s^T Y \bar{\theta} \leq \|\bar{q}\| \|\dot{Y}\| \|\bar{\theta}\| \leq \delta$$

여기서  $\delta$ 는 유한한 양의 실수이다. 참고로 이 영역에서  $\bar{q}$  과  $\dot{\bar{q}}$  은 유한하고  $\dot{\bar{\theta}} = 0$  이므로  $Y$ 와  $\bar{\theta}$ 는 유한하다.

④항은 (6)과 (8)식으로부터 다음의 두 경우로 나누어진다.

i)  $\|\bar{q}\| > \lambda \epsilon$ 인 경우

$$\begin{aligned} \text{④항} &\leq \|\bar{q}\| \rho - s^T p + \dot{\bar{\rho}} \dot{\bar{\rho}} \\ &= \rho \|\bar{q}\| - \dot{\bar{\rho}} \frac{s^T s}{\|\bar{q}\|} + \dot{\bar{\rho}} \|\bar{q}\| = 0 \end{aligned}$$

즉 ④항  $\leq 0$

ii)  $\|\bar{q}\| \leq \lambda \epsilon$ 인 경우

$$\begin{aligned} \text{④항} &= s^T \tau_d - s^T p \leq \|\bar{q}\| \rho - s^T \frac{\dot{\bar{\rho}}}{\epsilon} s \\ &\leq \|\bar{q}\| \rho - \|\dot{\bar{q}}\|^2 \frac{\rho}{\epsilon} = \frac{\rho}{\epsilon} (-\|\dot{\bar{q}}\|^2 + \epsilon \|\bar{q}\|) \end{aligned}$$

$$\leq \frac{\epsilon\rho}{4}$$

두번째 부등식이 성립하는 근거는  $\dot{\rho}(t)$ 가 단조증가 함수이므로  $\dot{\rho}(t_1) \geq \rho$ 가 되도록 하는 유한한 시간  $t_1$ 이 존재하는 데서 비롯되고, 세번째 부등식이 성립하는 이유는  $\|s\|$ 의 2차 방정식  $(-\|s\|^2 + \epsilon\|s\|)$ 가  $\|s\| = \frac{\epsilon}{2}$  일때 최대값을 갖기 때문이다. 이상의 내용을 종합해보면  $V$ 에 대해 다음의 최정식이 얻어진다.

$$V \leq -\lambda_m(Q)\|s\|^2 + \delta + \frac{\epsilon\rho}{4} \quad (12)$$

이제 (12)식을 참조하여 잔여집합(residual set)를 다음과 같이 정의하자.

$$D = \{\|s\| \mid \lambda_m(Q)\|s\|^2 \leq \delta + \frac{\epsilon\rho}{4}\} \quad (13)$$

이러한 잔여집합 밖에서는  $V < 0$ ,  $V > 0$  이므로 [6]의 정리 2.24에 의하여  $x(t)$ , 즉  $\bar{q}(t)$ ,  $\dot{\bar{q}}(t)$ 는 임의의 유한한 초기치  $\bar{q}(t_0)$ ,  $\dot{\bar{q}}(t_0)$  및 모든  $t$ 에 대해 유한하고, 어떤 유한한 시간  $T$ 가 존재해서  $T$  이후에는  $x(t)$ 가 잔여집합안에 머물게 된다. 그리고 잔여집합안에서는 파라미터 추정이 멈추므로  $\dot{\theta}(t)$ 와  $\dot{\rho}(t)$ 는 더 이상 증가하지 않고 유한한 값을 유지한다. 참고로 잔여집합의 크기는 설계변수 값, 외란의 크기에 의해 결정된다.

## V. 시뮬레이션 결과

수직 평면상을 움직이고 동력이 기어(gear)를 통하지 않고 직접 전달되는 수직 2관절 직렬구동형(direct drive) 강체 매니플레이터를 시뮬레이션 대상으로 삼았다.

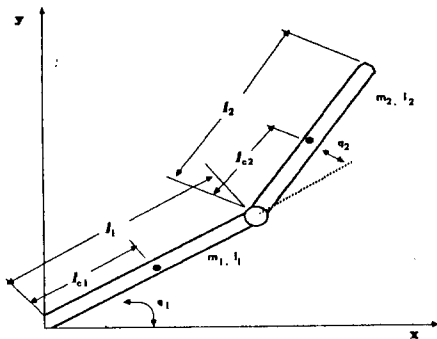


그림 2. 2관절 매니플레이터

표 1. 파라미터 값

$m_1$	$m_2$	$l_1$	$l_2$	$l_{c1}$	$l_{c2}$	$I_1$	$I_2$
10	$5+\alpha$	1	1	0.5	0.5	$\frac{10}{12}$	$\frac{5}{12}$

여기서  $m_2$ 는 부하 질량을 포함한 링크 2의 유효 질량으로써 부하가 빈번히 바뀔 때 질량값이 역시 달라지므로  $m_2$ 의 정확한 값을 사전에 알 수 없다.

