

로봇 매니퓰레이터의 개선된 견실 및 적응제어기의 설계

최 형 식*, 김 두 형**

An improved Robust and Adaptive Controller Design for a Robot Manipulator

Hyeung-Sik Choi*, Doo-hyeong Kim**

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

Key Words : (견실 제어) Robust control, (적응 제어) Adaptive Control, (임계외란 입력) Bounded disturbance inputs, Lyapunov's Second Method

1. 서 론

최근 산업의 고도화에 따라 생산시스템에 있어서 공정의 고속화 및 고정밀화를 요하게 되었고 로봇트는 중요한 도구로서 사용되었다. 하지만 종래에 사용하던 로봇트는 감속기를 채용함으로써 기계적 백래쉬, 큰 정적

토크 등으로 제어정밀도가 저하되고 감속비 만큼의 속도 저하를 가져오므로써 고속 고정밀화의 요구에 부합하기가 어렵게 되었다. 이에 반해 최근에는 빠른 응답효과를 가져오고 고속, 고정도의 작업을 가능하게 하는 로봇트의 연구가 많이 행해지고 있다^{1,2)}. 하지만 이러한 로봇트는 동작 제어시 매니퓰레이터의 질량이나 관성값

* 한국해양대학교 기계공학과

** 한국기계연구원

은 변수의 측정오차나 다루는 불확실한 물체의 질량이나 관성의 추정오차로 인한 교란으로 원하지 않는 과도 반응을 보이거나 심지어 시스템의 안정도에도 영향을 미친다. 이러한 매니퓰레이터의 제어에 있어서 추정오차들을 줄이거나 상쇄시키기 위해 계산토크 방식에 기저를 둔 적응제어칙이 설계되었다^(3,4,5). 이 제어칙은 매니퓰레이터의 조인트 각가속도에 대한 정보와 적응제어칙에 의한 변수의 추정치로 구성된 관성 행렬의 역치를 필요로 한다. 하지만 각 가속도는 측정하기가 용이하지 않고 역치는 항상 가능한 것만이 아니고 발산할 수가 있어서 안정하지 못한 경우가 있다. 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 현실성에 대한 연구가 있었다⁽⁸⁾.

한편 대부분의 로봇 매니퓰레이터는 스칼라형으로 원심력, 코리올리력, 및 관성력과 같은 비선형적인 동역학적 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 뿐만 아니라 시스템의 안정도도 영향을 받게 된다. 이러한 문제를 해결하는 제어방식으로 이들의 영향을 받지 않거나 적게 받고 원하는 동작을 이루는 건설제어기가 설계되었다^(9,10,11). 이 건설제어기는 model reference control과 함께 설계되었다. 이 건설제어 방식은 응용되어 계산토크 방식에 기저를 두고 로봇 매니퓰레이터의 제어에 적용되었으나 수식적인 계산이 어려워져 제어기의 실제 적용이 용이하지 않다⁽¹²⁾.

본 논문에서는 질량과 관성같은 변수의 정확한 값을 모르는 로봇 매니퓰레이터의 제어시에 인버스다이내믹스 제어를 매니퓰레이터에 적용한다. 이때 시스템의 질량이나 관성같은 변수들의 추정치와 실제치 사이에 추정오차가 발생하는데 이 오차는 시스템을 교란시키므로 실제 변수치를 추정하여 발생된 오차를 줄이거나 상쇄시키는 적응제어기를 제안하였다. 이는 (3, 4, 5)의 방법에서 요구되는 조인트 각가속도의 측정이 필요 없다. 또한 위의 방법에서는 관성행렬의 역치가 존재하지 않을 가능성이 있는데 본 논문의 방법으로는 이를

배제할 수 있도록 개선되었다. 동시에 적응제어로 완화 또는 상쇄할 수 없는 방해력이나 외란등에 의해 시스템의 안정도가 영향을 받지않거나 적게 받도록 제어하는 건설제어기가 제안되었다. 이 건설제어기는 (10, 11)의 제어방식이나 본 논문에서 직접 고안한 리아푸노프 함수를 이용하여 설계되었다.

2. 로봇의 다이내믹스 및 인버스다이내믹스 제어 알고리즘

n개의 관절을 가진 로봇의 동방정식은 아래와 같이 표현된다.

