

◎ 論 文

직접 적응제어방식에 의한 로봇 머니플레이터의 견실한 제어기 설계에 관한 연구

한 성 현* · 박 한 일**

(1989년 10월 31일 접수)

A Study on Robust Controller Design of Robotic Manipulator Using Direct Adaptive Control

Sung-Hyun Han* and Han-Il Pak**

Key Words : Unmodelled Dynamics(비모형화 동특성), Manipulator(머니플레이터), Modeling Error(모델링오차), Robustness(견실성), Direct Adaptive Control(직접 적응제어)

Abstract

This paper deals with the robust controller design of robot manipulator to track a desired trajectory in spite of the presence of unmodelled dynamics in cause of nonlinearity and parameter uncertainty. The approach followed in this paper is based on model reference adaptive control technique and convergence on hyperstability theory but it does away with the assumption that process is characterized by a linear model remaining time invariant during adaptation process. The performance of controller is demonstrated by computed simulation about position and speed control of six link manipulator in case of disturbance and payload variation.

1. 서 론

최근 제어 이론은 산업의 발전과 더불어 눈부신 발전을 거듭하여 왔음에도 불구하고 아직도 실제적인 응용면에 있어서는 여러가지 문제점들이 대두되고 있는 실정이다. 그 중에서 가장 중요한 것은 복잡한 비선형성의 동특성을 지닌 실제 시스템의 정확한 수학적 모델링이 어려움이라 할 수 있다.

특히, 산업용 로봇 머니플레이터는 각 관절사

이에 코리올리스(coriolis)력 및 원심력 등의 강한 비선형 결합의 성질을 지니고 있기 때문에 정확한 동특성의 모델링이 어려워 모델과 제어계에 대한 선형성의 가정 및 프로세스의 진행중 플랜트의 매개변수가 일정하게 유지된다는 것 등의 여러 가정하에서 수행되어 왔으므로 고도의 동력학적 성능이 요구될 때에는 이러한 가정하에서 설계된 제어 알고리즘은 그 수렴 특성을 상실하게되어 좋은 제어성능을 내지 못하게 된다.

따라서 로봇 머니플레이터의 동적 모델링에 있어서 매개변수의 불확실성과 비선형성의 존재하

* 정희원, 부산대학원 기계공학과

** 정희원, 해양대학교 해양공학과

에서도 좋은 제어성능을 가질 수 있고 부하의 변동 및 모델링 오차에도 잘 적응될 수 있는 적응제어 방식에 대하여 많은 연구가 되어 왔다.

적응제어 방식은 플랜트의 동특성에 대한 제한된 정보만을 가지고 예측할 수 있는 불확실성에 대처할 수 있는 진보된 제어방식이라 할 수 있다.

적응 제어기법에는 크게 기준모델 적응제어(model reference adaptive control)^{6), 7)} 방식과 자기동조적응제어(self-tuning adaptive control) 방식^{2), 11)}의 두가지로 나눌 수 있는데 후자의 자기동조적응제어 방식은 대상시스템에 대한 잡음의 영향을 최소로 억제하는 제어방식으로 대상시스템의 특성을 추정하면서 추정된 매개변수를 바탕으로 적절한 제어기를 구성하는 방법으로서, 이는 1970년대 Astrom과 Wittenmark^{3), 14)}에 의해 제안되었으며 이미 많은 응용 결과가 보고 되어 왔다.

그리고 기준모델 적응제어 방식은^{4), 7)} Whitaker 등에 의해 MIT rule이 발표된 이래 1960년대 이후부터 본격적인 연구가 시작되었다고 할 수 있는데 이 방식은 원하는 동특성을 갖는 기준 모델을 설정하여 이 기준모델의 출력과 플랜트의 출력이 일치하도록 플랜트의 파라미터를 조정하는 방식인데 그 제어 방식에는 직접 적응제어(direct adaptive control)¹⁰⁾와 간접적응제어(indirect adaptive control) 방식⁵⁾으로 구별된다.

그리고 직접 적응 제어 방식에서는 플랜트와 제어계를 포함한 전체 제어계의 전달함수가 원하는 기준모델의 전달함수와 일치하도록 하기 위하여 플랜트의 출력과 모델의 출력 사이의 오차를 적응 제어칙(adaptive control law)에 사용하는 반면에, 간접 적응제어(indirect adaptive control) 방식은 플랜트의 매개변수를 추정하여 제어기의 매개변수를 조정하도록하는 방식인데, 이 방식은 효율적인 연산이 가능한 on-line 상태 추정자를 구성해야 하는 단점이 있으므로 보편적으로 직접 적응제어방식이 많이 사용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 기준모델 적응제어 방식에서 직접적응제어 방식을 사용하여 부하의 변동 및 외란의 증가에 대해서도 머니플래이터의 정확한 궤적의 추종 및 속도의 실시간 제어가 가능한 안정한 제어기를 설계하고자 한다. 제 2절에서는 로봇 머니플래이터의 기구학적 이론 및 동적 모델링에 대한 기본이론을 전개하고, 제 3절에서는 안정한 제어기의 설계를 위한 제어알고리즘과 초

안정(hyperstability)이론을 통한 안정성 해석을 다룬다. 그리고 제 4절에서는 제안된 제어기의 성능 평가를 위해 6관절 로봇인 스텐포드 로봇 머니플래이터에 대한 시뮬레이션을 통한 결과를 토크 계산법(computed torque method)에 의한 결과와 비교 검토함으로써 제안된 제어기의 성능을 예증한다.

2. 이론적 배경

2.1 머니플래이터의 기구학

기구학은 직교 공간(cartesian space)에서의 로봇 팔(end-effect)의 위치 및 방향과 관절 공간에서의 변수들 사이의 관계를 다루는 분야로서 직접기구학(direct kinematics)과 역 기구학(inverse kinematics)이 있다.

