

## 불확실성을 포함한 로봇의 확장된 견실 하이브리드 제어

### An Expanded Robust Hybrid Control for Uncertain Robot Manipulators

김재홍, 하인철, 한명철  
(Jae-Hong Kim, In-Chul Ha, and Myung-Chul Han)

**Abstract :** When robot manipulators are mathematically modeled, uncertainties may not be avoided. The uncertain factors come from imperfect knowledge of system parameters, payload change, friction, external disturbance and etc. In this work, we proposed a class of robust hybrid control of manipulators. We propose a class of expanded robust hybrid control with the separated bound function and the simulation results are provided to show the effectiveness of the algorithm.

**Keywords :** robot manipulators, bound function, robust control, hybrid control

#### I. 서론

최근 산업용 로봇의 수요가 점점 늘어남에 따라 로봇 매니퓰레이터(manipulator)의 제어에 관한 관심이 높아지고 있다. 산업로봇이 투입되는 작업을 크게 두 개의 부류로 나눌 수 있다. 첫째는 로봇의 말단장치(end-effector)와 주위 환경(environment)사이에서 접촉이 일어나지 않는 비접촉 작업이고, 둘째는 조립, 가공 등 로봇과 주위환경 사이에 접촉이 발생하는 접촉 작업이다. 이러한 작업에서는 말단장치(end-effector)와 물체, 주위환경에 대한 접촉힘을 적절하게 제어해야 할 필요가 있다. 이를 해결하기 위한 노력으로 Raibert and Craig[1], Wedel and Saridis[2]에 의해 하이브리드 제어(hybrid control)가 제안되었다.

산업용 로봇 매니퓰레이터(manipulator)의 제어 알고리즘의 개발에 있어 장애 중의 하나가 실제 로봇 매니퓰레이터와 주위환경의 정확한 모델링의 어려움이다. 시스템 동역학은 부정확한 파라미터들의 값, 마찰력, 부하(payload)의 변화, 외란 등 여러 종류의 불확실성(uncertainty)을 포함하게 된다. 이러한 불확실 요소는 시스템의 성능을 저하시키고, 안정성에도 영향을 줄 수 있다. 그러므로, 제어기 설계시 이러한 불확실 요소들을 고려해야 하고, 이러한 불확실성을 고려한 제어기 설계는 Chen[3], Chen and Pandey[4], Reithmeier and Leitmann[5] 등에 의해 제시되었다. 이들에 의해 불확실 요소들의 가능한 경계치를 제어기 설계에 이용하여 견실함을 설계함으로써 불확실성을 제거하는 견실 제어(robust control) 알고리즘이 제시되었다.

본 논문에서는 선행연구[6]에서 제안한 견실 하이브리드 제어기(robust hybrid controller)를 수정 보완하여 각 축의 불확실성이 다른 축에 영향을 주지 않고, 오차와 오차의 미분치가 0으로 수렴할 수 있는 확장된 견실 하이브리드 제어기를 제안한다. 리아프노프(Lyapunov) 안정성 분석을 통하여

전체 시스템의 안정성을 입증하고, SCARA 형태의 4축 로봇에 대하여 시뮬레이션(Simulation) 결과를 보일 것이다.

#### II. 시스템 운동 방정식

일반적으로  $m$ 관절 로봇 매니퓰레이터의 운동방정식은 관절좌표계(joint coordinate)에서 다음과 같다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + f(q, \dot{q}, t) = \tau(t) - J(q)^T R \tag{1}$$

$q$  :  $m \times 1$  관절 위치 벡터

$\tau$  :  $m \times 1$  토크 벡터

$M(q)$  :  $m \times m$  관성 행렬

$C(q, \dot{q})q$  :  $m \times 1$  원심력 및 코리올리시 힘 벡터

$g(q)$  :  $m \times 1$  중력 벡터

$f(q, \dot{q}, t)$  :  $m \times 1$  불확실 토크 벡터

$R$  :  $m \times 1$  반발력 벡터

여기서,  $J(q)$ 는 관절좌표계와 직교좌표계 사이의 자코비안(Jacobian)이다.

$$\dot{x} = J(q)\dot{q}, \quad \dot{q} = J(q)^{-1}(x - J(q)\dot{q}) \tag{2}$$

여기서,  $x$ 는  $n \times 1$  직교좌표계 벡터이다.