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

여기서 q 는 팔의 $(n \times 1)$ 관절각 벡터이고, τ 는 팔에 대한 $(n \times 1)$ 입력토크 벡터이다. $H(q)$ 는 $(n \times n)$ 관성행렬이고 $C(q, \dot{q})$ 는 원심력, 코리올리력, 마찰력 및 중력을 포함하는 $(n \times 1)$ 비선형 힘벡터이다. $J(q)$ 는 자코비안 행렬이며 F 는 말단효과장치와 대상물체와의 상호접촉점에서 작용하는 힘과 모멘트를 나타내는 $(n \times 1)$ 벡터이다. (1)에서 로봇의 $H(q)$ 와 $C(q, \dot{q})$ 를 구성하는 질량이나 관성은 정확히 측정하기 힘들며 더구나 질량과 관성을 모르는 작업물체의 이동시에 이들의 변동은 항상 가능하다. 이러한 상황아래 로봇의 운동을 제어하기 위해서 다음의 인버스다이내믹스 제어 알고리즘이 제안된다.

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

여기서 $\bar{H}(q)$ 와 $\bar{C}(q, \dot{q})$ 는 각각 $H(q)$ 와 $C(q, \dot{q})$ 를 구성하고 있는 질량, 관성, 및 마찰력과 같은 모르는 변수에 대한 불변의 근사한 추정치로 구성되어 있다. U 는 적응제어를 위한 제어입력을 포함하고 건설제어를 위한 제어입력으로 구성되어 있으며, q_d 는 원하는 관절각벡터이고, 상태오차벡터는 $e = q_d - q$ 로 표현된다. 또한 $D(t)$ 는 입력교란(input disturbance)이다. 제어입력식 (2)를 로봇 동방정식(1)에 적용하면 다음의 식이 된다.

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) = \bar{H}(q)(\ddot{q}_d + k_d \dot{e} + k_p e - U) + \bar{C}(q, \dot{q}) + D(t) + J(q)^T F \quad (3)$$

(3)을 정리하면

$$\begin{aligned} \bar{H}(q)(\ddot{e} + k_d\dot{e} + k_p e) &= \Delta H(q)\ddot{q} + \Delta C(q, \dot{q}) \\ &\quad - J(q)^T F - D(t) + \bar{H}(q)U \end{aligned} \quad (4)$$

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

$$\begin{aligned} \ddot{e} + k_d\dot{e} + k_p e &= \bar{H}^{-1}(q)\{\Delta H(q)\ddot{q} + \Delta C(q, \dot{q}) \\ &\quad - J(q)^T F - D(t)\} + U \end{aligned} \quad (5)$$

(3)과 (4)의 방법에서 (2)의식에서의 $H(q)$ 와 $C(q, \dot{q})$ 를 모르는 변수에 대한 추정치는

$\hat{H}(q)$ 와 $\hat{C}(q, \dot{q})$ 이고 이는 적응제어기에 의해 온라인으로 계속 변한다. 하지만 적응제어기에는 $\hat{H}(q)$ 의 역행렬이 요구되고 어떤 경우에는 $\|\hat{H}^{-1}\|$ 의 값이 무한대에 가깝게 되는 경우가 야기된다. 이와는 달리 인버스 다이내믹스 제어방법으로는 $\bar{H}(q)$ 가 항상 일정하기 때문에 (5)에서 항상 역행렬이 존재한다. 적응제어에 적합한 식으로 유도하기 위해 위의 식을 정리하면

$$\begin{aligned} \ddot{e} + k_d\dot{e} + k_p e &= \bar{H}^{-1}(q)\{\Delta H(q)\ddot{q}_d - \Delta H(q)\ddot{q}_d \\ &\quad + \Delta H(q)\ddot{q} + \Delta C(q, \dot{q}) - J(q)^T F \\ &\quad - D(t)\} + U \end{aligned} \quad (6)$$

(6)의 우측항을 관절각의 일차미분식으로 표현하기 위하여 이 항중 \ddot{q} 를 (3)에서 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned} \ddot{q} &= H(q)^{-1}\{\bar{H}(q)(\ddot{q}_d + k_d\dot{e} + k_p e - U) - \Delta C(q, \dot{q}) \\ &\quad + J(q)^T F + D(t)\} \end{aligned} \quad (7)$$

이상으로 편의상 $H(q)$, $\bar{H}(q)$, $\Delta C(q, \dot{q})$, $J(q)^T$ 을 각각 H , \bar{H} , ΔC , J^T 로 표현한다. (7)을 (6)에 대입하여 정리하면

