

PID 적응 제어를 이용한 컴플라이언스 로봇에 대한 연구

(A Study on Compliance Robot Using a PID Adaptive Controller)

金承禹*, 姜文植**, 高在源***, 朴玟用**, 李相培**

(Seung Woo Kim, Moon Sik Kang, Jae Won Koh,
Mignon Park, and Sang Bae Lee)

要 約

본 논문에서는 PID 적응 제어를 이용한 컴플라이언스 로봇 제어 알고리즘을 제안한다.

조립작업, 표면가공 등과 같이 환경과 접촉해야 하는 작업을 수행할 때 컴플라이언스 로봇이 적
합하며, 제어방식으로는 하이브리드 로봇 제어 방식을 사용한다. 하이브리드 제어방식은 힘과 위치
를 함께 제어하는 방식으로 두개의 독립적인 폐환 루프를 형성한다.

환경과의 접촉으로 인하여 컴플라이언스 로봇은 역학의 선형적인 모델링이 더욱 어려워진다. 이
어려움을 극복하기 위해 로봇 역학에 독립적인 PID 적응 제어를 컴플라이언스 로봇에 적용했
다. 2축 로봇의 평면 가공 작업의 시뮬레이션을 통하여 제안된 컴플라이언스 제어 알고리즘을 분석,
확인했다.

Abstract

In this paper, a compliance robot control algorithm using a PID adaptive controller is proposed. The compliance robot is suitable for the tasks in contact with environment, such as assembly operation or surface processing. A hybrid robot control method can control force and position simultaneously and two independent feedback closed loops are formed in this method. Because the compliance robot is operated in contact with environment, it is very difficult to obtain linear model of dynamics for this robot. In order to overcome this difficulty, a PID adaptive controller independent of robot dynamics is applied to the compliance robot.

The proposed control algorithm for the compliance robot was analyzed and conformed by simulating the surface processing task by a two-joint robot.

*正會員, 三星綜合技術院
(Samsung Advanced Institute of Technology)

**正會員, 延世大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Yonsei Univ.)

***正會員, 三星電子 生産技術研究所
(Samsung Electronics Production Engineering
Center)

接受日字: 1989年 7月 31日

I. 서 론

현대 산업의 발전과 더불어 최근에는 공장 자동화
와 같은 여러가지 면에서 인간이 할 수 있는 작업의
대용으로 상당한 부분에 이르기까지 산업 로봇이
사용되고 있다. 특히 반복적인 작업과 작업환경의
개선에 있어서 산업로봇의 역할이 더욱 중요한 비
중을 차지하고 있다. 이러한 여러가지 측면에서 로

보트 매니퓰레이터 (manipulator)의 원하는 궤적과 성능을 얻기 위해 많은 모델과 법칙이 제안되어 왔다.

로봇 제어에 있어서 가장 큰 오차의 원인은 로트 역학의 비선형에 있으며 그것은 또한 극복할 수 없는 한계를 가지고 있다. 특히 로봇트가 외부환경으로 부터 일정치 않은 힘을 받게되는 조립작업, 표면가공 등과 같은 정밀 작업에서 로봇트 역학의 모델링은 더욱 큰 오차를 발생하게 된다.^[9]

이와같은 이유로 본 논문에서는 외부로 부터 받은 힘을 일정한 크기로 유지하려는 즉, 컴플라이언트 운동 (compliant motion)을 수행하는 로봇트 제어방식과 외부환경으로 부터의 힘으로 인해 더욱더 어려워진 로봇트 역학의 모델링을 극복하는 방법으로서 로봇트 역학과 무관한 적응 제어를 적용하는 알고리즘을 개발한다.

컴플라이언스 로봇트 (compliance robot) 제어 방식으로는 하이브리드 제어방식을 사용한다. 하이브리드 제어방식은 메이슨과 크레이그 등에 의해서 80년대에 들어와서 제안된 로봇트 제어 방식으로써 위치제어와 힘 제어를 동시에 수행하는 제어 방식이다.^[11] 이러한 로봇트 제어방식에는 하나의 폐환 폐루프를 통해서 힘 제어와 위치 제어를 선택적으로 수행하는 방법과 두개의 독립 폐환 폐루프를 각각 힘, 위치제어에 할당해서 제어하는 방식이 있다.

