

論 文

작업공간에서 로봇트 매니플레이터의 적응 제어

正會員 鄭 用 澈* 正會員 任 達 鎬**

Adaptive Control of a Robot Manipulator in Operational Space

Yong Cheol CHUNG*, Dal Ho IM** *Regular Members*

要 約 현재까지의 로봇트 매니플레이터의 토오크 및 위치 제어는 링크의 질량이나 물체의 무게를 아는 경우에 행하는 것으로 국한 되어져 왔다. 본 논문에서는 로봇트 매니플레이터의 링크의 질량이나 물체의 무게를 모르는 경우 토오크 및 위치 제어 방법을 제안하고자 하며 이 방법은 관절 공간에서 제어를 작업 공간에서 제어에까지 확대시킨 것이다. 본 방법에서 미지변수 추정을 위하여 기지변수를 이용하였다. 본 연구의 타당성을 보이기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 하였으며 결과의 분석 검토를 통하여 본 연구가 유용성이 있음을 보였다.

ABSTRACT Up to now, hybrid torque/position control of a robot manipulator have been researched under the assumption that link mass and/or load are known. This paper proposes a torque and position control method under unknown mass of links or load of a robot manipulator and the method extend control in joint space to control in operational space. In the method, known parameters are used to estimate unknown parameter. We illustrate the theory with some simulations and show that the result is effective.

I. 서 론

고급 제품의 제조를 위한 산업용 로봇트는 고정밀도 및 고신뢰성을 보유해야 하는데 이러한 로봇트를 제조하기 위해서는 많은 문제를 해결하여야 한다.

이중 한가지 중요한 것은 물체무게의 변화나 예기치 못한 왜란 등의 환경 변화에도 로봇트가 성공적인 작업을 수행하기 위해서 변화된 환경에 자동적으로 적응토록 하는 것이다.

아직까지 적응제어 이론은 실제 적용에 있어서 성숙 단계에 있지 못하며 또한 로봇트의 동적 특성이 비선형 임에도 불구하고 현재까지 로봇트 분야의 적응제어 연구는 주로 선형 시스템에 집중되어 왔다.

Dubowsky¹⁾는 처음으로 매니플레이터를 제어하기 위하여 MRAC(model reference adaptive control) 방법을 제안하였으며 이는 매니플

* 漢陽大學校 電氣工學科
Dep. of Electric, Hanyang Univ.

** 漢陽大學校 電氣工學科
Dep. of Electric, Hanyang Univ.
論文番號 : 88-34 (接受 1988. 6. 25)

레이터가 느린 속도로 운동하는 선형 디커플링 모델에 대해 행한 것이었다.

Koivo⁽²⁾는 Self tuning 방식을 이용하여 토오크 및 위치 제어를 가능케 하는 적응제어기를 제안하였으며 Salisbury⁽³⁾와 유사한 방법으로 원하는 힘을 외부에서 가하여 변수 예측치를 제어기에 공급하여 오차를 수렴시키는 구조로 하였다.

종래의 토오크 및 위치제어 방식을 살펴보면 Raibert⁽⁴⁾는 직교좌표 공간 상에서 토오크 및 위치 제어를 함께 할 수 있도록 하는 하이브리드제어를 제안하였으며 이는 토오크 제어부와 위치 제어부 사이에 선택부를 두어 제어기를 구성한 것으로 외부에서 원하는 힘을 공급하여 내부 루우프에서 오차가 수렴되도록 하였다.

Paul⁽⁵⁾은 물체의 무게를 알고 있는 경우에 내부 루우프에서 힘의 오차를 보상할 수 있는 힘 제어 방법을 제안하였다.

Arimoto⁽⁶⁾은 같은 동작을 되풀이 하는 로봇트에 있어서 로봇트의 반복 동작시 동일 위치에서 전 값과 비교하여 오차를 보상하는 구조의 학습제어 방식을 기반으로한 하이브리드 힘 및 위치제어 방식을 제안하였다.

Khatib⁽⁷⁾는 여유도를 갖는 매니플레이터에 있어서 토오크 제어부 및 위치 제어부 사이에 선택부를 두어 Raibert 방법⁽⁴⁾과 유사한 방법으로 외부에서 원하는 힘 및 위치를 공급함으로써 토오크 및 위치를 제어하는 방법을 제시하였다.

이상의 종래 제어 방식에서 보면 Dubowsky^{(1), (2)} 등이 제안한 적응제어 방식은 모델을 선형 시스템에 한정시켰으며 Raibert^{(3), (4), (5), (7)} 등이 제안한 제어 방식에선 이미 알고 있는 링크의 질량이나 물체의 무게를 이용하거나 알고 있는 질량에 적합한 원하는 힘을 외부에서 공급하여 토오크를 제어하는 구조로 되어 있어 이러한 제어 방식에 있어서 힘 제어는 링크의 질량이나 물체의 무게를 아는 범위에 국한되어 있다는 문제가 있었다.

본 논문에서는 링크의 질량이나 물체의 무게를 모르는 상태에서 링크의 질량 혹은 물체의 무게를 추정하여 제어함으로써 미지의 질량이나 무게를 갖는 로봇트 매니플레이터의 토오크 및 위치 제어 방법을 제안하고자 하며 특히 관절 공간에

서의 제어를 직교좌표 공간에 까지 확대시킨 것으로 실제 작업 공간에서 로봇트 매니플레이터에 적용이 가능한 이론을 제안한 것이며 비선형 모델을 대상으로 하였다.

이 방법은 외부에서 원하는 힘을 가하지 않고 다만 원하는 위치만을 공급하는 상태에서 링크나 물체 질량에 상응한 원하는 힘을 추정 변수치에 실제 가속도를 곱하는 방법으로 자동 생성시켜 내부 루우프에서 실제 힘이 원하는 힘에 수렴되도록 한 구조이며 공급토오크에 원심력, coriolis 힘 및 중력까지 고려하여 작업 공간 상에서 매니플레이터 핸드의 오차를 개선시킨 것으로 이는 Paul의 Force 제어방식⁽⁵⁾ 및 Acceration 제어방식⁽⁷⁾의 각각의 장점을 취한 것이고 Acceration 제어방식은 관절 공간인 반면 본 제어방식은 작업 공간상에서 행한 것으로 적용 범위를 확장시킨 것이며 Force 제어 방식보다는 오차 특성을 개선시킨 것이다.

이상에서 기술한 바와 같이 본 제어 방식의 토오크 제어 scheme은 Paul의 Force 제어⁽⁵⁾ 및 Acceration 제어 방식⁽⁷⁾을 이용한 것이며 질량 행렬의 미지변수 추정을 하기 위해서 알고있는 변수 및 서어브 오차를 이용하였다.

