

MRAC를 이용한 산업용 로봇의 실시간 게인 동조

하회권*, 허남**, 이영진**, 이만형***

On-line Gain Tuning of Industrial Robot Using MRAC

Hee-Kwon Ha*, Nam Huh**, Young-Jin Lee**, Man Hyung Lee***

Abstract

During operating given working, a robot manipulator makes some problems such as the accumulation of the error or the deviation from the command trajectory. These problems are mainly due to the disturbance, noise, or unmodeled system parameters. To solve these problems, most of robot manipulators equip the controller. But if exact controller gains are not selected, we can't decrease the working efficiency (such as compensation about error or deviation) of the robot manipulator. So in this paper, we present the controller gain tuning law, by which we can find the controller gain which satisfies the performance specification of the robot manipulator during working of the robot. The proposed algorithm is derived from the Lyapunov direct method. And by the simulation on the 4-axis SCARA type robot (SAMSUNG SM5 Robot), we guarantee the performance of this algorithm.

Key Words : PD-Gravity Controller, Lyapunov Direct Method, Adaptive Control, MRAC

1. 서론

현재 제어 이론이 발전하여 많은 고급 제어 법칙이 제시되는데 불구하고 아직까지 산업현장에서는 고전적 제어 방법인 PID 제어가 사용되고 있다. 그 이유는 PID 제어기는 비례, 적분, 그리고 미분기의 간단한 구조를 갖고 있음에도 불구하고 상대적으로 좋은 제어성능을 제공하고, 제어기의 물리적 의미가 쉽게 파악할 수 있는 장점을

지니고 있기 때문이다.

이러한 장점에도 불구하고, PID 제어기의 성능은 제어 대상 혹은 이를 둘러싼 주위환경 변화에 기인한 매개 변수의 변화에 대하여 크게 의존하는 단점을 지니고 있으며, 이 때 제어기 게인은 전문가의 경험에 의한 시행착오적으로 선정되어지고 있는 것이 현실이다. 이를 위해서는 많은 시간과 경비가 소요되는 문제점을 지니고 있다.

PID 제어기 이득의 자동 동조에 관한 연구는 예측을 기

* 부산대학교 기계공학과
** 부산대학교 지능기계공학과
*** 부산대학교 기계공학부

초로 한 Ziegler-Nichols의 PID 제어기 동조법, 해석적인 방법을 이용한 극배치 기법과 λ -튜닝 기법, 오차 제곱의 적분값을 이용한 Hazebroek-Waerden 최적화 방법 등이 있다.⁽⁶⁾ 최근에는 유전 알고리즘, 퍼지 이론, 신경망 이론을 접목하여 제어기 계인 선정에 이용되고 있다. 그러나, 이들 방법들은 PID 제어기의 계인 동조시, 제어 대상이 안정하다는 가정 하에 전문가의 지식에 의존하고 있으며⁽¹⁾, 국소(local)값에 빠져들거나 학습되지 못한 작업 환경에서는 정확한 계인을 동조하기가 어렵기 때문에 실제 산업 공정에 적용시키는 데에는 적지 않은 문제점을 내포하고 있어 많은 연구의 결과에 비하여 실제의 활용은 극소수에 불과하다.

이에 본 논문에서는 제어 대상이 작업 동작 중에 발생하는 외란, 노이즈의 작용에 대해서도 제어 대상의 매개 변수를 잘 조절할 수 있는 MRAC(Model Reference Adaptive Control)를 이용한 적응 제어 이론을 접목하여 외란, 노이즈가 발생하는 제어 대상이 작업 중에도 동조 가능한 알고리즘을 제안한다.^(2, 3, 8, 13) 그리고 이 알고리즘은 MRAC의 상태공간방정식과 실제 제어 대상의 상태공간 방정식의 오차를 이용하여 적응 제어 법칙(adaptive control law)을 유도하며 이 제어 법칙으로서 제어기 계인을 동조한다. 이 때 적응 제어 법칙은 직접적으로 선정하였으며 이 Lyapunov 함수 후보(Lyapunov function candidate)는 양으로 한정된 함수(positive definite function)이고, 이 후보의 시간에 대한 미분은 음으로 한정된 함수(negative definite function)가 되어 점근 안정(asymptotically stable)을 만족한다.^(12, 14) 그리고 4장에서는 설계한 제어 알고리즘을 상수 외란과 백색 잡음이 존재하는 산업용 로봇에 대해 시뮬레이션을 하여 그 성능을 확인한다. 이 때 산업용 로봇은 4축 SCARA 타입의 삼성 SM5에 대한 변수값들을 이용하여 수행하였다.

