

로봇 매니플레이터에 대한 출력궤환 적응제어기 설계

Design of an Adaptive Output Feedback Controller for Robot Manipulators

°이 강 응°

한국항공대학교 항공전자공학과(Tel: 300-0136; Fax: 3159-9986; E-mail: kwlee@cai.hangkong.ac.kr)

Abstracts An adaptive output feedback controller is designed for tracking control of an n-link robot manipulator with unknown load. High-gain observers with same structure as error dynamic systems are used to estimate joint velocities. The parameter adaptation is achieved by the smoothed projection algorithm. The control inputs are saturated outside a domain of interest. Simulation results on a 2-link manipulator illustrate that when the speed of the high-gain observer is sufficiently high, the proposed controller recovers the performance under state feedback control.

Keywords, robot, adaptive control, output feedback control, high-gain observer

1. 서론

대부분의 로봇 매니플레이터에 대한 적응제어시스템에서는 센서에 의해 측정되는 관절의 위치와 속도 상태를 사용하는 상태궤환제어시스템이었다[1]-[3]. 그러나 속도추정에 사용되는 타코미터 출력에는 측정 잡음이 포함되기 때문에 제어기 이득의 크기가 제한되고 그 결과로 제어성능도 약화된다. 따라서 최근에는 속도추정치를 직접 제어 알고리즘에 사용하지 않고 관측기로부터 추정된 추정치를 사용하는 제어시스템[4] 구성에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.

Nicosia et al[5][6]에 의해 적용된 고이득 관측기(high-gain observer)는 외란을 억제할 뿐만 아니라 선형시스템의 경우와 마찬가지로 제어기와 관측기를 분리하여 설계할 수 있도록 한다. 그러나 상태변수를 추정하는 동안 임펄스 형태의 피이킹(peaking) 현상이 발생할 수 있으며 이 피이킹이 제어입력을 통하여 시스템에 전달되면 시스템을 불안정하게 한다[7].

피이킹이 시스템에 전달되지 않도록 하기 위하여 관측기에 의해 추정된 상태변수를 포함하는 제어입력을 포화시키는 데 제어입력에 대한 포화함수는 상태변수들이 정의되는 영역을 벗어나지 않도록 하는 최대값으로 정한다[8].

본 연구에서는 미지의 부하를 갖는 로봇 매니플레이터에 대한 출력궤환 적응제어시스템을 설계하고자 한다. Berghuis et al[9]에 의해 제안된 상태궤환 제어시스템에 [8]에서 사용된 파라미터 추정 알고리즘을 적용하였다. 파라미터 변동범위가 크지 않을 때 관절위치 측정치로부터 속도벡터를 추정하기 위해 제안된 고이득 관측기는 오차 동특성방정식의 구조와 유사하도록 구성하여 과도상태가 지난 후의 추정오차가 매우 작아지도록 한다. 따라서 관측기를 포함하는 출력궤환시스템의 성능이 상태궤환시스템의 제어성능을 점근적으로 복원시킬 수 있음을 2-링크 로봇 매니플레이터의 궤적제어에 적용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 보이고자 한다.

2. 매니플레이터 모델과 문제 설정

링크가 n개인 강체 로봇의 모델식은 다음과 같다[10].

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (1)$$

여기서 $q \in R^n$ 관절위치벡터이고 $\tau \in R^n$ 는 토크 입력이다. 행렬 $M(q) \in R^{n \times n}$ 는 관성행렬로 대칭이고 양한(positive definite)이고, 벡터 $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 는 구심력과 코리올리스 힘으로 $n \times 1$ 벡터이고, $G(q)$ 는 중력벡터이다. 식 (1)의 동적 모델은 다음 성질을 갖는다.

성질 1: 행렬 $M(q)$ 는 다음 부등식을 만족시킨다.

$$0 < M_m \leq |M(q)| \leq M_M$$

성질 2: 행렬 $C(q, \dot{q})$ 는 모든 $q, y, z \in R^n$, $\alpha \in R$ 에 대해

$$|C(q, \dot{q})| \leq C_M |\dot{q}|$$

$$C(q, y + \alpha z) = C(q, y) + \alpha C(q, z).$$

성질 3: 행렬 $\dot{M} - 2C$ 는 skew-symmetric이다.

