

로봇트 매니플레이터의 비집중 적응제어

이 상철*
대유공업전문대학

정 찬수
승실 대학교

DECENTRALIZED ADAPTIVE CONTROL FOR ROBOT MANIPULATOR

Sang Cheol Lee*
Dae Yeu Tech. College

Chan Su Chung
Sung Sil Univ.

ABSTRACT

This paper presents a decentralized adaptive control scheme for multi-joint robot manipulators based on the independent joint control scheme. The control object is to achieve accurate tracking of desired joint trajectories.

The proposed control scheme does not use the complex manipulator dynamic model, and each joint is controlled simple by a feedback controller which ensure stable and also a position-velocity-acceleration feedforward controller and also auxiliary signal, with adjustable gains.

Simulation results are given for a two-link manipulator under independent control, proposed decentralized adaptive control of manipulator is feasible, in spite of a pay load variation and strong static and dynamic couplings that exist between the joints.

1. 서 론

최근의 산업현장은 다종종 소량생산 과 임금의 상승 및 작업환경의 개선과 같은 요인이 증가함에 따라 공장자동화 및 사무자동화에 대한 필요성이 요구되고, 이에 산업용 로봇트의 개발에도 관심이 증대되고 있다.

산업용 로봇트에 대한 종래의 제어방식은 end-effector가 미리 정해진 상수 이득을 갖는 간단한 servo-loop에 의해 제어되는 것으로 이러한 제어기법은 point-to-point와 같은 간단한 pick-and-place작업 등에서는 적절한것으로, 이때 매니플레이터의 동적 모델은 강하게 결합된(coupled) 비선형계통을 선형 계통으로 근사화시켜 제어할 수 있다는 가정을 한 경우이다.

이러한 선형화한 방식의 대표적인 예로 Computed Torque Method[1]는 매니플레이터의 파라미터와 동력학의 모델을 정확히 알아야하는 방식으로, 이때의 성능은 매니플레이터의 동력학을 표시하는 수학적인 모델에 의해 정해지는데 전동기 및 부하의 파라미터가 시간에 따라 변화하기 때문에 동작속도가 보통이거나 그이상인 경우에는 더욱 큰 상호 작용을 정확히 측정하기가 어려울 뿐 아니라 계산량이 방대함에 따라 실시간으로 적용하기가 사실상 불가능 하게 되기도 한다. 그러나 위의 방식들은 모든 정보처리 와 계산이 한장소에서 집중적으로 이루어짐을 전제로 하였기 때문에 시스템의 규모가 커지면 집중적인 정보수집이 비 경제적일 뿐 아니라 실시간 제어가 어려워지는 단점이 있다.

이에 따라 부하의 변동에 대처하여 이득값을 조정 할 수 있고 로봇트 매니플레이터 동적모델의 파라미터값을 정확히 알지 않아도 되는 적응제어 기법이 개발되었다.

적응제어기법에는 STAC(Self-Tuning Adaptive Control)방식과 MRAC(Model Reference Adaptive Control)

roi)방식이 있다.

MRAC방식은 Dubowsky와 Desforges[2]에 의해 처음으로 제안된 기법으로 기준모델의 상태방정식과 플랜트의 상태방정식 간의 오차함수를 2차 함수로 설정하여서 이 오차함수를 최소화 시키는 이득값을 찾고자 하는 방식이다.

Lee와 Chung[3]은 로봇의 비선형 동적 방정식을 공칭궤적에 대해 선형화시키고 선형화된 모델을 RLS 기법에 의해 파라미터값을 인식하는 알고리즘으로 로봇을 제어하였다. Lim 과 Eslami[4]는 Lyapunov방정식을 이용한 MRAC방법을 제시 하였다.

이에 본 연구에서는 로봇 모델의 파라미터와 부하의 영향을 받지않으면서 집중적응제어 기법에 비해 계산량을 줄일 수 있도록 각 관절로 제어를 분산하여 각 관절을 동시에 제어가 가능하도록 하는 비집중 적응제어기법에 대해 논하기로 한다.