2. 로봇 시스템 모델

마찰과 외란의 영향을 고려하지 않은 n절의 로봇 매니플레이터는 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.^(4, 6)

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (1)$$

여기서, q 는 조인트 변위 $q = [q_1, q_2, z, \theta]^T$ 이며, τ 는 조인트 토크이고, $M(q)$ 은 매니플레이터의 관성 행렬이며, 이것은 양으로 한정된 대칭 행렬이다. 그리고 $C(q, \dot{q})$ 는 구심력과 Coriolis 토크항이며, $g(q)$ 는 중력 토크항이다.

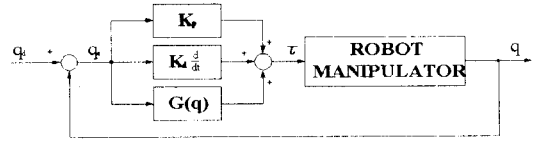


Fig. 1 Block diagram of Robot system

이 때 토크 입력을 주기 위한 제어 시스템은 다음과 같이 PD-중력 제어기(PD-Gravity Controller)를 선정한다.

$$\tau = K_p q_e(t) + K_d \dot{q}_e(t) + G(q) \quad (2)$$

여기서, $q_e(t) = q_d(t) - q(t)$ 이며 이것은 실제 조인트 변위 벡터 $q(t)$ 와 요구되는 조인트 변위 벡터 $q_d(t)$ 사이의 오차 벡터이고, K_p 와 K_d 는 비례·미분 제어기의 계인 행렬이다. 식 (2)를 로봇 매니플레이터 운동방정식인 식 (1)에 대입하면,

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + g = K_p q_e(t) + K_d \dot{q}_e(t) + G(q) \quad (3)$$

이 된다. 식 (3)은 Fig. 1과 같은 블럭 선도를 가진 로봇 시스템으로 구현할 수 있다.

그리고 조인트 변위 오차 항에 대한 2차 미분방정식을 다음과 같이 구성한다.

$$M\ddot{q}_e + (C + K_d)\dot{q}_e + K_p q_e = M\ddot{q}_d + C\dot{q}_d \quad (4)$$

식 (4)에서 관성 행렬로 양변을 나누면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$q_e + M^{-1}(C + K_d)\dot{q}_e + M^{-1}K_p q_e = \dot{q}_d + M^{-1}C\dot{q}_d \quad (5)$$

식 (5)에 생략되었던 모델링 과정 중 생략하였던 마찰과 노이즈에 대해서 식 (6)과 같이 추가한다.⁽⁴⁾

$$q_e + [M^{-1}(C + K_d) + a^*]\dot{q}_e + [M^{-1}K_p + b^*]q_e = \dot{q}_d + M^{-1}C\dot{q}_d + f^* \quad (6)$$

식 (6)의 a^* , b^* , f^* 는 모델링시 고려하지 못한 항을 나타낸다. 그리고,

$$A^* = M^{-1}(C + K_d) + a^* \quad (7-a)$$

$$B^* = M^{-1}K_p + b^* \quad (7-b)$$

$$F^* = \dot{q}_d + M^{-1}C\dot{q}_d + f^* \quad (7-c)$$

라고 두면, 식 (6)을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\ddot{q}_e + A^*\dot{q}_e + B^*q_e = F^* \quad (8)$$

이렇게 구해진 식 (8)을 상태공간 형태의 식으로 표현하기 위해서 상태 벡터 $Z(t)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$Z = [q_e, \dot{q}_e]^T \quad (9)$$

