

論 文

# 로봇 매니퓰레이터의 적응 토포크 및 위치 제어

正會員 鄭 用 澈\* 正會員 任 達 鎬\*\*

## Adaptive Torque and Position Control of a Robot Manipulator

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

**要 約** 종래의 로봇 매니퓰레이터의 토포크 및 위치 제어는 알고 있는 링크의 질량이나 물체의 무게를 이용하여 제어하는 방법이었다. 본 논문에서는 링크나 무게의 질량을 모르는 상태에서 토포크 및 위치 제어를 하는 방법을 제안하고자 한다. 이 방법은 관절공간에서 기지의 변수치와 서어브 오차를 이용한 것이다. 본 연구의 타당성을 보이기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 하였으며 결과의 분석 검토를 통해 본 연구가 유용성이 있음을 보였다.

**ABSTRACT** Conventional torque and position control scheme is developed to control a robot manipulator using the knowing mass of links or load. This paper presents a torque and position control method which performs under unknown mass of links or load. This method takes full advantage of known parameters and servo error in joint coordinate space. We illustrate the theory with some simulations and show that the result is effective.

### I. 서 론

현재 상업화된 산업용 로봇은 대부분 동적 특성을 무시한채 각 링크를 구동하는 모터를 서로 독립적으로 제어하고 있으며 이와같은 경우 고속운동에 한계가 있으며 특히 산업용 로봇이 조립 작업시 필요한 토포크 제어를 효과적으로 할 수 없었다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 많은 연구가 있었으며 방법이 제시되었다.

Salisbury<sup>(1)</sup>는 임의의 핸드좌표에서 이동 및 회

전하는 arm을 갖는 로봇의 제어기 설계가 가능토록 하는 제어 방법을 제안하였고 토포크 제어와 함께 위치제어도 가능토록 하였으며 토포크 제어부는 원하는 토포크를 외부에서 공급하여 내부 루우프에서 오차가 수렴되는 구조를 제시하였다.

Raibert<sup>(2)</sup>는 직교좌표 공간에서 토포크 및 위치 제어를 함께 가능토록 하는 하이브리드 제어를 제안하였으며 이는 토포크 제어부와 위치 제어부 사이에 선택부를 두어 제어기를 구성한 것으로 외부에서 원하는 토포크를 공급하여 내부 루우프에서 오차가 수렴되도록 하였다.

Arimoto<sup>(3)</sup>은 같은 동작을 되풀이 하는 로봇에 있어서 로봇의 반복 동작시 동일 위치에서 전 값과 비교하여 오차를 보상하는 구조의 학습

\* 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 : 88-26 (接受 1988. 6. 3)

제어 방식을 기반으로한 하이브리드 토포크 및 위치 제어 방식을 제안하였다.

Koivo<sup>(4)</sup>는 self tuning 방식을 이용하여 토포크 및 위치 제어를 가능케 하는 적응 제어기를 제안 하였으며 Salisbury<sup>(1), (2)</sup>과 같이 원하는 토포크를 외부에서 가하여 변수 예측치를 제어기에 공급하여 오차를 수렴시키는 구조로 하였다.

Khatib<sup>(6)</sup>는 여유도를 갖는 매니플레이터에 있어서 토포크 제어부, 위치제어부 및 선택부를 두어 Raibert<sup>(2)</sup>와 유사한 방법으로 외부에서 원하는 힘 및 위치를 공급함으로써 토포크 및 위치를 제어하는 방법을 제시하였다.

이상의 Salisbury 등의<sup>(1), (2), (3), (4), (6)</sup> 제어방법에서 보면 물체의 질량에 적합한 원하는 토포크를 외부에서 공급하여 토포크를 제어하는 구조로 되어있어 이러한 제어 방식에 있어서 토포크 제어는 물체의 질량을 아는 범위에 국한되어 있다는 문제가 있었다.

본 논문에서는 로봇트 매니플레이터의 링크의 질량이나 작업의 대상인 물체 무게를 추정하여 제어를 함으로써 물체의 질량이나 원하는 토포크를 모르는 상태에서 토포크 및 위치 제어가 됨을 보이고자 한다.

이 방법은 "Computed torque" 방법<sup>(6)</sup>을 기반으로 관절좌표 공간에서 행해 졌으며 미지 변수 추정은 서어보 오차와 기지 변수치를 이용하였고 토포크 제어 Scheme은 Robbins monro의 stochastic 정리<sup>(2)</sup>을 이용하였다. 이는 외부에서 원하는 토포크를 가하지 않고 다만 원하는 위치만을 가하는 상태에서 변하는 물체에 상응한 원하는 토포크를 자동 생성시켜 내부 루우프에서 실제 토포크가 원하는 토포크에 수렴 하도록한 구조이며 원하는 토포크는 실제 물체를 추정치에 서어보 오차와 함께 구성된 실제 가속도를 곱한 것이다.

