

탄성매니플레이터의 고성능 제어기 설계에 관한 연구

이 지 우*, 한 성 현*, 이 만 형**, 이 권 순***

A Study on High Performance Controller Design of Elastic Manipulator

Chi-Woo Lee*, Sung-Hyun Han*, Man-Hyung Lee**, Guen-Soon Lee***

ABSTRACT

An industrial robot, installed real manufacturing processes an element of the system automation, can be considered as an uncertain system due to dynamic uncertainties in inertial parameters and varying payloads. Most difficulties in controlling a robot manipulator are caused by the fact that the dynamic equations describing the motions of the manipulator are inherently nonlinear and heavily coupled because of dynamic coupling effects between joints and associated links. Existing robot control systems have constant predefined gains and do not cover the complex dynamic interactions between manipulator joints. As a result, the manipulator is severely limited in range of application, speed of operation and variation of payload. The proposed controller is operated by adjusting its gains based on the response of the manipulator in such a way that the manipulator closely matches the reference model trajectories defined by the designer. The proposed manipulator control studied has two loops, an inner loop of model reference adaptive controller and an outer loop of state feedback controller with integral action to guarantee the stability of the adaptive scheme. This adaptation algorithm is based on the hyperstability approach with an improved Lyapunov function. The coupling among joints and the nonlinearity in the dynamic equation are explicitly considered. The designed manipulator controller shows good tracking performance in practical working environment, various load variations and parameter uncertainties.

1. 서 론

산업용 로봇매니플레이터의 동특성은 각 관절 사이의 코리올리스력 및 원심력 등으로 인한 강한 비선형성 및 연성등을 지닌다. 이에 따라 정확한 동적모델링의 어려움으로 모델 및 제어기에 대한 선형계의 가정 및 플랜트의 매개변수가 일정하게 유지된다는 가정하에서 설계되어지므로 부하의 변동 및 파라미터의 불확실성의

존재시 그 수렴특성을 상실하게 되어 좋은 제어성능을 내지 못하게 된다.

지난 수년 동안에 산업용 로봇매니플레이터에 대한 제어시스템의 설계에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔으며 그 설계방법은 크게 2가지로 분류할 수 있는데, 그 대표적인 것은, 토크계산법³⁾의 일환으로 로봇 동적모델에 대해 비선형성을 무시한 동적모델의 선형화를 바탕으로 한 비선형 피드백제어방법과, 적응제어방법^{1,7)}을

* 경남대학교 기계설계과 (정회원)

** 부산대학교 제어기계공학과 및 기계기술연구소 (정회원)

*** 동아대학교 전기공학과

들 수 있다. 적응제어방식에는 기준모델적응제어방식과 자기동조적응제어방식이 있다. 기준모델적응제어방식은 MIT 규율이 발표된 이래 1960년대 이후부터 본격적인 연구가 시작되었으며, 이 방식은 원하는 동특성을 갖는 기준모델을 설정하여 이 기준모델의 출력과 플랜트의 출력이 일치하도록 플랜트의 매개변수를 조정하는 방식인데, 그 제어방식은 직접제어¹²⁻¹⁶⁾와 간접제어방식⁷⁻⁹⁾으로 구별된다. 직접제어방식에서는 플랜트의 파라미터를 추정하지 않고 제어계의 파라미터를 직접 식별하는 방법으로, 플랜트와 제어를 포함한 전체제어계의 전달함수와 원하는 기준모델의 전달함수와 일치하도록 하기 위하여 플랜트의 출력과 모델의 출력사이의 오차를 적응제어칙에 사용한다. 그러나 간접제어방식은 추정자로 미지 플랜트의 파라미터를 추정하고 이 정보를 바탕으로 제어를 구성하는 방법이다. 그런데 지금까지의 기존의 산업용로봇의 제어방식은 전체적인 운동방정식이 고려되지 않고, 로봇매니퓰레이터의 비선형 동특성을 가진 무시한 상태에서 각 관절의 독립 제어만으로 운용되고 있는 실정이므로, 기존의 로봇트는 간단하고 단순한 위치적인 임무의 수행에 그 기능이 국한되어 있는 실정이다. 따라서 로봇매니퓰레이터의 동적모델링에 있어서 매개변수의 불확실성과 비선형성의 존재 및 부하의 변동과 모델링 오차의 존재하에서도 좋은 성능을 얻을 수 있는 진보된 제어방법이 절실하게 요구되어 그에 대한 많은 관심이 집중되고 있다.

그러므로 본 연구에서는 직접적응제어방식을 응용하여 부하의 변동이 심하고 많은 외란이 존재하는 실제의 공정에서 두드러진 성능의 저하를 초래하는 기존의 로봇제어시스템의 설계방법을 개선하여, 미지의 부하변동으로 인한 로봇모델의 역학적 특성의 변화, 모델링 오차에 기인하는 관성상수 및 링크상수 등의 파라미터 불확실성, 그리고 제어기의 실현시 수반되는 계산시간의 지연 등이 존재하는 경우에서도 견실하고 정확한 제어 성능이 유지되는 새로운 고성능 로봇매니퓰레이터 제어시스템의 구현을 위한 연구를 수행한다.