2. 매니플레이터의 동적모델 및 제어기 설계

2-1. 동적모델

일반적으로 로봇 매니플레이터의 동역학 방정식을 기술하는 방법에는 여러가지가 있으나[14], 본 연구에서는 주어진 위치, 속도 및 가속도로부터 관절의 토크(또는 힘)를 얻는 방식으로서 페루우프 형태로 되어있는 Lagrange방식을 사용한다. n개의 관절을 가지고 있는 로봇 매니플레이터에서 T(t)를 관절에 가해지는 nx1 토크 벡터, $\theta(t)$ 를 nx1 관절각 벡터라 하자. 그러면 로봇의 동역학 방정식은 다음과 같이 관절간에 강하게 결합된 비선형 미분방정식으로 표시할 수 있다.

$$M(\theta, \dot{\theta})\ddot{\theta}(t) + N(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}(t) + G(\theta) = T(t) \quad (1)$$

여기서 $M(\theta, \dot{\theta})$ 는 $n \times n$ 관성 벡터, $N(\theta, \dot{\theta})$ 는 $n \times 1$ 인 코리올리스(Coriolis)와 원심력(Centrifugal)벡터, $G(\theta)$ 는 $n \times 1$ 인 중력 벡터로서 M, N와 G는 매니플레이터 end-effector의 이동에 따라 변하는 부하의 관성 파라미터와 같은 $\theta, \dot{\theta}$ 와 $\ddot{\theta}$ 의 비선형 함수이다.

매니플레이터의 제어문제는 임의의 시간 함수 $\theta_r(t)$ 를 nx1인 기준 궤적 벡터라 할때, 관절각 벡터 $\theta(t)$ 가 $\theta_r(t)$ 에 tracking할 수 있는 관절 토크

벡터 $T_i(t)$ 를 발생시키는 것이다.

비집중 적응 제어기법은 각 관절별로 부시스템을 정하여 이 부시스템 별로 해당관절을 제어하는 것이다.

그러나 이때의 부 시스템은 식(1)과 같이 관성, 코리올리스, 원심력 및 중력등이 강하게 결합이 되어 있기 때문에 다음과 같은 n개의 비선형 스칼라 미분방정식으로 표시할 수 있다.

$$m_{ii}(\theta)\ddot{\theta}_i(t) + \left[\sum_{j=1}^n m_{ij}(\theta)\dot{\theta}_j(t) \right] + n_i(\theta, \dot{\theta}) + g_i(\theta) = T_i(t) \quad (2)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

여기서 i 는 i 번째 요소, $m_{ii}(\theta)$ 는 i 번째 관절에서 본 i 번째 관절의 시변 유효 관성행렬, m_{ij} 는 j 번째 관절에서 본 i 번째 관절의 상호 관성행렬이다. 식(2)는 다음과 같은 형태로 표시할 수 있다.

$$m_{ii}(\theta)\ddot{\theta}_i(t) + d_i(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) = T_i(t) \quad (3)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

$$d_i(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) = \left[\sum_{j=1}^n m_{ij}(\theta)\dot{\theta}_j(t) \right] + n_i(\theta, \dot{\theta}) + g_i(\theta) \quad (4)$$

으로 다른 관절에서 영향을 주는 것과 같은 i 번째 joint에 대한 중력 coriolis와 원심력 토크등과 i 번째 제어기에 의한 외란 토크로서 취급되고 있다.

본 연구에서 제안한 비집중 제어적응기법은 i 번째 관절의 궤적 $\theta_i(t)$ 가 $\theta_{r,i}(t)$ 에 점근적으로 tracking하도록 관절토크 $T_i(t)$ 를 발생시키는 것으로 각 부제어기는 그 해당 부 시스템만을 제어하고, 부 시스템 사이의 정보교환은 없는 것으로 가정하였다.

II - 2. 적응 제어기 설계

실제궤적 $\theta_i(t)$ 와 기준궤적 $\theta_{r,i}(t)$ 사이의 초기 오차가 점근적으로 0 이 될 수 있도록, 즉 부시스템이 안정하도록 궤환제어기 $T_{bi}(t)$ 는 다음과 같이 선정한다.

$$T_{bi}(t) = k_{pi}(t)e_i(t) + k_{vi}(t)\dot{e}_i(t) \quad (5)$$

여기서, $e_i(t) = \theta_i(t) - \theta_{r,i}(t)$ 및 $\dot{e}_i(t) = \dot{\theta}_i(t) - \dot{\theta}_{r,i}(t)$ 는 i 번째 부 시스템의 위치 및 속도 tracking

오차이다. 원하는 궤적 $\theta_{r_i}(t)$ 를 입력시켜 매니플레이터가 원하는 궤적으로 tracking하도록 하는 전향제어기 $T_{F_i}(t)$ 는 다음과 같이 선정한다.

$$T_{F_i}(t) = A_i(t)\ddot{\theta}_{r_i}(t) + B_i(t)\dot{\theta}_{r_i}(t) + C_i\theta_{r_i}(t) \quad (6)$$

여기서, A, B, C는 θ_{r_i} , $\dot{\theta}_{r_i}$ 및 $\ddot{\theta}_{r_i}$ 와 부피에 따른 복소 비선형 함수이다.