상태 벡터 $Z(t)$ 를 이용하면 로봇의 위치 추종 운동방정식을 다음과 같이 상태공간 방정식으로 쓸 수 있다.

$$\dot{Z} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -B^* & -A^* \end{bmatrix} Z + \begin{bmatrix} 0 \\ F^* \end{bmatrix} \quad (10)$$

3. 적응제어 알고리즘

본 논문에서는 직접 적응제어(Direct Adaptive Control) 방법을 이용하여 로봇 말단 효과기가 기준 위치 선도를 추종하도록 한다. 이 때 직접 적응제어 방법은 위치 추종 오차 함수를 실시간적으로 로봇 말단 효과기의 추종 위치를 지시해주고, 실제 로봇의 추종 위치 오차의 운동방정식(식 (6))에서는 제어기 계인을 변화시킬 수 있는 MRAC를 선정하여 미분 제어기 계인 K_d 와 비례 제어기 계인 K_p 를 적절히 조절하도록 한다.

MRAC의 위치 추종 오차 방정식은 식 (11)과 같이 쓸 수 있다.

$$\ddot{q}_m + 2\zeta\omega \dot{q}_m + \omega^2 q_m = 0 \quad (11)$$

이 때 q_m 은 $q_m = q_d(t) - q_{MRAC}(t)$ 라 한다. 여기서 $q_d(t)$ 는 요구되는 조인트 변위 벡터이고 $q_{MRAC}(t)$ 는 MRAC에 의해서 생성되는 조인트 벡터이다. 그리고 $\zeta\omega$ 는 $n \times n$ 대각 행렬 벡터이고 마찬가지로 ω^2 도 $n \times n$ 대각 행렬 벡터이다. 한편 ζ 는 감쇠 계수이고 ω 는 고유주파수이다.

식 (11)을 상태공간 형태의 식으로 표현하기 위해서 상태 벡터 $Z_m(t)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$Z_m = [q_m, \dot{q}_m]^T \quad (12)$$

Z_m 을 이용하여 MRAC의 위치 추종 오차 방정식을 다음과 같은 상태공간 방정식으로 쓸 수 있다.

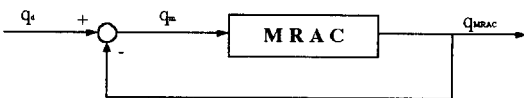


Fig. 2 Block diagram of MRAC(Model Reference Adaptive Control)

$$\dot{Z}_m = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\omega^2 & -2\zeta\omega \end{bmatrix} Z_m \quad (13)$$

로봇의 위치 추종 오차 방정식과 MRAC의 위치 추종 오차 방정식의 차로 이루어진 오차 방정식을 다음과 같이 정의한다.

$$E = Z - Z_m \quad (14)$$

오차 방정식을 미분하면,

$$\dot{E} = \dot{Z} - \dot{Z}_m \quad (15)$$

이 되고, 이 때 위의 두 식(식 (10)와 식 (13))을 대입하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{E} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -B^* & -A^* \end{bmatrix} Z + \begin{bmatrix} 0 \\ F^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\omega^2 & -2\zeta\omega \end{bmatrix} Z_m \quad (16)$$

식 (16)을 다시 쓰면,

$$\dot{E} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\omega^2 & -2\zeta\omega \end{bmatrix} E + \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\omega^2 - B^* & -2\zeta\omega - A^* \end{bmatrix} Z + \begin{bmatrix} 0 \\ F^* \end{bmatrix} \quad (17)$$

와 같이 된다.