2. 매니퓰레이터의 동특성해석

로봇매니퓰레이터의 동적방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$I(q(t)) \ddot{q}(t) + N(q(t), \dot{q}(t)) = T(t) \quad (1)$$

여기서 q 는 매니퓰레이터의 관절변수벡터, $I(q)$ 는 관성행렬 ($n \times n$), $N(q, \dot{q})$ 는 비선형벡터행렬 ($n \times 1$)을 나타낸다. 그리로 $I(q)$ 및 $N(q, \dot{q})$ 는 파라미터의 불확실성을 내포하고 있으므로, $I(q) = I_0(q) + I_n(q)$, 그리고 $N(q, \dot{q}) = N_0(q, \dot{q}) + N_n(q, \dot{q})$ 으로 정의될 수 있다. 또한 $I_0(q)$ 는 무부하상태 로봇의 관성행렬을 나타내고, $I(q)$ 는 파라미터의 불확실성 및 부하하중에 의한 역학적인 효과에 기인한 관성행렬을 나타낸다. 그리고 $N_0(q, \dot{q})$ 및 N_n 는 각각 무부하 로봇만의 비선형성 및 부하 파라미터의 불확실성에 의한 비선형성을 나타내는 데 이 성분도 분리하여 표현하면, $N(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q}) + G(q)$, $N_0(q, \dot{q}) = C_0(q, \dot{q}) + G_0(q)$, 그리고 $N_n(q, \dot{q}) = C_n(q, \dot{q}) + G_n(q)$ 으로 기술된다. 여기서 $C(q, \dot{q})$ 는 원심력 및 코리올리스를 나타내고, $G(q)$ 는 중력을 나타낸다. $C_0(q, \dot{q})$ 는 무부하상태에서의 코리올리력 및 원심력을 나타내고, $G_0(q)$ 는 무부하상태에서의 중력이며, $C(q, \dot{q})$ 의 i 번째 성분 $C_i(q, \dot{q}) = q^T H_i(q) q$ 와 같이 정방형으로 주어진다.

그리고 위의 $H(q)$ 의 성분 및 $G(q)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$H_{ijk}(q) = \sum_{m=\max(i,j,k)}^n T_r [U_{mj}(q) J_m U_{mi}^T(q)]$$

$$G_i(q) = \sum_{j=1}^n [-m_j \quad g^T U_{ij}(q) \quad j \quad r_j] \quad (2)$$

여기서 $U_{ij}(q) = \partial U_{ij}(q) / \partial q_i$ 으로 정의된다. 그리고 $i=1, 2, \dots, n-1$ 인 경우에는 $J_i = J_{pi} + J_{qi}$, $m_i = m_{pi} + m_{qi}$ 이 되고, $i=n$ 인 경우에는 $J_i = J_{pi} + J_{qi} + J_{ni}$, $m_i = m_{pi} + m_{qi} + m_{ni}$ 이 된다.

회전 관절이나 미끄럼 관절을 갖는 로봇의 경우에 로봇의 관절각 및 관절각속도를 측정가능하다는 가정하에서 n 개의 자유도를 갖는 로봇매니퓰레이터의 동적방정식은 다음과 같은 상태방정식으로 정의될 수 있다.

$$I_{nn} \dot{X}_{vn} + N_n(X_p, X_v) = U_{pn} \quad (3)$$

$$I_{nn} = \begin{bmatrix} I_{11} & \dots & I_{1n} \\ I_{21} & \dots & I_{2n} \\ \vdots & & \vdots \\ I_{n1} & \dots & I_{nn} \end{bmatrix}, \quad X_{vn} = \begin{bmatrix} X_{v1} \\ X_{v2} \\ \vdots \\ X_{vn} \end{bmatrix}$$

$$N_n = \begin{bmatrix} N_1(X_p, X_v) \\ N_2(X_p, X_v) \\ \vdots \\ N_n(X_p, X_v) \end{bmatrix}, \quad U_{pn} = \begin{bmatrix} U_{p1} \\ U_{p2} \\ \vdots \\ U_{pn} \end{bmatrix}$$

여기서, X_{pi} 및 X_v 는 각각 로봇트 관절의 각위치 및 각속도를 나타내고, 그리고 U_p 는 입력 토크를 나타내는 상태벡터를 나타내고 있으며, 또한 $X_{pi}^T = (X_{p1}, X_{p2}, \dots, X_{pn}) = (q_1, q_2, \dots, q_n)$, $X_v^T = (X_{v1}, X_{v2}, \dots, X_{vn}) = (\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n)$, $U_p^T = (T_1, T_2, \dots, T_n)$ 으로 정의되고 있다.

3. 제어알고리즘

본 연구에서는 로봇트매니플레이터의 운동방정식의 기본성질을 이용하여 각관절 사이의 연성의 상호작용을 비연성화 시키고 로봇트매니플레이터의 동적방정식에서의 비선형성을 보상하는 새로운 적응제어알고리즘을 개발하여 부하의 변동이 크고 매니플레이터의 파라미터의 불확실성 등으로 인한 비모형화 동특성(Unmodelled dynamics)이 존재하는 경우에서도 항상 좋은 제어성능을 유지할 수 있는 로봇트제어시스템을 설계하고자 한다.

본 연구에서 제안된 제어알고리즘은 기존의 로봇트매니플레이터에 대한 적응제어알고리즘과는 달리 로봇트의 역학적 비선형의 보상 및 비연성제어를 위한 내부루프의 적응제어 구조와 외부루프의 PI제어알고리즘으로 구성되는 새로운 제어시스템을 제안하였다. 그림1은 제안된 로봇트매니플레이터의 제어시스템의 내부루프로서 비선형 보상 및 디커플링제어를 위한 기준모델적용제어의 구조를 나타내고 있다.

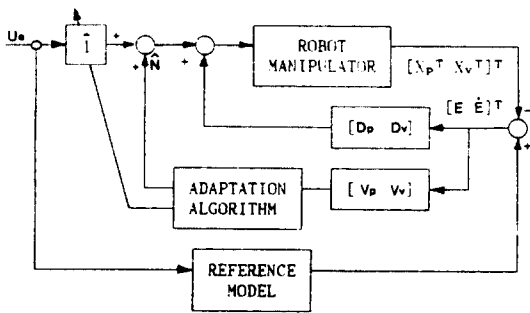


Fig.1 Inner loop block diagram of robot manipulator controller

부하의 변동 및 파라미터의 불확실성으로 인하여 비모형화 동특성이 존재하는 로봇트의 동적모델에 대하여 파라미터의 값을 항상 알 수 다는 확정시스템의 가정하에서 각 관절의 상호작용에 의한 연성(coupling)의 특

