

불확실 로봇 매니플레이터의 견실 예측 제어기 설계

Robust Predictive Control of Robot Manipulators with Uncertainties

김정관*, 한명철

(Jung-Kwan Kim and Myung-Chul Han)

Abstract : We present a predictive control algorithm combined with the robust robot control that is constructed on the Lyapunov min-max approach. Since the control design of a real manipulator system may often be made on the basis of the imperfect knowledge about the model, it is an important trend to design a robust control law that guarantees the desired properties of the manipulator under uncertain elements. In the preceding robust control work, we need to tune several control parameters in the admissible set where the desired stability can be achieved. By introducing an optimal predictive control technique in robust control we can find out much more deterministic controller for both the stability and the performance of manipulators. A new class of robust control combined with an optimal predictive control is constructed. We apply it to a simple type of 2-link robot manipulator and show that a desired performance can be achieved through the computer simulation.

Keywords : robot manipulators, lyapunov stability, uncertainty, robust predictive control, predictor equation

I. 서론

로봇 매니플레이터의 제어 알고리즘의 개발에서 발생할 수 있는 장애 중의 하나가 실제 로봇 매니플레이터와 주위 환경의 정확한 수학적 모델링을 수행하기 어렵다는 점이다. 이러한 실제 시스템과 수학적 모델식 사이의 차이점은 부정확한 파라미터의 선정, 마찰력, 부하의 변동, 외란 등에서 기인한다. 견실제어(robust control) 기법은 이와 같은 불확실성이 내포된 시스템에 대하여 원하는 제어성능을 발휘할 수 있다. 시스템의 모델식에 불확실성이 내재하는 경우에 대한 확정 견실제어(deterministic robust control)는 Chen[1], Chen and Pandey[2], Reithmeier and Leitmann[3], Shoureshi et al[4], Han[5,6] 등에 의해 제시되었다.

예측제어(predictive control) 개념은 1970년대 후반에 제시되었으며, 그 후 꾸준한 관심을 받고 있다. 예측제어의 구조는 우선, 함수적 근사에 의한 예측방정식(predictor equation)으로부터 프로세스 출력을 예측하고, 적절히 설정된 가격함수(cost function)를 최적화 함으로써 미래의 플랜트 응답이 목표 궤적에 추종할 수 있는 입력벡터를 구한다. 이 제어기법은 시스템 파라미터, dead-time 그리고 모델 차수가 가변적인 시스템에 대하여 좋은 성능을 보인다[7-9]. 이러한 예측제어 기법은 거의 대다수가 선형 시스템에 대해 연구되어 왔다[10]. Lu[11]는 이 기법을 비선형 시스템으로 확장하였고, 안정성 및 견실성을 검증하였다. Lu가 제안한 비선형 시스템에 대한 예측제어 개념은 선형 시스템에 대한 그것과 기본적으로 유사하다. 즉, 적절한 함수적 전개(functional expansions)에 의해 얻어지는 예측모델(prediction model)로부터 시스템의 미래 출력값을 구하고, 미래의 출력값과 목표값 사이의 에러를 최소화함으로써 제어 입력을 계산한다. 그 외 다른 형태의 예측 제어 이론이 많은 사람들에 의해 연구되었으며[12], 특히 초

기 예측제어의 문제점으로 대두되었던 안정성 검증의 문제와 더불어 불확실성을 포함한 시스템에 대한 견실예측제어 개념이 제안되었다[13-17].

본 논문에서는, 불확실성이 존재하는 비선형 시스템에 관한 견실제어기와 전술한 최적예측제어(optimal predictive control) 기법을 접목한 새로운 형태의 견실예측제어(robust predictive control) 기법을 제시한다. 견실예측제어 기법은 최적예측제어 부분에서 시스템 안정성과 견실성의 평가를 위한 작업이 수행되고, 견실제어 부분에서 안정성과 견실성을 향상시키는 구조로 되어 있다. 제시된 제어기에 대한 안정성 분석을 로봇 매니플레이터에 대해 수행하였으며, 비교적 간단한 형태의 로봇 매니플레이터에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

II. 로봇 동역학 및 안정성

(1)과 같이 n-링크 강성 매니플레이터의 동역학 방정식이 쓰여질 수 있다.

