

본 연구는 한국과학재단 (KOSEF86-0123)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

적응제어기법에 의한 다관절 로봇
매니퓰레이터의 견실한 제어기 설계에 관한 연구

한 성현*, 이 만형**

A Study on Robust Controller Design of Multi-Joint
Robot Manipulator Using Adaptive Control

Sung-Hyun Han*, Man-Hyung Lee**

-Abstract-

An adaptive control scheme has been recognized as an effective approach for a robot manipulator to track a desired trajectory in spite of the presence of nonlinearity and parameter uncertainty in robot dynamics model.

In this paper, an adaptive control scheme for a robot manipulator is proposed to design robust controller using model reference adaptive control technique and hyperstability theory but it does away with assumption that the process is characterized by a linear model remaining time invariant during the adaptation process. The performance of controller is demonstrated by the simulation about position and speed control of a six-link manipulator with disturbance and payload variation.

* 부산대학교 정밀기계공학과 교수 (정회원)

** 부산대학교 기계공학과 박사과정 (정회원)

I. 서 론

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

특히, 산업용 로봇 매니플레이터는 각 관절 사이에 코리올리스(Coriolis)력 및 원심력 등의 강한 비선형 연성(nonlinear coupling)의 성질을 지니고 있기 때문에 정확한 동특성의 모델링이 어려워 모델과 제어계에 대한 선형성의 가정 및 프로세서의 진행중 플랜트의 매개변수가 일정하게 유지된다는 것 등의 여러 가정하에서 수행되어 왔으므로 고도의 동력학적 성능이 요구될 때에는 이러한 가정하에서 설계된 제어알고리즘은 그 수렴특성을 상실하게 되어 좋은 제어 성능을 내지 못하게 된다.

따라서 로봇 매니플레이터의 동적 모델링에 있어서 매개변수의 불확실성과 비선형성의 존재하에서도 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.

적응제어기법에는 크게 기준모델 적응제어(model reference adaptive control)¹⁾³⁾¹⁰⁾ 방식과 자기동조 적응제어(self-tuning adaptive control)²⁾⁶⁾¹¹⁾ 방식의 두가지로 나눌 수 있는데 후자의 자기동조 적응제어 방식은 대상시스템에 대한 잡음의 영향을 최소로 억제하는 제어방식으로 대상시스템의 특성을 추정하면서 추정된 매개변수를 바탕으로 적절한 제어기를 구성하는 것인데, 이는 1970년대 Astrom 과 Wittenmark¹⁶⁾에 의해

제안 되었으며 이미 많은 응용 결과가 보고 되어 왔다.

그리고 기준모델 적응제어 방식은 whitaker 등에 의해 MIT rule이 발표된 이래 1960년대 이후부터 본격적인 연구가 시작되었다고 할 수 있는데 이 방식은 원하는 동특성을 갖는 기준모델을 설정하여 이 기준모델의 출력과 플랜트의 출력이 일치하도록 플랜트의 파라미터를 조정하는 방식인데 그 제어 방식에는 직접 적응제어(direct adaptive control)와 간접 적응제어(indirect adaptive control)⁶⁾¹⁴⁾ 방식으로 구분된다.

그리고 직접 적응제어 방식에서는 플랜트와 제어계를 포함한 전체 제어계의 전달함수가 원하는 기준모델의 전달함수와 일치하도록 하기 위하여 플랜트의 출력과 모델의 출력사이의 오차를 적응제어칙(adaptive control law)에 사용하는 반면에, 간접 적응제어(indirect adaptive control) 방식은 플랜트의 매개변수를 추정하여 제어기의 매개변수를 조정하도록 하는 방식인데, 이 방식은 효율적인 연산이 가능한 on-line 상태에서 추정자를 구성해야 하는 단점이 있으므로 보편적으로 직접 적응제어방식이 많이 사용되고 있다.³⁾⁵⁾⁸⁾¹⁵⁾

따라서 본 연구에서는 기준모델 적응제어 방식에서 직접적응제어 방식을 사용하여 부하의 변동 및 외란의 증가에 대해서도 매니플레이터의 정확한 궤적의 추종 및 속도의 실시간 제어가 가능한 안정한 제어기를 설계하고자 한다. 제 2절에서는 로봇 매니플레이터의 기구학적 이론 및 동적 모델링에 한 기본이론을 전개하고 제3절에서는 안정한 제어기의 설계를 위한 제어알고리즘과 초안정(hyperstability)⁴⁾⁷⁾이론을 통한 안정성 해석을 다룬다.

