

# 강성 경계를 가지는 견실한 위치/힘 제어

하 인 철\* · 한 명 철\*\*

## Robust Hybrid Position/Force Control With Stiffness Bound

In-Chul Ha and Myung-Chul Han

**Key Words:** Robust control(견실 제어), Stiffness(강성), Robot manipulators(로봇 매니플레이터), Hybrid Control(혼합 제어)

### Abstract

When a real robot manipulator is mathematically modeled, uncertainties are not avoidable. The uncertainties are often nonlinear and time-varying. The uncertain factors come from imperfect knowledge of system parameters, payload change, friction, external disturbance, and etc. In this paper, We propose a class of robust hybrid controls of manipulators without knowing the exact stiffness and provide the stability analysis. Simulation results are provided to show the effectiveness of the algorithms.

### 1. 서 론

산업로봇이 투입되는 작업은 크게 두 개의 분류로 나뉜다. 하나는 로봇의 end-effector와 주위 환경사이에 접촉이 일어나지 않는 비접촉 작업과 다른 하나는 조립, 가공 등의 복잡하고 진보된 로봇이 필요한 작업으로 로봇과 주위환경사이의 접촉이 발생하는 작업이 있다. 특히 접촉 작업에서는 로봇은 물론 주위 환경 접촉상황 등이 함께 고려되어야 함으로 복잡한 제어문제가 제기된다.

산업용 로봇 매니플레이터의 제어 알고리즘을 개발하는 데에는 많은 장애가 있다. 그 중의 하나가 실제 로봇 매니플레이터와 주위 환경의 정확한 모델링의 어려움이다. 즉, 로봇 시스템의 동

역학이 정확하지 않은 파라미터, 마찰력, 로드의 변화, 외란 등의 불확실성을 포함한다. 불확실 요소들은 비선형 성분이다.

기존의 제어기들(PID 등)은 비선형 요소들이 없는 시스템의 운동 방정식에서 상당히 좋은 성능을 나타낼 수 있으나, 비선형 요소들이 포함된 시스템의 방정식에서는 좋은 성능을 나타내지 못한다. 이러한 비선형 요소들이 포함된 경우에는 견실제어기를 사용하는데 견실제어기는 불확실 요소들의 정확한 값을 필요로 하지 않고, (불확실 요소들의 정확한 값을 구하기도 어렵다.) 단지 불확실 요소들의 경계치를 알면 비선형 요소들에 대하여 견실한 성능을 나타낸다.[1]

이러한 불확실성을 고려한 견실제어기 설계는

\* 부산대학교 지능기계학과

\*\* 부산대학교 기계공학부 교수

Chen[2], Chen and Pandey[3], Reithmeier and Leitmann[4], Shoureshi[5] et al 등에 의해 제시되었다. 이들에 의해 불확실 인자들의 가능한 경계치가 제어기 설계에 사용된 확정제어(deterministic control) 알고리즘이 제시되고, 또한 주어진 제어기가 견딜 수 있는 불확실성의 정도가 분석되었다.

본 논문에서는 불확실 로봇 시스템을 위한 새로운 형태의 견실 하이브리드 제어기가 제시되고 그 안정성이 증명된다. 특히 제안된 제어기는 환경을 정확하게 알지 못하나, 가능한 경계치에 의하여 견실한 성능을 나타낸다. 제안된 제어기의 성능을 보여주기 위해서 SCARA 타입의 4축 로봇에 대하여 시뮬레이션 결과를 보일 것이다.

## 2. 로봇 모델링

일반적으로 접촉 작업에 대한 관절좌표계에서의 로봇 운동방정식은 다음과 같다.

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

$q : m \times 1$	관절위치벡터
$\tau : m \times 1$	토크벡터
$M(q) : m \times m$	관성행렬
$C(q, \dot{q}) : m \times m$	원심력 및 코리올리스 벡터
$g(q) : m \times 1$	중력벡터
$f(q, \dot{q}, t) : m \times 1$	불확실토크벡터
$R : m \times 1$	Reaction force

식(1)은 다음과 같은 성질이 있다.