성으로부터 비연성의 특성을 얻기위한 토크 입력에 대한 제어칙을 구하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$U_p(t) [I(X_p)U_e(t) + N(X_p, X_v)]^{-1} = I \quad (4)$$

여기서 $UU_e(t)$ 는 외부루프로 부터의 입력을 나타내고, $U_p(t)$ 는 로봇트매니플레이터의 제어입력을 나타낸다. 또한 식(3) 및 (4)로부터,

$$\dot{X}_p(t) = X_v(t), \quad \dot{X}_v(t) = U_e(t) \quad (5)$$

의 두 관계식을 얻을 수 다. 이 두 관계식은 강한 비선형성과 연성의 특성을 지니고 매니플레이터의 각 관절의 자유도로부터 선형비연성의 특성을 얻기 위한 비연성 적분기의 특성을 나타내고 있는데, 이 두 관계식중 후자는 매니플레이터의 동적방정식에서의 비선형항을 상쇄시키기 위한 항으로 고려된다. AMFC (adaptive model following control)의 원리는 플랜트와 원하는 특성을 가진 기준모델의 출력 사이의 오차를 적응제어제인에 위한 파라미터의 적절한 조절로서 0으로 수렴되게 함으로써 플랜트인 로봇트매니플레이터의 관절이 기준모델의 궤적을 추종하도록 하기 위한 것이라 할 수 있다. 그런데 식(4)의 확정시스템에 대한 제어칙의 실행에 있어서는 컴퓨터의 실시간 제어를 위해, 모든 X_{pi} 에 대하여 이미 계산되어서 저장된 $I(X_{pi})$ 및 $N(X_{pi}, X_v)$ 의 값이 요구되므로, 이러한 문제점을 용이하게 하기 위해 본 연구에서는 AMFC의 기법을 활용하여, 외부에서의 입력인 $U_e(t)$ 와 플랜트의 출력인 $X_v(t)$ 의 관계가 식(5)로 수렴되게 할 수 있는 제어칙을 유도한다.

본 연구에서는 비선형연성의 특성을 지닌 매니플레이터의 각 관절 사이의 비연성제어를 위해 기준모델을 다음과 같이 선정하였다.

$$\dot{X}_p^d(t) = X_v(t), \quad \dot{X}_v^d(t) = U_e(t) \quad (6)$$

여기서 $X_p^d(t)$ 및 $X_v^d(t)$ 은 각각 기준모델의 각위치 및 각속도벡터를 나타낸다. 기준모델의 출력과 플랜트의 출력 사이의 오차방정식, 즉 $E(t) = X_{pi}^d(t) - X_{pi}(t)$ 가 영으로 수렴되게 하는 것이 궁극적목적이라 할 수 있다.

본 연구에서 제안한 로봇트매니플레이터에 대한 제어입력은 다음과 같이 표현된다.

$$U_p(t) = \hat{I}(t)U_e(t) + \hat{N}(t, X_v) + L_p[X_p^d(t) - X_p(t)] + L_v[\dot{X}_p^d(t) - \dot{X}_p(t)] \quad (7)$$

$$\hat{C}(t, X_v) = [X_v^T H_1(t) X_v, X_v^T H_2(t) X_v, \dots, X_v^T H_k(t) X_v] \quad (8)$$

여기서 식(7)의 I(t) 및 N(t)는 적응파라미터로서 적응알고리즘에 의하여 조절 되어진다.

그리고, 기준모델의 출력과 플랜트의 출력 사이의 오차방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$E(t) = X_{np}^d(t) - X_p(t) \quad (9)$$

그리고 I(t) 및 H(t)의 적응파라미터를 조절하기 위한 적응알고리즘은 다음 식과 같이 표현된다.

$$\dot{\hat{I}}_{ij}(q) = K_{Iij}[Y_i U_j] \quad (10-a)$$

$$\dot{\hat{H}}_{kij}(q) = K_{Nkij}[Y_k X_{vi} X_{vj}] \quad (10-b)$$

$$Y(t) = V_p E(t) + V_v \dot{E}(t) \quad (10-c)$$

위의 식(10-a), (10-b)의 제어알고리즘은 비례적분 적응제어치를 확장하고, 개선한 적응제어알고리즘이다. 그리고 K_{Iij} 및 K_{Nkij} 는 양의 상수이고 V_p, V_v 는 설계자에 의해 설정되는 정방행렬로서 그 값의 선정기준은 안정도 해석을 통하여 주어진다. 그리고 E(t)와 $\dot{E}(t)$ 는 각각 기준모델과 매니플레이터 사이의 각위치 및 각속도벡터의 오차를 나타낸다.

그림2는 제안된 로봇매니플레이터의 제어시스템의 전체적인 구조를 나타내고 있다.

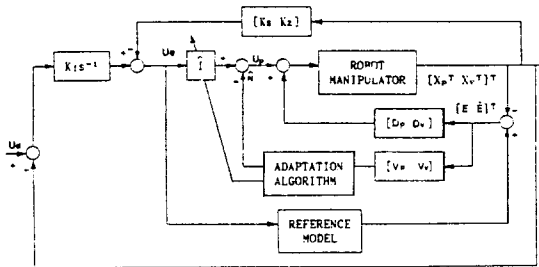


Fig. 2 Global robot manipulator control system.