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{d}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) = \boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

여기서,

\mathbf{q} : $n \times 1$ 관절위치 벡터(vector of joint positions)

$\boldsymbol{\tau}$: $n \times 1$ 관절토크 벡터(vector of joint torques)

$M(\mathbf{q})$: $n \times n$ 관성행렬(inertia matrix)

$C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$: $n \times 1$ 원심력 및 코리올리스힘 벡터(vector of centrifugal and Coriolis forces)

$\mathbf{g}(\mathbf{q})$: $n \times 1$ 중력 벡터(vector of gravity force)

$\mathbf{d}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$: $n \times 1$ 불확실토크 벡터(vector of uncertain torques)

특히, $\mathbf{d}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$ 는 마찰력, 외란과 같은 구조적, 비구조적 불확실성 모두를 포함한다.

(1)은 다음과 같은 성질을 갖고 있으며, 이를 바탕으로 제어기 설계가 이루어진다. 첫째, 관성행렬 $M(\mathbf{q})$ 는 양확정(uniformly positive definite), 대칭(symmetric) 그리고 유계(bounded)인 행렬이다. 즉, $m_1 I \leq M(\mathbf{q}) \leq m_2 I, \forall \mathbf{q} \in \mathbf{R}^n$ 을 만

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 5. 15., 채택확정 : 2003. 9. 2.

김정관 : 부산대학교 지능기계공학과(jgdtkim@pusan.ac.kr)

한명철 : 부산대학교 기계공학부(mchan@pusan.ac.kr)

※ 본 연구는 부산대학교 연구비에 의한 연구임.

족하는 양수 m_1, m_2 가 존재한다. 여기서, I 는 단위행렬 (identity matrix) 이다. 둘째, $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 은 $\dot{M} - 2C$ 이 교대대칭 (skew symmetric) 이 될 수 있도록 적절히 선택될 수 있으며, 따라서 임의의 벡터 $\xi \in \mathbf{R}^n$ 에 대하여 $\xi^T (\dot{M} - 2C) \xi = 0$, $\forall \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}} \in \mathbf{R}^n$ 을 만족한다.

본 논문에서는 불확실 로봇 시스템의 실용안정성 (practical stability) 을 보장하는 제어기가 제안되고 리아프노프 함수 (Lyapunov function) 를 이용한 안정성 분석을 통하여 그 안정성이 증명된다. 실용안정성은 대상 시스템이 다음과 같은 성질들을 만족함을 의미한다.

정의 1: 실용적 안정성 (practically stable) [1,2,5,6,18-20]

비선형 동적 시스템 $\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{a}(\mathbf{x}(t), \boldsymbol{\sigma}(t), t)$ 을 고려한다. 여기서, $\boldsymbol{\sigma}(t)$ 는 불확실 벡터 (vector of uncertainties) 이다. 위의 동적 시스템이 다음의 성질들을 만족할 때 실용적 안정성을 갖는다고 한다.

(P1) 해의 존재성 (existence of solutions): 시스템이 해를 갖는다.

(P2) 평등유계성 (uniform boundedness): 임의의 $r \in (0, \infty)$ 에 대하여, $\|\mathbf{x}_0\| \leq r$ 이면 $\|\mathbf{x}(t)\| \leq d(r), \forall t \in [t_0, \infty)$ 을 만족하는 상수 $d(r) < \infty$ 가 존재한다.

(P3) 평등궁극유계성 (uniform ultimate boundedness): 임의의 $\bar{r} \geq r_0$ 와 $r \in (0, \infty)$ 에 대하여, $\|\mathbf{x}_0\| \leq r$ 이면 $\|\mathbf{x}(t)\| \leq \bar{r}, \forall t \geq t_0 + T(r, \bar{r})$ 을 만족하는 유한시간 $T(r, \bar{r})$ 가 존재한다.

(P4) 평등안정성 (uniform stability): 임의의 $\bar{r} \geq r_0$ 에 대하여, $\|\mathbf{x}_0\| \leq \delta(\bar{r})$ 이면 $\|\mathbf{x}(t)\| \leq \bar{r}, \forall t \geq t_0$ 을 만족하는 상수 $\delta(\bar{r}) > 0$ 가 존재한다.