(2)를 (1)의 관절좌표계 운동방정식에 대입하면 (3)과 같은 직교좌표계 운동방정식이 된다.

$$\begin{aligned} M_x(q)\ddot{x} + C_x(q, \dot{q})\dot{x} + g_x(q) + f_x(q, \dot{q}, t) &= \tau_x(t) - R \\ M_x(q) &= J(q)^{-T}M(q)J(q)^{-1} \\ C_x(q, \dot{q}) &= J(q)^{-T}(C(q, \dot{q}) - M(q)J(q)^{-1}\dot{J}(q)) \cdot J(q)^{-1} \end{aligned} \tag{3}$$

$$g_x(q) = J(q)^{-T}g(q)$$

$$f_x(q, \dot{q}, t) = J(q)^{-T}f(q, \dot{q}, t)$$

$$\tau_x(t) = J(q)^{-T}\tau(t)$$

(3)에서  $\dot{M}_x(q) - 2C_x(q, \dot{q})$ 가 왜대칭(skew symmetric)이 되는  $C_x(q, \dot{q})$ 를 선정할 수 있다[6].

접수일자 : 2001. 2. 15., 수정완료 : 2001. 7. 20.  
김재홍, 하인철 : 부산대학교 지능기계공학과(blofs@orgio.net/dolgon@hyowon.pusan.ac.kr)  
한명철 : 부산대학교 기계공학부, 기계기술훈원연구소(mchan@hyowon.pusan.ac.kr)  
※ 본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(기계공학ME97-D-06)에 의하여 연구되었습니다.

**III. 제어기 설계 및 안정성 분석**

제안된 견실 하이브리드 제어기의  $\widehat{M}_x, \widehat{C}_x, \widehat{g}_x, \widehat{f}_x, \widehat{R}$  등은 불확실성을 포함하는  $M_x, C_x, g_x, f_x, R$  등의 추측값 또는 대표값이다.

힘과 위치를 동시에 제어하는 하이브리드 제어기의 경우 직교 좌표계에서는 하나의 축에 힘제어와 위치제어 중 하나만이 고려된다. 여기서 복잡성을 피하기 위해서  $n$ 개의 직교 좌표축에서 처음  $k$ 개의 좌표축은 위치제어 대상이며 나머지  $n-k$ 개의 좌표축은 힘제어 대상이라고 가정한다.

위치와 힘을 동시에 다루기 위해 새로운 변수  $r$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} r_i &= x_i, & i &= 1, \dots, k \\ r_i &= k_{ei}(x_i - x_{di}), & i &= k+1, \dots, n \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $k_{ei}$ 는  $i$ 축 변형의 강성(equivalent stiffness)이고,  $x_{di}$ 는 로봇의 말단장치가 주위 환경에 접촉되기 직전의 위치를 나타낸다. 복잡성을 피하기 위해 여기서는 로봇과 주위환경이 접촉한 지점에 좌표계의 원점을 둔다. 즉,  $x_0 = 0$ .

사용상의 편의를 위하여 다음을 정의한다.

$$\begin{aligned} K_e &= \text{diag}\{k_{e1}, k_{e2}, \dots, k_{en}\} \\ k_{ei} &= 1 \text{ for } i = 1, 2, \dots, k \\ r &= [r_1 \ r_2 \ \dots \ r_n]^T = K_e x \\ e &= [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_n]^T = r - r_d \\ \dot{e} &= [\dot{e}_1 \ \dot{e}_2 \ \dots \ \dot{e}_n]^T = \dot{r} - \dot{r}_d \end{aligned} \quad (5)$$

$r_d$ 는 원하는 위치 및 힘의 궤도이다.

