

分散適應制御技法을 이용한 産業用 로봇制御

Industrial Robot Control using the Distributed Adaptive
Control Techniques

鄭 讚 壽* · 李 相 喆**
(Chan-Soo Chung · Sang-Cheol Lee)

요 약

본 연구는 공장자동화에 이용되는 산업용 로봇의 분산 적응 제어기법을 고찰한 것이다. 이 제어기법은 매니플레이터가 원하는 경로를 따라 진행할 때 부하의 변동에 신속히 대응할 수 있도록 함으로서 실시간 제어가 가능하게 하는 것이다. 제어방식은 전체 시스템을 규모가 작은 여러개의 부시스템으로 분리하고, 각 부시스템을 공칭제어기와 적응제어기로 제어하는 것이다.

이 제안한 기법을 컴퓨터 시뮬레이션한 결과 매니플레이터 동력학이 비선형이며 부하변동이 있을 때에도 원하는 궤적에 양호하게 추종함을 알 수 있었다.

Abstract

The paper considers a distributed adaptive control technique for Industrial Robots which contribute to the factory automation. The control object is to tracking for a desired trajectories under various load conditions, rapidly against load variation. These control techniques divided whole system into sub-systems which is controlled with the Nominal and Adaptational controllers. And also the asymptotic stability of these substem was proved.

Simulation results shown that the proposed techniques was feasible in spite of nonlinear dynamics of robot manipulator and payload variations.

1. 서 론

공장자동화에 이용되는 제어장비는 부하의

변동에 신속히 대응할 수 있어야 하고, 실시간으로 제어가 가능해야 한다. 이에따라, 산업용 로봇도 작업수행 능력이 고속화되고 더욱 정밀한 정확도를 요구함에 따라 기존의 제어방식으로는 매니플레이터 자체의 복잡한 동력학과 비선형성으로 인하여 위의 요구를 충족시켜 주

* 正會員: 崇實大學校 工科大學 電氣工學科

** 正會員: 大宥工業專門大學 電氣工學科 助教授

지 못하고 있다. ^{1)~3)} 이러한 문제점을 보완하는 방법으로 복잡한 동적모델을 직접 다루지 않고 간단한 선형모델에 관한 적응 알고리즘을 구현하여 효율적으로 제어할 수 있는 적응제어 이론을 도입한 기법이 제시되고 있다. ^{4)~7)}

적응제어기법 중에서 집중 적응제어 기법은 모든 정보처리와 계산이 한 장소에서 집중적으로 이루어짐을 전제로 하였기 때문에 시스템의 규모가 커지면 집중적인 정보수집이 비 경제적이고 실시간 제어가 어려워진다는 단점이 있다. ^{8) 9)}

이에따라 집중 적응제어 기법의 단점을 보완하기 위해 전체 시스템을 낮은 차원의 부시스템으로 모델링하고, 각 부시스템별로 분산적인 제어를 함으로서 실시간 제어가 가능한 비집중 적응제어 기법에 대해 관심이 커지고 있는바^{10)~13)}, 본 연구에서도 로보트 시스템을 여러개의 부시스템으로 모델링하고, 각 부시스템별로 분산제어를 고찰하는 것으로, 이때 각 부시스템의 제어기 구조는 공칭 제어기와 적응제어기로 구성하였고, 각 부시스템은 Lyapunov의 직접적인 방법을 이용하여 점근적인 안정이 됨을 증명하였다.

이 기법을 2-링크 매니퓰레이터를 모델로 하여 컴퓨터 시뮬레이션을 하였고, 기존의 방식 ¹³⁾ 에 비해 제어성능을 크게 저하시키지 않으면서 계산량을 줄임으로서 실시간 제어에 유리하도록 동력학 모델의 샘플링 갱신속도를 제어기의 샘플링 갱신속도에 비해 느리게 하였다.

2. 로보트 매니퓰레이터의 섭동 방정식

매니퓰레이터의 동적방정식은 관절의 입력토크와 운동과의 관계식으로, 동적특성을 나타내는 데에는 Lagrange방법이 많이 이용된다. 이 방법을 적용할 때, 관절 공간에서 n개의 관절에 대한 Lagrange의 운동방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다. ¹⁴⁾

$$D(\theta) \ddot{\theta}(t) + h(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau(t) \dots\dots\dots(1)$$

