

불확실성의 경계를 추정하는 로봇 매니퓰레이터의 적응견실제어기 설계 및 실험

Adaptive Robust Control for Robot Manipulator with the Uncertain Bound Estimation and Implementation

하 인 철*, 한 명 철
(In-Chul Ha and Myung-Chul Han)

Abstract : In this paper, it is presented an adaptive robust control system to implement real-time control of a robot manipulator. There are quantitative or qualitative differences between a real robot manipulator and a robot modeling. In order to compensate these differences, uncertain factors are added to a robot modeling. The uncertain factors come from imperfect knowledge of system parameters, payload change, friction, external disturbance, etc. Also, uncertainty is often nonlinear and time-varying. In the proceeding work, we proposed a class of robust control of a robot manipulator and provided the stability analysis. In the work, we propose a class of adaptive robust control of robot manipulator with bound estimation. Through experiments, the proposed adaptive robust control scheme is proved to be an efficient control technique for real-time control of a robot system using DSP.

Keywords : adaptive robust control, bound, estimation, lyapunov stability, robot manipulators

I. 서론

현대 산업의 자동화에 로봇 시스템은 중요한 요소로 등장하였고, 그 활용 영역이 확대됨에 따라 고속, 고정밀의 제어 성능을 필요로 하게 되었다. 그리고 아무리 잘 구성된 시스템이라 할지라도 구조화되거나 혹은 그렇지 않은 불확실성은 존재하게 마련이므로 불확실성에 견실한 제어 성능 또한 더욱 요구되고 있다. 여기서 구조화된 불확실성은 측정오차나 부하의 변동, 또는 토크상수의 부정확성에 따른 모델내의 파라미터 불확실성을 말한다. 구조화되지 않은 불확실성은 고주파 성분이나 비선형 마찰력, 측정 잡음이나 외란 등 모델링 되지 않은 불확실성 등을 나타내며, 대부분 비선형 특성을 지닌다. 모터의 선형시스템에 근간을 둔 독립관절 제어 방식은 비선형성의 영향을 고려한 computed torque 제어 방식으로 발전되었고 불확실성을 고려하기 위해 견실 제어 방식과 적응 제어 방식이 로봇 제어 기법에 도입되었다[1,2,3]. 그 중 비선형 불확실성 인자의 경계치에 대한 정보를 제어기 설계에 이용하여 그 경계치 내에서 구현되는 불확실성의 형태에 관계없이 안정성이 보장되도록 하는 제어 방법이 견실제어의 주요 갈래가 되고 있다.

견실제어기 설계는 Chen[4], Chen 과 Pandey[5], Reithmeier 과 Leitmann[6], Shoureshi등[7]에 의해 제시되었다. 이들에 의해 불확실 인자들의 가능한 경계치가 제어기 설계에 사용된 확정제어(deterministic control)기법이 제시되고, 제어기가 견딜 수 있는 불확실성의 정도가 분석되었다.

이 논문의 선행 연구로서 불확실 로봇 시스템에 대한 새

로운 형태의 견실제어기가 제시되고 그의 안정성이 분석되었다[8]. 여기서는 좀 더 일반적인 경우인 불확실성의 경계치에 대한 정보가 부족한 환경에서 적응제어 기법을 견실제어에 도입하여 안정성을 보장 할 수 있도록 한다. 그러므로, 본 연구에서는 불확실성의 경계에 대한 함수적인 상태를 아는 경우에 대하여 적응견실제어기(adaptive robust control)을 설계한다. 적응 알고리즘(Adaptive algorithm)은 불확실성의 경계에 대하여 추정하고 견실 제어 기법은 그 경계의 추정치를 이용하는 것이다.

이 논문에서는 제안된 알고리즘의 적용 예로 자유 공간 이동에서 주어진 시변 궤적을 추종하는 4축 스카라(SCARA) 로봇의 실험을 통하여 제안된 적응견실제어기의 효용성을 보일 것이다.

II. 로봇 모델링

일반적으로 n 관절 로봇 매니퓰레이터의 운동 방정식은 다음과 같이 유도 될 수 있다

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

$q : n \times 1$	관절 위치 벡터
$M(q, \sigma) : n \times n$	관성 행렬
$C(q, \dot{q}, \sigma)\dot{q} : n \times 1$	원심력, 코리올리스 벡터
$g(q, \sigma) : n \times 1$	중력 벡터
$f(q, \dot{q}, \sigma, t) : n \times 1$	불확실 토크 벡터
$\tau : n \times 1$	토크 벡터
$\sigma \in R^s$	불확실 파라미터 벡터

위 식은 다음과 같은 성질이 있다.