이 방법은 로봇트 매니플레이터 링크의 상이한 무게에서 효율적으로 제어할 수 있는 방법이며 특히, 작업장에서 로봇트가 물체를 들거나 놓는 작업을 할때 서로다른 무게를 갖는 물체의 경우 가장 효율적인 토포크 제어를 가능케 하는 방법인 것이다.

본 제어 방식에서는 상기 대부분의 토포크 제어 방식이 비선형 모델을 선형화시켜 제어하는 것과 달리 비선형 모델 자체를 제어하였다.

## II. 미지변수 추정을 이용한 적응 토포크 제어

### 가. 로봇트 매니플레이터의 동적 방정식

n개의 링크가 체인의 형태로 직렬로 연결된 매니플레이터의 동적 방정식은 다음과 같다.

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

여기서 T는 n×1인 관절 토포크이고 q는 n×1인 관절 위치이다.

또한 M(q)은 n×n인 매니플레이터의 질량 행렬이며 F(q, q̇)는 원심력 및 Coriolis 힘이고 G(q)는 중력을 나타낸다.

### 나. 미지 변수 추정

#### (1) 비선형 모델 제어

미지변수 추정치가 실제치와 차이가 있을때 매니플레이터를 제어하기 위한 제어 법칙은 다음과 같다.

$$T = \hat{M}(q)\ddot{q}_a + \hat{F}(q, \dot{q}) + \hat{G}(q) \quad (2)$$

여기서  $\hat{M}(q)$ ,  $\hat{F}(q, \dot{q})$ ,  $\hat{G}(q)$ 은 각각 M(q), F(q, q̇), G(q)의 추정치이다.

원하는 관절좌표 위치  $q_a$ 와 실제의 관절좌표 위치  $q_e$ 로 부터 관절의 위치 오차는 다음과 같다.

$$q_e = q_a - q_a \quad (3)$$

또한 원하는 관절속도  $\dot{q}_a$ 와 실제의 관절속도  $\dot{q}_e$ 로부터 관절속도 오차  $\dot{q}_e$ 는 다음과 같이 된다.

$$\dot{q}_e = \dot{q}_a - \dot{q}_a \quad (4)$$

여기서  $\dot{q}_a$ 는 n×1인 실제 관절속도이고 관절 속

도메타로 측정되며 원하는 관절 가속도는 차분근사에 의하여

$$\ddot{q}_a(t) = \{\dot{q}_a(t + \Delta t) - \dot{q}_a(t)\} / \Delta t \quad (5)$$

가 되며 실제 가속도  $\ddot{q}_a$  는 다음과 같이 된다.

$$\ddot{q}_a = K_v \dot{q}_e + K_p q_e + \ddot{q}_d \quad (6)$$

여기서,  $K_v$ 와  $K_p$ 는 속도와 위치이득으로써 양의 상수이다.

미지변수 추정치가 실제치와 동일한 경우에는 식(3)과 식(6)으로부터 다음식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{q}_e + K_v \dot{q}_e + K_p q_e = 0 \quad (7)$$

그러므로 식(7)의 특성근이 음의 실수부를 갖도록  $K_v$ 와  $K_p$ 를 선택하면  $q_e$ 는  $q_d$ 로 수렴하게 된다.

(2) 오차 방정식

추정된 미지 변수치와 실제치가 일치하지 않는 경우의 오차 방정식은 식(1)과 식(2)로부터 식(8)과 같이 구할 수 있다.

$$K_v \dot{q}_e + K_p q_e + \ddot{q}_e = \hat{M}(q) [\hat{M}(q) \ddot{q} + \hat{F}(q, \dot{q}) + \hat{G}(q)] \quad (8)$$

여기서,  $\hat{M}(q) = M(q) - \hat{M}(q)$ ,  $\hat{F}(q, \dot{q}) = F(q, \dot{q}) - \hat{F}(q, \dot{q})$ ,  $\hat{G} = G(q) - \hat{G}(q)$ 이다. 추정 변수를 구하기 위하여 식(8)을 다음과 같이 변형한다.

$$K_v \dot{q}_e + K_p q_e + \ddot{q}_e = \hat{M}^{-1}(q) \cdot Z(q, \dot{q}, \ddot{q}) \cdot \Phi \quad (9)$$

여기서,  $\Phi = D - \hat{D}$ 이고 미지변수의 수가  $r$ 인 경우  $r \times 1$  차원이며,  $D = [d_1, d_2, \dots, d_r]^T$ 는 실제 변수치이고 실제링크의 질량을 의미하며  $\hat{D} = [\hat{d}_1, \hat{d}_2, \dots, \hat{d}_r]^T$ 는 이의 추정 변수치이고 추정 질량을 의미하는 것이다.