대상 매니플레이터의 동적 방정식은 다음과 같이 주어진다 [5].

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q, \dot{q}) = \tau + \tau_d$$

$$M_{11} = m_1 I_{c1}^2 + m_2(I_1^2 + I_{c1}^2 + 2I_1 I_{c2} \cos(q_2)) + I_1 + I_2$$

$$M_{12} = M_{21} = m_2(I_{c1}^2 + I_1 I_{c2} \cos(q_2)) + I_2$$

$$M_{22} = m_2 I_{c2}^2 + I_2$$

$$C_{11} = -2m_2 I_1 I_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_2, \quad C_{12} = m_2 I_1 I_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_2$$

$$C_{21} = m_2 I_1 I_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_1, \quad C_{22} = 0$$

$$g_1 = (m_1 I_{c1} + m_2 I_1)g \cos(q_1) + m_2 I_{c2} g \cos(q_1 + q_2)$$

$$g_2 = m_2 I_{c2} g \cos(q_1 + q_2)$$

동적 방정식의 linear parameterization을 위해 관성 파라미터들을 다음과 같이 선택했을때

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6]^T$$

$$\theta_1 = m_1 I_{c1}^2 + m_2 I_1^2 + I_1 \quad \theta_2 = m_2 I_{c2}^2 + I_2$$

$$\theta_3 = m_2 I_1 I_{c2} \quad \theta_4 = m_1 I_{c1}$$

$$\theta_5 = m_2 I_1 \quad \theta_6 = m_2 I_{c2}$$

신호 행렬  $Y$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$Y(q, \dot{q}, v, a) = M(q)a + C(q, \dot{q})v + g(q)$$

$$y_{11} = \ddot{q}_1, \quad y_{12} = \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2$$

$$y_{13} = \cos(q_2)(2\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) - \sin(q_2)(\dot{q}_2^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2)$$

$$y_{14} = g \cos(q_1), \quad y_{15} = g \cos(q_1), \quad y_{16} = g \cos(q_1 + q_2)$$

$$y_{21} = 0, \quad y_{22} = \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2$$

$$y_{23} = \cos(q_2)\ddot{q}_1 + \sin(q_2)\dot{q}_1^2$$

$$y_{24} = 0, \quad y_{25} = 0, \quad y_{26} = g \cos(q_1 + q_2)$$

여기서  $a_1 = \ddot{q}_1 - \lambda \dot{q}_1$ ,  $a_2 = \ddot{q}_2 - \lambda \dot{q}_2$

$$v_1 = \dot{q}_1 - \lambda \dot{q}_1, \quad v_2 = \dot{q}_2 - \lambda \dot{q}_2.$$

매니플레이터에 부과된 작업은 산업용 로봇이 흔히 하고 있는 일인 집어서 옮겨 놓기(pick and place) 로 기획하였으며 구체적인 작업 조건은 표 2와 같다.

표 2. 작업 조건

시간 (초)	$0 \leq t \leq 0.5$	$0.5 \leq t \leq 3.5$	$3.5 \leq t \leq 4$	$4 \leq t \leq 7$
작업 내용	정지중에 0~5Kg의 부하를 집는다	A 지점에서 B 지점으로 기준궤적을 따라 이동한다.	정지중에 0~5Kg의 부하를 내려 놓는다.	B 지점에서 A 지점으로 기준궤적을 따라 되돌아온다.
비고	위의 운동 패턴을 12번 반복함.			

