

論文 92-29B-3-4

유연한 로봇트 매니퓰레이터의 적응 제어기 설계

(Adaptive Controller Design of the Flexible
Robotic Manipulator)

金勝錄* 朴鍾國**

(Seung Rock Kim and Chong Kuk Park)

要 約

본 논문에서는 링크가 가볍고 유연한 로봇트 매니퓰레이터에 대해 손의 끝점을 측정하여 기준 궤적을 추종하기 위한 자기 동조 적응 제어기를 제안하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 알고리즘의 성능을 입증하였다. 제어 대상으로 2개의 링크를 갖는 유연성 로봇트 매니퓰레이터를 선정하고 모델의 구성은 중력 작용이 포함된 가정 모드 형태 방법을 사용하여, 각 링크의 진동 모드를 2가지로 채택하여 동력학 방정식을 유도하였으며, 제어기는 공칭 토크를 가하는 동적 전향 보상기와 교정 토크를 가하는 자기 동조 제환 제어기를 결합시킨 합성 제어기로 구성하였다. 또한 오프셋을 제거하기 위하여 K증분 예측기를 제안하였다. 부하 조건에 대한 시뮬레이션을 실행한 결과 설계한 제어기는 정상 상태 오차를 제거하였으며, 부하 변화 및 빠른 속도에 적응함을 보여 주었다.

Abstract

This paper proposes a Self-Tuning control algorithm for tracking the reference trajectory by measuring the end-point of robot manipulator whose links are light and flexible, and the performance of it is tested through the computer simulation. As an object of system, a flexible robot manipulator with two-links is considered and an assumed mode shape method including gravity force is adopted to analyze the vibration modes for each links and dynamics equation is derived. The controller is designed as a combined form which consists of dynamic feedforward compensator and self-tuning feedback controller. The one supplies nominal torque and the other supplies variational torque to manipulator. Apart from the, K-incremental predictor is also proposed in order to eliminate the offset error. and it shows that the result of simulation adapted well to load change and rapid velocity.

*正會員, 安養專門大學 電子科

(Dept. of Elec. Eng., Anyang Technical College)

**正會員, 慶熙大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Kyunghee Univ.)

接受日字: 1991年 12月 21日

(※ 이 논문은 1990년도 문교부 지원 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 지원 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.)

I. 서 론

산업 자동화는 1920년 이래 작업 현장에서 당면해 왔으며, Paul¹⁾은 오늘날의 복잡화된 매니퓰레이터에 중요한 공헌을 하였으며 매니퓰레이터에 대한 연구는 초기이래 속도와 정확성 사이의 배타성으로 하여 정체되어 왔다고 할 수 있다. 그 이유는 기존 연구가 이들 시스템에 대하여 단지 관철각만을 측정하거나

정확한 위치에 도달하기 위하여 강체 구조만을 검토하였기 때문이다.

Canon^[2]에 의하여 제안된 끝점 위치 제한의 개념은 유연한 링크를 갖는 매니퓰레이터의 정확한 위치 제어를 위하여 절대적으로 필요하며, Trueknbrodt^[3]는 휨, 비틀림과 구심력에 의한 탄성 매니퓰레이터의 운동방정식을 제안하였다. 로봇 시스템 개발에 있어서 중요한 연구 과제중의 하나는 매니퓰레이터 구동의 정확성과 부하 용량을 기준값 이상으로 유지시키면서 가볍고 가격이 저렴한 유연성 재료를 이용하는 것이다. 최근에는 강체 운동과 탄성 변형 운동이 결합된 모델이 이용되며, 탄성 변형을 유도하기 위해 유한 요소법^[4]과 가정모드법^[5] 등이 있다.

본 논문에서는 제어 대상으로 두개의 조인트와 두개의 링크를 갖는 유연성로봇 매니퓰레이터를 선정하였으며 속도를 높이기 위하여 가벼운 링크를 사용한다. 모델의 구성은 중력 작용이 포함된 가정모드법을 사용하여 각 링크의 진동모드를 두가지로 택하여 동력학 방정식을 유도한다. 또한 동력학 전향보상기를 갖는 K중분 자기 동조 섭동 적응 제어기를 설계한다. 여기서 사용된 제어는 본질적으로 전향 성분과 제한 성분으로 나누어지는 두가지의 중요한 성분으로 나뉘어지며, 전향 성분은 원하는 궤적에 따르는 경로에 접근하여 매니퓰레이터를 조정하는 nominal torque 입력을 결정한다. 단순 중분 적응 제어기와 K중분 보상 적응 제어기의 성능을 비교 평가하기 위해 두개의 조인트와 두개의 링크를 갖는 유연성 로봇 매니퓰레이터의 끝점이 추종해야 할 위치 궤적을 수평선으로 하고, 부하 변화에 따른 컴퓨터 시뮬레이션을 실행하고 제어기의 타당성을 검토한다.

II. 유연성 링크의 로봇 매니퓰레이터 모델

1. 모델 선정 및 모드가정법

본 논문에서는 매니퓰레이터 끝점의 위치를 제어하기 위해 2개의 자유도로 구성된 2개의 링크를 갖는 평면 로봇 매니퓰레이터를 택하였다. 이 매니퓰레이터의 운동을 표현하기 위하여 파라메타와 3개의 좌표계를 그림1과 같이 정의한다.

여기서 l_1 은 링크1의 길이, l_2 는 링크2의 길이, m_1 은 링크1의 분포질량, m_2 는 조인트 2에서 구동기의 집중된 질량, m_3 는 링크 2의 분포질량, m_3 는 매니퓰레이터 End-Effector 및 부하의 집중된 질량이다. 변수 $Y(X, t)$ 는 다음과 같이 정의된다.^[6]

$$Y[X, t] = W(X, t) + X\theta(t) \quad (1)$$

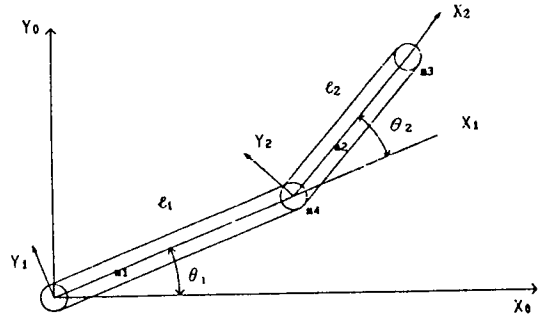


그림 1. 모델 파라메타 및 좌표계

Fig. 1. Model parameters and coordinate system.

