

MRAC방식이 의한 산업용 로봇 매니퓰레이터의 실시간 제어를 위한 근접한 제어기 설계

한 성 현 * 이 남 영 **

* 부산대학교 대학원 기계공학과 박사과정
 **부산대학교 정밀기계공학과

This paper deals with the robust controller design of robotic 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 assumption that process is characterized by a linear model remaining time invariant during adaptation process. A computer simulation has been performed to demonstrate the performance of the designed control system in task coordinates for stanford manipulator with payload and disturbances.

1. 서 론

최근 제어론은 산업의 발전과 더불어 눈부신 발전을 거듭하고 있다. 이는 아직도 실질적인 응용분야에 있어서는 상당의 발전이 이루어져 있다. 그 중에서도 가장 주목적점은 복잡한 비선형성의 동특성을 지닌 실제 시스템에 대한 정확한 수학적 모델링의 어려움이라 할 수 있다. 특히, 산업용 로봇 매니퓰레이터는 각 관절 사이에 보폭, 링크의 무게, 링크의 질량 등의 강한 비선형 결합성을 지니고 있기 때문에 정확한 모델링이 어렵고 모델과 제어계에 대한 선형성의 가정 및 플랜트의 매개변수의 일정한 값 유지등의 여러 가정 하에서 수행되어 왔으므로 고도의 동력학적 성능을 요구 할 때에는 좋은 제어 성능을 내지 못하게 된다. 따라서 로봇 매니퓰레이터의 동적 모델링에 있어서 매개변수의 불확실성과 비선형의 존재하에서도 좋은 제어 성능을 가질 수 있고 부하의 변동 및 모델링 오차에도 잘 적응 할 수 있는 적응 제어 방식에 대하여 많은 연구가 되어왔다. 적응 제어 방식은 플랜트의 동 특성이 대략 제함된 정보만을 가지고 예측할 수 있는 불확실성이 대처할 수 있는 진보된 제어 방식이라 할 수 있다. 적응 제어 기법에는 크게 기준 모델 적응 제어 방식과 자기동조 적응 제어 방식의 두 가지로 나눌 수 있는데 후자의 자기동조 제어 방식은 대상 시스템에 대한 잡음의 영향을 최소화 하는 제어 방식으로서 대상 시스템의 정보를 추정하면서 추정된 매개 변수를 바탕으로 적절한 제어기를 구성하는 방법으로서 1970년대 초 제안된 방식으로서 이 시기 많은 연구의 응용 결과와 비교 되어져 왔다. 그리고 기준 모델 적응 제어 방식은 MIT rule 이 발표된 이래 1960년대 이후부터 본격적인 연구가 시작되었다고 말할 수 있는데 이 제어 방식은 원하는 동특성을 갖는 기준 모델의 출력이 이 기준 모델의 출력과 플랜트의 출력이 일치되도록 플랜트의 파라미터를 조정하는 방식이다. 본 연구에서는 기준 모델 적응 제어 방식을 사용하여 부하의 변동 및 외란의 증가에 대해서도 매니퓰레이터의 정확한 궤적의 추종 및 속도의 실시간 제어가 가능한 근접한 제어기를 설계하고자 한다.

$$A_n = \begin{bmatrix} \cos\theta_n & -\cos\theta_n \sin\theta_n & \sin\theta_n \sin\theta_n & a_n \sin\theta_n \\ \sin\theta_n & \cos\theta_n \cos\theta_n - \sin\theta_n \cos\theta_n & a_n \sin\theta_n \\ 0 & \sin\theta_n & \cos\theta_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 θ_n 는 Z_n 축을 중심으로 X_{n+1} 축과 X_n 축과의 관절각을 나타내고, d_n 는 Z_{n+1} 축을 중심으로 생각할 때 $(n-1)$ 번째의 좌표계의 원점에서 Z_{n+1} 축과 Z_n 축의 표적간의 거리이며, a_n 는 Z_n 축과 Z_{n+1} 축과의 가장 가까운 거리이며 또한, θ_n 는 X_n 축을 중심으로 했을 경우 Z_{n+1} 축에서 Z_n 축까지의 회전각을 나타내고 있는데 각 링크의 파라미터는 Fig.1에서 상세히 나타내고 있다.