성질 4: 행렬 M 과 C , 벡터 G 는 미지의 $p \times 1$ 파라미터 벡터 θ 에 대해 선형이어서 식 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\theta = \tau$$

원하는 위치, 속도 및 가속도 벡터를 각각 $q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$ 라 하고

고 $Q_d = [q_d^T \dot{q}_d^T \ddot{q}_d^T]^T$ 라 정의한다. 연속이고 닫힌 집합(compact set) $Q_D \in R^{3n}$ 에 대해 $Q_d \in Q_D$ 라 가정할 때 미지의 파라미터가 존재하는 조건에서 로봇 매니플레이터의 관절 위치 벡터 $q(t)$ 가 원하는 궤적 $\dot{q}(t)$ 를 추종하도록 하는 적응제어기를 매니플레이터의 관절위치 측정치만을 사용하여 설계하고자 한다.

3. 상태궤환 적응제어기

상태제환 적용 제어입력을 다음과 같이 정한다[9].

$$\tau = \hat{M}(q) \ddot{q}_d + \hat{C}(q, \dot{q}_r) \dot{q}_d + \hat{G}(q) - K_d(e, \dot{e}) \dot{e} - K_p e \quad (2)$$

여기서 $e = q - q_d$ 는 위치 추종 오차벡터이고, 벡터 \dot{q}_r 은

$$\dot{q}_r = \dot{q} - \lambda e \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{1 + |e|}, \quad \lambda_0 > 0. \quad (3)$$

또한 행렬 $\hat{M}(\cdot)$ 과 $\hat{C}(\cdot)$, 벡터 $\hat{G}(\cdot)$ 는 각각 행렬 $M(\cdot)$ 과 $C(\cdot)$ 벡터 $G(\cdot)$ 의 추정치이고 K_d 와 K_p 는 대칭인 양한 행렬이다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 다음과 같은 오차 동특성 방정식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} M(q) \ddot{e} + C(q, \dot{q}) \dot{e} + K_d(e, \dot{e}) \dot{e} + \lambda C(q, e) \dot{q}_d + K_p e \\ = Y_r(q, \dot{q}_r, \ddot{q}_d) \bar{\theta} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $\bar{\theta} = \bar{\theta} - \theta$ 이고 $Y_r(q, \dot{q}_r, \ddot{q}_d)$ 는 $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 와 같은 구조를 갖는 $n \times p$ 행렬이다.

함수 s 를 $s = \dot{e} + \lambda e$ 로 정의하고, Lyapunov 후보함수를 다음과 같이 정한다.

$$V = \frac{1}{2} [s^T M(q) s + e^T K_p e + \bar{\theta}^T \Gamma^{-1} \bar{\theta}] \quad (5)$$

함수 V 를 미분하고 식 (1)과 식 (2)를 대입하면 다음 부등식을 얻는다.

$$\dot{V} \leq -x_1 |s_1|^2 - x_2 | \frac{\lambda}{2} e |^2 + \bar{\theta}^T \Gamma^{-1} (\dot{\bar{\theta}} + \Gamma Y_r^T s) \quad (6)$$

여기서 $s_1 = \dot{e} + \frac{\lambda}{2} e$ 이고 제어기 이득을 적절히 선정하면 x_1 과 x_2 는 0보다 크게 된다.

로봇트 매니플레이터가 갖는 미지의 파라미터 값이 유한한 범위 내에 있다고 가정하고 다음 두 집합을 정의하자.

$$\begin{aligned} \Theta &= \{ \theta \mid a_i \leq \theta_i \leq b_i, \quad 1 \leq i \leq p \} \\ \Theta_\delta &= \{ \theta \mid a_i - \delta \leq \theta_i \leq b_i + \delta, \quad 1 \leq i \leq p \}, \quad \delta > 0 \end{aligned}$$

부등식 (6)의 오른쪽 셋째항이 모든 $t \geq 0$ 에 대해 0보다 작도록 하고 파라미터 추정 벡터 $\bar{\theta}(t)$ 가 닫힌 집합(bounded set) 내에 있도록 하기 위한 파라미터 추정 알고리즘은 다음과 같은 연속 파라미터 투영 알고리즘(smoothed projection algorithm)으로 한다[8].