또한, tracking성능을 개선시키고 외란을 보상시킬 수 있는 보조신호기 $F_i(t)$ 를 합성한다. 그러면 1번째 관절의 적응제어 법칙은 다음과 같다.

$$T_i(t) = F_i(t) + T_{B_i}(t) + T_{F_i}(t) \\ = F_i(t) + [K_{P_i}(t)e_i(t) + k_{V_i}(t)\dot{e}_i(t) \\ + A_i(t)\ddot{\theta}_{r_i}(t) + B_i(t)\dot{\theta}_{r_i}(t) + C_i(t)\theta_{r_i}(t)] \quad (7)$$

1번째 적응제어기 (7)을 1번째 동적모델 (3)에 가하여 정리하면 다음과 같은 오차방정식을 구할 수 있다.

$$m_{11}\ddot{e}_i(t) + k_{V_i}(t)\dot{e}_i(t) + k_{P_i}(t)e_i(t) = \\ d_1 - F_i - (m_{1j}(t) - A_i(t))\ddot{\theta}_{r_i}(t) - B_i(t)\dot{\theta}_{r_i}(t) - C_i(t)\theta_{r_i}(t) \quad (8)$$

$X_i(t) = [e_i(t), \dot{e}_i(t)]^T$ 를 $2n \times 1$ 인 위치-속도 오차라 하면 식(8)은 다음과 같은 상태 방정식으로 쓸 수 있다.

$$\dot{X}_i(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\Delta_1 & -\Delta_2 \end{bmatrix} X_i(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta_3 \end{bmatrix} \ddot{\theta}_{r_i}(t) \\ + \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta_4 \end{bmatrix} \dot{\theta}_{r_i}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta_5 \end{bmatrix} \theta_{r_i}(t) \quad (9)$$

여기서, $\Delta_0 = [m_{11}]^{-1}[d_1 - f_1]$, $\Delta_1 = [m_{11}]^{-1}[k_{P_i}]$,
 $\Delta_2 = [m_{11}]^{-1}[k_{V_i}]$, $\Delta_3 = [m_{11}]^{-1}[m_{1j} - A_i]$,
 $\Delta_4 = [m_{11}]^{-1}[B_i]$, $\Delta_5 = [m_{11}]^{-1}[C_i]$

또한 기존모델의 설정은 원하는 궤적으로 tracking할 수 있도록 다음과 같은 궤적 오차 방정식의 형태로 해야한다.

$$\dot{e}_i(t) + 2\xi_i\omega_i\dot{e}_i(t) + \omega_i^2 e_i(t) = 0 \quad (10)$$

여기서 ξ_i 와 ω_i 는 감쇠비와 자연주파수로 $e_i(t)$ 의 원하는 동적상태에 따라 설계자가 선정한다. 식 (10)을 vector 형태로 쓰기위해 원하는 속도와 위치의 오차를 $X_{m_i}(t) = [e_i(t), \dot{e}_i(t)]^T$ 로 하면 다음과 같다.

$$\dot{X}_{m_i}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & -2\xi\omega \end{bmatrix} X_{m_i}(t) = DX_{m_i}(t) \quad (11)$$

기존모델 (11)은 안정하기 때문에 다음과 같은 Lyapunov 방정식을 만족하는 대칭 정치 (s.p.d) 인

상수행렬 P가 존재한다.

$$PD + D^T P = -Q \quad (12)$$

여기서 Q는 s.p.d인 상수행렬이고, D는 기존모델의 상수행렬이다.

원하는 관절의 궤적과 실제 관절의 궤적 시이에 초 기값은 일반적으로 같기 때문에 초기 오차는 0, 즉 $X_{m_i}(0) = [e_{m_i}(0), \dot{e}_{m_i}(0)]^T$ 는 0이된다. 그러므로 제 차방정식 (10)에 의해 $X_{m_i}(t)$ 는 모든 t에 대해 0 이 된다.