이 식을 이용하여 Lyapunov 함수 후보를 다음과 같이 정의한다.

$$V = E^T P E + F^{*T} \Gamma_1 F^* + (\omega^2 - B^*)^T \Gamma_2 (\omega^2 - B^*) + (2\zeta\omega - A^*)^T \Gamma_3 (2\zeta\omega - A^*) \quad (18)$$

행렬 P 는 항상 양으로 한정된 행렬이고, 식 (20)를 만족하고 있다.

$$P = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 \\ p_2 & p_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$A^T P + P A = -\bar{Q}$$

이 때 행렬 Q 역시 양으로 한정된 행렬이다. 그리고 Lyapunov 함수 후보 V 를 시간에 대해서 미분을 하면,

$$\dot{V} = 2E^T P \dot{E} + 2F^{*T} \Gamma_1 \dot{F}^* - 2(\omega^2 - B^*)^T \Gamma_2 B^* - 2(2\zeta\omega - A^*)^T \Gamma_3 A^* \quad (20)$$

이 되며, 위의 조건을 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -E^T Q E + (p_2 q_e + p_3 q_m) F^* \\ & + (p_2 q_e + p_3 q_m)(\omega^2 - B^*) q \\ & + (p_2 q_e + p_3 q_m)(2\zeta\omega - A^*) \dot{q} + 2F^{*T} \Gamma_1 F^* \\ & - 2(\omega^2 - B^*)^T \Gamma_2 B^* - 2(2\zeta\omega - A^*)^T \Gamma_3 A^* \end{aligned} \quad (21)$$

이 때 $\dot{V} \leq 0$ 이 되면 점근 안정 조건을 만족하게 된다 [13]. 이 조건으로부터 다음의 세 가지 적응 제어 법칙을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} a. & (p_2 q_e + p_3 q_m) F^* + 2F^{*T} \Gamma_1 F^* = 0 \\ & \rightarrow \dot{F}^* = -\frac{1}{\Gamma_1} (p_2 q_e + p_3 q_m) \quad (22-a) \\ b. & (p_2 q_e + p_3 q_m)(\omega^2 - B^*) q - 2(\omega^2 - B^*)^T \Gamma_2 B^* = 0 \\ & \rightarrow \dot{B}^* = -\frac{1}{\Gamma_2} (p_2 q_e + p_3 q_m) q \quad (22-b) \\ c. & (p_2 q_e + p_3 q_m)(2\zeta\omega - A^*) \dot{q} - 2(2\zeta\omega - A^*)^T \Gamma_3 A^* = 0 \\ & \rightarrow \dot{A}^* = -\frac{1}{\Gamma_3} (p_2 q_e + p_3 q_m) \dot{q} \quad (22-c) \end{aligned}$$

위의 세 적응 제어 법칙을 만족하게 되면, \dot{V} 는

$$\dot{V} = -E^T Q E \quad (23)$$

이 되고, Q는 항상 양으로 한정된 행렬이므로 \dot{V} 는 항상 영보다 작게 된다. 따라서 Lyapunov 함수 후보는 근접 안정도를 만족하게 된다.

식 (22-a, b, c)의 안정 조건에 식 (7-a, b, c)를 대입하여 다음과 같은 적분 적응 제어 법칙으로 구성된 PD-중력제 어기의 계인(비례 계인 K_p 와 미분 계인 K_d)을 얻을 수 있다.

- 비례계인

$$K_p = K_p(0) + Q_p \int_0^t (p_2 q_e + p_3 q_m) \cdot q dt \quad (24-a)$$

- 미분계인

$$K_d = K_d(0) + Q_d \int_0^t (p_2 q_e + p_3 q_m) \cdot \dot{q} dt \quad (24-b)$$

이렇게 얻은 계인 법칙을 이용하여 4장에서는 실제 로봇에 적용하여 시뮬레이션을 수행하고 계인 동조 성능을 확인하고자 한다.

Fig. 3은 전체 블럭 선도를 나타내고 있으며, 중력 제어기는 로봇 매니퓰레이터의 중력항과 상쇄되기 때문에 생략하였다.