여기서

$W(x, t)$: 비변형된 위치에서 빔의 변위

X : 고유축에서 측정된 점의 위치

유연한 매니퓰레이터의 4차 편미분 방정식은

$$EI \frac{\partial^4 Y}{\partial X^4} + \rho \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

4개의 경계조건은

$$EI \frac{\partial^2 Y}{\partial X^2} \Big|_{x=0} + T - I_n \theta = 0$$

$$Y(0, t) = 0$$

$$EI \frac{\partial^2 Y}{\partial X^2} \Big|_{x=L} = 0$$

$$EI \frac{\partial^3 Y}{\partial X^3} \Big|_{x=L} = m_1 \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} \Big|_{x=L} \quad (3)$$

여기서

ρ : 단위 길이당 질량 밀도

E : 탄성계수

I : 빔 단면의 관성 모멘트

선형 PDE의 해는 변수 분리 방법을 이용하여 구할 수 있다.

$$W(X, t) = \psi(X) q(t) \quad (4)$$

이 결과들은 Pinned-free 빔^[6]으로 가정되었고, i 번째 링크에서 y 방향의 편이 W_i 를 얻기 위하여 가정모드 형태의 방법을 X - Y 평면 좌표에 대해 적용하면,^[7] 유연성 운동의 횡변위는

$$W_i(X_i, t) = \sum_{k=1}^n \varphi_{ik}(X_i) q_{ik}(t) \quad (5)$$

여기서 $\varphi_{ik}(X_i)$ 는 i 번째 좌표계에 대해 기하학적 경

계조건을 만족하는 함수이고 $q_{ik}(t)$ 는 일반화된 좌표이다. 모드함수 φ_{ik} 는 Bernoulli-Euler 빔 이론에 의하여 유도되며, 2차 모드까지만 택하면

$$W_1(X_1, t) = \varphi_{11}(X_1) q_{11}(t) + \varphi_{12}(X_1) q_{12}(t) \quad (6)$$

2. 동적 방정식

유연성 로봇트 매니플레이터의 힘에 의한 2개의 링크는 그림2와 같다.

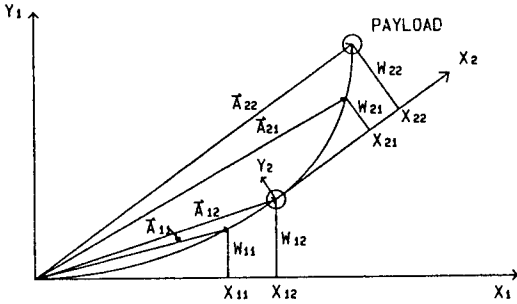


그림 2. 유연성 매니플레이터와 좌표계
Fig. 2. The flexible manipulator and coordinates.

여기서 위치벡터 $A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}$ 및 속도를 구하여 운동에너지와 위치에너지를 구할 수 있다. 조인트 1의 운동에너지는

$$K_{j1} = 1/2 \dot{j}\theta_1 \quad (7)$$

이다. 분포질량 및 집중질량 m_1, m_2, m_3, m_4 에 대한 운동에너지는

$$\begin{aligned} K_{L1} &= 1/2 \int m_1 (\vec{V}_{11} \vec{V}_{11}) dX_{11} \\ K_{j2} &= 1/2 \int m_4 (\vec{V}_{12} \vec{V}_{12}) dX_{12} \\ K_{L2} &= 1/2 \int m_2 (\vec{V}_{21} \vec{V}_{21}) dX_{21} \\ K_P &= 1/2 \int m_3 (\vec{V}_{22} \vec{V}_{22}) dX_{22} \end{aligned} \quad (8)$$

이며, 분포질량 및 집중질량 m_1, m_2, m_3, m_4 의 위치 에너지는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{L1} &= 1/2 \int m_1 g(X_{11}s_1 + W_{11}c_1) dX_{11} \\ P_{j2} &= -m_4 g(X_{12}s_1 + W_{12}c_1) \\ P_{L2} &= 1/2 \int m_2 g(X_{21}s_1 + W_{21}c_1) dX_{21} \\ P_P &= -m_3 g(X_{22}s_1 + W_{22}c_1) \end{aligned} \quad (9)$$

이 된다. 전체의 위치에너지는 $PE = P_{L1} + P_{j2} + P_{L2} + P_P$ 로 구해진다 이다. 링크1의 스트레인 에너지는 편이 $w_{11} = \varphi_{11}q_{11} + \varphi_{12}q_{12}$ 를 고려하여 구하면

$$S_1 = \frac{1}{2} EI_{1y} \left(\frac{\partial^2 W_{11}}{\partial X_{11}^2} \right)^2 dX_{11} \quad (10)$$

링크 2의 스트레인 에너지는 편이 $W_{21} = \varphi_{21}q_{21} + \varphi_{22}q_{22}$ 를 고려하여

$$S_2 = \frac{1}{2} EI_{2y} \left(\frac{\partial^2 W_{21}}{\partial X_{21}^2} \right)^2 dX_{21} \quad (11)$$

로 구한다. 전체의 운동에너지는

$$K = \sum_{i=1}^2 K_{ji} + \sum_{i=1}^2 K_{Li} + K_P \quad (12)$$

전체의 위치 에너지는

$$P = \sum_{i=1}^2 P_{Li} + P_{j2} + P_P \quad (13)$$

스트레인 에너지는

$$S = \sum_{i=1}^2 S_i \quad (14)$$

이며, Lagrange 방법에 의한 동역학 방정식은

$$T_1(t) = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i(t)} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i(t)} \quad (15)$$

여기서 L은 Lagrange 함수이며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L &= K - (P + S) = \sum_{i=1}^2 K_{ji} + \sum_{i=1}^2 K_{Li} + K_P - \\ &\quad \left(\sum_{i=1}^2 P_{Li} + P_{j2} - P_P + \sum_{i=1}^2 S_i \right) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 $T_1 = i$ 번째 조인트에 가해지는 토크, $q =$ 조인트각 및 일반화된 좌표이며 Lagrange의 동역학 방정식은 다음과 같이 행렬형태로 나타낼 수 있다.¹¹⁾

$$M(q) \ddot{q} + N(q, \dot{q}) + G(q) = T \quad (17)$$

여기서 $M(\ddot{q})$ 는 6×6 관성 행렬이며, $N(q, \dot{q})$ 는 6×1 원심력 및 Coriolis 벡터, $G(q)$ 는 6×1 중력 벡터이다.