여기서, $\tau(t)$ 는 $n \times 1$ 인 입력토크 벡터, $D(\theta)$

는 $n \times n$ 관성 행렬계수, $h(\theta, \dot{\theta})$ 는 $n \times 1$ 인 비선형 Coriolis와 원심력 행렬계수 $G(\theta)$ 는 $n \times 1$ 인 중력벡터, $\theta(t)$, $\dot{\theta}(t)$, $\ddot{\theta}(t)$ 는 각위치, 각속도, 각가속도 벡터이다. 식(1)의 운동방정식에서 매니퓰레이터의 $2n$ 인 상태벡터를 $x(t) = [\theta^T(t), \dot{\theta}^T(t)] = [\theta_1^T, \theta_1^T \dots, \theta_n^T, \dot{\theta}_1^T, \dot{\theta}_2^T \dots \dot{\theta}_n^T]$, n차의 입력벡터를 $u(t) = [\tau_1(t), \tau_2(t), \dots, \tau_n(t)]^T$ 로 하여 상태 벡터로 정의하면 다음과 같다. ¹⁵⁾

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \dots\dots\dots(2)$$

$f(\cdot)$ 는 $2n \times 1$ 인 연속 미분가능한 벡터함수이다. 식(2)의 시스템에 대한 공칭 상태를 $x_n(t)$, 공칭 입력을 $u_n(t)$ 로 하면, 공칭 상태벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{x}_n(t) = f(x_n(t), u_n(t)) \dots\dots\dots(3)$$

공칭궤적에 대해 식(2)를 Taylor급수로 전개하고, 고차항을 무시하면, 이 제어시스템은 다음과 같은 선형화 섭동방정식으로 표시할 수 있다.

$$\delta \dot{x}(t) = A(t) \delta x(t) + B(t) \delta u(t) \dots\dots\dots(4)$$

여기서, $\delta x(t) = x(t) - x_n(t)$, $\delta u(t) = u(t) - u_n(t)$ 이고, 이때 $A(t)$ 와 $B(t)$ 는 공칭궤적에서 계산되는 시변 매개변수로서 다음과 같다.

$$A(t) = \begin{bmatrix} \dots\dots\dots O_n \dots\dots\dots \vdots \dots\dots\dots I_n \\ \frac{\partial [D^{-1} \theta_n(t) \{-h(\theta_n(t), \dot{\theta}(t)) - G(\theta(t)) + \dot{\theta}(t)\}]}{\partial \theta_n} \end{bmatrix}$$

$$B(t) = \begin{bmatrix} \dots\dots\dots O_n \\ \vdots \\ D^{-1}(\theta(t)) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(5)$$

식(5)에서 링크와 부하의 매개변수들이 제어측 갱신속도에 비해 천천히 변한다고 가정하면, 이들 매개변수들은 일정 시구간에서 상수로 간주할 수 있다. ¹⁵⁾

그러면 식(4)는 다음과 같다.

$$\delta \dot{x}(t) = A \delta x(t) + B \delta u(t) \dots\dots\dots(6)$$

여기서 매개변수 A와 B는 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} \dots\dots\dots O_n \dots\dots\dots I_n \\ \vdots \\ A^* \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \dots\dots\dots O_n \\ \vdots \\ B^* \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(7)$$

여기서 A^* 와 B^* 는 시불변 매개변수이다.

3. 비집중 적응제어 기법

n개의 부시스템을 가지고 있는 대규모 선형 시불변시스템은 다음과 같이 표시한다.¹³⁾

$$x_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + \sum_{j=1}^n A_{ij} x_j(t) \quad \dots\dots(8)$$

여기서, x_i 는 $n \times 1$ 인 i 번째 부시스템의 상태, u_i 는 $m \times 1$ 인 입력, A_i , B_i 와 A_{ij} 는 같은 차수의 상수행렬이다. 전체 시스템의 상태 $x(t) = [x_1^T(t), x_2^T(t), \dots, x_n^T(t)]$, 입력 $u(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)]^T$ 이고, $n \times n$ 행렬 A_i 와 $n \times 1$ 행렬 B_i 는 다음과 같은 가제어 표준형으로 주어진다.¹⁴⁾

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 \\ a_{i1} & a_{i2} & a_{in} \end{bmatrix} \quad B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots(9)$$

$n_i \times n_i$ 행렬 A_{ij} 는 다음과 같이 정한다.

$$a_{ij}^{pq} \leq \mu_{ij}, \quad p < q \quad \dots\dots(10)$$

여기서 $p=1, 2, \dots, n_i$, $q=1, 2, \dots, n_i$ 이다.

가정 1.

a_{ij}^{pq} 는 A_{ij} 의 pq 번째 요소로서 μ_{ij} 는 기지의 상수이다. 또한 이때의 계수값은 미지이나 경계값은 알고 있는 것으로 한다.