본 연구에서의 링크 상호관의 관계는 Denavit-Hartenberg Representation의 A 행렬을 사용하였는데 각 link parameter θ , α , d , a 의 변환 행렬은 회전 운동을 하는 관절의 경우에 다음과 같이 기술된다.

$$A_n = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\cos\theta \sin\alpha & \sin\theta \sin\alpha & a \cos\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \cos\alpha & -\sin\theta \cos\alpha & a \sin\theta \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 θ 는 Z_{n-1} 축을 중심으로 X_n 축과 X_{n-1} 축과의 관절각을 나타내고, d 는 Z_{n-1} 축을 중심으로 생각할 때 $(n-1)$ 번째 좌표계의 원점에서 Z_{n-1} 축과 X_{n-1} 축의 교점간의 거리이며, a 는 Z_{n-1} 축과 Z_n 축과의 가장 가까운 거리를 나타내고, 또한 a 는 X_n 축을 중심으로 했을 경우 Z_{n-1} 축에서 Z_n 축까지의 offset 각을 나타내고 있는데 각 링크의 파라미터는 Fig. 1에서 상세하게 나타내고 있다.

그리고 prismatic joint의 경우 "A행렬"은 식 (1)에서 a 의 값이 0이 된다.

직접 기구학은 기본좌표계에 대한 머니플래이터의 손끝의 위치 및 방향을 구하는 것으로서 손끝의 위치 및 방향은 "A행렬"의 곱으로 나타내는데, n 개의 링크를 갖는 머니플래이터의 손끝의 위치 및 방향은 다음과 같이 기술된다.

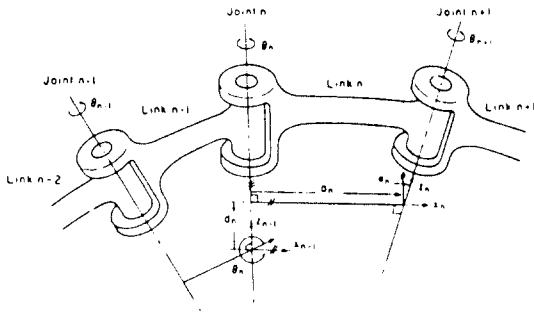


Fig. 1 Manipulator link parameters a , d , α and θ

$$T_n = A_1 A_2 \cdots A_n$$

$$= \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdots \cdots (2)$$

여기서 Fig. 2와 같이 6개의 링크를 가지는 Stanford manipulator를 기본 모델로 사용한다면 식

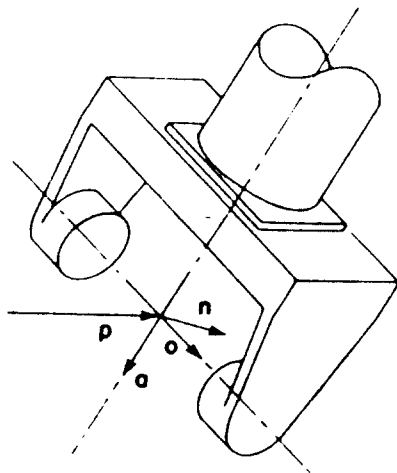


Fig. 2 o , a , n and p vectors

(2)의 변환행렬의 구성 요소인 n , o , a , p 의 값을 다음과 같다.

$$n_x = C_1(C_2(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - S_2S_5C_6 + C_4S_6)$$

$$n_y = S_1(C_2(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - S_2S_5C_6) + C_1(S_4C_5C_6 + C_4S_6)$$

$$n_z = -C_2(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - C_2S_5C_6$$

$$o_x = C_1(-C_2(C_4C_5C_6 + S_4C_6) + S_2S_5S_6)$$

$$o_y = S_1(-C_2(C_4C_5S_6 + S_4C_6) + S_2S_5S_6) + C_1(-S_4C_5S_6 + C_4C_6)$$

$$o_z = S_2(C_4C_5S_6 + S_4C_6) + C_2S_5S_6$$

$$a_x = C_1(C_2C_4S_5 + S_2C_5) - S_1S_4S_5$$

$$a_y = S_1(C_2C_4S_5 + S_2C_5) + C_1S_4S_5$$

$$a_z = -S_2C_4S_5 + C_4S_5$$

$$p_x = C_1S_2d_3 + S_1d_2$$

$$p_y = S_1S_2d_3 + C_1d_2$$

$$p_z = C_2d_3$$

여기서 $S_i = \sin \theta_i$, $C_i = \cos \theta_i$ 를 나타낸다.

2.2 동적 모델링

일반적으로 머니플레이터의 링크 i 에 대해 주어진 점 r 의 위치를 기준좌표계에 표시하면

$$r = T_i \cdot ir \cdots \cdots (3)$$

이 되고, 또한 이것을 미분하여 이점의 속도를 구하면

$$\frac{dr}{dt} = \left(\sum_{j=1}^i \frac{\partial T_i}{\partial q_j} \dot{q}_j \right) ir \cdots \cdots (4)$$

이 된다. 여기서 T_i 는 링크 i 의 변환(transform)을 나타내고, q 는 기준좌표계를 나타내는 매개변수이다.

그러므로 링크 i 위에 위치한 미소 질량 dm 의 운동 에너지는

$$dK_i = \frac{1}{2} \text{Trace} \left\{ \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial T_i}{\partial q_j} \dot{q}_j \right\} ir \cdots (5)$$

으로 주어지므로 링크 i 의 전체 운동에너지는 다음과 같이 된다.

$$K_i = \int_{link i} ir \cdot ir^T dm$$

$$= \frac{1}{2} \text{Trace} \left\{ \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial T_i}{\partial q_k} \left(\int_{link i} ir \cdot ir^T \cdot dm \right) \frac{\partial T_i^T}{\partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k \right\} \cdots \cdots (6)$$

식 (4)에서 우변의 적분항 ($\int ir \cdot ir^T \cdot dm$)은 가장 관성행렬을 나타내는 요소로서 Pseudo inertia matrix라고 불리우는데 다음과 같이 정의되고 있다.

$$J = \int_{link\ i} ir \cdot ir^T \cdot dm$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{-I_{ixx} + I_{iyy} + I_{izz}}{2} & I_{ixy} & I_{ixz} & m_i \bar{x}_i \\ I_{ixy} & \frac{I_{ixx} - I_{iyy} + I_{izz}}{2} & I_{iyz} & m_i \bar{y}_i \\ I_{ixz} & I_{iyz} & \frac{I_{ixx} + I_{iyy} - I_{izz}}{2} & m_i \bar{z}_i \\ m_i \bar{x}_i & m_i \bar{y}_i & m_i \bar{z}_i & m_i \end{bmatrix} \dots (7)$$

여기서 I는 관성모멘트를 나타내고 $m_i \bar{x}_i, m_i \bar{y}_i, m_i \bar{z}_i$ 는 링크 i의 일차 모멘트를 나타내며, 또한 m_i 는 링크 i의 질량을 나타낸다.

