

論 文

동적 보상기를 갖는 가벼운 유연성 매니플레이터의 적응 제어

正會員 金勝錄\* 正會員 朴鍾國\*

Adaptive Control with Dynamic Compensator for Lightweight Flexible Robotic Manipulator

Seung Rok KIM\* Jong Kuk PARK\*\* Regular Members

**要 約** 본 논문에서는 링크가 가볍고 유연한 로봇 매니플레이터에 대해 손의 끝점을 측정하여 기준 궤적을 추종하기 위한 자기 동조 제어를 제안하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 알고리즘의 성능을 입증하였다. 제어 대상으로 2개의 링크를 갖는 유연성 로봇 매니플레이터를 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 개환 제어를 결합시킨 합성 제어기로 구성하였다.

**ABSTRACT** This paper has proposed a self-tuning controller for tracking reference trajectory by measuring End-point of arm on robot manipulator whose link is light and flexible, and proved the performance of the algorithm proposed through the computer simulation. As an object of control, a flexible robot manipulator with two-links was selected. As for structure of model, it utilized an assume mode shape method with include gravity force and derived a dynamics equation by adapting two kinds of vibration mode of each.

I. 서 론

최근 컴퓨터의 기술의 눈부신 발전과 이를 응용한 제어 시스템의 이론 및 설계에 많은 진전이 이루어졌으며 그 가운데 중요한 분야가 로봇 매니플레이터의 제어 시스템이다. 특히 지난 수년 동안 로봇의 수요가 급증하므로써 연구

열기가 급속히 증가하였으며 현재도 계속 상승하고 있다.

Dubowsky<sup>(1)</sup>가 처음으로 기준 모델 적응 제어(model reference adaptive control)를 로봇 매니플레이터에 적용하였고, Koivo<sup>(2)</sup>등은 자기 동조 제어(self-tuning control)를, Lee와 Chung<sup>(3)</sup>등이 섭동 적응 제어(perturbation adaptive control)를 조인트 좌표계에서 매니플레이터에 적용하였다.

\*慶熙大學校 電子工學科  
Dept. of Electronic Engineering, Kyunghee University.  
論文番號 : 90-71(接受 1990. 8. 24)

Kelly<sup>(4)</sup>는 우주선과 매니플레이터의 기구학적 결합을 적용할 강탄성체의 알고리즘을 전개 하였으며 유연성 매니플레이터를 제어하기 위하여 Book<sup>(5)</sup>이 휨 운동을 주파수 영역에서 상태 천이 행렬 방법을 적용하여 유연성 매니플레이터의 모델을 설계하였고, 또한 가정 모드 방법에 의한 단일 링크 유연성 매니플레이터를 모델링 하였으며, Book, Neto<sup>(6)</sup>등은 분산된 유연성을 가진 2 빔, 2-조인트 시스템의 제한 제어기를 설계한 이후 연구가 활발하게 수행되어 왔다.

본 논문에서는 링크가 가볍고 유연한 로봇트 매니플레이터에 대해 손의 끝점을 측정하여 기준 궤적을 추종하기 위한 자기 동조 제어기를 제안 한다.

## II. 유연성 링크의 로봇트 매니플레이터 모델

2개의 링크를 갖는 로봇트 매니플레이터는 그림 1에서 보여주며 유연성 로봇트 매니플레이터의 동역학 모델을 구하기 위해 각 링크들은 캔틸레버 빔(cantilever beam)<sup>(6)</sup>으로 가정한다. 여기서 각 링크의 유연한 운동은 다음과 같이 얻을 수 있다.<sup>(6)</sup>

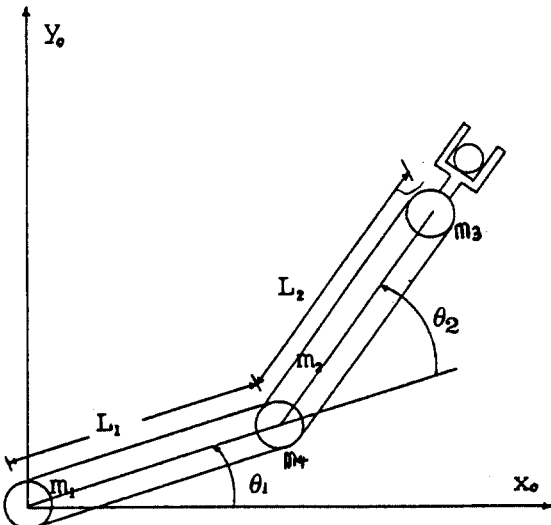


그림 1. 2링크 로봇트 매니플레이터  
Two-link Robot manipulator

$$u_i(x_i, t) = \sum_{j=1}^n \phi_{ij}(L_j) q_{ij}(t) \quad (2.1)$$

여기서  $\phi_{ij}(L_j)$ 는  $i$ 번째 링크의 좌표계에 대해 기하학적 경계 조건을 만족하는 함수이고,  $q_{ij}(t)$ 는 일반화된 좌표이다. 그리고  $n$ 은 링크의 편향을 나타내는 모드의 수이다.