**1. 기존 제어기**

본 논문에서는 기존 제어기의 문제점을 분석하고 이를 보완하는 방법을 제시한다. [6]에서 제안한 견실 하이브리드 제어기는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_x &= \widehat{M}_x K_e^{-1} (\ddot{r}_d - S\dot{e}) + \widehat{C}_x K_e^{-1} (\dot{r}_d - Se) \\ &+ \widehat{g}_x + \widehat{f}_x + \widehat{R} + K_b \dot{e} - K_a K_e^{-1} e \\ &- K_b K_e^{-1} \dot{e} \end{aligned} \quad (6)$$

(6)에서 견실항  $p$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \Phi(x, \dot{x}, t) &= K_e^{-1} [(\widehat{M}_x - M_x) K_e^{-1} (\ddot{r}_d - S\dot{e}) \\ &+ (\widehat{C}_x - C_x) K_e^{-1} (\dot{r}_d - Se) \\ &+ \widehat{g}_x - g_x + \widehat{f}_x - f_x + \widehat{R} - R] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\rho(x, \dot{x}, t) \geq \|\Phi(x, \dot{x}, t)\| \quad (8)$$

$$\mu_i = (\dot{e}_i + s_i e_i) \rho(x, \dot{x}, t) \quad (9)$$

$$p = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n]^T \quad (10)$$

$$p_i = \begin{cases} -\frac{\mu_i}{\|\mu_i\|} \rho & \text{if } \|\mu_i\| \geq \varepsilon \\ -\frac{\mu_i}{\varepsilon} \rho & \text{if } \|\mu_i\| < \varepsilon \end{cases} \quad (11)$$

견실 하이브리드 제어기 (6)에 의해 시스템은 실용적 안정성(practical stability)을 갖는다[6].

제시된 기존 제어기에서 다음과 같은 문제점이 있음을 알 수 있다.

첫째, (8)에서 각 축의 불확실성은 모두 하나의 경계함수  $\rho(x, \dot{x}, t)$ 로 고려되고, 이 값이 (11)의 각 축의 견실항에 공통적으로 사용된다. 이 경우, 한 축의 불확실성이 크게 되면 다른 모든 축의 견실항  $p_i$ 가 커지게 되어 필요 없는 과도 입력이 발생한다.

둘째, (11)에서  $\varepsilon$ 을 공통된 하나의 값을 사용하는 것을 알 수 있다. 이  $\varepsilon$ 은  $e, \dot{e}$ 가 머무르는 불의 크기를 결정하는 중요한 요소로서, 이  $\varepsilon$ 이 작아지면 불의 크기가 작아져서 성능이 좋아지지만 너무 작게 되면 채터링(chattering)이 발생하는 단점이 발생한다. 이러한  $\varepsilon$ 을 하나의 값으로만 사용하므로, 각 축의 최대 성능을 발휘할 수 있는  $\varepsilon$  중에 최대값을 최종적인  $\varepsilon$ 으로 결정해야만 된다. 즉, 어느 한 축이 사용할 수 있는 최소  $\varepsilon_i$ 가 결정되면 나머지 축은 더 작은  $\varepsilon_j$ 에서 더 좋은 성능을 발휘할 수 있더라도 위의 결정된  $\varepsilon_i$ 보다 더 작은  $\varepsilon$ 을 사용할 수는 없다.

셋째,  $e, \dot{e}$ 이 어느 일정한 불 안에 머무르는 것은 0으로 수렴하지는 않는다. 이는 어느 정도의 성능은 보장하지만, 오차가 0이 되는 정확성을 보장할 수 없음을 의미한다.

**2. 제안된 제어기**

위의 제시된 기존 제어기의 문제점들을 해결하는 견실 하이브리드 제어기를 다음과 같이 제안한다.

$$\begin{aligned} \tau_x &= \widehat{M}_x K_e^{-1} (\ddot{r}_d - S\dot{e}) + \widehat{C}_x K_e^{-1} (\dot{r}_d - Se) \\ &+ \widehat{g}_x + \widehat{f}_x + \widehat{R} + p - K_a K_e^{-1} e \\ &- K_b K_e^{-1} \dot{e} \end{aligned} \quad (12)$$