$Z(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 은  $n \times r$ 함수행렬로 식(8)의 우변 항중  $\hat{M}^{-1}(q)$  및  $\Phi$ 를 제외한 변수들로 기지의

값이며 구체적으로는 로봇 매니퓰레이터 동적 방정식 중에서 질량 이외의 링크의 길이, 관절의 위치, 관절의 속도 및 가속도 등의 함수로써 이미 알고 있거나 그림 2의 Feedback 으로부터 얻어지는 값들이다.

(3) 미지변수 추정을 위한 적응칙 유도

추정 변수는 서어보 오차의 함수이며 이때 서어보 오차는 다음과 같다.

$$e = \dot{q}_e + \alpha q_e \quad (10)$$

여기서,  $\alpha = \text{diag}\{\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n\}$ 이다. 단  $\alpha_i$ 는 양의 상수로서 식(10)에 대한 전달함수가 Strictly positive real 이 되도록 선택한다.  $x_1 = [e_1 \dot{e}_1]^T$ ,  $X = [x_1 x_2 \dots x_n]^T$ 로 놓고 식(9) 및 식(10)의 관계로부터 상태방정식을 구하면 다음과 같이 된다.

$$\dot{X} = AX + B\hat{M}^{-1}Z\Phi \quad (11)$$

$$E = CX$$

여기서,  $A, B, C$ 는 관절오차 방정식의 최소 상태 공간 실현을 위한 행렬이며 Positive real lemma<sup>8)</sup>에 의하여 다음과 같은  $2n \times 2n$  positive definite matrix  $P = \text{diag}\{P_1 P_2 \dots P_n\}$ ,  $Q = \text{diag}\{Q_1 Q_2 \dots Q_n\}$ 가 존재한다.

그러므로 적응칙 유도를 위하여 Lyapunov 정리를 이용하여 다음의 함수를 정의할 수 있다.

$$V(X, \Phi) = X^T P X + \Phi^T \Gamma^{-1} \Phi \quad (12)$$

여기서,  $\Gamma = \text{diag}\{\gamma_1 \gamma_2 \dots \gamma_r\}$ ,  $\gamma_i > 0$ 이다. 식(13)을 시간에 대해 미분하고

$$\dot{\Phi} = -\Gamma Z^T \hat{M}^{-1} E \quad (13)$$

로 놓으면

$$\dot{V}(X, \Phi) = -X^T Q X \quad (14)$$

가 얻어진다. 여기서  $\Phi = D - \hat{D}$  이므로  $\dot{\Phi} = -\dot{\hat{D}}$ 가 되고 적응칙은 다음과 같이 된다.

$$\dot{\hat{D}} = \Gamma Z^T \hat{M}^{-1} E \quad (17)$$

식(13)과 식(16)은 X 및  $\Phi$ 가 진동됨을 의미하며 적응칙의 기본식은 식(17)과 같이 주어진다.

추정치를 제한하기 위하여 경계영역내에 다음과 같이 놓는다.

$$L - \delta < \hat{D} < H + \delta \quad (18)$$

여기서 추정치  $\hat{D}$ 은 상한치H와 하한치L 사이에 놓이며  $\delta$ 는 오차로 양의 상수이다.

#### 다. 토크 수렴 제어

위치 오차를 보정하기 위한 원하는 토크는 다음과 같다.

$$T_a = \hat{M}(q) \ddot{q}_a + F(q, \dot{q}) + G(q) \quad (19)$$

여기서,  $\ddot{q}_a$ 은 실제 가속도로써 식(6)과 같으며  $\hat{M}(q)$ 는  $M(q)$ 의 추정치이고  $F(q, \dot{q})$  및  $G(q)$ 은 식(1)에서와 같다.

측정된 실제 토크  $T_0$ 가 원하는 토크  $T_a$ 에 수렴되도록 하기 위해 매니플레이터 관점에 가할 토크  $T_a$ 를 구하는 방법으로써 Robbins monro의 stochastic approximation 방법을 사용하였다.

로보트에 가하는 실제 토크는 관절 전류를 검지한 값으로 부터 환산된다.

따라서, 원하는 토크 및 실제 토크와의 오차 토크는 다음과 같이 된다.

$$\Delta T = T_a - T_0 \quad (20)$$

원하는 토크에 실제 토크를 수렴시키기 위한 토크 제어(Torque convergent control : TCC)칙은 다음과 같이 한다.

$$T_a(k+1) = T_a(k) + b \cdot \Delta T \quad (21)$$

여기서, 로보트 관절 공급 토크  $T_a(k)$ 은  $T_a(k+1)$ 의 전값이며  $b = 1/(k+1)$ 이고  $k = 0, 1, 2, \dots$ 이다.

