

# 파라미터 적응을 이용하는 로봇 매니플레이터의 위치/힘 제어

유 동영 김 응석 양 해원  
한양대학교 전기공학과

## A Position/Force Control of Robotic Manipulators with Parameter Adaptation

•Dong-Young Yu Eung-Seok Kim Hai-Won Yang  
Dept. of Electrical Eng. Han-Yang Univ.

### Abstract

An adaptive hybrid position/force controller for constrained manipulator with uncertain dynamic model parameters and environment stiffness is presented. In this paper, the compliance frame model is constructed by independent positions and forces to be controlled. The adaptive controller based on this compliance frame dynamic model is designed. Lyapunov theory is used for controller design and stability analysis.

### 1. 서 론

로봇 매니플레이터의 동작제어는 크게 자유동작제어(free motion control)와 제한된 동작제어(constrained motion control)의 두가지로 분류될 수 있다. 자유동작제어는 로봇 팔이 작업 대상과 접촉없이 자유공간에서 움직이는 경우에 적용될 수 있으며 제한된 동작제어는 로봇팔의 끝부분(end-effector)이 작업대상과 기구적으로 접촉하게 되는 경우에 적용될 수 있다. 그런데 일반적으로 로봇 매니플레이터가 조립, 절삭, 연마 등의 작업을 수행하게 될 경우 필연적으로 작업대상과 매니플레이터가 접촉하게 되고 그에 따라 interaction force가 발생하게 된다. 그러므로 이때에는 그 interaction force도 제어해야 할 필요성이 생긴다. 제한된 동작제어의 몇가지 방법으로는 힘제어, 임피던스 제어[1], 하이브리드 위치/힘제어[2] 등이 있다.

대부분의 하이브리드 위치/힘제어에서 운동방정식에 존재하는 비선형항의 정확한 소거를 통하여 좋은 성능을 보이고 있다[3]. 매니플레이터의 파라미터를 정확히 알지 못하는 경우에는 비선형항의 정확한 소거가 불가능하므로 적응제어기법[4~5]을 도입하거나 파라미터의 상한값을 이용하여 스위칭시키는 방법[6]으로 이러한 문제를 해결하고 있다. 참고문헌[4]에서의 하이브리드 위치/힘 적응제어 방법은 파라미터 적응이 오직 위치 오차에 의해서만 이루어지고 있고 힘제어 방향에서의 변위를 무시하여 힘제어와 위치제어의 간섭이 고려되지 않는 단점이 있다. 또 참고문헌[5~6]의 하이브리드 위치/힘 제어방법도 주위환경의 강성(stiffness)을 정확히 알아야 한다는 단점이 있다. 본 연구에서는 매니플레이터의 compliance frame 운동방정식에 대해서 Lyapunov이론에 입각한 제어기법[7]에 기초하여 적응제어 알고리즘을 소개한다. 제시된 알고리즘은 매니플레이터의 파라미터 뿐 만 아니라 주위환경의 강성을 정확히 알지 못하는 경우에도 전체 시스템의 안정도 및 위치, 힘 오차의 접근적 수렴성을 보장한다.

### 2. 매니플레이터의 운동방정식

n차의 매니플레이터의 운동방정식은 joint space에서 다음과 같다[3].

$$M(q)\ddot{q} + Q(q, \dot{q}) + G(q) = \tau - J^T E_f f_f \quad (1)$$

여기서,  $q \in R^n$ 은 joint 변위벡터이며,  $M(q): R^n \rightarrow R^{n \times n}$ 은 모든  $q \in R^n$ 에 대해서 symmetric이고, positive definite인 관성 행렬이고,  $Q(q, \dot{q}): R^n \times R^n \rightarrow R^n$ 은 전향력 및 구심력 벡터이고,

$G(q): R^n \rightarrow R^n$ 은 중력벡터이고,  $f_f$ 는 end-effector에 의해서 주위환경에 가해지는 interaction force벡터이고,  $\tau$ 는 actuator에 의해서 가해지는 joint 토크벡터이다.  $J$ 는 nonsingular라고 가정된 Jacobian행렬이고,  $E_f$ 는 cartesian space에서 compliance frame의 힘제어방향으로의 변환행렬이다.