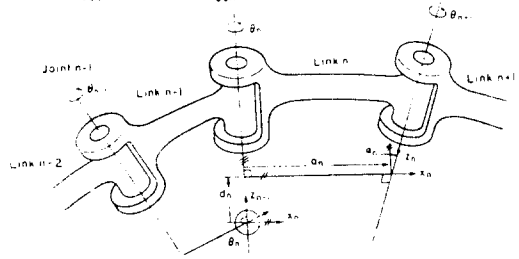


Fig.1 Manipulator link parameter θ, a, d, a_n

직접 기구학은 기본좌표계에 대한 매니퓰레이터의 손끝의 위치 및 방향을 구하는 것으로서 손끝의 위치 및 방향은 'A 행렬'의 값으로 나타내는데, n개의 링크를 갖는 매니퓰레이터의 손끝의 위치 및 방향은 다음과 같이 기술된다.

$$T_n = A_1 A_2 \dots A_n$$

$$= \begin{bmatrix} n_x & 0_x & a_x & R_x \\ n_y & 0_y & a_y & R_y \\ n_z & 0_z & a_z & R_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 운동 방정식

일반적으로 매니퓰레이터의 링크 1인 단에 주어진 점의 위치를 기준좌표계에 표시하면,

$$r = T_1 \cdot i_r \quad (3)$$

이 되고, 또한 이것을 기본하여 이 점의 속도를 구하면,

$$\frac{dr}{dt} = \left(\sum_{j=1}^n \frac{\partial T_j}{\partial q_j} \dot{q}_j \right) i_r \quad (4)$$

2. 매니퓰레이터의 기본이론

2.1 기구학적 이론

기구학은 직교 공간에서의 로봇의 위치 및 방향과 관절 공간에서의 변수들 사이의 관계를 다루는 분야로서 직접 기구학과 역 기구학이 있다. 본 연구에서의 링크 상호간의 관계는 디나비트 마틴버그 표시법을 사용하였는데 각 링크 파라미터 a, θ, d 의 변함 임의의 회전 운동을 하는 관절의 경우엔 다음과 같이 기술된다.

이 된다. 여기서 T_i 는 링크 i 의 변형을 나타내고, 또 q 는 기준좌표계를 나타내는 계개변수이다. 그러므로 링크 i 외에 위치한 미소 질량 dm 의 운동에너지는 다음과 같다.

$$dK_i = 0.5 \text{Trace} \left(\sum_{j=1}^n \frac{\partial T}{\partial q_j} \dot{q}_j \right) \dot{q}_i \quad (5)$$

그리고 캐니플레이트의 전체 운동에너지는 매니플레이터의 구조에 대한 운동에너지를 나타내고 있으므로 임의링크의 운동에너지를 고려한 전체 운동에너지는 다음과 같이 주어진다.

$$K_i = 0.5 \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^i \sum_{l=1}^n \text{Trace} \left(\frac{\partial T}{\partial q_j} J_{ij} \frac{\partial T}{\partial q_l} \right) \dot{q}_j \dot{q}_l + 0.5 \sum_{j=1}^n I_{ai} \dot{q}_i^2 \quad (6)$$

또한, 링크 i 의 위치에너지는 다음과 같이 정의된다.

$$P_i = m_i g^T T_i \quad (7)$$

여기서 g 는 기준좌표계에서 링크의 무게중심까지의 거리를 나타내고, g 는 중력 가속도이고, m_i 는 링크의 질량을 나타내고 있다.

그러므로 라그랑지-오일러 방정식에 의한 매니플레이터의 동적 방정식은 다음과 기술 되어진다.

$$F = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^j \sum_{l=1}^n \text{Trace} \left(\frac{\partial T}{\partial q_k} J_{ij} \frac{\partial T}{\partial q_l} \right) \ddot{q}_i + I_{ai} \ddot{q}_i - \sum_{j=1}^n m_j g^T \frac{\partial T}{\partial q_i} \ddot{q}_j + \sum_{k=1}^i \sum_{l=1}^n \text{Trace} \left(\frac{\partial T}{\partial q_k} J_{ij} \frac{\partial T}{\partial q_l} \right) \dot{q}_k \dot{q}_l \quad (8)$$

3. 제어계 구성

3.1 제어 알고리즘

매니플레이터의 관절좌표의 동적방정식은 직접기하학을 이용하여 작업좌표의 동적방정식으로 변환할 수 있다. 그러므로 앞절에서 매니플레이터의 동적 방정식을 비선형 결합 형태 방정식으로 나타내면 다음과 같이 기술된다.

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau(t) \quad (9)$$

여기서 q, \dot{q}, \ddot{q} 는 각각 관절각의 위치, 속도 및 가속도를 나타내고, $D(q)$ 는 대칭정칙관성행렬이고, $C(q, \dot{q})$ 는 원심력과 코리올리스력을 나타내는 비선형행렬이며, $G(q)$ 는 중력부하 행렬이고, $\tau(t)$ 는 각 관절에 가해지는 관절토크이다.