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

여기서 $U = U_1 + U_2$ 이고 U_1 은 적응제어에 적합한 식을 유도하기 위한 입력이며 U_2 는 전실제어기이다. 또한

$W(q, \dot{q}, \ddot{q}_d)\Delta p = \Delta H\ddot{q}_d + \Delta C$, $\Delta p = \bar{p} - p$ 이다. 여기서 $W(q, \dot{q}, \ddot{q}_d)$ 는 $\Delta H(q)$ 와 $\Delta C(q, \dot{q})$ 로 구성되어 엔코더나 타코메터로 측정 가능한 관절각위치와 각속도만 필요로 하고, $(m \times 1)$ 벡터 \bar{p} 는 $H(q)$ 와 $C(q, \dot{q})$ 를 구성하는 알려지지 않은 변수인 질량과 관성과 같은 것으로 구성된 $(m \times 1)$ 벡터 p 에 대한 불변의 근사한 추정치이다. (8)을 정리하면,

$$\begin{aligned} \ddot{e} + k_d\dot{e} + k_p e &= \bar{H}^{-1}W(q, \dot{q}, \ddot{q}_d)\Delta p + \Omega_1 \\ &\quad + \Omega_2(k_d\dot{e}) + \Omega_2(k_p e) \\ &\quad + \Omega_2(-U_2) + U_1 + U_2 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= \bar{H}^{-1}\Delta H[H^{-1}\{\bar{H}(\ddot{q}_d - U_1) - \Delta C + J^T F \\ &\quad + D(t)\}] - \bar{H}^{-1}(\Delta H\ddot{q}_d + J^T F + D(t)) \\ \Omega_2 &= \bar{H}^{-1}\Delta H\bar{H}^{-1}\bar{H} \end{aligned}$$

U_1 은 (9)의 $\bar{H}^{-1}W(q, \dot{q}, \ddot{q}_d)\Delta p$ 을 적응제어에 적합한 식으로 유도하기 위한 입력으로 다음과 같다.

$$U_1 = -\bar{H}^{-1}W(q, \dot{q}, \ddot{q}_d)\Delta \hat{p} \quad (10)$$

여기서 $W\Delta \hat{p} = \Delta \hat{H}\ddot{q}_d + \Delta \hat{C}$, $\Delta \hat{p} = \bar{p} - \hat{p}$ 이고 $(m \times 1)$ 벡터 \hat{p} 는 변수의 추정치로서 적응제어에 의해 온라인으로 실제치를 추정한다. 또한 $\Delta \hat{H} = \hat{H} - \bar{H}$, $\Delta \hat{C} = \hat{C} - \bar{C}$ 이고, \hat{H} 와 \hat{C} 는 각각 H 와 C 의 추정 행렬이다. (10)을 (9)에 적용하고 정리하면,

$$\ddot{e} + k_d\dot{e} + k_p e = \bar{H}^{-1}W(q, \dot{q}, \ddot{q}_d)\bar{p} + \Omega + U_2 \quad (11)$$

여기서 $\bar{p} = \hat{p} - p$ 이고,

$$\Omega = \Omega_1 + \Omega_2(k_d\dot{e}) + \Omega_2(k_p e) + \Omega_2(-U_2) \quad (12)$$

(9)에서 다음의 관계를 이용하여 (12)의 Ω_1 과 Ω_2 를 정리하면

$$\begin{aligned} \bar{H}^{-1}\Delta H &= \bar{H}^{-1}H - I, \\ \bar{H}^{-1}\Delta H\bar{H}^{-1}\bar{H} &= I - \bar{H}^{-1}\bar{H} \\ \bar{H}^{-1}\Delta H\bar{H}^{-1} &= \bar{H}^{-1} - \bar{H}^{-1}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= (I - \bar{H}^{-1}\bar{H})\ddot{q}_d + (\bar{H}^{-1} - \bar{H}^{-1})\Delta \hat{H}\ddot{q}_d \\ &\quad - (\bar{H}^{-1}H - I)\ddot{q}_d + (\bar{H}^{-1} - \bar{H}^{-1})(\Delta \hat{C} - \Delta C \end{aligned}$$

$$+ J^T F + D(t)) - \bar{H}^{-1}(D(t) + J^T F).$$

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

3. 개선된 적응제어기의 설계

매니퓰레이터의 제어를 위한 인버스다이내믹스 제어기와 적응제어에 적합한 제어입력의 적용으로 (11)과 같은 오차상태 방정식이 생겨난다. 하지만 (11)의 우변에 입력외란과 추정오차로 인한 외란이 원하는 출력을 얻는 것을 방해한다. 이의 제어를 위해 적응제어기와 견실제어기가 설계되고, 이 적응제어기와 견실제어기는 리아푸노프 함수를 이용해서 다음과 같이 유도된다. 이를 위해서 (11)은 다음의 식으로 표기된다.