본 연구는 각 부시스템에서의 상태 $x_i(t)$ 가 0이 되도록 하여 전체 시스템이 점근적으로 안정하도록 하는 것이다. 이를 위해 $[A_{mi}, B_{mi}]$ ($i=1, 2, \dots, n$)가 기준 모델의 가제어 행렬쌍이라 하자. 식(8)을 정리하면 다음과 같다.

$$x_i(t) = A_{mi} x_i(t) + B_{mi} u_i(t) + (A_i - A_{mi}) x_i(t) + (B_i - B_{mi}) u_i(t) + \sum_{j=1}^n A_{ij} x_j(t) \quad \dots\dots(11)$$

시스템(9)를 제어하기 위해 다음과 같이 부제어기를 구성한다.

$$u_i(t) = -(F_i(t) + K_i) x_i(t) - G_i(t) u_i(t) \quad \dots\dots(12)$$

여기서 $F_i(t)$ 와 $G_i(t)$ 는 매개변수 적응법칙이고, K_i 는 다음의 관계를 만족하는 상수 행렬이다.

$$K_i = B_{mi}^T P_i \quad \dots\dots(13)$$

식(13)에서 대칭 정치행렬 P_i 는, 대칭 정치행렬 Q_i 와 상수 α_i 에 대해 다음과 같은 Riccati 방정식의 해이다.¹³⁾

$$(A_{mi} + \alpha_i I_{n_i})^T P_i + P_i (A_{mi} + \alpha_i I_{n_i}) - P_i B_{mi} B_{mi}^T P_i Q_i = 0 \quad \dots\dots(14)$$

각 부시스템의 적응 제어기(12)를 시스템(11)에 가하면 페루우프 시스템은 다음과 같다.

$$\dot{x}_i(t) = A_{mi} - B_{mi} K_i x_i(t) + (A_i - A_{mi} F_i(t)) x_i(t) + (B_i - B_{mi} - B_{mi} G_i(t)) u_i(t) + \sum_{j=1}^n A_{ij} x_j(t) \quad \dots\dots(15)$$

식(15)에서 $(A_{mi} - B_{mi} K_i)$ 는 α_i 의 안정도를 가지는 안정행렬이다.

가정 2. 정합조건

주어진 A_i , B_i 및 A_{mi} , B_{mi} 에 대해 다음 관계를 만족하는 상수행렬 F_i^* 와 G_i^* 가 존재한다.

$$\begin{aligned} A_i - A_{mi} &= B_{mi} F_i^* \\ B_i - B_{mi} &= B_{mi} G_i^* \quad \dots\dots(16) \end{aligned}$$

위의 가정 2.에서 행렬 $[A_i - A_{mi}]$ 와 $[B_i - B_{mi}]$ 는 벡터 B_{mi} 의 행벡터에 선형종속이 됨을 알 수 있다.¹¹⁾

Lyapunov의 안정 이론에 의해 다음과 같은 매개변수 적응법칙을 제안한다.

$$\begin{aligned} \dot{F}_i(t) &= \Gamma_{1i} K_i x_i(t) x_i^T(t) \\ \dot{G}_i(t) &= \Gamma_{2i} K_i x_i(t) u_i^T(t) \quad \dots\dots(17) \end{aligned}$$

여기서, Γ_{1i} , Γ_{2i} 는 대칭이고 정치인 적응 이득행렬이다. 식(16)의 정합조건을 이용하여 페루우프 시스템을 구하면 다음과 같다.

$$\dot{x}_i(t) = (A_{mi} - B_{mi} K_i) x_i(t) + B_{mi} (F_i^* - F_i(t)) x_i(t) + B_{mi} (G_i^* - G_i(t)) u_i(t) + \sum_{j=1}^n A_{ij} x_j(t) \quad \dots\dots(18)$$

전체시스템의 안정은 다음의 정리를 통해 보장된다.

정리

대칭행렬 L 의 ij 번째 요소 l_{ij} 가 음의 값이 되도록 차수 N 인 α_i ($i=1, 2, \dots, N$)를 선정한다면 식(18)의 페루우프 시스템은 안정하다. 즉,

$$l_{ij} = \begin{cases} -\lambda_m[D_i + 2\alpha_i P_i] / \lambda_m(P_i) & : i=j \\ \|A_{ij}\| + \|A_{ji}\| & : i \neq j \end{cases} \quad \dots\dots(19)$$

여기서 $\lambda_m[\cdot]$ 는 정방행렬 $[\cdot]$ 의 최소 고유치, $\lambda_M[\cdot]$ 는 $[\cdot]$ 의 최대 고유치, P_i 는 식(14)의 해이고, D_i 는 다음과 같다.

$$D_i = Q_i + P_i B_{mi} B_{mi}^T P_i \quad \dots\dots(20)$$

증명) $\Delta F_i(t)$ 와 $\Delta G_i(t)$ 가 다음과 같다 하자.

$$\begin{aligned} \Delta F_i(t) &= F_i(t) - F_i^* \\ \Delta G_i(t) &= G_i(t) - G_i^* \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(21)$$