첫째,  $M(q)$ 는 양확정이다.

둘째,  $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$ 가 교대대칭이 되는 적당한  $C(q, \dot{q})$ 를 선정 가능하다.

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

위치와 힘을 동시에 제어하는 혼합 제어[6]를 위해 관절좌표계를 직교좌표계로 변환한다. 여기

서  $J(q)$ 는 관절좌표계와 직교좌표계 사이의 자코비안이다.

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

식(2)를 식(1)의 관절좌표계 운동방정식에 대입하면, 다음과 같다.

$$M_x(q)\ddot{x} + C_x(q, \dot{q})\dot{x} + g_x(q) + f_x(q, \dot{q}, t) = \tau_x(t) - R \quad (3)$$

$$\begin{aligned} M_x(q) &= J^{-T}M(q)J \\ C_x(q, \dot{q}) &= J^{-T}(C(q, \dot{q}) - M(q)J^{-1}\dot{J})J \\ g_x(q) &= J^{-T}g(q) \\ f_x(q, \dot{q}, t) &= J^{-T}f(q, \dot{q}, t) \\ \tau_x &= J^{-T}\tau \end{aligned}$$

직교좌표계로 나타내어진 운동 방정식은 관절좌표계 상에서의 특성을 유지한다. 즉,  $\dot{M}_x(q) - 2C_x(q, \dot{q})$ 가 교대대칭의 성질을 만족한다.[7]

## 3. 실용적 안정성

본 논문에서는 제안된 제어기에 의해 전체 시스템이 흔히 실용적 안정성 혹은 대역적 평등 흡인성으로 지칭되는 다음과 같은 안정성을 보장한다.

정의 : 실용적 안정성

$$\dot{\xi}(t) = f(\xi(t), t), \quad \xi(t) \in R^n, \quad \xi(t_0) = \xi_0 \quad (4)$$

식(4)의 동적 시스템은 아래의 성질을 만족시키는 상수  $r \geq 0$ 가 존재할 때 실용적 안정성을 갖는다고 한다.

(1) 해의 존재성 : 각  $(\xi_0, t_0)$ 에 대하여, 식(4)의 해  $\xi(\cdot) : [t_0, \infty)$ 가 존재한다.

(2) 평등 유계성 (UB) : 임의의  $r > 0$ 에 대하여,

$\|\xi_0\| \leq r$ 이면,  $\|\xi(t)\| \leq d(r)$ ,  $\forall t \in [t_0, \infty)$  을 만족하는 상수  $d(r) < \infty$ 가 존재한다.

(3) 평등 궁극 유계성 (UUB) : 임의의  $\bar{r} \geq r$ 와  $r > 0$ 에 대하여,  $\|\xi_0\| \leq r$ 이면  $\|\xi(t)\| \leq \bar{r}$ ,  $\forall t \geq t_0 + T(r, \bar{r})$  을 만족하는 유한시간  $T(r, \bar{r})$ 이 존재한다.

(4) 평등 안정성 (US) : 임의의  $\bar{r} \geq r$ 에 대하여,  $\|\xi_0\| \leq \delta(\bar{r})$ 이면  $\|\xi(t)\| \leq \bar{r}$ ,  $\forall t \geq t_0$ 을 만족하는 상수  $\delta(\bar{r})$ 이 존재한다.

대략적으로 이 안정성을 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.

#### 4. 제어기 설계

힘과 위치를 동시에 제어하는 경우 직교좌표계에서는 하나의 축에 힘제어와 위치제어 중 하나만이 고려된다. 여기서 복잡성을 피하기 위해서  $n$ 개의 직교좌표축에서 처음  $k$ 개는 위치제어 대상이며 나머지  $n-k$ 개의 좌표축은 힘제어의 대상이라고 가정한다.