(12)에서 견실항  $p$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \Phi(x, \dot{x}, t) &= (\widehat{M}_x - M_x) K_e^{-1} (\ddot{r}_d - S\dot{e}) \\ &+ (\widehat{C}_x - C_x) K_e^{-1} (\dot{r}_d - Se) \\ &+ \widehat{g}_x - g_x + \widehat{f}_x - f_x + \widehat{R} - R \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \rho_1(x, \dot{x}, t) \geq |\phi_1(x, \dot{x}, t)| \\ \rho_2(x, \dot{x}, t) \geq |\phi_2(x, \dot{x}, t)| \\ \vdots \\ \rho_n(x, \dot{x}, t) \geq |\phi_n(x, \dot{x}, t)| \end{cases} \quad (14)$$

$$\mu_i = (a + bt)(\dot{e}_i + s_i e_i) \rho_i(x, \dot{x}, t) \quad (15)$$

$$p = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n]^T \quad (16)$$

$$p_i = \begin{cases} -\frac{\mu_i}{\|\mu_i\|} \rho_i, & \text{if } \|\mu_i\| \geq \varepsilon_i \\ -\frac{\mu_i}{\varepsilon_i} \rho_i, & \text{if } \|\mu_i\| < \varepsilon_i \end{cases} \quad (17)$$

(14)와 (17)에서 각 축별로 분리한  $\rho_i$ 와  $\varepsilon_i$ 을 사용하여 기존 제어기의 첫째, 둘째 문제를 해결하였으며, (15)에서

(a + bt)를 사용하여 셋째 문제를 해결하였다.

안정성 분석 : 다음과 같이 리아프노프 함수 후보를 선정한다.

$$V(\bar{e}, t) = (\dot{e} + Se)^T K_e^{-1} M_x K_e^{-1} (\dot{e} + Se) + e^T K_e^{-1} (K_a + SK_b) K_e^{-1} e \quad (18)$$

$$\bar{e} = [e^T \ \dot{e}^T]^T = [e_1 \ \dots \ e_n \ \dot{e}_1 \ \dots \ \dot{e}_n]^T$$

(18)은 다음 부등식을 만족한다[7].

$$\varphi_1 \|\bar{e}\|^2 \leq V(\bar{e}, t) \leq \varphi_2 \|\bar{e}\|^2 \quad (19)$$

$\varphi_1, \varphi_2$  : 양의 상수

다음은 리아프노프 함수 후보인  $V(\bar{e}, t)$ 의 시간에 대한 미분치가 원점을 중심으로 어떤 볼의 외부에서는 항상 음임을 보여준다.

시스템의 임의의 궤도를 추종하는  $V$ 에 대한 시간의 미분치는 아래와 같다.

$$\dot{V}(\bar{e}, t) = 2(\dot{e} + Se)^T K_e^{-1} M_x K_e^{-1} (\ddot{e} + S\dot{e}) + (\dot{e} + Se)^T K_e^{-1} \dot{M}_x K_e^{-1} (\dot{e} + Se) + 2e^T K_e^{-1} (K_a + SK_b) K_e^{-1} \dot{e} \quad (20)$$

(3)과 식 (12)로부터

$$M_x \dot{x} = M_x K_e^{-1} \ddot{r} = \tau_x - C_x \dot{x} - g_x - f_x - R = \hat{M}_x K_e^{-1} (\ddot{r}_d - S\dot{e}) + \hat{C}_x K_e^{-1} (\dot{r}_d - Se) - C_x K_e^{-1} r + (\hat{g}_x - g_x) + (\hat{f}_x - f_x) + (\hat{R} - R) + p - K_a K_e^{-1} e - K_b K_e^{-1} \dot{e} \quad (21)$$

(21)을 적절히 변형시키면

$$M_x K_e^{-1} \dot{e} = (\hat{M}_x - M_x) K_e^{-1} (\ddot{r}_d - S\dot{e}) - \hat{M}_x K_e^{-1} S\dot{e} + (\hat{C}_x - C_x) K_e^{-1} (\dot{r}_d - Se) - C_x K_e^{-1} (\dot{e} + Se) + (\hat{g}_x - g_x) + (\hat{f}_x - f_x) + (\hat{R} - R) + K_e p - K_a K_e^{-1} e - K_b K_e^{-1} \dot{e} \quad (22)$$