식(1)은 joint space에서의 운동방정식인데 제어목적은 compliance frame에서 위치와 힘을 제어하는 것이므로 compliance frame 운동방정식을 유도한다. 먼저, cartesian space에서의 변위벡터를  $x$ 로 쓰면, joint 속도벡터와 가속도벡터는 jacobian에 의해서 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

그리고 위치제어방향과 힘제어방향으로의 변환이 다음과 같다고 할때,

$$x_p = T_p(x), \quad x_f = T_f(x)$$

cartesian space에서 compliance frame으로의 변환행렬  $E$ 는

$$E_p = \frac{\partial T_p}{\partial x}, \quad E_f = \frac{\partial T_f}{\partial x}, \quad E = \begin{bmatrix} E_p \\ E_f \end{bmatrix}$$

와 같다. 또 cartesian space에서의 속도벡터와 가속도벡터를 compliance frame에서의 속도벡터와 가속도벡터로 표현하면

$$\dot{x} = E^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{x}_f \end{bmatrix}, \quad \ddot{x} = E^{-1} \begin{bmatrix} \ddot{x}_p \\ \ddot{x}_f \end{bmatrix} + (\dot{E}^{-1}) \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{x}_f \end{bmatrix}$$

이고, joint 속도벡터와 가속도벡터를 compliance frame에서의 속도벡터와 가속도벡터로 표현하면

$$\dot{q} = (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{x}_f \end{bmatrix}, \quad \ddot{q} = (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} \ddot{x}_p \\ \ddot{x}_f \end{bmatrix} + [(EJ)^{-1}] \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{x}_f \end{bmatrix} \quad (2)$$

이 된다. 또, end-effector에 의해서 주위환경에 가해지는 힘 벡터  $f_f$ 는 Hooke's 법칙을 일반화 시켜서 다음과 같이 쓸 수 있다[9].

$$f_f = ke x_f \quad (3)$$

여기서  $ke$ 는 주위환경의 강성을 나타낸다.

식(3)에서 힘제어방향의 속도  $\dot{x}_f$ , 가속도  $\ddot{x}_f$ 는

$$\dot{x}_f = \frac{1}{ke} \dot{f}_f, \quad \ddot{x}_f = \frac{1}{ke} \ddot{f}_f \quad (4)$$

이고, 식(4)를 식(2)의  $\dot{x}_f$ ,  $\ddot{x}_f$ 에 대입하면,

$$\dot{q} = (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \frac{1}{ke} \dot{f}_f \end{bmatrix}, \quad \ddot{q} = (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} \ddot{x}_p \\ \frac{1}{ke} \ddot{f}_f \end{bmatrix} + [(EJ)^{-1}] \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \frac{1}{ke} \dot{f}_f \end{bmatrix} \quad (5)$$

이다. 식(5)를 식(1)에 대입하면

$$\begin{aligned} & M \left\{ (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ 0 \end{bmatrix} + [(EJ)^{-1}] \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \\ & + \frac{1}{ke} M \left\{ (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{f}_f \end{bmatrix} + [(EJ)^{-1}] \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{f}_f \end{bmatrix} \right\} \\ & + Q + G = \tau - J^T E_f f_f \end{aligned} \quad (6)$$

와 같이 된다. 식(6)은 제어되어야 할 독립적인 위치와 힘에 의해서 표현된 compliance frame 운동방정식이 된다. 다음 절에서는 식(6)에 기초하여 매니플레이터의 파라미터 뿐 만 아니라 주위환경의 강성을 정확히 알 수 없는 경우에도  $x_p$ ,  $f_f$ 가 각각 원하는 값들을 따라가게 하는 적응제어기를 소개하기로 한다.

### 3. 제어기 구조

식(6)의 운동방정식에 대해서 시스템의 파라미터들(end-effector부분의 질량, 주위환경의 강성 등)을 정확히 알 수 없는 경우에도 Lyapunov이론에 입각한 제어기법[7]을 이용하여 시스템의 점근적인 안정도를 보장하는 제어기를 소개한다.