본 연구는 임의의 원하는 궤적 $\theta_{r_i}(t)$ 에 대해서 tracking 오차 $X_i(t) = [e_i(t), \dot{e}_i(t)]^T$ 가 원하는 값 $X_{m_i}(t) = [0, 0]^T$ 에 점근적으로 될 수 있는 제어기의 로 부터 $2n \times 1$ 인 적응 오차 벡터 $E_i(t) = X_{m_i}(t) - X_i(t)$ 를 다음과 같은 오차 미분 방정식을 정의하지.

$$\dot{E}_i(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\Delta_1 & -\Delta_2 \end{bmatrix} E_i(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ D_1 - \Delta_1 & D_2 - \Delta_2 \end{bmatrix} X_i(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ D_0 - \Delta_0 \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} 0 \\ D_3 - \Delta_3 \end{bmatrix} \ddot{\theta}_{r_i}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ D_4 - \Delta_4 \end{bmatrix} \dot{\theta}_{r_i}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ D_5 - \Delta_5 \end{bmatrix} \theta_{r_i}(t) \quad (13)$$

스칼라 Lyapunov 함수를 다음과 같이 정의하지.

$$V_i(t) = E_i^T P_i E_i + (\Delta_0 - \Delta_0^*)^T Q_{0i} (\Delta_0 - \Delta_0^*) \\ + \sum_{n=1}^5 ((\Delta_n - \Delta_n^*)^T Q_{ni} (\Delta_n - \Delta_n^*)) \quad (14)$$

이 Lyapunov 방정식을 시간에 대해 미분한 값이 0 보다 작다면 Lyapunov 2번째 방법에 의해 적용되어 질 위치-속도 이득 값의 각 파라미터는 다음과 같고, 또한 제어기의 적응법칙 (7)은 1번째 부 시스템의 점근적인 안정을 보장하게 된다.

$$f_i(t) = f_i(0) + \delta_i \int_0^t r_i(t) dt + \rho_i r_i(t) \\ k_{P_i}(t) = k_{P_i}(0) + \alpha_{1i} \int_0^t r_i(t) e_i(t) dt + \beta_{1i} r_i(t) e_i(t) \\ k_{V_i}(t) = k_{V_i}(0) + \alpha_{2i} \int_0^t r_i(t) \dot{e}_i(t) dt + \beta_{2i} r_i(t) \dot{e}_i(t) \\ A_i(t) = A_i(0) + r_{1i} \int_0^t r_i(t) \ddot{\theta}_{r_i}(t) dt + \lambda_{1i} r_i(t) \ddot{\theta}_{r_i}(t) \\ B_i(t) = B_i(0) + r_{2i} \int_0^t r_i(t) \dot{\theta}_{r_i}(t) dt + \lambda_{2i} r_i(t) \dot{\theta}_{r_i}(t) \\ C_i(t) = C_i(0) + r_{3i} \int_0^t r_i(t) \theta_{r_i}(t) dt + \lambda_{3i} r_i(t) \theta_{r_i}(t) \quad (15)$$

여기서 $r_i(t) = P_2 e_i(t) + P_3 \dot{e}_i(t)$ 이다. 또한, 전체 적으로 점근적인 안정성을 보이기 위해 식(13)의 2차인 부시스템의 오차방정식을 합하여 합성 오차 방정식을 만들고, 각 부시스템의 local Lyapunov 함수 $V_i(E_i)$ 를 합성하여 전체적인 함수 $V(E)$ 로 하여

도 $V(E) > 0$, $\dot{V}(E) < 0$ 이 되므로 합성시스템은 $[m, d]$ 가 존재하는 조건에서도 안정됨을 알수있다.

2-3. 결합항의 안정조건

앞절에서는 적응법칙을 유도하기 위해 결합항 d ($\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$)를 느린 시변, 즉 $ds \rightarrow 0$ 으로 가정하였다.

그러나 이러한 가정을 제거하고도 부시스템의 안정성에 대한 시변 결합항에 대해서 논하기로한다.