(1) 링크 1의 운동 에너지  
운동 에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$KE_1 = \frac{1}{2} \{ m_1 (\dot{V}_1 \cdot \dot{V}_1) db_1 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{V}_2 \cdot \dot{V}_2) + \frac{1}{2} J \Theta_1 \} \quad (2.2)$$

여기서  $J$ 는 관성 모멘트이다.

운동 에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$KE_2 = \frac{1}{2} \{ m_2 (\dot{V}_3 \cdot \dot{V}_3) dx_2 + \frac{1}{2} m_3 (\dot{V}_4 \cdot \dot{V}_4) \} \quad (2.3)$$

그러므로 전체 운동 에너지는  $KE = KE_1 + KE_2$ 으로 주어진다.

위치 에너지는 다음과 같다.

$$PE_1 = - \{ m_1 g (b_1 s_1 + u_1 c_1) db_1 - m_2 g (l_1 s_1 + u_2 c_1) - \int m_2 g (l_1 s_1 + b_3 s_1 c_2 - u_3 s_1 s_2 + u_2 c_1 + b_3 c_1 s_2 + u_3 c_1 c_2) db_3 - m_3 g (l_1 s_1 + l_2 s_1 c_2 - u_4 s_1 s_2 + u_2 c_1 + l_2 c_1 s_2 + u_4 c_1 c_2) \} \quad (2.4)$$

스트레인 에너지는 링크의 편이에 의한 에너지이다.

$$SE_1 = \frac{1}{2} \{ EI_{1y} (\partial^2 u_1 / \partial b_1)^2 db_1 + \frac{1}{2} \int EI_{2y} (\partial^2 u_3 / \partial x_2)^2 db_3 \}$$

여기서  $EI_{1y}$ ,  $EI_{2y}$ 는 각 링크에서  $Y$  방향의 편이에 대한 강성이다.

Lagrange 함수  $L = KE - (PE + SE)$ 에서 Lagrange의 동역학 방정식은

$$T = \frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial L}{\partial q} \quad (2.5)$$

으로 표현된다.<sup>(7)</sup>

그러므로 동력학 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M(q)\ddot{q}+N(q,\dot{q})+G(q)=T(t) \quad (2.6)$$

### Ⅲ. 동적 전향 보상기를 갖는 자기 동조 제어

#### 1. 동적 전향 보상기

직교 좌표계에서 역 모델은 역 기구학 모델과 역 동력학 모델로 구성되며, 블록선도는 그림 2와 같다.

매니플레이터 끝점의 위치 궤적을  $X=[x,y]$ 로 나타내고, 조인트의 각을  $\theta$ 로 나타내면 기구학적 관계는 다음과 같이 표현된다.<sup>[1]</sup>

$$\theta=f^{-1}(X) \quad (3.1a)$$

$$\theta=J^{-1}(\theta)X \quad (3.1b)$$

$$\theta=J^{-1}(\theta)[X-J(\theta)\theta] \quad (3.1c)$$

역 동력학 모델은 역 기구학 모델에서 구한 조인트의 각, 각속도 및 각가속도를 이용하여 조인트에 가해지는 공칭 토크를 구하는 모델이다.