그런데 식 (6)에서 주어진 머니플레이터의 전체 운동에너지는 머니플레이터의 구조에 대한 운동 에너지를 나타내고 있으므로 액츄에이터(actuator)의 운동에너지를 고려한 실질적인 전체 운동에너지는 다음과 같이 주어진다.

$$K_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^i Trace \left(\frac{\partial T_j}{\partial q_i} J_i \frac{\partial T_i^T}{\partial q_k} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n I_{ai} \dot{q}_i^2 \dots (8)$$

여기서 우변의 두번째 항은 액츄에이터의 운동 에너지이고 I_{ai} 는 등가질량을 나타낸다.

그리고 작업좌표에서 머니플레이터를 제어하기 위해 필요한 입력 힘 벡터 $U(t)$ 를 입력관절토크 $\tau(t)$ 와의 관계식으로 나타내면 다음과 같이 기술된다.

$$\tau(t) = Z^T(q) U(t) \dots (14)$$

이 얻어지고 또한 머니플레이터의 가속도는 식 (11), (12), (13), (14)으로부터

$$\ddot{x}_p = Z(q) \ddot{q} - Z(q) D^{-1}(q) [G(q) - C(q, \dot{q}) - Z^T(q) U(t)] \dots (15)$$

으로 주어진다.

그러므로 머니플레이터의 상태변수를 $Xs(t)^T = [Xp(t), Xp(t)]^T, Us(t) = U(t)$ 으로 정의하고 머니플레이터의 동적방정식을 상태 방정식으로 기술하면 다음과 같이 기술된다.

$$\dot{Xs}(t) = As(t) Xs(t) + Bs(t) Us(t) \dots (16)$$

여기서, $Xs(t)$ 는 상태벡터행렬($n \times n$), $Us(t)$ 는 입력 벡터행렬($n \times 1$), 매개변수 $As(t)$ 및 $Bs(t)$ 는 다음과 같다.

$$As(t) = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ Z(Xp)D^{-1}(Xp) & G(Xp) & & \\ & I & & \\ Z(Xp)Z^{-1}(Xp) - Z(Xp)D^{-1}(Xp)C(Xp, Xp)Z^{-1}(Xp) & & & \end{bmatrix}$$

$$Bs(t) = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ Z(Xp)D^{-1}(Xp)Z^T(Xp) & & & \end{bmatrix}$$

여기서 O 및 I는 각각 영벡터 행렬 및 단위 벡터 행렬을 나타낸다.

본 연구에서 제안하고 있는 기준모델 적응제어 시스템의 궁극적 목적은 플랜트와 기준모델의 출력의 오차가 영이 되게 하는 즉, $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ 가 되도록 하는 제어 이득을 선정하여 플랜트인 로봇 머니플레이터의 동특성이 기준 모델을 추종하도록 하는 것이므로 기준 모델의 선정이 매우 중요하다.

그런데 각 관절의 자유도(degree of freedom)가 상호결합의 시변 비선형(nonlinear)의 동특성을 지닌 로봇 머니플레이터의 각 관절에 대한 기준모델로서는 Dubowsky⁵⁾에 의해 제안된 방법으로서 다음과 같이 기술되는 시불변 선형 2차 미분 방정식으로 선정할 수 있다.

$$\ddot{X}mi + A1i \dot{X}mi + AOi Xmi = Umi, \quad i=1,2, \dots, n \dots (17)$$

그러므로 기준 모델의 방정식을 상태공간방정식(state space equation)으로 표기하면 다음식과 같이 기술되어진다.

$$\dot{X}m = Am Xm + Bm Um \dots (18)$$

여기서,

$$Am = \begin{bmatrix} 0 & I \\ \Omega_0 & \Omega_1 \end{bmatrix} \quad Bm = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}$$

이고 $\Omega_0 = -\text{diag}(A_{0i}), \Omega_1 = -\text{diag}(A_{1i})$ 이며 $A_{0i}, A_{1i} > 0$ 이다. 그리고 $Xm \in R^{n \times n}$ 및 $Um \in R^{n \times 1}$ 는 각각 기준 모델의 출력 및 입력의 상태변수를 나타내고 있다.

또한 기준모델과 플랜트와의 오차 방정식은 다음과 같다.

$$e(t) = Xm(t) - Xs(t) \dots (19)$$

$$V(t) = Q \cdot e(t) \dots (20)$$

위의 식 (20)에서 Q는 선형보상인자(linear com-

pensator)이다.

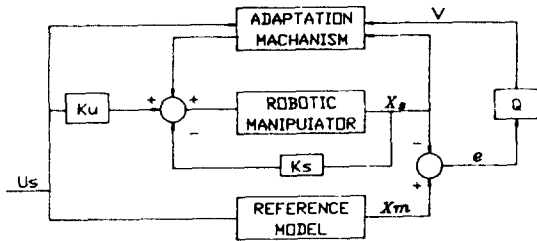


Fig. 3 Block diagram of model reference adaptive control system

그리고 본 연구에서 제안된 매니퓰레이터의 기준모델 적응제어시스템(MRAC)의 제어입력은 Fig. 3에서와 같이 적응칙(adaptation law)에 의하여 다음과 같다.

$$Us(t) = \phi_1(V, Xs, t) Xs(t) + \phi_2(V, Um, t) Um(t) - KsXs(t) + KmUm(t) \dots (21)$$