본 제안방법은 Salisbury^{(3), (4), (7)} 등의 제어 방법으로는 불가능 했던 링크나 물체 질량을 모르는 경우의 토오크 및 위치 제어를 가능케 하며 매니플레이터의 질량이 상이하거나 특히 물체의 무게가 변하는 경우에 효율적인 토오크 및 위치 제어 방법을 제공한다.

예로써, 작업장에서 로봇트가 무게가 다른 물체를 이동시키기 위해 들고 놓는 작업을 하는 경우, 그때마다 물체 무게에 상응하는 원하는 힘을 자동 생성시켜 실제 힘을 이에 수렴시킴으로써 물체의 무게가 변하는 작업을 하는 로봇트에 효율적인 적응 토오크 및 위치제어 방법을 제공하는 것이다. 이에 타당성을 보이기 위하여 여러 가지 경우의 질량추정, 힘오차 및 위치 오차에 대한 실시예를 설명하였다.

II. 작업 공간에서 적응 제어

II - 1. 매니플레이터 핸드의 동적 방정식

관절 공간에서 n개의 링크가 있는 로봇 매니플레이터 핸드의 동적 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$A(q)\ddot{q} + F(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (1)$$

여기서 A(q), F(q, \dot{q}), G(q) 및 \tau는 각각 n \times n 차원의 질량행렬, n \times 1 차원의 원심력과 coriolis 힘, n \times 1 차원의 중력 및 n \times 1 차원의 관절토크이고 q는 n \times 1 차원의 관절의 위치를 나타낸다.

매니플레이터의 운동에너지는 다음과 같이 된다.

$$T = \frac{1}{2} \dot{q}^T A(q) \dot{q} = \frac{1}{2} \dot{X}^T \Lambda(X) \dot{X} \quad (2)$$

여기서 X는 작업 공간에서 매니플레이터 핸드의 위치 및 각을 나타내는 요소로 구성된 독립 변수이고 \Lambda(X)은 직교좌표에서 질량 행렬이며 \dot{q} 및 \dot{X}은 각각 관절 및 핸드의 속도를 나타낸다.

작업 공간에서 Lagrange 방정식으로부터 매니플레이터 핸드의 동적 모델을 유도하면

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{X}} \right) - \frac{\partial L}{\partial X} = F \quad (3)$$

가 되고 여기서 Lagrangian L(x, \dot{x})은

$$L(x, \dot{x}) = T(x, \dot{x}) - u(x) \quad (4)$$

로 되며 T(x, \dot{x}) 및 u(x)은 각각 시스템의 운동 에너지 및 중력에 기인된 위치에너지이다.

매니플레이터 핸드에 가해지는 힘 F와 관절토크는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$F = J^{-T}(q) \cdot \tau \quad (5)$$

여기서 J는 n \times n 차원의 Jacobian 행렬이고 작업 공간에서 매니플레이터 핸드의 동적 방정식은 다음과 같다.

$$F = \Lambda(x)\ddot{x} + \mu(x, \dot{x}) + P(x) \quad (6)$$

여기서 F, \Lambda(x), \mu(x, \dot{x}), P(x)은 각각 매니플레이터 핸드에 작용하는 n \times 1 차원의 힘, n \times n 차원의 질량행렬, n \times 1 차원의 원심력 및 coriolis 힘 및 n \times 1 차원의 중력을 나타내고

$$\dot{x} = J \cdot \dot{q} \quad (7)$$

이므로 식(7)과 식(2)의 관계를 이용하여 \Lambda(x), \mu(x, \dot{x}), P(x)와 관절 좌표에서의 A(q), F(q, \dot{q}), G(q)의 관계를 구하면 다음과 같이 된다.

$$\Lambda(x) = J^{-T}(q) \cdot A(q) \cdot J^{-1}(q)$$

$$\mu(x, \dot{x}) = J^{-T}(q) \cdot (F(q, \dot{q}) - A(q) \cdot J^{-1}(q) \cdot J(q) \cdot \dot{q}) \quad (8)$$

$$P(x) = J^{-1}(q) \cdot G(q)$$

II - 2. 작업 공간에서 비선형 궤적 제어

미지변수 추정치가 실제치와 차이가 있을 때 매니플레이터를 제어하기 위한 제어칙은 다음과 같다.

$$F = \hat{\Lambda}(x)\ddot{x}_a + \hat{\mu}(x, \dot{x}) + \hat{P}(x) \quad (9)$$

여기서 \hat{\Lambda}(x), \hat{\mu}(x, \dot{x}), \hat{P}(x)는 각각 \Lambda(x), \mu(x, \dot{x}), P(x)의 추정치이며 \ddot{x}_a은 매니플레이터 핸드의 n \times 1 차원의 실제 가속도이다. 작업공간에서 매니플레이터 핸드의 위치 오차는 다음과 같다.

$$X_e = X_a - X \quad (10)$$

여기서 X_a은 매니플레이터 핸드의 원하는 궤적치이고 X는 실제 궤적치이다.

핸드의 속도 오차 \dot{X}_e은 식(10)을 미분한 형태로 주어지며 이때 실제속도 \dot{X}_a은 식(7)의 관계를 이용하여 구한다. 작업공간 실제가속도 \ddot{X}_a은 다음과 같이 되며 위치 및 속도 오차가 영인 경우

실제가속도 \ddot{X}_a 은 원하는 가속도 \ddot{X}_d 에 수렴하게 된다.

$$\ddot{X}_a = \ddot{X}_d + K_v \dot{X}_e + K_p X_e \quad (11)$$

여기서, $\ddot{X}_d(t) = [\dot{X}_d(t + \Delta t) - \dot{X}_d(t)] / \Delta t$ 이며 K_v 와 K_p 는 속도와 위치 이득으로써 양의 상수이며 미지변수 추정치가 실제치와 동일한 경우 식(10) 및 식(11)로부터 다음 식을 얻는다.

$$\ddot{X}_e + K_v \dot{X}_e + K_p X_e = 0 \quad (12)$$

그러므로 식(12)의 특성근이 음의 실수부를 갖도록 K_v 와 K_p 를 선택하면 X_e 는 X_d 에 수렴하게 된다.