위치와 힘을 동시에 다루기 위해 다음의 새로운 변수를 도입한다.

$$\begin{aligned} r_i &= x_i, & i &= 1, \dots, k \\ r_i &= k_{ei}(x_i - x_{i0}), & i &= k+1, \dots, n \end{aligned}$$

여기서  $k_{ei}$ 는  $i$ 축의 equivalent stiffness이고,  $x_{i0}$ 는 로봇의 end-effector가 주위환경에 접촉되기 직전의 위치를 나타낸다. 즉, 힘은 로봇과 주위환경의 변형에 비례한다. 또한 복잡성을 피하기 위해 로봇과 주위환경이 접촉한 지점에 좌표계의 원점을 둔다. ( $x_{i0} = 0$ )

$$K_e = \begin{matrix} \text{diag}\{k_{e1}, k_{e2}, \dots, k_{en}\} \\ \text{for } i = 1, 2, \dots, k \end{matrix} \quad k_{ei} = 1$$

$$\begin{aligned} r &\equiv [r_1 \ r_2 \ \dots \ r_n] = K_e x \\ e &\equiv [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_n] = r - r_d, \quad \dot{e} \equiv \dot{r} - \dot{r}_d \end{aligned}$$

여기서  $K_e$ 는 positive constant matrix이고,  $r_d$ 는 원하는 위치 및 힘의 궤도이다.

본 논문에서 제안하는 건설 하이브리드 제어기는 다음과 같다.

$$\tau_x = \widehat{M}_x \widehat{K}_e^{-1} (\ddot{r}_d - S\dot{e}) + \widehat{C}_x \widehat{K}_e^{-1} (\dot{r}_d - Se) + \widehat{g}_x + \widehat{f}_x + \widehat{R} + P - K_a \widehat{K}_e^{-1} e - K_b \widehat{K}_e^{-1} \dot{e} \quad (5)$$

건설제어항  $P$ 는 다음과 같이 설계된다.

$$\begin{aligned} P &= [p_1, p_2, p_3, \dots, p_n]^T \\ p_i &= \begin{cases} -\frac{\mu_i}{\|\mu\|} \rho & \text{if } \|\mu\| \geq \varepsilon \\ -\frac{\mu_i}{\varepsilon} \rho & \text{if } \|\mu\| < \varepsilon \end{cases} \\ \mu &= (\dot{e}_i + Se_i) \rho(a, \dot{a}) \end{aligned} \quad (6)$$

$\varepsilon$ 은 설계자에 의해 선택되는 양의 상수이다.

이때 한계함수  $\rho$ 는 다음과 같다.

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

여기서,

$$\begin{aligned} \widehat{K}_e &= \text{diag}\{\widehat{k}_{e1}, \widehat{k}_{e2}, \dots, \widehat{k}_{en}\} \\ \widehat{k}_{ei} &= 1 \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, k \end{aligned}$$

$$S = \text{diag}\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$$

$$K_a = \text{diag}\{k_{a1}, k_{a2}, \dots, k_{an}\}$$

$$K_b = \text{diag}\{k_{b1}, k_{b2}, \dots, k_{bn}\}$$

$\widehat{K}_e, S, K_a, K_b$ : positive constant matrix

그리고,  $\widehat{M}_x, \widehat{C}_x, \widehat{g}_x, \widehat{f}_x, \widehat{R}, \widehat{K}_e$  등은 불확실성을 포함하는  $M_x, C_x, g_x, f_x, R, K_e$  등의 추측값 또는 대표값이다. 식(7)의 경계함수를 찾기 위해 불확실성 인자값들이 속한 집합들의 경계치에 대한 정보가 필요하다.

세안된 제어기 식(5)에 의하여 불확실 로봇 시스템에서 위치 제어 및 힘 제어는 실용적 안정성을 갖는다.

본 논문에서 사용되는 벡터의 노름(norm)은 유클리디안 노름(Euclidean norm)이고, 행렬의 노름은 유클리디안 유도 노름(induced norm)이다. 즉, 행렬 M의 노름  $\|M\|$ 은  $\sqrt{\lambda_{\min}(M^T M)}$ 이다. 여기서  $\lambda_{\min}(\cdot)$ (혹은  $\lambda_{\max}(\cdot)$ )은 최소(혹은 최대) 고유값(eigen value)을 나타낸다.