여기서, Ks 및 Km 은 각각 피드백게인 및 피드 포워드게인을 나타내고, ϕ_1 및 ϕ_2 는 단위 벡터 적응 제어칙(unit vector adaptation law)으로서 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \phi_1(V, Xs, t) &= P1 \cdot V \cdot \|V\|^{-1} \cdot \text{sgn}(Xs)^T \\ \phi_2(V, Um, t) &= P2 \cdot V \cdot \|V\|^{-1} \cdot \text{sgn}(Um)^T \end{aligned} \dots (22)$$

여기서 $P1, P2$ 는 단위벡터 적응제어칙의 게인으로 (23)식의 조건을 만족하는 수로서 p.d(positive definite)이어야 한다.

$$\begin{aligned} P1 &\succeq (\wedge_{kr}^T)^{\text{max}} (\wedge_D^{-1})^{\text{min}} \\ P2 &\succeq (\wedge_{ss}^T)^{\text{max}} (\wedge_D^{-1})^{\text{min}} \end{aligned} \dots (23)$$

여기서 $(\wedge_{kr}^T)^{\text{max}}$ 및 $(\wedge_{ss}^T)^{\text{max}}$ 는 각각 $[RR^T]$ 및 $[SS^T]$ 에 대한 Xs 의 최대고유치이고 $(\wedge_D^{-1})^{\text{min}}$ 은 $[D^{-1}]$ 에 대한 Xs 의 최소 고유치를 나타낸다. 그리고 $[R]$ 과 $[S]$ 는 다음과 같이 정의되고 있다.

$$\begin{aligned} [R] &= [Ks + Bs^t (Am - As)] [Bs]^{-1} \\ [S] &= [(Bs^t Bm - Km)] [Bs]^{-1} \dots (24) \end{aligned}$$

여기서 $Bs^t = (Bs^t Bs)^{-1} Bs^t$ 로 정의된다.

3. 안정도 해석

일반적으로 모델 추종 적응제어 시스템의 안정성 해석에 있어서는 우선 그 시스템의 플랜트 및 기준 모델의 파라미터의 구조적 특성에 의하여 결정되어지는 구조적 완전모델추종조건(structural perfect model following contidion)을 언급하여야 한다.

그러나 본 연구에서 제안하고 있는 직접 적응제어방식은 시간이 지남에 따라 상태 오차($e = Xm - Xs$)가 "0"으로 수렴하는 구조를 갖도록 제어기를 설계하므로 이 방식은 모델의 구조적인 특성에 무관하므로 완전모델 추종조건을 언급하지 않아도 된다.

그리고 제안된 Fig. 3의 기준 모델 적응제어시스템은 식 (18), (19), (22)로부터 다음과 같이 상대오차에 대한 방정식으로 기술되어진다.

$$\dot{e} = Am \cdot e + [0 : I] W \dots (26)$$

$$V = Q \cdot e \dots (27)$$

$$W1 = -W = [Bs]([Bs^t]([Am] - [As]) + Ks - \phi_1) Xs + [Bs]([Bs^t] [Bm] - Km + \phi_2) Um \dots (28)$$

또한, 위의 식 (26), (27), (28)은 선형 시불변 피드포워드(linear time invariant feed forward) 블록과 비선형시불변(nonlinear time varying)의 피드백 블록으로서 구성되는 Fig. 3의 제어 시스템에 대한 등가표시(equivalent representation)를 Fig. 4와 같이 구성시킬 수 있다.

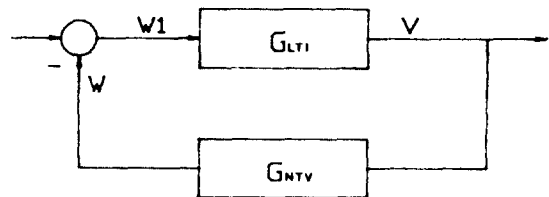


Fig. 4 Equivalent representation of model reference adaptive control system

Fig. 4에서 G_{LTI} 는 선형시불변(linear time invariant)블록의 전달함수이고, G_{NTV} 는 비선형 시불변(nonlinear time varying)블록의 전달함수를 나타내

고 있다.

본 연구에서 제안되고 있는 Fig. 3의 직접 적응 방식에 의한 기준모델 적응 제어시스템이 점근적인 초안정(asymptotically hyperstability)을 유지하기 위해서는 다음의 조건을 만족해야 한다.

조건1: Fig. 4의 선형시불변블록의 전달함수 G_{LN} 는 SPR(strictly positive real)이어야 한다.

$$G_{LN}(S) = Q(SI - AM)^{-1} \begin{pmatrix} Q \\ I \end{pmatrix}$$

조건2: Fig. 4에서 피드백의 비선형시변 블록은 다음과 같이 정의되는 부동식,

$$\int_0^t V^T W d\tau \geq -\gamma_0, \forall t \geq 0 \dots (29)$$

을 만족하여야 한다. 여기서 γ_0 는 임의의 상수이다.

첫번째의 조건은 앞절에서 언급된 선형보상인자(linear compensator)를 다음과 같이 설정함으로써 G_i 이 SPR하게 된다.

$$Q = [O : I] \quad L \dots \dots \dots (30)$$

여기서 L은 아래의 Lyapunov 방정식,

$$Am^T L + L Am = -C \dots \dots \dots (31)$$

의 해(solution)이다. 윗식에서의 C는 양의 부호인 정치행렬(positive definite symmetric matrix)로서 기준모델이 디커플링(decoupling)이므로 다음과 같이 대각선 행렬로 구성하였다.

$$C = \begin{bmatrix} \text{diag}(C_i) & 0 \\ 0 & \text{diag}(C_{i-k}) \end{bmatrix}, C_i, C_{i+k} > 0 \dots \dots (32)$$

(i=1,2,...,n)

그리고, 시스템의 초안정을 위한 두번째 조건인 식(29)의 만족은 식(22)와 같이 정의되는 단위백터 적응제어칙에 의해 달성되어진다.