$$\dot{X} + CX + GX = W_o(X, Y, t)\hat{p} + \Omega(X, Y, t) + U_2 \quad (13)$$

여기서 $X = e$, $C = k_d$, $G = k_p$ 이다. 또한 $W_o = \bar{H}^{-1}W(X, Y, t)$ 이고 X 와 Y 는 $(n \times 1)$ 오차상태벡터이며 C 와 G 는 제어이득으로 구성된 $(n \times n)$ 정정대각행렬 (positive definite diagonal matrix)이다. (13)은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{X} = Y,$$

$$\dot{Y} = -CY - GX + W_o(X, Y, t)\hat{p} + \Omega(X, Y, t) + U_2 \quad (14)$$

일반적으로 리아푸노프 함수를 이용한 안정도의 증명에서 (14)의 식을 이용하는 것과 달리 상태방정식을 이용하여 리아푸노프식 (lyapunov Equation)을 풀어야 하는데 본 논문의 방법으로는 리아푸노프 함수 $V = V(X, Y)$ 를 다음과 같이 선택함으로써 리아푸노프 식을 풀지않는 장점이 있다.

$$2V = \langle Y + CX, Y + CX \rangle + \langle Y, Y \rangle + 2 \langle GX, X \rangle + \langle \hat{p}, \Gamma \hat{p} \rangle \quad (15)$$

여기서 G 는 $(n \times n)$ 정정대각행렬이고 Γ 는 $(m \times m)$ 정정대각행렬이므로 $V(t, X, Y) \geq 0$ 이다. 안정한 시스템이 되기 위해서는 $V = \frac{d}{dt}V(X(t), Y(t)) \leq 0$ 이 되어야

한다. 이후부터 편의상 $W_o(X, Y, t)$, $\Omega(X, Y, t)$ 를 W_o, Ω 로 표기한다. (15)의 리아푸노프 함수를 미분하면 다음의 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \langle Y + CX, -CY - GX + \Omega + U_2 + CY \rangle \\ & + \langle Y, -CY - GX + \Omega + U_2 \rangle + 2 \langle GX, Y \rangle \\ & + \langle 2Y + CX, W_o \hat{p} \rangle + \langle \hat{p}, \Gamma \hat{p} \rangle \\ = & - \langle CX, GX \rangle - \langle Y, CY \rangle + \langle 2Y + CX, \Omega \\ & + U_2 \rangle + \langle 2Y + CX, W_o \hat{p} \rangle + \langle \hat{p}, \Gamma \hat{p} \rangle \quad (16) \end{aligned}$$

시스템의 안정도의 충분조건을 위해 $\dot{V} \leq 0$ 인 조건이 요구된다. (16)에서 처음 두항은 음의정의(negative definite)의 조건을 만족한다. 변수 추정오차에 의한 네번째와 다섯번째 항은 다음과 같이 표현되고

$$\begin{aligned} & \langle 2Y + CX, W_o \hat{p} \rangle + \langle \hat{p}, \Gamma \hat{p} \rangle \\ = & (W_o \hat{p})^T (2Y + CX) + \hat{p}^T \Gamma \hat{p} \\ = & \hat{p}^T \{W_o^T (2Y + CX) + \Gamma \hat{p}\} \quad (17) \end{aligned}$$

이들을 제거하기 위한 적응제어기는 (17)의 식을 0으로 놓고 풀면 다음과 같이 설계된다.

$$\dot{\hat{p}} = -\Gamma^{-1}W_o^T (2Y + CX) \quad (18)$$

여기서 \hat{p} 는 질량이나 관성과 같은 불확실한 변수의 추정치로서 원하는 관절각과 관절각속도와 실제 관절각과 관절각속도 간의 오차상태벡터의 입력을 포함하는 (18)을 적분하여 온라인으로 실제 변수를 추정한다. 또한 (18)에서 질량과 관성은 불변함으로 $\dot{p} = 0$ 이고 따라서 $\hat{p} = \dot{p}$ 이다.

(16)에서 추정오차로 인한 교란 및 작업물체와의 접촉력과 같은 외란을 포함하는 세번째 항은 다음과 같이 표현된다.

$$\langle 2Y + CX, \Omega + U_2 \rangle = (2Y + CX)^T (\Omega + U_2) \quad (19)$$

여기서 외란항 Ω 는 (12)에서 정의되고 이 외란에 견실한 제어기는 다음과 같이 설계된다.