그리고 제4절에서는 제안된 제어기의 성능평가를 위해 6관절 로봇인 스탠포드 로봇 매니플레이터에 대한 시뮬레이션을 통한 결과를 토르크 계산법(computed torque method)에 의한 결과와 비교 검토함으로써 제안된 제어기의 성능을 예증한다.

매니플레이터의 동특성이 기준모델을 추종하도록 하는것이므로 기준 모델의 선정이 매우 중요하다.

그런데 각 관절의 자유도 (degree of freedom) 가 상호결합이 시변 비선형(nonlinear)의 동특성을 지닌 로보트 매니플레이터의 각 관절에 대한 기준모델로서는 Dubowsky에 의해 제안된 방법으로서 다음과 같이 기술되는 시불변 선형 2차 미분 방정식으로 선정하였다.

$$\ddot{X}_{m_i} + A_i \dot{X}_{m_i} + B_i X_{m_i} = U_{m_i} \quad i = 1, 2, \dots, n(7)$$

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

$$\dot{X}_m = A_m X_m + B_m U_m \quad \dots\dots\dots(8)$$

여기서,

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \Omega_0 & \Omega_1 \end{bmatrix}, \quad B_m = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

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

또한 기준모델과 플랜트와의 출력오차 상태 방정식은 다음과 같다.

$$e(t) = X_m(t) - X_s(t) \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$v(t) = Q e(t) \quad \dots\dots\dots(10)$$

위의 식(10)에서 Q는 선형보상인자(linear compensator)이다.

그리고 본 연구소에서 제안된 매니플레이터의 기준모델 적응 제어시스템(MRAC)의 제어입력은 Fig.1에서와 같이 적응칙(adaptation law)에 의하여 다음과 같다.

$$U_s(t) = \Phi_1(V, X_s, t) X_s(t) + \Phi_2(V, U_m, t) U_m(t) - K_s X_s(t) + K_m U_m(t) \quad \dots\dots(11)$$

여기서, K_s 및 K_m 은 각각 피이드백 게인 및 피이드 포워드 게인을 나타내고, Φ_1 및 Φ_2 는 단위

벡터 적응제어칙(unit vector adaptation law) 으로서 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \Phi_1(V, X_m, t) &= P_1 V \| V \|^{-1} \text{sgn}(X_m)^T \\ \Phi_2(V, U_m, t) &= P_2 V \| V \|^{-1} \text{sgn}(U_m)^T \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, P_1, P_2 는 단위벡터 적응제어칙의 게인으로서 (13)식의 조건을 만족하는 수로서 p, d (positive definite) 이어야 한다.

$$\begin{aligned} P_1 &> (\wedge_R) \max (\wedge_D) \min \quad \dots\dots\dots(13) \\ P_2 &> (\wedge_S) \max (\wedge_D) \min \end{aligned}$$

여기서 $(\wedge_R) \max$ 및 $(\wedge_S) \min$ 는 각각 $[RR^T]$ 및 $[SS^T]$ 에 대한 X_s 의 고유치의 실수부의 최대치이고 $(\wedge_D) \min$ 은 $[D^{-1}]$ 에 대한 X_s 의 고유치의 실수부의 최소치를 나타낸다. 그리고 $[R]$ 과 $[S]$ 는 다음과 같이 정의되고 있다.

$$[R] = [K_s + B_s^+ (A_m - A_s)] [B_s]^{-1} \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$[S] = [(B_s B_m - K_u)] [B_s]^{-1} \quad \dots\dots\dots(15)$$

여기서 $B_s^+ = (B_s^T B_s)^{-1} B_s^{-1}$ 으로 정의된다.

