

〈論 文〉

유연한 단일링크 조작기의 적응진동제어

Adaptive Vibration Control of Flexible One-Link Manipulator

박 영 욱* · 김 재 원** · 박 영 필***
Young-Uck Park, Jae-Won Kim, and Young-Pil Park

〈1995년 1월 31일 접수 ; 1995년 5월 29일 심사완료〉

Key Words : Flexible Link (유연한 링크), Vibration Control (진동제어), Parameter Identification (파라미터 추정), Adaptive Control (적응제어)

ABSTRACT

Recently, since robot manipulator becomes faster and lighter, its link is no longer regarded as rigid body, and robot controller which only controls robot position cannot reduce vibration of the flexible link. Therefore vibration control is needed in robot manipulator control in addition to position control. In the case that tip mass changes when robot manipulator in working, it is clear that the efficiency of the vibration/position controller designed for the fixed system goes down. In this paper, the system with time varying parameters, adaptive control theory is adopted which estimates parameters changed by the variation of the tip mass and re-calculates the gain of the controller. Validity of the proposed adaptive controller and capability of the estimator are evaluated by computer simulations and experiments. Comparison results of the optimal controller for the fixed system and proposed adaptive controller are carried out.

기 호 설 명

a : 강체허브의 길이, [m]
 e, e^0 : 예측오차
 EI : 링크의 굽힘강성, [Nm²]
 F : 적응이득행렬
 h : 링크의 두께, [m]
 H : 히비사이드 함수 (Heaviside's step function)
 l : 링크의 길이, [m]

m : 링크의 단위길이당 질량, [kg/m]
 M : 첨단질량, [kg]
 M^* : 링크질량 대 첨단질량비, [M/ml]
 $\underline{0}$: 영 벡터 (zero vector)
 O : 영 행렬 (zero matrix)
 t : 시간, [sec]
 T : 목표회전시간 [sec]
 ΔT : 샘플링 시간, [sec]
 x, y : 회전기준좌표계
 X, Y : 관성기준좌표계
 δ_{ij} : Kronecker's delta
 δ : Dirac delta function

*현대자동차

**정회원, 연세대학교 공과대학 기계공학과 대학원

***정회원, 연세대학교 공과대학 기계공학과

- ϵ : 스트레인
- θ : 허브각, [rad]
- θ_r : 목표회전각, [rad]
- Ω : 허브의 각속도, [rad/sec]
- $\hat{\theta}$: 예측파라미터 벡터
- $\hat{\phi}$: 측정벡터
- λ : 적응이득

1. 서 론

로봇조작기는 최근에 와서 공정의 특수성과 자동화, 생산성 향상을 위해 수요가 급격히 늘어가고 있다. 이에 따라 로봇조작기의 전반적인 연구가 활발히 수행되고 있다. 특히 로봇조작기는 인간의 작업영역을 벗어난 원자력 발전소내의 오염, 위험지역이나 또 우주공간에서의 작업 등에 이용되어지며 이러한 극한지역에서의 작업은 특수한 연구를 필요로 하게 되었다. 특히 로봇 링크의 경량화를 위한 링크길이의 연장에 의해 나타나는 로봇 링크의 탄성문제는 많은 연구가 요구되었다.

로봇 링크의 구동시 링크의 탄성에 의해 진동이 유발되고 이 진동은 링크 끝단의 위치정밀도에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 많은 연구가 활발히 진행되어 왔다. 먼저 1975년 Book⁽¹⁾은 유연한 성질을 갖는 두개의 링크와 관절을 갖는 계의 귀환제어를 실시하였다. 1986년 하영균⁽²⁾ 등은 하나의 링크를 갖는 유연한 조작기에 대해 최적제어이론을 이용하여 위치와 진동을 동시에 제어하였고, 1987년 Rovens⁽³⁾는 유연한 1자유도 링크에 대해 파라미터를 예측한 후 그 파라미터에 대한 제어를 설계하여 제어를 수행하였다. 1990년 최승철⁽⁴⁾은 2자유도의 수직다관절 로봇 링크의 위치와 진동에 대해 최적제어를 행하였고, 1991년 하영균⁽⁵⁾은 3자유도 평행구동방식 로봇조작기의 진동제어를 하였다. Book⁽⁶⁾은 유연한 링크의 적응제어에 대해 연구하였고, 1992년 Cetinkunt⁽⁷⁾ 등은 유연한 로봇 링크의 끝단의 위치 제어를 래티스 필터(lattice filter)를 이용하여 실시하였고, 김재원⁽⁸⁾은 퍼지로직을 이용하여 1자유도를 갖는 유연한 링크에 대해 위치제어 및 진동제어를 실시하였다.

동일한 작업을 연속적으로 하는 경우가 아닌 일정하지 않은 작업을 수행하거나 미지의 영역에서 질량을 모르는 물체에 대해 작업을 하는 경우 그 질량을 고려한 제어를 필요로 한다. 따라서 미지의 질량으로 인해 바뀐 계의 파라미터를 예측(추정)하여 적

절한 위치 및 진동제어를 실시해야 한다. 이에 적응제어를 적용하여 모르는 계의 파라미터를 추정하고 거기에 알맞은 이득(gain)을 설정하여 제어하도록 한다. 이 경우 위치와 진동제어를 동시에 실시해야 하므로 다변수 계에 대한 적응제어를 실시해야 한다. Goodwin⁽⁹⁾, Landau⁽¹⁰⁾는 다변수 계에 대해 적용할 수 있는 적응제어이론을 발표하였다. 본 연구에서 이들의 이론을 이용하여 이득을 결정하였다.

본 연구는 끝단의 질량이 바뀔 때 따라 계의 파라미터를 예측하고 그 추정된 파라미터로 설계된 제어를 이용하여 위치제어와 진동제어를 동시에 실시한다. 이 결과와 알고 있는 계에 의해 결정된 이득에 의한 최적제어이론을 이용한 실험결과를 비교, 분석하였다.