$$\begin{aligned} \tau = & \dot{M} \left[ (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x}_{pr} \\ 0 \end{bmatrix} + [(EJ)^{-1}] \begin{bmatrix} x_{pr} \\ 0 \end{bmatrix} \right] \\ & + \left( \frac{1}{k_e} M \right) \left[ (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{f}_{fr} \end{bmatrix} + [(EJ)^{-1}] \begin{bmatrix} 0 \\ f_{fr} \end{bmatrix} \right] \\ & + \dot{Q} + \dot{G} + J^T E_F^T F_F \\ & + \left( -\frac{1}{2} \dot{M} \right) \left[ (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} a_p \\ 0 \end{bmatrix} \right] + \left( -\frac{1}{2k_e} \dot{M} \right) \left[ (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ a_f \end{bmatrix} \right] \\ & - (EJ)^T K_d \begin{bmatrix} a_p \\ a_f \end{bmatrix} - b_p (EJ)^T S (EJ)^{-T} W_s \cdot \text{sgn}(z) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $M, \frac{1}{k_e} M, Q, G, (-\frac{1}{2} \dot{M}), (-\frac{1}{2k_e} \dot{M})$ 의 정확히 알 수 없는 상수 파라미터(end-effector부분의 질량, 주위환경의 강성 등)는 알 수 있는 신호의 함수와 곱해지는 형태로 나타나므로 다음과 같이 정확히 알 수 없는 파라미터에 대하여 선형적으로 표시할 수 있고

$$\begin{aligned} M \left[ (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x}_{pr} \\ 0 \end{bmatrix} + [(EJ)^{-1}] \begin{bmatrix} x_{pr} \\ 0 \end{bmatrix} \right] + \left( -\frac{1}{2} \dot{M} \right) \left[ (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} a_p \\ 0 \end{bmatrix} \right] \\ + \left( \frac{1}{k_e} M \right) \left[ (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{f}_{fr} \end{bmatrix} + [(EJ)^{-1}] \begin{bmatrix} 0 \\ f_{fr} \end{bmatrix} \right] \\ + \left( -\frac{1}{2k_e} \dot{M} \right) \left[ (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ a_f \end{bmatrix} \right] + Q + G \\ = W_s P + W_0; \quad W_s \in R^{n \times p}, P \in R^p, W_0 \in R^n \end{aligned} \quad (8)$$

$\dot{M}, \left( \frac{1}{k_e} M \right), \dot{Q}, \dot{G}, \left( -\frac{1}{2} \dot{M} \right), \left( -\frac{1}{2k_e} \dot{M} \right)$ 는 파라미터의 차값P 대신에 추정치P를 이용해서 구한 값이다. 그리고  
 $a_p = e_p + \Lambda p_e, e_p = x_p - x_{pd}, x_{pr} = \dot{x}_p - \dot{x}_{pd}, x_{pr} = \dot{x}_{pd} - \Lambda p_e,$   
 $a_f = e_f + \Lambda p_f, e_f = f_f - f_{fd}, f_{fr} = \dot{f}_f - \dot{f}_{fd}, \dot{f}_{fr} = \dot{f}_{fd} - \Lambda p_f,$   
 $\Lambda_p, \Lambda_f$ 는 설계파라미터로 양인 상수의 대각행렬이며,  $x_{pd}, f_{fd}$ 는 compliance frame에서의 원하는 위치, 힘벡터이고,  
 $b_p$ 는  $b_p \geq \|P\|$ 를 만족하는 파라미터 오차벡터( $P = P - \hat{P}$ )의 norm의 상한값이며, S는 대각행렬로 힘제어방향 요소만 1, 나머지 요소는 0인 compliance selection matrix이고,  $z \in R^n$ 는

$$z = W_s^T (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ a_f \end{bmatrix}, \quad \text{sgn}(z) = \begin{bmatrix} \text{sgn}(z_1) \\ \text{sgn}(z_2) \\ \vdots \\ \text{sgn}(z_p) \end{bmatrix} \text{이고,}$$

$K_d$ 는 설계파라미터로 양인 상수의 대각행렬이다.  
 제어칙 식(7)의 우변에서 처음 5항은 가능한한 비선형항을 소거시켜서 간섭효과를 줄이기 위한 feedforward항이고, 나머지 항은 전체 시스템을 안정하게 하기 위한 feedback항이다. 파라미터를 정확히 알 수 없는 경우 파라미터의 추정치를 사용하므로 운동방정식의 비선형항을 정확히 소거시킬 수 없고, 이로 인하여 발생하는 위치오차부분은 파라미터의 적용을 이용하는 적응제어기법을 이용하고 힘오차부분에 대해서는 파라미터 오차벡터의 norm의 상한값을 이용하여 스위칭 시켜줌으로써 해결하고 있다. 적응칙은 다음과 같은 gradient method를 사용한 다.

$$\dot{\hat{P}} = -\Gamma W_s^T (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} a_p \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