정합조건(16)를 이용하면 다음과 같은 폐루프 시스템이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= (A_i - B_i K_i) x_i(t) - B_{mi} \Delta F_i(t) - B_{mi} \Delta G_i(t) \\ &+ u_i(t) + \sum_{j \neq i}^n A_{ij} x_j(t) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(22)$$

Lyapunov 함수를 다음과 같이 선정한다.

$$\begin{aligned} V(t) &= \sum_{j=1}^n \{ x_j^T(t) P_j x_j(t) + \text{Tr}(\Delta F_j^T(t) \Gamma_{1j}^{-1} \Delta F_j(t)) \\ &+ \text{Tr}[\Delta G_j(t) \Gamma_{2j}^{-1} \Delta G_j^T(t)] \} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(23)$$

시간 t에 대하여 미분하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \sum_{j=1}^n \{ 2\text{Tr}\{ \Gamma_{1j}^{-1} \Delta F_j(t) - K_j x_j^T(t) \}^T (\Delta F_j^T(t)) \\ &+ 2\text{Tr}\{ (\Gamma_{2j}^{-1} \Delta G_j(t) - K_j x_j(t) u_j^T(t) G_j(t)) \\ &- x_j^T(t) [D_j + 2\alpha_j P_j] x_j(t) + 2x_j^T(t) P_j \sum_{j \neq i}^n A_{ij} x_j(t) \} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(24)$$

V(t)를 계산하기 위해 적응법칙 (17)을 이용하면

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \sum_{i=1}^n \{ -x_i^T(t) [D_i + 2\alpha_i P_i] x_i(t) \} + 2x_i(t) \\ &P_i \sum_{j=1}^n A_{ij} x_j(t) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(25)$$

이 식을 다음과 같은 부등식들을 이용하여 정리한다.¹⁸⁾

(1) 실대칭 행렬의 부등식

$$\lambda_m[R_i] \|x_i\|^2 \leq x_i^T R_i x_i \leq \lambda_M[R_i] \|x_i\|^2 \quad \dots\dots(26)$$

(2) Cauchy-Schwarz의 부등식

$$\begin{aligned} x_i^T(t) (P_i A_{ij} x_j(t)) &\leq \|x_i(t)\| \|P_i A_{ij} x_j(t)\| \\ &\leq \|x_i(t)\| \|P_i\| \|A_{ij} x_j(t)\| \leq \|x_i(t)\| \|P_i\| \\ &\|A_{ij}\| \|x_j(t)\| \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(27)$$

(3) Induced Norm

$$\|P\| = \max_{x \neq 0} \frac{\|P_i\| \|x\|}{\|x\|} \quad \text{와} \quad P_i x = \lambda [P_i] x \text{에서}$$

$$\|P\| \leq \lambda_M[P_i] \quad \dots\dots\dots(28)$$

등의 관계를 이용하여 정리하면 식(25)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \sum_{i=1}^n \{ \lambda [P + 2[P_i + 2\alpha_i [P_i]] \|x_i\| \sum_{j=1}^n \\ &\|A_{ij}\|_{UB} \|x_j^T(t)\| = -\lambda_M[P_N] x^T(t) L x(t) \} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(29)$$

여기서, $\alpha_i (i=1, 2, \dots, n)$ 가 증가할때 각 i에서 L이 양의 정치값이 될 수 α_i 를 선정한다면

$$V(t) < 0 \quad \dots\dots\dots(30)$$

가 된다. 즉 위 시스템은 점근 안정이 된다.

4. 시뮬레이션 및 결과고찰

본 연구에서 제안한 비집중 제어기법의 유용성을 실험하기 위해 그림1과 같이 수직면에 마찰이 없는 2-링크 매니퓰레이터를 모델로 하였다.

이때의 모델의 동적방정식은 관절 토크 $T = [T_1, T_2]^T$ 로, 관절각 벡터 $\theta = [\theta_1, \theta_2]^T$ 로 하면 다음과 같은 비선형 미분방정식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} T_i &= M_{ij}(\theta) \ddot{\theta}_j + N_i(\theta, \dot{\theta}) + G_i(\theta) \\ &+ {}_m J^T(\theta) \{ J(\theta) \dot{\theta} + J(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + g_j \}_{ji} \end{aligned}$$

여기서

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} a_1 + a_2 \cos \theta & a_3 \frac{a_2}{2} \cos \theta_2 \\ a_3 + \frac{a_2}{2} \cos \theta_2 & a_3 \end{bmatrix}$$

$$N(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} -a_2 \sin \theta_2 (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{\dot{\theta}_2^2}{2}) \\ a_2 \sin \theta_2 \frac{\dot{\theta}_2^2}{2} \end{bmatrix}$$

$$G(\theta) = \begin{bmatrix} a_4 \cos \theta_1 - a_5 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ -a_5 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}$$