2. 이론해석

2.1 지배방정식

유연한 단일링크 조작기를 Fig. 1과 같이 이상화하여 해석하였다. 길이가 l 인 보가 회전축으로부터 길이 a 의 강체허브에 고정되어 있는 것으로 간주한다. 보의 굽힘강성계수는 EI 이고, 단위길이당 질량 m 인 Euler-Bernoulli 보로 가정하였다. XY 는 허브의 회전중심이 원점인 절대좌표축, xy 는 보가 허브에 부착된 부분에 원점을 갖는 회전좌표축, $w(x, t)$ 는 팔의 횡방향변위를 나타낸다. 원심력 및 축방향변위를 무시하고 평형점 근처에서의 운동을 고려하고 Hamilton의 원리를 이용하여 다음의 지배방정식 및 경계조건식을 구할 수 있다.

$$EIw''''(x, t) + \{m + M\delta(x-l)\}\ddot{w}(x, t) = (x+a)\{m + M\delta(x-l)\}\dot{\Omega}(t) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} w(x, t) \Big|_{x=0} &= 0, & w'(x, t) \Big|_{x=0} &= 0, \\ w''(x, t) \Big|_{x=l} &= 0, & w'''(x, t) \Big|_{x=l} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

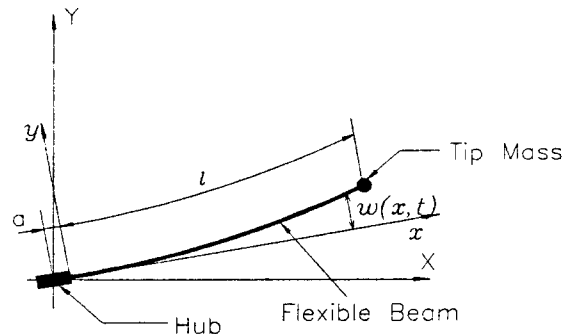


Fig. 1 Flexible one-link manipulator model

Galerkin의 모드합방법을 이용하여 식 (1)의 해를 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$w(x, t) = \sum_{j=1}^L \phi_j(x) q_j(t) \quad (3)$$

여기서 $\phi_j(x)$ 는 경계조건식 (2)를 만족하는 첨단질량이 없는 균일외팔보의 고유함수이며, $q_j(t)$ 는 일반화된 좌표(generalized coordinate), L 은 모드 수를 나타낸다. $\phi_j(x)$ 는 아래의 미분방정식과 직교성 조건을 만족하는 함수이다.

$$EI\phi_j''''(x) - m\bar{\omega}_j^2\phi_j(x) = 0 \quad (j=1, \dots, L) \quad (4)$$

$$\int_0^l m\phi_i(x)\phi_j(x)dx = \delta_{ij} \quad (i, j=1, \dots, L) \quad (5)$$

$$\phi_j(x) = (1/\sqrt{ml}) [\cos h\lambda_j(x/l) - \cos \lambda_j(x/l) - \sigma_j \{\sin h\lambda_j(x/l) - \sin \lambda_j(x/l)\}] \quad (j=1, \dots, L) \quad (6)$$

$$\sigma_j = \frac{\sin h\lambda_j - \sin \lambda_j}{\cos h\lambda_j + \cos \lambda_j} \quad (j=1, \dots, L)$$

여기서 $\bar{\omega}_j = \lambda_j^4(EI/ml^4)$ 이고 이는 균일외팔보의 고유치이다. λ_j, σ_j 값은 Table 1에 주어져 있다. 식 (3)을 식 (1)에 대입하고 식 (4)를 이용하여 다음 식을 구할 수 있다.

$$\sum_{j=1}^L [m\bar{\omega}_j^2\phi_j(t) + \{m + M\delta(x-l)\}\phi_j(x)\ddot{q}_j(t)] = -(x+a)\{m + M\delta(x-l)\}\dot{\Omega}(t) \quad (7)$$

식 (7)에 $\phi_j(x)$ 를 x 에 대해 내적하고 다음의 식 (8)을 이용하면 식 (9)를 얻을 수 있다⁽⁶⁾.

$$\int_0^l \phi_i(x) dx = \frac{2\sigma_i\sqrt{l/m}}{\lambda_i} \quad (8)$$

$$\int_0^l x\phi_i(x) dx = \frac{2l\sqrt{l/m}}{\lambda_i^2}$$

$$\phi_i(l) = \frac{2(-1)^{i+1}}{\sqrt{ml}} \quad (i=1, \dots, L)$$

$$\sum_{j=1}^L [\{\delta_{ij} + 4M^*(-1)^{i+j}\}\ddot{q}_j(t) + \delta_{ij}\bar{\omega}_j^2q_j(t)] = A_i\dot{\Omega}(t) \quad (i=1, \dots, L) \quad (9)$$

$$A_i = -2\sqrt{ml}[(l/\lambda_i^2) + (a\sigma_j/i) + M^*(l+a)(-1)^{i+1}]$$

Table 1 The value of λ_j and σ_j

| i | λ_i | σ_i |
|-----|-------------|------------|
| 1 | 1.87510 | 0.73409 |
| 2 | 4.69409 | 1.01846 |
| 3 | 7.87475 | 0.99922 |
| 4 | 10.9955 | 1.00003 |

여기서 M^* 는 첨단질량비로서 M/ml 이다. 식 (7)을 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$M\dot{Q} + KQ = \dot{\Omega}(t)F \quad (10)$$

$$M_{ij} = \delta_{ij} + 4M^*(-1)^{i+j},$$

$$K_{ij} = \delta_{ij}\bar{\omega}_j^2 = \delta_{ij}\lambda_j^4(EI/ml^4) \quad (11)$$

$$F_i = A_i \quad (i, j=1, \dots, L)$$

2.2 상태방정식

상태변수벡터(state variable vector)를 다음과 같이 정의한다.

$$\underline{X} = \{Q \ \dot{Q} \ \bar{\theta} \ \Omega\}^T \quad (12)$$

$$\bar{\theta}(t) = \theta(t) - \theta_r(t) \quad (13)$$

Q, \dot{Q} 는 로봇팔의 진동에 관계되는 상태변수이고, $\bar{\theta}$ 는 회전각의 오차를 나타낸다. $\theta(t)$ 는 허브의 회전각, $\theta_r(t)$ 는 로봇팔의 목표회전각으로 다음 식과 같다.

$$\theta_r(t) = \theta_r[3(t/T)^2 - 2(t/T)^3] [H(t) - H(t-T)] + \theta_r H(t-T) \quad (14)$$