따라서, 식(28)을 식(29)에 대입하면 다음과 같이 기술된다.

$$\int_0^t V^T [B_s \Phi 1 - B_s B_s^+ (Am - As) + B_s K_s] d\tau + \int_0^t V^T [B_s \Phi 2 - B_s B_s^+ B_m - B_s K_m] d\tau \geq -\gamma_0, \forall t \geq 0 \dots \dots \dots (33)$$

그러므로 식(33)에서 적응칙 $\Phi 1$ 및 $\Phi 2$ 의 계인 P1 및 P2의 값은 다음의 조건을 만족하는 값으로 정의되어야 한다.

$$\left. \begin{aligned} P1 &\geq \| B_s [B_s^+ (Am - As) + K_s] \| \quad \| B_s^{-1} \| \\ P2 &\geq \| B_s [B_s^+ B_m - K_m] \| \quad \| B_s^{-1} \| \end{aligned} \right\} \dots (34)$$

4. 시뮬레이션

일반적으로 기준모델 적응제어방식은 기존의 여러 적응 제어기법중 다변수 입 출력 시스템으로 모델링 가능하고, 이상적인 응답 특성을 갖는 기준모델의 설정이 가능한 경우에 가장 적당한 제어기법으로서 미지의 플랜트에 적당한 제어 입력을 가하여 그 응답특성이 기준모델의 응답특성과 일치하게하는 방식이다.

그러나 플랜트의 모든 상태를 측정하기는 어려우므로 입력과 출력만을 이용하여 문제를 해결하고자 많은 연구가 행하여져 왔다.

본 연구에서는 제안된 기준모델 적응 제어기(model reference adaptive controller)의 제어성능 평가를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 모델은 Fig. 2와 같이 6개의 관절을 갖는 스탠포드 로봇을 선정하였다.

그리고 사용된 모델에 대한 각 링크의 사양 및 관성 모멘트는 각각 Table 1, Table 2 및 Table 3에서 나타내고 있다.

Table 1 Link parameters for Stanford manipulator

Link	Variable	α	a	d	$\cos \alpha$	$\sin \alpha$
1	θ_1	-90°	0	0	0	-1
2	θ_2	90°	0	d_2	0	1
3	θ_3	0	0	d_3	1	0
4	θ_4	-90°	0	0	0	-1
5	θ_5	90°	0	0	0	1
6	θ_6	0	0	0	1	0

Table 2 Link mass and first moments for Stanford manipulator

Link	Mass, kgf	x, cm	y, cm	z, cm
1	9.29	0	1.75	-11.05
2	5.01	0	-10.54	0
3	4.25	0	0	-64.47
4	1.08	0	0.92	-0.54
5	0.63	0	0	5.66
6	0.51	0	0	15.54

Table 3 Actuator and link inertias for the Stanford manipulator

Link	Ia	mk _{xx} ² kgf·m ²	mk _{yy} ² kgf·m ²	mk _{zz} ² kgf·m ²
1	0.953	0.276	0.255	0.071
2	2.193	0.108	0.018	0.100
3	0.782	2.51	2.51	0.006
4	0.106	0.002	0.001	0.001
5	0.097	0.003	0.003	0.0004
6	0.020	0.013	0.013	0.0003

그리고, 기준모델은 각 링크에 대하여 동일한 모델을 사용하였는데, 식 (16)에서의 매개변수 A_{oi} 및 A_{ii} 의 값은 안정한 평형점(stable equilibrium point)근처에서 선형화된 모델의 매개변수의 값과 거의 일치하는 값인 $A_{oi}=2.04$, $A_{ii}=1.6$ 으로 선정하였다.

또한, Lyapunov 방정식인 식 (30)에서의 C의 값은 모델의 구조를 고려하여 다음과 같이 대각선

행렬로 선정하였다.

$$C = \begin{bmatrix} 35 I & 0 \\ 0 & 10 I \end{bmatrix}$$

여기서 I은 6x6의 대각선 단위 행렬을 나타낸다. 그리고, P1 및 P2의 값은 각각 식 (33)의 조건을 만족하는 값으로서 0.4 및 15로 선정하였고, 또한 K_s 및 K_m 의 값은 식 (26)에 의하여 각각 다음과 같이 선정하였다.

$$K_s = [\text{diag}(50, 360, 100, 150, 100, 60) :$$

$$\text{diag}(80, 300, 90, 100, 80, 100)]$$

$$K_m = [\text{diag}(30, 100, 25, 40, 50, 60)]$$

또한 시뮬레이션에 사용된 로봇 머니플레이터 모델에 대한 자코비안(jacobian)행렬은 다음과 같다.

$$Z(q) = [Z_1(q), Z_2(q), Z_3(q), Z_4(q), Z_5(q), Z_6(q)]$$

여기서,

$$Z_1(q) = \begin{bmatrix} -d_2(C_2(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - S_2S_5C_6) + S_2d_3(S_4C_5C_6 + C_4S_6) \\ -d_2(-C_2(C_4C_5S_6 + S_4C_6) + S_2S_5S_6) + S_2d_3(-S_4C_5S_6 + C_4C_6) \\ -d_2(C_2C_4S_5 + S_2C_5) + S_2d_3S_4S_5 \\ -S_2(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - C_2C_6S_5 \\ S_2(C_4C_5S_6 + S_4C_6 + C_2S_5S_6) \\ -S_2C_4S_5 + C_2S_5 \end{bmatrix}$$

$$Z_2(q) = \begin{bmatrix} d_3(C_4C_5C_6 - S_4S_6) \\ -d_3(C_4C_5C_6 + S_4C_6) \\ d_3C_4S_5 \\ S_4C_5C_6 + C_4S_6 \\ -S_4C_5S_6 + C_4C_6 \\ S_4S_5 \end{bmatrix} \quad Z_3(q) = \begin{bmatrix} -S_5C_6 \\ S_5S_6 \\ C_5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$Z_4(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -S_5C_6 \\ S_5S_6 \\ C_5 \end{bmatrix} \quad Z_5(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ S_6 \\ C_6 \\ 0 \end{bmatrix} \quad Z_6(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

여기서 $S_i = \text{SIN}(\theta_i)$, $C_i = \text{COS}(\theta_i)$, $S_{ij} = \text{SIN}(\theta_i + \theta_j)$, $C_{ij} = \text{COS}(\theta_i + \theta_j)$ 를 나타낸다.

