'93 한국자동제어학술회의논문집 (1993.10.20~22)

로보트 매니플레이터의 개선된 견실 및 적응제어기의 설계

°최형식, 김두형
한국기계연구원

An Improved Robust and Adaptive Controller Design for a Robot Manipulator

°Hyeung-Sik Choi, Doo-Hyeong Kim
Korea Institute of Machinery & Metals

Abstract

This paper presents a controller design to coordinate a robot manipulator under unknown system parameters and bounded disturbance inputs. To control the motion of the manipulator, an inverse dynamics control scheme is applied. Since parameters of the robot manipulators such as mass and inertia are not perfectly known, the difference between the actual and estimated parameters works as a disturbance force. To identify the unknown parameters, an improved adaptive control algorithm is directly derived from a chosen Lyapunov's function candidate based on the Lyapunov's Second Method.

A robust control algoritm is devised to counteract the bounded disturbance inputs such as contact forces and disturbing force coming from the difference between the actual and the estimated system parameters. Numerical examples are shown using three degree-of-freedom planar arm.

1. 서 론

최근 산업의 고도화에 따라 생산 시스템에 있어서 공정의 고속화 및 고정밀화를 요하게 되었다. 하지만 종래에 사용하던 로보트는 감속기를 채용함으로써 기계적 백래쉬, 큰 Static Torque등으로 제어정밀도가 저하되고 감속비 만큼의 속도 저하를 가져옴으로써 고속 고정밀화의 요구에 부합하기가 어렵게 되었다. 이에 반해 최근에는 빠른 응답효과를 가져오고 고속, 고정도의 작업을 가능하게 하는 로보트의 연구가 많이 행해지고있다(1,2). 하지만 이러한 로보트는 동작 제어시 매니플레이터의 질량이나 관성같은 파라미터의 측정오차나 다루는 불확실한 물체의 질량이나 관성의 추정오차는 교란으로 작용하여 원하지 않는 과도반응을 보이거나 심지어 시스템의 안정도에도 영향을 미친다. 이러한 매니플레이터의 제어에 있어서 추정 오차들을 줄이거나 상쇄시키기 위해 계산 토오크 방식에 기저를 둔 적응제어칙이 설계되었다[3,4,5]. 이 제어칙은 매니퓰레이터의 조인트 각 가속도에 대한 정보와 모르는 변수의 적응제어칙에 의한 추정치로 구성된 관성 행렬의 역치를 필요로 한다. 하지만 각 가속도는 측정하기가 용이하지 않고 역치는 항상 가능치 않아 발산할 수가 있어서 안정하지 못하다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 관성행렬의 미분치와 코리올리력 및 원심력의 Skew Symmetric 관계를 이용하여 계산이 용이한 적응제어칙이 설계되었다(6,7). 또한 불확실한 시스템에 대한 적응제어칙의 설계와 견실성에 대한 연구가 있었다(8).

한편 대부분의 로보트 매니퓰레이터는 스칼라형으로 원심력, 코리올리력, 및 관성력과 같은 비선형적인 동력학적 간섭력의 영향을 많이 받는다. 더구나 마찰력 및 다루는 여러 작업 물체와의 접촉력 등의 외란이 자주 매니퓰레이터에 작용한다. 이러한 비선형력들은 매니퓰레이터를 원하는 궤도로 제어하는 것을 어렵게 만든다. 더우기 시스템에 마찰력, 노이즈 및 작업물체나 주위환경과의 접촉에 의한 외란이 존재할 때 제어의 어려움 뿐만아니라 시스템의 안정도도 영향을 받게된다. 이러한 문제를 해결하는 제어방식으로 이들의 영향을 받지 않거나 적게 받고 원하는 동작을 이루는 견실제어칙이 설계되었다(10,11). 이 견실제어칙은 model reference control과 함께 설계되었다. 이 견실제어 방식은 응용되어 계산토오크 방식에 기저를 두고 로보트 매니퓰레이터의 제어에 적용되었다(12). 여기서 견실적응 제어칙도 고안되었으나 제어칙의 implementation이 용이하지않다.