θ_r 는 목표회전각 상수, T 는 목표회전완료시간 $H(t)$ 는 히비사이드 함수이다. 식 (12)의 상태변수벡터를 이용하면 식 (10)은 다음 식 (15)로 표현된다.

$$\dot{X} = AX + bu - d, \quad u = \dot{\Omega}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 & 0 \\ -M^{-1}K & 0 & 0 & 0 \\ \underline{0}^T & \underline{0}^T & 0 & 1 \\ \underline{0}^T & \underline{0}^T & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\underline{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}F \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \underline{d} = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\theta} \\ \dot{\theta}_r(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

계의 출력 y 는 횡방향 두께가 h 인 로봇팔의 x_s 지점에서의 스트레인(strain)과 모터의 회전각이고, 스트레인은 다음과 같이 표현된다.

$$y_\epsilon = \epsilon(t) = -(h/2)\omega''(x_s, t) = -(h/2)\sum_{j=1}^L \phi_j''(x_s)q_j(t) \quad (16)$$

따라서 전체 계의 출력은 다음과 같이 나타낸다.

$$y = \begin{bmatrix} \Phi & P & \underline{0}^T & 0 & 0 \\ \underline{0}^T & \underline{0}^T & 1 & 0 \end{bmatrix} \underline{X}$$

$$\Phi = -\frac{h}{2}\phi_j''(x_s). \quad (17)$$

여기서 P 는 규준화된 모달 행렬이다.

2.3 최적제어

제어입력 $u(k)$ 는 식 (18)과 같고 귀환 계수 벡터 \underline{k} 는 식 (19)와 같은 2차 성능 계수를 최소화시키는 것을 선택한다. 식 (19)의 2차성능계수를 최소화시키는 \underline{k} 를 구하는 문제는 식 (20)의 리카티 차분방정식(Riccati's difference equation)의 해 P_∞ 를 구하는 것과 같다.

$$u(k) = -\underline{k} X(k) \quad (18)$$

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N [X^T(k) Q_e X(k) + R_o u^2(k)] \quad (19)$$

$$P_\infty = A_o^T [P_\infty - P_\infty b_o (R + b_o^T P_\infty b_o)^{-1} P_\infty] A_o + Q_o \quad (20)$$

\underline{k} 는 다음과 같이 구해진다.

$$\underline{k} = \{R_o + b_o^T P_\infty b_o\}^{-1} b_o^T P_\infty A_o \quad (21)$$

제어 입력 $u(k)$ 중에 측정이 가능한 상태변수는 $\bar{\theta}(k)$, $\Omega(k)$ 뿐이고 로봇팔의 진동에 관계되는 Q , \dot{Q} 은 측정이 불가능하다. 따라서, 측정이 불가능한 상태변수를 추정하기 위하여 관측기를 사용한다. 관측기의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \underline{Z}(k) &= [A_{0b} - G C_{0b}^T] \underline{Z}(k-1) \\ &+ [G b_{0b}] \begin{bmatrix} y(k) \\ u(k-1) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\underline{Z}(k) = \begin{Bmatrix} \underline{Q}(k) \\ \underline{\dot{Q}}(k) \end{Bmatrix}$$

여기서 벡터 G 는 칼만 필터(Kalman filter)를 이용하여 결정하였으며 $\underline{Z}(k)$ 는 측정 불가능한 상태변수 $\underline{X}(k)$ 의 추정치가 된다.

2.4 적응제어

2.3절에서 언급된 최적제어이론을 도입한 제어기의 설계에 있어서는 가능한 한 플랜트를 정확히 모델링하여야 안정되고 양호한 제어성능을 얻을 수 있다. 그러나 계의 모델링에는 한계가 있으므로 설계자는 공칭 플랜트모델을 기준으로 제어기를 설계하게 된다.

첨단 질량이 변함에 따라 외팔보 계의 파라미터는 변하게 된다. 본 연구에서는 이 파라미터를 순환 파라미터 동정법을 이용하여 추정하고 그 파라미터를 이용하여 제어기를 설계한다. 적응제어의 개략적인 알고리즘을 Fig. 2에 나타내었다.

(1) 파라미터 예측

링크의 1차모드만 고려한다면 이산화된 전달함수

를 구할 수 있다.

$$\frac{y(k)}{u(k)} = \frac{b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_2} \quad (23)$$

여기서 $y(k)$ 는 측정되는 스트레인 값, $u(k)$ 는 모터의 각가속도이다. a_1, a_2, b_1, b_2 는 첨단질량의 변함에 따라 변하는 파라미터로 예측되어야 하는 값이다. 식 (23)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} y(k) &= -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) + b_1 u(k-1) \\ &- b_2 u(k-2) \end{aligned} \quad (24)$$

이 플랜트의 예측모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다^(11,13,15).

$$\begin{aligned} \hat{y}(k) &= -\hat{a}_1(k) y(k-1) - \hat{a}_2(k) y(k-2) \\ &+ \hat{b}_1(k) u(k-1) + \hat{b}_2(k) u(k-2) \\ &= \hat{\theta}(k)^T \phi(k-1) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} y^{\hat{o}}(k) &= -\hat{a}_1(k-1) y(k-1) - \hat{a}_2(k-1) y(k-2) \\ &+ \hat{b}_1(k-1) u(k-1) + \hat{b}_2(k-1) u(k-2) \\ &= \hat{\theta}(k)^T \phi(k-1) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\hat{\theta}(k)^T = \{\hat{a}_1(k) \hat{a}_2(k) \hat{b}_1(k) \hat{b}_2(k)\} \quad (27)$$

$$\phi(k)^T = \{-y(k) - y(k-1) u(k) u(k-1)\} \quad (28)$$

$\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{b}_1, \hat{b}_2$ 는 a_1, a_2, b_1, b_2 의 예측 값이고 파라미터 예측에 의한 오차는 다음과 같다.

$$e(k) = y(k) - \hat{y}(k) \quad (29)$$

$$e^o(k) = y(k) - y^{\hat{o}}(k) \quad (30)$$

순환 최소 자승 동정법(recursive least square identification method)을 적용하기 위한, J_e 는 다음과 같이 표현된다.

$$J_e = \sum_{i=1}^{k-1} [y(i) - \hat{\theta}^T(k-1) \phi(i-1)]^2 \quad (31)$$

예측 파라미터 $\hat{\theta}(k-1)$ 에 대한 J_e 의 최소화조건은 다음과 같다.