이상과 같은 서어보시스템에서 작업공간 위치 오차를 보정하기 위한 원하는 힘은 식(11)을 식(9)에 대입하여 구하면 다음과 같이 된다.

$$F_d = \hat{\Lambda}(X) (\ddot{X}_d + K_v \dot{X}_e + K_p X_e) + \hat{\mu}(X, \dot{X}) + \hat{P}(X) \quad (13)$$

원심력과 coriolis 힘 및 중력을 고려하지 않는 경우 식(13)은 다음과 같이 된다.

$$F_d = \hat{\Lambda}(X) (\ddot{X}_d + K_v \dot{X}_e + K_p X_e) \quad (14)$$

여기서, $\hat{\Lambda}(X)$ 는 작업 공간의 질량 행렬로써 추정 링크 및 물체의 질량의 함수이므로 실제 링크의 질량이나 물체의 무게에 따라 $\hat{\Lambda}(X)$ 의 크기가 다르게 되며 따라서 링크질량 및 변하는 물체 무게에 대응되는 원하는 힘이 식(13)에 의해 결정되게 된다.

식(11)에 의한 위치 제어 scheme을 보인 것이 그림 2의 PD제어기이며 블록은 $K_v S + K_p$ 를 의미한다.

II - 3. 미지변수 추정을 위한 적응치

이 절에서는 미지 변수 추정에 사용될 적응치를 보이고자 하며 이 식은 로봇트 매니플레이터

핸드의 동적 방정식 중 알고 있는 변수와 서어보 오차를 이용하는 것이다.

추정된 미지변수치와 실제변수치가 일치하지 않는 경우 오차 방정식은 식(6) 및 식(9)로부터 다음과 같이 된다.

$$\ddot{X}_e + K_v \dot{X}_e + K_p X_e = \hat{\Lambda}^{-1}(X) [\Lambda(X) \ddot{X} + \mu(X, \dot{X}) + P(X)] \quad (15)$$

여기서, $\tilde{\Lambda}(X) = \Lambda(X) - \hat{\Lambda}(X)$, $\tilde{\mu}(X, \dot{X}) = \mu(X, \dot{X}) - \hat{\mu}(X, \dot{X})$, $\tilde{P}(X) = P(X) - \hat{P}(X)$ 이다. 미지변수를 추정하기 위하여 식(15)을 다음과 같이 변형한다.

$$\ddot{X}_e + K_v \dot{X}_e + K_p X_e = \hat{\Lambda}^{-1}(X) \cdot R(X, \dot{X}, \ddot{X}) \cdot \tilde{D} \quad (16)$$

여기서, $\hat{\Lambda}(X)$ 은 추정된 변수치를 이용하여 구한 $n \times n$ 차원의 질량 행렬이며 $R(X, \dot{X}, \ddot{X})$ 은 $n \times r$ 차원의 함수 행렬이고 $\tilde{D} = D - \hat{D}$ 이며 미지의 변수가 r 인 경우 $r \times 1$ 차원으로 $D = [d_1, d_2, \dots, d_r]^T$ 은 실제 변수치이고, $\hat{D} = [\hat{d}_1, \hat{d}_2, \dots, \hat{d}_r]^T$ 은 추정 변수치이다.

식을 간단히 하기 위해 $Z(X, \dot{X}, \ddot{X}) = \hat{\Lambda}^{-1}(X) \cdot R(X, \dot{X}, \ddot{X})$ 으로 놓으면 식(16)은 다음과 같이 된다.

$$\ddot{X}_e + K_v \dot{X}_e + K_p X_e = Z(X, \dot{X}, \ddot{X}) \cdot \tilde{D} \quad (17)$$

적응치는 추정 변수치를 계산하며 추정변수치는 서어보 오차의 함수이고 서어보 오차는 다음과 같이 정의된다.

$$E = \dot{X}_e + \beta X_e \quad (18)$$

여기서 $\beta = \text{diag} \{ \beta_i \}$, $\beta_i > 0$ 이고 식(18)에 대한 전달함수가 strictly positive real (SPR)이 되도록 선택한다.

$x_i = [X_{ei} \dot{X}_{ei}]^T$, $X = [x_1^T \ x_2^T \ \dots \ x_n^T]^T$ 와 같이 상태변수를 정하면 식(17) 및 식(18)로부터 서어보

오차에 대한 상태 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BZ\tilde{D} \\ E &= CX \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 A, B, C는 관절 오차방정식의 최소상태 공간 실현을 위한 행렬이며 positive real lemma에 의하여 다음과 같은 $2n \times 2n$ positive definite matrix $P = \text{diag}\{P_i\}$, $Q = \{Q_i\}$ 가 존재한다.

$$\begin{aligned} A^T P + PA &= -Q \\ PB &= C^T \end{aligned} \quad (20)$$

그러므로 적응칙을 구하기 위해 Lyapunov 정리를 이용하여 다음의 함수를 정의할 수 있다.

$$V(t) = X^T P X + \tilde{D}^T \Phi^{-1} \tilde{D} \quad (21)$$

여기서 $\Phi = \text{diag}\{\Phi_i\}$, $\Phi_i > 0$ 이며 식(21)를 시간에 대해 미분하면 다음과 같이 된다.

$$\dot{V}(t) = -X^T Q X + 2\tilde{D}^T (ZE + \Phi^{-1} \dot{\tilde{D}}) \quad (22)$$

여기서 $\tilde{D} = D - \hat{D}$ 으로 $\dot{\tilde{D}} = -\dot{\hat{D}}$ 이므로 적응칙은 다음과 같이 된다.

$$\dot{\hat{D}} = \Phi Z E \quad (23)$$

그 결과

$$\dot{V}(t) = -X^T Q X \leq 0 \quad (24)$$

이는 서어보 오차가 시간이 감에 따라 영에 수렴되는 것을 의미하며 따라서 매니플레이터 핸드의 궤적은 원하는 궤적에 수렴되고 시스템이 안정하다는 것을 보여주고 있다.

로봇 매니플레이터 핸드에서 물체는 마지막 링크의 끝부분에 위치하고 있으므로 물체의 무게는 마지막 링크의 질량에 포함된 것으로 볼수 있어 식(23)에 의한 미지변수의 추정치는 마지막 링크

와 물체무게가 포함된 질량변수치를 추정하게 된다.