III. 유연성 매니플레이터의 적응 제어기

1. 상태 방정식

식(17)을 다음과 같이 미분 방정식으로 나타내면

$$M \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_r \\ \ddot{q}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_r \\ V_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_r \\ T_f \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서

$$\begin{aligned} \theta_r &= [\ddot{\theta}_1, \ddot{\theta}_2]^T \\ \ddot{q}_r &= [q_{11}, q_{12}, q_{21}, q_{22}] \\ V_r &= -[N_1 + G_1, N_2 + G_2]^T \\ V_f &= -[N_3 + G_3, N_4 + G_4, N_5 + G_5, N_6 + G_6]^T \end{aligned} \quad (19)$$

V_r 과 V_f 는 비선형 항이며, 식(18)은...

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_r(t) &= F_r + M^{-1}T_r(t) \\ \ddot{q}_r(t) &= F_f + M^{-1}T_f(t) \end{aligned} \quad (20)$$

여기서

$$\begin{bmatrix} F_r \\ F_f \end{bmatrix} = -M^{-1} \begin{bmatrix} V_r \\ V_f \end{bmatrix}$$

자기 동조 시스템을 설계하기 위하여, 강체(rigid body) 로봇트 매니플레이터에 외란을 갖는 것으로 가정하여 매니플레이터 시스템의 상태벡터 $X = [X_1, X_2, \dot{X}_1, \dot{X}_2]^T$ 라 하면 식(17)에서

$$\dot{X}(t) = WX(t) + R[X(t)]u(t) + S[X(t)] \quad (21)$$

여기서

$$\begin{aligned} W &= \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R[X(t)] = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}(q) \end{bmatrix} \\ S[X(t)] &= \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1}(q)[N(q, \dot{q}) + G(q)] \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

식(21)의 해는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x(t_2) &= e^{W(t_2-t_1)} + \int_{t_1}^{t_2} e^{W(t_2-\tau)} R[X(\tau)]u(\tau) d\tau + \\ &\int_{t_1}^{t_2} e^{W(t_2-\tau)} S[X(\tau)] d\tau \end{aligned} \quad (23)$$

이산 모델은 T를 샘플링 주기라 하면

$$X(t+1) = F(t)X(t) + G(t)u(t) + W(t) \quad (24)$$

여기서

$$\begin{aligned} F(t) &= e^{WT} \\ G(t) &= \int_{tT}^{(t+1)T} e^{W((t+1)T-\tau)} R[X(\tau)] d\tau \\ W(t) &= \int_{tT}^{(t+1)T} e^{W((t+1)T-\tau)} S[X(\tau)] d\tau \end{aligned} \quad (25)$$

2. Implicit 자기 동조 제어

유연성 로봇트 매니플레이터의 끝점 좌표에 대한 단일 입출력 차분 모델은⁽⁸⁾

$$A(Z^{-1})y(t) = Z^{-K}B(Z^{-1})u(t) + \rho(t) \quad (26)$$

이다. 여기서 $y(t)$ 는 출력, $u(t)$ 는 제어입력, $\rho(t)$ 는 외란, t 는 샘플시점 $t=0, 1, 2, 3, \dots$ 을 나타내며 Z^{-1} 은

후향이동 연산자이다. $\xi(t)$ 를 영평균을 가정한 랜덤 변수라 하고 신호 $\rho(t)$ 를 외란이라 하면

$$\rho(t) = C(Z^{-1})\xi(t) + d \quad (27)$$

따라서

$$A(Z^{-1})y(t) = Z^{-K}B(Z^{-1})u(t) + C(Z^{-1})\xi(t) + d \quad (28)$$

$A(Z^{-1}), B(Z^{-1})$ 및 $C(Z^{-1})$ 은 후향 이동 연산자 Z^{-1} 의 다항식이며 d 가 상수이고 고정 증분을 갖는 외란으로 취급하면

$$\Delta\rho(t) = C(Z^{-1})\xi(t) \quad (29)$$

로 된다. $\Delta = 1 - Z^{-1}$ 로서 차분 연산자이며, Δd 는 상수 d 에 의하여 영이고 플랜트 모델은 $C(Z^{-1})$ 을 1로 가정하면 식(26)과 식(29)에서

$$Ay(t) = Z^{-K}Bu(t) + \frac{\xi(t)}{\Delta} \quad (30)$$

이다. 편차를 제거하기 위한 제어법칙은 부하변화 및 링크의 편이 등을 고려하여 다음과 같이 정의한다.

$$Gu(t) + Fy(t) - HW(t) + d(t) = 0 \quad (31)$$

여기서 G, F, H 는 Z^{-1} 의 다항식이며

$$\begin{aligned} G(Z^{-1}) &= 1 + g_1Z^{-1} + g_2Z^{-2} + \dots + g_{n_g}Z^{-n_g} \\ &\quad (n_g = n_b + K - 1) \\ F(Z^{-1}) &= f_0 + f_1Z^{-1} + f_2Z^{-2} + \dots + f_{n_f}Z^{-n_f} \\ &\quad (n_f = n_g - 1) \\ H(Z^{-1}) &= h_0 + g_1Z^{-1} + h_2Z^{-2} + \dots + h_{n_h}Z^{-n_h} \\ &\quad (n_h = n_g - 1) \end{aligned} \quad (32)$$

$W(t)$ 는 측정된 변수에 대한 기준값이며, $d(t)$ 는 측정할 수 없는 부하 $\xi(t)/\Delta$ 를 기지의 데이터로부터 $d(t)$ 를 재구성하여 시간 t 에서 편차를 제거하기 위한 항이다. 이 시스템에 대한 모델 추종 제어기는 식(30)과 식(31) 및 DIOPHANTINE 방정식으로 부터⁽⁹⁾

$$PB = AG + Z^{-K}BF \quad (33)$$

정상상태 이득을 얻기 위하여 $P(Z^{-1}) = 1$ 로 선택하며 식(33)을 고려한 페루프 방정식은 다음과 같다.

$$Py(t) = HW(t-K) + \frac{E\xi(t)}{\Delta} - d(t-K) \quad (34)$$

이고 입력과 출력이 같기 위하여 식(34)는 다음 두가지의 조건을 만족해야 한다.