$$\dot{\bar{\theta}}_i = \begin{cases} \gamma_{ii} \phi_i & \text{if } a_i < \bar{\theta}_i < b_i \text{ or} \\ & \text{if } \bar{\theta}_i \geq b_i \text{ \& } \phi_i \leq 0 \text{ or} \\ & \text{if } \bar{\theta}_i \leq a_i \text{ \& } \phi_i \geq 0 \\ \gamma_{ii} \bar{\phi}_i & \text{if } \bar{\theta}_i \geq b_i \text{ \& } \phi_i \geq 0 \\ \gamma_{ii} \hat{\phi}_i & \text{if } \bar{\theta}_i \leq a_i \text{ \& } \phi_i \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

여기서

$$\bar{\phi}_i = \left[1 + \frac{b_i - \bar{\theta}_i}{\delta} \right] \phi_i, \quad \hat{\phi}_i = \left[1 + \frac{\bar{\theta}_i - a_i}{\delta} \right] \phi_i.$$

또한 ϕ_i 는 행렬 $\phi = -Y_r^T s$ 의 i 번째 원소이고, γ_{ii} 는 대각선 행렬 Γ 의 i 번째 대각선 원소이다. 파라미터의 추정 오차벡터의 초기치 $\bar{\theta}(0)$ 가 $\bar{\theta}(0) \in \Theta$ 에 속하면, 식 (7)의 추정 알고리즘은 모든 $t \geq 0$ 에서 $\bar{\theta}(t) \in \Theta_\delta$ 가 되도록 하고, $\dot{V} \leq 0$ 를 만족시킨다. 따라서 오차벡터 e 와 $\bar{\theta}$ 는 유한하게 되고 Q_d 와 $\bar{\theta}$ 도 유한하게 된다. 모든 신호가 유한하고 $\dot{V} \leq -x_1 |s_1|^2 - x_2 | \frac{\lambda}{2} e |^2$ 와

invariance 정리[11]에 의해 $t \rightarrow \infty$ 일 때 $e(t) \rightarrow 0$ 로 된다.

4. 출력제환 제어기 구성

식 (1)의 로봇트 매니플레이터 모델에 대한 오차 동특성 방정식을 다음과 같이 상태변수 방정식으로 나타내자.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\ddot{q}_d - M^{-1}(x_1, q_d) [C(x, q_d, \dot{q}_d)(x_2 + \dot{q}_d) \\ &\quad + G(x_1, q_d)] + M^{-1}(x_1, q_d) \tau^e(x, Q_d, \bar{\theta}) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $x_1 = e$, $x_2 = \dot{e}$ 이다.

제어입력 $\tau^e(x, Q_d, \bar{\theta})$ 는 추정되는 상태를 포함하는 입력 토오크가 허용범위를 벗어나면 포화되도록 하는 포화함수를 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_i^e(e, \dot{e}, Q_d, \bar{\theta}) = S_i \text{sat} \left(\frac{\tau(e, \dot{e}, Q_d, \bar{\theta})}{S_i} \right), \quad 1 \leq i \leq n \quad (9)$$

여기서 S_i 는 e , \dot{e} , Q_d , 와 $\bar{\theta}$ 가 유한집합내에 있을 때

$$S_i \geq \max | \tau_i(e, \dot{e}, Q_d, \bar{\theta}) |, \quad 1 \leq i \leq n. \quad (10)$$

출력제환 제어시스템은 관절 위치추정치로부터 속도벡터를 추정하기 위한 관측기를 이용하여 구성하는데 사용되는 관측기는 다음과 같이 구성한다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_1 &= \hat{x}_2 + \frac{1}{\epsilon} L_1(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 &= \frac{1}{\epsilon} L_2(x_1 - \hat{x}_1) - \ddot{q}_d + \hat{M}(\hat{x}_1, q_d) [\hat{C}(\hat{x}_1, q_d, \dot{q}_d) \\ &\quad \times (\hat{x}_2, \dot{q}_d) + \hat{G}(\hat{x}_1, q_d)] + \hat{M}^{-1}(\hat{x}_1, q_d) \tau^e(\hat{x}_1, Q_d, \bar{\theta}) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, $L_1 = \text{diag}(\alpha_{1i})$, $L_2 = \text{diag}(\alpha_{2i})$, $i = 1, \dots, n$ 이고 ϵ 는 정해져야 할 양의 상수이다. 양의 상수 α_{ij} 는 행렬