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}$$

$$g = \begin{bmatrix} 0 \\ 9.81 \end{bmatrix}$$

여기서 a_1, \dots, a_5 는 로봇의 질량 m_1, m_2 와 길이 l_1, l_2 로부터 구해지는 상수로 다음과 같고,

본 시뮬레이션에서는 $m_1=m_2=0.5[\text{kg}]$, $l_1=l_2=0.3[\text{m}]$ 으로 하였다.

$$\begin{aligned} a_1 &= (1/3)m_1l_1^2 + (1/3)m_2l_1^2 + m_2l_1^2 \\ a_2 &= m_2l_1 l_2 \\ a_3 &= (1/3) m_2 l_2^2 \\ a_4 &= (1/2)m_1gl_1 + m_2gl_1 \\ a_5 &= (1/2)m_2l_2 \end{aligned}$$

이때 동적모델의 샘플링 구간은 0.1[sec]로 하였고, 비선형성이나 부하 변동 등에 따른 스차를 보상하기 위한 적응제어는 섭동 방정식을 이용한 적응제어 기법으로 구하였으며, 이때의 샘플링 구간은 0.01[sec]로 하였다.

비집중 적응제어의 설계변수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_{m1} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -11000 & 110 \end{bmatrix} & B_{m1} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ A_{m2} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -30000 & -100 \end{bmatrix} & B_{m2} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ Q_1 &= 1000I_2, & Q_2 &= 1500I_2 \\ \alpha_1 &= 5, & \alpha_2 &= 10 \\ \Gamma_1 &= 1, & \Gamma_2 &= -0.1 \end{aligned}$$

본 연구는 관절각 $\theta_1(t)$ 와 $\theta_2(t)$ 가 원하는 궤적 $\theta_{R1}(t)$ 와 $\theta_{R2}(t)$ 로 진행할 수 있는 비집중 적응제어를 설계하는 것으로, 본 연구에서 기준 궤적은 Cubic Polynomial 기법을 사용하였다.¹⁶⁾

그림1과 같은 로봇 모델에 비집중 적응 제어기법을 적용시키기 위해 각 링크를 하나의 부시스템으로 하여 그림2와 같이 제어시스템을 구성하였다.

이때 본 시뮬레이션에서 링크1, 링크2의 질량 m_1, m_2 와 길이 l_1, l_2 는 $m_1=m_2=0.5[\text{kg}]$, $l_1=l_2=0.3[\text{m}]$ 으로 하였다.

공칭제어량은 Newton-Euler 방정식을 이용하였으며 이때의 샘플링구간은 0.1[sec]하였고, 비선형성이나 부하 변동 등에 따른 오차를 보상하기 위한 궤환제어는 섭동방정식을 이용한 적응제어 기법으로 구하였으며 이때의 샘플링구간은 0.01[sec]로 하였다.

본 연구는 관절각 $\theta_1(t)$ 와 $\theta_2(t)$ 가 원하는 궤적 $\theta_{R1}(t)$ 와 $\theta_{R2}(t)$ 로 진행할 수 있는 비집중 적응제어를 설계하는 것이다.

제어목표는 링크1, 링크2의 초기 각위치, 각속도가 $\theta_{R1}=90[\text{deg}]$, $\theta_{R2}=0[\text{deg}]$, $\dot{\theta}_{R1}=0[\text{rad/s}]$, $\dot{\theta}_{R2}=0[\text{rad/s}]$ 에서 최종 각위치, 각속도 ($\theta_{R1}=45[\text{deg}]$, $\theta_{R2}=45[\text{deg}]$, $\dot{\theta}_{R1}=0[\text{rad/sec}]$, $\dot{\theta}_{R2}=0[\text{rad/sec}]$)까지를 3초이내에 진행하는 것으로, 이때의 궤적은 그림3과 같다.

제안된 적응제어의 성능을 평가하기 위해 부하의 상태를 로봇 매니플레이터의 링크-1, 링크-2 자체만의 무게 0.5[kg]로서 End-Effector에 부하를 인가하지 않은 무부하, 0.5[kg]의 부하를 인가한 정격부하 등 2개의 경우를 시뮬레이션한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫번째, 시뮬레이션은 일정 부하에 대한 비집중 적응제어의 제어성능을 평가하는 것으로 매니플레이터의 무부하, 정격부하에 대한 시뮬레이션을 하였다. 그림4-그림 5가 시뮬레이션한 결과로서 매니플레이터의 동력학은 비선형이고 상호결합항이 크에도 불구하고 제안된 비집중 적응제어기는 우수한 성능을 보여주고 있다. 즉 목표시간 3[sec] 이전에 제어 목적이 달성되며 그 이후에도 안정한 동작을 보여주고 있으며 기준궤적을 양호하게 추종하고 있다.