조건 1 : $H(Z^{-1})z=1$ 은 1이 되어야 한다.

조건 2 : $E[\frac{R\xi(t)}{\Delta} - d(t-K)]$ 는 영이 되어야한다.

조건1은 $H(Z^{-1})=1$ 로 택하면 해결되고 $E[\]$ 는 기대값이며, 식(31) 및 식(34) 등을 고려한 회귀 모델 구조는 다음과 같다.

$$Py(t) = \hat{G}u(t-K) + \hat{F}y(t-K) + \frac{E\xi(t)}{\Delta} \quad (35)$$

영평균을 갖는 추정모델로 식(35)을 나타내면

$$P\Delta y(t) = G\Delta u(t-K) + F\Delta y(t-K) + E\xi(t) \quad (36)$$

이며, \hat{G} 와 \hat{F} 는 다항식으로 추정하며 파라메타 추정 모델은

$$P\Delta y(t) = X^T(t)\phi(t) + E\xi(t) \quad (37)$$

여기서

$$X^T(t) = [\Delta u(t-K), \Delta u(t-K-1), \dots; \Delta y(t-K), \Delta y(t-K-1), \dots] \quad (38)$$

$$\phi(t) = [\hat{g}_0, \hat{g}_1, \dots, \hat{f}_0, \hat{f}_1, \dots] \quad (39)$$

로 추정된다. 추정된 G와 F를 사용하여 d(t)를 구성하면 조건 2는 해결된다.

$$d(t) = Py(t) - \hat{G}u(t-K) - \hat{F}y(t-K) \quad (40)$$

이며, 식(31)에 d(t)의 값을 대입하면 제어법칙은 다음과 같다.

$$u(t) = \frac{1}{\hat{G}} [HW(t) - Fy(t) - Py(t) + \hat{G}u(t-K) + Fy(t-K)] \quad (41)$$

제어법칙에 대한 블록선도는 그림3과 같다.

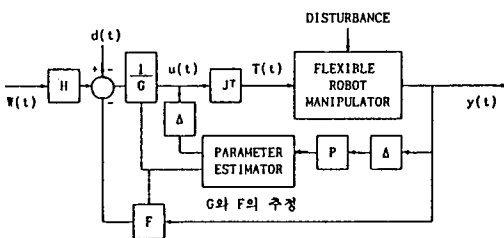


그림 3. 자기동조 제어 시스템 블록 선도
Fig. 3. Block diagram of the self-turning control system.

3. 동적 전향 보상기를 갖는 K중분 섭동 적응 제어기

1) 동적 전향 보상기

동적 전향 보상기는 역 기구학 및 역 동력학의 모델로 구성되며, 원하는 기준 궤적을 가깝게 추종하도록 공칭 제어 입력을 결정한다. 이 근사 역 모델은 개루프 제어이며, 그 효과는 로보트 매니퓰레이터 모델 표현의 정확성에 의해 결정된다. 직교 좌표계에서 역 모델에 대한 블록선도는 그림4와 같다. 행렬 표현은

$$\theta = f^{-1}(X) \quad (42)$$

$$\dot{\theta} = J^{-1}(\theta) \dot{X} \quad (43)$$

여기서 J는 Jacobi 행렬이고 양변을 시간에 대해 미분하면

$$\dot{\theta} = J^{-1}(\theta) [\ddot{X} - \dot{J}(\theta) \dot{\theta}] \quad (44)$$

역 동력학 모델은 역 기구학 모델에서 구한 조인트의 각, 각속도 및 각가속도를 이용하여 조인트에 가해지는 nominal torque를 구하는 모델이다. 그러나 시간에 따른 전기적 기계적인 불확실한 파라메타의 변화 및 링크의 유연성 때문에 정확한 역 모델을 얻기 어렵다. 이 변화 등에 의하여 원하는 기준 궤적에 대해 오차가 발생되며, 오차를 줄이기 위해 공칭 제어 입력을 동적 전향 보상기에 의하여 가한다. 이 오차를 측정하고 제어하기 위해 nominal torque에 교정 토크를 가하는 자기 동조 제환 제어기를 사용한다.

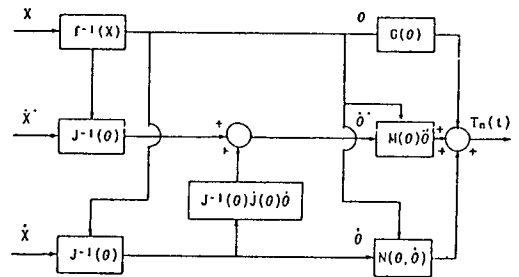


그림 4. 동적 전향 보상기
Fig. 4. Dynamic feedforward compensator.

2) K중분 예측기

움셋트 문제를 해결하기 위해 외란 모델 $\rho(t)$ 를 고려하여 식(28)에서 목표값을 $W(t)$ 라 하고 $T(Z^{-1})$, $U(Z^{-1})$, $V(Z^{-1})$ 을 Z^{-1} 의 다항식이라 하면 제환제어

계통의 방정식은 다음과 같다.

$$Ty(t) + Uu_v(t) - VW(t) + d_1 = 0 \quad (45)$$

여기서 $u_v(t)$ 는 교정 힘이며 d_1 는 제어 옵셋트이다. $u_v(t)$ 를 구하여 식(26)에 대입하면

$$(Z^{-k}BT + AU)y(t) = Z^{-k}BVW(t) + U\tilde{\rho}(t) - Z^{-k}Bd_1 \quad (46)$$

이며 정상 상태에서 제어는 외란 $\tilde{\rho} = d$ 와 관계없이 $\tilde{y} = \tilde{W}$ 가 되도록 한다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} [\tilde{y} - \tilde{W}] = 0 \quad (47)$$

가 되도록 하며 정상 상태에서 $U(Z^{-1})\rho(t)$ 는 $\rho(t)$ 의 값이 상수 d 일 때 $U(1)\tilde{\rho} = U(1)d$ 이며, $Z=1$ 로 놓으므로 간단히 구해진다. 즉 $\tilde{y} = \tilde{W}$ 가 되기 위하여 식(46)에 최종치 정리를 사용하면 다음 2가지의 방법을 만족해야 한다.

$$[B(1)T(1) + A(1)U(1)]\tilde{y} = B(1)V(1)\tilde{W} + U(1)d - B(1)d_1 \quad (48)$$

방법 1 : 위 식에서 옵셋트 항이 영이 되기 위하여 $U(1)d = B(1)d_1$ 과 $B(1)T(1) + A(1)U(1) = B(1)V(1)$ 이 되어야 한다.