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} -L_1 & I \\ -L_2 & 0 \end{bmatrix}_{n \times n}$$

이 Hurwitz 행렬이 되도록 선정한다.

새로운 벡터 ζ_i 를

$$\zeta_i = \frac{1}{\epsilon^{2-i}} (x_i - \hat{x}_i), \quad i = 1, 2 \quad (12)$$

로 정의하고 $\zeta = [\zeta_1^T \zeta_2^T]^T$ 라 하면 페루프 시스템을 다음과 같이 표준 쌍극라 페터베이션(standard singular perturbation) 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B [-\ddot{q}_d - F(x, q_d, \dot{q}_d) + M^{-1}(x_1, q_d) \\ &\quad \times \tau^e(x - \bar{D}(\epsilon)\zeta, Q_d, \bar{\theta})] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\dot{\bar{\theta}} = \text{Proj}(\bar{\theta}, \phi(x - \bar{D}(\epsilon)\zeta, Q_d, \bar{\theta})) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \epsilon \dot{\zeta} &= (A - \bar{L}C)\zeta + \epsilon B [F(x, q_d, \dot{q}_d) \\ &\quad - \hat{F}(x - \bar{D}(\epsilon)\zeta, q_d, \dot{q}_d)] + \{ M^{-1}(x_1, q_d) \\ &\quad - \hat{M}^{-1}(x_1, q_d) \} \tau^e(x - \bar{D}(\epsilon)\zeta, Q_d, \bar{\theta}) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} \\ I_{n \times n} \end{bmatrix}, \quad C = [I_{n \times n} \ 0_{n \times n}],$$

$$\overline{D}(\varepsilon) = \begin{bmatrix} \varepsilon I_{n \times n} & 0 \\ 0 & I_{n \times n} \end{bmatrix}, \quad \overline{L} = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix}$$

이고 행렬 $(A - \overline{L}C) = \overline{A}$ 는 Hurwitz이다. 함수 $F(\cdot)$ 와 $\hat{F}(\cdot)$ 는 각각

$$F(x, q_d, \dot{q}_d) = -M^{-1}(x_1, q_d)(C(x, q_d, \dot{q}_d)(x_2 + \dot{q}_d) + G(x_1, q_d))$$

$$\hat{F}(x - \overline{D}(\varepsilon)\xi, q_d, \dot{q}_d) = -\hat{M}^{-1}(x_1 - \varepsilon\xi_1, q_d)(\hat{C}(x - \overline{D}(\varepsilon)\xi, q_d, \dot{q}_d)(x_2 - \varepsilon\xi_2, \dot{q}_d) + \hat{G}(x_1 - \varepsilon\xi_1, q_d))$$

이고, $\hat{F}(\cdot)$ 는 유한함수로 제한된다.

식 (11)로 표시되는 관측기는 제어시스템의 설계와 분리하여 설계할 수 있으며 ε 이 작을수록 추정속도가 빠르게 된다. 그러나 $\hat{M}(\cdot)$ 의 역행렬을 포함하므로 파라미터 추정 동안 $\hat{M}(\cdot)$ 의 역행렬이 존재해야 하는데, 시스템 파라미터 변동범위가 크지 않으면 $\hat{M}(\cdot)$ 의 역행렬이 존재하게 된다[10].

관측기의 구조가 식 (8)의 오차 동특성방정식의 구조와 유사하기 때문에 식 (15)의 우변의 두번째항은 과도상태가 지난 후에 매우 작아지므로 관측기에 의한 추정오차가 작아지게 된다. 또한 식 (15)의 우변의 두번째항은 $\varepsilon \rightarrow 0$ 일 때 없어지기 때문에 외란억제 효과도 얻을 수 있다.