II-4. 힘 수렴 제어

이 절은 매니플레이터 핸드가 물체의 무게를 들므로써 물체의 무게에 대응되는 원하는 힘이 생성된 경우, 이에 실제 힘이 수렴되도록 공급힘을 제어하는 힘제어에 관한 것으로 공급힘을 구하는 방법으로써 Robbins Monro의 Stochastic approximation 방법⁸⁾을 사용하였다. 위치 오차를 보정하기 위한 원하는 힘은 식(13)에서 다음과 같았다.

$$F_a = \hat{A}(X) (\ddot{X}_d + K_v \dot{X}_e + K_p X_e) + \hat{\mu}(X, \dot{X}) + \hat{P}(X)$$

공급 토크를 매니플레이터에 가하여 얻어지는 실제힘 F_0 은 힘 센서로부터 얻어지며 이것과 원하는 힘과의 힘오차는 다음과 같이 된다.

$$\Delta F = F_a - F_0 \quad (25)$$

원하는 힘에 실제힘을 수렴시키기 위한 힘제어 (Force Convergent Control:FCC)칙은 다음과 같다.

$$F_a(k) = F_a(k-1) + \alpha \cdot \Delta F \quad (26)$$

여기서 F_a 는 매니플레이터에 공급되는 힘이며 $\alpha = 1/j$ 이고 $j = 1, 2, \dots$ 이다. 매니플레이터의 관절에 공급되는 관절 토크는 식(5)의 관계로부터 다음과 같이 된다.

$$\tau_a = J^T(q) \cdot F_a \quad (27)$$

식(27)에서 작업 공간치가 관절 공간치로 변환되고 매니플레이터의 관절에 가해지는 토크를 제한하기 위하여 공급 토크를 다음과 같이 놓는다.

$$\tau_{\text{lower}} \leq \tau_a \leq \tau_{\text{upper}} \quad (28)$$

여기서, τ_{upper} 및 τ_{lower} 은 각각 경계영역 내에서 토오크 상한치 및 하한치를 표시한다.

그림 1은 힘제어 루우프를 보이고 있으며 여기서 dT 는 기준 힘 오차이며 이의 설정치에 따라 FCC 수행 회수가 다르게 되고 힘 오차 $|\Delta F|$ 가 기준 힘오차 dF 보다 적은 경우에는 FCC를 우회하게 된다.

계적 제어 루우프가 1회 수행되는 시간 Δt 동안 FCC 루우프가 N 회 수행되는 경우에 FCC 수행시간은 $\Delta t/N$ 이 된다. 힘오차 $|\Delta F|$ 와 기준 힘오차 dF 를 비교하는 대신 Δt 동안 FCC의 반복회수를 삽입하여 제어할 수도 있다.

그림 2는 Adaptive scheme을 포함한 전체 제어도를 나타낸 것으로 계적 제어는 PD 제어기 ($K_v S + K_p$)에서 행해지고 Adaptive scheme에서 매니플레이터의 미지의 질량을 추정하여 질량 행렬 \hat{A} 에 공급하고 이것에 실제 가속도 \ddot{X}_a 을 곱한 것에 원심력, coriolis 힘 및 중력을 보정하여 매니플레이터가 든 물체의 무게(링크질량 포함)에 상응하는 원하는 힘이 되고 힘 제어기에서

매니플레이터의 실제 힘이 원하는 힘에 수렴되게 하는 것이다.

III. 시뮬레이션 및 결과

제안된 방식의 타당성을 검토하기 위하여 그림 3과 같은 두개의 관절을 갖는 매니플레이터에 대해 시뮬레이션을 실시하였다.

계산을 간단히 하기 위하여 매니플레이터에 작용하는 마찰력과 점성은 없다고 가정하였으며 전체 시뮬레이션 순서도 그림 4에 따라 각 시뮬레이션 단계를 설명하면 다음과 같다.

초기치 설정 단계에서는 계적제어 루우프의 샘플링 시간은 5ms, 힘제어 루우프의 수행 시간은 1ms, 전체 수행시간은 2초, 링크 1 및 링크 2의 질량 m_1, m_2 는 각각 4kg, 2kg이고 링크의 길이는 각각 1m이며 공급 토오크의 상·하한치는 각각 $\pm 400 [N \cdot m]$ 로 하였다.

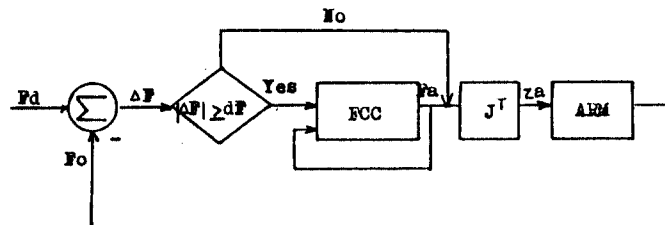


그림 1 힘 제어 루우프
Forc control loop

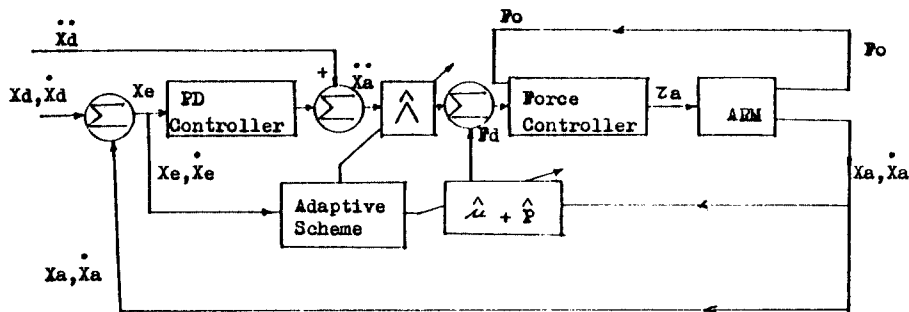


그림 2 전체 적응 제어 루우프
The overall adaptive control loop

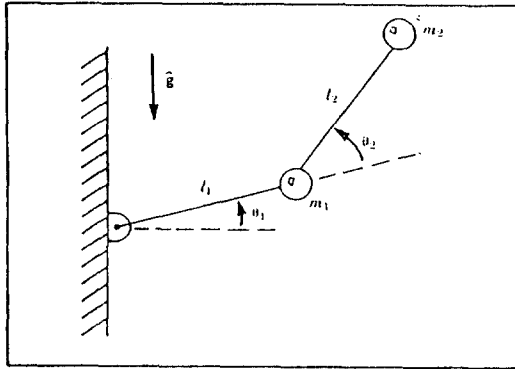


그림 3 이 관절 매니플레이터
Two degree of freedom manipulator

원하는 관절의 궤적은 다음과 같이 하였으며 여기서 $a_1 = a_2 = 1.5$, $b_1 = b_2 = 1.0$ 으로 하였다.

$$\begin{bmatrix} q_{1a} \\ q_{2a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 + b_1 (\cos(2t) - \cos(4t)) \\ a_2 + b_2 (\sin(2t) + \sin(4t)) \end{bmatrix}$$

여기서 q_{1a} , q_{2a} 는 각각 관절 1 및 2의 원하는 궤적이고 원하는 매니플레이터 핸드의 직교좌표 궤적은 매니플레이터의 영좌표에서 본 링크 2의 끝점 좌표의 전치 행렬에서 다음과 같이 구한다.

$$\begin{bmatrix} X_a \\ Y_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos(q_{1a}) + l_2 \cos(q_{1a} + q_{2a}) \\ l_1 \sin(q_{1a}) + l_2 \sin(q_{1a} + q_{2a}) \end{bmatrix} \quad (29)$$

여기서 X_a , Y_a , l_1 , l_2 는 각각 X축 및 Y축의 원하는 궤적, 링크 1 및 2의 길이이다.