4. 안정도 해석

매니플레이터의 동적방정식 (3)과 식(6), (7), (8), (9)로부터 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$I(t) \ddot{E}(t) + D_v \dot{E}(t) + D_p E(t) = W(t) \quad (11)$$

위의 식(11)에서 우변의 W(t)는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} W(t) &= -W_1 \\ &= [I(t) X_{np}^d(t) - \hat{I}(t) U_o(t)] \\ &\quad + [\hat{N}(X_v) - N(X_v)] \end{aligned} \quad (12)$$

그리고 $X_E(t)^T = [E(t)^T \dot{E}(t)^T]^T$ 으로 정의하면 식(11)은 식(10-c)로부터 다음 식과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \dot{X}_E(t) &= \begin{bmatrix} 0 & I \\ -I^{-1} D_p & -I^{-1} D_v \end{bmatrix} X_E(t) \\ &\quad + \begin{bmatrix} 0 \\ I^{-1} \end{bmatrix} W(t) \end{aligned} \quad (13)$$

위의 식(13)은 식(10-b)로부터 다음의 관계식이 정의된다.

$$Y(t) = [V_p \ V_v] X_E(t) \quad (14)$$

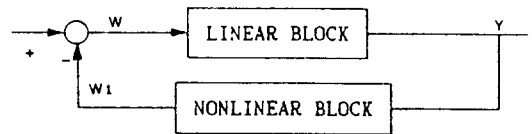


Fig. 3 Popov loop for parallel model reference adaptive controller of inner loop

제안된 제어시스템의 안정성을 해석하기 위하여 식(11)-(12)으로부터 그림3과 같이 피이드포워드블록과 비선형 피이드백블록으로 구성되는 동가 피이드백 입력 및 출력을 나타낸다. 그러므로 제안된 매니플레이터에 대한 적응제어시스템이 점근적인 초안정을 유지하기 위해서는 다음의 정리를 만족하여야 한다.

[정리 I] W 및 Y로서 출력과 입력이 구성되는 선형 피이드포워드블록의 전달함수 G(s)는 STR(strictly positive real)이다.

$$\begin{aligned} (V_p + V_v S)(I S^2 + K_s S + K_z)^{-1} \\ G_f(S)^{-1} = I \end{aligned} \quad (15)$$

[정리 II] 동가 피이드백루프에서 입력 Y와 출력 $W_1 = -W$ 로서 구성되는 비선형 피이드백블록은 다음 식과 같이 정의되는 Popov 부등식을 만족하면 점근적 초안정성이 유지될 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_0^t W_1(\tau)^T Y(\tau) d\tau + \gamma_0^2 \geq 0, \\ t \geq 0 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 γ 는 임의의 상수이다.

[정리 I]은 설계정수 V_p, V, D, D 를 각각 아래의 조건을 만족하도록 설계함으로써 만족되어 질 수 있다.

$$\begin{aligned} [D_p, D_v] &= [A_p I \quad A_v I] \\ [V_p, V_v] &= [F_p I \quad F_v I] \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 I는 identity 행렬을 나타내고, F_p, F, A_p, A 는 양이다.

그러므로 Kalman-Yakubovich-Popov정리⁶로부터 위의 조건을 만족하는 설계정수의 설정으로 만족될 수 있다.

$$\begin{aligned} [F_v A_p + F_p A_v] I > F_p I(q) > 0, \\ [F_v A_v] I > F_p I(q), \quad F_v > F_p \end{aligned} \quad (18)$$

그리고 [정리 II]의 조건 만족은 다음과 같이 증명된다. 식(15)와 (16)로부터 비선형 피드백블록의 입력과 출력의 내적은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} W_i(t)^T Y(t) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [\hat{I}_{ij}(t) - I_{ij}(t)] \\ &\quad R_{ij}(t) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n [\hat{N}_{kij}(t) \\ &\quad - N_{kij}(t)] R_{kij}(t) \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 $R_{ij}(t)$ 와 $R_{kij}(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} R_{kij}(t) &= Y_k(t) X_{vi}(t) X_{vj}(t), \\ &\quad k, i, j = 1, 2, \dots, n \\ R_{ij}(t) &= Y_i(t) U_o(t), \\ &\quad i, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (20)$$

식(10-a)와 (10-b)로부터 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{I}_{ij}(t) - I_{ij}(0) - K_{ij} \int_0^t R_{ij}(\tau) d\tau &= 0, \\ H_{kij}(t) - H_{kij}(0) - K_{kij} \int_0^t H_{kij}(\tau) d\tau &= 0 \end{aligned} \quad (21)$$

그러므로 식(19)의 양변을 적분하면 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \int_0^t W_i(\tau)^T Y(\tau) d\tau &= \int_0^t \{ [\hat{I}_{ij}(t) - I_{ij}] \\ &\quad R_{ij}(\tau) + [\hat{H}_{kij}(t) \\ &\quad - H_{kij}] R_{kij}(\tau) \} d\tau \end{aligned} \quad (22)$$

식(22)은 두개의 적분 부등식으로 구분하여 표현하기

위하여 첫번째 항 및 두번째 항을 각각 I_1 및 I_2 로 정의하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \int_0^t [\hat{I}_{ij}(\tau) - I_{ij}] R_{ij}(\tau) d\tau \\ &\quad + \gamma_1^2 > 0 \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \delta_2 &= \int_0^t [\hat{H}_{kij}(\tau) - H_{kij}] R_{kij}(\tau) d\tau \\ &\quad + \gamma_2^2 > 0 \end{aligned} \quad (24)$$

여기서 $\gamma_1, \gamma_2 > 0$ 이다. 식(22)은 식(23)와 (24)의 항이므로 위의 식(23), (24)가 만족되면 결국 식(22)이 만족하게 된다.

위의 식(23)에 식(21)을 대입하면 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} &(\hat{I}_{ij}(\tau) - I_{ij}(\tau)) R_{ij}(\tau) d\tau \\ &= \int_0^t \{ (\hat{I}_{ij}(0) - I_{ij}(0)) + K_{ij} \int_0^\tau R_{ij} \\ &(\eta) d\eta \} R_{ij}(\tau) d\tau + \frac{1}{2K_{ij}} (\hat{I}_{ij}(0) \\ &- I_{ij}(0))^2 \geq 0 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} &\int_0^t (\hat{H}_{kij}(\tau) - H_{kij}(\tau)) R_{kij}(\tau) d\tau \\ &= \int_0^t \{ (H_{kij}(0) - H_{kij}(0)) + K_{kij} \int_0^\tau R_{kij} \\ &(\eta) d\eta \} R_{kij}(\tau) d\tau + \frac{1}{2K_{kij}} (H_{kij}(0) \\ &- H_{kij}(0))^2 \geq 0 \end{aligned} \quad (26)$$

식(25), (26)에서 $K_{ij}, K_{kij} > 0$ 이므로, 식(23)와 (24)의 조건을 만족하므로 Popov 부등식 조건을 만족하게 된다.