II.2 안정도 해석

일반적으로 모델추종 적응제어 시스템의 안정성 해석에 있어서는 우선 그 시스템의 플랜트 및 기준 모델의 파라메타의 구조적 특성에 의하여 결정되어지는 구조적 완전모델 추종조건(structural perfect model following condition)을 언급하여야 한다.

그러나 본 연구에서 제안하고 있는 직접 적응 제어방식은 시간이 지남에 따라 상태오차($e = X_m - X_s$)가 "0"으로 수렴하는 구조를 갖도록 제어기를 설계하므로 이 방식은 모델의 구조적인 특성에 의한 완전모델 추종조건을 언급하지 않아도 된다.

그리고 제안된 Fig.1의 기준모델 적응제어시스템은 식(7), (8), (11)로 부터 다음과 같이 상태오차에 대한 방정식으로 기술되어진다.

$$\dot{e} = A_m e + [0 : 1] W \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$v = Qe \dots\dots\dots (17)$$

$$w_1 = -w = [B_s] \{ [B_s^+] \{ [A_m] - [A_s] \} + K_s - \Phi_1 \} X_s + [B_s] \{ [B_s^+] [B_m] - K_m + \Phi_2 \} U_m \dots\dots\dots (18)$$

또한, 위의 식 (16), (17), (18)은 선형 시불변 피드포워드(linear time invariant feedforward) 블록과 비선형시변(nonlinear time varying)의 피이드백 블록으로서 구성되는 fig.1의 제어시스템에 대한 등가표시(equivalent representation)를 fig.2와 같이 구성시킬 수 있다. fig.2에서 G1은 선형시불변(linear time invariant)블록의 전달함수이고, G2는 비선형 시불변(nonlinear time varying)블록의 전달함수를 나타내고 있다.

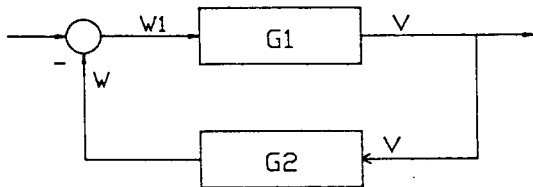


Fig. 2 Equivalent representation of model reference adaptive control system

본 연구에서 제안되고 있는 Fig.1의 직접 적응 방식에 의한 기준모델 적응제어 시스템의 점근적인 초안정(Asymptotically hyperstability)을 유지하기 위해서는 다음의 정리를 만족해야 한다.

정리1 : Fig.2의 선형 시불변블록의 전달함수 G1이 SPR(strictly positive real) 이어야 한다.

정리2 : Fig.2에서 피이드백의 비선형시변 블록은 다음과 같이 정의되는 부등식,

$$\int_0^t V^T W d\Gamma > -\gamma_0^2, \quad t > 0 \dots\dots\dots (19)$$

을 만족 한다. 여기서 γ_0^2 는 임의의 상수이다.

첫번째의 정리1은 앞절에서 언급된 선형보상인자(linear compensator)를 다음과 같이 설정함으로써 만족 된다.

$$Q = [0 : 1] L \dots\dots\dots (20)$$

여기서 L은 아래의 Lyapunov 방정식,

$$A_m^T L + L A_m = -H \dots\dots\dots (21)$$

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

$$H = \begin{bmatrix} \text{diag}(h_i) & 0 \\ 0 & \text{diag}(h_{i+n}) \end{bmatrix}, \quad h_i, h_{i+n} > 0 \dots\dots (22)$$

그리고, 시스템의 초안정을 위한 두번째 조건인 식(19)의 만족은 식(12)와 같이 정의되는 단위벡터 적응제어칙에 의해 달성되어진다.