실제 가속도는 식(11)의 해를 구하는 것으로 되며 이 단계에서 궤적 제어가 행해지고 원하는 힘의 계산은 식(13)의 해를 구하는 것으로 되며 이 단계에서 물체에 대응되는 원하는 힘이 생성된다.

원하는 힘에 실제 힘을 수렴시키기 위해 식(25) 및 식(26)으로부터 매니플레이터 핸드에 가할 힘을 구하고 식(27)을 이용하여 관절 토크로 바꾸며 이때 사용되는 Jacobian 행렬은 다음과 같다.

$$J(q) = \begin{bmatrix} -l_1 \sin(q_{1a}) - l_2 \sin(q_{1a} + q_{2a}) \\ l_1 \cos(q_{1a}) + l_2 \cos(q_{1a} + q_{2a}) \end{bmatrix}$$

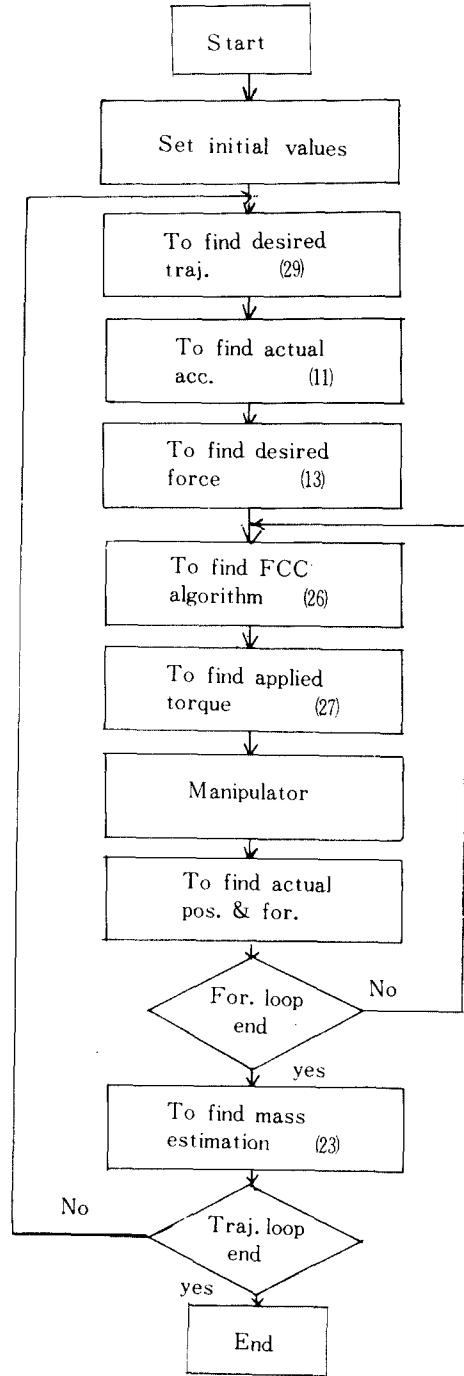


그림 4 시뮬레이션의 순서도
Flowchart of simulation

$$\begin{bmatrix} -l_2 \sin(q_{1a} + q_{2a}) \\ l_2 \cos(q_{1a} + q_{2a}) \end{bmatrix} \quad (30)$$

여기서 q_{1a} , q_{2a} 는 각각 관절 1 및 2의 실제 궤적이고 매니플레이터 시뮬레이션 단계에서는 다음과 같은 그림 3의 이 관절 매니플레이터의 동적 방정식에 대하여 행하였다.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_2 + \frac{m_1}{s(q_{2a})} & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_{ax} \\ \ddot{X}_{ay} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -(m_2 l_1 C(q_{2a}) + m_2 l_2) \cdot \dot{q}_{1a}^2 & -m_2 l_2 \dot{q}_{2a}^2 \\ -(2 \cdot m_2 \cdot l_2 + m_2 l_1 C(q_{2a}) + m_1 l_1 \frac{c(q_{2a})}{s^2(q_{2a})}) \dot{q}_{1a} \dot{q}_{2a} \\ m_2 l_1 s(q_{2a}) \cdot \dot{q}_{1a}^2 + l_1 \cdot m_2 s(q_{2a}) \dot{q}_{1a} \cdot \dot{q}_{2a} \\ m_1 \cdot g \cdot \frac{c(q_{1a})}{s(q_{2a})} + m_2 \cdot g \cdot s(q_{1a} + q_{2a}) \\ m_2 \cdot g \cdot c(q_{1a} + q_{2a}) \end{bmatrix} \quad (31)$$

여기서 F_x , F_y , \ddot{X}_{ax} , \ddot{X}_{ay} , \dot{q}_{1a} , \dot{q}_{2a} , $c(q)$, $s(q)$ 은 각각 x 축 힘, y 축 힘, x 축 실제 가속도, y 축 실제 가속도, 관절 1의 실제 가속도, 관절 2의 실제 가속도, $\cos(q)$, $\sin(q)$ 을 표시한다.

실제 위치 및 실제 힘을 구하는 단계에서는 실제 위치는 원하는 관절위치 대신에 실제 관절 위치를 식(29)와 같은 방법으로 구하며 실제 힘은 다음 식으로 구한다.

$$F_0 = \frac{\dot{X}_a(t+1) - \dot{X}_a(t)}{ST} \cdot A(X) \quad (32)$$

여기서 \dot{X}_a 은 실제 속도이고 ST는 샘플링 시간이다.

매니플레이터의 미지의 질량을 추정하기 위해 서어보 오차 E는 식(18)로부터 구하고 미지변수 추정은 식(23)을 이용하며 여기서 $\hat{D}_1 = m_1$, $\hat{D}_2 = m_2$ 로 놓았을 때 식(17)의 조건 $Z = \hat{A}^{-1} \cdot R$ 을 이용하여 Z 행렬은 R 행렬로부터 구하고 R 행렬은 동적 방정식 (31)로부터 다음과 같이 구하며 여기서

R_{ij} 은 힘 F_i 에서 링크 j 의 질량인 m_j 의 관련 상수 및 변수이고 기지치이다.