첫째, $M(q, \sigma)$ 는 양확정이고, 대칭이다.

둘째, $\dot{M}(q, \sigma) - 2C(q, \dot{q}, \sigma)$ 가 교대대칭이 되는 적당한

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 5. 26., 채택확정 : 2003. 12. 17.

하인철 : 부산대학교 지능기계공학과 (현) 고등기술연구원 로봇/생산기술센터(icha@iae.re.kr)

한명철 : 부산대학교 기계공학부(mchan@hyowon.cc.pusan.ac.kr)

$C(q, \dot{q}, \sigma)$ 를 선정 가능하다.

셋째, $f(q, \dot{q}, \sigma, t)$ 는 구조적, 비구조적 불확실성에 의해 발생하는 토크를 포함한다.

III. 건설제어기 및 안정성

본 절에서는 로봇 시스템 (1)에 대하여 건설제어기 설계를 고려하며, 제안된 건설제어기에 의하여 전체 시스템이 흔히 실용적 안정성(practical stability) 혹은 대역적 평등흡인성(global uniform attractivity)으로 지칭되는 다음과 같은 안정성 [4,5,9]을 보장 받음을 분석한다.

여기서 $\beta \in R^s$ 로서 상수 벡터이고, $\Phi(q, \dot{q}, \sigma, t)$ 는 불확실 요소들에 대한 함수이며, 이 때의 제어 입력은 $\tau(q, \dot{q}, \beta, t)$ 이다.

정의 1 : 로봇에 대한 실용적 안정성 1

제어 입력 $\tau(q, \dot{q}, \beta, t)$ 가 로봇 시스템 (1)에 적용된 페루프 시스템은 다음과 같다.

$$M(q, \sigma)\ddot{q} + C(q, \dot{q}, \sigma)\dot{q} + g(q, \sigma) + f(q, \dot{q}, \sigma, t) = \tau(q, \dot{q}, \beta, t) \quad (2)$$

$$q(t_0) = q_0, \quad \dot{q}(t_0) = \dot{q}_0$$

이때 시스템 (2)가 아래의 성질을 만족시키는 상수 $d > 0$ 가 존재 할 때, 제어 입력 $\tau(q, \dot{q}, \beta, t)$ 는 안정한 건설제어 입력이 된다.

1) 해의 존재성

각 (q_0, \dot{q}_0, t_0) 에 대하여, 로봇 시스템 (1)의 해 $(q(\cdot), \dot{q}(\cdot)) : [t_0, t_1] \rightarrow R^n$ 이 존재한다.

2) 평등 유계성 (Uniform Boundedness)

어떤 $r \in [0, \infty)$ 에 대하여, $\|(q_0, \dot{q}_0)\| \leq r$ 이면 $\|(q(t), \dot{q}(t))\| \leq d(r), \quad \forall t \in [t_0, \infty)$ 을 만족하는 양수 $d(r) < \infty$ 이 존재한다.

3) 평등궁극유계성 (Uniform Ultimate Boundedness)

어떤 $\bar{d} > d$ 와 $r \in [0, \infty)$ 에 대하여, $\|(q_0, \dot{q}_0)\| \leq r$ 이면 $\|(q(t), \dot{q}(t))\| \leq \bar{d}, \quad \forall t \geq t_0 + T(\bar{d}, r)$ 을 만족하는 유한시간 $T(\bar{d}, r) \in [0, \infty)$ 가 존재한다.

4) 평등 안정성 (Uniform Stability)

어떤 $\bar{d} \geq d$ 에 대하여, $\|(q_0, \dot{q}_0)\| \leq \delta(\bar{d})$ 이면 $\|(q(t), \dot{q}(t))\| \leq \bar{d}, \quad \forall t \geq t_0$ 을 만족하는 $\delta(\bar{d})$ 가 존재한다.

대략적으로 이 정의의 안정성을 로봇 시스템에 대한 점근 안정성의 느슨한 형태로 볼 수 있다. 즉, 실용적 안정성은 모든 상태벡터의 궤적이 발산하지 않고 유한 시간 내에 원점 주위의 볼 내로 들어와 머무는 것이다. 그리고, 본 논문에서 사용되는 벡터의 노름은 유클리디안 노름(Euclidean norm)이고, 행렬의 노름은 유클리디안 유도 노름(Euclidean induced norm)이다. 위의 정의를 만족하는 로봇 시스템에 대한 건설 제어기 설계가 선행 연구로서 수행되었고[8], 다음과 같다.