그리고 매니플레이터의 손끝의 위치 및 방향벡터와 관절 각 벡터와의 운동학적 관계는 다음과 같다.

$$X_p = f(q) \quad (10)$$

여기서 X_p 는 매니플레이터의 위치 및 방향벡터 행렬이고, $f(q)$ 는 비선형벡터행렬이다. 또한, 이것을 미분하여 매니플레이터의 손끝의 속도를 구하면,

$$\dot{X}_p = Z(q)\dot{q} \quad (11)$$

이 되는데, 여기서 $Z(q)$ 는 매니플레이터의 자코비안 행렬을 나타내고 있다. 그리고 작업좌표에서 매니플레이터를 제어하기 위해 필요한 입력력 벡터 U 를 입력관절토크로 T 와의 관계식으로 나타내면 다음과 같이 주어진다.

$$\tau(t) = Z^T(q) U(t) \quad (12)$$

또한, 매니플레이터의 가속도는 식(9), (10), (11), (12)으로 부터 다음과 같이 주어진다.

$$\ddot{X}_p = Z(q)\ddot{q} - Z(q)D^{-1}(q) \{ G(q) - C(q, \dot{q}) - Z^T(q)U(t) \} \quad (13)$$

그러므로 매니플레이터의 상태변수들 $X_s^T(t) = [X_p^T(t), \dot{X}_p^T(t)]$

$U_s(t) = U(t)$ 으로 정의하고 매니플레이터의 동적 방정식을 상태방정식으로 기술하면 다음과 같이 기술 되어진다.

$$\dot{X}_s(t) = A_s(t)X_s(t) + B_s(t)U_s(t) \quad (14)$$

$$Y_s(t) = C_s X_s(t) \quad (15)$$

여기서 $X_s(t)$, $Y_s(t)$ 는 각각 상태벡터 및 입력벡터 행렬이고, Y_s 는 출력벡터행렬이며, A_s, B_s 는 다음과 같다.

$$A_s(t) = \begin{bmatrix} 0 & I \\ Z C D^{-1} & Z Z^{-1} - Z D^{-1} C Z \end{bmatrix}, B_s(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ Z D^{-1} Z^T \end{bmatrix}$$

위에서 0 및 I 는 각각 영행렬행렬 및 단위행렬행렬을 나타내고 있다. 그리고 C_s 는 적절한 차원을 갖는 행변수들 나타내고 있다.

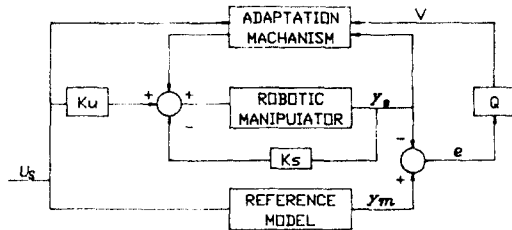


Fig.2 Block diagram of model reference adaptive control system

본 연구에서 설계하는 적응제어시스템의 궁극적인 목적은 플랜트와 기준모델의 출력의 오차가 영이 되게 하는 즉, $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ 가 되도록 하는 제어 이득을 선정하여 플랜트인 로봇 매니플레이터의 동특성이 기준 모델을 추종하도록 하는 것이므로 기준 모델의 선형의 매우 중요하다.

그런데 각 관절의 자유도 (degree of freedom) 가 상호결합의 시변 비선형(nonlinearity)의 동특성을 지닌 2Dof 매니플레이터의 각 관절에 대한 기준모델로서는 Dubowsky 에 의해 제안된 방법으로서 다음과 같이 기술되는 시불변 선형 2차 미분 방정식으로 택하였다.

$$X_{mi} + A X_m + A X_m = U_m \quad i=1,2,\dots,n \quad (16)$$

그러므로 이 식을 상태 공간 방정식 (state space equation)으로 표기하면 다음식과 같이 기술되어진다

$$\dot{X}_m = A_m X_m + B_m U_m \quad (17)$$

$$Y_m = C_m X_m \quad (18)$$

여기서 Y_m 및 U_m 은 각각 기준모델의 출력벡터 및 입력 벡터행렬이고 A_m, B_m 및 C_m 은 매개변수이다.

또한 기준모델과 플랜트와의 오차 상태 방정식은 다음과 같다.

$$e(t) = Y_m - Y_s \quad (19)$$

$$V(t) = Q e(t) \quad (20)$$

위의 식 (20)에서 Q 는 선형보상인자(linear compensator)이다.