III. 견실예측제어 (Robust Predictive Control)

본 논문에서는, 다음과 같은 형태의 비선형 시스템에 대하여 예측제어기를 설계한다.

$$\dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{f}(\mathbf{x}_1, \dot{\mathbf{x}}_1, t) + B(\mathbf{x}_1, \dot{\mathbf{x}}_1, t) \mathbf{u} \quad (2)$$

여기서, $\mathbf{x}_1 \in \mathbf{R}^n$ 이고 $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^m$ 는 제어입력이다. 로봇 매니플레이터의 운동방정식이 (2)와 같이 표현될 수 있다. (2)를 상태공간 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_1 &= \mathbf{x}_2 \\ \dot{\mathbf{x}}_2 &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + B(\mathbf{x}, t) \mathbf{u} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_2 &\equiv \dot{\mathbf{x}}_1 \\ \mathbf{x} &\equiv [\mathbf{x}_1^T \ \mathbf{x}_2^T]^T \in \mathbf{R}^{2n} \text{ 상태벡터 (state vector)} \end{aligned}$$

h 가 작은 범위에서, 미래의 출력 $\mathbf{x}_2(t+h)$ 는 Taylor 시리스에 의해 (4)와 같이 쓰여진다.

$$\mathbf{x}_2(t+h) \cong \mathbf{x}_2(t) + h\dot{\mathbf{x}}_2(t) \quad (4)$$

(3)과 (4)를 조합하여 다음을 얻는다.

$$\mathbf{x}_2(t+h) \cong \mathbf{x}_2(t) + h(\mathbf{f} + B\mathbf{u}) \quad (5)$$

비슷하게,

$$\mathbf{x}_1(t+h) \cong \mathbf{x}_1(t) + h\mathbf{x}_2(t) \quad (6)$$

여기서, 우리는 목표궤적 (desired trajectory) 이 작은 에러 범위 내에서 예측 가능하다고 가정하여 다음의 식을 얻는다.

$$\mathbf{x}_d(t+h) \cong \mathbf{x}_d(t) + h\dot{\mathbf{x}}_d(t) \quad (7)$$

미래의 추종 성능을 향상시킬 수 있는 현재의 제어입력을 구하기 위하여, (8)과 같은 가격함수를 설정한다.

$$\begin{aligned} J(\mathbf{u}) &= \frac{1}{2} [\mathbf{x}(t+h) - \mathbf{x}_d(t+h)]^T Q \\ &\quad + \frac{1}{2} \mathbf{u}^T R \mathbf{u} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1 & 0 \\ 0 & Q_2 \end{bmatrix}, \quad Q_1, Q_2 \in \mathbf{R}^{n \times n} : \text{양확정}$$

$$R \in \mathbf{R}^{m \times m} : \text{양반확정}$$

(8)의 $\mathbf{x}(t+h)$ 와 $\mathbf{x}_d(t+h)$ 를 (5)와 (6)으로 대체하고, $\partial J / \partial \mathbf{u} = 0$ 로부터 최적제어입력을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= -B^{-1}PB^{-T} \left\{ \frac{1}{2h^2} B^T Q_1 [\mathbf{e}_1 + h\dot{\mathbf{e}}_1 \right. \\ &\quad \left. + \frac{h_2}{2} (\mathbf{f} - \dot{\mathbf{x}}_{2d})] + \frac{1}{h} B^T Q_2 [\mathbf{e}_2 + h(\mathbf{f} - \dot{\mathbf{x}}_{2d})] \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \mathbf{e} &= \mathbf{x} - \mathbf{x}_d = [\mathbf{e}_1^T \ \mathbf{e}_2^T]^T, \\ P &\equiv (1/4Q_1 + Q_2)^{-1} > 0 \end{aligned}$$

이제, 위의 결과식 (9)를 로봇 매니플레이터에 적용한다. 이를 위하여 (1)을 (2)의 형태로 고쳐 쓰면 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{q}} = -M^{-1}(C\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g} + \mathbf{d}) + M^{-1}\boldsymbol{\tau} \quad (10)$$

여기서, (10)의 \mathbf{q} , $-M^{-1}(C\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g} + \mathbf{d})$, M^{-1} 은 각각 (2)의 \mathbf{x}_1 , \mathbf{f} 그리고 B 에 해당한다.