식 (12)의 변수 ξ_i 는 $\varepsilon \rightarrow 0$ 가 될 때 임펄스 형태의 피이킹 현상을 갖을 수 있으나 유한함수 $\hat{F}(\cdot)$ 와 포화함수 $r^i(\cdot)$ 에 포함되기 때문에 저속변수인 x , $\hat{\theta}$ 에서는 피이킹이 발생되지 않는다.

충분히 작은 ε 에 대해 관절 위치 측정치만을 사용하는 출력 제한제어시스템은 상태 제한제어시스템의 성능을 복원시킬 수 있음을 설명하고자 한다.

집합 Ω 와 Ω_0 를 각각

$$\Omega = \{x \mid V \leq c_4\}, \quad \Omega_0 = \{x \mid V \leq b_4 < c_4\}$$

로 정의할 때, $(x(0), \hat{\theta}(0)) \in \Omega_0 \times \Theta$ 이면, 제어입력이 포화되므로 $x(t) \in \Omega$ 이고

$$\|x(t)\| \leq \|x(0)\| + k_2 t \quad (16)$$

가 된다. 따라서 ε 에 관계없이 $(x(t), \hat{\theta}(t)) \in \Omega \times \Theta_\delta$ 인 유한한 T_1 이 존재한다. 한편 성능함수 ν 를 $\nu = \xi^T P \xi$ 로 정하고 식 (15)의 시스템에 대해 ν 를 미분하면

$$\dot{\nu} \leq -\frac{\gamma_1}{\varepsilon} \nu, \quad \gamma_1 = \frac{1}{2\lambda_{\max}(P)}$$

변수 ξ 의 초기치가 $\|\xi(0)\| \leq \frac{k}{\varepsilon}$ 일 때, $k_5 = \frac{k^2}{2\gamma_1}$ 로 정하

면 $\nu(t) \leq \frac{k_5}{\varepsilon} e^{-\frac{\gamma_1}{\varepsilon} t}$ 이 되므로 $T(\varepsilon) = \frac{\varepsilon}{\gamma_1} \ln \frac{k_5}{\rho \varepsilon^4} \leq \frac{1}{2} T_1$ 가

되는 $0 < \varepsilon \leq \varepsilon_1^*$ 인 충분히 작은 ε_1^* 에 대해 $\nu(T, \varepsilon) \leq \rho \varepsilon^2$ 가 되게 할 수 있다.

시스템 (13)-(15)의 상태변수들이

$$(x, \hat{\theta}, \xi) \in (V = c_4) \cap \Theta_\delta \times \{\xi^T P \xi \leq \rho \varepsilon^2\}$$

이고 충분히 작은 ε 에 대해 $\dot{V} \leq 0$ 이고 $\dot{\nu} \leq -\frac{\gamma_1}{\varepsilon} \nu$ 이므로 집

합 $\mathcal{E} = \Omega \times \Theta_\delta \times \{\xi^T P \xi \leq \rho \varepsilon^2\}$ 는 positively invariant하다. 이 집합내에서 $\nu \leq \rho \varepsilon^2$ 이므로 $\|\xi\|$ 는 $O(\varepsilon)$ 의 차원이 된다.

식 (13)은 $t \geq T(\varepsilon)$ 에서 다음과 같이 $\|\xi\|$ 차원의 섭동을 갖는 시스템으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + B(-\dot{q}_d + F(x, q_d, \dot{q}_d) + H(x_1, q_d)\tau^i(x, \hat{\theta})) + B(H(x_1, q_d)(\tau^i(\hat{x}, \hat{\theta}) - \tau^i(x, \hat{\theta}))) \quad (17)$$

따라서 $\hat{\theta} \in \Theta_\delta$ 에서 \dot{V} 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(Q) \|x\|^2 + k_6 \varepsilon, \quad k_6 > 0 \quad (18)$$

여기서, 행렬 Q 는 λ 와 x_1, x_2 로 적절히 정의된다. 식 (18)과 V 가 유한하므로 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \|x\|^2 dt \leq k_7 \varepsilon, \quad k_7 = \frac{k_6}{\lambda_{\min}(Q)} \quad (19)$$

이것은 관절의 위치와 속도 제곱의 평균 추종오차가 $O(\varepsilon)$ 의 차원이 됨을 의미하므로 충분히 작은 ε 에 대해 관절 위치 측정치만을 사용하는 출력 제한제어시스템은 상태 제한제어시스템의 성능을 복원시킬 수 있다.