4. 견실제어기의 설계와 안정도의 연구

(19)의 외란항 Ω 를 제어하기위해 다음의 견실제어기가 설계된다.

$$\begin{cases} U_2 = -\frac{\mu}{\|u\|} \rho & \text{if } \|u\| > \varepsilon \\ U_2 = -\frac{\mu}{\varepsilon} \rho & \text{if } \|u\| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (20)$$

여기서 $\mu = (2Y + CX)$ 이고 ϵ 은 임의의 작은 양의 상수이다. 또한 ρ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\|\Omega\| \leq \|\Omega_1\| + \|\Omega_2(k_p)\| \|X\| + \|\Omega_2(k_b)\| \|Y\| + \|\Omega_2\| \rho = \rho \quad (21)$$

여기서 ρ 가 양의 정의(positive definite)를 만족하기 위한 조건은 다음과 같다.

$$\max\|\Omega_2\| = \max\|H^{-1}\bar{H} - I\| < 1 \quad (22)$$

여기서 $\max\|\cdot\|$ 는 L_2 놈의 최대치를 의미한다. 만약 (22)의 조건을 만족하는 ρ 가 존재하면

$$\rho = b_1 + b_2\|X\| + b_3\|Y\| \quad (23)$$

여기서

$$b_1 = (1 - \|\Omega_2\|)^{-1} \|\Omega_2\|, \quad b_2 = (1 - \|\Omega_2\|)^{-1} \|\Omega_2(k_p)\|, \\ b_3 = (1 - \|\Omega_2\|)^{-1} \|\Omega_2(k_b)\|.$$

(16)에서 (17)의 적응제어기를 적용한 후에 (16)을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\langle CX, GX \rangle - \langle Y, CY \rangle \\ &\quad + \langle 2Y + CX, \Omega + U_2 \rangle \\ &= -X^T CGX - Y^T CY + (2Y + CX)^T (\Omega + U_2) \end{aligned} \quad (24)$$

(24)는 (21)의관계를 이용하여 다음의 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -X^T CGX - Y^T CY + \|2Y + CX\| \rho \\ &\quad + (2Y + CX)^T U_2 \\ &= -X^T CGX - Y^T CY + (2Y + CX)^T \left(\frac{\mu}{\|\mu\|} \rho + U_2 \right) \end{aligned} \quad (25)$$

(25)의 마지막 항은 다음의 관계로 인하여 성립된다. 즉,

$$(2Y + CX)^T \frac{\mu}{\|\mu\|} \rho = \frac{\|2Y + CY\|^2 \rho}{\|2Y + CX\|} = \|2Y + CX\| \rho$$

(25)에서 견실제어기 (20)을 적용하였을 때 $\|\mu\| > \epsilon$ 경우에는 (25)의 우변의 세번째 항은 0이 되어 사라져서 $\dot{V} \leq 0$ 의 조건을 만족하여 시스템이 안정하다.

$\|\mu\| \leq \epsilon$ 의 경우에는 $(2Y + CX)^T \left(\frac{\mu}{\|\mu\|} \rho - \frac{\mu}{\epsilon} \rho \right)$ 가 되고

이의 최대 값은 $\|\mu\| = \left(\frac{1}{2}\right)\epsilon$ 일때 이다. 따라서 최대값을

가질때 (25)는 다음과 같이된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -X^T CGX - Y^T CY + (\epsilon/4)\rho \\ &= -\lambda_{cg} X^T X - \lambda_c Y^T Y + (\epsilon/4)(b_1 + b_2\|X\| + b_3\|Y\|) \\ &= -\lambda_{cg} \{ \|X\| - \epsilon b_2 / (8\lambda_{cg}) \}^2 \\ &\quad - \lambda_c \{ \|Y\| - \epsilon b_3 / (8\lambda_c) \}^2 + d \end{aligned} \quad (26)$$

여기서 $d = (\epsilon/4)b_1 + (\epsilon b_2)^2 / (64\lambda_{cg}) + (\epsilon b_3)^2 / (64\lambda_c)$ 이고, λ_{cg} 와 λ_c 는 각각 CG와 C 행렬의 최소 고유치이다. (26)에서 $\dot{V} \leq 0$ 의 조건을 만족하기 위해서 $\|X\| \geq \eta_x$ 와 $\|Y\| \geq \eta_y$ 이 되어야 하고 이때 η_x 와 η_y 는 각각 $\eta_x = \epsilon b_2 / (8\lambda_{cg}) + (d/\lambda_{cg})^{1/2}$ 와 $\eta_y = \epsilon b_3 / (8\lambda_c) + (d/\lambda_c)^{1/2}$ 이다. (26)은 페루프 시스템의 오차상태벡터가 제한된 범위 내에 한정되어 있다는 것을 의미하고 따라서 매니퓰레이터의 실제 궤도와 원하는 궤도간의 오차벡터는 유계된다는 것을 의미한다. 특히 $\epsilon \rightarrow 0$ 일 때 $\eta_x \rightarrow 0$, $\eta_y \rightarrow 0$ 이어서 오차벡터의 한계영역이 작아진다.