따라서, 식(18)을 식(19)에 대입하면 다음과 같이 기술된다.

$$\int_0^t V^T [B_s \Phi_1 - B_s B_s^+ (A_m - A_s) + B_s K_s] d\Gamma + \int_0^t V^T [B_s \Phi_2 - B_s B_s^+ B_m - B_s K_m] d\Gamma > -\gamma_0^2, \quad t > 0 \dots\dots\dots (23)$$

그러므로 식(23)에서 적응칙 Φ_1 및 Φ_2 의 계인 P_1 및 P_2 의 값은 다음의 조건을 만족하는 값으로 정의 되어야 한다.

$$P_1 > \| B_s [B_s^+ (A_m - A_s) + K_s] \| \cdot \| B_s^{-1} \|$$

$$P_2 > \| B_s (B_s^+ B_m - K_m) \| \cdot \| B_s^{-1} \| \dots\dots\dots (24)$$

III. 시뮬레이션

일반적으로 기준모델 적응제어방식은 기존의 여러 적응제어기법중 다변수 입력력 시스템으로 모델링이 가능하고, 이상적인 응답 특성을 갖는 기준 모델이 설정이 가능한 경우에 가장 적당한 제어 기법으로서 미지의 플랜트에 적당한 제어입력을 가하여 그 응답특성이 기준모델의 응답특성과 일치하게하는 방식이다.

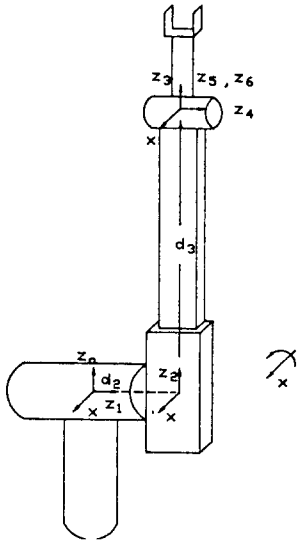


Fig. 3 Coordinate frames for the standford robot manipulator

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

본 연구에서는 제안된 기준모델 적응제어기(model reference adaptive controller)의 제어성능 평가를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 모델은 Fig.3과 같이 6개의 관절을 갖는 스탠포드 로봇을 선정하였다.

그리고 사용된 모델에 대한 각 링크의 사양 및 관성 모멘트는 각각 표.1과 표.2 및 표.3에서 타내고 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 (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	0.92	-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	I_a	mk_{xx}^2 (kg·m ²)	mk_{yy}^2 (kg·m ²)	mk_{zz}^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, 기준모델은 각 링크에 대하여 동일한 모델을 사용하였는데, 식(7)에서의 매개변수 A_1 및 B_1 은 상태오차 감소속도(decaying speed)에 의한 영향을 고려하여 안정한 평형점(stable equilibrium point) 근처에서 선형화된 모델의 매개변수의 값과 거의 일치하는 값인 $A_1=2.04$, $B_1=1.6$ 으로 선정하였다.

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

여기서 I은 6×6의 대각선 단위 행렬을 나타낸다. 그리고, P_1 및 P_2 의 값은 각각 식(24)의 조건을 만족하는 값으로서 0.4 및 15로 선정하였고, 또한 K_s 및 K_m 의 값은 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 매니퓰레이터 모델에 대한 자코비안(Jacobian) 행렬은 다음과 같다.

$$Z(q) = [Z1(q), Z2(q), Z3(q), Z4(q), Z5(q), Z6(q)]$$

여기서,

$$Z1(q) =$$

$$\begin{bmatrix} -d2(C2(C4C5C6 - S4S6) - S2S5C6) \\ S2d3(S4C5C6 + C4S6) \\ -d2(-C2(C4C5S6 + S4C6) + S2S5S6) \\ + S2d3(-S4C5S6 + C4C6) \\ -d2(C2C4S5 + S2C5) + S2d3S4S5 \\ -S2(C4C5C6 - S4S6) - C2C6S5 \\ S2(C4C5S6 + S4C6) + C2S5S6 \\ -S2C4S5 + C2C5 \end{bmatrix}$$

$$Z2(q) = \begin{bmatrix} d3(C4C5C6 - S4S6) \\ -d3(C4C5C6 + S4C6) \\ d3C4S5 \\ S4C5C6 + C4S6 \\ -S4C5S6 + C4C6 \\ S4S5 \end{bmatrix}$$

$$Z3(q) = \begin{bmatrix} -S5C6 \\ S5S6 \\ C5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$Z4(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -S5C6 \\ S5S6 \\ C5 \end{bmatrix}$$

$$Z5(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ S6 \\ C6 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$Z6(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

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

그리고 궤적 계획에서 작업수행은 3초 동안하였고, 초기위치 $(-0.2, 0.5, 0.3)$ rad 에서 출발하여, 최종 도달점 $(-0.7, 1.2, -0.3)$ rad 지 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 80287 을 내장한 16bit AT(40MB) 컴퓨터에서 수행하였다.