이 논문에서는 적응 제어기의 적용에 편리한 두번째 제어방식을 사용한다. 적응제어 방식은 온라인 (on-line) 파라미터 추정 방식에 의해 플랜트 모델을 결정하는 LMAC (Learning Model Adaptive Control)와 임의의 제안 조건에 따라서 미리 선택된 모델에 의해서 제어기가 조정되어지는 MRAC (Model Referenced Adaptive Control)로 나눌 수 있으며 이 논문에서는 LMAC방식을 사용한다.

끝으로 PID로 설계된 적응 제어기와 컴플라이언스 로봇트 제어 방식인 하이브리드 제어방식과의 결합 알고리즘을 제시하며, 2축 로봇트의 평면 가공작업을 설정해서 시뮬레이션을 통해 제시된 알고리즘을 분석하고 타당성을 확인한다.

II. PID 적응 제어 알고리즘

산업용 로봇트를 구동하는데 사용되는 제어방식은 대부분 디지털 또는 아날로그 PID 제어방식이다. 제어기 파라미터가 적절하게 구성되고, 로봇트의 각 조인트들이 디커플링 (decoupling) 하다고 가정하면, 로봇트에 있어서 PID 제어방식은 만족할만한 성능을 얻을 수 있기 때문이다. 그러나 고정 파라미터를 갖는

PID 제어기로는 충분치 않을 경우가 많다. 이 경우를 위해서 PID 구조를 갖는 적응 제어기를 사용해야 한다.

$$U(S) = K \left[1 + \frac{1}{T_i S} + \frac{T_d S}{1 + T_d S/N} \right] E(S) \tag{1}$$

여기서 K는 이득값이고, T_i와 T_d는 적분 및 미분 시간상수이고, N은 양의 상수이다. 이 고전적인 PID 제어기에 일치하는 미분방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{N}{T_d} \frac{du}{dt} = K(N+1) \frac{d^2 e}{dt^2} + \frac{K}{T_i T_d} (N T_i + T_d) \frac{de}{dt} + \frac{K N e}{T_i T_d} \tag{2}$$

오일러 미분 근사식을 사용해서 다음과 같은 차등방정식을 얻는다.

$$u(t) + (r-1)u(t-1) - r u(t-2) = r_0 e(t) + r_1 e(t-1) + r_2 e(t-2) \tag{3}$$

여기서 u(t), u(t-1), ...은 제어 신호이고, e(t), e(t-1), ...은 오차값이며 제어 파라미터 r, r₀, r₁, r₂는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} r &= N T_i / T_d - 1 \\ r_0 &= K(\epsilon(r+1) + N + 1) \\ r_1 &= K(\epsilon + r - 2N - 1) \\ r_2 &= r_1 + K(N + 1) \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 $\epsilon = T/T_i$ (T: 표본화 주기)이다. 식(3)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S(q^{-1})U(t) = R(q^{-1})e(t) \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } S(q^{-1}) &= (1 - q^{-1})(1 + r q^{-1}) \\ R(q^{-1}) &= r_0 + r_1 q^{-1} + r_2 q^{-2} \\ e(t) &= q^0(t) - q(t) \end{aligned}$$

이때 e(t)는 추적오차 (tracking error)를 나타내며 q⁻¹는 백워드 쉬프트 오퍼레이터 (backward shift operator)로 PID/ST 제어기에 의해 제어되는 플랜트가 로봇트 시스템이라면 다음과 같은 선형 시변 모델로 나타난다.

$$A(q^{-1})Y(t) = B(q^{-1})u(t-1) + e(t) \tag{6}$$

여기서

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} \\ B(q^{-1}) &= b_0 + b_1 q^{-1} \end{aligned}$$

a₁와 b₁는 미지의 스칼라 상수들이며, 로봇트 시스템의 2차 모델링은 대부분의 로봇트 시스템에 적합하다. 최소 자승 알고리즘에 의해서 구해지는 추정 실 다항식을 $\hat{A}(q^{-1})$ 와 $\hat{B}(q^{-1})$ 로 표시하고 그것에 일

치하는 PID/ST 제어기의 다항식을 $S(q)$ 과 $R(q)$ 로 표현한다면, 추정다항식 $\hat{A}(q^{-1})$ 과 $\hat{B}(q^{-1})$ 로부터 $\hat{S}(q^{-1})$ 과 $\hat{R}(q^{-1})$ 을 계산한다.