두번째, 시뮬레이션은 적응제어의 장점인 부하급변시의 적응성을 확인하기 위한 것으로, 그림6은 무부하로 제어하는 도중 1[sec]순간에 0.5[kg]의 부하를 인가하여 정격부하로한 경우의 링크1과 링크2의 궤적상태이고, 그림7은 정격부하에서 0.5[kg]를 가한 경우의 결과로서 부하가 변화하는 1[sec]에서 약간의 오차가 발생하지만, 그 크기는 매우 작기 때문에 (최대 0.04[deg]정도) 제안한 비집중 적응제어기가 부하변동에 따른 적응 능력에도 우수함을 보여주고 있다.

세번째, 시뮬레이션은 임의의 위치에 장애물이 있는 경우에 대한 적응성을 확인하는 것으로 이경우 링크1과 링크2의 궤적은 각각 0

[sec]에서 0.8[sec]사이엔 90[deg]에서 120 [deg], 0[deg]에서 -30[deg]으로, 0.8[sec]에서 1.3[sec]사이엔 120[deg]에서 90[deg], -30[deg]에서 -10[deg]으로, 1.3[sec]에서 3 [sec]사이엔 90[deg]에서 45[deg], -10

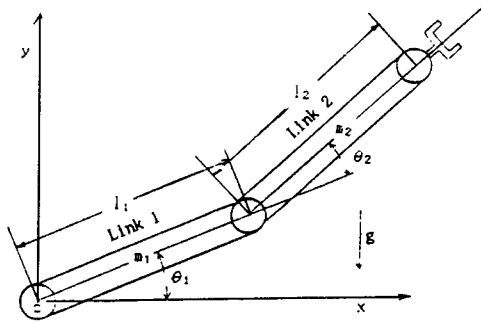


그림 1. 2-링크 매니퓰레이터.
Fig. 1. 2-Link Manipulator.

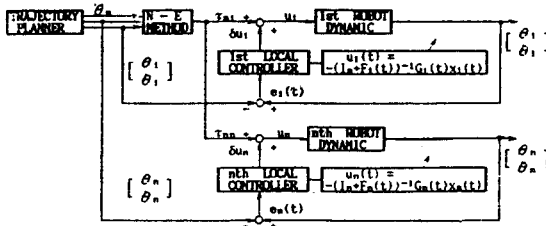


그림 2. N개 관절의 비집중 적응 제어도.
Fig. 2. Decentralized adaptive control scheme for N Joints.

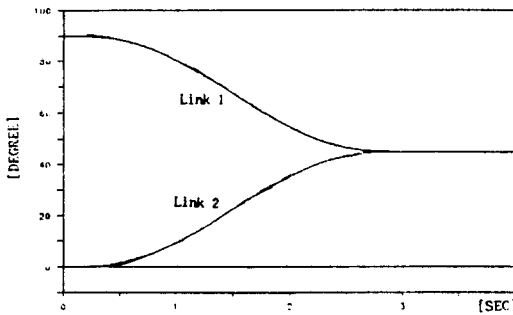


그림 3. 링크-1, 링크 2의 원하는 기준궤적.
Fig. 3. Desired reference trajectory of Link-1, Link-2.

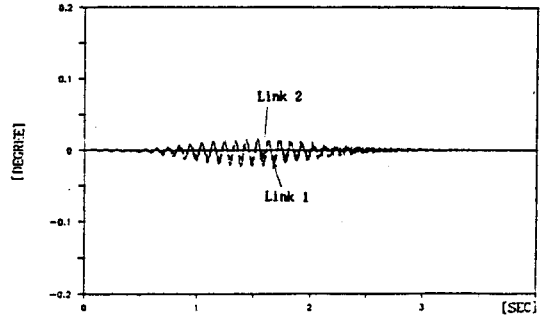


그림 4. 무부하시 기준궤적에서 링크-1, 링크-2의 위치오차.
Fig. 4. Position error of Link-1, Link-2 in reference trajectory with no Load.

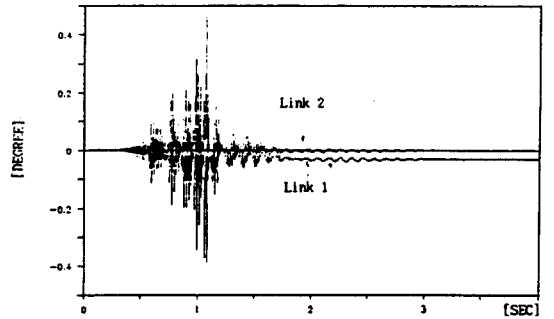


그림 5. 정격부하시 기준궤적에서 링크-1, 링크-2의 위치오차.
Fig. 5. Position Error of Link-1, Link-2 in reference trajectory with normal Load.