5. 시뮬레이션

본 연구에서 제안된 로봇트매니플레이터 제어기의 성능시험을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 수행하였으며, 제어기의 성능시험은 여러가지 실제 작업시 수반되는 상황들을 고려하여 기존의 적용제어책⁷과 제안된 새로운 제어기의 성능을 비교 검토하였다.

그리고 실험조건은 실제 로봇트 제어기의 실현시 필연적으로 수반되는 현상들을 포함한 다음의 3가지 조건 즉, 로봇트의 매니플레이터의 손끝에 부하가 존재 (5kg,

10kg, 15kg) 하는 경우, 관성상수 및 링크상수의 불확실성(5%, 10%, 15%)이 존재하는 경우 그리고, 로봇 시스템과 제어기 사이에 계산시간 지연(0.004초)이 존재하는 경우의 세가지의 조건에 대하여 성능시험을 수행하였다. 로봇매니플레이터의 링크 및 관성 파라미터의 사양을 Puma 560 모델의 사양을 기본모델로 사용하였다. 시뮬레이션 시험은 6관절중 윗쪽의 3개의 관절은 정지된 채로 3번째축에 붙어 고정되어 움직이지 않는 것으로 가정한 상태에서 아래쪽 3개의 관절에 대하여 수행되었다. 각 관절은 2초 동안에 각각 100° 움직이도록 하였고, 궤적계획은 4-3-4 궤적계획법¹¹⁾으로 하였으며, 기준모델의 궤적은 $X.(0)=[0^\circ \quad -30^\circ \quad 30^\circ]$, $X.(0.6)=[30^\circ \quad 0^\circ \quad 60^\circ]$, $X.(1.2)=[90^\circ \quad 30^\circ \quad 90^\circ]$, $X.(2)=[90^\circ \quad 60^\circ \quad 120^\circ]$ 으로 하였다. 그리고 샘플링주기는 0.002초로 하였다.

그림4는 본 연구에서 고려한 모델인 3축 탄성 매니플레이터에 대한 동적방정식을 해석하기 위한 본드 그래프를 나타내고 있으며, 식(26)은 BONDGRAPH를 사용하여 구한 탄성 매니플레이터의 운동방정식을 나타내고 있다.

$$I(\theta_1, \theta_2, \theta_3)\ddot{\theta} + H(\theta_1, \theta_2, \theta_3)\dot{\theta} + f\dot{\theta} + K\theta = T(t)$$

$$I = \begin{bmatrix} L_1(a_1M_1 + M_2 + M_3) & L_1L_2(M_2 + M_3)\cos(\theta_1 - \theta_2) & L_1L_2L_3\cos(\theta_1 - \theta_3) \\ L_1L_2(a_2M_2 + M_3)\cos(\theta_1 - \theta_2) & L_2L_3\cos(\theta_2 - \theta_3) & L_2L_3\cos(\theta_2 - \theta_3) \\ a_3M_3L_1L_3\cos(\theta_1 - \theta_3) & a_3L_2L_3\cos(\theta_2 - \theta_3) & a_3L_3^2M_3 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 & L_1L_2(M_2 + M_3)\sin(\theta_1 - \theta_2) & L_1L_2L_3\sin(\theta_1 - \theta_3) \\ -L_1L_2(a_2M_2 + M_3)\sin(\theta_1 - \theta_2) & 0 & L_2L_3\sin(\theta_2 - \theta_3) \\ -a_3M_3L_1L_3\sin(\theta_1 - \theta_3) & a_3L_2L_3\sin(\theta_2 - \theta_3) & 0 \end{bmatrix}$$

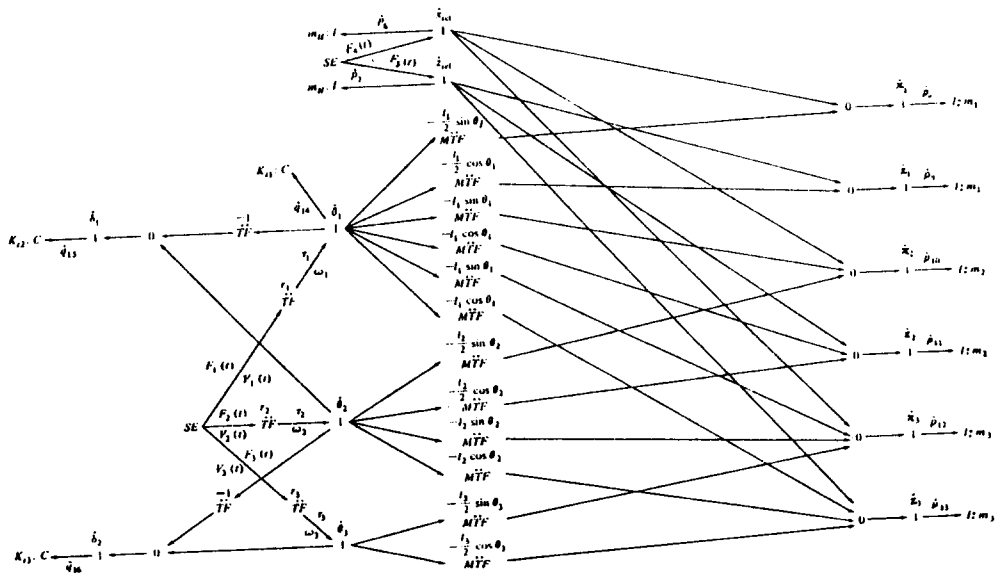


Fig. 4 Bond graph corresponding to elastic manipulator

여기서 M 은 링크의 질량, L 은 링크의 길이, 그리고 θ 및 a 는 각각 관절 각 및 각속도를 나타내고 있다. 그리고, I 는 관성벡터행렬, H 는 원심력 및 코리올리스 벡터행렬, $T(t)$ 는 입력토크벡터를 나타내며, K 는 강성, f 는 댐핑마찰계수를 나타내고 있다.