그리고, 궤적 계획에서 작업수행을 3초 동안하였고, 초기위치 $(-0.2, 0.5, 0.3)\text{rad}$ 에서 출발하여, 최종 도달점 $(-0.7, 1.2, -0.3)\text{rad}$ 까지 도달하도록 하였다.

샘플링시간은 0.002초로 하였고, 무부하상태와 3.5kg의 부하상태에 대하여 수행하였다. 각 관절의 특성 다항식은 감쇠상수를 0.65~0.85로 하였고, 주파수는 12Hz으로 하였다. 그리고 시뮬레이션은 coprocessor 80287을 내장한 16bit AT(40MB) 컴퓨터에서 수행하였다.

그리고, 제어효과를 평가 하기 위하여 다음 식과 같이 주어지는 상수계환 이득을 갖는 토크 계산법(computed torque control method)과 비교검토 하였다.

$$U_s(t) = D(q(t))(\ddot{q}_m(t) + K_v(\dot{q}_m(t) - \dot{q}(t)) + K_p(q_m(t) - q(t)) + C(q(t), \dot{q}(t)) + G(q(t)) \dots (35)$$

여기서 K_v 와 K_p 는 각각 속도와 위치의 계환 이득으로서 $K_v = (18, 30, 45, 50, 40, 35)$, $K_p = (100, 200, 350, 250, 400, 300)$ 으로 주었으며, \ddot{q}_m , \dot{q}_m 는 각각 기준 모델 및 머니퓰레이터의 관절 i 의 속도를 나타내고 있다. (Fig. 5)

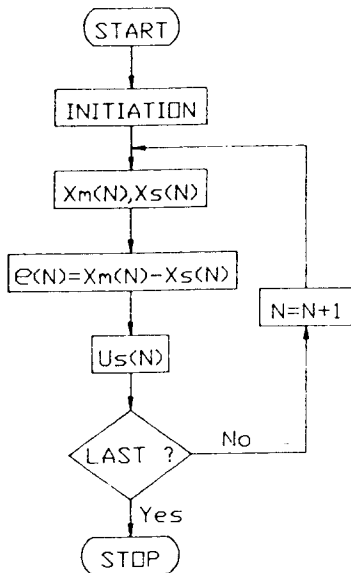
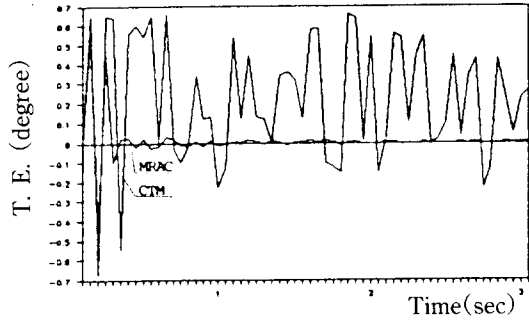
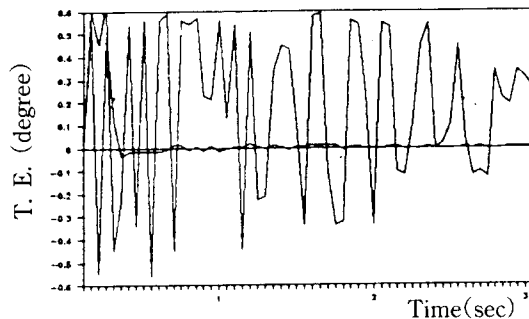