$$\tau(q, \dot{q}, \beta, t) = \hat{M}(q)(\ddot{q}_d - S\dot{e}) + \hat{C}(q, \dot{q})(\dot{q}_d - Se) + \hat{g}(q) + \hat{f}(q, \dot{q}) + p(q, \dot{q}, \beta, t) - K_a e - K_b \dot{e} \quad (3)$$

건설제어항 p 는 다음과 같이 설계된다.

$$p = \begin{cases} -\frac{\mu}{\|\mu\|} \rho & \text{if } \|\mu\| \geq \epsilon \\ -\frac{\mu}{\epsilon} \rho & \text{if } \|\mu\| < \epsilon \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu = (\dot{e} + Se)\rho(q, \dot{q}, \beta, t) \quad (5)$$

$$\rho(q, \dot{q}, \beta, t) \geq \|\Phi(q, \dot{q}, \sigma, t)\| \quad (6)$$

$$\Phi(q, \dot{q}, \sigma, t) = (\hat{M}(q) - M(q, \sigma))(\ddot{q}_d - S\dot{e}) + (\hat{C}(q, \dot{q}) - C(q, \dot{q}, \sigma))(\dot{q}_d - Se) + (\hat{g}(q) - g(q, \sigma)) + (\hat{f}(q, \dot{q}, t) - f(q, \dot{q}, \sigma, t)) \quad (7)$$

불확실 요소들은 함수 Φ 에 존재하며, 알 수 있는 함수 ρ 는 Φ 보다 크거나 같게 선정된다.

여기서, $e = q - q_d, \quad \dot{e} = \dot{q} - \dot{q}_d$

q_d : 원하는 경로 (desired trajectory)

$S = \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_m)$ 양의 상수 행렬

$K_a = \text{diag}(k_{a1}, k_{a2}, \dots, k_{an})$ 양의 상수 행렬

$K_b = \text{diag}(k_{b1}, k_{b2}, \dots, k_{bn})$ 양의 상수 행렬

ϵ : 설계 변수 β : 불확실성의 경계

IV. 적응건설제어기 및 안정성

(3)의 건설제어기는 불확실성의 경계(β)에 대한 정보를 요구한다. 그러나, 많은 경우에 대하여 불확실성의 경계를 알기는 어렵다. 그러므로, 본 논문에서는 불확실성의 경계를 추정하는 적응건설제어기를 설계한다. 불확실 부분에 대한 경계함수 ρ 는 다음의 가정을 만족시킨다고 가정한다.

가정1 : 어떤 $(q, \dot{q}, t) \in R^n \times R^n$ 에 대하여

$\rho(q, \dot{q}, \cdot, t) : R^s \rightarrow R_+$ 은 C^1 이고 오목하며(concave) 다음의 식이 성립한다[10].

$$\rho(q, \dot{q}, \beta^1, t) - \rho(q, \dot{q}, \beta^2, t) \leq \frac{\partial \rho}{\partial \beta}(q, \dot{q}, \beta^2, t)(\beta^1 - \beta^2) \text{ for all } \beta^1, \beta^2 \in R^s$$

β 에 대하여 다음의 적응제어 알고리즘이 제안된다.

$$\dot{\hat{\beta}}(t) = \begin{cases} \text{if } \|\mu\| \geq \epsilon \\ N \frac{\partial \rho^T}{\partial \beta}(q, \dot{q}, \hat{\beta}, t) \alpha - NL f(\hat{\beta}) \hat{\beta} \\ \text{if } \|\mu\| < \epsilon \\ N \frac{\partial (\rho^2)^T}{\partial \beta}(q, \dot{q}, \hat{\beta}, t) \alpha - NL f(\hat{\beta}) \hat{\beta} \end{cases} \quad (8)$$

$$\alpha(\dot{e}, e) = \begin{cases} 2\|\dot{e} + Se\| & \text{if } \|\mu\| \geq \epsilon \\ 2 \frac{\|\dot{e} + Se\|^2}{\epsilon} & \text{if } \|\mu\| < \epsilon \end{cases} \quad (9)$$

$$f(\hat{\beta}) = \begin{cases} 1 & \text{if } \|\hat{\beta}\| > 2\nu \\ \frac{\|\hat{\beta}\|}{\nu} - 1 & \text{if } \nu \leq \|\hat{\beta}\| \leq 2\nu \\ 0 & \text{if } \|\hat{\beta}\| < \nu \end{cases} \quad (10)$$

$N, L \in R^{s \times s}, \hat{\beta} \in R^s, N, L$ 은 양의 상수 행렬, $\nu > 0$ 이 때의 적응건설제어기는 다음과 같다.