그림1은 토크 제어 루우프를 보이고 있으며 여기서  $dT$ 는 기준 토크 오차이며 이의 크

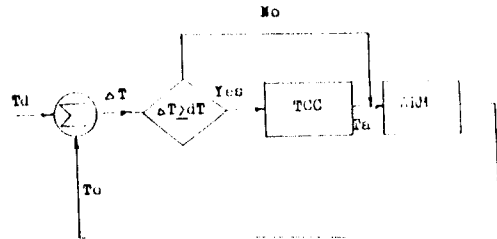


그림 1 토크 제어루우프  
Torque Control loop.

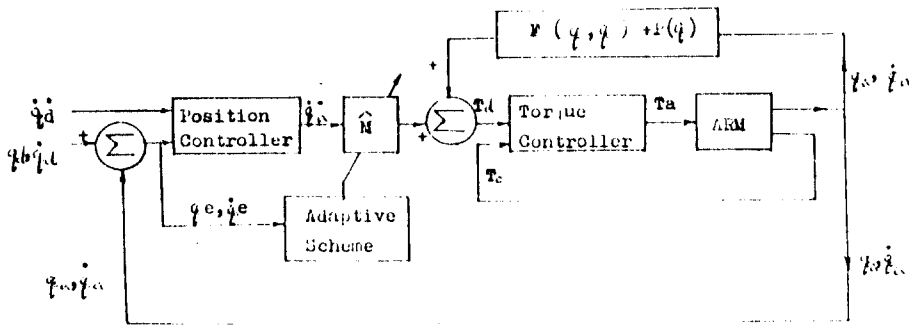


그림 2 적응방법 부가전체제어 시스템  
The Entire control system with an adaptive element.

기 설정에 따라 TCC 수행 회수가 상이하게 된다.

그림 2는 토오크 제어 루우프를 포함한 전체 제어도를 나타낸 것으로 외부에서 원하는 관절 위치, 속도 및 가속도만을 가하고 원하는 토오크  $T_d$ 는 추정된 질량행렬  $\hat{M}$ 에 실제 가속도  $\ddot{q}_a$ 를 곱한 것에다가 원심력 및 coriolis 힘  $F(q, \dot{q})$ 와 중력  $G(q)$ 를 보상한 것으로 토오크 제어 루우프에 공급되며 추정 질량행렬  $\hat{M}$ 은 위치 및 속도 오차로부터 계산된다.

### III. 시뮬레이션 및 결과

이상과 같은 알고리즘의 타당성을 검토하기 위하여 그림 3과 같은 두개의 관절을 갖는 로봇 매니플레이터에 대한 시뮬레이션을 실시하였다.

계산을 간단히 하기 위하여 매니플레이터에 작용하는 마찰력과 점성은 없다고 가정하였으며 위치 루우프의 샘플링 시간은 5ms, 토오크 루우프의 수행시간은 1ms, 전체 수행시간은 2초, 링크 1 및 링크 2의 질량은 각각 4kg이고 링크의 길이는 각각 1m이다. 이러한 매니플레이터의 동적 방정식은 다음과 같다.

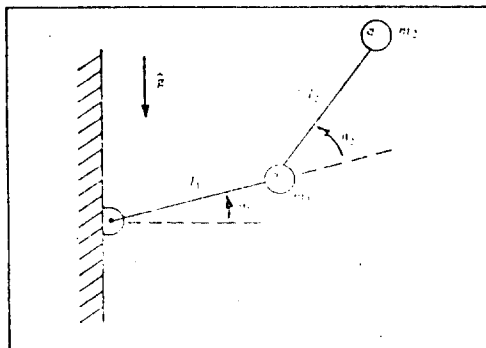


그림 3 이 관절 매니플레이터  
Two degree of freedom manipulator.

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} m_2 l^2 + 2m_2 l^2 C_2 + (m + m_2) l^2 & m_2 l^2 + m_2 l^2 C_2 \\ m_2 l^2 C_2 + m_2 l^2 & m_2 l \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -m_2 l^2 S_2 \dot{q}_2^2 & -2m_2 l^2 S_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 \\ m_2 l^2 S_2 \dot{q}_1^2 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} m_2 l g S_{12} + (m_1 + m_2) l g C_1 \\ m_2 l g S_{12} \end{bmatrix} \quad (22)$$

여기서,  $m_1, m_2$ 는 링크 1 및 링크 2의 질량이고  $g$ 는 중력 가속도,  $l$ 은 링크 1 및 링크 2의 각각의 길이이며  $C_i = \cos \theta_i, S_i = \sin \theta_i, C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$ 이다.