그리고 본 연구에서 제안된 매니플레이터의 기준모델 적응 제어시스템(MRAC)의 제어입력은 Fig.2 의식와 같이 적응칙(adaptation law)에 의하여 다음과 같다.

$$\dot{U}_s(t) = \phi(V, X_s, t) X_s(t) + \psi(V, U_m, t) + K_s X_s(t) - K_m U_m(t) \quad (21)$$

여기서, K_m 및 K_s 은 각각 피드백게인 및 피드포워드게인을 나타내고, ϕ 및 ψ 는 단위 벡터 적응제어칙(unit vector adaptation law)으로서 다음과 같이 정의된다

$$\phi(V, X_m, t) = \|V\| \|V\|^{-1} \cdot \text{sgn}(X_m^T) \quad (22)$$

$$\psi(V, U_m, t) = \|V\| \|V\|^{-1} \cdot \text{sgn}(U_m^T) \quad (23)$$

여기서 P_1, P_2 는 단위행렬 적응제어칙의 개인으로서 (24)식의 조건을 만족하는 수로서 P.d(positive definite)이다.

3.2 안정도 해석

본 연구에서의 직접 적응제어방식은 시간이 지남에 따라 상태오차 "0"으로 수렴하는 구조를 갖도록 제어기를 설계하므로 이 방식은 모델의 구조적인 특성에 무관하게 된다.

그리고 앞절에서 나타낸 기준 모델 적응제어시스템은 식 (10), (17), (21)로부터 다음과 같이 상태오차에 대한 방정식으로 기술되어진다.

$$\dot{e} = A_m e + (0 : I) W \quad (24)$$

$$V = Q e \quad (25)$$

$$\dot{W} = -W = B_s(B_s^*(A_m - A_s) + K_s - \phi) X_s + B_s(B_s^*(B_m - K_m + \psi)) U_m \quad (26)$$

또한, 위의 식 (23), (24), (25)은 선형 시불변 피드포워드 블록과 비선형시변(nonlinear time varying)

의 피드백 블록 (feedback block)으로서 구성되는 Fig. 2 의 제어 시스템에 대한 등가표시 (equivalent representation)를 나타내면 Fig. 3 과 같이 구성될 수 있다.

Fig. 3 에서 G1 은 선형시불변 (linear time invariant block) 블록의 전달함수이고, G2 는 비선형 시불변 블록의 전달함수 (nonlinear time varying block transfer)를 나타내고 있다.

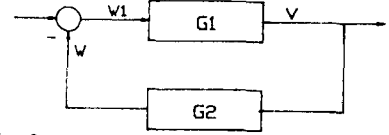


Fig. 3 Equivalent representation of model reference adaptive system

그리고, 기존모델은 각 링크에 대하여 동일한 모델을 사용하였다. 매개변수 A_1 및 A_0 는 식의 상태오차 감쇠속도 (decaying speed) 에 의한 영향을 고려하여 안정한 평형점 (stable equivalent point) 근처에서 선정화된 모델의 매개변수의 값과 거의 일치하는 값인 $A_1 = 2.04$, $A_0 = 1.6$ 으로 선정 하였다.

또한, Lyapunov 방정식인 식 (27) 에서의 H 의 값은 다음과 같이 대각선 행렬로 선정하였다.

$$H = \begin{bmatrix} 35 I_n & 0 \\ 0 & 10 I_n \end{bmatrix}$$

여기서 I_n 는 6×6 의 대각선 단위 행렬을 나타낸다. 그리고, P1 및 P2 의 값은 각각 식 (31) 의 조건을 만족하는 값으로서 0.4 및 15로 선정하였고, 또한 식 (23) 에 의하여 각각 다음과 같이 선정 하였다.

Table.2 Link Mass and First Moments for Stanford Manipulator

| Link | Mass kg. | 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 | 0.9P | -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 | I_a $mk^2/kg.m^2$ | $mk^2/kg.m^2$ | $mk^2/kg.m^2$ | $mk^2/kg.m^2$ |
|------|---------------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | 0.953 $kg.m^2$ | 0.276 | 0.255 | 0.071 |
| 2 | 2.193 $kg.m^2$ | 0.108 | 0.018 | 0.100 |
| 3 | 0.782 $kg.m^2$ | 2.51 | 2.51 | 0.006 |
| 4 | 0.106 $kg.m^2$ | 0.002 | 0.001 | 0.001 |
| 5 | 0.097 $kg.m^2$ | 0.003 | 0.003 | 0.0004 |
| 6 | 0.020 $kg.m^2$ | 0.013 | 0.013 | 0.0003 |

그리고, 궤적 계획에서 작업수업은 3초 동안하였고, 초기위치 (0.2, 0.5, 0.3) rad 에서 출발하여, 최종도달점 (0.7, 1.2, -0.3) rad 까지 도달하도록 하였다.