5. 시뮬레이션

로봇트 매니퓰레이터의 동작 제어를 위하여 고안된 적응 및 견실제어기의 설계에 대한 시뮬레이션을 IBM 486-DX 개인용 컴퓨터를 사용하여 행하였다. 시뮬레이션 대상으로는 3축 수평관절형 로봇트를 사용하였다. 제어기를 적용한 페루프식이 비선형식이어서 4차 Runge-Kutta 알고리즘을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 사용된 각 로봇트 팔의 질량과 길이는 다음의 Table 1과 같이 정의되었고 질량 중심은 각 팔의 중심점에 있다고 가정하였다.

Table 1 로봇트 팔의 질량 및 관성

로봇트 팔	길 이	질 량	관 성
L1	0.4m	2 kg	0.2 kg·m ²
L2	0.4m	2 kg	0.2 kg·m ²
L3	0.3m	1kg	0.1 kg·m ²

제어기의 이득은 각 팔에 같은 $K_d = 8$, $K_p = 16$ 을 사용하였고 견실제어기에는 $\epsilon = 0.1$ 을 사용하였다. 원하는 운동계획은 $1.5t/2\pi$, $2.0t/2\pi$, $2.5t/2\pi$ (t 는 second)의 3가지 주기를 갖는 삼각함수를 사용하였다. 그림에서 X축과 Y축 방향은 말단효과 장치의 태스크공간상에서 X축과 Y축 방향으로의 궤적오차를 나타낸다. Fig. 1-1, 1-2, 1-3와 1-4는 질량과 관성을 모르는 작업물체를 이동시킬 때 2초경에 로봇트팔의 말단효과장치가 외부와 접촉하여 충격력이 발생하는 경우이다. 이 중에

Fig. 1-1은 인버스다이나믹 방식의 제어만을 적용하였는데 각 작업물체의 질량과 관성을 알 수 없어서 초기에 추정하였으며 그 오차율이 질량(60%)이고 관성(67%)이었다. 또한 $t = 2$ (second)에서 발생하는 충격력이 로봇트 팔의 운동을 방해하는 경우를 나타내었다. 이 충격력은 짧은 순간동안 일어나기에 본 논문에서는 0.02초 동안 +Y축 방향으로 2000 Newton의 충격력으로 가정되었다. 이 충격력으로 인하여 원하는 운동계획과 실제 운동계획 간의 오차가 2초경에 크게 발생하

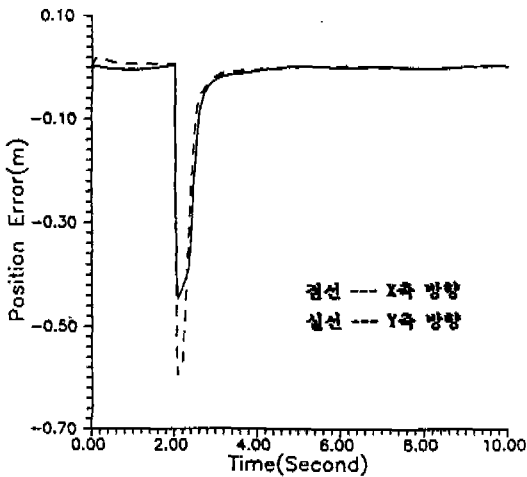


Fig. 1-1 인버스다이나믹 방식의 제어만 적용 (외부로부터 충격력 발생)