## 5. 안정도 분석

여기서는 리아프노프 후보 함수인 V에 대해서 시간에 대한 미분치가 원점을 중심으로 한 어느 불의 외부에서는 항상 음임을 보여준다.

다음과 같이 리아프노프 후보함수를 선정한다.

$$V(\bar{e}, t) = (\dot{e} + Se)^T K_e^{-1} M_x K_e^{-1} (\dot{e} + Se) + e^T K_e^{-1} (K_a + SK_b) \widehat{K}_e^{-1} e \quad (8)$$

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

시스템의 임의의 궤도를 추종하는 V에 대한 시간의 미분치는 아래와 같다.

$$\dot{V} = 2(\dot{e} + Se)^T K_e^{-1} M_x K_e^{-1} (\ddot{e} + S\dot{e}) + (\dot{e} + Se)^T K_e^{-1} \dot{M}_x K_e^{-1} (\dot{e} + Se) + e^T K_e^{-1} (K_a + SK_b) \widehat{K}_e^{-1} \dot{e} + e^T K_e^{-1} (K_a + SK_b) \widehat{K}_e^{-1} \dot{e} \quad (9)$$

위 식에서  $K_e^{-1}, \widehat{K}_e^{-1}, S, K_a, K_b$ 는 대각요소이므로  $K_e^{-1}(K_a + SK_b) \widehat{K}_e^{-1}$ 는 대칭 행렬이 되어

다음과 같이 다시 쓰여질 수 있다.

$$\dot{V} = 2(\dot{e} + Se)^T K_e^{-1} M_x K_e^{-1} (\ddot{e} + S\dot{e}) + (\dot{e} + Se)^T K_e^{-1} \dot{M}_x K_e^{-1} (\dot{e} + Se) + 2e^T K_e^{-1} (K_a + SK_b) \widehat{K}_e^{-1} \dot{e} \quad (10)$$

식(3)과 식(5)로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} M_x K_e^{-1} \ddot{e} &= M_x K_e^{-1} \ddot{r} - M_x K_e^{-1} \ddot{r}_d \\ &= \tau_x - C_x \dot{x} - g_x - f_x - R - M_x K_e^{-1} \ddot{r}_d \\ &= \widehat{M}_x \widehat{K}_e^{-1} (\ddot{r}_d - S\dot{e}) + \widehat{C}_x \widehat{K}_e^{-1} (\dot{r}_d - S\dot{e}) \\ &\quad + \widehat{g}_x + \widehat{f}_x + \widehat{R} + P - K_a \widehat{K}_e^{-1} e \\ &\quad - K_b \widehat{K}_e^{-1} \dot{e} - C_x K_e^{-1} (\dot{e} + \dot{r}_d) - g_x - f_x \\ &\quad - R - M_x K_e^{-1} \ddot{r}_d \\ &= -(\widehat{M}_x - M_x)(\widehat{K}_e^{-1} - K_e^{-1}) \ddot{r}_d \\ &\quad - \widehat{M}_x K_e^{-1} \ddot{r}_d - M_x \widehat{K}_e^{-1} \ddot{r}_d + \widehat{M}_x \widehat{K}_e^{-1} S\dot{e} \\ &\quad - (\widehat{C}_x - C_x)(\widehat{K}_e^{-1} - K_e^{-1}) \dot{r}_d - \widehat{C}_x K_e^{-1} \dot{r}_d \\ &\quad - C_x \widehat{K}_e^{-1} \dot{r}_d + \widehat{C}_x \widehat{K}_e^{-1} S\dot{e} - C_x K_e^{-1} \dot{e} \\ &\quad + (\widehat{g}_x - g_x) + (\widehat{f}_x - f_x) + (\widehat{R} - R) + P \\ &\quad - K_a \widehat{K}_e^{-1} e - K_b \widehat{K}_e^{-1} \dot{e} \\ &\quad + 2\widehat{M}_x \widehat{K}_e^{-1} (\ddot{r}_d - S\dot{e}) \\ &\quad + 2\widehat{C}_x \widehat{K}_e^{-1} (\dot{r}_d - S\dot{e}) \end{aligned} \quad (11)$$