제어입력 (9)를 (3)에 대입하여 다음과 같이 오차 동역학식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}} &= \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} \\ -\frac{1}{2h^2} (1/4Q_1 + Q_2)^{-1} Q_1 \\ I_{2 \times 2} \\ -\frac{1}{h} (1/4Q_1 + Q_2)^{-1} (1/2Q_1 + Q_2) \end{bmatrix} \mathbf{e} \equiv \mathbf{A} \mathbf{e} \end{aligned} \quad (11)$$

전술한 제어 기법을 적용하기 위해서는 플랜트의 파라미터 및 외란에 대한 정확한 정보가 요구된다. 그러나, 일반적으로는 여러 가지 이유로 인하여 플랜트의 파라미터 함수가 변하거나 모델식에 불확실성이 존재하므로 \mathbf{f} 와 B 의 대략의 경계값만을 알 수 있을 뿐 정확한 값은 알기가 어려우며, 따라서 실제 적용시에는 적절한 추정치 $\hat{\mathbf{f}}$ 와 \hat{B} 를 이용하게

된다. 그러므로, 이러한 불확실성이 존재하는 경우에도 제어 시스템이 견실할 수 있도록 하기 위하여 (9)의 제어입력 \mathbf{u} 에 (12)에서와 같이 견실 제어항 \mathbf{u}_r 을 추가한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{u} = & -\hat{B}^{-1}P\hat{B}^{-T} \left\{ \frac{1}{2h^2}\hat{B}^T Q_1[\mathbf{e}_1 + h\dot{\mathbf{e}}_1 \right. \\ & \left. + \frac{h_2}{2}(\hat{\mathbf{f}} - \dot{\mathbf{x}}_{2d})] + \frac{1}{h}\hat{B}^T Q_2[\mathbf{e}_2 + h(\hat{\mathbf{f}} - \dot{\mathbf{x}}_{2d})] \right\} \\ & + \hat{B}^{-1}\mathbf{u}_r, \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, \mathbf{u}_r 은 견실제어 항이다. (12)에 의한 오차 동력학 식은 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{e}} = \Lambda\mathbf{e} + \Gamma(\mathbf{u}_r + \boldsymbol{\eta}) \quad (13)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \Gamma &= \begin{bmatrix} 0 \\ I_{2 \times 2} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\eta} &= (B\hat{B}^{-1} - I)(\mathbf{u}_r + \dot{\mathbf{x}}_{2d}) + B\hat{B}^{-1}(\mathbf{f} - \hat{\mathbf{f}}) \end{aligned} \quad (14)$$

가정 1: $\|E\| = \|B\hat{B}^{-1} - I\| \leq \alpha < 1$ for α , for all $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^{2n}$

관성행렬 M 은 평등양화정 및 평등유계의 성질을 가지므로, 모든 $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^{2n}$ 에 대해 다음의 식을 만족하는 상수 b_1 , b_2 가 존재한다.

$$b_1 \leq \|B\| = \|M^{-1}(\mathbf{x})\| \leq b_2 \quad (15)$$

만일,

$$\hat{B}^{-1} = \frac{1}{c}I \quad (16)$$

의 선택을 한다면, 다음의 식을 만족한다.

$$\|E\| = \|B\hat{B}^{-1} - I\| \leq \frac{b_2 - b_1}{b_2 + b_1} = \alpha < 1 \quad (17)$$

여기서, $c = \frac{b_2 + b_1}{2}$ 이다.

다시 말해서, 가정 1을 만족하는 \hat{B} 이 항상 적어도 하나 존재한다.