샘플링시간은 0.002 초로 하였고, 무부하상태와 3.5 kg 의 부하상태에 대하여 수행하였다.

각 관절의 특성 다항식은 감쇠상수를 (0.65-0.85)로 하였고 주파수는 50 Hz 으로 하였다.

그리고 시뮬레이션은 coprocessor 30207 을 내장한 1C AT (40 MB) 컴퓨터에서 수행하였다.

그리고, 제어효과를 평가 하기 위하여 다음식과 같이 주어지는 삼수계환 이득을 갖는 토르크 계산법 (computed torque control method) 과 비교경도 하였다

$$U_s(t) = D(q(t)) (\ddot{q}_s(t) + K_v(\dot{q}_m(t) - \dot{q}_s(t)) + K_p(q_m(t) - q_s(t)) + C(q_s(t) - \dot{q}_s(t)) + G(q_s(t))), \quad (32)$$

여기서 K_v 와 K_p 는 각각 속도와 위치의 피관 이득으로서 $K_v = [12, 30, 45, 50, 40, 35]$, $K_p = [100, 200, 350, 250, 400, 300]$ 으로 주었다.

본 연구에서 Fig. 2 의 기존모델 적용 제어시스템이 적은 초안정을 유지하기 위해서는 다음의 조건을 만족 해야 한다.

조건1: Fig. 3 의 선형시불변블록의 전달함수 G1이 SPR(strictly positive real) 이어야한다.

조건2: Fig. 3 에서 피드백의 비선형시불변 블록은 다음과 같이 정의되는 부동식,

$$\int_0^t V^T W d\tau \geq -\lambda^2, \quad t \geq 0 \quad (26)$$

을 만족하여야 한다.

여기서 λ 는 임의의 상수이다.

첫번째의 조건은 앞절에서 언급된 선형보상인자 (linear compensator) 를 다음과 같이 설정함으로써 이 SPR 하게된다.

$$Q = [0 : I] L \quad (27)$$

여기서 L 은 아래의 Lyapunov 방정식,

$$A_m + L A_m = -H \quad (28)$$

의 해 (solution) 이다.

위식에서의 H 는 양의부호인 정칙행렬 (positive definite symmetric matrix) 로 구성되어지는 기존모델이 디커플링 (decoupling) 인점을 고려하여 다음과 같이 대각선 행렬로 구성하였다.

$$H_i = \begin{bmatrix} \text{diag}(h_i) & 0 \\ 0 & \text{diag}(h_{i+1}) \end{bmatrix}, \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (29)$$

시스템의 초안정을 위한 두번째 조건인 식 (26) 의 만족는 식 (23) 와 같이 정의되는 단위벡터 적을 제어치의 의해 달성되어진다.

따라서, 식 (25) 을 식 (26) 에 대입하면 다음과 같이 기술되다.

$$\int_0^t V^T (B_s \phi - B_s B_s (A_m - A_s) + B_s K_s) d\tau + \int_0^t V^T (B_s \psi - B_s (B_s^T B_m - K_m)) d\tau \geq -\lambda^2, \quad t \geq 0 \quad (30)$$

그러므로 식 (30) 에서 적용칙 ϕ 및 ψ 의 개인 P1 및 P2 의 값은 다음의 조건을 만족하는 값으로 정의되어야 한다.

$$\begin{aligned} P1 &\geq \|B_s (B_s (A_m - A_s) + K_s)\| \cdot \|B_s\| \\ P2 &\geq \|B_s (B_s B_m - K_m)\| \cdot \|B_s\| \end{aligned} \quad (31)$$

4. 시뮬레이션

일반적으로 기존모델 적용제어방식은 기존의 여러 적용제어기법중 다변수 입력출력시스템으로 모델링 가능하고, 이상적인 응답 특성을 갖는 기존 모델의 설정이 가능한 경우에 가장 적당한 제어 기법으로서 리지의 플랫폼에 적당한 제어 입력을 가하여 그 응답특성의 기존모델의 응답특성과 일치하게 하는 방식이다.

그러나 플랫폼의 모든 상태를 측정하기는 어려우므로 입력과 출력만을 이용하여 관측을 행함과자 많은 연구가 행하여져 왔다.

본 연구에서는 제시된 기존모델 적용 제어기 (model reference adaptive controller) 의 제어 성능의 평가를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 수행하였다.

시뮬레이션에 사용된 모델은 Fig. 4 와 같이 C개의 관절을 갖는 스탠포드 로봇을 선정하였다.

그리고 사용된 모델에 대한 각 링크의 사양 및 관성모멘트는 각각 표.1 과 표.2 에서 나타내고 있다.