PID/ST 제어기 $u(t) = [\hat{R}(q^{-1})/S(q^{-1})]e(t)$ 와 예측 플랜트 모델 $Y(t) = [\hat{B}(q^{-1})/\hat{A}(q^{-1})u(t)]$ 로 구성되는 전체 시스템의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{Y(t)}{Y^0(t)} = \frac{\hat{R}(q^{-1})\hat{B}(q^{-1})}{\hat{S}(q^{-1})\hat{A}(q^{-1}) + \hat{R}(q^{-1})\hat{B}(q^{-1})} \quad (7)$$

여기서 $\hat{S}(q^{-1})$ 과 $\hat{R}(q^{-1})$ 을 계산하기 위하여 극점 배치 방법을 적용한다. 식(6)의 특성 다항식과 원하는 다항식 $C_R(q^{-1})$ 로부터 다음을 얻는다.

$$\hat{S}(q^{-1})\hat{A}(q^{-1}) + q^{-1}\hat{B}(q^{-1})\hat{R}(q^{-1}) = C_R(q^{-1}) \quad (8)$$

여기서

$$C_R(q^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{no} C_{Ri}q^{-i}, \quad n \leq 4$$

식(8)의 항등 다항식으로부터 제어기의 파라미터들인 4개의 미지수를 가진 4개의 선형대수 방정식을 이끌어 낼 수 있으며, 페루프에서 위치되어지는 극점의 수는 n 으로 정의된다.

원하는 다항식 $C(q^{-1})$ 의 적절한 선택은 다음과 같이 한다.

$$C_R(q^{-1}) = 1 - 2e^{-\rho} \cos \theta q^{-1} + e^{-2\rho} q^{-2} \\ \theta = w_n T \sqrt{1 - \epsilon^2} \quad \text{이고} \quad \rho = \theta \epsilon / \sqrt{1 - \epsilon^2} \quad (9)$$

여기서 w_n 과 ϵ 은 일치하는 연속 2 차 특성 다항식의 감쇄 고유주파수와 감쇄비이다.

III. PID 적응 제어를 이용한 컴플라이언스 로봇

컴플라이언스 로봇은 외부로부터 받는 환경의 힘에 능동적으로 대처하는 로봇이다. 로봇 역학(dynamics)은 비선형성을 가지고 있어 그것의 선형 모델링은 어렵다. 게다가 외부로부터 받는 힘으로 인하여 선형 모델링은 더욱 어려워진다.^[9] 이러한 이유로 로봇의 역학적 특성에 무관한 PID 적응 제어를 이용한 컴플라이언스 로봇 제어 알고리즘을 개발한다. 여기서 로봇 역학 방정식의 비선형항을 무시하는 선형화 기법을 사용하여 적응시켰으며, 알고리즘의 구성도(그림1)는 다음과 같다.