미지 질량을 구하기 위하여 링크 1의 추정질량  $m_1$  및 링크 2의 추정질량  $m_2$  (부채무게 포함)은 다음과 같이 놓는다.

$$D_1 = m_1$$

$$D_2 = m_2$$

식(17)에 이용될 Z행렬은 동적 방정식 (22)로부터 다음과 같이 구하며, 여기서  $Z_{ij}$ 는 토오크  $T_i$ 에서 링크  $j$ 의 질량인  $m_j$ 의 관련 상수 및 변수이고 기지의 값이다.

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ 0 & Z_{22} \end{bmatrix}$$

$$Z_{11} = l^2 \ddot{\theta}_1 + l g S_1$$

$$Z_{12} = (2 \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) (1 + C_2) l^2 + (S_1 + S_2) l g - (\ddot{\theta}_2 + 2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) l^2 S_2$$

$$Z_{22} = (l^2 + l^2 C_2) \ddot{\theta}_1 + l^2 \ddot{\theta}_2 + l^2 S_2 \dot{\theta}_1^2 + l g S_{12}$$

상식을 이용하여 미지 변수를 추정하는 법칙은 식(17)에 주어진 것과 같다.

본 시뮬레이션에 사용된 원하는 궤적은 다음과 같다. (그림 4)

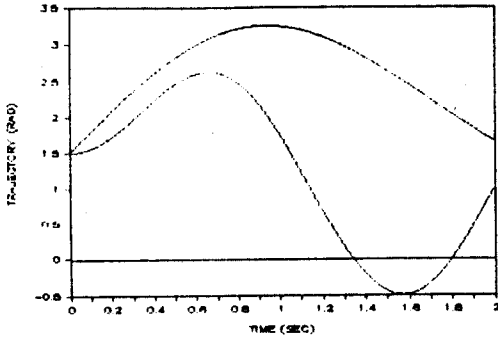


그림 4 관절 1 및 2의 원하는 궤적  
Desired trajectories of Joint 1 and Joint 2.

$$\theta_{1d} = a_1 + b_1(\cos(2t) - \cos(4t))$$

$$\theta_{2d} = a_2 + b_2(\sin(t) + \sin(2t))$$

그림 5 부터 그림 18까지는 대표적인 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다.

그림 5는 링크 1의 추정질량  $m_1$ 이 초기치 4.0kg에서 실제치 4.0kg을 추정하는 것이고 그림 6은 링크 2의 추정질량  $\hat{m}_2$ 이 초기치 2.0kg에서 실제치 4.0kg을 추정하는 것을 보이고 있다.

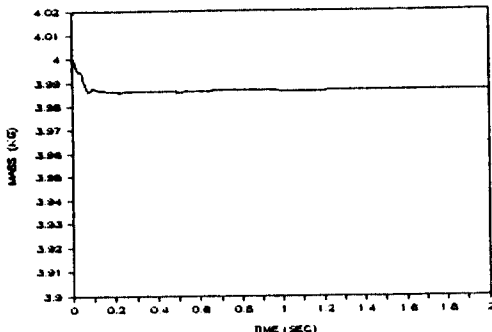


그림 5 링크 1의 질량 추정  
Estimate of the mass of link 1.

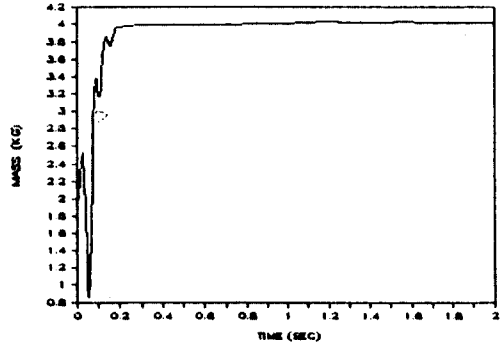


그림 6 링크 2의 질량 추정  
Estimate of the mass of link 2.

그림 7 및 그림 8은 질량추정이 다른 경우의 예를 보이고 있으며 그림 7은 링크 1의 추정질량이 초기치 4.0kg에서 실제치 3.0kg에 수렴되고 있는 것을 보이고 있으며 그림 8은 링크 2의 추정질량이 초기치 2.0kg에서 실제치 2.0kg을 추정하다가 0.1sec에서(화살표 지점) 실제 질량이 4.0kg으로 변경되었을 경우 이를 추정하는 곡선을 보이고 있다.

이때 추정 질량이 실제 질량에 접근하는 시간이 앞의 경우보다 지연되고 있는데 이는 초기치 2.0kg에서 실제치 2.0kg 추정시 누적된 오차에 기인된 것으로 보인다.