적응계인(adaptation gain)은 다음과 같은 값으로 선정 하였다.

$$\begin{aligned}
 K_{111} &= 5, \quad K_{122} = 7, \quad K_{133} = 5, \\
 K_{123} &= 6, \quad K_{112} = K_{113} = 0.03 \\
 K_{N112} &= 18, \quad K_{N113} = 8, \quad K_{N122} = K_{N133} \\
 &= K_{N233} = 0.03
 \end{aligned}$$

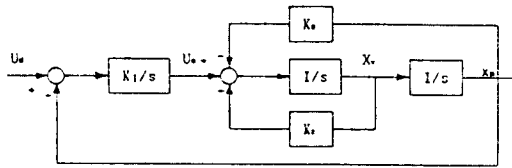


Fig.5 Equivalent system block diagram for desired ideal performance ofn presented robot control system

그림5는 제안된 그림2의 로봇매니퓰레이터의 제어시스템에 대하여 요구되는 이상적인 특성을 지닐 때의 등가제어시스템을 나타내고 있다.

그리고 외부루프의 PI 제어계인은 $K_1=2000$, $K_2=350$, $n K_3=35$ 로 선정하였고, 또한 $[V_1, V_2] = [I, 20, I]$, $[D_1, D_2] = [30, I, 30, I]$ 으로 선정 하였다. 그리고 $I_{11}(t)$ 및 $H_{11}(t)$ 의 초기 조건은 $I_{12}(0) = I_{13}(0) = 0$, $I_{23}(0) = 6$, $I_{11}(0) = 10$, $I_{22}(0) = 15$, $I_{33}(0) = 8$, $N_{113}(0) = N_{113}(0) = N_{122}(0) = N_{133}(0) = N_{233}(0) = 0$ 으로 선정 하였다. 그리고 1, 2, 3축에 대한 N_1, N_2, N_3 는 매니퓰레이터의 관성행렬의 기본성질에 의하여 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 N_1(X_P, X_V) &= X_V^T \begin{bmatrix} 0 & H_{112} & H_{113} \\ H_{112} & H_{122} & H_{133} \\ -H_{112} & H_{133} & H_{133} \end{bmatrix} X_V \\
 N_2(X_P, X_V) &= X_V^T \begin{bmatrix} -H_{112} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{233} \\ 0 & H_{233} & H_{233} \end{bmatrix} X_V \\
 N_3(X_P, X_V) &= X_V^T \begin{bmatrix} -H_{113} & 0 & 0 \\ 0 & -H_{233} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X_V
 \end{aligned}$$

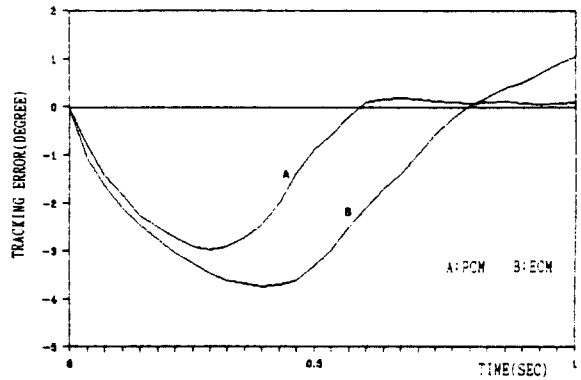


Fig.6(a) Comparison of tracking performance for joint2 with 5kg payload

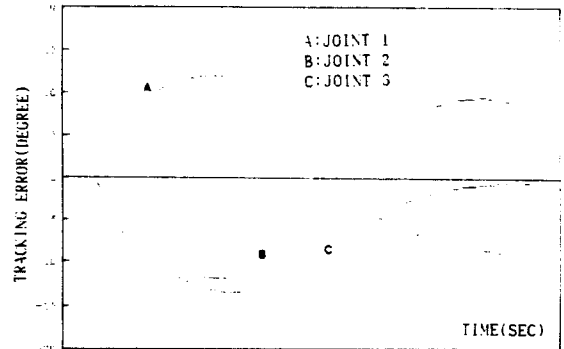


Fig.6(b) Tracking errorof each joint for ECM with parameter uncertainties (3%)

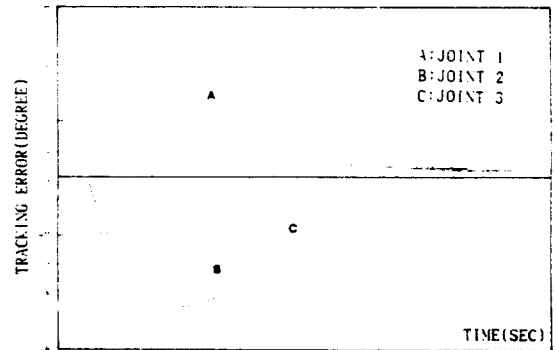


Fig.6(c) Tracking errorof each joint for PCM with parameter uncertainties (3%)