식(14)의 Lyapunov함수와 결합항 d 를 시변함수라 하자. 이경우 $\dot{V}_d(t)$ 을 $V(t)$ 에 부기하면 다음과 같다.

$$\dot{V}_d(t) = -2Q_0 \frac{d_i(t)}{m_i} \left| \frac{f_i(t) - d_i(t)}{m_i} - f_i^* \right| \quad (16)$$

$Q_{0i} = m_i / \delta_i$, $f_i(t) = Q_{0i} r_i(t) = (\rho / m_i) r_i(t)$ 와 식

(15) $f(t)$ 를 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} \dot{V}_d(t) &= \frac{2}{m_i \delta_i} d_i(t) [f_i(t) - d_i(t) - \rho r_i(t)] \\ &= \frac{2}{m_i \delta_i} d_i(t) [d_i(t) - f_i(0) - \delta_i \int_0^t r_i^1(t) dt] \end{aligned} \quad (17)$$

그러면 $V(t)$ 는 양정치인 함수이기 때문에 부 시스템이 점근적인 안정이 되기 위해서는 다음의 식이 (-)의 값을 가져야 한다.

$$\dot{V}(t) = \dot{V}_0(t) + \dot{V}_d(t) \quad (18)$$

여기서 $V_0(t)$ 는 결합항이 느린 시변이라고 가정할 경우에 주어진 (-)함수이다. 그러면 $\dot{V}_d(t) < -\dot{V}_0$ (t)이 되어야 한다. 즉 모든 t에 대하여

$$d_i(t) [d_i(t) - f_i(0) - \delta_i \int_0^t r_i^1(t) dt] < - \frac{m_i \delta_i}{2} V_0(t) \quad (19)$$

의 조건은 결합항이 시변인 경우 부 시스템이 안정할 수 있는 조건이 된다.

3. 시뮬레이션 및 결과

본 연구에서 제안한 비집중 제어기법의 유용성을 실험하기 위해 그림 2 와 같이 수직면에 마찰이 없는 2-link 매니퓰레이터를 모델로 하였다.

이때의 동적 방정식은 관절 토크 $T = [T_1, T_2]^T$ 와 관절각 벡터 $\theta = [\theta_1, \theta_2]^T$ 로 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} T &= M(\theta) \ddot{\theta}_r(t) + N(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + M^J T(\theta) [J(\theta) \ddot{\theta} \\ &\quad + J(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + g] \end{aligned}$$

본 시뮬레이션에서는 $m_1 = 0.5$ [kg], $m_2 = 0.5$ [kg],

$l_1 = l_2 = 0.3$ [m]로 하였다.

본 연구는 관절각 $\theta_1(t)$ 와 $\theta_2(t)$ 가 원하는 궤적으로 tracking 할수있는 독립제어기를 설계하는 것으로 본 연구에서는 기존 궤적은 Cubic polynomial 기법[14]을 사용하여 3[sec]에 초기위치 [$\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$]에서 최종위치 [$\theta_1 = 50^\circ$, $\theta_2 = 50^\circ$]로 가는 것으로 하였다.

또한 관절각은 다음과 같이 동일한 형태를 가진 독립적인 적응제어기식 (16)으로 적용시켰다.

보조신호, 궤환이득 및 전향이득 등의 초기값은 0으로 하였고 이때 샘플링 시간은 1[ms]로 하였다.

그림 3, 4, 5는 매니퓰레이터에 부하를 무부하, 정적 부하 및 최대부하에서 시뮬레이션한 결과로. 관절각 $\theta_1(t), \theta_2(t)$ 와 기준궤적 $\theta_{r1}(t), \theta_{r2}(t)$ 사이에 궤적오차가 거의 0에 접근하는 것을 알수 있고, 또한 각관절 사이에 동적항과 정적항의 강한 결합에도 불구하고 비집중 제어기법의 유용함을 알수 있었다.

또한 그림 6, 7은 정상동작중 1[sec]순간에 부하의 상태를 무부하에서 정적, 정적에서 최대로 갑자기 변화시킨 경우에도 부하변동의 영향이 거의 없음을 알 수 있었다.

즉 부하의 수학적인 모델 및 파라미터값은 로봇의 동작을 시뮬레이션 하는 데만 쓰일 뿐 제어법칙에는 이용되지 않고있다.