본 논문에서는 파라미터의 정확한 값을 모르는 로보트 매니퓰레이터의 동작제어를 위하여 inverse dynamics 제어칙에 의해 매니퓰레이터를 제어한다. 하지만 시스템의 질량이나 관성같은 파라메터들이 불확실할 경우 추정오차가 발생한다. 따라서 적응제어칙에 의해 실제 변수치를 추정하여 측정오차를 줄이거나 상쇄시키는 적응 제어칙에 대하여 연구하였고 이는 조인트 각가속도나 관성행렬의 역치가 항상 존재하는 [3,4,5]에서의 문제들이 개선되었다. 동시에 적응제어로 완화 또는 상쇄할 수 없는 방해력이나 외란등의 동작을 방해하는 력들에 의해 시스템의 안정도가 영향을 받지않거나 적게 받는 견실 제어칙이 설계되었다. 이 견실제어칙은 (10,11)의 제어방식이나 본 논문에서는 리야푸노프 함수에서 직접 유도하였다.

2. 로보트의 다이내믹스 및 인버스다이내믹스 제어 알고리즘

n 개의 관절을 가진 로보트의 동방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$H(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})=\tau+J^T(q)F \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

여기서 q는 ($n\times 1$) 팔의 관절각 벡터이고, τ는 ($n\times 1$) 팔에 대한 입력토크 벡터이다. $H(q)$는 ($n\times n$) 관성행렬이고 $C(q,\dot{q})$는 올 원심력, 코리올리력, 및 중력을 포함하는 ($n\times 1$) 비선형 힘벡터이다. $J(q)$는 ($n\times n$) 자코비안행렬이다. F는 엔드 이펙터와 대상물체와의 상호접촉점에서 작용하는 힘과 모멘트를 나타내는 ($n\times 1$) 벡터이다. (1)에서 로보트의 $H(q)$와 $C(q,\dot{q})$를 구성하는 질량이나 관성은 정확히 측정하기 힘들며 더구나 작업중 질량이 알려지지않은 부하의 변동시 더욱 추정이 힘들다. 이러한 조건아래 로보트의 운동을 제어하기 위해서 다음의 인버스 다이내믹스 제어 알고리즘이 제안된다.

$$\tau=\overline{H}(q)(\ddot{q}_d+k_d\dot{e}+k_pe-U)+\overline{C}(q,\dot{q})+D(t) \quad \cdots\cdots\cdots (2)$$

여기서 $\overline{H}(q)$ 와 $\overline{C}(q,\dot{q})$는 각각 $H(q)$와 $C(q,\dot{q})$의 모르는 변수에 대한 불변의 근사한 추정치이다. U는 적응 및 견실제어를 위한 부가적인 입력 벡터이며, q_d는 원하는 조인트 각벡터이고, 상태 오차벡터는 $e=q-q_d$로 표현된다. 또한 $D(t)$는 입력교란 (input disturbance)이다. 제어입력식 (2)를 로보트 동방정식 (1)에 적용하면 다음의 식이 된다.

$$H(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})=\overline{H}(q)(\ddot{q}_d+k_d\dot{e}+k_pe-U)+\overline{C}(q,\dot{q})+D(t)+J^TF \quad \cdots\cdots\cdots (3)$$

(3)을 정리하면

$$\overline{H}(q)(\ddot{e}+k_d\dot{e}+k_pe)=\Delta H(q)\ddot{q}+\Delta C(q,\dot{q})+J^TF-\overline{H}(q)U \quad \cdots (4)$$

여기서 $\Delta H(q)=H(q)-\overline{H}(q)$이고 $\Delta C(q,\dot{q})=C(q,\dot{q})-\overline{C}(q,\dot{q})$이다. 위의 식을 정리하면,

$$\ddot{e}+k_d\dot{e}+k_pe=-\overline{H}^{-1}(q)(\Delta H(q)\ddot{q}+\Delta C(q,\dot{q})+J^TF+D(t))+U \quad \cdots\cdots\cdots (5)$$

적응제어에 적합한 식으로 유도하기위해 위의 식을 정리하면

$$\ddot{e}+k_d\dot{e}+k_pe=-\overline{H}^{-1}(q)(\Delta H(q)\ddot{q}_d-\Delta H(q)\ddot{q}_d+\Delta H(q)\ddot{q}+\Delta C(q,\dot{q})+J^TF+D(t))+U \quad \cdots\cdots\cdots (6)$$

(5)의 $\ddot{q}$는 (3)에서

$$\ddot{q}=H(q)^{-1}(\overline{H}(q)(N-U)+\overline{C}(q,\dot{q})+J^TF+D(t)) \quad \cdots\cdots (7)$$