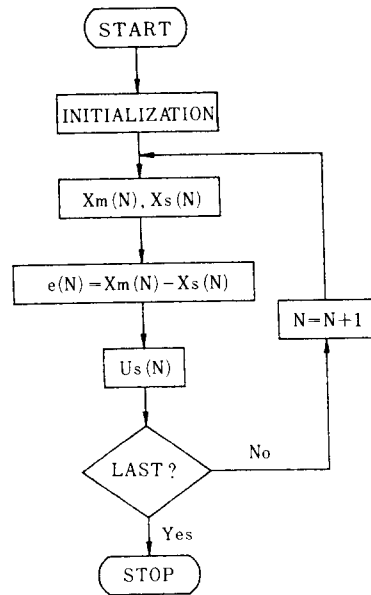


Fig.4 Flow chart for simulation

그리고, 제어효과를 평가하기 위하여 다음식과 같이 주어지는 상수궤환 이득을 갖는 토크 계산법(computed torque control method)과 비교 검토하였다.

$$U_s(t) = D(q_i(t)) (\ddot{q}_m(t) + K_v(\dot{q}_m(t) - \dot{q}_i(t)) + K_p(q_m(t) - q_i(t))) + C(q_i(t), \dot{q}_i(t)) + G(q_i(t)) \dots\dots\dots (25)$$

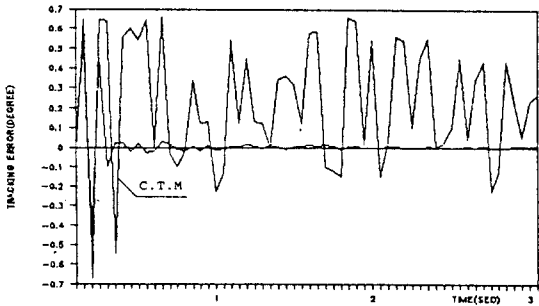
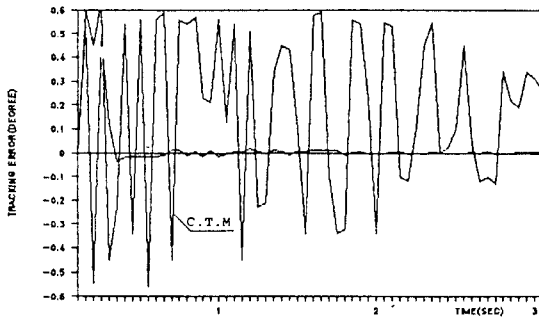
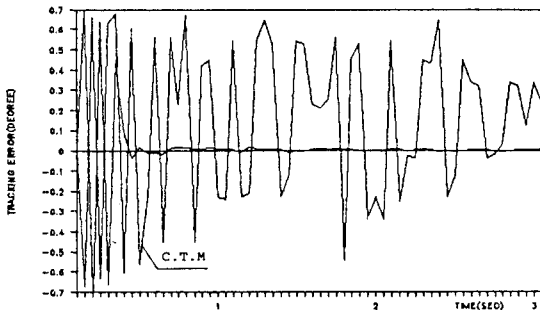