다음으로, (12)의 견실제어 항 \mathbf{u}_r 을 설계한다. 우선, 우리는 다음의 (18)과 (19)와 같은 조건을 만족하는 경계함수 (bounding function) $\rho(\mathbf{e}, t)$ 를 찾을 수 있다.

$$\|\mathbf{u}_r\| \leq \rho(\mathbf{e}, t) \quad (18)$$

$$\|\boldsymbol{\eta}\| \leq \rho(\mathbf{e}, t) \quad (19)$$

(14)로부터,

$$\begin{aligned} \|\boldsymbol{\eta}\| &\leq \|E(\mathbf{u}_r + \dot{\mathbf{x}}_{2d}) + B\hat{B}^{-1}(\mathbf{f} - \hat{\mathbf{f}})\| \\ &\leq \alpha\rho(\mathbf{e}, t) + \alpha\|\dot{\mathbf{x}}_{2d}\| + \|B\hat{B}^{-1}(\mathbf{f} - \hat{\mathbf{f}})\|_{\max} \\ &= \rho(\mathbf{e}, t) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\text{즉, } \rho(\mathbf{e}, t) = \frac{1}{1-\alpha} \left[\alpha\|\dot{\mathbf{x}}_{2d}\| + \|B\hat{B}^{-1}(\mathbf{f} - \hat{\mathbf{f}})\|_{\max} \right] \quad (21)$$

(21)에는 실제 시스템의 값들인 B 와 \mathbf{f} 가 존재한다. 그러나, 이 항들의 실제값이 존재하는 범위(bound)가 주어지며, $B\hat{B}^{-1}(\mathbf{f} - \hat{\mathbf{f}})$ 은 $n \times 1$ 벡터가 된다. 따라서, 경계함수 ρ 는 (21)에 표시된 바와 같이 $B\hat{B}^{-1}(\mathbf{f} - \hat{\mathbf{f}})$ 의 norm이 최대가 되는 B 와 \mathbf{f} 를 범위 내에서 선택하여 계산한다.

견실제어 항 \mathbf{u}_r 은 다음과 같이 결정되어 진다.

$$\mathbf{u}_r = \begin{cases} -\rho \frac{\rho\Gamma^T P_0 \mathbf{e}}{\|\rho\Gamma^T P_0 \mathbf{e}\|} & \text{if } \|\rho\Gamma^T P_0 \mathbf{e}\| > \varepsilon \\ -\rho \frac{\rho\Gamma^T P_0 \mathbf{e}}{\|\varepsilon\|} & \text{if } \|\rho\Gamma^T P_0 \mathbf{e}\| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (22)$$

여기서, P_0 는 (23)과 같은 리아프노프 방정식의 해이며, ε 은 설계자가 작은 양의 값으로 선정할 설계 파라미터이다.

$$\Lambda^T P_0 + P_0 \Lambda = -Q_0 \quad (23)$$

정리 1: (3)의 형태로 쓸 수 있는 불확실성을 포함하는 로봇 매니플레이터 운동방정식 (1)에 대하여, 제어입력 (12)는 (7)을 만족하는 목표궤적 \mathbf{x}_d 의 추종에 있어 실용적 안정성을 보장한다.

증명: 다음의 리아프노프 함수 후보를 고려한다[21,22].

$$V = \mathbf{e}^T P_0 \mathbf{e} \quad (24)$$

미분을 취하면,

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{e}^T P_0 \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{e}^T P_0 \dot{\mathbf{e}} \\ &= \mathbf{e}^T (\Lambda^T P_0 + P_0 \Lambda) \mathbf{e} + 2\mathbf{e}^T P_0 \Gamma(\mathbf{u}_r + \boldsymbol{\eta}) \\ &= -\mathbf{e}^T Q_0 \mathbf{e} + 2\mathbf{e}^T P_0 \Gamma(\mathbf{u}_r + \boldsymbol{\eta}) \end{aligned} \quad (25)$$

만일, $\|\rho\Gamma^T P_0 \mathbf{e}\| > \varepsilon$ 인 경우:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\mathbf{e}^T Q_0 \mathbf{e} + 2\mathbf{e}^T P_0 \Gamma(\mathbf{u}_r + \boldsymbol{\eta}) \\ &\leq -\mathbf{e}^T Q_0 \mathbf{e} + 2\|\Gamma^T P_0 \mathbf{e}\|(-\rho + \|\boldsymbol{\eta}\|) < 0 \end{aligned} \quad (26)$$