로봇 시스템으로 들어가는 제어 신호와 위치 센서와 힘 센서로부터 $\Phi = [Y_1, Y_1, u_1, u_1]$ 를 데이터로

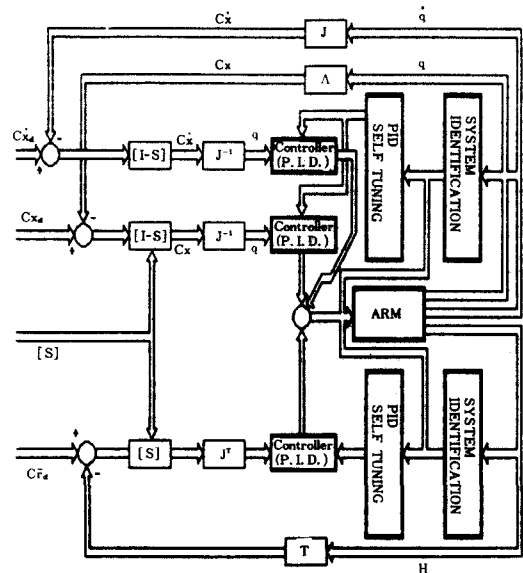


그림 1. PID 적응 제어를 이용한 컴플라이언스 로봇 제어 알고리즘의 구성도

Fig. 1. Block diagram of Compliance Robot control algorithm using a PID a daptive controller.

하여 로봇 시스템의 특성파라미터인 $\hat{\theta} = [a_1, a_1, b_1, b_1]$ 를 추정한다. 추정값 $\hat{\theta}$ 와 원하는(desired) 페루프 특성 방정식을 이용해서 PID로 구성되는 제어기의 파라미터가 결정되어 제어기가 구성된다.

로봇의 각 조인트에 부착되어 있는 위치 센서와 힘 센서로부터 얻어지는 $q(t)$ 와 $F(t)$ 는 좌표 변환을 거쳐 다음과 같은 오차 신호를 만들어낸다.

$$\Delta X(t) = {}^c X_d(t) - \Lambda(q(t)) \quad (10)$$

$$\Delta X(t) = {}^c X_d(t) - [J] \dot{q}(t) \quad (11)$$

$$\Delta F(t) = {}^c F_d(t) - [{}^c T] F(t) \quad (12)$$

여기서 Λ 는 위치에 대한 좌표 변환 함수이며, J 는 야코비안이고 ${}^c T$ 는 힘에 대한 좌표변환 함수이다. 이렇게 만들어진 오차 신호는 컴플라이언스 행렬에 의하여 위치제어 좌표 공간과 힘 제어 좌표 공간으로 할당된다.

$${}^c X_e(t) = [[I] - [S]] \cdot \Delta X(t) \quad (13)$$

$${}^c X_e(t) = [[I] - [S]] \cdot \Delta X(t) \quad (14)$$

$${}^c F_e(t) = [S] \cdot \Delta F(t) \quad (15)$$

여기서 $[S]$ 는 컴플라이언스 선택 행렬이고 $[I]$ 는

단위 행렬이다. $X_e(t)$ 와 $F_e(t)$ 는 다시 각각의 조인트로 다음과 같이 역변환 한다.

$$\begin{aligned} q_e(t) &= [J]^{-1} \cdot {}^c X_e(t) \\ \tau_e(t) &= [J]^T \cdot {}^c F_e(t) \end{aligned} \quad (16)$$

이 신호가 제어기의 입력이 된다. 이미 PID 적응 제어 알고리즘을 이용하여 구성되어 있는 제어기를 통해서 다음과 같은 제어 신호를 결정짓는다.

$$\begin{aligned} u_1(t) &= -(r-1)u_1(t-1) + r u_1(t-2) + r_0 q_{e1}(t) \\ &\quad + r_1 q_{e1}(t-1) + r_2 q_{e1}(t-2) \\ u_2(t) &= -(r'-1)u_2(t-1) + r' u_2(t-2) + r_0' q_{e2}(t) \\ &\quad + r_1' q_{e2}(t-1) + r_2' q_{e2}(t-2) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 $u_1(t)$ 는 위치 제어 신호이고 $u_2(t)$ 는 힘 제어 신호이다. 이 두 제어신호 $u_1(t), u_2(t)$ 의 합이 로봇의 디커플(decouple)된 각 조인트를 제어한다.

IV. 시뮬레이션 및 결과 고찰

시뮬레이션을 위해 설정한 평면 가공 타스크는 그림(2)와 같다.