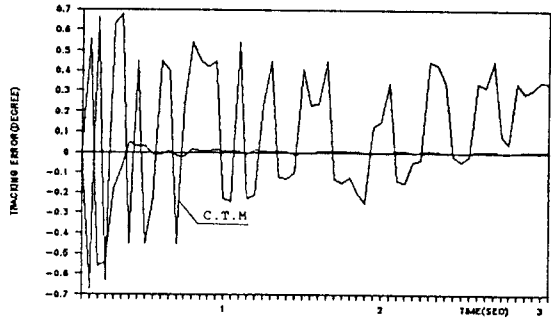
Fig. 5 (a) Tracking error of joint 1



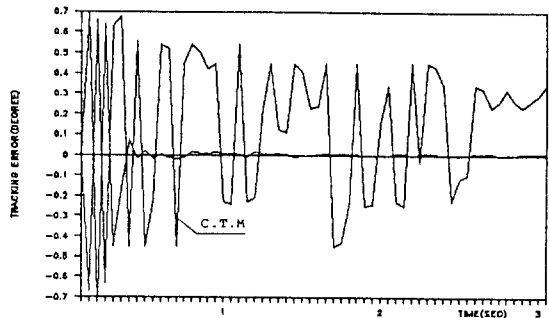
(b) Tracking error of joint 2



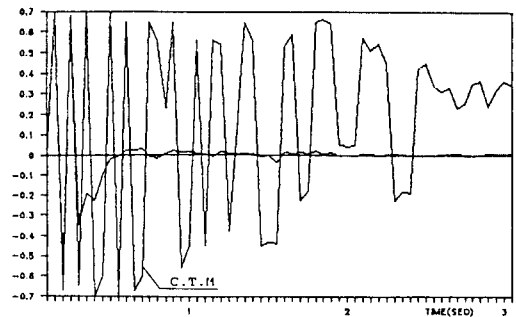
(c) Tracking error of joint 3



(d) Tracking error of joint 4



(e) Tracking error of joint 5



(f) Tracking error of joint 6

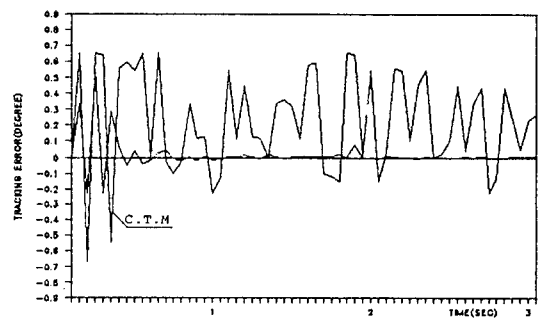
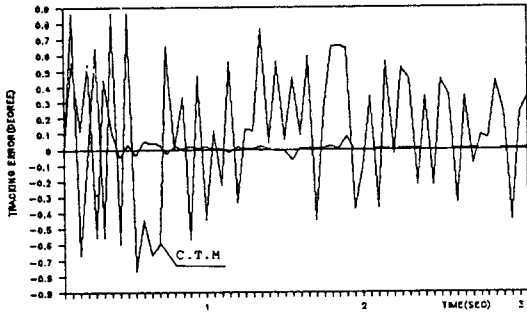
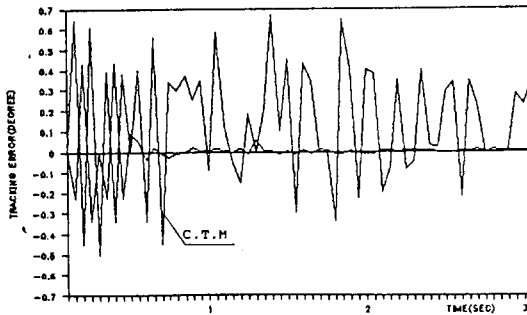