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ 0 & R_{22} \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$R_{11} = \ddot{X}_{ax} / s(q_{2a}) + l_1 \cdot c(q_{2a}) / s^2(q_{2a}) \cdot \dot{q}_{1a} \cdot \dot{q}_{2a} + g \cdot c(q_{1a}) / s(q_{2a})$$

$$R_{12} = \ddot{X}_{ax} - [l_1 \cdot c(q_{2a}) + l_2] \cdot \dot{q}_{1a}^2 - l_2 \dot{q}_{2a}^2 - [2 l_2 + l_1 \cdot c(q_{2a})] \cdot \dot{q}_{1a} \cdot \dot{q}_{2a} + g \cdot s(q_{1a} + q_{2a})$$

$$R_{22} = \ddot{X}_{ay} + l_1 \cdot s(q_{2a}) \cdot \dot{q}_{1a}^2 + l_1 \cdot s(q_{2a}) \cdot \dot{q}_{1a} \cdot \dot{q}_{2a} + g \cdot c(q_{1a} + q_{2a})$$

그림 5는 XY평면상의 로봇트 매니플레이터 핸드의 원하는 궤적을 보이고 있으며 그림 6 부터 그림 12까지는 대표적인 시뮬레이션 결과를 보여 주고 있다.

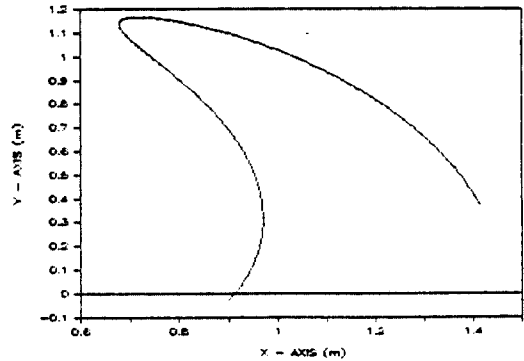


그림 5 매니플레이터 핸드의 원하는 궤적
Desired trajectory of the manipulator hand

그림 6은 링크 1의 실제질량 4.0kg을 초기질량 4.0kg에서 추정하는 것을 보이고 있으며, 그림 7은 물체 무게를 포함한 링크 2의 질량추정 예를 보인 것으로 그림 7-(a)는 링크 2의 질량이 2.0kg인 매니플레이터가 2.0kg의 물체를 들은 경우 초기질량 2.0kg에서 실제질량 4.0kg을 추정하는 것이며, 그림 7-(b)는 매니플레이터가 1.0kg의 물체를 내려 놓음으로써 링크 2의 실제 질량이 4.0kg에서 3.0kg이 된 경우 초기질량 4.0kg에서 실제질량 3.0kg을 추정하는 것이며,

그림 7-(c)는 링크 2 자체의 질량 2.0kg을 추정하는 도중 매니퓰레이터가 1.0kg의 물체 무게를 들어 실제 질량이 3.0kg으로 변경된 경우 초기 질량 2.0kg에서 링크 2 자체의 질량 2.0kg을 추정하다가 변경된 실제질량 3.0kg을 추정하는 것을 보이고 있으며 이상의 그림 6 및 그림 7에서 보는 바와 같이 추정치가 실제질량에 수렴하고 있음을 볼 수 있고 그림 7-(c)의 경우에는 실제 질량에 수렴되는 추정시간이 다소 지연되고 있는 것을 볼 수 있다.

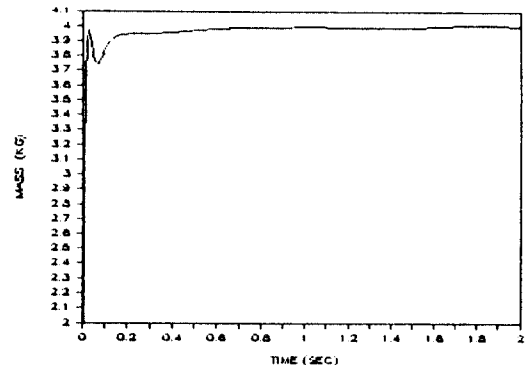
그림 8, 9, 10은 링크 1 및 링크 2가 그림 6 및 그림 7-(a)와 같이 변하고 공급 토크를 $\pm 400[N \cdot m]$ 로 제한할 때 각각 위치오차, 힘오차 및 공급 토크를 보이고 있으며 그림 8 및 그림 9에서 초기 과도 상태를 제외하곤 오차가 영에 수렴하고 있으며, 그림 10의 초기 공급토크 400 $[N \cdot m]$ 은 제한 토크를 나타낸 것이다.

그림 11은 공급 토크에서 원심력, coriolis 힘 및 중력을 고려하지 않는 방식과 본 제안방식을 비교한 것으로 위치오차 및 토크 오차의 수렴 특성이 개선되었음을 볼 수 있고 이는 Paul의 Force 제어 방식⁵⁾보다 본 제안 방식이 미지질량 추정이 가능한 것 이외에도 더 개선되었음을 알 수 있다.

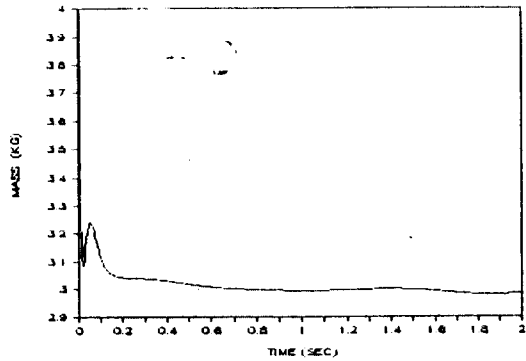
그림 12은 Raibert^{3), 4), 7)}등이 사용한 원하는 힘에 오차를 보정하여 공급 힘을 구하는 방식, 즉 $F_a = F_d + k \cdot \Delta F$, 과 본 제안 방식을 비교한

것으로 이 역시 그림에서 보는 바와 같이 본제안 방식이 우수함을 알 수 있다.

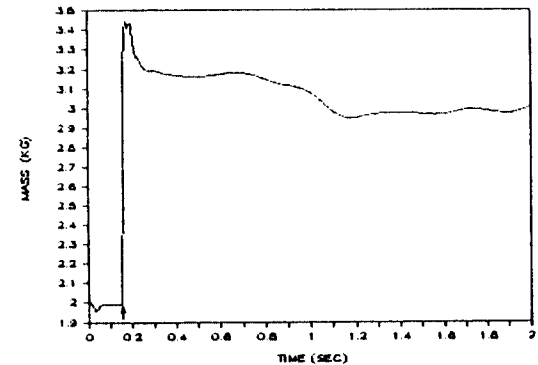
그림 11과 그림 12는 Y축의 경우이며, 여기에서 기타의 조건은 그림 8, 9의 경우와 같이하였다.