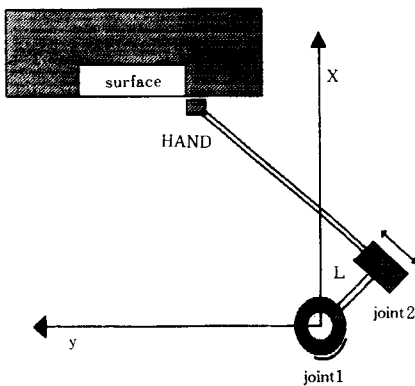


그림 2. 평면 가공 타스크
Fig. 2. Surface processing task

여기서 조인트1은 로터리(rotary)조인트이고, 조인트2는 프리즈메틱(prismatic)조인트이다. 두 조인트는 디커플(decouple)된 것으로 가정한다.

위의 타스크에서 구한 위치 변환 행렬(A)미소 변환행렬(J), 힘 변환 행렬(T)은 다음과 같다.

$$A(q) = \begin{bmatrix} q_2 \cos(q_1) + L \sin(q_1) \\ q_2 \sin(q_1) - L \cos(q_1) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$[J] = \begin{bmatrix} L \cos(q_1) - q_2 \sin(q_1) & \cos(q_1) \\ q_2 \cos(q_1) + L \sin(q_1) & \sin(q_1) \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$[{}^H T] = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\sin(q_1) \\ \sin(q_1) & \cos(q_1) \end{bmatrix} \quad (20)$$

여기서 L은 0.153m이다.

컴플라이언스 선택 벡터 $s = [1 \ 0]^T$ 로서 y 축에 위치 제어, x 축에 힘 제어를 할당했다. PID 적응 제어기에 사용한 원하는 특성다항식과 초기값은 다음과 같다.

- 감쇄비 $\xi = 0.7$
- 감쇄 고유 주파수 = 5
- $Cr(q^{-1}) = 1 + 0.75q^{-1} + 0.24q^{-2}$
- 공분산 행렬 $P[0] = \text{Diag}[10]$
- 망각 인자 $\lambda = 0.985$

제안된 알고리즘을 그림(2)의 타스크에 적용한 결과를 그림(3)에서 그림(4)까지 보여준다.

그림(3)은 한 step에서 2차의 시스템 파라미터 추정값을 구하며 그 중 힘 제어 폐환 페루프의 경우만을 보여주고 있으며 30 step이내의 빠른 추정 속도로 수렴한다. 힘 제어에서는 각 조인트의 엔코더의 출력과 제어신호를 통해서 위치 제어에서는 각 조인트의 엔코더의 출력과 제어 신호를 이용해서 로봇 시스템의 파라미터를 추정한다.

그림(4)와 그림(5)는 그림(3)의 추정값을 이용해서 구한 PID 제어기의 힘 제어와 위치 제어에 대한 각각의 파라미터들을 보여주고 있으며 시스템 파라미터 추정값의 적응 속도에 비례함을 알 수 있다. 감쇄

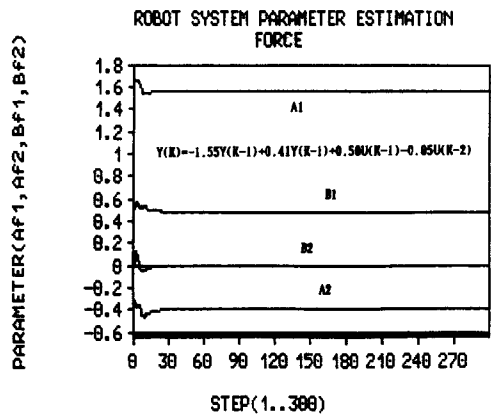


그림 3. 로봇시스템인식(힘제어)
Fig. 3. Robot system identification(force control).

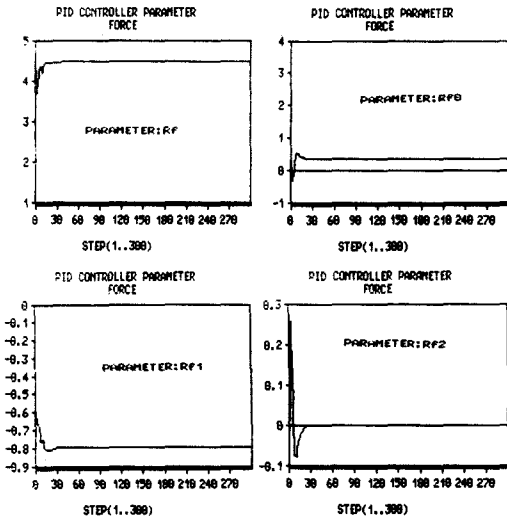


그림 4. PID 제어기(힘 제어)
 Fig. 4. PID controller(force control).