(22)를 (20)에 대입하면

$$\begin{aligned} \dot{V}(\bar{e}, t) &= 2(\dot{e} + Se)^T K_e^{-1} [(\hat{M}_x - M_x) K_e^{-1} \ddot{r}_d - (\hat{M}_x - M_x) K_e^{-1} S\dot{e} + (\hat{C}_x - C_x) K_e^{-1} (\dot{r}_d - Se) + (\hat{g}_x - g_x) + (\hat{f}_x - f_x) + (\hat{R} - R) - C_x K_e^{-1} (\dot{e} + Se) + p - K_a K_e^{-1} e - K_b K_e^{-1} \dot{e}] \\ &+ (\dot{e} + Se)^T K_e^{-1} \dot{M}_x K_e^{-1} (\dot{e} + Se) + 2e^T K_e^{-1} (K_a + SK_b) K_e^{-1} \dot{e} \\ &= 2(\dot{e} + Se)^T K_e^{-1} (\Phi + p) + (\dot{e} + Se)^T K_e^{-1} (\dot{M}_x - 2C_x) \cdot K_e^{-1} (\dot{e} + Se) - 2e^T K_e^{-1} SK_a K_e^{-1} e - 2e^T K_e^{-1} K_b K_e^{-1} \dot{e} \end{aligned} \quad (23)$$

$\dot{M}_x - 2C_x$ 가 왜대칭이므로

$$\dot{V}(\bar{e}, t) = 2(\dot{e} + Se)^T K_e^{-1} (\Phi + p) - 2e^T K_e^{-1} SK_a K_e^{-1} e - 2e^T K_e^{-1} K_b K_e^{-1} \dot{e} \quad (24)$$

일반성을 잃지 않고 주어진 상태변수에 의해 다음을 가정할 수 있다.

$$\begin{aligned} |\mu_i| &< \varepsilon_i, & i = 1, 2, \dots, l \\ |\mu_i| &\geq \varepsilon_i, & i = l+1, l+2, \dots, n \end{aligned} \quad (25)$$

(24)에서

$$\begin{aligned} \dot{V}(\bar{e}, t) &= 2 \sum_{i=1}^l (\dot{e}_i + s_i e_i) \phi_i / k_{ei} + \sum_{i=1}^l (\dot{e}_i + s_i e_i) p_i / k_{ei} - \sum_{i=1}^l (2s_i k_{ai} e_i^2 / k_{ei}^2 + 2k_{bi} \dot{e}_i^2 / k_{ei}^2) \\ &\leq 2 \sum_{i=1}^l |\dot{e}_i + s_i e_i| \rho_i / k_{ei} - \sum_{i=1}^l \frac{2}{\varepsilon_i} (a + bt) |\dot{e}_i + s_i e_i|^2 \rho_i^2 / k_{ei} - \sum_{i=l+1}^n 2|\dot{e}_i + s_i e_i| \rho_i / k_{ei} - \sum_{i=1}^l (2s_i k_{ai} e_i^2 / k_{ei}^2 + 2k_{bi} \dot{e}_i^2 / k_{ei}^2) \\ &\leq 2 \sum_{i=1}^l (|\dot{e}_i + s_i e_i| \rho_i - \frac{(a + bt)}{\varepsilon_i} |\dot{e}_i + s_i e_i|^2 \rho_i^2) / k_{ei} - \sum_{i=l+1}^n k_{0i} (e_i^2 + \dot{e}_i^2) \\ &\leq \sum_{i=1}^l \frac{\varepsilon_i}{2k_{ai}(a + bt)} - k_{0l} \|\bar{e}\|^2 \end{aligned} \quad (26)$$

여기서,

$$k_{0i} \equiv \min\{2s_i k_{ai} / k_{ei}^2, 2k_{bi} / k_{ei}^2\},$$

$$k_0 \equiv \min\{k_{01}, k_{02}, \dots, k_{0n}\} \text{이다.}$$

$$\gamma \equiv \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l \frac{\varepsilon_i}{2k_{ai}(a + bt)}}{k_0}} \text{로 두면, } \|\bar{e}\| > \gamma \text{ 일 때, } \dot{V}(\bar{e}, t) < 0$$

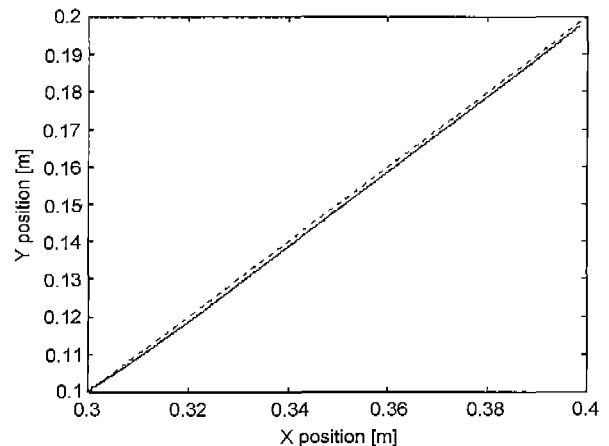


그림 1. 기존 제어기의 위치 궤적.