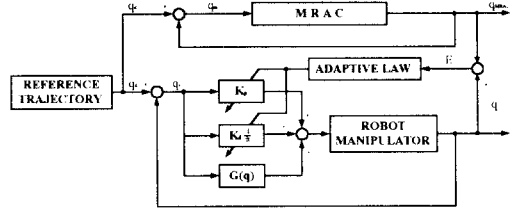


Fig. 3 Joint-space adaptive control scheme of Robot manipulator

4. 시뮬레이션

2절과 3절에서 제시한 MRAC를 이용한 계인 동조 알고리즘을 4축 SCARA 로봇 매니퓰레이터에 대해서 컴퓨터 시뮬레이션을 하여 그 성능을 알아보기로 하자. Fig. 4는 4축 SCARA 로봇의 개략도를 나타낸 것이며, Table 1은 산업현장에서 사용하고 있는 4축 SCARA 타입의 삼성 SM5 로봇 변수를 나타낸다. 그리고 식 (1)은 다음과 같이 구성되어 있다.

$$\begin{aligned} M_{11} \ddot{q}_1 + M_{12} \ddot{q}_2 + M_{14} \ddot{\theta}_4 + C_{112} \dot{q}_1 \dot{q}_2 + C_{122} \dot{q}_2^2 &= \tau_1 \\ M_{21} \ddot{q}_1 + M_{22} \ddot{q}_2 + M_{24} \ddot{\theta}_4 + C_{211} \dot{q}_1^2 &= \tau_2 \\ M_{33} \ddot{\theta}_3 + G_3 &= \tau_3 \\ M_{41} \ddot{q}_1 + M_{42} \ddot{q}_2 + M_{44} \ddot{\theta}_4 &= \tau_4 \end{aligned} \quad (25)$$

여기서, 관성 행렬 M(q)는 다음과 같고,

$$\begin{aligned} M_{11} &= M_1 \cdot L_{c1}^2 + M_2 \cdot (L_1^2 + L_{c1}^2 + 2L_1 L_{c2} \cos(q_2)) \\ &+ (M_2 + M_3) \cdot (L_1^2 + L_{c1}^2 + 2L_1 L_{c2} \cos(q_2)) + I_1 + I_2 + I_4 \\ M_{12} &= M_{21} = M_2 \cdot (L_{c2}^2 + L_1 L_{c2} \cos(q_2)) \\ &+ (M_3 + M_4) \cdot (L_{c2}^2 + L_1 L_{c2} \cos(q_2)) + I_2 + I_4 \\ M_{22} &= M_2 \cdot L_{c2}^2 + (M_3 + M_4) \cdot L_2^2 + I_2 + I_4 \\ M_{14} &= M_{41} = M_{24} = M_{42} = -I_4 \\ M_{33} &= M_3 + M_4 \\ M_{44} &= I_4 \\ M_{13} &= M_{31} = M_{23} = M_{32} = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

구심력과 Coriolis 행렬 C(q, \dot{q})는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_{112} &= -2M_2 \cdot L_1 L_{c2} \sin q_2 - 2(M_3 + M_4) \cdot L_1 L_{c2} \sin q_2 \\ C_{122} &= -M_2 \cdot L_1 L_{c2} \sin q_2 - (M_3 + M_4) \cdot L_1 L_2 \sin q_2 \\ C_{211} &= M_2 L_1 L_{c2} \sin q_2 + (M_3 + M_4) \cdot L_1 L_2 \sin q_2 \end{aligned} \quad (27)$$

Table 1 Parameter of the manipulator

	Notation	Value	Unit
Length of link 1	L_1	350	mm
Length of link 2	L_2	260	mm
Length of link 3	L_3	256	mm
Length of link 4	L_4	50	mm
Center of mass of link 1	L_{c1}	116	mm
Center of mass of link 2	L_{c2}	178	mm
Mass of link 1	M_1	15.067	kg
Mass of link 2	M_2	8.994	kg
Mass of link 3	M_3	3.0	kg
Mass of link 4	M_4	1.0	kg
Inertia moment of link 1	I_1	821000	kgmm^2
Inertia moment of link 2	I_2	136000	kgmm^2
Inertia moment of link 3	I_3	45000	kgmm^2
Inertia moment of link 4	I_4	1400	kgmm^2
Gravity acceleration	G	9.8	m/s^2