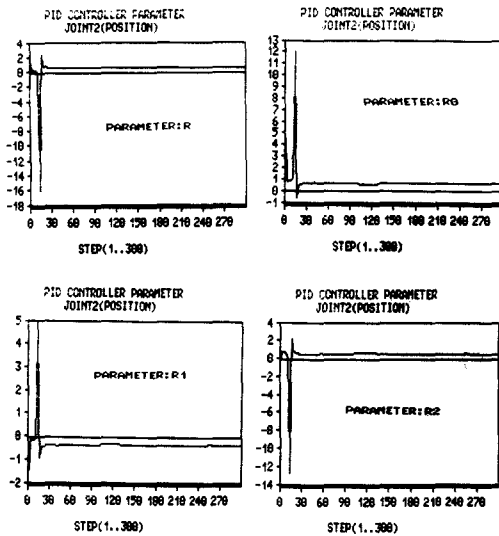


그림 5. PID 제어기(위치제어)
 Fig. 5. PID controller(position control).

비는 0.7로 사용했으며 이는 안정도와 적응속도가 타협한 값이다. 표본화 시간을 작은값으로 선택하면 짧은 안정시간을 나타내므로 제어시간을 고려해서 작은 표본화 시간을 택했다.

힘 센서로써 조인트토크 서어보, 혹은 손목 서어보

의 사용여부에 따라 디커플 시스템에서는 적응제어기의 수가 틀리지만 본 논문에서는 손목 서어보를 선택했다.

출력 궤적으로 원하는 값을 다음과 같이 주었다.

$$\text{힘} : F_d = 4 - 2U(t-50)Nt$$

$$\text{위치} : Y_d = 12 - 12\text{Sin}(0.07 \times 0.12 \times t) \text{cm}$$

출력 궤적의 의미는 y 축에 평행한 홈을 위의 속도로 x 축 방향으로 50 스텝 마다 홈의 깊이를 변환시키는 작업이다. 이 작업의 특수성으로 해서 로봇트 손은 x 축 방향으로 외부 환경으로부터 힘을 받으며 그 힘을 특정크기로 유지하려는 방향으로 위치를 조절하는, 즉 하이브리드 제어 방식의 결과를 그림 (5) 와 그림(6)에서 잘 보여준다.

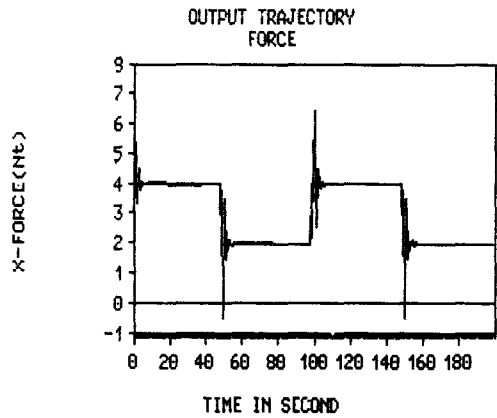


그림 6. 출력 궤적(힘)
 Fig. 6. Output trajectory(force).

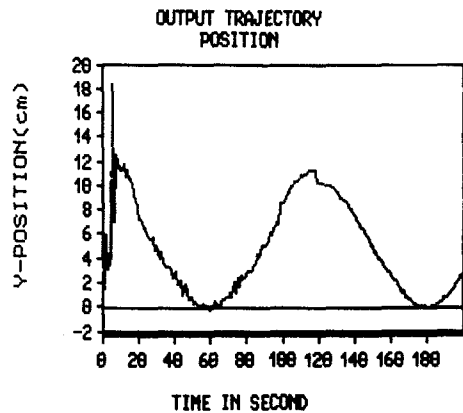


그림 7. 출력 궤적(위치)
 Fig. 7. Output trajectory(position).