만일, $\|\rho\Gamma^T P_0 \mathbf{e}\| \leq \varepsilon$ 인 경우:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\mathbf{e}^T Q_0 \mathbf{e} + 2\mathbf{e}^T P_0 \Gamma(\mathbf{u}_r + \boldsymbol{\eta}) \\ &\leq -\mathbf{e}^T Q_0 \mathbf{e} + 2\|\Gamma^T P_0 \mathbf{e}\|(-\rho + \|\boldsymbol{\eta}\|) \\ &\leq -\mathbf{e}^T Q_0 \mathbf{e} - 2/\varepsilon \|\rho\Gamma^T P_0 \mathbf{e}\|^2 + 2\|\rho\Gamma^T P_0 \mathbf{e}\| \\ &\leq -\mathbf{e}^T Q_0 \mathbf{e} + \varepsilon/2 \end{aligned} \quad (27)$$

결론적으로, 위의 (26)과 (27)에 의하여, 오차 동력학 식은 실용적으로 안정하다[12-14].

IV. 시뮬레이션

본 절에서는 앞에서 얻은 이론적 결과의 적용 예로서, 그림 1과 같은 형태의 로봇 매니플레이터에 대한 제어기 설계 및 시스템 응답을 살펴본다.

본 논문에서는, 그림 1과 같은 매니플레이터에 대하여 견실예측제어 시스템의 시뮬레이션을 수행하였다.

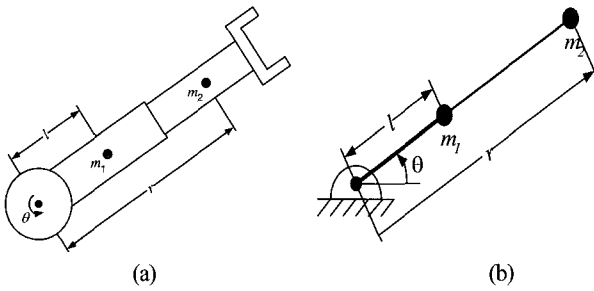


그림 1. 로봇 매니플레이터 : R-P 형.
Fig. 1. Two-link planar RP type arm.

표 1. 불확실 파라미터의 시뮬레이션 데이터.

Table 1. Simulation data for uncertain parameter.

Unknown parameter	Min. value	Max. value	Real value	Estimated value
m_1	0.55	0.65	0.58	0.6
m_2	0.25	0.35	0.33	0.3
d_1	-1	1	$\sin 20t$	0
d_2	-0.5	0.5	$0.5 \sin 10t$	0

표 2. 설계 파라미터의 시뮬레이션 데이터.

Table 2. Simulation data for design parameter.

Design parameter	Value
Q_1, Q_2	$10^{-4} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.3 \end{bmatrix}$
Q_0	$10^{-1} I_{4 \times 4}$
h	0.001

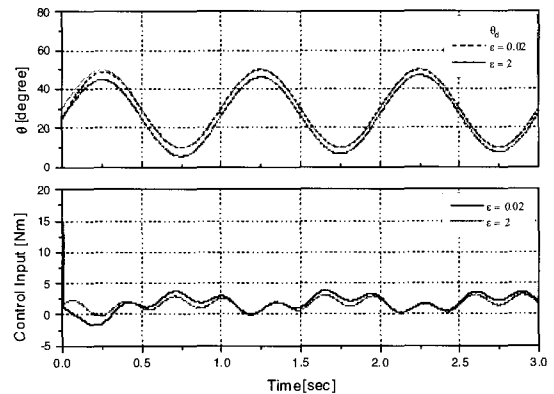
우선, 편의상 그림 1-(a)와 같은 매니플레이터를 그림 1-(b)와 같이 질점 질량의 형태로 단순화하였으며, 그에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} (m_1 l^2 + m_2 r^2) & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{r} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} m_2 r \dot{r} & m_2 r \dot{\theta} \\ -m_2 r \dot{\theta} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{r} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (m_1 l + m_2 r) g \cos \theta \\ m_2 g \sin \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (28)$$