$$\tau(q, \dot{q}, \hat{\beta}, t) = \hat{M}(q)(\dot{q}_d - S\dot{e}) + \hat{C}(q, \dot{q})(\dot{q}_d - S\dot{e}) + \hat{g}(q) + \hat{f}(q, \dot{q}) + p(q, \dot{q}, \hat{\beta}, t) - K_a e - K_b \dot{e} \quad (11)$$

정의 2 : 로봇에 대한 실용적 안정성 2

(11)의 제어입력 $\tau(q, \dot{q}, \hat{\beta}, t)$ 이 로봇 시스템(1)에 적용된 페루프 시스템은 다음과 같다.

$$M(q, \sigma)\ddot{q} + C(q, \dot{q}, \sigma)\dot{q} + g(q, \sigma) + f(q, \dot{q}, \sigma, t) = \tau(q, \dot{q}, \hat{\beta}, t) \quad (12)$$

$$q(t_0) = q_0, \dot{q}(t_0) = \dot{q}_0, \hat{\beta}(t_0) = \hat{\beta}_0$$

선행 연구로 증명된 안정한 건설제어기(3)과 가정1을 만족 하는 $P(q, \dot{q}, \beta, t)$ 를 고려한다. 만약 (8)에 주어진 $\hat{\beta}$ 을 가진 제어입력 $\tau(q, \dot{q}, \hat{\beta}, t)$ 이 시스템(1)에 적용된다면 페루프 시스템(12)이 다음의 성질을 만족시키는 상수 $\underline{x} > 0$ 가 존재한다.

1) 해의 존재성 (Existence of solution)

각 $(q_0, \dot{q}_0, \hat{\beta}_0, t_0)$ 에 대하여, 로봇 시스템 (1)의 해 $(q(\cdot), \dot{q}(\cdot), \hat{\beta}(\cdot)) : [t_0, t_1) \rightarrow R^n$ 이 존재한다.

2) 평등 유계성 (Uniform Boundedness)

어떤 $r_1, r_2 > 0$ 에 대하여, $\|\xi_0\| \leq r_1$ 와 $\|\hat{\beta}_0 - \beta\| \leq r_2$ 이면, $\|\xi(t)\| \leq d_1(r_1, r_2)$ 와 $\|\hat{\beta}(t) - \beta\| \leq d_2(r_1, r_2), \forall t \in [t_0, \infty)$ 을 만족하는 상수 $d_1(r_1, r_2), d_2(r_1, r_2) < \infty$ 가 존재한다.

3) 평등궁극유계성 (Uniform Ultimate Boundedness) 어떤 $\bar{r} \geq \underline{x}$ 와 $r > 0$ 에 대하여, $\|\xi_0\|, \|\hat{\beta}_0 - \beta\| \leq r$ 이면 $\|\xi(t)\|, \|\hat{\beta}(t) - \beta\| \leq \bar{r}, \forall t \geq t_0 + T(r, \bar{r})$ 을 만족하는 유한 시간 $T(r, \bar{r})$ 가 존재한다.

4) 평등 안정성 (Uniform Stability)

어떤 $\bar{r} \geq \underline{x}$ 에 대하여, $\|\xi_0\|, \|\hat{\beta}_0 - \beta\| \leq \delta(\bar{r})$ 이면 $\|\xi(t)\|, \|\hat{\beta}(t) - \beta\| \leq \bar{r}, \forall t \geq t_0$ 을 만족하는 상수 $\delta(\bar{r})$ 가 존재한다.

제안된 제어기에 대한 안정성 증명은 Corless 와 Leitmann[11]에 의해 증명된 방법을 이용하여 시스템에 대해 실용적 안정성을 가짐을 보인다. 즉, 리아프노프 후보 함수인 V에 대해서 시간에 대한 미분치가 원점을 중심으로 한 어느 불 외부에서는 항상 음임을 보여준다.

다음과 같이 리아프노프 후보함수를 선정한다.

$$V = (\dot{e} + Se)^T M(\dot{e} + Se) + e^T(K_a + SK_b)e + \frac{1}{2}(\hat{\beta} - \beta)^T N^{-1}(\hat{\beta} - \beta) \quad (12)$$

V에 대한 시간의 미분치는 다음과 같다.

$$\dot{V} = 2(\dot{e} + Se)^T M(\ddot{e} + S\dot{e}) + (\dot{e} + Se)^T \dot{M}(\dot{e} + Se) + 2e^T(K_a + SK_b)\dot{e} + (\hat{\beta} - \beta)^T N^{-1} \dot{\hat{\beta}} \quad (13)$$

로봇 운동방정식 (1)과 제어기 (11)을 사용하여 다음을 구할 수 있다.