식(11)를 식(10)에 대입하여 정리하면,

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 2(\dot{e} + Se)^T K_e^{-1} [ \\ &\quad -(\widehat{M}_x - M_x)(\widehat{K}_e^{-1} - K_e^{-1}) \ddot{r}_d \\ &\quad - \widehat{M}_x K_e^{-1} \ddot{r}_d - M_x \widehat{K}_e^{-1} \ddot{r}_d + \widehat{M}_x \widehat{K}_e^{-1} S\dot{e} \\ &\quad - (\widehat{C}_x - C_x)(\widehat{K}_e^{-1} - K_e^{-1}) \dot{r}_d - \widehat{C}_x K_e^{-1} \dot{r}_d \\ &\quad - C_x \widehat{K}_e^{-1} \dot{r}_d + \widehat{C}_x \widehat{K}_e^{-1} S\dot{e} - C_x K_e^{-1} \dot{e} \\ &\quad + (\widehat{g}_x - g_x) + (\widehat{f}_x - f_x) + (\widehat{R} - R) + P \\ &\quad - K_a \widehat{K}_e^{-1} e - K_b \widehat{K}_e^{-1} \dot{e} \\ &\quad + 2\widehat{M}_x \widehat{K}_e^{-1} (\ddot{r}_d - S\dot{e}) + M_x K_e^{-1} S\dot{e} \\ &\quad + 2\widehat{C}_x \widehat{K}_e^{-1} (\dot{r}_d - S\dot{e}) \\ &\quad + (\dot{e} + Se)^T K_e^{-1} \dot{M}_x K_e^{-1} (\dot{e} + Se) \\ &\quad + 2e^T K_e^{-1} (K_a + SK_b) \widehat{K}_e^{-1} \dot{e} \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)에서 ①에 관한 식을 정리하면, 다음의 식(13)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{①} &= -(\widehat{M}_x - M_x)(\widehat{K}_e^{-1} - K_e^{-1})(\ddot{r}_d - S\dot{e}) \\ &\quad + \widehat{M}_x(\widehat{K}_e^{-1} - K_e^{-1})(\ddot{r}_d - S\dot{e}) \\ &\quad + (\widehat{M}_x - M_x) K_e^{-1} (\ddot{r}_d - S\dot{e}) \end{aligned} \quad (13)$$

식(12)에서 ②에 관한 식을 정리하면, 다음의 식(14)와 같다.

$$\begin{aligned} \textcircled{2} = & -(\widehat{C}_v - C_v)(\widehat{K}_e^{-1} - K_e^{-1})(\dot{r}_d - Se) \\ & + \widehat{C}_x(\widehat{K}_e^{-1} - K_e^{-1})(\dot{r}_d - Se) \\ & + (\widehat{C}_x - C_x)\widehat{K}_e^{-1}(\dot{r}_d - Se) - C_x K_e^{-1}(\dot{e} + Se) \end{aligned} \quad (14)$$

식(13)과 식(14)를 식(12)에 대입하여 정리하면, 다음의 식(15)와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} = & 2(\dot{e} + Se)^T K_e^{-1}(\Phi + P) \\ & + (\dot{e} + Se)^T K_e^{-1}(\dot{M}_x - 2C_x)K_e^{-1}(\dot{e} + Se) \\ & + 2e^T K_e^{-1}(K_a + SK_b)\widehat{K}_e^{-1}\dot{e} \\ & - 2(\dot{e} + Se)^T K_e^{-1}(K_a \widehat{K}_e^{-1}e + K_b \widehat{K}_e^{-1}\dot{e}) \\ = & 2(\dot{e} + Se)^T K_e^{-1}(\Phi + P) \\ & - 2e^T K_e^{-1}SK_a \widehat{K}_e^{-1}e \\ & - 2\dot{e}^T K_e^{-1}K_b \widehat{K}_e^{-1}\dot{e} \end{aligned} \quad (15)$$