#### 2. 자기 동조 궤환 제어

$e(k)$ 는 매니플레이터 끝점의 기준 궤적과 측정된 오차이고, 또한  $\mu(k)$ 는 결합항, 모델링 오차, 링크의 변형 및 외부 외란을 가지며, 상수  $f$ 와 영 평균을 갖는 잡음으로 구성된다면 (3.2)식과 같이 표현된다.

$$A(z^{-1})e(k)=z^{-d}B(z^{-1})u_v(k)+f+\epsilon(k) \quad (3.2)$$

$\mu(k)=f+\epsilon(k)$ 를 정상 증분을 갖는 외란으로 취급하면  $\mu(k)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mu(k)=\epsilon(k)/\Delta \quad (3.3)$$

(3.2)식은 다음과 같이 표현된다.

$$A(z^{-1})e(k)=z^{-d}B(z^{-1})u_v(k)+\epsilon(k)/\Delta \quad (3.4)$$

링크의 편이 등은 고려하여 제어 법칙을 다음과 같이 정의한다.

$$R(z^{-1})u_v(k)+S(z^{-1})e(k)+s(k)=0 \quad (3.5)$$

식(3.5)을 식(3.4)에 대입하면 케루프 시스템

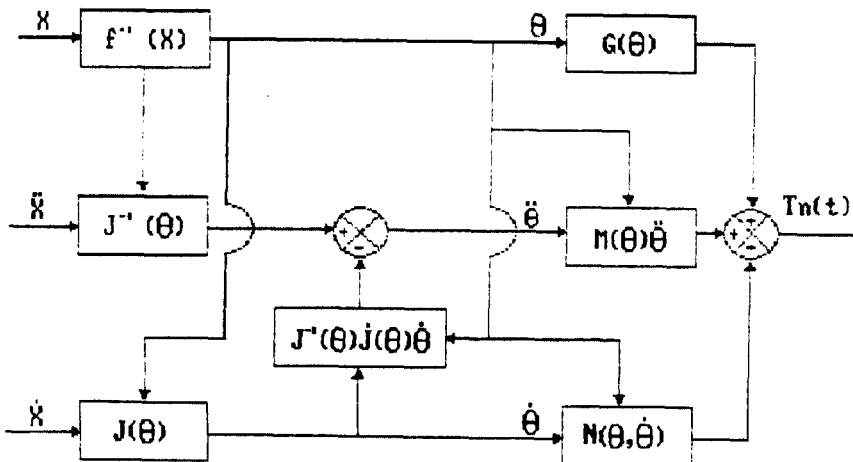


그림 2. 동적 전향 보상기  
Dynamic feedford compensator

은 다음과 같다.

$$[A(z^{-1})R(z^{-1}) + z^{-d}B(z^{-1})S(z^{-1})]e(k) = R(z^{-1})\epsilon(k) / \Delta - B(z^{-1})f(k-d) \quad (3.6)$$

이러한 시스템에 대한 k중분 모델 추종 제어기는 다음과 같은 Diophantine 방정식으로 부터 얻어진다<sup>6)</sup>.

$$P(z^{-1})B(z^{-1}) = A(z^{-1})R(z^{-1}) + z^{-d}B(z^{-1})S(z^{-1}) \quad (3.7)$$

(3.7)식에서 다항식의 해를 얻기 위하여  $R(z^{-1})$ 는 인수  $B(z^{-1})$ 을 포함하여야 한다.

$$R(z^{-1}) = E(z^{-1})B(z^{-1}) \quad (3.8)$$

Diophantine 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$P(z^{-1}) = E(z^{-1})A(z^{-1}) + z^{-d}S(z^{-1}) \quad (3.9)$$

(3.9)식을 (3.6)식의 페루프 계통에 대입하면 다음과 같이 표현된다.

$$P(z^{-1})e(k) = E(z^{-1})\epsilon(k) / \Delta - f(k-d) \quad (3.10)$$

또한 정상 상태에서 부하 외란에 의한 편차를 제거하기 위해 (3.10)식은 다음 조건식을 만족해야 한다.

$$[E(z^{-1})\epsilon(k) / \Delta - f(k-d)] = 0 \quad (3.11)$$

여기서  $E[\ ]$ 는 기대값이며, 식(3.11)은  $f(k)$ 을 다음과 같이 구성하면

$$f(k) = E(z^{-1})\epsilon(k) / \Delta \quad (3.12)$$

파라메타를 추정하기 위해 (3.4)식은

$$P(z^{-1})\Delta e(k) = R(z^{-1})\Delta u_v(k-d) + S(z^{-1})\Delta e(k-d) + E(z^{-1})\epsilon(k) \quad (3.13)$$

파라메타 벡터  $\theta$ 를 (3.14) 식과 같이 정의한다.

$$\theta(k) = [r_0, r_1, \dots, r_{nr}, s_0, s_1, \dots, s_{ns}] \quad (3.14)$$

파라메타  $\theta$ 는 다음의 반복 최소 차승 알고리즘에 의해 추정된다<sup>6)</sup>.