$$M\ddot{e} = \tau - C\dot{q} - g - f - M\ddot{q}_d = (\hat{M} - M)\ddot{q}_d - \hat{M}S\dot{e} + (\hat{C} - C)(\dot{q}_d - S\dot{e}) - C(\dot{e} + Se) + (\hat{g} - g) + (\hat{f} - f) + p(q, \dot{q}, \hat{\beta}, t) - K_a e - K_b \dot{e} \quad (14)$$

위 (14)식을 \dot{V} 에 대입하고, $\hat{M} - 2C$ 가 교대대칭이라는 성질을 적용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{V} = 2(\dot{e} + Se)^T \{ (\hat{M} - M)(\ddot{q}_d - S\dot{e}) + (\hat{C} - C)(\dot{q}_d - S\dot{e}) + (\hat{g} - g) + (\hat{f} - f) + p(q, \dot{q}, \hat{\beta}, t) \} - 2e^T SK_a e - 2e^T K_b \dot{e} + (\hat{\beta} - \beta)^T N^{-1} \dot{\hat{\beta}} \quad (15)$$

(15)을 정리하여 편의상 다음과 같이 분류한다.

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dot{V}_3 \quad (16)$$

$$\dot{V}_1 = 2(\dot{e} + Se)^T \{ \Phi(q, \dot{q}, \sigma, t) + p(q, \dot{q}, \beta, t) \} - 2e^T SK_a e - 2e^T K_b \dot{e} \quad (17)$$

$$\dot{V}_2 = 2(\dot{e} + Se)^T (p(q, \dot{q}, \hat{\beta}, t) - p(q, \dot{q}, \beta, t)) \quad (18)$$

$$\dot{V}_3 = (\hat{\beta} - \beta)^T N^{-1} \dot{\hat{\beta}} \quad (19)$$

여기서 \dot{V}_1 은 선행 연구된 건설제어기에 의하여 실용적 안정성이 증명됨을 보였고, 그 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{if } \|\mu\| \geq \epsilon & \quad \dot{V}_1 \leq -R_1 \|\mu\|^2 \\ \text{if } \|\mu\| < \epsilon & \quad \dot{V}_1 \leq 2\epsilon - R_1 \|\mu\|^2 \end{aligned} \quad (20)$$

$$x = [e, \dot{e}]^T, R_1 = \min\{2s, k_{ai}, 2k_{bi}\}$$

여기서 $\|\mu\|$ 의 범위에 따라 \dot{V}_2 은 다음과 같이 해석될 수 있다.

첫 번째로, $\|\mu\| \geq \epsilon$ 인 경우에 대하여 (4)를 적용시켜 정리하면 다음과 같이 된다. 이때 $\alpha = 2\|\dot{e} + Se\| > 0$ 로 선정하고, 함수 ρ 가 오목하다면, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \alpha(\rho(q, \dot{q}, \beta, t) - \rho(q, \dot{q}, \hat{\beta}, t)) \\ &\leq \alpha \frac{\partial \rho}{\partial \beta}(q, \dot{q}, \hat{\beta}, t)(\beta - \hat{\beta}) \\ &\leq -\alpha(\hat{\beta} - \beta)^T \frac{\partial \rho}{\partial \beta}(q, \dot{q}, \hat{\beta}, t) \end{aligned} \quad (21)$$

두 번째로, $\|\mu\| < \epsilon$ 인 경우에 대하여 (4)를 적용시켜 정리하면 다음과 같이 된다.

이때 $\alpha = 2\|\dot{e} + Se\|^2 / \epsilon > 0$ 로 선정하고, 함수 ρ 가 오목하면 ρ^2 또한 오목하다. ($\because \rho \geq 0$)

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \alpha(\rho^2(q, \dot{q}, \beta, t) - \rho^2(q, \dot{q}, \hat{\beta}, t)) \\ &\leq \alpha \frac{\partial \rho^2}{\partial \beta}(q, \dot{q}, \hat{\beta}, t)(\beta - \hat{\beta}) \\ &\leq -\alpha(\hat{\beta} - \beta)^T \frac{\partial(\rho^2)}{\partial \beta}(q, \dot{q}, \hat{\beta}, t) \end{aligned} \quad (22)$$

위의 (19), (20), (21)과 (22)를 종합하여 전체 V에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\text{if } \|\mu\| \geq \varepsilon \quad \dot{V} \leq -R_1\|\dot{x}\|^2 + (\hat{\beta} - \beta)^T N^{-1} \hat{\beta} - \alpha(\hat{\beta} - \beta)^T \frac{\partial \rho^T}{\partial \beta}(q, \dot{q}, \hat{\beta}, t) \quad (23)$$

$$\text{if } \|\mu\| < \varepsilon \quad \dot{V} \leq 2\varepsilon - R_1\|\dot{x}\|^2 + (\hat{\beta} - \beta)^T N^{-1} \hat{\beta} - \alpha(\hat{\beta} - \beta)^T \frac{\partial(\rho^2)^T}{\partial \beta}(q, \dot{q}, \hat{\beta}, t) \quad (24)$$

위의 (23), (24)식과 (8)식에 의하여 $\|\mu\|$ 의 범위에 따라 \dot{V} 은 다음과 같이 정리된다.