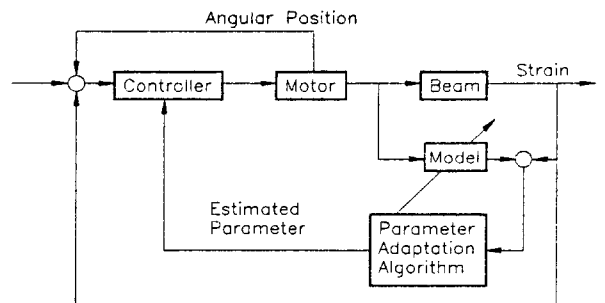


Fig. 2 Schematic diagram of adaptive control

$$\frac{\partial J_e}{\partial \underline{\theta}(k-1)} = -2 \sum_{i=1}^{k-1} [y(i) - \underline{\theta}^T(k-1) \underline{\phi}(i-1)] \underline{\phi}(i-1) = 0 \quad (32)$$

윗 식으로부터

$$\begin{aligned} \underline{\hat{\theta}}(k-1) &= \left[\sum_{i=1}^{k-1} \underline{\phi}(i-1) \underline{\phi}(i-1)^T \right]^{-1} \sum_{i=1}^{k-1} y(i) \underline{\phi}(i-1) \\ &= F(k-1) \sum_{i=1}^{k-1} y(i) \underline{\phi}(i-1) \end{aligned} \quad (33)$$

$$F(k-1) = \left[\sum_{i=1}^{k-1} \underline{\phi}(i-1) \underline{\phi}(i-1)^T \right]^{-1} \quad (34)$$

윗 식을 순환식으로 표현하기 위해 식 (35)와 식 (36)을 이용하면 식 (37)을 얻을 수 있다.

$$\underline{\hat{\theta}}(k) = F(k) \sum_{i=1}^k y(i) \underline{\phi}(i-1)^T \quad (35)$$

$$F(k)^{-1} = F(k-1)^{-1} + \underline{\phi}(k-1) \underline{\phi}(k-1)^T \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^k y(i) \underline{\phi}(i-1) &= F(k)^{-1} \underline{\hat{\theta}}(k) \\ &= F(k-1)^{-1} \underline{\hat{\theta}}(k-1) + \underline{\phi}(k-1) \underline{\phi}(k-1)^T \underline{\hat{\theta}}(k-1) \\ &\quad + \underline{\phi}(k-1) [y(k) - \underline{\hat{\theta}}(k-1)^T \underline{\phi}(k-1)] \end{aligned} \quad (37)$$

따라서 $\underline{\hat{\theta}}(k)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\underline{\hat{\theta}}(k) = \underline{\hat{\theta}}(k-1) + F(k) \underline{\phi}(k-1) e^o(k) \quad (38)$$

식 (36)을 일반화시키기 위해 가중치 $\lambda_1(k)$ 와 $\lambda_2(k)$ 를 도입하면 다음과 같이 표현된다.

$$F(k)^{-1} = \lambda_1(k) F(k-1)^{-1} + \lambda_2(k) \underline{\phi}(k-1) \underline{\phi}(k-1)^T \quad (39)$$

여기서 $0 < \lambda_1(k) \leq 1$, $0 \leq \lambda_2(k) < 2$, $F(0) > 0$ 이다, $\lambda_1(k) = \lambda$, $\lambda_2(k) = 1$ 이라 할 때 파라미터 추정 알고리즘은 다음과 같다.

$$\underline{\hat{\theta}}(k) = \underline{\hat{\theta}}(k-1) + F(k) \underline{\phi}(k-1) e^o(k) \quad (40)$$

$$F(k) = \frac{1}{\lambda} \left[F(k-1) - \frac{F(k-1) \underline{\phi}(k-1) \underline{\phi}(k-1)^T F(k-1)}{1 + \underline{\phi}(k-1)^T F(k-1) \underline{\phi}(k-1)} \right] \quad (41)$$

(2) 적응제어

식 (38)을 이용하여 식 (15)와 식 (17)의 공간 상태방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \underline{X}(k+1) &= A_d \underline{X}(k) + \underline{b}_a u(k) - \underline{d} \\ y(k) &= C \underline{X}(k) \end{aligned} \quad (42)$$

$$A_d = \begin{bmatrix} -a_1 & 1 & 0 & 0 \\ -a_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \underline{b}_a = \left\{ b_1 \quad b_2 \quad \frac{h^2}{2} \quad h \right\} \quad (43)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \underline{d}^T = \{ 0 \quad 0 \quad h \theta_r(k) \quad 0 \}$$

이 상태공간방정식에서 상태벡터 $\underline{X}(k)$ 는 다음과 같다.

$$\underline{X}(k)^T = \{ \varepsilon(k) \quad \varepsilon(k-1) \quad \bar{\theta}(k) \quad \Omega(k) \} \quad (44)$$

여기서 $\varepsilon(k)$ 는 스트레인을 나타낸다. 식 (42)로 표현되는 계에 상태귀환제어를 행하면 입력 $u(k)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다^(14,17).

$$u(k) = -\underline{L}(k) \underline{X}(k) \quad (45)$$

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N [\underline{X}^T(k) Q_a \underline{X}(k) + R_a u^2(k)] \quad (46)$$

식 (45)의 $\underline{L}(k)$ 는 식 (46)의 성능함수를 최소화하도록 식 (46)을 풀면 다음의 리카티 차분 방정식(Riccati's difference equation)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} S(k) &= A_d^T [S(k-1) - S(k-1) \underline{b}_a \\ &\quad \{ R + S(k-1) \underline{b}_a \}^{-1} \underline{b}_a^T S(k-1)] A_d + Q \end{aligned} \quad (47)$$

식 (47)로부터 이득 $\underline{L}(k)$ 은 다음과 같이 구하여 진다.

$$\underline{L}(k) = \{ R_a + \underline{b}_a^T S(k-1) \underline{b}_a \}^{-1} \underline{b}_a^T S(k-1) A_d \quad (48)$$

파라미터 예측 알고리즘을 통하여 $\underline{\hat{\theta}}(k)$ 를 구하고 식 (43)의 A_d , \underline{b}_a 를 재구성하여 매샘플링 시간에 따른 $\underline{L}(k)$ 를 구하여 상태귀환제어를 실시한다.