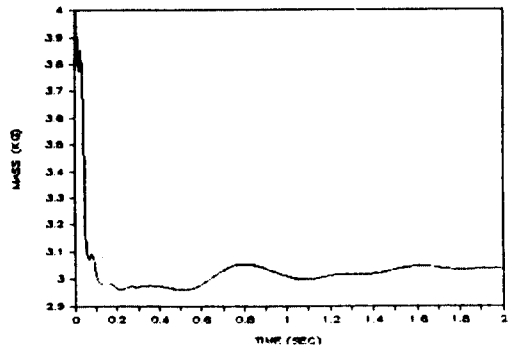


그림 7 링크 1의 질량 추정  
Estimate of the mass of link 1.

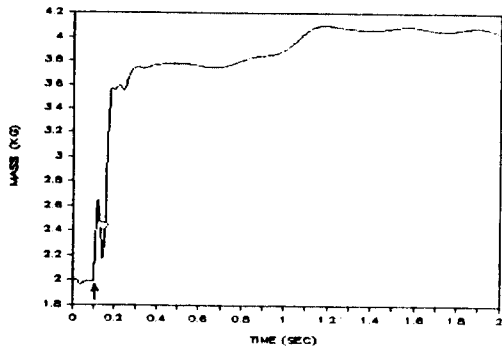


그림 8 링크 2의 질량 추정  
Estimate of the mass of link 2.

그림 9에서 그림14까지는 링크 1 및 링크 2의 질량이 각각 그림 5 및 그림 6과 같이 변하고 공급토크 경계치를 300(N·m)으로 할때 위치오차, 토크오차 및 공급토크를 보이고 있다.

그림 9 내지 그림12에서 보는 바와같이 위치 및 토크 오차 특성은 초기상태를 제외하곤 영에 수렴된 상태를 보이고 있다.

그림13 및 그림14는 관절 1 및 관절 2에 공급되는 공급 토크를 보이고 있으며 초기 상태 값이 300(N·m)인 것은 토크 경계치를 보이고 있는 것이다.

그림15 및 그림16은 종래 제어 방식<sup>(1), (2), (3), (4), (5)</sup>에서 많이 사용 되어온 토크 제어 알고리즘인 원하는 토크에 오차를 보정하는 방식, 즉  $T_a = T_d + b \cdot \Delta T$  여기서  $T_a$ 는 공급토크이고  $T_d$ 는 원하는 토크이며  $\Delta T$ 는 오차토크이고  $b$ 는 상수임, 과 본 논문의 방식을 비교한 것으로 토크 오차 특성이 종래 방식은 진동하는 반면 본 논문의 방식은 영에 수렴하고 있음을 볼 수 있으며 위치 오차도 개선 되었음을 알 수 있었고 이 경우에 비교를 용이하게 하기 위하여 토크 루우프 수행 시간을 위치 루우프 수행 시간과 같게 하였다.

그림17 및 그림18은 본 논문의 방식과 토크 제어부가 없는, 즉 Adaptive scheme 만이 있는 형태의 Computed torque 제어방식과 비교한 것으로 토크 제어부(TCC)를 들으로써

토크 및 위치특성이 현저히 개선되었음을 보여주고 있으며 이 경우에도 비교를 용이하게 하기 위하여 토크 루우프 수행 시간은 위치 루우프와 같게 하였다.

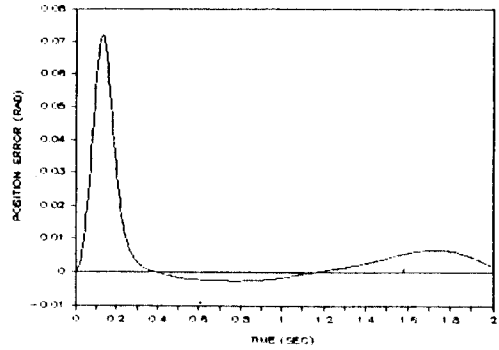


그림 9 관절 1의 위치 오차  
Position error of Joint 1.

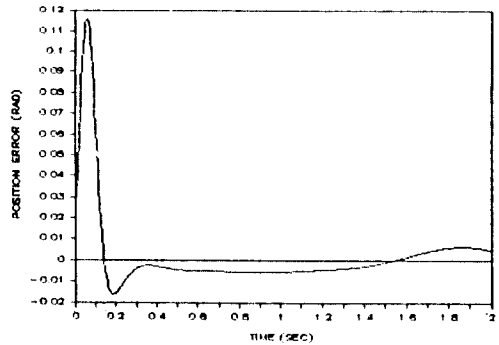


그림10 관절 2의 위치 오차  
Position error of Joint 2.