① : $\|\mu\| \geq \varepsilon$ 인 경우

$$\dot{V} \leq -R_1\|\dot{x}\|^2 - (\hat{\beta} - \beta)^T L A(\hat{\beta}) \hat{\beta} \quad (25)$$

$\|\mu\| \geq \varepsilon$ 인 (25)식은 (10)식에 의하여 다시 $\|\hat{\beta}\|$ 의 범위에 따라 다음과 같이 세 가지로 분류된다.

①-1 : $\|\hat{\beta}\| < \nu$ 인 경우 \dot{V} 은 다음과 같이 된다.

$$\dot{V} \leq -R_1\|\dot{x}\|^2 \quad (26)$$

①-2 : $\nu \leq \|\hat{\beta}\| \leq 2\nu$ 인 경우 $0 \leq A(\hat{\beta}) \leq 1$ 이 되어 \dot{V} 은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -R_1\|\dot{x}\|^2 \\ &\quad - (\hat{\beta} - \beta)^T L A(\hat{\beta}) (\hat{\beta} - \beta) - (\hat{\beta} - \beta)^T L A(\hat{\beta}) \beta \\ &\leq -R_1\|\dot{x}\|^2 + \lambda_M(L) \bar{\beta} \|\hat{\beta} - \beta\| \end{aligned} \quad (27)$$

①-3 : $2\nu < \|\hat{\beta}\|$ 인 경우 \dot{V} 은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -R_1\|\dot{x}\|^2 \\ &\quad - (\hat{\beta} - \beta)^T L (\hat{\beta} - \beta) - (\hat{\beta} - \beta)^T L \beta \\ &\leq -R_1\|\dot{x}\|^2 \\ &\quad - \lambda_m(L) \|\hat{\beta} - \beta\|^2 + \lambda_M(L) \bar{\beta} \|\hat{\beta} - \beta\| \end{aligned} \quad (28)$$

여기서 $\bar{\beta}$ 는 β 의 최대값이고 $\xi = [x^T (\hat{\beta} - \beta)^T]^T$, $\gamma_1 = \min\{R_1, \lambda_m(L)\}$ 라 정의하면, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -R_1\|\dot{x}\|^2 - \lambda_m(L) \|\hat{\beta} - \beta\|^2 \\ &\quad + \lambda_M(L) \bar{\beta} \|\hat{\beta} - \beta\| + 0\|\dot{x}\| \\ &\leq -\gamma_1\|\dot{x}\|^2 + \lambda_M(L) \bar{\beta} \|\hat{\beta} - \beta\| \end{aligned} \quad (29)$$

결론적으로 $\|\hat{\xi}\| > \frac{\lambda_M(L) \bar{\beta}}{\gamma_1}$ 가 되면 $\dot{V} < 0$ 이 되어, 제안된 제어기에 의해 실용적 안정성을 가진다.

② : $\|\mu\| < \varepsilon$ 인 경우

$$\dot{V} \leq 2\varepsilon - R_1\|\dot{x}\|^2 - (\hat{\beta} - \beta)^T L A(\hat{\beta}) \hat{\beta} \quad (30)$$

$\|\mu\| < \varepsilon$ 인 (30)식은 (10)식에 의하여 다시 $\|\hat{\beta}\|$ 의 범위에 따라 다음과 같이 세 가지로 분류된다.

-1 : $\|\hat{\beta}\| < \nu$ 인 경우 \dot{V} 은 다음과 같이 된다.

$$\dot{V} \leq 2\varepsilon - R_1\|\dot{x}\|^2 \quad (31)$$

②-2 : $\nu \leq \|\hat{\beta}\| \leq 2\nu$ 인 경우 $0 \leq A(\hat{\beta}) \leq 1$ 이 되어 \dot{V} 은 다음과 같이 된다.

$$\dot{V} \leq 2\varepsilon - R_1\|\dot{x}\|^2 + \lambda_M(L) \bar{\beta} \|\hat{\beta} - \beta\| \quad (32)$$