여기서 $N=\ddot{x}_d+k_d\dot{e}+k_pe$. (7)을 (6)에 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned}\ddot{e}+k_d\dot{e}+k_pe &= \overline{H}^{-1}(q)W(q,\dot{q},\dot{q}_d)\Delta p \\ &- \overline{H}^{-1}(q)\Delta H\ddot{q}_d+H^{-1}\Delta H[H^{-1}(\overline{H}(N-U)+\Delta C \quad (8)\\ &+J^TF+D(t))]+\overline{H}^{-1}(D(t)+J^TF)+U_1+U_2\end{aligned}$$

여기서 $U=U_1+U_2$ 이고,

$$W(q,\dot{q},\ddot{q}_d)\Delta p=\Delta H\ddot{q}_d+\Delta C,\ \Delta p=\overline{p}-p.$$

W는 조인트 각위치와 각속도만의 측정을 필요로하고, $\overline{p}$는 모르는 변수 p에 대한 불변의 근사한 추정치이다. U_1은 적응제어에 적합한 식을 유도하기 위한 입력으로 다음과 같다.

$$U_1=-\overline{H}^{-1}W(q,\dot{q},\ddot{q}_d)\Delta\hat{p} \quad \cdots\cdots\cdots (9)$$

여기서 $W\Delta\hat{P}=\Delta H\ddot{q}_d+\Delta\hat{C}$, $\Delta\hat{p}=\overline{p}-\hat{p}$이고 $\hat{p}$는 변수의 추정치로서 적응제어에 의해 온라인으로 실제치를 추정한다. 또한 $\Delta H=\overline{H}-\hat{H}$, $\Delta\hat{C}=\overline{C}-\hat{C}$이고, $\hat{H}$와 $\hat{C}$는 H와 C의 추정 행렬이다. 위의 식을 정리하면,

$$\ddot{e}+k_d\dot{e}+k_pe=\overline{H}^{-1}(q)W(q,\dot{q},\ddot{q}_d)\tilde{p}+\Omega(q,\dot{q},\ddot{q}_d,t)+U_2 \quad \cdots (10)$$

여기서 $\tilde{p}=\hat{p}-p$,

$$\Omega=\omega_1+\Omega_2(-K_dE)+\Omega_2(-K_pE)+\Omega_2(-U_2), \quad \cdots\cdots\cdots (11)$$

또한

$$\begin{aligned}\omega_1 =&-(I-\overline{H}^{-1}H)\ddot{q}_d+(H^{-1}\overline{H}-I)\ddot{q}_d+(I-\overline{H}^{-1}H)H^{-1}\Delta H\ddot{q}_d\\ &+(H^{-1}-\overline{H}^{-1})(\Delta C+\Delta\hat{C}-J^TF+D(t))+\overline{H}^{-1}(D(t)-J^TF)\end{aligned}$$

$$\Omega_2=(H^{-1}\overline{H}-I)$$

또한 (11)에서

$$\overline{H}^{-1}\Delta H=I-\overline{H}^{-1}H,\ \overline{H}^{-1}\Delta HH^{-1}\overline{H}=H^{-1}\overline{H}-I$$이다.

3. 개선된 적응제어기의 설계

적응제어기와 견실제어기는 리야푸노프 함수를 이용해서 다음과 같이 유도된다. 이를 위해서 (10)은 다음의 식으로 표기된다.

$$\dot{X}+CX+GX=W_o\tilde{p}+\Omega+U_2 \quad \cdots\cdots\cdots (12)$$

여기서 $W_o=\overline{H}^{-1}W$이고 X는 ($n\times 1$) 벡터이고, C와 G는 ($n\times n$) 정정대각행렬(positive definite diagonal matrix)이다. (12)는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{X}=Y,\ \dot{Y}=-CY-GX+W_o(X,Y)\tilde{p}+\Omega(t,X,Y)+U \quad \cdots\cdots (13)$$

리야푸노프 함수 $V=V(X,Y)$는 다음과 같이 선택된다.

$$2V = <Y+CX, Y+CX> + <Y,Y> + 2<GX,X> + <\tilde{p}, \Gamma\tilde{p}> \quad (14)$$

여기서 G는 정정행렬 이므로 $V(t,X,Y) \geq 0$ 이다. 안정한 시스템이 되기위해서는 $\dot{V} \equiv \frac{d}{dt} V(X(t),Y(t)) \leq 0$이 되어야한다. 이후부터 편의상 $\Omega(t,X,\dot{X})$를 Ω로 표기한다. 리아푸노프 함수를 미분하면 다음의 식을 얻는다.