### 4. 안정도 해석

먼저 시스템의 안정도를 해석하기 위해 식(6)의 운동방정식에 식(7)의 제어칙을 대입하면 다음식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} M \left[ (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} \dot{a}_p \\ 0 \end{bmatrix} + M (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} \dot{a}_p \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \dot{M} (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} a_p \\ 0 \end{bmatrix} \right] \\ = W_s \dot{P} - (EJ)^T K_d \begin{bmatrix} a_p \\ a_f \end{bmatrix} - b_p (EJ)^T S (EJ)^{-T} W_s \cdot \text{sgn}(z) \end{aligned} \quad (10)$$

신호들의 점근적인 유계성 및 수렴성을 보이기 위해서 Lyapunov함수를 다음과 같이 선정한다.

$$V = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} a_p \\ \frac{1}{k_e} a_f \end{bmatrix}^T (EJ)^{-T} M (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} a_p \\ \frac{1}{k_e} a_f \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \dot{P}^T \Gamma^{-1} \dot{P} \quad (11)$$

이 Lyapunov함수 V의 1계 도함수는 식(10)을 이용하고, 적응칙 식(9)을 대입하면, 다음과 같이 전개시킬 수 있다

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \begin{bmatrix} a_p \\ \frac{1}{k_e} a_f \end{bmatrix}^T (EJ)^{-T} \left[ M \left[ (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} \dot{a}_p \\ \frac{1}{k_e} \dot{a}_f \end{bmatrix} + M (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} \dot{a}_p \\ \frac{1}{k_e} \dot{a}_f \end{bmatrix} \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{2} \dot{M} (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} a_p \\ \frac{1}{k_e} a_f \end{bmatrix} \right] + \dot{P}^T \Gamma^{-1} \dot{P} \right] \\ = & \begin{bmatrix} a_p \\ \frac{1}{k_e} a_f \end{bmatrix}^T (EJ)^{-T} \left[ W_s \dot{P} - (EJ)^T K_d \begin{bmatrix} a_p \\ a_f \end{bmatrix} - b_p (EJ)^T S (EJ)^{-T} W_s \cdot \text{sgn}(z) \right] \\ & - \dot{P}^T W_s^T (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} a_p \\ 0 \end{bmatrix} \\ = & \frac{1}{k_e} \left[ \begin{bmatrix} 0 \\ a_f \end{bmatrix} \right]^T (EJ)^{-T} W_s \dot{P} - b_p \begin{bmatrix} 0 \\ a_f \end{bmatrix}^T (EJ)^{-T} W_s \cdot \text{sgn}(z) \\ & - \begin{bmatrix} a_p \\ \frac{1}{k_e} a_f \end{bmatrix}^T K_d \begin{bmatrix} a_p \\ a_f \end{bmatrix} \\ \leq & \frac{1}{k_e} \left[ \|\dot{P}\| \cdot \|W_s^T (EJ)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ a_f \end{bmatrix}\| - b_p \begin{bmatrix} 0 \\ a_f \end{bmatrix}^T (EJ)^{-T} W_s \cdot \text{sgn}(z) \right] \\ & - \begin{bmatrix} a_p \\ \frac{1}{k_e} a_f \end{bmatrix}^T K_d \begin{bmatrix} a_p \\ a_f \end{bmatrix} \\ \leq & - \begin{bmatrix} a_p \\ \frac{1}{k_e} a_f \end{bmatrix}^T K_d' \begin{bmatrix} a_p \\ \frac{1}{k_e} a_f \end{bmatrix}, \quad K_d' = (I - S) K_d + k_e S K_d \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)에서  $\begin{bmatrix} a_p \\ \frac{1}{k_e} a_f \end{bmatrix}$ 는 점근적으로 0으로 수렴하므로  $a_p, a_f$ 와  $e_p, e_f$ 의 관계에서  $e_p, e_f, \dot{e}_p, \dot{e}_f$ 도 0으로 수렴함을 알 수 있고 따라서  $x_p, f_f, \dot{x}_p, \dot{f}_f$ 가 유계이므로 이에따라 다른 모든 신호들이 유계가 됨을 알 수 있다[9].

### 5. 시뮬레이션

이 절에서는 제한된 알고리즘의 타당성을 보이기 위해 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시한다.