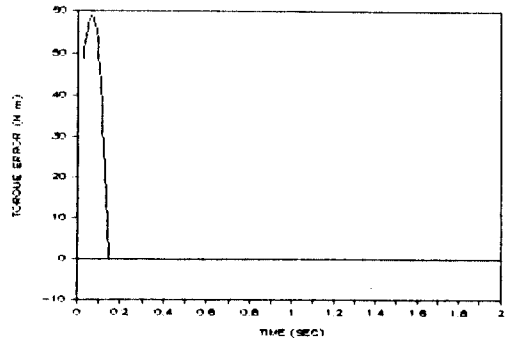


그림11 관절 1의 토크 오차  
Torque error of Joint 1.

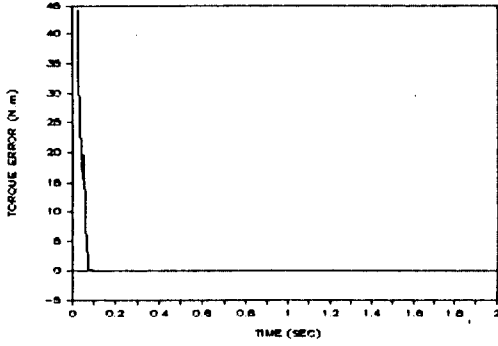


그림12 관점2의 토크오차  
Torque error of Joint 2.

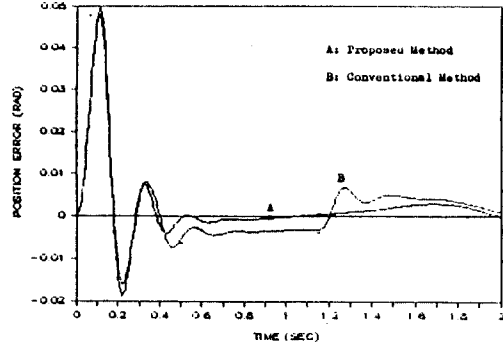


그림15 종래의 방식과 위치 오차 비교  
Position Error comparing with conventional method.

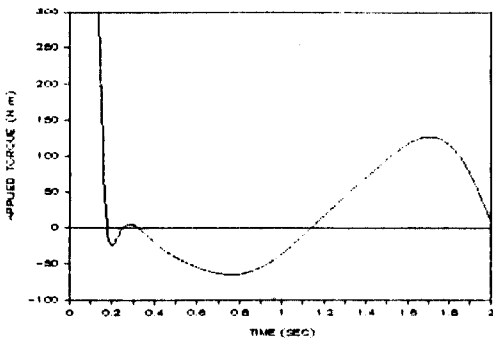


그림13 관점1의 공급토크  
Applied Torque of Joint 1.

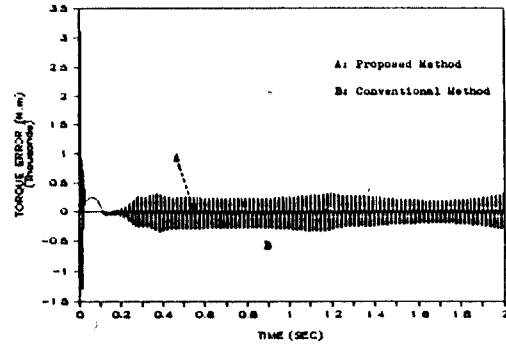


그림16 종래 방식과 토크오차 비교  
Torque Error comparing with conventional method.

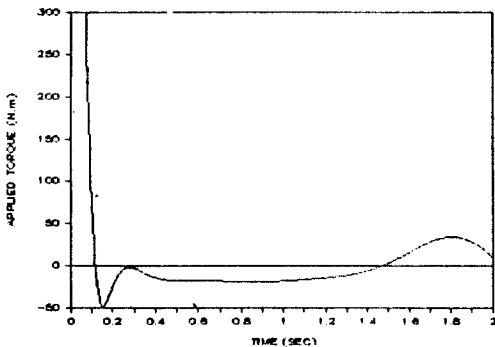


그림14 관점2의 공급토크  
Applied Torque of Joint 2.

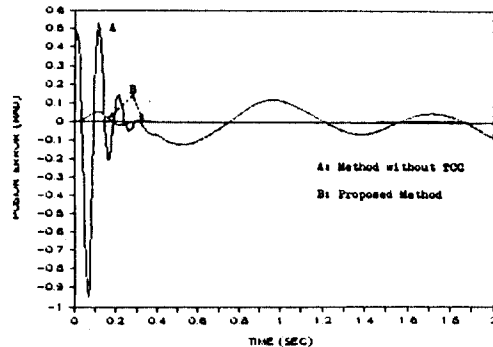


그림17 TCC 없는 방식과 위치 오차 비교  
Position Error comparing with method without TCC.