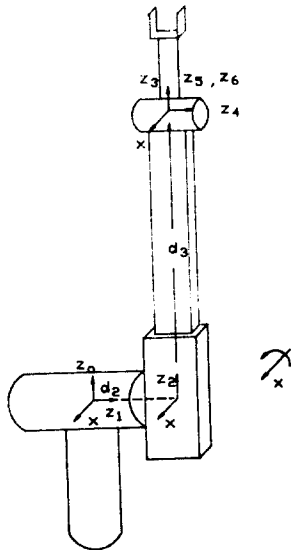


Fig.4 Coordinate Frames for the Stanford Manipulator

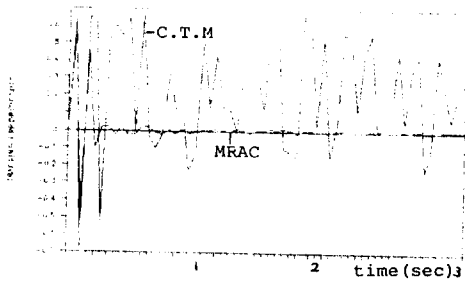


Fig.5(a) Tracking error of joint 1 for no load

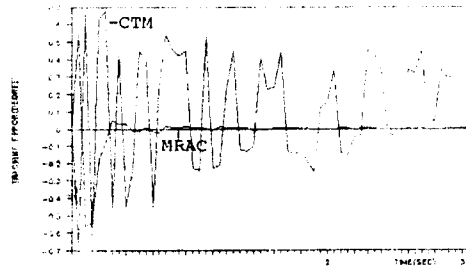


Fig.5(c) Tracking error of joint 3 for no load

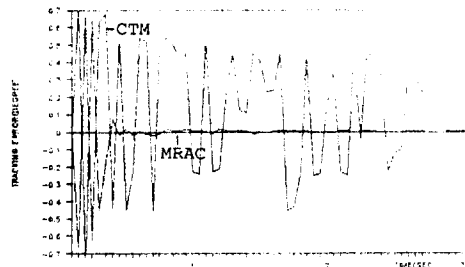


Fig.5(d) Tracking error of joint 4 for no load

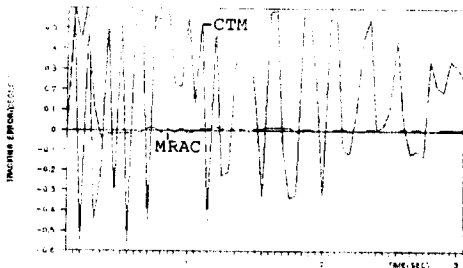


Fig.5(b) Tracking error of joint 2 for no load

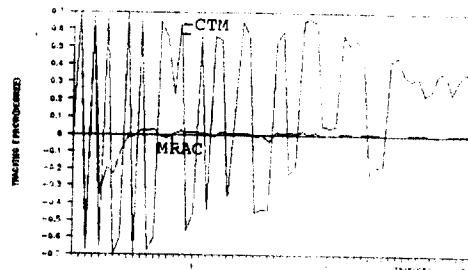


Fig.5(e) Tracking error of joint 5 for no load

Fig.5 Comparison of control performance of MRAC and computed torque method for 3.5Kg load

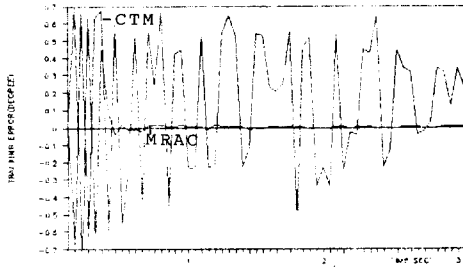


Fig. 5(f) Tracking error of joint 6
 Fig. 5 Comparison of performance of MRAC and Computed torque Method for no load