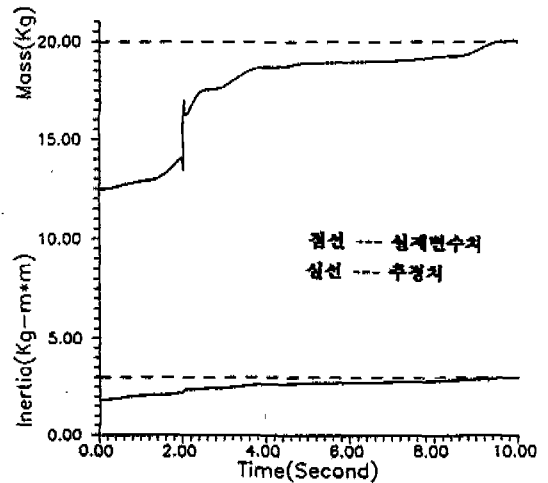


Fig. 1-3 적응제어기에 의한 실제변수의 추정

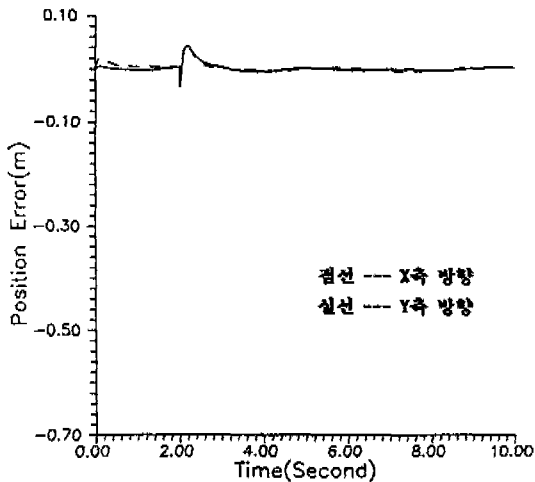


Fig. 1-2 적응 및 견실제어의 적용 (외부로부터 충격력 발생)

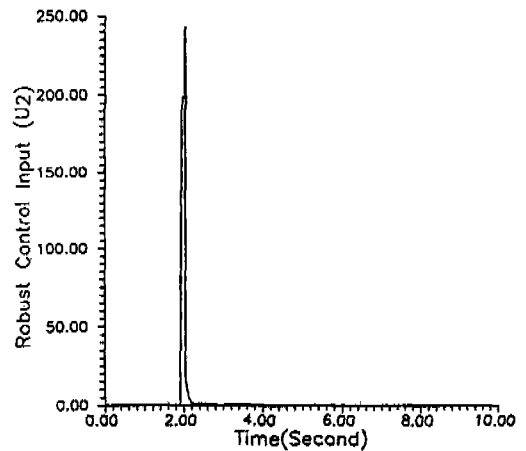


Fig. 1-4 견실제어기의 제어입력

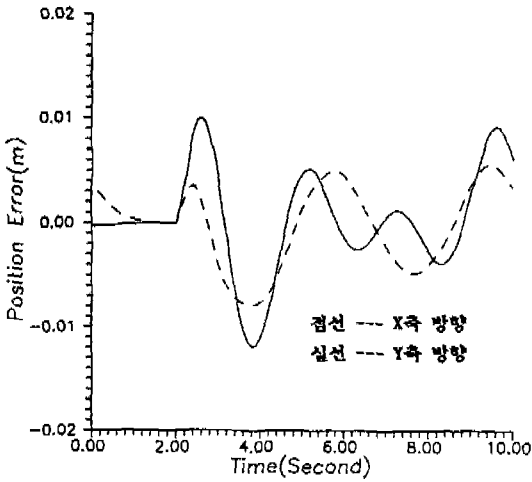


Fig. 2-1 인버스다이나믹스 방식의 제어만 적용 (질량과 관성의 변화)

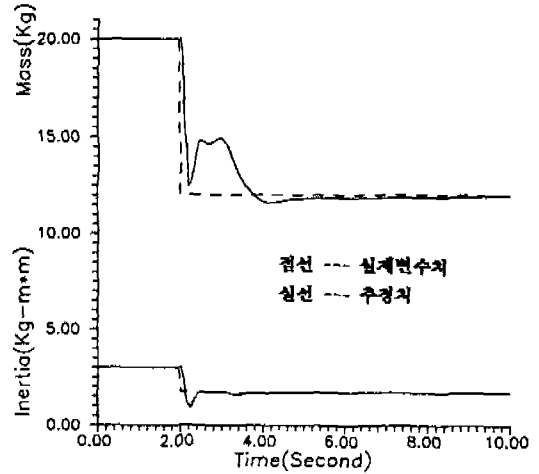


Fig. 2-3 적응제어기에 의한 실제변수의 추정

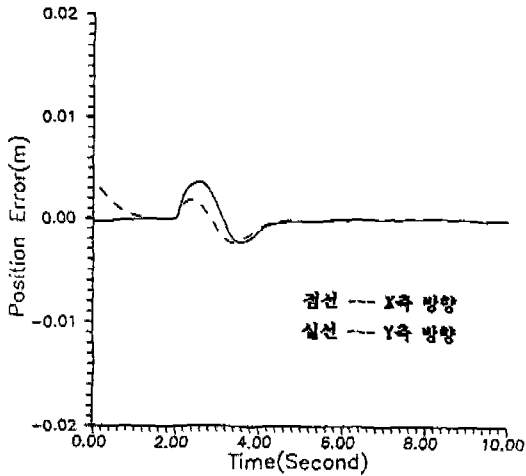


Fig. 2-2 적응 및 견실제어기의 적용 (질량과 관성의 변화)