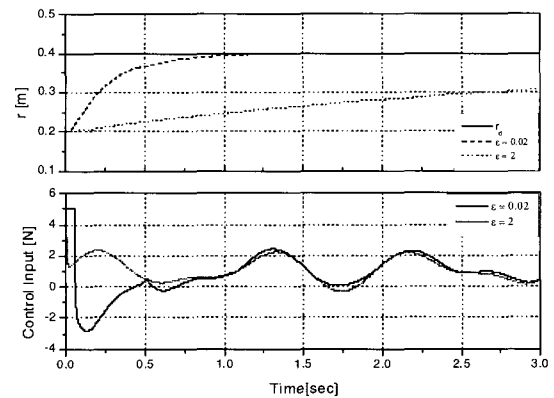
(28)의 d_1, d_2 는 (1)의 불확실 항이다.

시뮬레이션을 수행하기 위한 불확실 파라미터의 값은 표 1과 같이 설정하였으며, 설계 파라미터의 값은 표 2와 같이 선정하였다.

설계 파라미터 ϵ 값에 따른 시뮬레이션 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2-(a)는 그림 1과 같은 매니플레이터의 회전 변위 θ 의 응답과 제어입력을 나타내며, (b)는 직선변위 r 의 응답과 제어입력을 나타낸다. 그림 2에서 알 수 있듯이, ϵ 의 값이 감소할수록 응답속도가 빨라진다. 그러나, 작은 ϵ 은 실제 시스템에 적용 시 채터링을 유발시킬 수 있으며 과도한 입력으로 인하여 입력 포화(saturation) 현상이 나타날 수 있다. 반면에, 큰 ϵ 은 정상상태 오차를 증가시킬 가능성을 가진다. 그러므로 설계자는 양쪽 모두를 고려하여 ϵ



(a) joint 1 : sine wave input response



(b) joint 2 : step input response

그림 2. 시스템 응답 및 제어 입력.

Fig. 2. System response and control history.

값을 선정하여야 한다.

V. 결론 및 고찰

본 논문에서는 로봇 매니플레이터의 새로운 형태의 궤환 제어(feedback control) 방식을 제안하였으며, 다음과 같은 절차로 설계되었다.

- 단계 1: 적절한 함수적 접근법으로 시스템 출력 예측
- 단계 2: 예측값과 목표값 사이의 오차를 최소화함으로써 최적예측제어기를 유도
- 단계 3: 불확실 항들의 영향을 최소화하기 위하여 건설제어 항을 추가

특히, 단계 3에서 추가된 건설제어 항에 의하여 불완전한 모델링 및 외란에 의한 불확실성이 존재하는 경우에도 안정성과 건설성을 보장할 수 있다.

본 논문에서 제시한 제어기법을 비교적 간단한 형태의 로봇 매니플레이터에 대해 적용하였고, 설계 파라미터 ϵ 의 변화에 따른 시뮬레이션 결과를 도시하였다. 이러한 과정을 통하여 설계자는 채터링, 정상상태오차 등으로 표현되는 실제 사양을 만족하기 위한 적절한 값을 선택할 수 있다.

일반적으로, 우리는 많은 경우에 불확실 파라미터의 경계 값을 어느 정도 예측할 수 있으나 지나치게 넓은 영역으로 설정될 경우 시스템의 응답특성을 저해할 우려가 있으므로,

가능하면 좁은 범위로 설정되어야 바람직하다. 따라서, 불확실 파라미터의 경계값을 체계적으로 추정할 수 있는 전략이 요구된다.