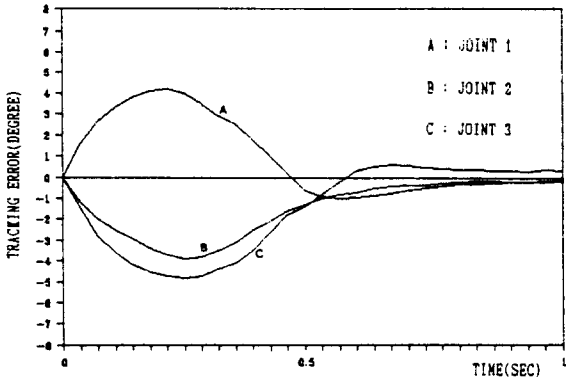


Fig. 7 Tracking error of each joint for PCM with 10kg payload

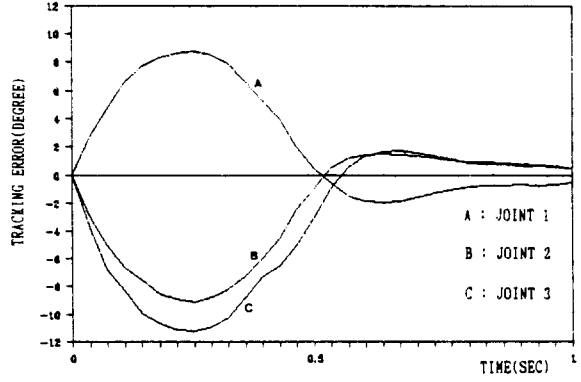


Fig. 10 Tracking error of each joint for PCM with inertia and link parameter uncertainties (10%)

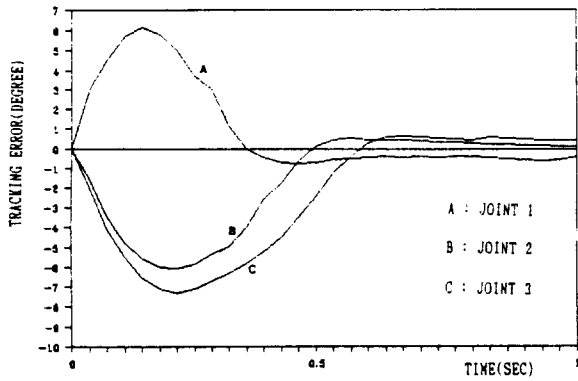


Fig. 8 Tracking error of each joint for PCM with 15kg payload

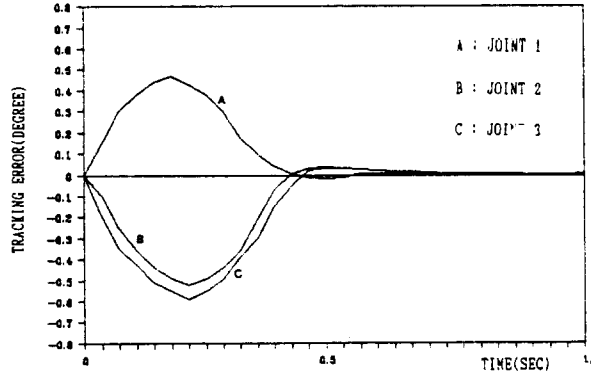


Fig. 11 Tracking error of each joint for PCM with inertia and link parameter uncertainties (15%)

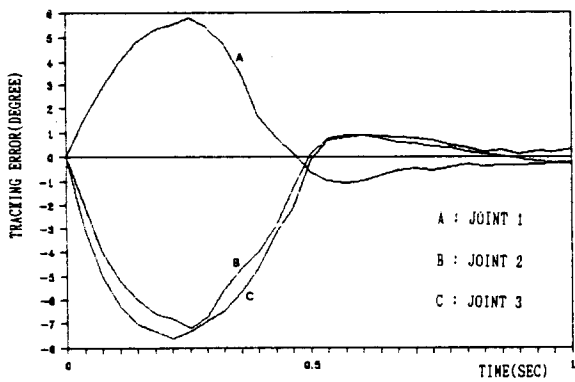


Fig. 9 Tracking error of each for PCM with inertia and link parameters uncertainties (5%)

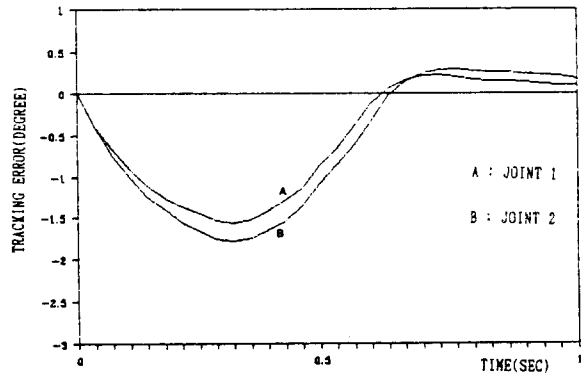


Fig. 12 Tracking error of each joint for PCM with time delay (0.004sec)

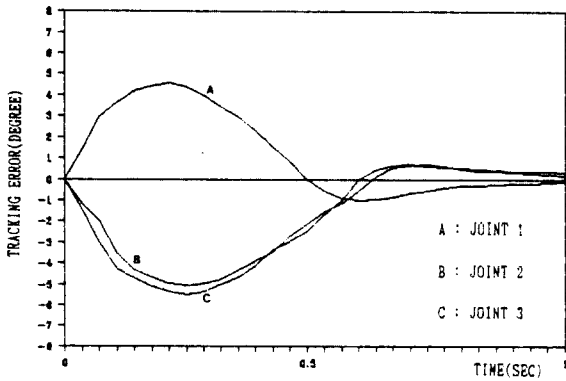


Fig. 13 Tracking error of each joint for PCM with payload (5kg) and time delay (0.0004sec)

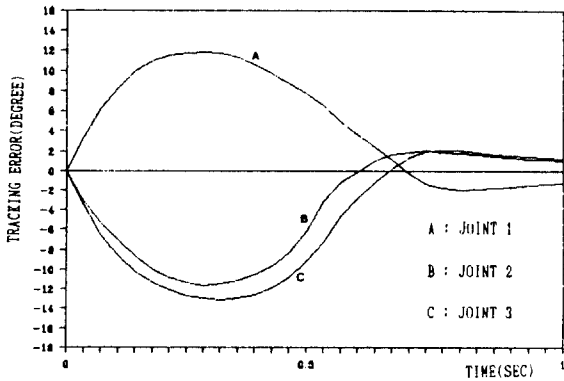


Fig. 14 Tracking error of each joint for PCM with payload (5kg) inertia and link parameter uncertainties (5%), and time delay (0.0004sec)

그림6에서 그림12까지는 제안된 제어기의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 여기서 PCM(persected control method)은 제안된 제어기 나타내고, ECM (existing control method)은 기존의 제어기'를 나타내고 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 로봇매니퓰레이터 제어기의 설계방법을 개선한 새로운 고성능 로봇제어기를 제안하였다.