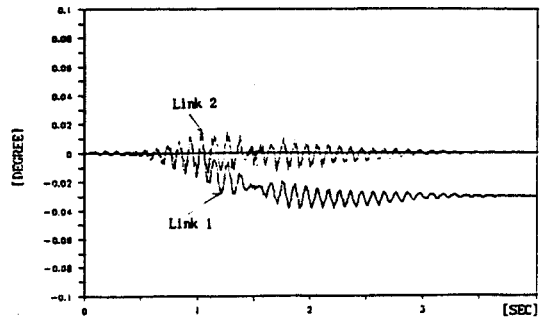


그림 6. 부하급변시 기준궤적에서 링크-1, 링크-2의 위치오차.(무 부하→정격부하)
Fig. 6. Position Error of Link-1, Link-2, in reference trajectory with suddenly load change. (No Load→Normal Load)

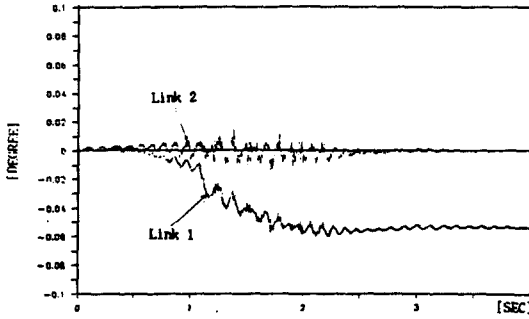


그림 7. 부하급변시 기준궤적에서 링크 1, 링크 2의 위치오차.(정격 부하→최대부하)
Fig. 7. Position Error of Link-1, Link-2 in reference trajectory with suddenly load change (Normal Load→Maximum Load)

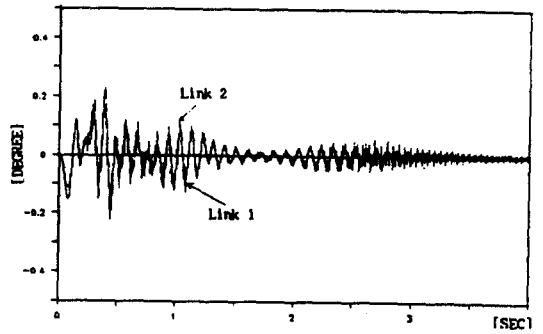


그림 9. 무 부하에서 장애물이 있는 경우 링크-1, 링크-2의 위치오차.
Fig. 9. Position error of Link-1, Link-2 in case obstacle with no load.

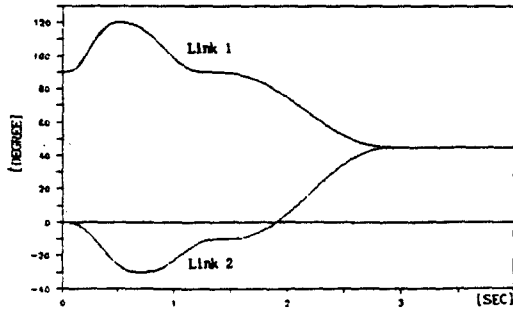


그림 8. 장애물이 있는 경우 링크-1, 링크-2의 위치궤적.
Fig. 8. Position trajectory of Link-1, Link-2 in case obstacle.

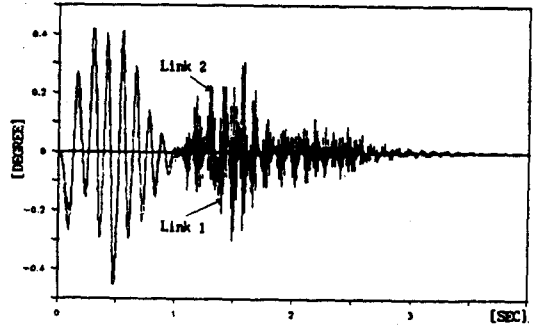


그림 10. 정격 부하에서 장애물이 있는 경우 링크-1, 링크-2의 위치오차.
Fig. 10. Position Error of Link-1, Link-2 in case obstacle with normal load.