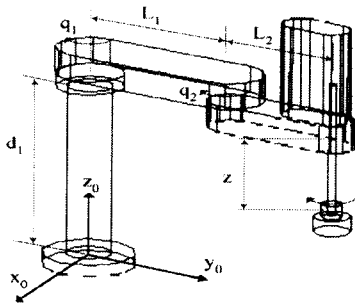


Fig. 4 Schematic of 4-axes SCARA Robot

시뮬레이션을 하기 위해서 MRAC의 사양은 응답은 늦지만 오버슈트가 일어나지 않는 것으로 선정하고자 한다. 그래서 ζ 는 0.9이고, ω 는 10로 선정하였으며, MRAC의 위치 추종 오차 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\ddot{q}_m + 18\dot{q}_m + 100q_m = 0 \quad (28)$$

MRAC의 응답을 알아보기 위하여 식 (29)에 스텝 입력을 주었을 때의 시간응답과 주파수 응답을 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 이 때 MRAC의 마진은 Fig. 6에서와 같이 위상 마진이 73.514deg이고, 게인 마진은 무한대임을 알 수 있다. 그리고 모델링시 고려못하였던 항에 대해서는 상수항과 정현파항의 합으로 하였다.

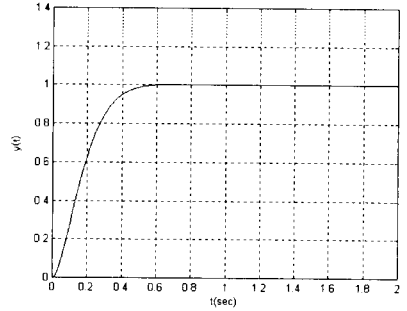


Fig. 5 Step response of MRAC

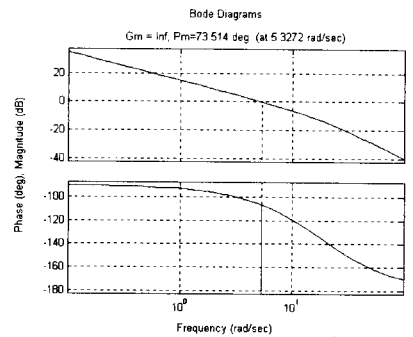


Fig. 6 Margin of MRAC

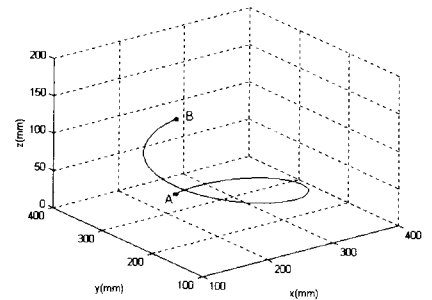


Fig. 7 Reference Input Trajectory

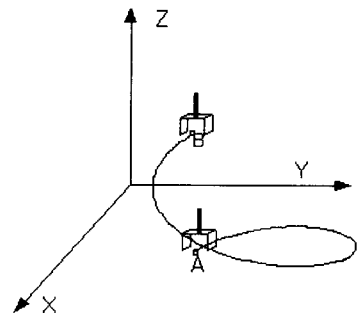


Fig. 8 Motion of End-Effector

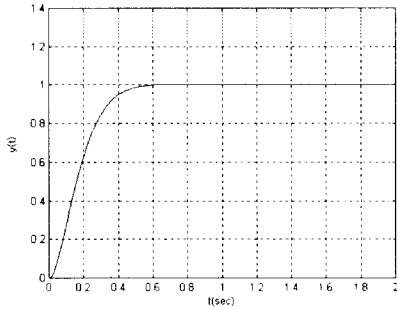


Fig. 9 Actual Moving Trajectory of End-Effector

본 논문에서의 시뮬레이션은 Fig. 7과 같이 지름이 100 mm이고 원통 형태의 경로를 말단 효과기가 추적하고자 한다. 이 때 점 A는 말단 효과기의 초기 위치를 나타내고, 점 B는 도착점을 나타낸다. 이 때 점 A의 좌표는 (250,350,0)이고 점 B의 좌표는 (250,350,100)이다. Fig. 8은 로봇 말단효과기가 점 A에서 점 B로 움직였을 때 4축이 360° 회전하는 것을 나타내고 있다.