방법 2 : 옵셋트 항을 제거하기 위하여 $d_1 = U(1)$ 및 $T(1) = V(1)$ 이 되어야 한다.

방법 1은 d 의 정확한 추정치가 필요하며, 방법 2는 d 를 정확히 추정할 필요가 없다. 본 논문에서 제안한 K 중분 예측기는 방법 2를 사용한다. $y_s \pm W$ 가 되도록 $P(1) = 1$ 에 의하여 정의된 보조출력 $y_s(t)$ 를 사용하면⁽¹⁰⁾

$$\begin{aligned} y_s(t) &= P(Z^{-1})y(t) = \frac{P_n(Z^{-1})}{P_d(Z^{-1})}y(t) \\ &= E(Z^{-1})A + Z^{-k} \frac{F(Z^{-1})}{P_d} \end{aligned} \quad (49)$$

이 된다. $F(Z^{-1})$ 다항식은 주어진 A, P 및 K 로부터 결정된다. $G(Z^{-1}) = EB$ 이고 $y_d(t)$ 는 여과된 신호 $y(t)/P_d(Z^{-1})$ 이며, 예측제어기는 다음과 같다.

$$u_v(t) = \frac{W(t) - y_{sp}(t+K|_t)}{Q(Z^{-1})} \quad (50)$$

즉 예측제어기는 $y_{sp}(t+K|_t)$ 가 $W(t) - Q(Z^{-1})u_v(t)$ 와 같을 때이고 Q 가 영일 때 식(50)에서 $W(t) = y_{sp}(t+K|_t)$ 가 되므로

$$W(t) = F(Z^{-1})y_d(t) + G(Z^{-1})u_v(t) + d_2 \quad (51)$$

로 된다. 일반 제어기 식(46)과 비교하면 $d_2 = E(1)d =$

$G(1)d/B(1)$ 이 됨을 알 수 있으며 조건(1)이 만족된다.

$$\begin{aligned} \frac{B(1)F(1)}{P_d(1)} + A(1)G(1)B(1) \left[\frac{F(1)}{P_d(1)} + A(1)E(1) \right] \\ = B(1)P(1) = B(1) \end{aligned} \quad (52)$$

그러므로 방법 1은 만족되며 옵셋트는 제거된다. 예측 옵셋트는 제어 방정식(50)을 사용하여 y_{sp} 를 측정하며 $P(Z^{-1}) = 1$ 인 간단한 경우의 위치 예측기를 고려하면

$$y_p(t+K|_t) = F(Z^{-1})y(t) + G(Z^{-1})u_v(t) + d_2 \quad (53)$$

또한 예측기는 단순 차분 연산자 Δ 를 이용하기 때문에 최적으로 예측할 수 없으며 지연 시간이 있는 폐루프 시스템의 예측 방법은 그림5와 같다. 여기서 $Q(Z^{-1})$ 은 고전적 PID 구조를 갖는다. Z 가 1일 때 $\Delta_k A/B$ 는 영 DC 이득이므로 케환경로는 DC 단위 이득이다. Smith 예측신호는

$$y^s(t+K|_t) = \frac{B(Z^{-1})u(t)}{A(Z^{-1})} \quad (54)$$

케환신호는 K 차분 연산자를 사용하면

$$f(t) = y(t) + \frac{\Delta_k B u(t)}{A} \quad (55)$$

차분 연산자의 특성에서 단순 증분 연산자 Δ 보다는 K 차분 연산자 Δ_k 를 이용하는 것이 더 적절하다. 식(53)을 사용하면 $Fy(t) - Fy(t-K) = Fy\Delta_k u_v(t)$, $G u_v(t) - G u_v(t-K) = G\Delta_k u_v(t)$ 이므로

$$y_p(t+K|_t) = y_p(t|_{t-k}) + F\Delta_k y(t) + G\Delta_k u_v(t) \quad (56)$$

여기서 $y(t+K) = y_p(t+K|_t) + \tilde{y}(t+K|_t)$ 이므로

$$y_p(t+K|_t) = y(t) - \tilde{y}(t|_{t-k}) + F\Delta_k y(t) + G\Delta_k u_v(t) \quad (57)$$

로 되고 식(57)을 K 중분 예측기라 한다. 이때 $\tilde{y}(t|_{t-k})$

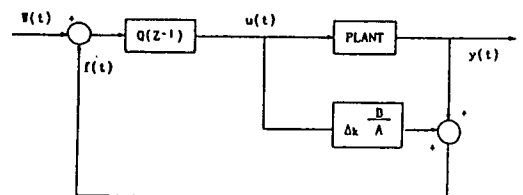


그림 5. 스미스 예측기
Fig. 5. Smith predictor.

는 재구성될 수 있는 신호 $E(Z^{-1})\xi(t)$ 이고 이 신호는 Smith 예측기와 같이 K차분 $y(t)-y(t-K)$ 등을 포함한다. 또한 기대값이 영인 외란을 갖는 추계적 방법에 의하여 최적 예측을 얻는데 필요하며 d_s 는 소거된다. 식(57)과 식(49)를 비교하면 보조출력 $y_s(t)$ 에 대한 K중분 예측기는

$$y_{sp}(t+K|t) = y_s(t) - \tilde{y}_s(t|t-k) + F\Delta_k y_d(t) + G\Delta_k u_v(t) \tag{58}$$

이다. 식(50)을 사용하면

$$(Q + G\Delta_k)u_v(t) = W(t) - y_s(t) - F\Delta_k y_d(t) + \tilde{y}_s(t|t-k) \tag{59}$$

여기서 $P(Z^{-1})z^{-1}=1$ 로 택하며 전향 경로에는 적분 전달함수 $1/\Delta_k$ 이 있으므로 추종 오차가 적분되고 옵셋트가 제거된다. RLS 추정 알고리즘은 각 샘플링 시간에서 현재의 입출력 값과 과거의 모든 입출력 값의 축적효과에 근거를 두어 다음 샘플링 시간에 대한 파라메타를 추정한다. 예측오차 $\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t) = E(Z^{-1})\xi(t)$ 라고 정의하면 $P=1$ 일 때 시점 t 에서의 출력은

$$y(t) = y(t-K) - \varepsilon(t-K) + F\Delta_k y(t-K) + G\Delta_k U_v(t-K) + \varepsilon(t) \tag{60}$$