$$\begin{aligned}\dot{V} &= <Y+CX, -CY-GX+\Omega+CY> + <Y, -CY-GX+\Omega> + 2<GX,Y> \\ &\quad + <2Y+CX, W_o\tilde{p}> + <\tilde{p}, \Gamma\tilde{p}> \\ &= -<CX,GX> - <Y,CY> + <2Y+CX,\Omega> + <2Y+CX, W_o\tilde{p}> + <\tilde{p}, \Gamma\tilde{p}>\end{aligned} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (15)$$

시스템의 안정도의 충분조건을 위해 $\dot{V} \leq 0$인 조건을 구한다. (15)에서 처음 두항은 negative definite의 조건을 만족한다. 변수 추정오차에의한 4,5번째 항은 다음과 같이 표현되고

$$\begin{aligned}<2Y+CX, W_o\tilde{p}> + <\tilde{p}, \Gamma\tilde{p}> &= (W_o\tilde{p})^T(2Y+C) + \tilde{p}^T\Gamma\dot{\tilde{p}} \\ &= \tilde{p}^T(W_o^T(2Y+CX) + \Gamma\dot{\tilde{p}})\end{aligned} \quad \cdots (16)$$

이들을 제거하기위한 적응제어기는 다음과 같이 설계된다.

$$\dot{\tilde{p}} = -\Gamma^{-1}W_o^T(2Y+CX) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (17)$$

마찰력 및 여러 물체와의 접촉력 등의 외란으로 인한 3번째 항은 다음과 같이 표현된다.

$$<2Y+CX, \Omega+U_2> = (2Y+CX)^T(\Omega+U_2) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (18)$$

여기서 $\Omega = \Omega_1 + \Omega_2(-U_2)$이고 이 외란에 견실한 제어칙은 다음과 같이 설계된다.

4. 견실제어칙의 설계와 안정도의 연구

(18)을 제어하기위해 다음의 견실제어칙이 설계된다.

$$\begin{aligned}U_2 &= -\frac{\mu}{\|\mu\|}\rho \quad \text{if} \quad \|\mu\| > \varepsilon \\ U_2 &= -\frac{\mu}{\varepsilon}\rho \quad \text{if} \quad \|\mu\| \leq \varepsilon\end{aligned} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (19)$$

여기서 $\mu = (2Y+CX)\rho$이고 ε은 임의의 작은 양의 상수이다.

또한 ρ는 다음과 같이 정의된다.

$$\|\Omega\| \leq \|\omega_1\| + \|\Omega_2(-K_p)\|\|X\| + \|\Omega_2(-K_b)\|\|Y\| + \|\Omega_2\|\rho = \rho \quad \cdots (20)$$

여기서 $\rho = b_1 + b_2\|X\| + b_3\|Y\|$이고

$b_1 = (1-\|\Omega_2\|)^{-1}\|\omega_1\|$, $b_2 = (1-\|\Omega_2\|)^{-1}\|\Omega_2(-K_p)\|$,
$b_3 = (1-\|\Omega_2\|)^{-1}\|\Omega_2(-K_b)\|$

ρ가 양의 함수(positive definete)가 되기위한 조건은 다음과 같다.

$$\max\|H^{-1}\overline{H} - I\| < 1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (21)$$

(15)에 견실제어칙 (19)를 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{V} &= -<CX,GX> - <Y,CY> + <2Y+CX, \Omega+U_2> \\ &= -X^TCGX - Y^TCY + (2Y+CX)^T(\Omega+U_2) \\ &\leq -X^TCGX - Y^TCY + (2Y+CX)^T\left(-\frac{\mu}{\|\mu\|}\rho + U_2\right)\end{aligned} \quad \cdots (22)$$

(22)에서 $\|\mu\| > \varepsilon$이면 (22)의 3번째 항은 사라진다. $\|\mu\| < \varepsilon$ 일때 , 최소값이 $\|\mu\| = (\frac{1}{2})\varepsilon$이고 (22)는 다음과 같이된다.

$$\begin{aligned}\dot{V} &\leq -\lambda_{cg}X^TX - \lambda_cY^TY + (\varepsilon/4)(b_1+b_2+b_3\|Y\|) \\ &\leq -\lambda_{cg}(\|X\| - \varepsilon b_2/(8\lambda_{cg}))^2\lambda_g(\|Y\| - \varepsilon b_3/(8\lambda_{cg}))^2 + d\end{aligned} \quad (23)$$