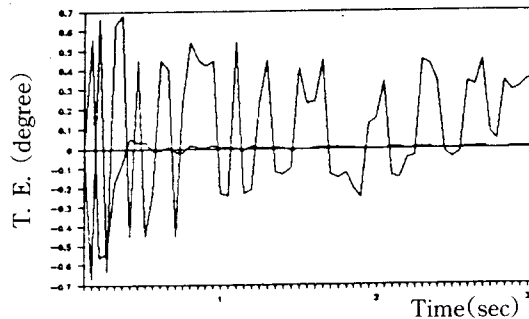
Fig. 5 Flowchart for simulation



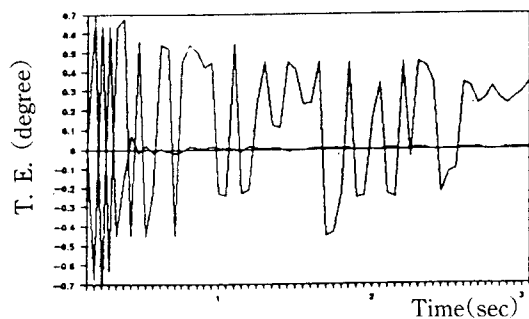
(a) Tracking error of joint 1



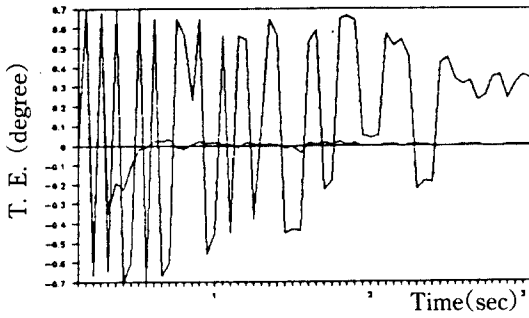
(b) Tracking error of joint 2



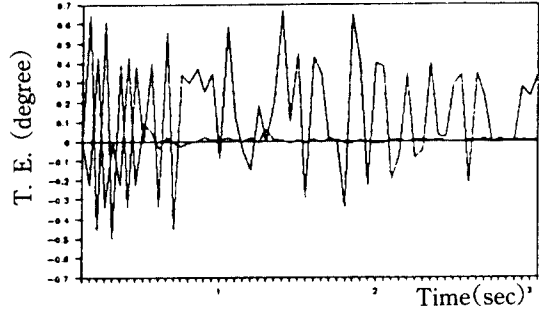
(c) Tracking error of joint 3



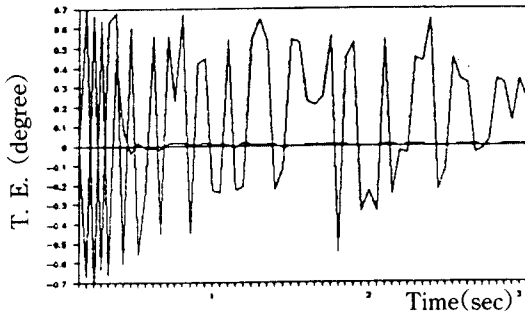
(d) Tracking error of joint 4



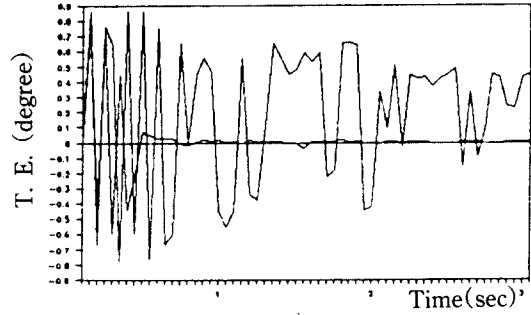
(e) Tracking error of joint 5



(c) Tracking error of joint 3

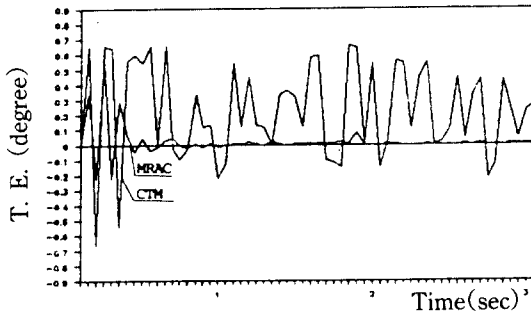


(f) Tracking error of joint 6

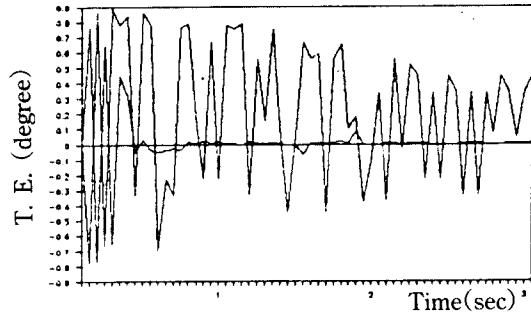


(d) Tracking error of joint 4

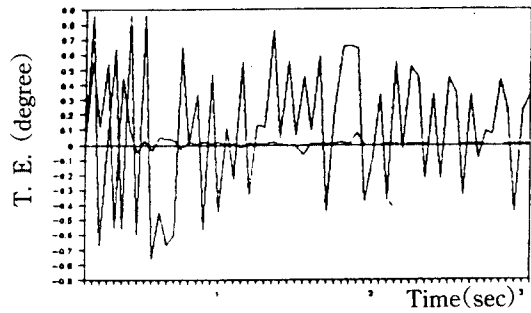
Fig.6 Comparison of control performance of MRAC and computed torque control method for no load



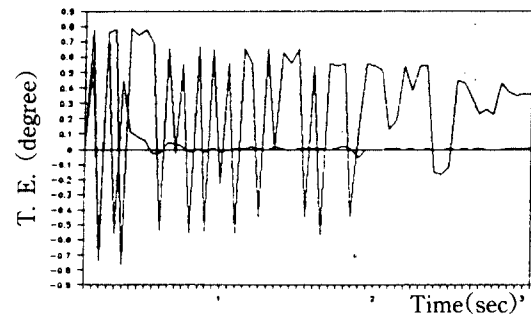
(a) Tracking error of joint 1



(e) Tracking error of joint 5



(b) Tracking error of joint 2



(f) Tracking error of joint 6

Fig.7 Comparison of control performance of MRAC and computed torque control method for 3.5kg load

위의 Fig. 6 및 Fig. 7은 무부하 상태 및 부하 상태에 대하여 각 관절의 추종 오차를 본 연구에서 제안한 제어기법과 토크 계산법(computed torque control method)에 의한 결과를 비교하여 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과를 보면 무부하 상태의 경우 본 연구에서 제안된 제어기에 의한 각 관절의 추종은 0.4초 이내에, 3.5kg 부하 상태에서는 약 0.45초 이내에 대부분의 관절이 정상상태로 수렴하고, 오차의 변동이 조금 큰 관절5 및 관절6도 실행후 약 0.5초 이내의 빠른 속도로 정상상태로 수렴되고 있어 기존의 토크 계산법에 비하여 훨씬 좋은 추종상태를 나타내 보이고 있다.

그리고 속도의 제적은 가속, 등속, 감속으로 연결되는 사다리꼴 형태로 주어지는 기준 모델을 추종하도록 하였다. 임의의 속도에 대한 제어가능성을 확인하기 위하여 부하의 변동 및 외란의 변동에 대한 출력오차의 수렴속도 및 수렴여부를 검토하였다. Fig. 8은 무부하 및 3.5kg 상태에서의 속도 추종상태를 나타내고 있는데, 무부하의 경우엔 약 0.4초 이내에, 3.5kg 부하의 경우 0.5초 이내에 정상상태로 수렴하므로 매우 좋은 모델 추종상태를 보여주고 있다.