Fig. 9은 로봇 매니퓰레이터의 말단 효과기가 움직이는 궤적을 나타내며, Fig. 10-(a)는 x-y-z축에 대한 입력에 대한 출력 오차값을 나타내었으며, Fig. 10-(b)는 4축에 대한 출력 s오차값을 나타내었다.

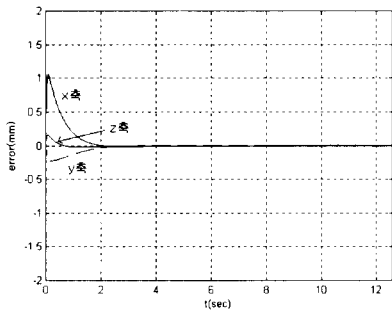


Fig. 10-(a) Path Tracking Error in Coordinate

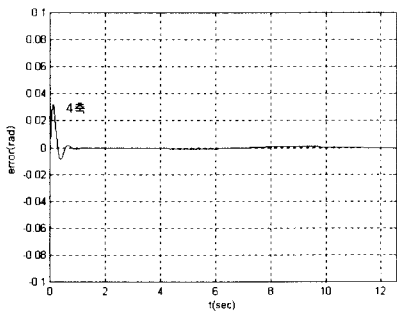


Fig. 10-(b) Path Tracking Error in Coordinate

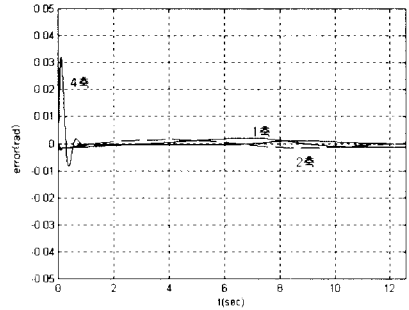


Fig. 10-(c) Tracking Error in Joint

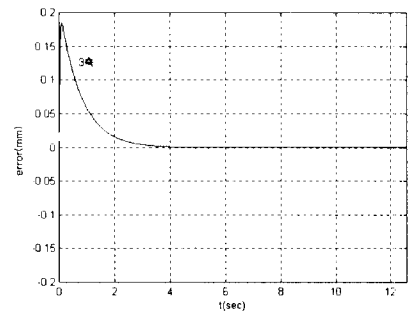


Fig. 10-(d) Tracking Error in Joint

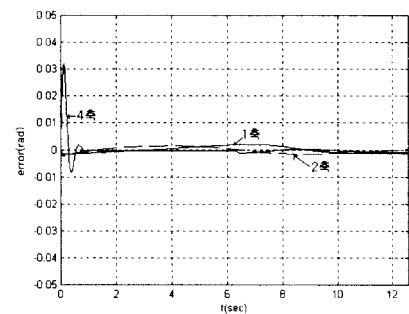


Fig. 11-(a) Tracking Error in Joint (Step Disturbance)

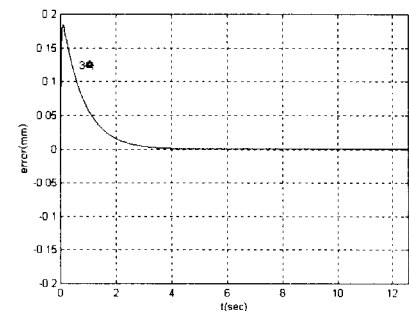


Fig. 11-(b) Tracking Error in Joint (Step Disturbance)

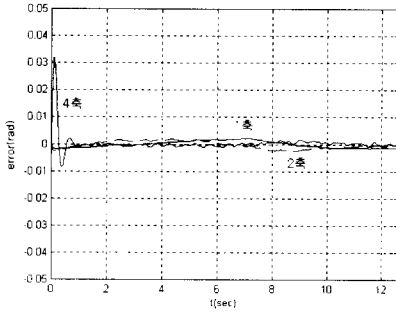


Fig. 12-(a) Tracking Error in Joint (White Noise)

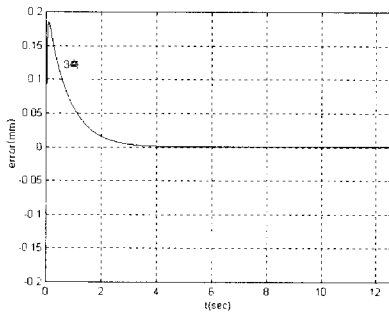


Fig. 12-(b) Tracking Error in Joint (White Noise)

Fig. 10(c)는 1-2-3 축에서 입력에 대한 출력 오차값을 나타내었으며, Fig. 10(d)는 3축에서의 출력 오차값을 나타내었다.