②-3 : $2\nu < \|\hat{\beta}\|$ 인 경우 \dot{V} 은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq 2\varepsilon - R_1\|\dot{x}\|^2 \\ &\quad - \lambda_m(L) \|\hat{\beta} - \beta\|^2 + \lambda_M(L) \bar{\beta} \|\hat{\beta} - \beta\| \end{aligned} \quad (33)$$

위에서 정의한 식을 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{V} \leq -\gamma_1\|\dot{x}\|^2 + \lambda_M(L) \bar{\beta} \|\hat{\xi}\| + 2\varepsilon \quad (34)$$

결론적으로 $\|\hat{\xi}\| > \frac{\lambda_M(L) \bar{\beta} + \sqrt{(\lambda_M(L) \bar{\beta})^2 + 8\gamma_1\varepsilon}}{2\gamma_1}$ 가 되면

$\dot{V} < 0$ 이 되어, 제안된 제어기에 의하여 시스템은 실용적 안정성을 가진다.

V. 실험

제안된 적응견실제어기의 효용성을 보이기 위해서 SCARA 타입의 4축 로봇인 삼성로봇(SM5)을 사용하고, 모션 컨트롤러 보드는 TMS320C44 DSP가 내장된 Innovative Integration사의 M44 보드를 사용하여 실험하였다[13]. 실험에서는 로봇의 관성에 대한 불확실성의 경계를 추정한다.

바람직한 경로로서 1축은 $1 - e^{-2t}$, 2축 $1 - e^{-2t}$, 3축 $0.1 - 0.1e^{-2t}$ 로서 시변 경로를 사용하고, 4축은 상수 경로로서 1 rad를 선정한다.

링크 질량에 관한 공칭 (nominal) 값은 $m_1 = 10.7$, $m_2 = 9.6$, $m_3 = 1$, $m_4 = 0.5$ 로 준다.

이때, 시스템의 응답 곡선은 다음과 같다.

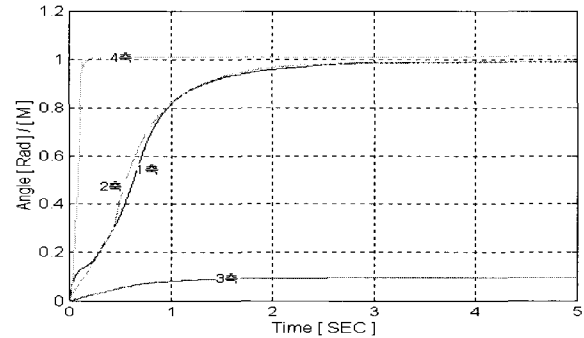


그림 1. 응답 궤적.
Fig. 1. Trajectory.

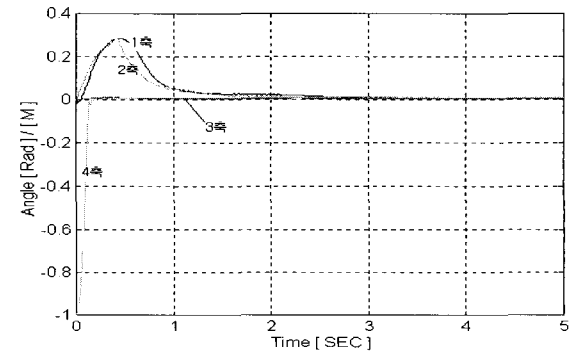


그림 2. 궤적 오차.
Fig. 2. Trajectory Error.

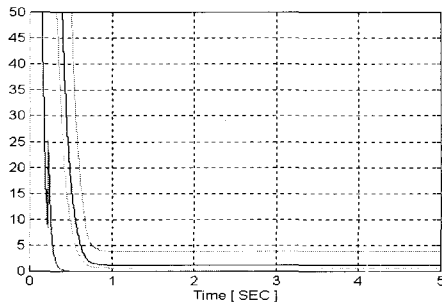


그림 3. 경계 추정치.

Fig. 3. Bound Estimation.

$$\begin{aligned}
 K_a &= \text{diag}\{100, 100, 100, 40\} \\
 K_b &= \text{diag}\{20, 20, 20, 5\} \\
 S &= \text{diag}\{0.5, 0.5, 0.5, 0.5\} \\
 N &= \text{diag}\{1, 1, 0.1, 0.1\} \\
 L &= \text{diag}\{10, 10, 30, 10\} \\
 \epsilon &= 100, \quad \nu = 4
 \end{aligned}$$

위의 그림으로부터 불확실성이 존재하고 불확실성의 가능한 경계치를 알지 못하는 경우에도 제안된 제어기에 의하여 시스템 응답이 우수함을 확인할 수 있으며, 가능한 경계 추정치는 bound됨을 알 수 있다.