3. 실험

3.1 실험장치

실험장치는 모터에 유연한 보를 부착한 1자유도 계이다. 보의 회전각은 보가 부착되어 있는 허브의 위치를 모터에 부착되어 있는 엔코더를 이용하여 측정하였다. 또 속도는 모터에 부착되어 있는 타코-제너레이터를 이용하여 측정하였다. 보의 진동량을 측정하기 위해 보의 양쪽 면에 스트레인 게이지를 부착하였다. 이들 물리량을 컴퓨터와 연결하기 위하여 엔코더에서 나오는 펄스는 16비트 카운터를 이용하였고, 타코-제너레이터와 스트레인 게이지 앰프로부

터 나오는 전압 신호는 12비트 AD 변환기를 이용하였다. 이들은 인터페이스 부를 거쳐 486 PC와 연결된다. 이 값들로부터 계산된 입력 값은 DA 변환기를 통해 모터의 서보앰프로 내보내 준다. 실험장치의 개략도를 Fig. 3에 나타내었고, 모의실험과 실험에 사용된 유연한 보의 물성치는 Table 2에 나타나 있다.

3.2 최적귀환제어기

보의 진동모드중 가장 지배적인 1차모드만 고려하면 식 (12)로 나타냈었던 상태벡터는 $X(k)^T = \{Q_1(k), \dot{Q}_1(k), \bar{\theta}(k), \Omega(k)\}$ 가 되고 $Q_1(k), \dot{Q}_1(k)$ 은 관측기를 이용하여 추정한다. 식 (19)의 2차성능계수를 최소로 되게 하는 $Q_0 = \text{diag}(175, 125, 24, 2.4)$, $R_0 = 0.001$ 로 하였다. 첨단질량이 121.3g인 계에 대하여 이득 k 의 값을 선정하였다.

3.3 적응제어기

먼저 첨단질량이 없는 경우에 대하여 2차성능지수가 최소가 되게 하는 $S(0)$ 과 $L(0)$ 를 선정한다. 여기서 $Q_a = \text{diag}(2300, 2250, 1, 0.2)$, $R_a = 0.001$ 로 하였다. 첨단질량이 있는 경우 계의 파라미터가 변하게 되므로 순환 최소 자승 동정법(recursive least square identification method)을 이용하여 파라미터를 예측한다. 파라미터 예측에 있어 입력 $u(k)$ 는 각가속도이고 출력 $y(k)$ 는 스트레인이다. 여기서 $u(k)$ 는 각가속도를 센서로 측정하는 대신 식 (49)를 이용하여 구한다.

$$u(k) = \dot{\Omega}(k) = \frac{\Omega(k) - \Omega(k-1)}{\Delta T} \quad (49)$$

ΔT : sampling time

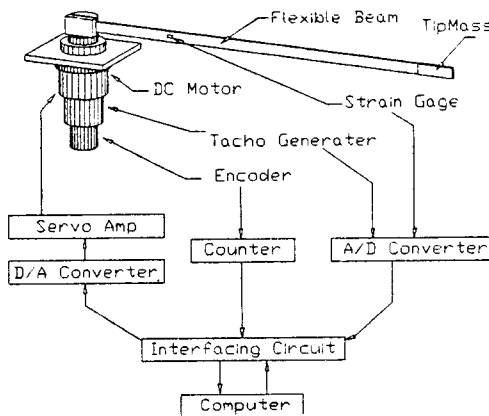
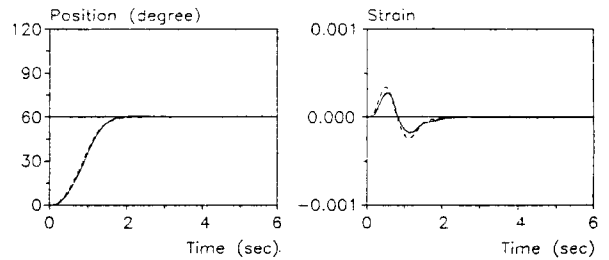
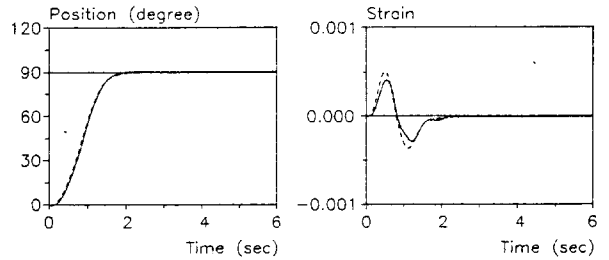


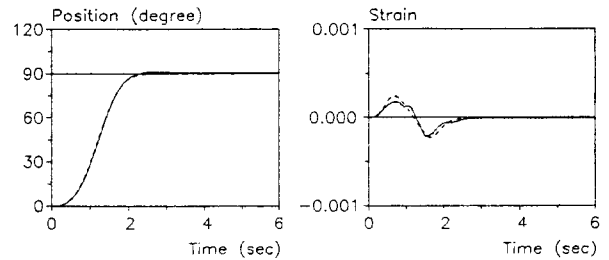
Fig. 3 Schematic diagram of experimental set-up



(a) $\theta_f = 60^\circ, T = 0.6 \text{ sec}$



(b) $\theta_f = 90^\circ, T = 0.6 \text{ sec}$



(c) $\theta_f = 90^\circ, T = 1.0 \text{ sec}$

----- : Simulation ——— : Experiment

Fig. 4 Comparison of simulation and experiment

Table 2 List of experimental parameter

| | | |
|----------------------|------------------------|-----------------------|
| Beam | Length | 1.0m |
| | Mass per unit length | 0.2358kg/m |
| | Tickeness | 0.003 |
| | Bending stiffness | 4.5095Nm ² |
| Servo motor | Gear reduction ratio | 1 : 10 |
| | Motor constant(Kt, Ke) | 21Nm/A |
| | Motor resistance | 1.1Ω |
| Hub length | | 0.04m |
| Strain gage position | | 0.1m |
| Tip mass | | 0.1213kg |
| | | 0.2433kg |
| | | 0.3988kg |
| | | 0.5527kg |
| | | |

식 (49)로 구한 $u(k)$ 와 스트레인으로 파라미터를 예측한 후 식 (43)의 A_d , b_d 를 재구성하고 미리 선정해 놓은 Q_a , R_a 과 $S(0)$ 로 식 (47), (48)을 이용하여 매 샘플링 시간마다 새로운 $\underline{L}(k)$ 를 선정하여 입력신호로 준다.