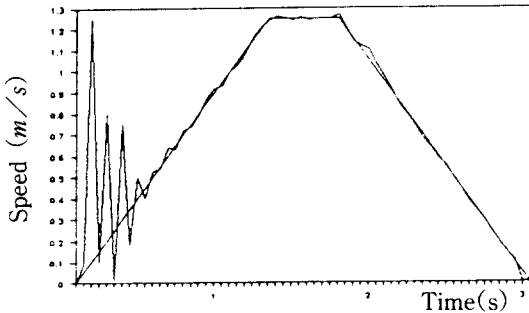


Fig. 8 Velocity tracking of end-effector

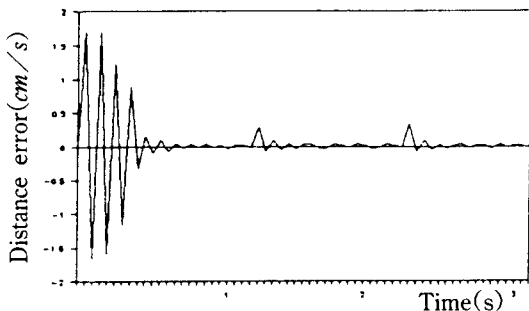


Fig. 9 Distance error of end-effector in case of load variation

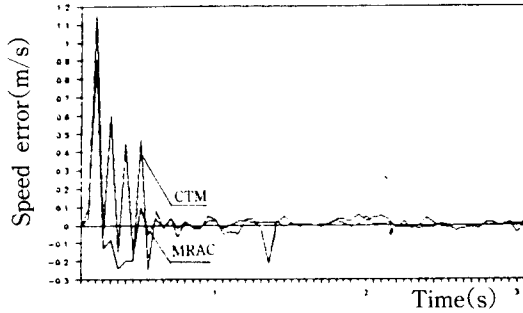


Fig. 10 Speed tracking error of end-effector by MRAC and CTM

그리고 Fig. 9는 3.5kg 상태에서 1.2초 및 2초 이후에 각각 0.5kg 및 1kg의 부하를 첨가시켰을 경우의 추종상태를 나타내고 있는데 거의 0.05초 이내에 정상상태로 수렴되어 정상편차가 없는 견고성(robust)을 보여 주고 있다(Fig. 10).

5. 결 론

기준모델 적응제어(model reference adaptive control)방식은 비모형화 동특성(unmodelled dynamics)을 갖는 플랜트를 제어함에 있어서 제어계의 특성을 원하는 이상적인 특성을 갖는 기준 모델의 동특성과 일치하게 하는 제어기를 적응적으로 구성하는 제어기법으로서 본 연구에서는 구조적 완전 모델 추종조건이나 명확한 매개변수의 추정자를 필요로 하지않는 직접 적응제어(direct MRAC)방식을 사용하여 다관절 로봇 머니플레이터의 견실한 제어기를 설계하였다.

그리고 설계된 제어기의 제어성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 기존의 방식인 토크 계산법과 비교검토하였다.

시뮬레이션 결과 제안된 제어기법에 의한 머니플레이터의 각 관절은 무부하 상태 및 부하의 변동 상태에서도 각 관절은 빠른 시간내에 거의 정확한 모델추종상태를 보여 주므로써, 정상편차가 없는 견실성을 확인할 수 있었다. 그리고 end-effector 임의의 속도 및 위치에 대해 순간적인 부하의 변동 및 외란의 경우에도 0.05초 이내의 매우 빠른 시간내에 정상상태로 되돌아와 임의의 속도 및 위치에 대한 정밀제어가 가능함을 보여 주므로써 본 연구에서 제안된 제어기법은 기존의 다른 제어방식에 비하여 그 제어성능의 우수성을 입증할 수

있었다.

참 고 문 헌

- 1) Koivo, A. J. and T. H. Guo, "Adaptive Linear Controller for Robotic Manipulators", IEEE Trans., AC-29, pp. 162~171, 1983
- 2) Liu, M. H., W. Lin, and Y. F. Huang, "Pole Assignment Selftuning Control of Robotic Manipulators" 16th ISIR, pp. 289~298, 1986
- 3) Kouse, R. L. and B. Friendlander, "Robust Adaptive Control-Conditions for Global Stability", IEE Trans. on Automat. Contr., Vol. Ac-30, pp. 610~623, 1985
- 4) Balestring, A., G. De Maria and L. Sciavico, "An Adaptive Modeling Following Control for Robotic Manipulators", ASME, Vol. 105, pp. 143~151, 1983
- 5) Lim, Kye-Young, "Model Reference Adaptive control for Linear System with Improved Convergence Rate-Parameter Adaptation Method", Trans. KIEE, Vol. 37, Nn. 10, pp. 733~739, Oct. 1988
- 6) 김성득, 양해원, "모형화 특성을 갖는 기준모델 적응제어 시스템의 견고성 해석", 전기학회 논문지, 제36권, 10호, 1987
- 7) Landau, Y. D., "Adaptive Control-The Model Reference Approach", NY : Marcel Dekker, 1979
- 8) Landau, I. D., "A Stability Criterion for Model Reference Adaptive Control Systems", IEEE Trans. Austo. Contr., Vol. Ac-14, No. 5, pp. 552~555, Oct. 1969
- 9) Choi, Y. K., M. J. Chung and Z. Bien., "An Adaptive Control Scheme for Robot Manipulators", INT. J. Control, Vol. 44, No. 4, pp. 1185~1191, 1986
- 10) Cook, P. A., M. A., J. Z. Chen., "Robust Properties of Model Reference Adaptive Control Systems", IEE Proc. Vol. 129, Pt. D, No. 6, Nov. 1982
- 11) 이상효, 양태규, "적응극점 배치 및 자기동조 제어방법에 의한 로보트 매니플레이터 제어", 전기학회논문지, 37권, 9호, 1988
- 12) Narendra, K. S., and P. Kudva, "Stable Adaptive Schemes for System Identification and control-Part I", this issu, pp. 542~551, 1974
- 13) Narendra K. S. and P. Kudva, "Stable Adaptive Schemes for System Identification and Control-Part II", this issu, pp. 552~560, 1974
- 14) Chen, B. S. and C. M. Lin, "Multipurpose Adaptive Control in Deterministic Multivariable System", IEE Proc. Vol. 135, Pt. D. No. 4, 1988
- 15) ROHRS, C., "Adaptive Control in the Presence of Unmodelled Dynamics", Ph. D Thesis, MIT, LIDS Report TH-1254, 1982



ICM-6
 THE SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE
 ON
 MECHANICAL BEHAVIOUR OF MATERIALS
 = FIRST CIRCULAR AND CALL FOR PAPERS =

July 29 - August 2, 1991

Kyoto International Conference Hall Kyoto, Japan
 Organized by The Society of Materials Science, Japan and The Foundation
 for Advancement of International Science
 Supported by The Science Council of Japan

연락 : 인하대 공대 기계공학과 김 상 철