(3.12)식으로 부터  $f(k)$ 를 구성하면

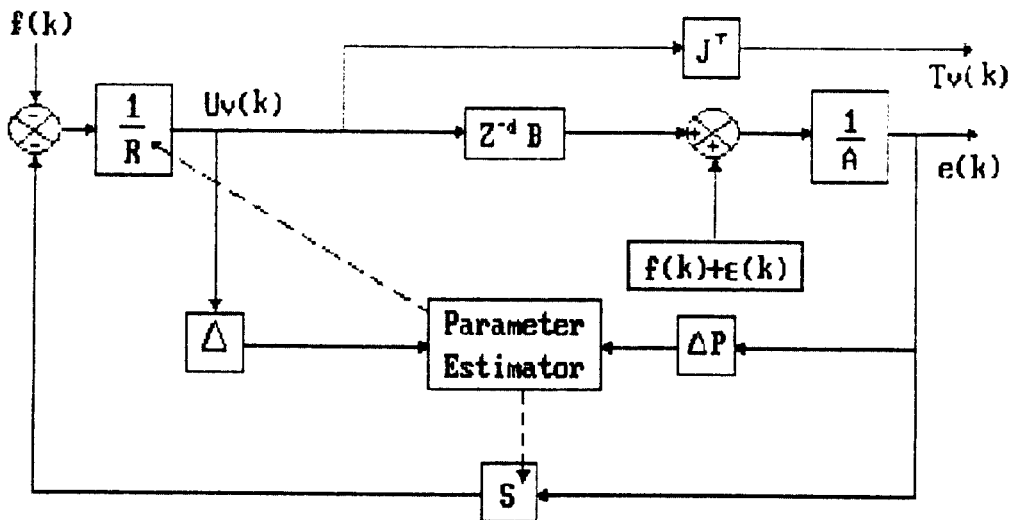


그림 3. 자기 동조 제환 시스템  
The Self-Tuning feedback control system

$$f(k) = P(z^{-1})e(k) - R(z^{-1})u_v(k-d) - S(z^{-1})e(k-d) \quad (3.15)$$

자기 동조 제한 제어 시스템의 블록 선도는 그림 3과 같다.

$$\hat{R}(z^{-1})u_v(k) = -\hat{s}(z^{-1})e(k) + P(z^{-1})e(k) - \hat{R}(z^{-1})u_v(k-d) - \hat{S}(z^{-1})e(k-d) \quad (3.16)$$

#### IV. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과 고찰

그림 2.1과 같은 유연성 링크를 갖는 로봇트 매니플레이터에 대해 설계한 자기 동조 제어 알고리즘의 성능을 비교 평가하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다.

사용된 매니플레이터 모델의 파라메타는 다음과 같이 선택한다.

$$l_1=1.2m, l_2=1.2m, m_1=3Kg/m, m_4=4Kg, m_2=2Kg/m, m_3=2.5Kg, J=0.001Kg-m^2, EI_1=1200N/m, EI_2=1000N/m$$

로봇트 매니플레이터 끝점을 추종하여야 할 대각선 궤적은 그림 4와 같이(0.0,1.3)m-(1.6, 0.2)m로 한다.

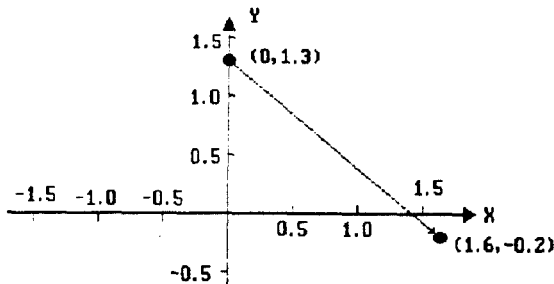


그림 4. 대각선 궤적  
Digonal line trajectory

그림 5은 끝점의 편이를 나타낸다. 자기 동조 제어기에 의한 손끝의 편향은 약 0.6Cmm 이하

이며, 동적 보상기를 갖는 자기 동조 제어기의 손끝의 편이는 약 0.6Cmm 이하로써, 큰 토크를 갖는 자기 동조 제어기에 의한 편향이 동적 보상기를 갖는 자기 동조 제어기보다 더 크을 일 수 있다.