3.4 모의실험

Table 2에 있는 파라미터들을 이용하여 적응제어에 대해 모의실험을 실시했다. 구동부인 모터에 대해서는 서보앰프의 성능이 아주 우수하다고 보고 입력신호로 나가는 속도 입력을 아주 잘 추종한다는 가정 하에 첨단질량이 121.3g($M^*=0.5$), 234.3g($M^*=1.0$), 398.3g($M^*=1.6$)인 경우에 대해 실시하였다.

3.5 실험결과

진동제어를 실시하지 않고 위치제어만을 실시한 경우와 위치와 진동을 적응제어기를 이용 동시에 실

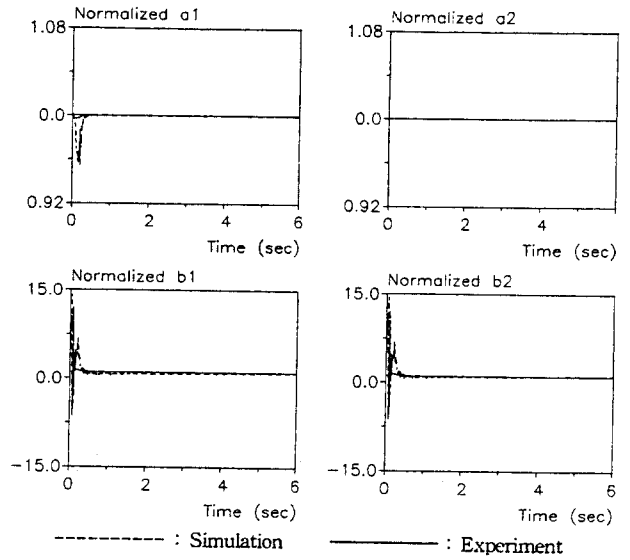
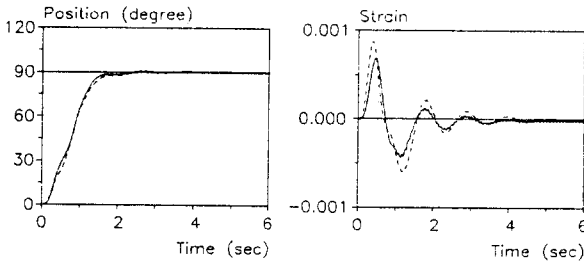
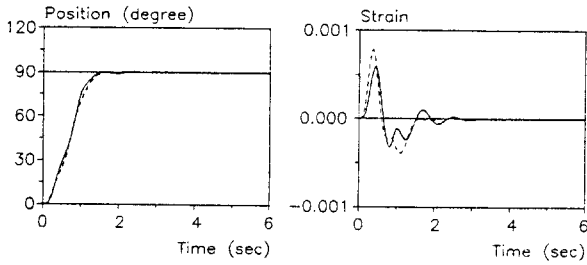


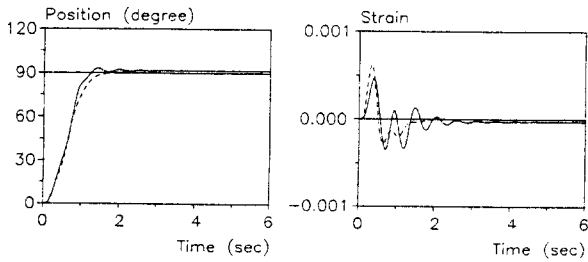
Fig. 6 Normalized parameter identification



(a) $M^*=1.6$



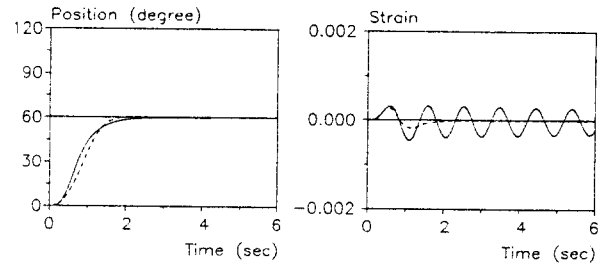
(b) $M^*=1.0$



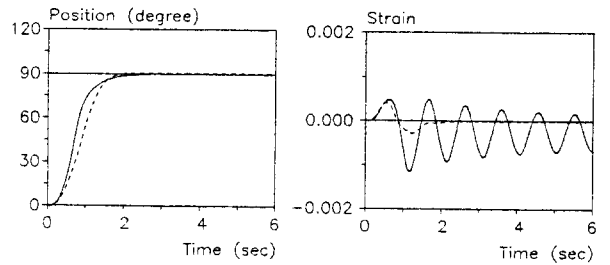
(c) $M^*=0.5$

----- : Simulation _____ : Experiment

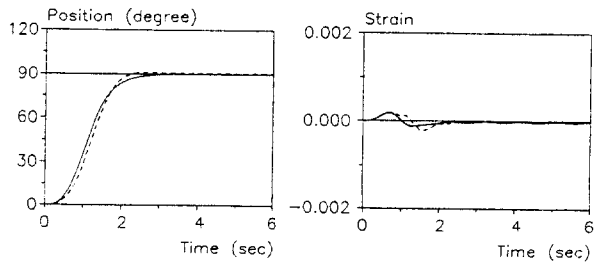
Fig. 5 Comparison of simulation and experiment



(a) $\theta_f=60^\circ, T=0.6\text{sec}$



(b) $\theta_f=90^\circ, T=0.6\text{sec}$



(c) $\theta_f=90^\circ, T=1.0\text{sec}$

----- : Position Control Only

_____ : Position and Vibration Control

Fig. 7 Experimental result

시한 경우에 3가지 첨단 질량에 대해 실험 및 비교 하였다. 위치제어만을 하는 경우는 적응제어기의 이득중 보의 진동에 관계된 항을 무시하여 실험하였다. 첨단질량이 121.3g($M^*=0.5$), 234.3g($M^*=1.0$), 398.8g($M^*=1.6$)의 경우에 대해서 위치와 진동을 최적귀환제어기와 적응제어기를 이용하여 동시에 제어한 경우에 대하여 실험하였다.