Fig. 1. Position trajectory of conventional controller ( $\varepsilon = 1000000$ ).

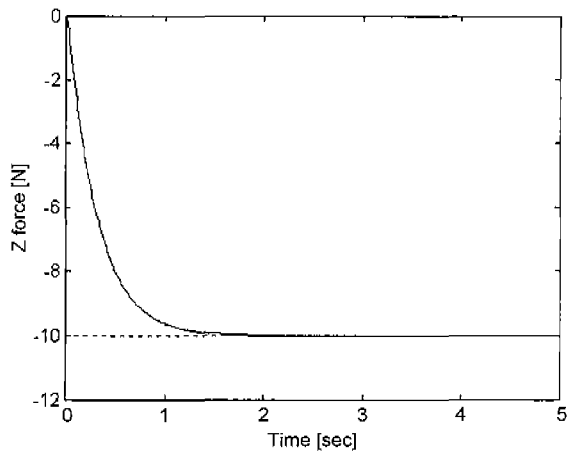


그림 2. 기존 제어기의 힘 궤적.  
Fig. 2. Force trajectory of conventional controller( $\epsilon=1000000$ ).

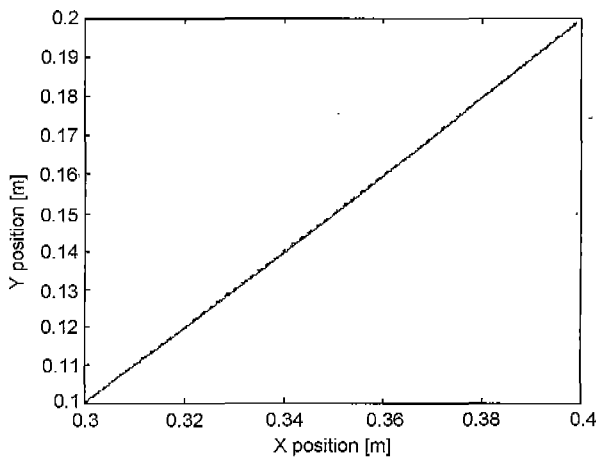


그림 3. 제안된 제어기의 위치 궤적.  
Fig. 3. Position trajectory of proposed controller( $\epsilon_1=0.01$ ,  $\epsilon_2=0.01$ ).

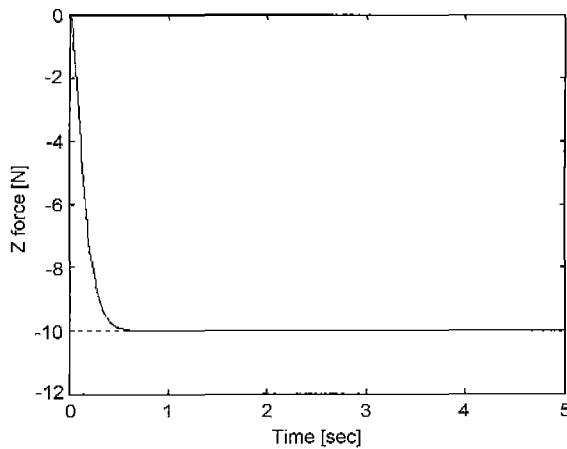


그림 4. 제안된 제어기의 힘 궤적.  
Fig. 4. Force trajectory of proposed controller( $\epsilon_3=10$ ).

이다.

즉,  $e$ 와  $\dot{e}$ 가 반지름  $\gamma$ 인 볼 안에 존재한다.  $t \rightarrow \infty$ 이면,  $\gamma \rightarrow 0$ 이므로,  $e$ 와  $\dot{e}$ 가 0으로 수렴하게 된다.