4. 결 론

본 연구는 디관절 로봇 매니퓰레이터의 제어에 대한 간단한 비집중 제어기법에 대해 고찰한 것이다. 적응제어기법은 관절중의 비선형 시분변 상호작용도 미지의 시변 부하와 마찬가지로 매니퓰레이터 동적특성의 변화분에 대한 보상을 하는 것이다.

본 비집중 제어기법은 집중 제어기법보다 계산량이 작다는 것이다. 즉 n관절을 가지는 경우에 집중 제어기는 각 샘플링 주기에 $5n^2 + n$ 개의 적응이득이 필요한데 비해, 비집중 제어기는 6n개의 적응 이득이 필요하다. 더구나 본산 계산으로 각 제어기기 6개의 이득 계산만 함으로서 빠른 샘플링으로 실시간 동작이 가능하며 이는 시스템의 성능을 개선시켰다. 또한 신뢰성이 더욱 보장되는 것으로 한개의

제어기가 오차가 생겼을 경우 한개의 루우프만 영향을 주는 반면, 집중제어 기법은 전체 시스템에 영향을 주게된다. 그러나 비집중적응 제어 기법은 상호결합항을 보상해야 하기 때문에 집중제어 방식보다는 큰 오차값을 가지게 되는 단점도 가지고 있으나, 제어기의 간편성과 단순성으로 매니플레이터와 부하 파라미터의 변화에 대한 강인성으로 인한 하는 귀적으로 갈 수가있고, 실제적인 응용에서 복잡한 매니플레이터의 제어에 용이하다.

< 참고 문헌 >

1. W.H.Chi, P.R.Paul, "Resolved Motion Force Control of Robot Manipulator," IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. 25, 1980, pp 468 - 474
2. S.Dubowsky, D.T.DesForges, "The application of model referenced adaptive control to robotic manipulators", ASME J. Dyna. Syst. Meas. Contr., Vol. 101, No. 3, 1979, pp193-200
3. C.S.G.Lee, M.J.chung, "An adaptive control strategy for Mechanical Manipulator," IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. 29, No. 9, 1984, pp837-840
4. K.Y.Lim, M.Eslami, "Adaptive Controller Design for Robot Manipulators System using Lyapunov Direct Method," IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. 30, No. 12, 1985, pp129 - 133
5. P.A. Ionnu, "Decentralized adaptive control of interconnected systems," IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. AC-31, No. 4, 1986, pp291-298
6. H.Seraji, M.Jamshidi, Y.T.Kim, M.Shahinpoor, "Linear multivariable control of two-link robots," J.Roboti syst., Vol. 3, No. 4, 1986, pp349-365
7. B.Armstrong, O.J.Burdick, "The explicit dynamic model and inertial parameters of the PUMA 560 arm," in Proc: IEEE Int. conf. on Robotics and Automation, (San Fransisco, CA), 1986, pp510-518
8. H.Seraji, "Direct adaptive control of manipulators in Cartesian space," J.Robotic Syst., Vol. 4, No. 1, 1987, pp157-178
9. C.Sanson, "Robust Control of a Class of Non-Linear System Application to Robotics," Int. J. Adaptive Contr. Sign. Procc., Vol. 1, 1987, pp49 - 68
10. K.Y.Lim, "Model Reference Adaptive control of Linear System with Improved Convergence Rate-Parameter Adaption Method," Trans. KIEE, Vol. 3, No. 12, 1988, pp884-893
11. H. Seraji, "A new approach to adaptive control of manipulators," ASME. J. Dyna. Syst. Meas. Contr., Vol. 109, No. 3, 1987, pp 193 - 202
12. M. Drady, et el, ROBOT MOTION, MIT press, 1982

13. P. K. Sinha, Multivariable Control: An Introduction, Merce - Dekker, 1984
14. K. S. Fu, R. C. Gonzalez, C. S. G. Lee, "Robotics control, Sensing, Vision and Intelligence," McGraw Hill, 1987

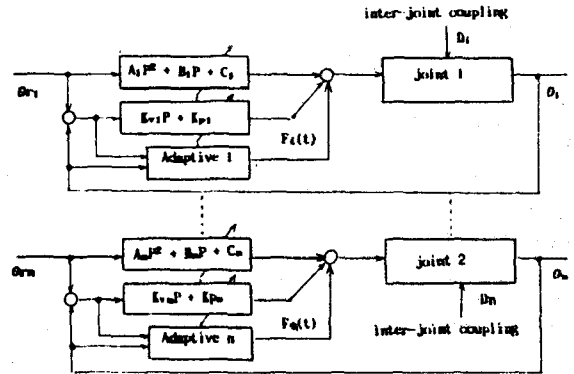


그림 1 제안한 비집중 적응 제어도
Fig. 1 Proposed decentralized adaptive control scheme.