표 2에서 기준궤적은 A 지점 ( $q_a = -\pi/2$ ,  $q_w = 0$ )에서 B 지점 ( $q_a = 0$ ,  $q_w = \pi/2$ )으로 3초 동안에 완만하게 움직이도록 계획되었다.  $q_a(t)$ 는 아래와 같이 주어지며,  $q_a$ ,  $\dot{q}_a$ 는  $q_w$ 로부터 미분하여 구할 수 있다. 이러한 경로는 직교 좌표상에서 볼때 Cycloid 모양을 그린다.

$$q_a(t) = -\pi/2 + 1/4 [2\pi t/3 - \sin(2\pi t/3)] \text{ rad}$$

$$q_w(t) = 1/4 [2\pi t/3 - \sin(2\pi t/3)] \text{ rad}$$

또한 B 지점에서 A 지점으로 이동하는 기준궤적은 역 경로로 계획되었다.

$$q_a(t)' = -q_w(t), \quad q_w(t)' = -q_a(t)$$

이제 대상 매니플레이터에 대해 제시된 강인 적응제어기를 적용한 컴퓨터 모사가 수행되었다. 매니플레이터의 미분방정식은 4차 Runge-Kutta 방법을 이용하여 풀었고, 적응법칙 (7)과 (8)을 7ms의 표본시간으로 이산화하여 매주기마다 제어법칙 (5)를 보강하였다. (5)~(8)에 주어진 설계변수, 초기 추종오차, 조정변수의 초기 추정치를 다음과 같이 정하고 토크 잡음 ( $\tau_d$ )으로는 평균이 1이고 표준편차가 0.5, 0.2인 가우시안(Gaussian) 잡음을 가하여 시뮬레이션한 결과가 그림 3에 주어져 있다.

$$\lambda = 70I, \quad K = 140I, \quad \varepsilon = 0.00714, \quad \Gamma = I, \quad \gamma = 1.$$

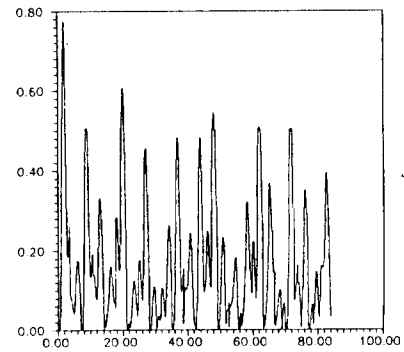
$$\theta(0) = [8.33 \ 1.67 \ 2.5 \ 5 \ 5 \ 2.5]^T$$

$$\dot{q}(0) = 0, \quad \dot{q}(0) = 0.$$

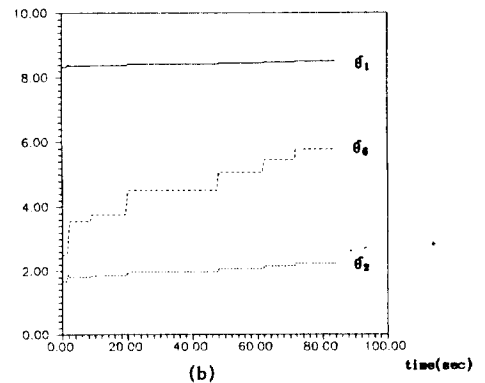
이때  $\theta(0)$ 는 부하가 없을때 공칭(nominal)값에 해당하고, 원하는 추종오차의 범위는  $\lambda\varepsilon = 0.5$ 이다.

그림 3의 (a)는 추종오차의 지표인  $\|s(t)\|$ 가 어느 정도 시간이 경과된 이후에 허용 범위 이하로 줄어들어 결국 관절의

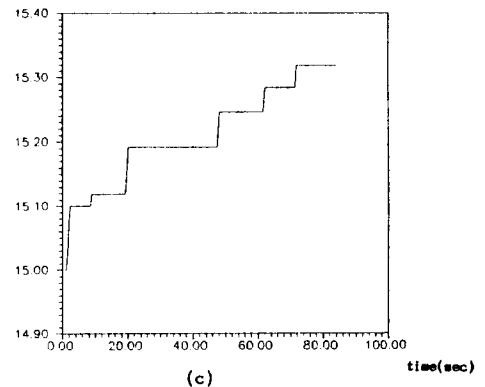
실제 궤적이 기준궤적을 규정된 범위내의 오차를 가지고 잘 추종하고 있음을 보여준다. (b)는 조정변수  $\theta(t)$ 의 표류가 일어나지 않고 모든 시간에서 유한함을 나타내고, (c)는 조정변수  $\dot{p}(t)$ 가 외란의 영향을 제압하는 수준까지 증가함을 보여준다. (d)는 이때 각 관절에 가해지는 토크 입력  $\tau_i(t)$ 를 도시한 것이다. 한편으로 본 방식과의 성능 비교를 위하여 토크 잡음을 고려하지 않은 상황에서 설계된 Slotine의 적응제어기[1]을 적용한 컴퓨터 모사가 별도로 수행되었다. 동일한 작업조건에 대해 시뮬레이션한 결과가 그림 4에 주어져 있다. 그림에서 보는바와 같이 외란에 대한 강인성이 부족하여 조정변수의 표류가 발생하고 결국 전체 적응시스템의 안정을 보장할 수 없음을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