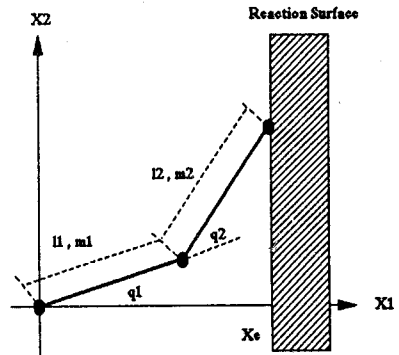


그림 1. 2-링크 매니퓰레이터와 Reaction Surface  
 Fig. 1. Two-link manipulator and reaction surface

시뮬레이션은 그림 1.의 2-링크 매니퓰레이터를 대상으로 하여  $x_1$ 축에 대해서는 한계제를 하고  $x_2$ 축에 대해서는 위치제어를 목적으로 하며, 그 운동방정식[7]은 다음과 같다.

$$M(q)\ddot{q} + Q(q, \dot{q}) + G(q) = \tau - J^T E_F^T F_F$$

여기서

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_2(l_2^2 + 2l_1l_2C_2 + l_1^2) + m_1l_1^2 & m_2(l_2^2 + l_1l_2C_2) \\ m_2(l_2^2 + l_1l_2C_2) & m_2l_2^2 \end{bmatrix}$$

$$-\frac{1}{2} M(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} m_2l_1l_2S_2\dot{q}_2 & \frac{1}{2}m_2l_1l_2S_2\dot{q}_2 \\ \frac{1}{2}m_2l_1l_2S_2\dot{q}_2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Q(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -2m_2l_1l_2S_2\dot{q}_1\dot{q}_2 - m_2l_1l_2S_2\dot{q}_2 \\ m_2l_1l_2S_2\dot{q}_1 \end{bmatrix}$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} m_2l_2gC_1 + m_2l_1gC_1 + m_1l_1gC_1 \\ m_2l_2gC_2 \end{bmatrix}$$

$$J(q) = \begin{bmatrix} -l_1S_1 & -l_2S_1 & -l_2S_2 \\ l_1C_1 + l_2C_1 & & l_2C_2 \end{bmatrix} \text{이고,}$$

$S_1, S_2, S_{12}, C_1, C_2, C_{12}$ 는 각각  $\sin(q_1), \sin(q_2), \sin(q_1+q_2), \cos(q_1), \cos(q_2), \cos(q_1+q_2)$ 를 나타내고,  $l_1, l_2$ 는 링크의 길이로 0.432m이고,  $m_1, m_2$ 는 링크의 질량으로  $m_1$ 은 15.91kg,  $m_2$ 는 11.36kg이며, interaction force는  $f_F = ke(x_1 - x_0)$ 로 주어지고,  $ke$ 는 주위환경의 강성으로  $ke=10^4 \text{N/m}$ 로 하였고,  $x_0$ 는 주위환경의 위치로  $x_0=0.432\text{m}$ 로 하였다.

시뮬레이션에서 cartesian space에서의 변위는 각각  $x_1(t) = l_1C_1 + l_2C_2, x_2(t) = l_1S_1 + l_2S_2$ 이고,

compliance selection matrix  $S$ 는  $S = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 이며, 위치제어방향과 힘제어방향으로의 변환은 각각  $x_p = x_2, x_f = x_1 - x_0$ 이고, 변환행렬  $E$ 는  $E = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ 이다.

원하는 위치궤적은  $x_{pd}=0.432[1 + 6\exp(-t/0.3) - 8\exp(-t/0.4)]\text{m}$ 이고, 원하는 힘궤적은  $f_{Fd} = 10\text{N}$ 으로 하였다.

먼저 파라미터들을 정확히 아는 경우의 결과는 그림 2~그림 3.에서와 같고, 파라미터  $m_2, ke$ 를 실제값의 70%인 7.952kg, 7000N/m라고 가정하고,  $m_2$ 의 오차의 상한값은 5kg,  $1/ke$ 의 오차의 상한값은 1/1000m/N이라고 했을때 결과는 그림 4.~그림 5.에서와 같다. 그림에서 보는 바와 같이  $ke$ 를 정확히 모르는 경우에도 만족할 만한 결과를 나타내고 있다. 제시된 제어기는 주위환경의 변형이 측정가능해야하고, interaction force의 미분값이 필요하지만 interaction force가 정밀하게 제어되고 있음을 알 수 있다.