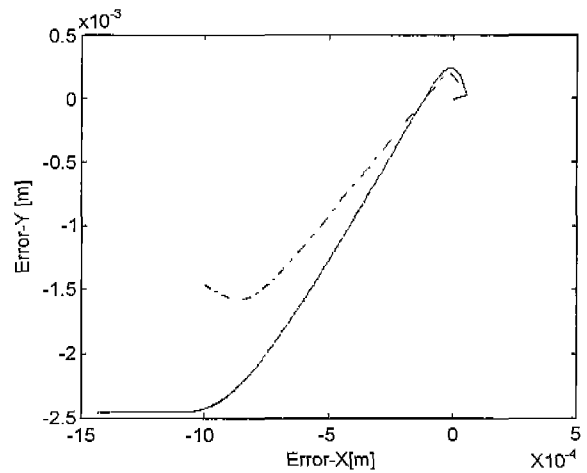


그림 5. 기존 제어기와 제안된 제어기의 위치 오차.  
Fig. 5. Position error between conventional controller(dash) and proposed controller(line).

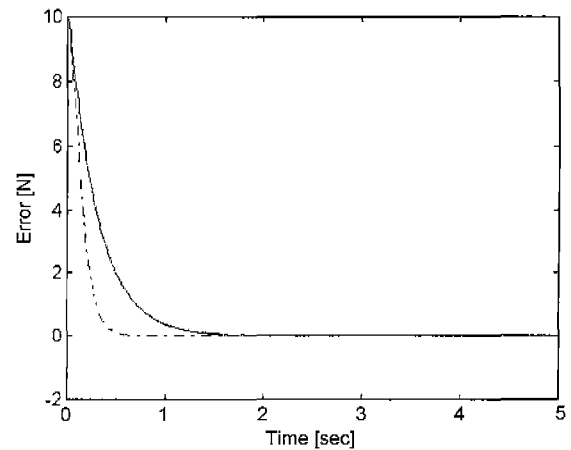


그림 6. 기존 제어기와 제안된 제어기의 힘 오차.  
Fig. 6. Force error between conventional controller(dash) and proposed controller(line).

(19)와 (26)에 의하여 시스템의 실용적 안정성이 보장된다[8]-[10].

#### IV. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 제어기의 성능을 검증하기 위하여 4축 스카라(SCARA) 형태의 로봇을 대상으로 시뮬레이션을 실시하였다.

시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

- i) x,y축은 위치제어이고, z축은 힘제어이다.
- ii) 각 축 구동기의 포화영역(saturation)을 고려하였다.
- iii) 1,2 축의 질량  $m$ 과 마찰력, 외란 등을 포함하는 불확실 토크벡터  $f$ 에 20%의 불확실성이 있고, 나머지 축은 불확실성이 없다고 가정한다.
- iv) 작업은 연마작업과 같이 바닥을 일정한 힘으로 누르면서 지정된 궤적을 추종하는 접촉작업으로 x,y축의 기준 궤적은 (0.3, 0.1)[m]에서 (0.4, 0.2)[m]으로 이동하는 시변 직선 궤적이고, z축의 기준 힘은 -10[N]이다.

위의 그림 1~4에서 .....은 기준궤적, — 추종궤적이고,

그림 5-6에서 .....은 기존 제어기의 오차, — —는 제안된 제어기의 오차를 나타낸다.

각 제어기에서 공칭제어(nominal control) 항에 포함되는  $S, K_a, K_b$ 는 공통된 값을 사용하였다.

기존 제어기에서는 하나의 공통된  $\rho$ 를 사용함으로써 x,y 축의 불확실성이 z축의 견실함  $p_3$ 에 영향을 준다. 즉, x,y 축의 불확실성이  $\rho$ 를 증대시키므로 z축에서  $\epsilon$ 이 너무 작아지면 채터링이 발생한다. 그러므로, z축에서 충분히 작은  $\epsilon$ 을 선정할 수 없다. 또한, 하나의 공통된  $\epsilon$ 을 사용하기 때문에 z축에서 이미 큰  $\epsilon$ 이 설정되었으므로 x,y축에서 좋은 성능을 발휘할 수 있는 더 작은  $\epsilon$ 이 존재하더라도 z축에 의해 결정된 큰  $\epsilon$ 을 사용할 수밖에 없다. 그림 1, 그림 2는 기존 제어기에서 이렇게 선정된  $\epsilon=1000000$ 을 사용하여 시뮬레이션 한 결과이다.