식(15)의 분석에서는  $\dot{M}_x(q) - 2C_x(q, \dot{q})$ 가 교대대칭이라는 성질과 대각행렬간에는 교환법칙이 성립하는 것을 이용하였다. 일반성을 잃지 않고, 주어진 상태변수에 의해 다음을 가정한다.

$$\begin{aligned} \text{if } \|\mu_i\| < \varepsilon, & \quad i=1, 2, \dots, l \\ \text{if } \|\mu_i\| \geq \varepsilon, & \quad i=l+1, l+2, \dots, n \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \|\dot{e} + Se\| \leq & \|\dot{e}_1 + S_1e_1\| \\ & + \|\dot{e}_2 + S_2e_2\| + \dots + \|\dot{e}_n + S_ne_n\| \end{aligned} \quad (17)$$

식 (16), (17)을 이용하여 식 (15)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \frac{2}{k_{ei}} \sum_{i=1}^l \|\dot{e}_i + S_i e_i\| \rho - \frac{1}{k_{ei}} \sum_{i=1}^l \frac{2}{\varepsilon} \|\dot{e}_i + S_i e_i\|^2 \rho^2 \\ & - \frac{2}{k_{ei}} \sum_{i=l+1}^n \|\dot{e}_i + S_i e_i\| \rho \\ & - \sum_{i=1}^l \left( \frac{2s_i k_{ai} e_i^2}{k_{ei} \widehat{k}_{ei}} + \frac{2k_{bi} \dot{e}_i^2}{k_{ei} \widehat{k}_{ei}} \right) \\ \leq & \frac{2}{k_{ei}} \sum_{i=1}^l (\|\dot{e}_i + S_i e_i\| \rho - \frac{1}{\varepsilon} \|\dot{e}_i + S_i e_i\|^2 \rho^2) \\ & - \frac{k_o}{k_{ei}} \sum_{i=1}^l (e_i^2 + \dot{e}_i^2) \\ = & \frac{1}{k_{ei}} \left( l \frac{\varepsilon}{2} - k_o \|\bar{d}\|^2 \right) \end{aligned} \quad (18)$$

여기서,

$$k_o \equiv \min \left\{ \frac{2s_i k_{ai}}{\widehat{k}_{ei}}, \frac{2k_{bi}}{\widehat{k}_{ei}} \right\}$$

$$\text{그러므로, } \|\bar{d}\| > \sqrt{\frac{l\varepsilon}{2k_o}} \Rightarrow \dot{V} < 0$$

결과적으로, 식(18)에 의하여 불확실성 로봇은 대역적으로 실용적 안정성이 보장된다.

## 6. Simulation

SCARA 형태의 4축 로봇에 대하여 제안된 건설 하이브리드 제어를 적용하고 응답을 살펴본다. 불확실 요소로서 링크의 각 질량과 환경 강성을 선정하고, 가능한 경계치를 실제값에 대한 20%로 선정한다.

바람직한 위치 경로는 시변 위치 경로를 사용하고, 바람직한 힘은 10N으로 한다. 이때, 모든 파라미터를 정확히 알고 있을 경우와 불확실 요소가 첨가된 경우에 대하여 시뮬레이션 결과를 확인한다.