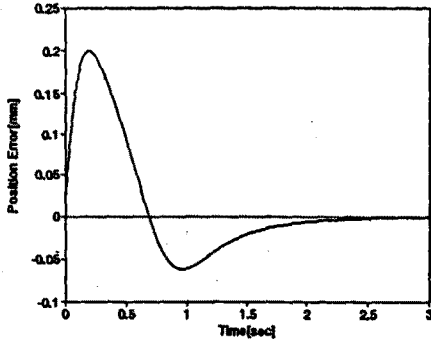


그림 2. 파라미터를 알고 있는 경우의 위치오차  
Fig 2. Position error of parameter known case

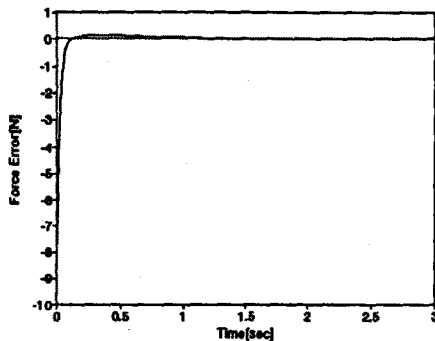


그림 3. 파라미터를 알고 있는 경우의 힘오차  
Fig 3. Force error of parameter known case

6. 결 론  
본 연구에서는 매니플레이터의 파라미터 뿐만 아니라 주위 환경의 강성에 대한 불확실성이 존재하는 경우의 위치/힘 제어를 제시하였다. compliance frame에서 매니플레이터 운동방정식을 구성하여 하나의 제어기로써 위치제어와 힘제어를 일괄적으로 제어할 수 있었으며 시스템의 안정도 및 위치, 힘 오차의 점근적 수렴성을 보장하였다. 제한된 제어기의 구성을 위해서는 interaction force의 미분값이 필요한데 이 조건을 완화시키기 위한 연구가 앞으로의 과제로 남는다.

#### 참 고 문 헌

- [1] W. S. Lu and Q. H. Meng, "Impedance Control with Adaption for Robotic Manipulators", IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. RA-7, no. 3, pp. 408-415, 1991.
- [2] M. Raibert and J. J. Craig, "Hybrid Position/Force Control of Manipulators", ASME J. Dynam. Syst., Measurement Contr., vol. 102, pp. 126-133, 1981.
- [3] Yoshikawa, T., "Dynamic Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators, Description of Hand Constraints and Calculation of Joint Deriving Force", in Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 1393-1398, 1987.
- [4] J. J. Slotine and W. Li, "Adaptive Strategies in Constrained Manipulation", in Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 595-601, 1987.
- [5] R. Kelly and R. Carelli, "Unified Approach to Adaptive Control of Robotic Manipulators", in Proc. IEEE Conf. Decision Contr. Austin, TX, Dec., 1988.
- [6] Y. H. Chen and S. Pandey, "Uncertainty Bound-Based Hybrid Control for Robotic Manipulators", IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. RA-6, no. 3, pp. 303-311, June, 1990.
- [7] R. Johansson, "Adaptive Control of Robot Manipulator Motion", IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. RA-6, no. 4, pp. 483-490, Aug., 1990.
- [8] H. Seraji, "Adaptive Force and Position Control of Manipulators", J. Robotic Syst. vol. 4, no. 4, pp. 551-578, 1987.
- [9] R. Ortega and M. W. Spong, "Adaptive Motion Control of Rigid Robots: a Tutorial", Automatica, vol. 25, no. 6, pp. 877-888, 1989.

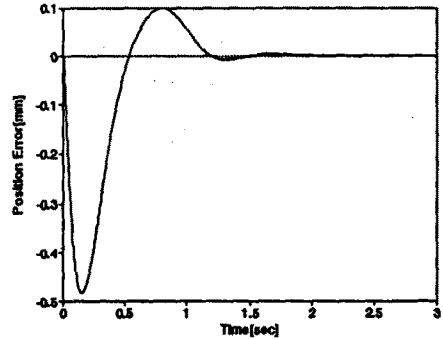


그림 4. 파라미터를 정확히 알 수 없는 경우의 위치오차  
Fig 4. Position error under parameter uncertainty

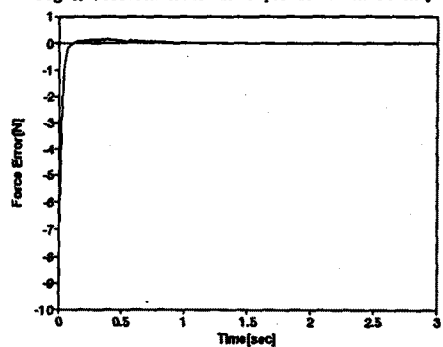


그림 5. 파라미터를 정확히 알 수 없는 경우의 힘오차  
Fig 5. Force error under parameter uncertainty