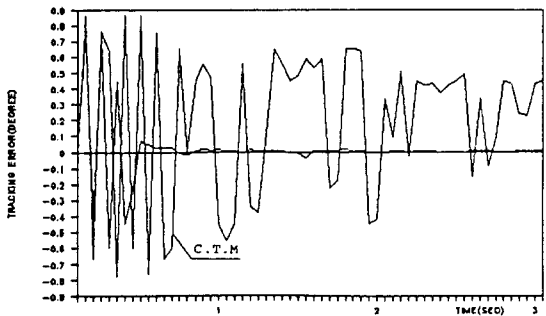
Fig. 6 (a) Tracking error of joint 1



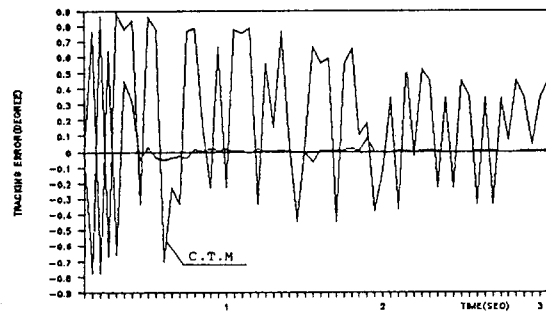
(b) Tracking error of joint 2



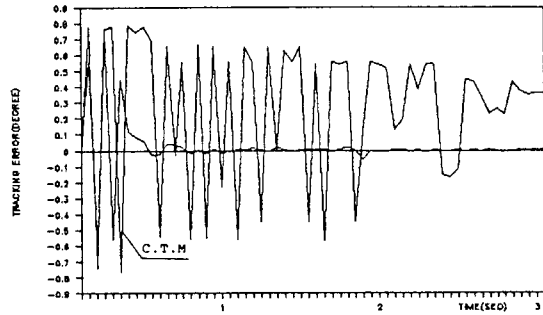
(c) Tracking error of joint 3



(d) Tracking error of joint 4



(e) Tracking error of joint 5



(f) Tracking error of joint 6

여기서 K_v 와 K_p 는 각각 속도와 위치의 게환 이득으로서 $K_v = (18, 30, 45, 50, 40, 35)$

$K_p = (100, 200, 350, 250, 400, 300)$ 으로 주어지며, \dot{q}_m 및 \dot{q}_i 는 각각 기준 모델 및 매니플레이터의 관절 i 의 속도를 나타낸다.

위의 fig.5 및 fig.6은 무부하 상태 부하상태에 대하여 각 관절의 추종오차를 본 연구에서 제안한 제어기법과 토크 계산법(computed torque control method)에 의한 결과를 비교하여 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과 무부하상태 및 3.5kg 부하 상태에서 약 0.45초 이내의 매우 빠른 속도로 정상상태로 수렴되고 있으므로 기존의 토크 계산법에 비하여 훨씬좋은 추종상태를 보여주고 있다.

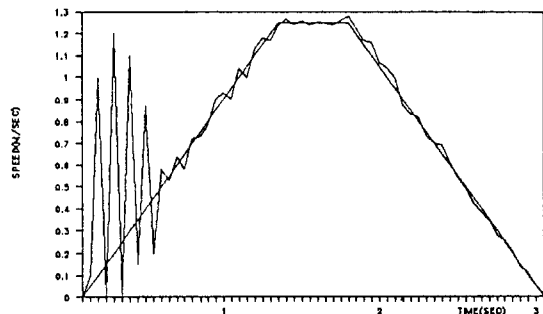


Fig. 7 Velocity tracking of end-effector

그리고 속도의 궤적은 가속, 등속, 감속으로 연결되는 사다리꼴 형태로 주어지는 기준 모델을 추종하도록 하였다.

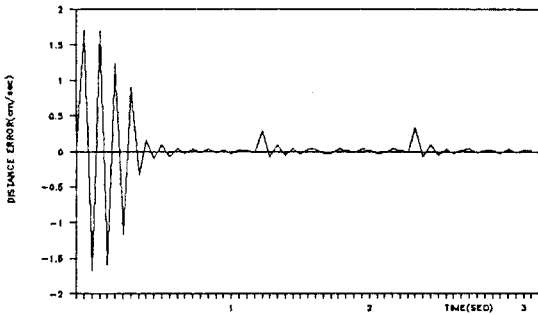


Fig. 8 Distance error of end-effector in case of load Variation

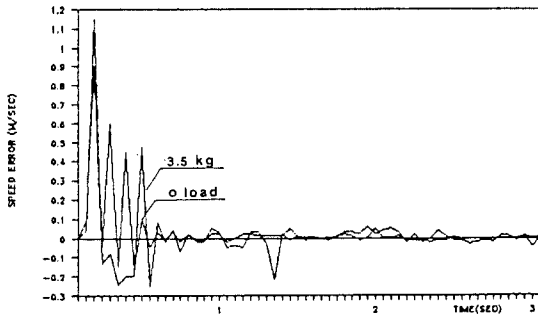


Fig. 9 Speed tracking error of end-effector

임의의 속도에 대한 제어가능성을 확인하기 위하여 부하의 변동 및 외란의 변동에 대한 출력 오차의 수렴속도 및 수렴여부를 검토하였다. Fig. 7은 무부하상태 및 3.5kg 상태에서의 속도 추종상태를 나타내고 있는데 무부하 상태 및 3.5kg 부하의 경우 약 0.45초 이내에 정상상태로 수렴하므로 매우 좋은 모델 추종상태를 보여주고 있다.