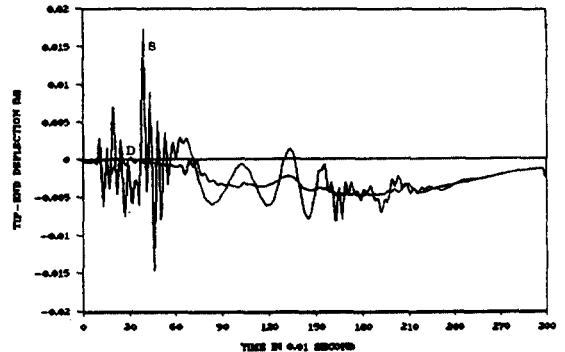


그림 5. 끝점의 전체 편이(대각선, 1kg)  
The total bending of End-Point

그림 6은: 거리오차이고, 그림 7, 8은 위치 x의 추종 오차이다. 파라메타 추정시 부정확한 초기차로 인해 자기 동조 제어기는 0.5초에서 19.2Cm, 동적 보상기를 갖는 자기 동조 제어기는 0.4초에서 1.3cm의 추종 오차가 크게 발생하였으나, 자기 동조 제어기는 약 1초 이후 부터 약 0.5Cm 이하의 추종 오차를 갖고, 동적 보상기를 갖는 자기 동조 제어기는 약 0.7초 이후 부터 약 0.5cm 이하의 추종 오차를 보인다.

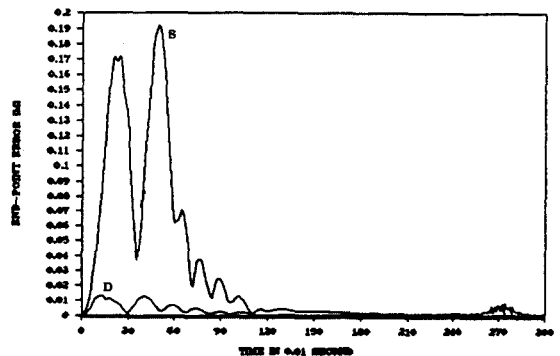


그림 6. 끝점의 거리 오차(대각선, 1kg)  
The distance errors of End-Point

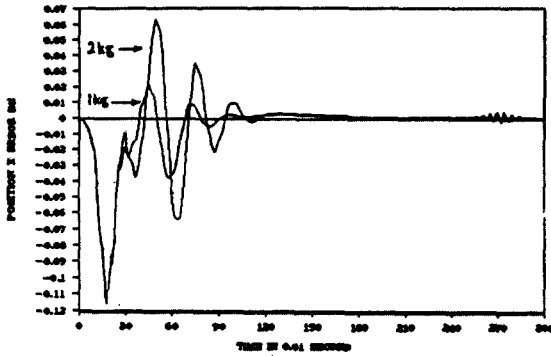


그림 7. 위치 X의 추종오차 (대각선, S)  
Tracking errors of position X

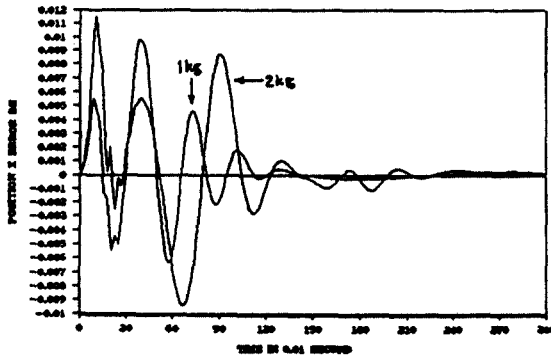


그림 8. 위치 X의 추종오차(대각선, D)  
Tracking errors of position X

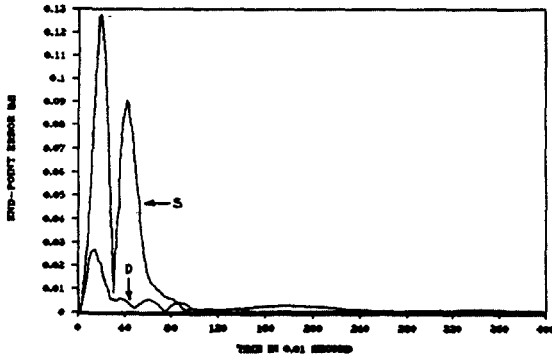


그림 9. 끝점의 거리 오차(대각선, 2kg)  
The distance errors of End-Point

그림 9는 부하 2kg에 끝점의 거리 오차를 나타낸다. 자기 동조 제어기는 약 1초에 약 0.53cm 이하의 추종 오차를 나타내고, 동적 전향 보상기를 갖는 자기 동조 제어기는 약 0.7초에서 약 0.5cm 이하의 추종 오차를 보인다.