여기서 $d = (\varepsilon/4)b_1 + (\varepsilon b_2)^2/(64\lambda_{cg}) + (\varepsilon b)3)^2/(64\lambda_g)$이고, λ_{cg}와 λ_g는 각각 CG와 G 행렬의 최소 아이겐밸류 값이다. (22)에서 $\dot{V} \leq 0$의 조건을 만족하기위해서 $\|X\| \leq \eta_x$, $\|Y\| \leq \eta_y$이고

$\eta_x = \varepsilon b_2/(8\lambda_{cg}) + (D/\lambda_{cg})^{1/2}$

$\eta_y = \varepsilon b_3/(8\lambda_g) + (D/\lambda_g)^{1/2}$이다. 위의 식은 페루프 시스템의 상태벡터가 제한된 지역안에 한정되어 있다는 것을 의미한다. 따라서 오차벡터는 bounded 된다는 것을 의미한다. 특히 $\varepsilon \to 0$ 일때 $\eta_x \to 0$, $\eta_y \to 0$이어서 오차벡터의 한계영역이 작아진다.

5. 시뮬레이션

로보트 매니퓰래이터의 동작 제어를 위한 적응 및 견실제어 어기 설계에 대한 시뮬레이션을 하였다. 3축 로보트를 사용하였고 질량을 모르는 물체를 이동시키는 작업을 하였다. 각 팔의 질량과 길이는 다음의 표 1과 같이 정의 되었고 질량 중심은 각 팔의 중심점에 있다고 가정하였다.

로보트 팔	길 이	질 량	관 성
L1	0.4 m	2 kg	0.2 Kg-m*m
L2	0.4 m	2 kg	0.2 Kg-m*m
L3	0.3 m	1 kg	0.1 Kg-m*m

표 1. 로보트 팔의 질량 및 관성

원하는 운동식은 서로 다른 3가지 주파수의 삼각함수를 사용하였다. 그림 1-1은 로보트의 구동을 위해 inverse dynamics방식의 제어만을 적용하였는데 각 팔의의 질량과 관성을 알 수 없어서 초기에 추정하였는데 그 오차율이 질량(60%)이고 관성(67%) 이었다. 더우기 로보트가 작업중에 외부 환경이나 작업체와 접촉하여 이 때 발생하는 충격력이 로보트의 운동을 방해하는 경우를 나타내었다. 이 충격력은 동작후 2초경에 짧은 순간동안 일어남으로써 impulse력의 형태로 표시될 수 있고 여기서는 0.2초 동안 2000 Newton의 충격력으로 가정되었다. 이 충격력으로 인하여 원하는 궤도와 실제 궤도 간의 오차가 로보트 동작 후 2초경에 크게 발생하는 것을 볼 수있다.

이 충격력을 완화 혹은 상쇄시키기 위해 견실 제어칙을 적용하였고 동시에 적응제어칙에 의해 모르는 변수를 추정하여 계산토오크 제어칙에 반영함으로써 발생오차를 상당히 줄일 수 있음을 그림1-2를 통하여 알 수 있다. 그림 1-3에서는 실제 질량과 관성을 적응 제어칙에 의해 추정하는 것을 나타내었다. 그림 2-1 에서는 초기 2초동안 질량과 관성을 정확히 알고있는 작업물체를 이동시키는 중 물체의 일부를 내려놓음으로써 질량과 관성의 변화율이 각각 (67%)와 (76%)로 생겨 났을 때이다. 따라서 2초 후 부터 위치의 오차가 크게 증가하였음을 알 수있다. 그림 2-2에서 적응 및 견실 제어칙을 적용함으로써 발생한 방해력을 감소 혹은 상쇄시킴을 알 수있다. 그림 2-3에서는 적응제어칙에 의해 변화된 질량과 관성을 추정하는 것을 보여준다.