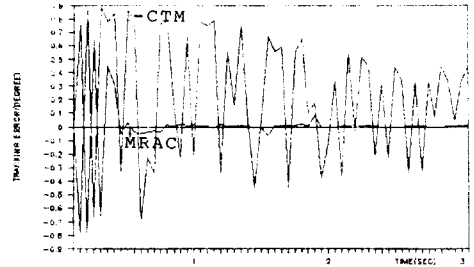


Fig. 6(e) Tracking error of joint 5 for 3.5 Kg load

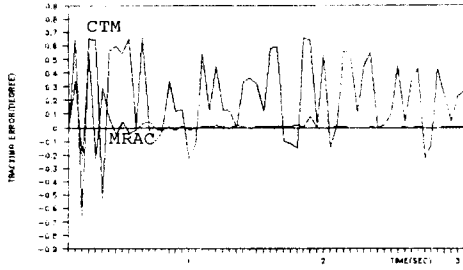


Fig. 6(a) Tracking error of joint 1 for 3.5Kg load

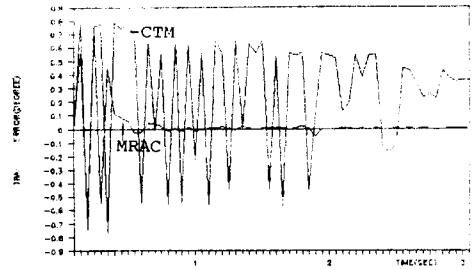


Fig. 6(f) Tracking error of joint 6 for 3.5Kg load
 Fig. 6 Comparison of control performance of MRAC and computed torque method for 3.5Kg load

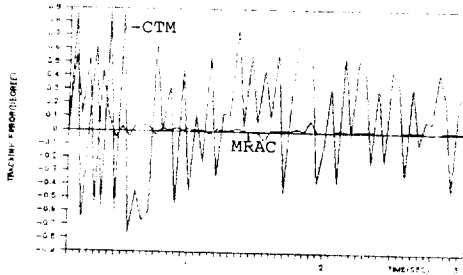


Fig. 6(b) Tracking error of joint 2 for 3.5Kg load

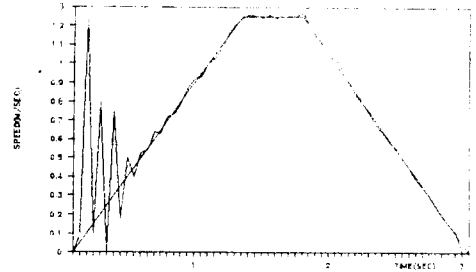


Fig. 7 Velocity tracking of end-effector

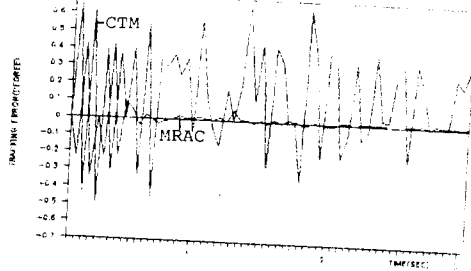


Fig. 6(c) Tracking error of joint 3 for 3.5Kg load

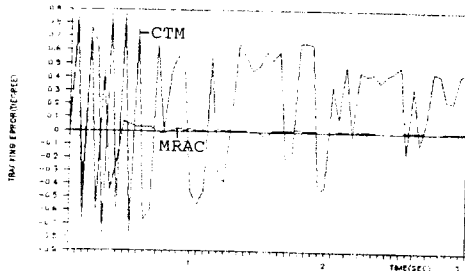


Fig. 6(d) Tracking error of joint 4 for 3.5Kg load

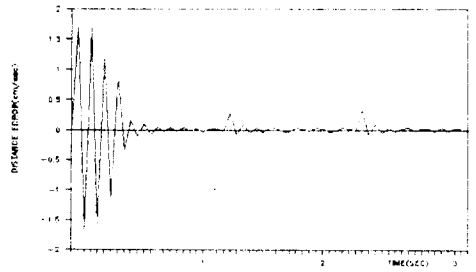


Fig. 8 Distance error of end-effector in case of load variation

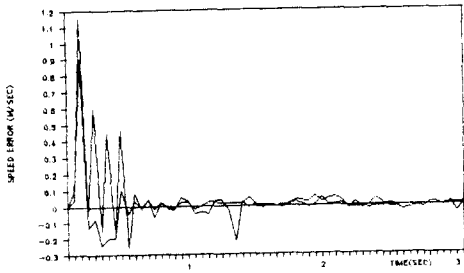


Fig. 9 Speed tracking error of end-effector

위의 Fig. 5 및 Fig. 6 은 무부하 상태 및 부하 상태에 대하여 각 관절의 추종 오차를 본 연구에서 제안한 제어 기법과 토오크 계산법 (computed torque control method) 에 의한 결과를 비교하여 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과를 보면 무부하 상태의 경우 본 연구에서 제안된 제어기에 의한 무부하 상태에서의 각 관절의 추종은 0.4 초 이내에 3.5 Kg 부하 상태에서는 약 0.45 초 이내에 대부분의 관절이 정상상태로 수렴하고있어 기존의 토오크 계산법에 비하여 훨씬 좋은 추종상태를 나타내 보이고 있다.