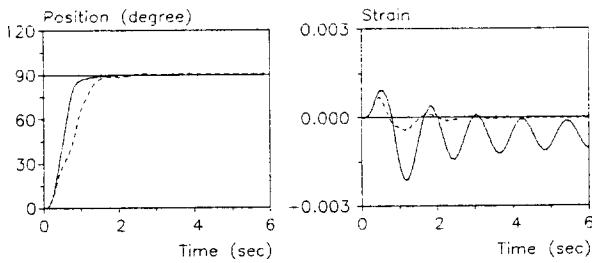
Fig. 4와 5는 모의실험을 행한 경우와 실제실험을 한 경우에 대해 비교한 결과이다. 거의 일치하는 것으로 보아 계의 모델링의 비교적 정확히 되었음을 알 수 있다. Fig. 6은 첨단 질량이 243.3g($M^*=1.0$) 일 때에 대하여 모르는 파라미터에 대해 예측을 한 결과로 실제 계산된 파라미터값으로 예측된 파라미터를 노말라이즈 한 값에 대한 그림이다. 모의 실험의 경우에는 다른 모드의 영향이 전혀 없다는 가정 하에서 실시하였으므로 빠르고 거의 완벽하게 예측

을 했으나, 실험에 있어서는 다른 모드의 영향이 전혀 없을 수 없고 이상화된 상황이 아니므로 약간의 오차가 있었다.

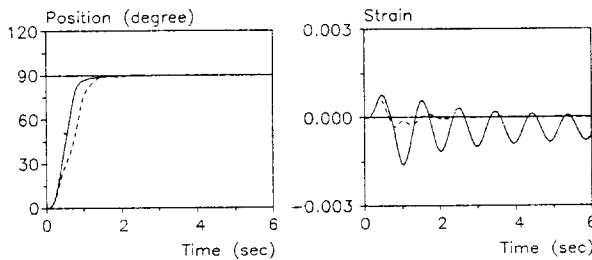
Fig. 7과 8은 위치제어만을 행하였을 경우와 적응제어기를 이용 진동과 위치를 제어한 경우를 보여준다. 적응제어기를 이용하여 실험한 경우 첨단질량, 목표회전각, 목표시간에 큰 영향을 받지 않고 위치 및 진동제어가 됨을 보이고 있다.

적응제어기의 성능을 비교하기 위해 최적귀환제어기를 이용 실험을 행한 경우와의 비교 그림을 Fig. 9 와 10에 나타내고 있다. 적응제어기의 성능이 최적 귀환제어기에 비해 아주 성능이 우수하지는 않지만, 첨단질량이 바뀔때 큰 영향을 받지 않고 진동제어를 잘 수행하고 있음을 알 수 있다.

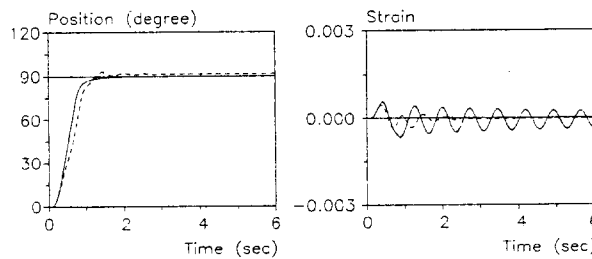
Fig. 11은 최적제어기의 이득을 구함에 있어 첨단



(a) $M^*=1.6$



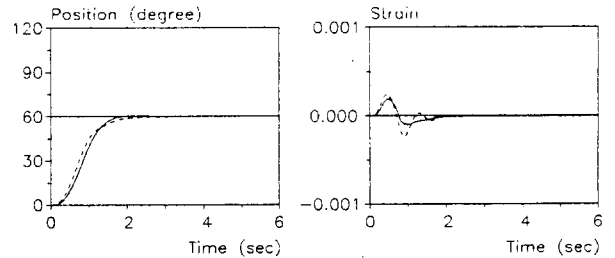
(b) $M^*=1.0$



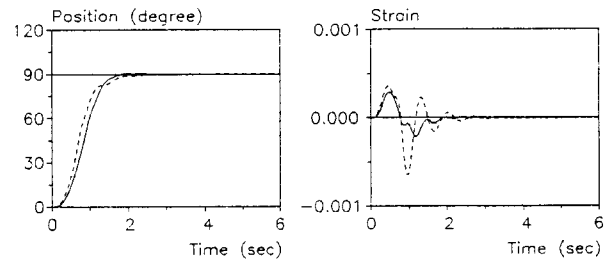
(c) $M^*=0.5$

----- : Position Control Only
 ————— : Position and Vibration Control

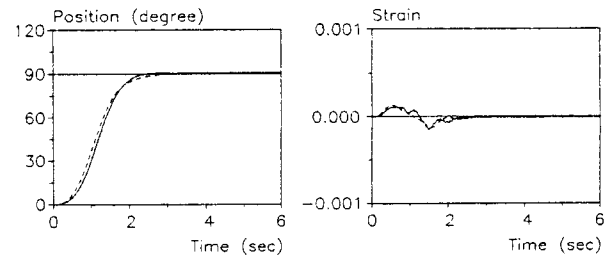
Fig. 8 Experimental result



(a) $\theta_f=60^\circ, T=0.6\text{sec}$



(b) $\theta_f=90^\circ, T=0.6\text{sec}$



(c) $\theta_f=90^\circ, T=1.0\text{sec}$

----- : Optimal Control (according to $M^*=0.5$)
 ————— : Position and Vibration Control