이 된다. 자기 동조에서 예측 모델은

$$\hat{y}(t) = \sum X^T(t)\phi(t) + \varepsilon(t) \tag{61}$$

여기서 데이터 벡터 X 와 파라메타 벡터 ϕ 는

$$X^T(t) = [y(t-K) - y(t-2K), y(t-K-1) - y(t-2K-1), \dots, U_v(t-K) - U_v(t-2K) \dots] \tag{62}$$

$$\phi(t) = [\hat{g}_0, \hat{g}_1, \dots, \hat{f}_0, \hat{f}_1, \dots] \tag{63}$$

식(59)로부터 추정된 \hat{G} 와 \hat{F} 를 이용하면 제어법칙은 다음과 같다.

$$U_v(t) = \frac{1}{G} [W(t) - \hat{F}\Delta_k y_d(t) - y_s(t) + GU_v(t-K) + \tilde{y}_s(t|t-k)] = \frac{1}{G} [W(t) - \hat{F}\Delta_k y_d(t) - y_s(t) + \tilde{\sigma}(t)] \tag{64}$$

제어법칙에 대한 블록선도는 그림6과 같다. 동적 전향 보상기를 갖는 K중분 자기 동조 시스템은 보상기와 K중분 자기 동조 제환제어의 두부분으로 나누어진다. 그러므로 유연성 매니퓰레이터에 가해지는 토크는 동적 전향 보상기에 의한 nominal torque

T_n 과 자기 동조 제환 제어에 의한 교정 토크 U_v 의 합으로 계산되는 섭동제어 이론이 도입되었다. 그림 6은 동적 전향 보상기를 갖는 K중분 섭동 자기 동조 적응제어 시스템의 블록 선도이다.

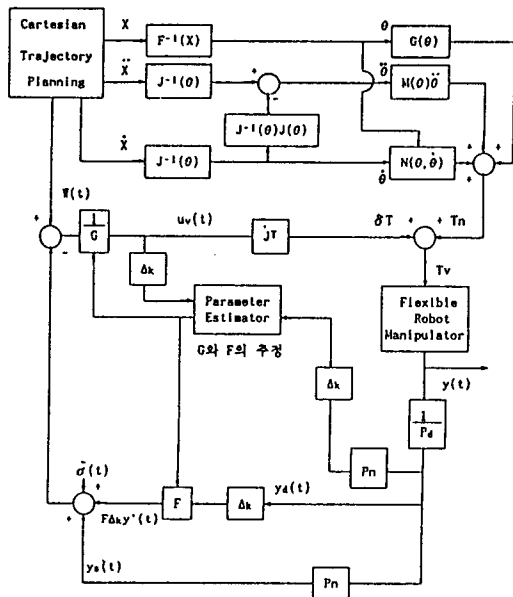


그림 6. 동적 전향 보상기를 갖는 K중분 자기동조 제어 시스템

Fig. 6. The K incremental self-tuning control with dynamic feedforward compensator.

IV. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과고찰

그림1과 같이 2개의 관절과 2개의 유연성 링크를 갖는 로봇 매니퓰레이터에 대해 제3장에서 설계한 자기 동조 적응 제어기 알고리즘의 성능을 비교 평가하기 위해 제 2장에서 유도한 유연성 로봇 매니퓰레이터의 식(17)을 사용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다. 매니퓰레이터 각 링크는 질량이 균일하게 분포된 빔이고, 각 조인트에 구동기가 장착되어 있으며, 부하는 끝점에 가해지며 집중된 질량으로 가정하였다. 사용된 매니퓰레이터 모델의 파라메타는 다음과 같이 선택한다.

$l_1=1.5m, l_2=1.5m, m_1=2Kg/m, m_3=2.5Kg, m_4=4Kg, J=0.001Kg-m^2, EI_1=1200N/m, EI_2=1000N/m, K=3$
 여기서 l_i 는 i 번째 링크의 길이, m_i 는 i 번째 링크의 질량 밀도, m_4 는 관절 2의 질량, m_3 는 매니퓰레이터 끝점의 질량, J 는 회전 관성 모멘트, EI_i 는 i 번째 링크

의 y방향에 대한 강성이다. 로봇 매니퓰레이터 끝점이 추종해야 할 위치 궤적을 직선으로 하고, 속도를 주어 시뮬레이션 한다. 매니퓰레이터 끝점이 직교 좌표계에서 직선을 따라 움직이도록 하기 위해 T시간 동안 추종하게 한다. 이때 속도 궤적은 포물선 궤적을 갖도록 시간 함수로 준다. 출발점 (x_0, y_0) 에서 도착점 (x_f, y_f) 을 추종한다면, 직교 좌표계에서 각 성분에 대한 위치, 속도 및 가속도 궤적은 다음과 같이 구해진다.

로봇 매니퓰레이터 끝점을 추종하여야 할 궤적은 $(1.6, 1.0)m - (-1.8, 1.1)m$, 또한 추종 속도에 따른 성능을 평가하기 위해 추종 시간을 4초 동안으로 하고, 끝점에 부하는 각각 1Kg, 2Kg을 갖게 하여 부하에 따른 성능을 평가한다.

매니퓰레이터 동력학 모델의 출력은 수치 적분에 의해 매 10ms 마다 계산되며, 또한 제어 법칙도 10ms 샘플링 시간마다 계산된다. 즉 10ms 마다 추종된 모델의 파라메타를 사용하여 제어기 파라메타가 10ms 마다 온라인 갱신된다.¹¹⁻¹² 그림7과 그림8은 직교 좌표계에서 x 및 y성분의 위치 추종오차를 나타내며 그림9는 끝점 거리 오차를 나타낸다. 끝점을 추종하는 속도 궤적은 2초에 최대 속도 1.275/ms를 갖는 포물선 궤적이며, 매니퓰레이터가 추종하여야 할 각 성분의 거리는 x성분은 1.6m에서 -1.8m까지이고 y성분은 1.0m에서 1.1m이다. 그림10과 그림11은 링크 1 및 링크 2의 편향이며, 그림12는 끝점의 전체 편향이다. 자기 동조 적응 제어기와 동력학 보상을 갖는 K중분 섭동 자기 동조 적응 제어기를 비교하기 위하여 표1에 나타내었다. 자기 동조 적응 제어기 및 동력학 전향 보상을 갖는 K중분 자기 동조 섭동 적응 제어기가 파라메타 추정시 부정확한 초기치로 인해 추종궤적의 시작 부분에서 오차가 크