그리고 속도의 궤적은 가속, 등속, 감속으로 연결 되는 사다리꼴 형태로 주어지는 기준 모델을 추종하도록 하였다. 임의의 속도에 대한 제어가능성을 확인하기 위하여 부하의 변동 및 외란의 변동에 대한 출력오차의 수렴속도 및 수렴 여부를 검토 하였다.

Fig. 7은 무부하 및 3.5Kg 상태에서 속도의 추종상태를 나타내고 있는데 무부하의 경우인 약 0.4초 이내에, 정상상태로 수렴하므로 매우 좋은 모델 추종상태를 보여주고 있다.

그리고 Fig. 8 는 3.5Kg 상태에서 1.2초 및 2초 이후에 각각 0.5Kg 및 1 Kg 의 부하를 첨가시켰을 경우 임의의 추종상태를 나타내고 있는데 거의 0.05초 이내에 정상상태로 수렴되어 정상편차가 없는 견고성(robustness) 을 보여 주고 있다.

5. 결론

기준모델 적용제어 (model reference adaptive control method) 방식은 비모형화 동특성 (unmodelled dynamics) 을 지니고 있는 플랜트를 제어함에 있어서 제어 계의 특성을 원하는 이상적인 특성을 갖는 기준 모델의 동특성과 일치하게 하는 제어기를 적응적으로 구성하는 제어 기법으로서 본 연구에서는 구조적 완전 모델 추종조건이나 명확한 매개변수의 추정자를 필요로 하지 않는 직접 적용제어 (direct MRAC) 방식을 사용하여 다관절 로봇 매니퓰레이터의 간단한 제어기를 설계하였다.

그리고 설계된 제어기의 제어성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 기존의 방식인 토오크 계산법과 비교검토하였다. 시뮬레이션 결과 설계된 제어기에 의한 매니퓰레이터의 각 관절은 무부하 상태 및 부하의 변동 상태에서도 각 관절은 빠른 시간내에 거의 정확한 모델추종상태를 보여 주므로써, 정상 편차가 없는 견실성을 확인할 수 있었다.

그리고 end-effector 의 임의의 속도 및 위치여 대한 순간적인 부하의변동 및 외란의 경우에도 0.05초 이내의 매우 빠른 시간내에 정상상태로 돌아오므로써 임의의 속도 및 위치의 정밀제어의 가능성을 제시하였다

Reference

- 1). Koivo, A.J. and Guo, T.H., "Adaptive Linear Controller for Robotic Manipulators", IEEE Trans., AC-29, pp.162-171, 1983.
- 2). Liu, M.H., Lin, W. and Huang, Y.F., "Pole Assignment Self-tuning Control of Robotic Manipulators" 16th ISIR, pp.289-298, 1986.
- 3). R.L.Kouss and B.Friendlander, "Robust Adaptive Control-conditions for Global Stability", IEEE Trans.on Automat.Contr., vol.AC-30, pp.610-623, 1985.
- 4). A.Balestring, G.De Maria and L.Sciavico, "An Adaptive Modeling Following Control for Robotic manipulators". ASME, vol.105, pp.143-151, 1983.
- 5). Kye-Young Lim, "Model Reference Adaptive Control for Linear System with Improved Convergence Rate-parameter Adaption Method", Trans.KIEE, vol.37, no.10, pp.733-739, Oct.1988.
- 6). Y.D.Landau, Adaptive Control-The Model Reference Approach. NY; Marcel Dekker, 1979.
- 7). I.D.Landau, "A Stability Criterion for Model Reference Adaptive Control Systems", IEEE Trans.Auto.Contr., vol.AC-14, no.5, pp.552-555, Oct.1969.
- 8). Choi, Y.K., Chung M.J. and Bien, Z., "An Adaptive Control Scheme for Robot Manipulators", INT.J.Control, vol144, no-4, pp.1185-1191, 1986.
- 9). P.A.Cook, M.A., J.Z.Chen., "Robust properties of Model Reference Adaptive Control Systems", IEE Proc. vol:129, Pt.D.No.6, Nov.1982.
- 10). ROHRS, C., "Adaptive Control in The presence of Unmodelled Dynamics", Ph.D Thesis, MIT, LIDS report TH-1254, 1982.
- 11). S.Duboweky and T.Desforges, "The Application of Model Reference Adaptive Control to Robotic Manipulators", Trans.of ASME..Dynamic System, Measurement, and Control, 101, 1979.
- 12). K.S.Narendra, L.S. Valavani "Direct and Indirect Model Reference Adaptive Control," Automatica, vol. 15, pp. 653-664, 1979.
- 13). R.V. Monopoli, "Model Reference Adaptive Control with An Augmented Error Signal," IEE Trans. on Automatic Control, vol.19, pp. 474-484, 1974.