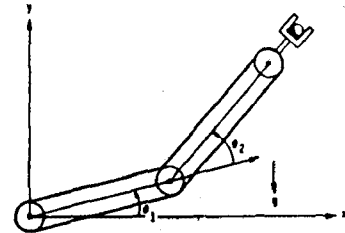


그림 2 2-link 매니플레이터
Fig. 2 2-link manipulator.

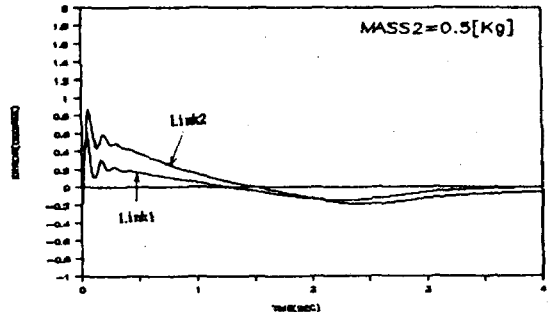


그림 3 무부하시 위치 오차
Fig. 3 Position error with no-load.

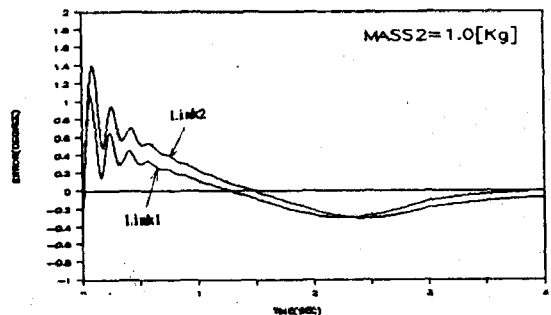


그림 4 중부하시 위치 오차
Fig. 4 Position error with medium load

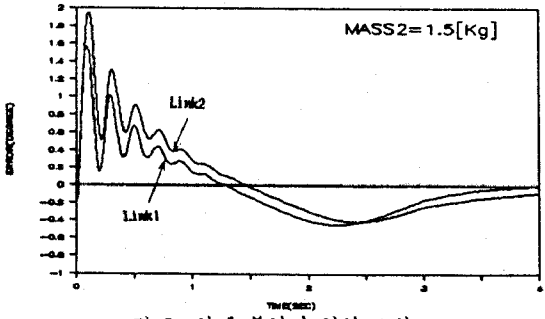


그림 5 최대 부하시 위치 오차
Fig. 5 Position error with maximum load.

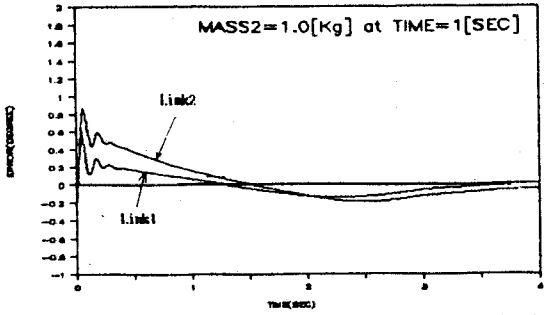


그림 6 무 부하시 위치 오차(1초에서 부하가 급변한 경우)
Fig. 6 Position error with no load
(in case of suddenly mass change at 1 second)

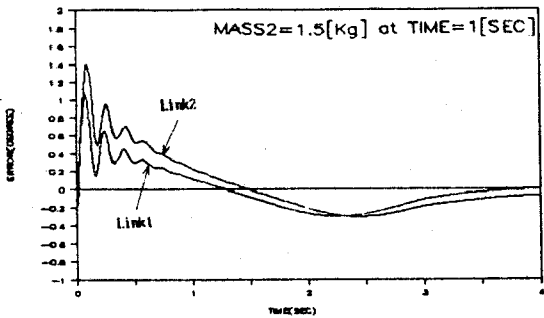


그림 7 중 부하시 위치 오차(1초에서 부하가 급변한 경우)
Fig. 7 Position error with medium load
(in case of suddenly mass change at 1 second)