(a) Estimate of real mass 4.0 kg from initial mass 2.0 kg



(b) Estimate of real mass 3.0 kg from initial mass 4.0 kg



(c) Estimate of changed real mass 3.0 kg from initial mass 2.0 kg

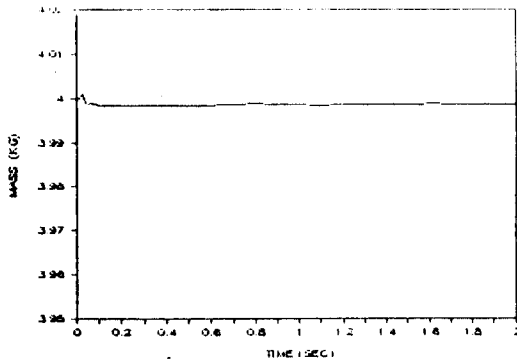
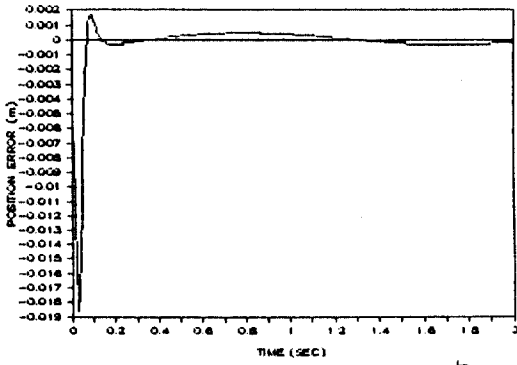
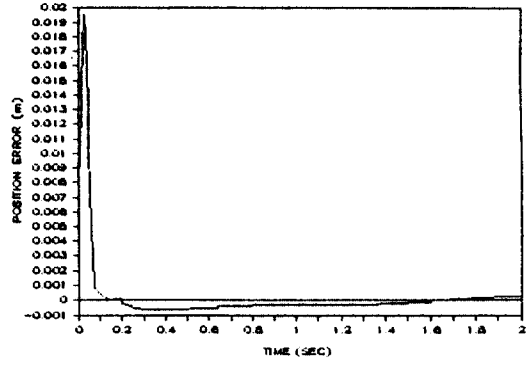