Fig. 9 Experimental result

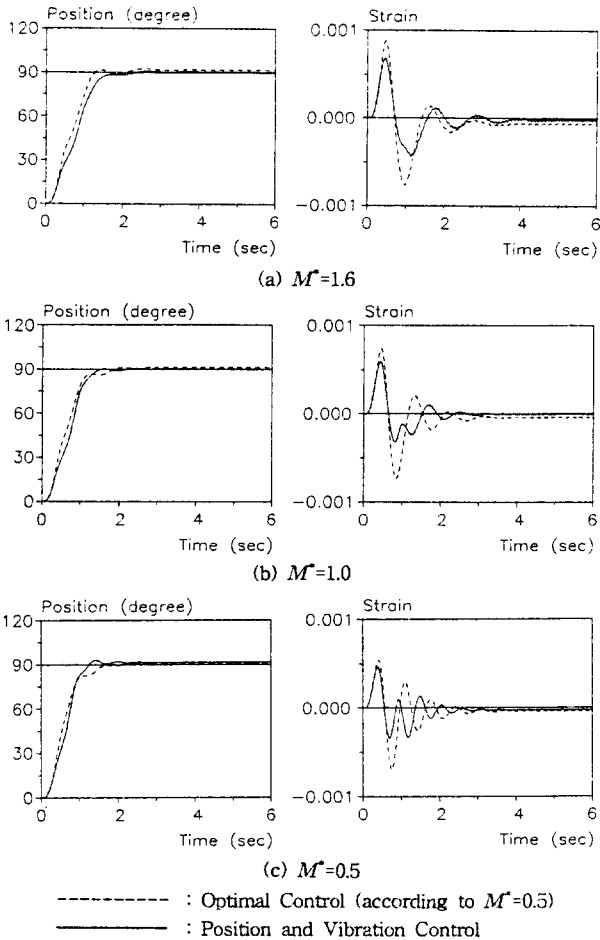


Fig. 10 Experimental result

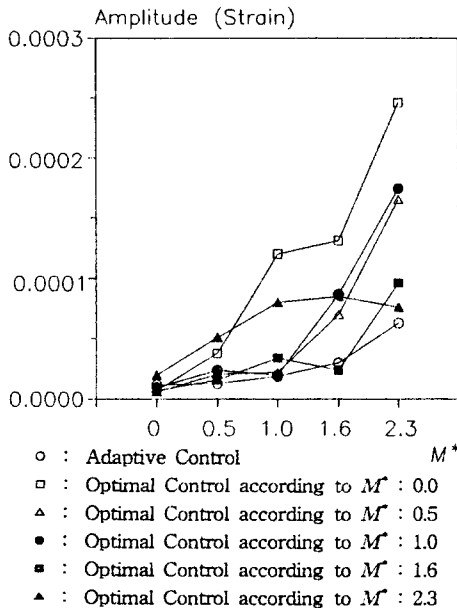


Fig. 11 Experimental result of vibration amplitude after 2sec

질량을 고려하지 않은 경우와 121.3g($M^*=0.5$), 243.3g($M^*=1.6$), 398.8g($M^*=1.6$), 552.7g($M^*=2.3$)으로 고려한 경우에 대해 목표 회전각 60°, 목표 시간 0.6으로 하였을 경우에 2초후의 가장 큰 진동량을 나타낸 그림이다. 적응 제어가 전반적으로 첨단질량에 관계없이 강건하게 진동제어를 수행함을 알 수 있다.

4. 결 론

첨단질량에 의해 변화되는 파라미터를 예측하여 적응제어방법을 이용하여 진동 및 위치제어를 수행하고 같은 상황에 최적제어를 적용하여 실험한 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유연한 보의 진동 및 위치제어에 대한 모의실험결과가 잘 일치하는 것으로 보아 모델링이 올바르게 되었음을 알 수 있다.

(2) 순환 최소 자승 동정법(recursive least square identification method)을 이용하여 첨단질량에 따라 변하는 파라미터를 예측하여 설계되는 적응제어기는 첨단질량에 관계없이 위치 및 진동제어를 잘 수행한다.

(3) 첨단질량을 바꾸어 가면서 진동 및 위치제어를 최적제어와 적응제어를 이용하여 실험하였을 때, 적응제어의 경우가 첨단질량에 관계없이 진동제어를 강건하게 수행함을 알았다.

참 고 문 헌

- (1) Book, W.J., Maizza-Neto O. and Whitney D.E., December 1975, "Feedback Control of Two Beam, Two Joint Systems with Distributed Flexibility," Trans. of ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, pp. 424~431.
- (2) 하영균, 1986. 12., "유연한 로봇트 조작기의 능동제어", 연세대학교 대학원, 석사학위 논문.
- (3) Rovenes, D.M., Robert H., and Cannon, Jr., Winter 1987, "Experiments Toward On-Line Identification and Control of a Very Flexible One-Link Manipulator," The International Journal of Robotic, Vol. 6, No. 4, pp. 3~19.
- (4) 최승철, 1989. 12., "평행구조 로봇트 매니플레이터의 진동제어," 연세대학교 대학원, 석사학위 논문.
- (5) 하영균, 1990. 12., "유연한 로봇트 팔 진동의 능동 제어," 연세대학교 대학원, 박사학위 논문.

- (6) Book, W.J., and Yuan, B.S., 1987, "A Robust Scheme for Direct Adaptive Control of Flexible Arms," Modeling and Control of Robotics Manipulators and Manufacturing Process, DSC-Vol. 6, pp. 261~268.
- (7) Sabri Cetinkunt, and Wu Sijun, September 1992, "Discrete-Time Tip Position Control of Flexible One Arm Robot," Trans, of the ASME, Vol. 114, pp. 428~435.
- (8) 김재원, 1992. 12., "퍼지로직에 의한 유연한 단일 링크 로봇의 진동 제어," 연세대학교 대학원, 석사학위 논문.
- (9) Goodwin, G.C., Peter J. Ramadge, and Peter E. Caines, June 1980, "Discrete-Time Multivariable Adaptive Control," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-25 No. 3, pp. 449~456.
- (10) Landau, I.D., and Courtiol B., "Design of Multivariable Adaptive Model Following Control System," Automatica, Vol. 10, pp. 483~494.
- (11) Landau, I.D., 1990, System Identification and Control Design, Prentice-Hall.
- (12) Astrom, K.J., 1990, Computer-Controlled Systems, 2nd Ed., Prentice-Hall.
- (13) Astrom, K.J., 1989, Adaptive Control, Addison-Wesley.
- (14) Bitmead, R.R., and et al., 1990, Adaptive Optimal Control, Prentice-Hall.
- (15) 김중배, 1992. 12., "복합절삭 강성 가공물의 드릴 가공시 디지털 제어에 의한 일정 축력 제어," 연세대학교 대학원 박사학위 논문.
- (16) Blevins, R.D., 1979, Formulas for Natural Frequency and Mode Shape, Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- (17) Franklin, G.F., and et al., 1990, Digital Control of Dynamic Systems, 2nd, Ed., Addison-Wesley.