6. 결 론

불확실한 로보트 매니퓰레이터 시스템의 제어를 위한 적응 및 견실제어칙을 설계하였다. 이 제어칙은 리아푸노프 방식의 안정도 이론에 바탕을 두고 설계되었다. 한계된 외부로부터의 충격량이나 질량 및 관성과 같은 변수의 변화내에도 적응제어칙은 실제변수를 잘 추정하고 동시에 견실제어칙은 내부의 추정오차나 충격력등의 외란을 견실하게 대처하여 원하는 다이내믹스를 성취하는데 영향을 적게받는 것을 시뮬레이션을 통하여 알 수있다. 또한 적응제어칙은 관절각과 각속도만의 측정을 필요로 하기에 실제 로보트의 제어에 쉽게 적용할 수가 있다. 특히 적응제어칙에 의한 실제 변수의 추정후에는 견실제어칙만의 활용으로 원하는 출력을 얻을 수가 있다.

시뮬레이션에 의하면 큰 충격력에 의해 적응제어에 의한 추정치의 급격한 변화를 볼 수 있는데 앞으로 이에 대한 연구가 필요하리라 사료된다.

참고문헌

[1] H. Asada, and T. Kanade, "Control of Direct-Drive Arm," *ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control*, vol. 105, No. 3 1983.

[2] H. Asada, and K. Youcef-Toumi, "Analysis and Design of a Direct-Drive Arm with a Five-Bar-Link Parallel Drive Mechanism", *ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control*, vol. 106, Sep. 1984.

[3] J. J. Craig, P. Hsu, and S. Sastry, "Adaptive Control of Mechanical Manipulators", *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, San Francisco, CA, March 1986.

[4] R. Ortega, and M.W. Spong, "Adaptive Motion Control of Rigid Robots: a Tutorial", *Proc. of the 27th Conf. on Decision and Control*, 1988.

[5] R.H. Middleton, and G.C. Goodwin, "Adaptive Computed Torque Control for Rigid Link Manipulators", *Systems and Control Letters*, Vol. 10, 9-16 1988.

[6] N. Sadegh, and R. Horowitz, "Stability Analysis of an Adaptive Controller for Robot Manipulators", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Raleigh, NC, 1987.

[7] J.J. Slotin, and W. Li, "On the Adaptive Control of Robot Manipulators," *ASME Winter Annual Meeting*, Anaheim, CA., 1986.

[8] J. S. Reed, and P. A. Ioannou, "Instability Analysis and Robust Adaptive Control of Robotic Manipulators", *Proc. of the 27th Conf. on Decision and Control*, 1988.

[9] L. Cai, and A.A. Goldenberg, "Robust Control of Unconstrained Maneuver and Collision for a Robot Manipulator with Bounded Parameter Uncertainty", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1010-1015 1988.

[10] Y.H. Chen, "On the deterministic Performance of Uncertain Dynamical Systems", *Int. J. of Control*, vol. 43. No. 5, 1557-1579 1986.

[11] G. Leitmann, "Guaranteed Asymptotic Stability for Some Linear Systems with Bounded Uncertainties", *J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 101. Sep. 1979.

[12] Y.H. Chen, "Robust Computed Torque Scheme for Mechanical Manipulators: Nonadaptive Versus Adaptive", *J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 113, 324-327 1991.

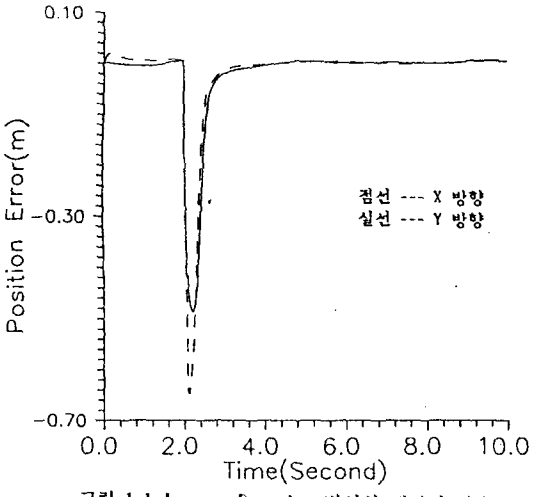

그림 1-1 Inverse Dynamics 방식의 제어만 적용
(외부의 충격력 발생)

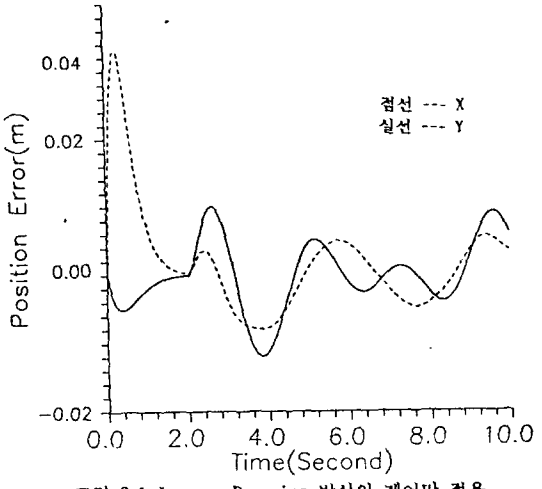

그림 2-1 Inverse Dynamics 방식의 제어만 적용
(질량과 관성의 변화)