그리고 fig. 8는 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(robustness)을 보여주고 있다.

IV. 결 론

기준모델 적응제어 (model reference adaptive

control) 방식은 비모형화 동특성 (unmodelled dynamics)을 갖는 플랜트를 제어함에 있어서 제어계의 특성을 원하는 이상적인 특성을 갖는 기준모델의 동특성과 일치하게 하는 제어기를 적응적으로 구성하는 제어기법으로서 본 연구에서는 구조적 완전모델 추종조건이나 정확한 매개변수의 추정자를 필요로 하지않는 직접적응제어 (direct MRAC) 방식을 사용하여 다관절 로봇트 매니플레이터의 견실한 제어기를 설계하였다.

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

시뮬레이션 결과 설계된 제어기에 의한 매니플레이터의 각 관절은 무부하 상태 및 부하의 변동 상태에서도 각 관절은 빠른 시간내에 거의 정확한 모델추종상태를 보여주므로써, 정상편차가 없는 견실성을 확인할 수 있었다. 그리고 end-effector의 임의의 속도 및 위치에 대해 순간적인 부하의 변동 및 외란에 경우에도 0.05초 이내의 매우 빠른 시간내에 정상상태로 되돌아와 임의의 속도 및 위치에 대한 정밀제어가 가능함을 보여주므로써 본 연구에서 설계된 제어기의 제어 성능의 우수성을 입증할 수 있었다.

參 考 文 獻

- 1) Koiv, 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 selftuning control of robotic manipulators" 16th ISIR, pp. 289-298, 1986.
- 3) R. L. Koust and B. Friendlander, "Roubst 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", Trans. of ASME. J. Dynamic System, Measurement, and Control, vol.105, pp.143-151, 1983.
- 5) Kye-young Lim, "Model reference adaptive control for linear system with improved convergence rate-parameter adaptation method", Trans. KIEE, vol. 37, no. 10, pp. 733-739, oct. 1988.
 - 6) 김성득, 양해원, "모형화 특성을 갖는 기준모델 적응제어 시스템의 견고성 해석" 전기 학회 논문지, 제36권, 10호, 1987.
 - 7) Y. D. Landau, Adaptive Control-The Model Reference Approach, Marcel Dekker, Inc., 1979.
 - 8) I. D. Landau, "A stability criterion for model reference adaptive control systems", IEEE Trans. Auto. Contr., vol. ac-14, no. 5, p. 552-555, oct. 1969.
 - 9) Choi, Y. K., Chung M. J. and Bien. Z., "An adaptive control scheme for robot manipulators", INT. J. Control, vol. 44, no-4, pp. 1185-1191, 1986.
 - 10) 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.
 - 11) 이상효, 양대규, "적응극점 배치 및 자기동조 제어방법에 의한 로봇 매니플레이터 제어", 전기학회 논문지, 37권, 9호, 1988.
 - 12) K. S. Narendra and P. Kudva, "Stable adaptive schemes for system identification and control-part I", IEEE Trans. on Syst., Man, Cybern., vol. SMC-4, pp. 542-551, 1974.
 - 13) K. S. Narendra and P. Kudva, "Stable adaptive schemes for system identification and control-part II", IEEE Trans. on Syst., Man, Cybern., vol. SMC-4, pp. 552-560, 1974.
 - 14) B. S. Chen, C. M. Lin, "Multipurpose adaptive control in deterministic multivariable systems", IEE Proc. vol. 135, Pt. D, No. 4, 1988.
 - 15) ROHRS, C., "Adaptive control in the presence of the presence of unmodelled dynamics", ph. D Thesis, MIT, LIDS report TH-1254, 1982.
 - 16) K. J. Astrom and B. Whitaker, "Self-tuning controllers based on pole-zero placement", proce. IEE. vol-127, pt. D., no-3, pp. 120-130, 1980.