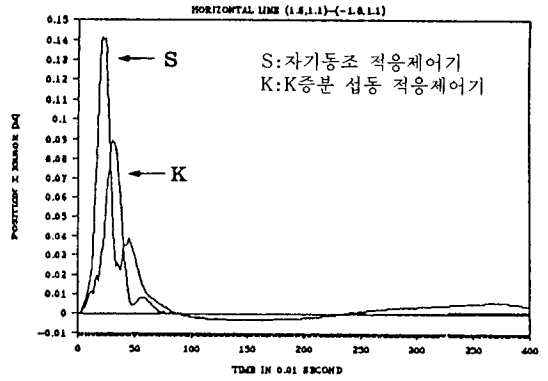


그림 7. 위치 x의 추종 오차
Fig. 7. Tracking errors of position x.

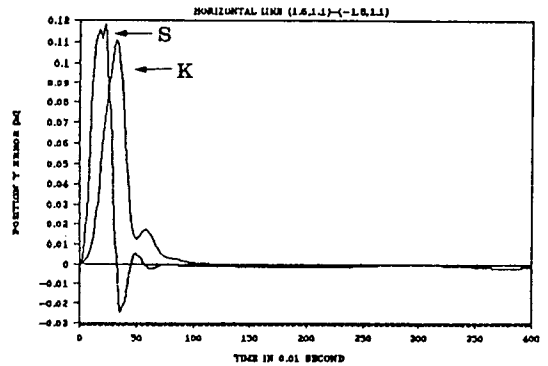


그림 8. 위치 y의 추종 오차
Fig. 8. Tracking errors of position y.

표 1. 편향과 위치 오차 비교(수평선, 4초, 2Kg)
Table 1. Comparison of the deflection and the position error (Horizontal, 4Sec, 2Kg).

		자기동조적응제어기	K중분적응제어기
링크 1	최대 편향	.1462E-01(0.22)	.9465E-02(0.17)
	편향 실효치	.7918E-02	.7580E-02
링크 2	최대 편향	.9330E-02(0.22)	.7956E-02(0.17)
	편향 실효치	.5673E-02	.6035E-02
끝점	최대 편향	.2395E-01(0.22)	.1742E-01(0.17)
	편향 실효치	.1143E-02	.1131E-02
끝점오차	최대 오차	.1834E+00(0.22)	.1415E+00(0.32)
	실효치 오차	.1264E-02	.8519E-02
	최종 오차	.3741E-02	.5663E-03

게 발생하였으나 0.7초 이후 부터 약 1cm 이하의 추종 오차를 갖는 비교적 좋은 추종 상태를 나타낸다. 그러나 기준 궤적에 대한 nominal torque를 가하는 동력학 전향 보상을 갖는 자기 동조 섭동 적응 제어기가 추종 궤적의 시작 부분에서 자기 동조 적응 제어기 보다 추종 오차가 작다. 또한 매니퓰레이터 동력학 모델의 강한 결합이 동력학 전향 보상을 갖는 자기 동조 적응 제어기의 동력학 전향 보상기에 의해 어느 정도 보상되므로 약 0.7초 이후에도 자기 동조 적응 제어기 보다 추종 오차가 작음을 알 수 있다. 표1에서 보는 바와 같이 파라메타 추정시 부정확한 초기치로 인해 자기 동조 제어기는 0.22초에서 최대 편향이 2.395cm, 최대 오차가 18.34cm 발생 하였으며 최종 오차는 0.3741cm로 되었다. 동력

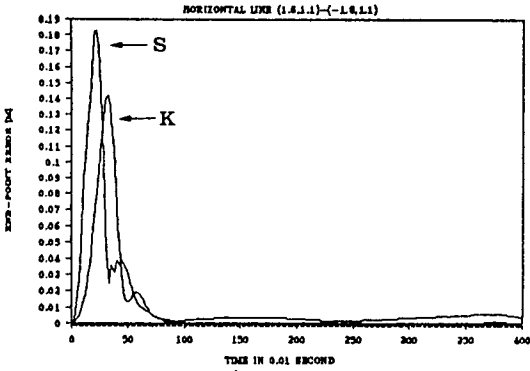


그림 9. 끝점 오차
Fig. 9. End-point error.

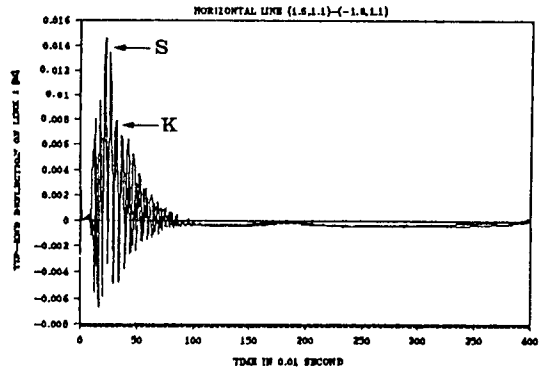


그림 10. 링크 1의 편향
Fig. 10. Deflection of link 1.

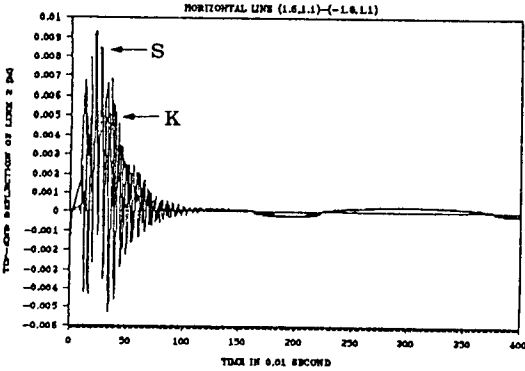


그림 11. 링크 2의 편향
Fig. 11. Deflection of link 2.