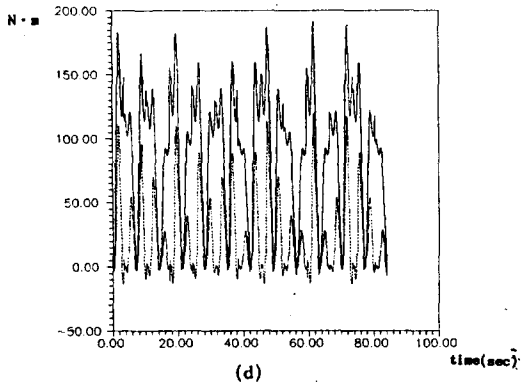


그림 3. 본 강인 적응제어기에 의한 결과  
(a)  $\|s(t)\|$  (b)  $\hat{\theta}(t)$  (c)  $\hat{\rho}(t)$  (d)  $\tau(t)$

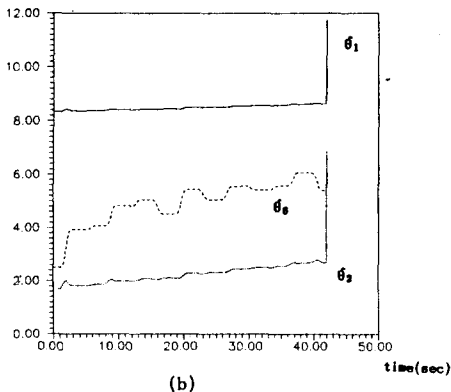
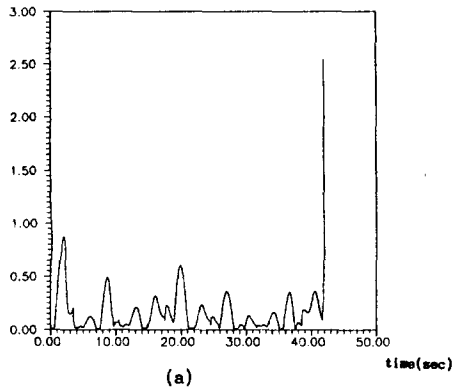


그림 4. Slotine의 적응제어기에 의한 결과  
(a)  $\|s(t)\|$  (b)  $\hat{\theta}(t)$

## VI. 결론

물건을 집어서 옮겨 놓기와 같이 부하 변화가 다양하고 반복적인 작업에 매니플레이터를 고속으로 운용하고자 할때, 부

정확한 모델에 의존하는 Computed Torque Method로는 추종오차를 효과적으로 줄일 수 없다. 또한 강인성이 결여된 적응제어 방식은 파라미터 표류를 유발하여 전체 적응시스템의 안정을 해치므로 안심하고 사용할 수 없다.

본 논문에서 제시된 강인 적응제어 기법은 Lyapunov 설계에 입각한 적응 Computed Torque Method의 변형된 형태로서 모트는 관성 파라미터 및 외란의 상한값을 추정해내기 위한 적응기구에 사역(dead zone) 개념을 도입하여 조정변수의 표류를 방지하고, 추정치들을 사용하여 제어입력을 보강해 줌으로써 추종오차가 허용 범위내에 머물도록 한다.

관심을 끄는 후속과제로는 이산시간(discrete-time) 강인 적응제어기의 설계, 토오크에 외란의 영향이 큰 매니플레이터 힘 제어로의 확장 연구 등을 꼽을 수 있다.

## 참고문헌

- [1] J.-J. E. Slotine, and W. Li, "On the adaptive control of robot manipulators," *Int. J. Robotics, Research*, vol. 6, no. 3, pp. 49-59, 1987.
- [2] R. Ortega and M. W. Spong, "Adaptive motion control of rigid robots : A tutorial", *Proc. IEEE Conf. Dec. & Contr.*, pp. 1575-1584, Austin TX, 1988.
- [3] C. Abdalh, et al. "Survey of Robust Control for Rigid Robots," *IEEE Contr. Syst. Mag.*, vol. 11, no. 2, pp. 24-30, 1991.
- [4] M. W. Spong, "On the Robust Control of Robot Manipulators," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 37, no. 37, pp. 1782-1786, 1992.
- [5] M. W. Spong, and M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*, John Wiley, 1989.
- [6] A. M. Annaswamy, and K. S. Narendra, *Stable Adaptive Systems*, Prentice-Hall, 1989.