VI. 결론

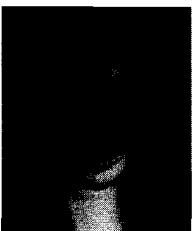
이 논문은 선행 연구인 알고 있는 불확실성의 가능한 경계치 정보를 이용하는 견실제어기[8]에 대하여 적응 알고리즘을 도입하여 가능한 경계치를 추정하고, 견실제어기법을 통하여 그 추정 경계를 이용하였다. 즉, 불확실성의 가능한 경계치의 정보가 유용하지 않은 경우에 대하여 적응견실제어기를 설계하고 안정성을 보였다. 또한 실시간 제어를 위해 DSP를 통하여 제안된 제어기의 효용성을 확인하였다. 제안된 제어기는 관성의 역치를 구하는 요소를 제거하여 제어기 수행시 시간의 소모성을 줄일 수 있을 것이며, 불확실성의 정확한 지식이나 불확실성의 경계치에 대한 정보를 요구하지 않는다. 앞으로의 과제는 견실 하이브리드 위치/힘 제어기(robust hybrid position/force control)[12]에 대하여 제안된 적응 알고리즘을 도입하는 것은 해 불 만한 과제라고 생각된다.

참고문헌

[1] S. S. Ge, "Advanced control techniques of roboticmanipulator,"

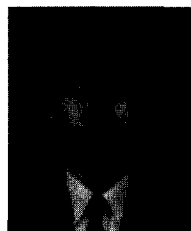
Proc. Amer. Control Conf., pp. 2185-2199, June 1998.

- [2] Y. H. Chen, G. Leitmann, and J. S. Chen, "Robust control for rigid serial manipulators; a general setting," *Proc. Amer. Control Conf. Philadelphia, Pennsylvania*, pp. 912-916, June 1998.
- [3] S. H. Lee, and T. G. Kim, "Robust control of a revolute joint robot," *Conf. of KSME*, vol. 1, no. 2, pp. 265-270, 2001.
- [4] Y. H. Chen., "Robust computed torque schemes for mechanical manipulators : non-adaptive versus adaptive," *ASME J. Dynam. Syst. Meas. Contr.*, vol. 113, pp. 324-327., 1991.
- [5] Y. H. Chen and S. Pandey, "Uncertainty bounded - based hybrid control for robot manipulators," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 6, no. 3, pp. 303-311, 1990.
- [6] E. Reithmeier and G. Leitmann, "Tracking and force control for a class of robotic manipulators," *Dynamics and Control*, vol. 1, pp. 133-150, 1991.
- [7] R. Shoureshi, M. Corless, and M. D. Roesler, "Control of industrial manipulators with bounded uncertainties," *ASME J. Dynam. Syst. Meas. Contr.*, vol. 109, pp. 53-58, 1987.
- [8] 한명철, "Robust control design for robots with uncertainty and joint-flexibility," *KSPE*, vol. 12, no. 5, pp. 117-125, May, 1995.
- [9] M. C. Han and Y. H. Chen, "Polynomial robust control design for uncertain systems," *Automatica*, vol. 28, no. 4, pp. 809-814, 1992
- [10] Y. H. Chen, "Modified adaptive robust control system design," *Int. J. Control*, vol. 49, no. 6, pp. 1869-1882, 1989.
- [11] M. Corless and G. Leitmann, "Continuous state feedback guaranteeing uniform ultimate boundedness for uncertain dynamic systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-26, no. 5, October, 1981.
- [12] 한명철, "Robust hybrid control design for uncertain robot mainpulators," *KACC*, pp. 418-421, 1995.
- [13] 하인철, 한명철, "Implementation of robust control for robot manipulators with time varying uncertainty," *KACC*, pp. 537-540, 1998.



하 인 철

1975년 8월 24일생, 1998년 부산대 제어기계공학과 졸업. 동대학원 석사(2000), 2002년 동대학원 박사과정 수료, 2002년~현재 고등기술연구원 로봇/생산기술센터 연구원, 관심분야는 로봇 기구학 및 제어, 견실 제어, 적응 제어, 비선형 제어, 초정밀 제어.



한 명 철

1960년 4월 14일생, 1983년 서울대학교 기계설계학과 졸업. 1985년 동대학원 졸업. 1992년 Georgia Institute of Technology, U.S.A. 졸업(공학박사). 1994년~현재 부산대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 견실제어, 비선형제어, 로봇제어, 제어이론, 엔진/자동변속기통합제어, 차량시뮬레이터, 수중발사시스템제어.