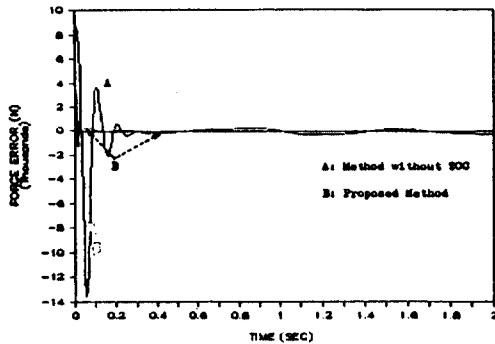


그림18 TCC 없는 방식과 토크 오차 비교.  
Torque Error comparing with method without TCC.

#### IV. 결 론

이상의 이론과 시뮬레이션에서 보는바와 같이 링크의 질량이나 물체의 무게를 알지 못하는 경우에도 그 값을 추정 함으로써 토크 및 위치 제어가 가능함을 보여 주었으며 이는 종래의 제어 방식에 비하여 변하는 질량이나 무게를 추정할 수 있어 효과적으로 토크 및 위치 제어가 됨을 알 수 있었으며 토크 제어부(TCC)가 없는 경우, 즉 Adaptive scheme 만이 있는 Computed torque 제어 방법보다 토크 오차 및 위치 오차 수렴 특성이 우수함을 알 수 있었다.

이는 현재 로봇의 작업 영역을 확장시킨 것으로 미지 변수 추정에 사용되는 계산량은 물체의 질량에 연관되는 수식만을 사용함으로 실시간 제어 이용에도 적절하다고 본다.

이 방법은 물체의 무게가 다른 작업을 하는 로봇에서 특히 유용하며, 이 경우 상이한 물체의 무게에 따라 적절한 토크를 가하게 됨으로써 효율적인 제어가 가능하다.

그러나 폭 넓게 물체의 무게가 변경 되는 경우에는 Gain값을 조정해 주어야 하는 점이 향후 더 연구 해야 할 과제이다.

#### 參 考 文 獻

(1) J. K. Salisbury, "Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates," Proc. of the 19 th

IEEE Conference on Decision and Cont., pp. 95 - 100, Albuquerque, New Mexico, November 1980.  
 (2) 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.  
 (3) Suguru Arimoto, "Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators Based on Learning Method," Proc. of ICAR '85, pp. 235 - 239, 1985.  
 (4) 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.  
 (5) D. E. Whitney, " Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions," Journal of Dynamic Systems, measurement and Control, ASME Trans., pp. 91 - 97, June 1977.  
 (6) OUSSAMA Khatib, "A unified Approach for motion and Force control of Robot Manipulator: The operational space formulation", IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol RA 3 No. 1, pp. 43 - 53, 1987.  
 (7) R. Paul, "Manipulator Cartesian Path Control", IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, vol. SMC-9, pp. 702 - 716, Nov. 1979.  
 (8) G. Goodwin and K. S. Sin, "Adaptive filtering, prediction and control," Prentice Hall, 1984.  
 (9) S. Boyd and S. Sastry, "Necessary and sufficient conditions for parameter convergence in adaptive control," Proc. of the Ames-Berkeley Conf. on Nonlinear Dynamics and control, pp. 81 - 101, Math-Sci Press, Brookline, MA, 1984.  
 (10) J. J. Craig, "Introduction to Robotics", Mechanics and control, Addison-Wesley, 1986.  
 (11) C. S. G. Lee, "Robot Arm Dynamics," Tutorials on Robotics, pp. 93 - 102, IEEE Press, 1984.  
 (12) 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.  
 (13) R. P. Anex and M. Hubbard, "Modeling and adaptive control of a Mechanical Manipulator," ASME J. Dynam. Syst. Meas. Contr: 1984: 106.  
 (14) A. Balestrino and G. De Maria "An adaptive model following control for fobotic Manipulators." ASME J. Dynam. Syst. Meas. Conty: 1983: 105.  
 (15) Idea, "Adaptive control of Manipulators in the Task Oriented Space," Proceedings of the 13th ISIR, p 13 - 13 to p13 - 28, 1983.  
 (16) J. Y. S. LUH, 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  
1984年 3月~現在: 漢陽大學校 大學院  
電氣工學科 博士課程  
1978年 4月~現在: 特許廳 審査官



任達鎬(Dal Ho IM) 正會員  
1933年 2月5日生  
1972年 3月~1975年 2月: 漢陽大學校大  
學院 電氣工學科 博士  
1970年 1月~現在: 漢陽大學校工科大学  
教授