제안된 로봇제어시스템은 기존모델 추종제어시스템이 로봇제어시스템의 내부루프로 구성되고, 고정된 계인의 적분항을 갖는 상태 피드백제어가 외부루프로

구성되는 새로운 구조의 제어시스템을 설계하였다.

초안정도 이론을 적용한 비선형 적응제어알고리즘으로 구성된 내부루프의 적응모델 추종제어기는 로봇매니퓰레이터의 동적모델의 비선형성의 보상 및 비연성화를 실현하고, 고정된 계인의 적분항을 갖는 외부루프의 상태 피드백제어기로서 전체 폐루프시스템의 안정도를 보장함으로써 매우 향상된 제어성능이 유지되었다.

제안된 제어시스템의 부하의 변동과 관성상수 및 링크상수의 불확실성에 대한 성능시험 결과 미지의 부하변동으로 인한 역학적 특성의 변화 및 모델링 오차로 인한 관성상수와 링크상수의 불확실성의 존재 및 제어기의 실현시 수반되는 계산시간의 지연등의 실제의 작업장에서 수반되는 여러조건에 대해서도 견실하고 정밀한 제어성능이 유지 되었다.

참고문헌

- 1) S. Dubowsky and D.T. Des Forger, "The Application of Model Reference Adaptive Control Robot Manipulators", ASME J. Dyn. Syst., Meas., Contr., Vol, 101, pp. 193~200, 1979.
- 2) S. Dubowsky and T.N. Gardner, "Dynamic Interaction of Links Elasticity and Clearance in Planar Mechanical System", ASME J. Eng., Industry, pp. 652~661, May 1975.
- 3) P.C Parks, "Lyapunov Redesign of Model Reference Adaptive Control Systems", IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. AC-11, No. 3, PP. 362 367, July 1966.
- 4) H. Serji, "An Approach to Multivariable Control of Manipulator", ASME J. Dyn Syst., Meas., Meas., Contr., Vol. 109, pp. 485~493, 1987.
- 5) I.D. Landau and B. Courtiol, "Design of Multivariable Adaptive Model Following Control System", Automatca, Vol. 10, pp. 483 ~494, Pergamon Press, 1974.
- 6) I.D. Landau, Adaptive Control-The Model Reference Approach, Marcel Dekker, New York, 1979.

- 7) I.D. Landau, "A Stability Criterion for Model Reference Adaptive Control Systems", IEEE Trans. Contr., Vol. AC-14, No. 5, pp. 552~555, Oct., 1969.
- 8) Y.K. Choi, M.J. Chang, and Z. Bien, "An Adaptive Control Schemes for Robot Manipulators", IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. 44, No. 4, pp. 1185~1191, 1986.
- 9) L. Mabus and H. Kaufman, "An Implicit Adaptive Algorithm for a Linear model Reference Control Algorithm", in Proc. IEEE Int. Cong. on Decision and Control, pp. 864~865, Dec. 1975.
- 10) K.Y. Lim, "Model Reference Adaptive Control for Linear System with Improved Convergence Rate-Signal Synthesis Method", Trans. KIEE, Vol. 37, No. 10, pp. 733~739, Oct. 1988.
- 11) R. Lozano and I.D. Landau, "Unification and Evaluation of Discrete Time Explicit Model Reference Adaptive Control Design", Automatica, Vol. 17, pp. 593~598, 1981.
- 12) K.V. Monpoli and V.N. Subbaro, "A New Algorithm for Model Reference Adaptive System for System Identification and Control -Part I", IEEE Trans. Syst. Man, Cybern., vol. SMC-4, No. 6, pp. 542~551, Nov. 1974.
- 13) K.J. Astrom and B. Whittenmark, "Self-Tuning Controller Based on Pole I", Zero Placement", IEE Proc., Vol. 127, No. 3, pp. 120~130, 1980.
- 14) W. Li and J.J.E. Slotine, "Globally Convergent Indirect Adaptive Robot Control", in Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Philadelphia, Pennsylvania, 1988.
- 15) M.H. Liu, W. Lin, and Y.F. Huang, "Pole Assignment Self-Tuning Control ofn Robotic Manipulators", 16th ISIR, pp. 289~298, 1986.
- 16) K.J. Astrom and B Wittenmark, "On Self-Tuning Rfgulators", Automatica, Vol. 9, pp. 179~185, 1973.
- 17) H.P. Whitaker, J. Yamron, and A. Icezer, Design of Model Reference Adaptive Systems for Aircragt, Instrumentation Laboratory MIT Cambridge, 1958.
- 18) K.S. Narendra and L.S. Valavani, "Stable Adaptive Controller Design Direct Control", IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. AC-23, No. 4, pp. 570~583, Aug. 1978.
- 19) K.S. Narendra and L.S. Valavani, "Direct and Indirect Adaptive Control", Proc. 7th IFAC Congress. Vol 3, pp. 1981~1988, 1978.
- 20) K.S. Narendra, S.S. Tripathi, G. Luders, and P. Kudva, "Adptive Control Using Lyapunov's Direct Method", Yale Univ., New Haven, Conn., Becton, Center Tech., Rep. CT-43, Oct. 1971.
- 21) K.Y. Lim and M. Eslami, "New Controller Designs for Robot Manipulator Systems Using Lyapunov Direct Method", IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. AC-30, No. 12, 1229~1233, Dec. 1985.
- 22) P.A. Cook and J.Z. Chen., "Robot Properties of Model Reference Adaptive Control Systems", IEE Proc., Vol. 129, Pt. D, No. 6, Nov. 1982.