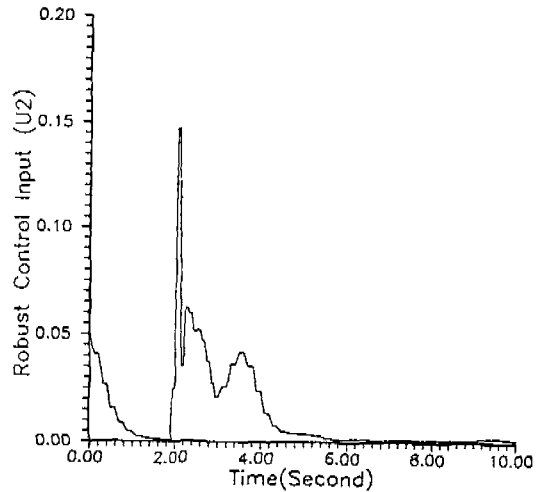


Fig. 2-4 견실제어기의 제어입력

는 것을 보여준다. Fig. 1-2에서는 이 충격력을 완화 혹은 상쇄시키기 위해 견실제어기를 적용하고 동시에 본 논문에서 제안된 식(18)의 적응제어기를 적용하여 온라인으로 모르는 변수를 추정하여 발생하는 궤적오차를 상당히 감소시킬 수 있음을 보여준다. Fig. 1-3에서는 질량과 관성이 알려지지 않은 작업물체(실제치:질량:20kg, 관성:3kg·m²)를 초기에 질량(60%)이고 관성(67%)의 오차를 하여 식(18)의 적응제어기를 적용함으로써 실제치를 잘 추정하는 것을 나타내었다. 또한

Fig. 1-4는 이 경우에 본 논문의 식(20)의 견실제어기의 제어입력의 벡터norm을 나타낸다.

Fig. 2-1, 2-2, 2-3과 2-4는 초기에 질량과 관성을 정확히 알고있는 작업물체를 이동하는 중 2초 후에 작업물체의 일부를 내려놓음으로써 질량과 관성의 변화율이 각각(67%)와 (76%)로 발생했을 경우이다. Fig. 2-1은 인버스다이나믹스 방식의 제어만을 적용하였는데 동작 2초 후부터 궤적오차가 크게 증가함을 보여준다. Fig. 2-2는 적응제어기로 실제변수를 추정하고 견실제

어기로 질량과 관성의 추정오차를 보상함으로써 발생한 궤적오차를 감소시킴을 보여준다. Fig. 2-3은 초기에는 질량과 관성이 정확히 알려진 작업물체를 이동시키나 이동 2초 후에 질량과 관성이 각각 (67%)와 (76%) 변화되었을 때 변화도니 질량과 관성을 식(18)의 적응제 어기를 적분함으로써 잘 추정하는 것을 보여준다. 또한 Fig. 2-4는 이 경우에 적용된 견실제어기의 제어입력의 벡터놀을 나타낸다.

6. 결 론

본 논문은 불확실한 로봇 매니퓰레이터 시스템의 제어를 위한 적응 및 견실제어기의 설계에 대한 연구이다. 제안된 제어기는 리야푸노프 방식의 안정도 이론에 바탕을 두고 설계되었다. 작업물체의 질량과 관성의 변화시에 적응제어기는 실제변수를 잘 추정하고 동시에 외부로부터의 유계된 충격력과 같은 외란의 존재시에 견실제어기는 이를 견실하게 제어하여 원하는 궤적을 따르는 것을 시뮬레이션을 통하여 알 수 있다. 제안된 적응제어기는 간절각과 각속도의 측정만을 필요로 하여 로봇제어에 쉽게 적용할 수 있고 견실제어기는 본 논문에서 직접 고안된 리야푸노프함수를 이용하였으므로 리야푸노프식을 풀지 않아 설계하기가 용이하다.

시뮬레이션에 의하면 큰 충격력에 의하여 적응제어기의 추정치의 급격한 변화가 나타나는데 향후 이에 대한 보다 깊은 연구가 필요하다.

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. Sadtry, "Adaptive Control of Mechanical Manipulators", IEEE Int. Conf. Robotics and Automa-

- tion, 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, pp.1010-1015 1988.
10. Y. H. Chen, "On the deterministic Performance of Uncertain Dynamical Systems", Int. J. of Control, vol.43. No.5, pp.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, pp.324-327 1991.