파라미터의 정확한 값을 알고 있을 경우에 대한 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

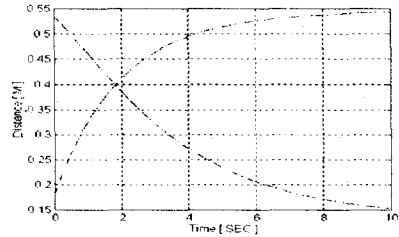


Fig.1 X-Y position trajectory

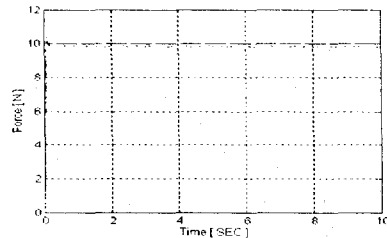


Fig.2 Force trajectory

파라미터에 대하여 불확실 요소가 첨가된 경우의 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

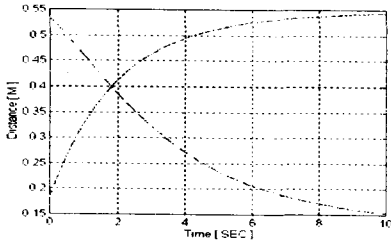


Fig.3 X-Y position trajectory

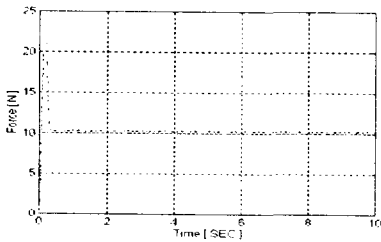


Fig.4 Force trajectory

위의 그림으로부터 파라미터의 불확실성이 존재하더라도 제안된 건설 하이브리드 제어기에 의하여 오차가 어느 정도의 범위내에서 머물고 있음을 확인할 수 있다. 특히 Fig.4 에서 초기 시간에 힘이 순간적으로 증가함을 알 수 있는데, 이것은 로봇이 정지하여 있다가 움직이는 순간 정적 마찰력의 최대 효과로 볼 수 있다. 그러나 그 이후 운동 마찰력이 작용하고 있는 구간에서는 일정한 오차 내에서 머물고 있음을 알 수 있다.

## 7. 결론

본 논문에서 가능한 강성 경계를 가지는 시스템에 대하여 건설한 제어기를 설계하고 대역적인 실용적 안정성을 보장함을 보였다. 제안된 제어기의 효용성을 보이기 위하여 SCARA 형태의 4축 로봇에 대하여 시뮬레이션 결과를 확인하였다. 불확실한 시스템 파라미터들의 값뿐만 아니라 구조적, 비구조적 불확실성에 의해 발생하는 모든 토크가 고려되었다. 예를 들면, 마찰력,

payload 등에 의한 토크나 시변 고주파수의 외란 등이 여기에 속할 수 있다. 본 논문은 일반적인 산업현장에서 조립 및 가공등의 접촉 작업을 요구하는 작업에서 로봇의 정확한 파라미터를 알지 못하는 경우이라도 제안된 건설 하이브리드 제어기에 의하여 작업 수행이 원만하게 된다는 점에서 본 논문의 효용성이 있을 것이다.

앞으로의 과제는 가능한 강성 경계에서 강성이 로봇의 위치에 따라서 어느 정도의 변화율을 가질 수 있으므로 이에 대한 제어기 설계 및 안정도 연구와 불확실 강성에 대한 적응제어 알고리즘의 연구는 해 볼만한 과제이다.

## 참고문헌

- [1] 하 인철, 한 명철, 1998, "Implementation of robust control for robot manipulators with time varying uncertainty." Proceedings of the 13<sup>th</sup> KACC, pp.537-540, October.
- [2] Y. H. Chen, 1991, "Robust computed torque schemes mechanical : non-adaptive versus adaptive." ASME J. Dynam. Syst. Meas. Contr., Vol.113, pp.324-327.
- [3] Y. H. Chen and S. Pandey, 1990, "Uncertainty bounded - based hybrid control for robot manipulators." IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.6, No.3, pp.303-311.
- [4] E. Reithmeier and G. Leitmann, 1991, "Tracking and force control for a class of robotic manipulators." Dynamics and Control, Vol.1, pp.133-150.
- [5] R. Shoureshi, M. Corless, and M. D. Roesler, 1987, "Control of industrial manipulators with bounded uncertainties." ASME J. Dynam. Syst. Meas. Contr., Vol.109, pp.53-58.
- [6] M. H. Raibert and J. J. Craig, 1981, "Hybrid position/force control of manipulators." ASME J. Dynam Syst. Meas. Contr., Vol. 102, pp.126-133.
- [7] 한 명철, 1995, "Robust hybrid control for uncertain robot manipulators." KACC, pp. 418-421.