이와같이 동적 보상기를 갖는 자기 동조 제어가 자기 동조 제어기보다 부하 변화와 빠른 속도에 잘 적응됨을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 링크가 가볍고 유연한 로봇트 매니플레이터에 대해 손의 끝점을 측정하여 기준 궤적을 추종하도록 자기 동조 제어기를 제안하였다.

제안된 제어기는 조인트 간의 결합으로 인한 추종 오차와 비선형성을 보상하기 위하여, 기준 궤적으로 부터 역 기구학 모델과 역동역학 모델을 이용하여 공칭 토크를 가하는 동적 전향 보상기와 직교 좌표계에서 주어진 공칭 궤적과 공칭 토크에 대한 섭동 이산 모델을 바탕으로 링크의 휨 및 부하 외란 등에 의한 편차를 제거할 수 있는 자기 동조 궤환 제어기로 구성된 동적 전향 보상기를 갖는 제어기를 설계하였다.

## 참 고 문 헌

1. S. Dubowsky and T. DesForges, "The Application of Model Reference Adaptive Control to Robotic Manipulators", Trans. of the ASME J. of Dyn. Sys. Meas., and Control, Vol.101, pp.193-200, 1979.
2. A.J. Koivo and T.H. Guo, "Adaptive Linear Controller for Robot Manipulators", IEEE Trans. on Auto. Contr., AC-28, No. 2, pp.162-171, 1983.
3. C.S.G. Lee and M.J. Chung, "An Adaptive Control Strategy for mechanical Manipulators", Tutorial on Robots, 1983.
4. Kelly, F., 1982, "On the Dynamics Flexible Multibody Systems", PH.D. Thesis, Department of engineering Science, University of Cincinnati, OH.

5. W.J. Book, "Model Design and Control of Flexible Manipulator Arms", Ph.D Dissertation, School of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, April, 1974.
6. W.J. Book, O. Maizza-Neto, D.E. Whitney, "Feedback Control of Two Beams, Two Joints Systems with Distributed Flexibility", Trans. of the ASME J. of Dyn. Sys., Meas., and Control, Vol. 97, No. 4, pp.4 21-431, December 1975.
7. Schmitz, E., 1985, "Experiments on the End-Point Position Control of a very Flexible One-Link Manipulator", PH.D Thesis, Stanford University, Guidance and Control Laboratory, Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford, California.
8. R.P. Paul, "Robot Manipulators : Mathematics, Programming and Control, Cambridge, Mass., MIT Press, 1981.
9. P.S. Tuffs and et al, "Self-tuning control of offset : a unified approach", Proc. IEE, Vol.132, Pt.D., No. 3, pp.100-110, May 1985.
10. P.Eykhoff, System Identification : Parameter and State Estimation, New York : Wiley-Interscience, 1974.
11. 남호법, 박종국, "유연성 매니플레이터의 최적 제어를 위한 Stochastic 관측기의 설계" 전기학회 논문지, 제38권, 제9호, 1989.
12. 김승록, 박종국, "유연한 로봇 매니플레이터에 PID 자기 동조 적용 제어", 전자공학회논문집, 제27권, 제8호, 1990.



**金勝錄 (Seung Rok KIM)** 正會員  
 1950年 5月 17日生  
 1972年 2月 : 광운대학교 응용전자공학과 (工學士)  
 1977年 8月 : 延世大學校 産業大學院 電子전공 (工學碩士)  
 1986年 9月 ~ 現在 : 경희대학교 전자공학과 박사과정  
 1979年 3月 ~ 現在 : 안양전문대학 전자과 부교수  
 主關心分野는 로보틱스 등임



**朴鍾國 (Jong Kuk PARK)** 正會員  
 1945年 2月 7日生  
 1971年 2月 : 서울大學校 물리학 (이학사)  
 1975年 2月 : 延世大學校 電子工學科 (工學碩士)  
 1979年 8月 : 延世大學院 電氣工學科 (工學博士)  
 1978年 3月 1980年 2月 : 동양工業專門大學 電子科 副教授  
 1987年 9月 ~ 1988年 8月 : 미국 오레곤 주립대 電氣工學科 교환교수  
 1980年 3月 ~ 現在 : 경희대학교 電子工學科 教授.  
 主關心分野는 로보틱스 및 工場自動化 등임.