Fig. 11(a)와 (b)는 2π 시간에 상수 외란이 제어 입력에 작용하였을 때의 로봇 매니퓰레이터 각 축에 발생하는 오차 곡선이다.

Fig. 12(a)와 (b)는 백색 잡음이 제어 입력에 작용하였을 때의 로봇 매니퓰레이터 각 축에 발생하는 오차 곡선이다.

5. 결 론

본 논문에서는 로봇의 작업 동작과 외란의 작용에 대해서도 제어 대상의 매개 변수를 잘 조절할 수 있는 MRAC를 이용한 적응 제어 이론을 접목하여 제어 대상이 제어기의 계인을 작업중에도 동조 가능한 알고리즘을 제안하였다. 이 때 MRAC의 상태공간방정식과 실제 제어 대상의 상태공간방정식 사이의 오차를 이용하여 Lyapunov 함수 후보를 직접법에 의해서 선정하였으며, 이 후보가 점근 안정을 만족하는 제어 법칙을 이용하여 제어기 계인 동조 알고리즘을 제시하였다. 그리고 4장의 시뮬레이션에서는 산업 현장에서 사용되고 있는 로봇에 적용하여 성능을 보

장하였으며, 본 논문에서 제시한 알고리즘이 실제 산업 현장에 사용되는 로봇에 대해서 적용할 수 있음을 제시한다.

참 고 문 헌

- (1) Astrom, K.J, and Haggglund, T, "Automatic Tuning of PID Controllers", Instrument Society of America, 1998.
- (2) Astrong, K.J. and Wittenmark, B., "Adaptive Control", 2nd, Addison-Wesley, 1995.
- (3) Choi, Young-Kiu, "A Study on Adaptive Control Schemes Applicable for Robot Manipulators", 서울대학교 박사학위 논문, 1987.
- (4) Crag, J.J., "Adaptive Control of Mechanical Manipulator", Addison Wesley, 1988.
- (5) Crag, J.J., "Introduction to Robotics : Mechanics and Control", 2nd ed. Reading, Addison Wesley, 1989.
- (6) Levine, William S., "The Control : Handbook", CRC Press Inc., 1996.
- (7) Lewis, F.L., "Control of Robot Manipulators", Macmil. Pub. Com., 1993.
- (8) Narendra, K.S. and Annaswamy, A.M., "Stable Adaptive Systems", Prentice-Hall, 1989
- (9) Nguyen, C.C., Antrazi, S.A., Zhou, Z.L., and Campell, C.E., "Adaptive Control of a Stewart Platform-Based Manipulator", J. Robotics Systems, Vol. 10, No. 5, pp.657~687, 1993.
- (10) Rafael, K., "Robust Asymptotically Stable Visual Servoing of Planar Robot", IEEE Trans. Robot. Auto., Vol. 12, No. 5, Oct., 1996.
- (11) Seraji, H. and Colbaugh, R., "Force Tracking in Impedance Control", Int. J. Robotics Research, Vol. 16, No. 1, Feb., pp.97~117, 1997.
- (12) Takegaki, M. and Arimoto, S., "A new feedback method for dynamics control of manipulators", ASME J. Dyn. Syst. Meas. Contr., vol. 102. pp. 119~125, June, 1981.
- (13) Tomei, P., "Adaptive PD Controller for Robot Manipulator", IEEE Trans. Robot. & Auto., Vol. 7, No. 4, Aug., pp.565~570, 1991.
- (14) Vidyasagar, M., "Nonlinear Systems Analysis", Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1993.