V. 결 론

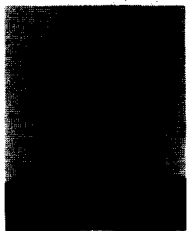
시뮬레이션의 결과 및 고찰에서 살펴 보았듯이 컴플라이언스 선택벡터가 TASK의 x축과 y축을 힘과 위치제어로 각각 할당해 주며 x축 방향으로 외부 환경으로부터 받는 힘으로 해서 더욱 더 어려워진 로봇 역학의 모델링을 극복하기 위해 제안된 PID 적응 제어 알고리즘 적용의 타당성을 확인함으로써 로봇의 동적 방정식에 대한 사전 정보의 필요 없이 로봇 시스템의 식별을 통하여 필요한 정보를 추정하여 컴플라이언스 로봇의 정밀제어가 가능해진다. 그러나 현재 프로세서의 속도로는 실시간 적용은 어려움이 있으며 결과 데이터의 배치(Batch) 처리로서 실현이 가능하다.

參 考 文 獻

[1] M.H. Raibert, "Hybrid position/force control of manipulators," *Journal of Dynamic Systems, M.C.* 1981.
 [2] J. De Schutter, "Compliant robot motion

II," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 7, no. 4, August 1988.
 [3] M. Vukobratovic, *Scientific fundamentals of Robotics*, Springer Verlag, Newyork, 1985.
 [4] Karl J. Astrom, *Computer Controlled Systems*, Prentice-Hall, 1984.
 [5] Richard P. Paul, "Robot manipulators," *The MIT Press, Massachusetts*, 1982.
 [6] 채창현, "감시 기능을 갖는 적응 PID 제어기의 설계," 연세대학원 전기공학과, 1988.
 [7] A.J. Koivo and T.H. Guo, "Adaptive linear controller for robot manipulators," *IEEE Trans. on Auto, Contr.*, AC-28, 2, pp. 162-171, 1983.
 [8] C.S.G. Lee and M.J. Chung, "An adaptive control strategy for computer-based manipulator," *Proceeding of the 21st Conference of Decision and Control*, pp. 95-100, 1982.
 [9] G.G. Leininger, "Adaptive control of manipulators using self-tuning methods," *Robotics Research, MIT Press*, 1984.

著 者 紹 介



金 承 禹 (正會員)

1961年 10月 15日生. 1987年 2月 연세대학교 전자공학과 졸업 (공학사). 1989年 8月 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사). 1989年 8月~현재 삼성 종합기술원 연구원. 주관심분야는 Robot

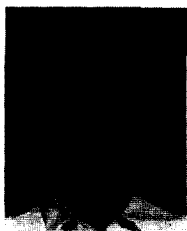
control, 적응 제어이론, AC서보모터제어 등임.



高 在 源 (正會員)

1957年 2月 21日生. 1981年 2月 연세대학교 전기공학과 졸업 (공학사). 1983年 2月 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사). 1983年 3月~1985年 12月 연세대 경기공업개발대, 인하공업전문대

강사. 1986年 4月~현재 삼성전자 생산기술 연구소 FA개발부 선임연구원. 1983年 8月~현재 연세대학교 대학원 전기공학과 박사과정. 주관심분야는 Robotic Adaptive Control, Computer Vision 등임.



姜 文 植 (正會員)

1961年 1月 13日生. 1985年 2月 연세대학교 전자공학과 졸업 (공학사). 1984年 12月~1986年 2月 삼성전자 종합연구소 연구원. 1988年 2月 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사). 1989年

3月~현재 연세대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중. 주관심분야는 Computer Network, MAP (Manufacturing Automation Protocol)을 이용한 자동화 시스템 등임.

朴 玟 用 (正會員)

第24卷 第5號 參照

현재 연세대학교 전자공학과 부교수

李 相 培 (正會員)

第24卷 第5號 參照

현재 연세대학교 전자공학과 교수