[deg]에서 45[deg]으로 진행하도록 한 것으로 이때의 궤적은 그림8과 같고, 그림9, 그림10이 이경우의 결과로서 이때에도 로봇의 동력학은 비선형이고 상호결합항이 크에도 불구하고 제안된 비집중 적응제어기는 예측한 바와 같이 적응능력이 우수함을 알 수 있었다. 즉 목표시간 3[sec]이전에 제어목적이 달성되며 그 이후에도 안정한 동작을 보여주고 있으며 기준궤적을 양호하게 추종하고 있다. 다만 링크1의 궤적오차가 부하의 증가에 따라 1[sec]에서 1.7[sec]사이에 오차가 증가하고 있는데, 이는 단위시간에 이동할 궤적이 증가함에 따라 시스템의 변화속도가 빨라짐에 따라 증가하는 것으로

추정되며 이를 해결하기 위해서는 이 구간에서 적응제어기의 샘플링속도를 증가시키거나 시간별로 궤적의 진행구간의 값을 조정하는 방법으로 생각할 수 있다.

5. 결 론

산업용 로봇의 작업속도 증가와 정확도 향상을 위한 효과적인 작업수행을 위해서는 제어량을 계산함에 있어서 계산량을 줄이고, 비선형성으로 인한 오차를 감소시켜야 한다. 본 연구는 위의 문제를 해결하기 위해 비집중 적응 제어 기법을 제안하였으며, 이들 로봇 매니

플래이더의 경로제어에 관해 컴퓨터 시뮬레이션한 결과 이를 확인하였다. 즉 비선형성이며 링크와 부하의 불확실한 파라미터등의 동력학을 보상할 수 있도록 하는데 적응제어기를 사용함으로써 제어성능을 개선시키고, 제어를 차수가 낮은 여러개의 부시스템으로 분산하여 제어하고, 적응법칙의 샘플링 속도를 동력학 파라미터값의 샘플링 속도에 비해 빠르게 계산함으로써 전체 계산량을 줄여 부하 변동에 따른 적응능력을 보장함으로써 산업 현장에서의 적용범위를 크게 확대시킬 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1) R. P. Paul, "Manipulator Cartesian Path Control," IEEE. Trans. on Sys. Man. Cyber., Vol.9, 1979. pp. 702-711
- 2) J. Y. S. Luh, M. W. Walker, P.R. Paul, "Resolved-Acceleration Control of Mechanical Manipulator", IEEE Trans. on Auto. Cont., Vol.AC-25, 1980, pp. 468-474.
- 3) W. H. Chi, P. R. Paul, "Resolved Motion Force Control of Robot Manipulator," IEEE Trans. on Sys. Man. Cyber., Vol.12 1982, pp. 266-275.
- 4) S. Dubowsky, D. T. DesForges, "The Application of Model Reference Adaptive Control to Robotic Manipulators," IEEE Trans. on ASME J. Vol 101, 1979. pp.193-200.
- 5) G. S. G. Lee, M. J. Chung, "An Adaptive Control Strategy for mechanical Manipulators," IEEE Trans. on Auto. Cont., Vol 29, No 9, 1984, pp. 837-840
- 6) A. J. Koivo, T.H. Guo, "Adaptive linear controller for Robotics Manipulator" IEEE Trans. on Auto. cont., Vol-28, 1983, pp. 162-171
- 7) H. Seraji, "Direct adaptive control of manipulators in Cartesian space," J. Robotic Syst., Vol.4, No.1, 1987, pp 157-178.
- 8) H. Seraji, "Adaptive Force and Position Cotrol of manipulators", J. Robotic Syst., Vol.4, No. 4, 1987, pp. 551-578
- 9) 이상철, 정찬수, 홍규장, 박성기, "로봇 매니플래이더의 집중 적응제어에 관한 연구", : in proc. KACC, Seoul, 11. 1988, pp. 45-49
- 10) A. Hmamed, L. Radouane, "Decentralised nonlinear adaptive feedback stabilisation of large-scale interconnected systems," IEE Proc., Vol.130, No.2, 1983, pp. 57-62
- 11) J. Lyou, Z. N. Bien, M. J. Youn, "Decentrized Stabilization of a Class of Uncertain Scale Continuous-Time Systems," 전자공학회학회지 Vol.22, No. 3, 1985, pp. 274-280
- 12) B. J. Oh, M. Jamshidi, H. Seriji, "Decentralized Adaptive Control," : in Proc. Int. Cont. on Robotics and Auto., 1988. pp. 1016-1021.
- 13) Y. K. Choi, Z. Bien, "Decentralized adaptive control scheme of multi-arm-type robot." Int. J. Control, Vol. 48, No.4, 1988, pp.1715-1722
- 14) J. M. Hollerbach, "A Recursive Lagrangian Formulation of Manipulator Dynamics and a Comparative Study of Dynamics Formulation Complexity," IEEE Trans. on Sys. Man. Cyber, Vol 10, 1980, pp.730-736.
- 15) C. T. Chen, Linear System Theory and Design, Holt-Saunders 1984.
- 16) J. J. Craig, Introduction Robotics Mechanical and control, Addison-Wesley, 1986, pp. 194-202