제안한 제어기에서는 각 축별로 분리한  $\rho$ 를 사용함으로써 x,y축의 불확실성이 z축의 견실함  $p_3$ 에 영향을 주지 않는다. 그러므로, z축에서 충분히 작은  $\epsilon$ 을 선정할 수 있다. 또한, 각 축별로 분리한  $\epsilon$ 을 사용하기 때문에 각 축별로 다른  $\epsilon$ 을 선정할 수 있으므로 x,y축에서 좋은 성능을 발휘할 수 있는 더 작은  $\epsilon$ 을 사용할 수 있다. 그림 3, 그림 4는 제안한 제어기에서 이렇게 선정된  $\epsilon_1=0.01, \epsilon_2=0.01, \epsilon_3=10$ 을 사용하여 시뮬레이션 한 결과이다. 기존 제어기의 결과인 그림 1, 그림 2보다 위치 궤적, 힘 궤적 모두 더 좋은 성능을 보여 준다. 오차 그림 5-6을 보면 성능의 개선이 확연함을 알 수 있다.

**V. 결론**

본 논문에서는 선행연구에서 제안된 견실 하이브리드 제어기를 수정 보완하여 확장된 견실 하이브리드 제어기를 제안하였다.

제안된 제어기는 다음과 같은 특성이 있다. 불확실 요소에 대한 경계함수 및 설계 파라미터  $\epsilon$ 을 분리함으로써 각 축에 작용하는 제어 입력이 다른 축에 작은 영향을 주게 된다. 또한, 안정성 해석에서 오차에 대한 고정된 경계 영역을 시

간에 따라서 경계 영역이 줄어드는 효과를 나타낼 수 있도록 제어기가 설계되어  $e, \dot{e}$ 이 0으로 수렴할 수 있게 되었다.

제안된 제어기는 리아프노프 분석을 통하여 실용적 안정성을 만족하였다. 또한, 시뮬레이션을 통하여 기존 제어기보다 성능이 향상되었음을 알 수 있었다.

**참고문헌**

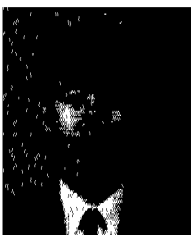
- [1] M. H. Raibert and J. J. Craig, "Hybrid position/force control of manipulators," *ASME J. Dynam. Syst. Meas. Contr.*, vol. 102, pp. 126-133, 1981.
- [2] D. L. Wedel and G.N. Saridis, "An experiment in hybrid position/force control of a six DOF revolute manipulators," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automation*, pp. 1638-1642, 1988.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] E. Reithmeier and G. Leitmann, "Tracking and force control for a class of robotic manipulators," *Dynamics and Control*, vol. 1, pp. 133-150, 1991.
- [6] 한명철, "Robust hybrid control for uncertain robot mainpulators," *KACC*, pp. 418-421, 1995.
- [7] 한명철, "Robust control design for robots with uncertainty and joint-flexibility," *KSPE*, vol. 12, no. 5, pp. 117-125, May, 1995.
- [8] M. C. Han and Y. H. Chen, "Polynomial robust control design for uncertain systems," *Automatica*, vol. 28, no. 4, pp. 809-814, 1992.
- [9] M. J. Corless and G. Leitmann. "Continuous state feedback guaranteeing uniform ultimate boundness for uncertain dynamic systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-26, no. 5, pp. 1139-1144, 1981.
- [10] G. Leitmann, "On the efficacy of nonlinear control in uncertain linear systems," *ASME J. Dynam. Syst. Meas. Contr.*, vol. 103, pp. 95-102, 1981.



**김 재 홍**  
1974년 1월 11일생. 1999년 부산대 기계공학부 졸업. 동대학원 석사(2000). 관심분야는 로보틱스 및 견실 제어.



**하 인 철**  
1975년 8월 24일생. 1998년 부산대 제어기계공학과 졸업. 동대학원 석사(2000). 2000년~현재 동대학원 박사과정 재학중. 관심분야는 로보틱스, 비선형 제어 및 하이브리드 제어.



**한 명 철**  
1960년 4월 14일생. 1983년 서울대 기계설계공학과 졸업. 동대학원 석사(1985). Georgia Institute of Technology 박사(1992). 1994년~현재 부산대학교 기계공학부 조교수, 부교수. 관심 분야는 메카트로닉스, 로보틱스 및 견실 제어.