그림 6 링크 1의 질량 4.0kg 추정
Estimate of the mass 4.0kg of link 1

그림 7 링크 2의 질량 추정
Estimate of the mass of link 2

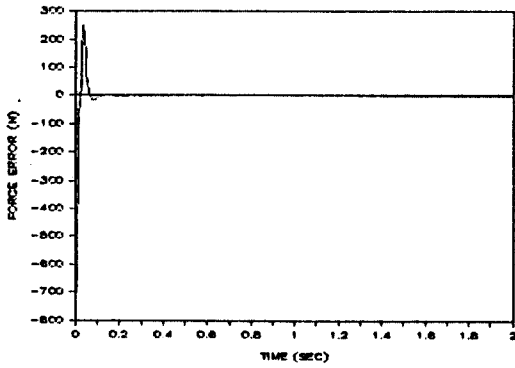


(a) X axis

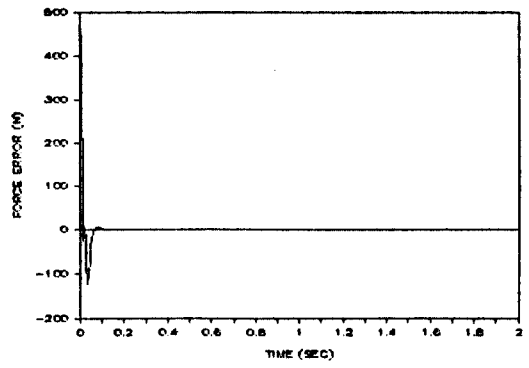


(b) Y axis

그림 8 위치오차
Position error

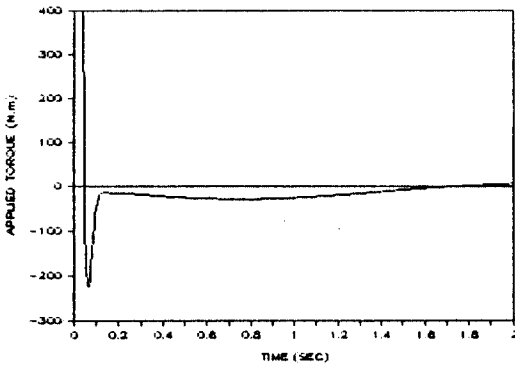


(a) Position error

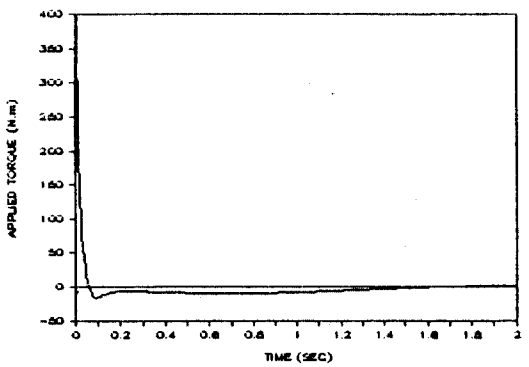


(b) Force error

그림 9 힘 오차
Force error

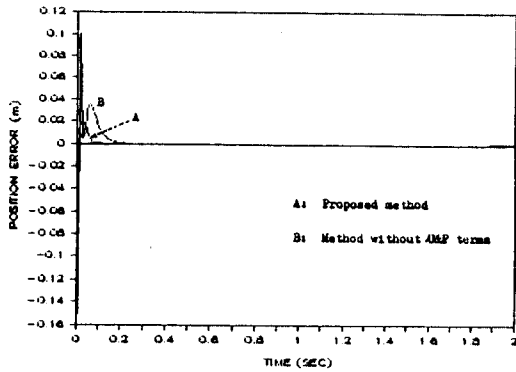


(a) Joint 1

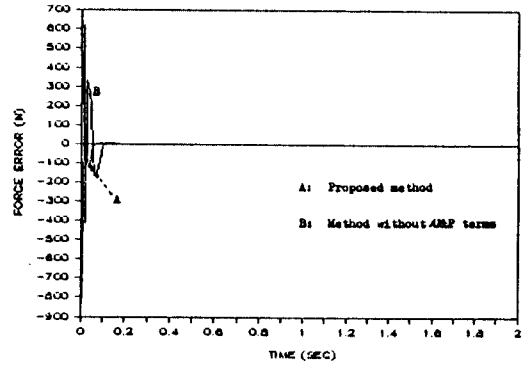


(b) Joint 2

그림 10 공급 토크
Applied torque



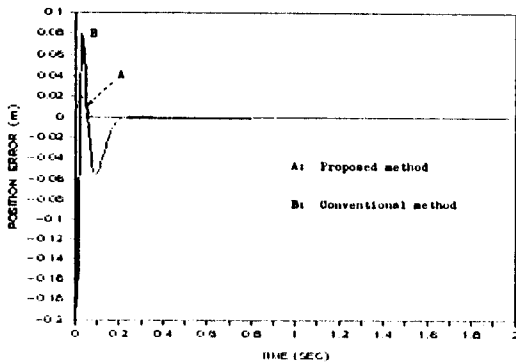
(a) Position error



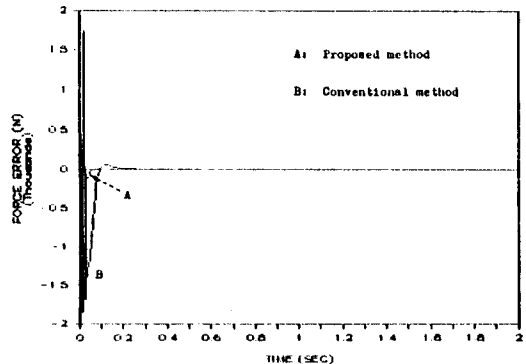
(b) Force error

그림11 원심력, coriolis 힘 및 중력을 고치지 않는 방식과 비교

Comparing with methol without considering cetrifugal, coriolis and gravity terms.



(a) Position error



(b) Force error

그림12 종래 방식과 비교

Comparing with conventional method

IV. 결 론

이상의 이론과 시뮬레이션 결과에서 보는바와 같이 매니퓰레이터 핸드가 무게가 다른 물체를 잡거나 놓는 경우 추정치가 실제 질량에 수렴하는 것을 볼 수 있었고 이 추정치를 이용한 위치 및 힘 제어가 효율적으로 영에 수렴됨을 보임으로써 링크의 질량이나 물체 무게를 알지 못하는 경우에도 그 값을 추정함으로써 토오크 및 위치 제어가 가능함을 보여 주었으며 특히 본 제어 방식은 로봇트 핸드의 작업 공간 상에서 행한 것으로 실제 적용 가능한 이론을 제안하였다는 점에서 관절 공간의 경우보다 진보된 것이며 미지변수 추정에 사용되는 계산량은 물체의 질량에 연

관되는 수식 만을 사용함으로써 실시간 제어 이용에도 적절하다고 본다.

본 제어 방식과 Raibert^{(3), (4), (7)} 등의 종래 제어 방식의 비교에서 보는 바와 같이 본 제안방식이 종래 제어 방식보다 우수하다는 것을 알 수 있었으며, 본 제안방식과 원심력, coriolis 힘 및 중력을 고려하지 않는 방식과 비교함으로써 Paul의 Force 제어방식⁽⁵⁾ 보다 효율성이 있음을 알 수 있었다.

이 방법은 물체의 무게를 모르고 로봇트가 작업을 할 때 특히 유용하며 이 경우 다른 물체의 무게에 따라 적절한 토오크를 가하게 됨으로써 효율적인 제어가 가능하다.

그러나 링크의 질량을 추정하는 중에 물체의

무게가 변경된 경우에는 실제 질량에 접근되는 추정 시간이 지연되는 점이 향후 더 연구 개선해야 할 과제이다.

參 考 文 獻

1. S. Dubowsky and D.T. DesForges. "The Application of Model-Referenced Adaptive Control to Robotic Manipulators." ASME J. Dynam. Syst. Meas. Contr. 1979; 101.
2. A.J. Koivo, "Force-Position-Velocity Control with Self-tuning for Robotic Manipulators," Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, San Francisco, CA, 1986, pp.1563-1568.
3. J.K. Salisbury, "Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates," Proc. of the 19th IEEE Conference on Decision and Contr., pp.95-100, Albuquerque, New Mexico, November 1980.
4. M.H. Raibert and J.J. Craig, "Hybrid Position/Force Control of Manipulators," Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 102, June 1981, pp.126-133.
5. C.-H. Wu and R.P. Paul, "Resolved Motion Force Control of Robot Manipulator," IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-12, No. 3, pp.266-275, May/June 1982.
6. Suguru Arimoto, "Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators Based on Learning Method," Proc. of ICAR '85, pp.235-239, 1985.
7. OUSSAMA Khatib, "A unified Approach for motion and Force Control of Robot Manipulator: The Operational Space Formulation," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol RA3 No. 1, pp. 43-53, 1987.
8. K. Fukunaga. Introduction to Statistical Pattern Recognition. New York: Academic. pp.204-210, 1972.
9. D.E. Whitney, "Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions," Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, ASME Trans., pp.91-97, June 1977.
10. R.P. Anex and M. Hubbard. "Modeling and Adaptive Control of a Mechanical Manipulator." ASME J. Dynam. Syst. Meas. Contr. 1984: 106.
11. A. BalesTrino and G. De Maria "Adaptive Control of Manipulators in the Task Oriented Space." Proceedings of the 13th ISIR, p.13-13 to p.13-28, 1983.
12. R. Paul, "Manipulator Cartesian Path Control," IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, Vol. SMC-9, pp.702-716, Nov. 1979.
13. G. Goodwin and K.S. Sin, "Adaptive Filtering, Prediction and Control," Prentice Hall, 1984.
14. S. Boyd and S. Sastry, "Necessary and Sufficient Conditions for Parameter Convergence in Adaptive Control," Proc. of the Ames-Berkelcy Conf. on Nonlinear Dynamics and Control, pp.81-101, Math-Sci Press, Brookline, MA, 1984.
15. J.J. Craig, "Introduction to Robotics", Mechanics and Control, Addison-Wesley, 1986.
16. C.S.G. Lee, "Robot Arm Dynamics," Tutorials on Robotics, pp.93-102, IEEE Press, 1984.
17. J.Y.S. LUM, M.W. WALKER, and R.P.C. PAUL "Resolved Acceleration Control of Mechanical Manipulators," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-25, No. 3, June 1980.



鄭用澈(Yong Cheol CHUNG)正會員
1949年1月15日生
1973年：漢陽大工大 電氣工學科 卒業
1986年：漢陽大 大學院 電氣工學科博士
課程 修了
現在：特許庁 審査四局 審査官



任達鎬(Dal Ho IM) 正會員
1933年7月4日生
1958年：漢陽大 工大 電氣工學科 卒業
1964年：漢陽大 大學院 電氣工學科卒業
現在：漢陽大學校 電氣工學科 教授
(工學博士)