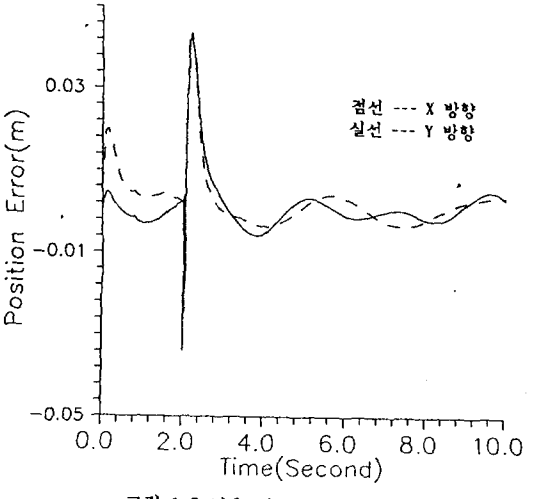

그림 1-2 적응 및 견실 제어의 적용
(외부의 충격력 발생)

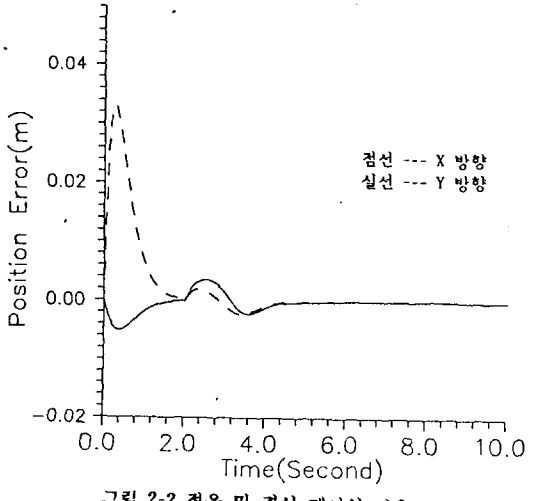

그림 2-2 적응 및 견실 제어의 적용
(질량과 관성의 변화)

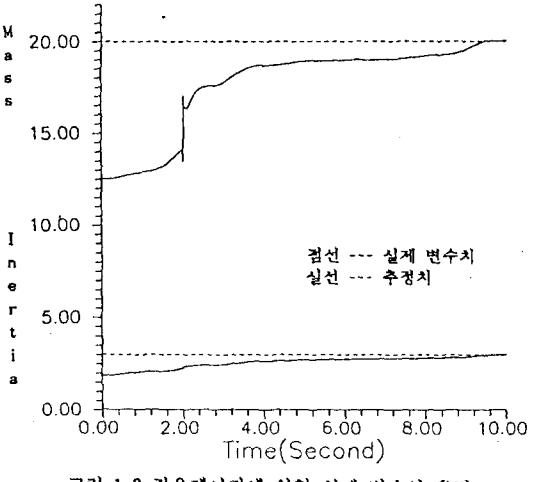

그림 1-3 적응제어기에 의한 실제 변수의 추정

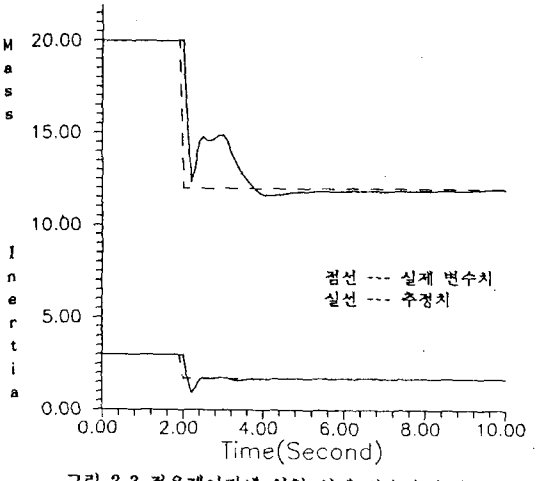

그림 2-3 적응제어기에 의한 실제 변수의 추정