참고문헌

- [1] Y. H. Chen, "Robust computed torque schemes of mechanical manipulators: non-adaptive versus adaptive", *ASME J. Dynam. Syst. Meas. Contr.*, vol. 113, pp. 324-327, 1991.
- [2] Y. H. Chen and S. Pandey, "Uncertainty bounded-based hybrid control for robot manipulators", *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 6, no. 3, pp. 303-311, 1990.
- [3] E. Reithmeier and G. Leitmann, "Tracking and force control for a class of robotic manipulators", *Dynamics and Control*, vol. 1, pp. 133-150, 1991.
- [4] R. Shoureshi, M. Corless, and M. D. Roesler, "Control of industrial manipulators with bounded uncertainties", *ASME J. Dynam. Syst. Meas. Contr.*, vol. 109, pp. 53-58, 1987.
- [5] M. C. Han, "Robust control design for robots with uncertainty and joint-flexibility", *J. Korean Society of Precision Engineering*, vol. 12, no. 5, pp. 117-126, 1995.
- [6] M. C. Han, "Robust hybrid control for uncertain robot manipulators", *J. Korean Society of Precision Engineering*, vol. 14, no. 7, pp. 75-81, 1997.
- [7] D. W. Clarke, C. Mohtad, and P. S. Tuffs, "Generalized predictive control - Part I. The Basic Algorithm", *Automatica*, vol. 14, pp. 413-428, 1978.
- [8] B. E. Ydstie, "Extended horizon adaptive control", *Proc. 9th IFAC World Congress*, Budapest, Hungary, 1984.
- [9] A. R. Cauwenberghe, et al., "Self adaptive long range predictive control", *Proc. America Control Conference*, TP10, pp. 1155-1160, 1985.
- [10] M. Morari, Jay H. Lee, "Model predictive control: past, present and future", *Computer and Chemical Engineering*, vol. 23, issues 4-5, 1 May pp. 667-682, 1999.
- [11] P. Lu, "Optimal predictive control of continuous nonlinear Systems", *Int. J. of Control*, vol. 62, no. 3, pp. 633-649, 1995.
- [12] M. A. Henson, "Nonlinear model predictive control: current status and future directions", *Computer and Chemical Engineering*, vol. 23, pp. 187-202, 1998.
- [13] T. A. Badgwell, "Robust model predictive control of stable linear systems", *Int. J. of Control*, vol. 68, no. 4, pp. 797-818, 1997.
- [14] Y. I. Lee and B. Kouvaritakis, "A linear programming approach to constrained robust predictive control", *Proceedings of the American Control Conference*, Chicago, Illinois, June, 2000.
- [15] Y. I. Lee, B. Kouvaritakis, "Robust receding horizon predictive control for systems with uncertain dynamics and input saturation", *Automatica*, vol. 36, pp. 1497-1504, 2000.
- [16] S. Ralhan and T. A. Badgwell, "Robust model predictive control for integrating linear systems with bounded parameters", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 36, pp. 2981-2991, 2000.
- [17] B. Kouvaritakis, J. A. Rossiter, and J. Schuurmans, "Efficient robust predictive control", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 45, no. 8, August, 2000.
- [18] G. Leitmann, "On the efficacy of nonlinear control in uncertain linear systems", *ASME J. Dynam. Syst. Meas. Contr.*, vol. 102, pp. 95-102, 1981.
- [19] M. J. Corless and G. Leitmann, "Continuous state feedback guaranteeing uniform ultimate boundedness for uncertain dynamic systems", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-26, no. 5, pp. 1139-1144, 1981.
- [20] Y. H. Chen, "Adaptive robust model-following control and application to robot manipulators", *ASME J. Dynam. Syst. Meas. Contr.*, vol. 109, pp. 209-215, 1987.
- [21] M. W. Spong, M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*, John Wiley & Sons, 1989.
- [22] F. L. Lewis, C. T. Abdallah, D. M. Dawson, *Control of Robot Manipulators*, Macmillan Publishing Company, 1993.



김정관

1995년 부산대학교 정밀기계공학과 졸업(공학사). 1997년 동대학원 졸업(공학석사). 1997년~현재 동대학원 지능기계공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 건설제어, 비선형제어, 로봇제어, 로봇비전 시스템, 엔진/자동변속기통합제어,

차량시뮬레이터.



한명철

1983년 서울대학교 기계설계학과 졸업(공학사). 1985년 동대학원 졸업(공학석사). 1992년 Georgia Institute of Technology, U.S.A. 졸업(공학박사). 1994년 ~ 현재 부산대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 건설제어, 비선형제어, 로봇제어, 제

어이론, 엔진/자동변속기통합제어, 차량시뮬레이터, 수중발사 시스템제어.