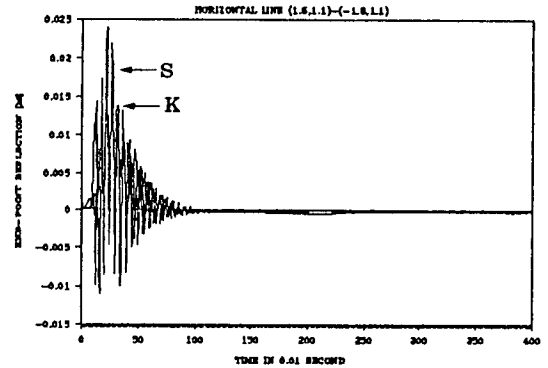


그림 12. 끝점의 전체편향
Fig. 12. Total deflection of end-point.

학 보상기를 갖는 K중분 자기동조 적응 제어기는 최대 편향이 0.17초에서 1.742cm, 최대 오차가 14.15 cm가 발생하였으나 최종 오차는 0.05663cm로 되었다. 이 결과는 최종 오차에서 동력학 보상기를 갖는 K중분 자기동조 적응 제어가 보상기가 없는 자기동조 제어기 보다 오차가 약 6.6배로 감소됨을 의미하며 동력학 보상기를 갖는 K중분 자기동조 제어가 자기동조 제어기 보다 수렴 속도가 빠름을 알 수 있다. 이것으로 nominal torque를 가하는 동력학 전향 보상기를 갖는 자기동조 제어가 매니플레이터 동력학 모델의 강한 결합, 비선형성 등을 동력학 전향 보상기에 의해 어느정도 보상됨을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 링크가 가볍고 유연한 로봇 매니

플레이터에 대해 손의 끝점을 측정하여 기준 궤적을 추종하도록 자기동조 제어를 제안하였다. 제안된 제어기는 조인트 간의 결합으로 인한 추종 오차와 비선형성을 보상하기 위하여, 기준 궤적으로 부터 역기구학 모델과 역동력학 모델을 이용하여 nominal torque를 가하는 동적 전향 보상기와 적교 좌표계에서 주어진 공칭 궤적과 nominal torque에 대한 섭동 이산 모델을 바탕으로 링크의 휨 및 부하외란 등에 의한 편차를 제거할 수 있는 자기동조 궤환 제어기로 구성된 동적 전향 보상기를 갖는 제어를 설계하였다.

본 논문에서는 유연성 매니플레이터 모델의 합리적인 접근이 가능하도록 2개의 진동 모드만을 채택하였으나, 다중 링크로 인해 모델의 표현식이 여전히 복잡하였다. 이와같이 설계된 제어를 2-링크의 유

연성 매니플레이터에 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션 하였다. 여러가지 궤적과 부하 조건에 대한 시뮬레이션을 통한 결과, 자기동조 제어기와 동적 전향 보상기를 갖는 자기 동조 제어기가 부하변화 및 링크의 변형에 의한 편차를 제거함으로써, 주어진 기준 궤적을 잘 추종함을 알 수 있었다. 그러나 링크의 휨에 의한 끝점의 편향과 오차가 동적 전향 보상기를 갖는 자기동조 제어기가 비교적 작았다. 또한 설계한 제어기는 정상 상태 오차를 제거하였으며, 부하변화 및 빠른 속도에 잘 적응함을 보여 주었다. 그러므로 동적 전향 보상기를 갖는 제어기가 유연성 매니플레이터 계통에 보다 적합함을 알 수 있었다. 또한 옵셋트를 제거하기 위하여 새로운 K중분 예측기를 도입하였으며 K중분 예측기는 추정이 잘 안될 때에도 부하 외란 제거가 가능하였으며 옵셋트 제거 특성에서 우수한 결과를 얻었다. 이와 같이 제안된 K중분 보상 자기동조 적응 제어기와 단순중분 적응 제어기의 성능을 비교 평가하기 위해 두개의 조인트와 두개의 링크를 갖는 유연성 로봇트 매니플레이터의 끝점이 추종해야 할 위치 궤적을 수평선으로 하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 실행한 뒤 제어기의 타당성을 검토하였으며 시뮬레이션을 통하여 구체적으로 입증하였다.

參 考 文 獻

- [1] R.P. Paul, Modelling, Trajectory Calculation, and Servoing of a Computer Controlled A.I. Memo 177, Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, Sep., 1972.
- [2] R.H. Cannon, Jr., and T.O. Blindford, "Precise control of flexible manipulators," Final Report to NASA, Langley Research Center, Hampton, VA., 1984.
- [3] A. Truckenbrodt, "Bewegungsverhalten und regelung hybrider mercorpersysteme mit

answedung auf industrieribition," Fortschrit-berlichter der VDI zeitschriften, Reihe 8, Nr. 33, 1980.

- [4] L. Meirovitch, Analytical Methods in Vibrations, McGraw-Hill, New York, 1967.
- [5] P.B. Usoro, R. Nadira and S. Mahil, "Control of lightweight flexible manipulator: A peasibility study," ACC, pp. 1209-1216, 1984.
- [6] J. Yuh, "Application of discrete-times model reference adaptive control to a flexible single-link robot," Journal of Robotic Systems, vol. 4, 5, pp. 621-630, 1987.
- [7] D.W. Clarke and P. Gawthrop, "Self-tuning controller," *Proc. IEE*, vol. 122, pt. D, pp. 929-934, 1975.
- [8] D.W. Clarke, et al, "Offset problem and K-incremental predictors in self-tuning control," *IEE Proceeding*, vol. 130, pt. D, no. 5, pp. 217-225, Sep., 1983.
- [9] J. Jezek, "New algorithm for minimal solutions of linear poly-nomial equations," *Kybernetica*, vol. 18, no. 6, 1982.
- [10] D.W. Clarke and P.J. Gawthrop, "Self-tuning control," *Proc. IEE*, vol. 126, no. 6, pp. 633-640, 1979.
- [11] S.G Tzafestas, Applied Digital Control, North-Holland, 1985.
- [12] 金勝錄, 朴鍾國, "유연한 로봇트 매니플레이터의 PID 자기 동조 적응제어," 전자공학회논문지, 제27권, 제8호, pp. 32-41, 1990.
- [13] 金勝錄, 朴鍾國, "동적 보상기를 갖는 유연성 매니플레이터의 적응제어," 한국통신학회 논문지, 제15권, 제8호, pp. 708-714, 1990.

著 者 紹 介

金勝錄(正會員) 第27卷 第8號 參照
1992年 2月 24日 경희대학교 대학원 전자공학과 공학박사. 1992年 3月 현재 안양전문대학 전자과 부교수

朴鍾國(正會員) 第27卷 第8號 參照
현재 경희대학교 공과대학 전자공학과 교수