5. 시뮬레이션

그림 1과 같은 미지의 부하를 갖는 2-링크 로봇 매니퓰레이터에 제안된 출력제한 적응제어 방식을 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실행하였다. 이 로봇에 대한 동특성 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} M_{11}(q) & M_{12}(q) \\ M_{12}(q) & M_{22}(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11}(q, \dot{q}) & C_{12}(q, \dot{q}) \\ C_{21}(q, \dot{q}) & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1(q) \\ G_2(q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

여기서

$$M_{11}(q) = m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos q_2 + I_1 + I_2,$$

$$M_{12}(q) = m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos q_2 + I_2, \quad M_{22} = m_2 l_2^2 + I_2,$$

$$C_{11}(q, \dot{q}) = -m_2 l_1 l_2 \sin q_2 \dot{q}_2,$$

$$C_{12}(q, \dot{q}) = -m_2 l_1 l_2 \sin q_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2),$$

$$C_{21}(q, \dot{q}) = m_2 l_1 l_2 \sin q_2 \dot{q}_1,$$

$$G_1(q) = (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) g \cos q_1 + m_2 l_2 g \cos(q_1 + q_2),$$

$$G_2(q) = m_2 l_2 g \cos(q_1 + q_2).$$

파라미터 θ_1 에서 θ_6 를 다음과 같이 정의된다.

$$\theta_1 = m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + I_1, \quad \theta_2 = m_2 l_2^2 + I_2, \quad \theta_3 = m_2 l_1 l_2,$$

$$\theta_4 = m_1 l_{c1}, \quad \theta_5 = m_2 l_1, \quad \theta_6 = m_2 l_2$$

로봇 매니플레이터의 파라미터 값들을 각각

$$m_1 = 10\text{kg}, l_1 = 1\text{m}, l_{c1} = 0.5\text{m}, I_1 = \frac{10}{12}\text{kg} \cdot \text{m}^2,$$

$$m_2 = 5\text{kg} + \Delta m_2, l_2 = 1\text{m}, l_{c2} = 0.5\text{m} + \Delta l_2,$$

$$I_2 = \frac{5}{12}\text{kg} \cdot \text{m}^2 + \Delta I_2, g = 9.8\text{m}/\text{sec}^2$$

로 정할 때, $\Delta m_2, \Delta l_2$ 와 ΔI_2 는 미지의 부하에 대한 파라미터 변동범위를 나타내며 본 시뮬레이션에서는

$$0 \leq \Delta m_2 \leq 1\text{kg}, 0 \leq \Delta l_2 \leq 0.1\text{m}, 0 \leq \Delta I_2 \leq \frac{1}{12}\text{kg} \cdot \text{m}^2 \quad (21)$$

으로 가정한다. 식 (21)의 조건에 따라 파라미터 θ_i 는

$$8.33 \leq \theta_1 \leq 9.34, 1.66 \leq \theta_2 \leq 2.66, 2.5 \leq \theta_3 \leq 3.6, 5 \leq \theta_5 \leq 6,$$

$2.5 \leq \theta_6 \leq 3.6$ 의 범위내에 있게 되며 이 범위에서 $\hat{M}(\cdot)$ 는 역행렬이 존재한다.

두 링크의 관절위치가 이동하는 기준체적을

$$q_{d1} = q_{d2} = 1.57(1 - e^{-5t})(1 + 5t) \text{ [rad]}$$

으로 정하고 제어기의 PD이득을 $K_p = 150I, K_d = 80I$, 파라미터 추정 이득 행렬을 $\Gamma = 10I$ 로 정한다. 상수 $x_1, x_2 > 0$ 이 되도록 하기 위하여 $\lambda_0 = 1$ 로 정하고, $\delta = 0.05$ 로 하였다.

집합 $\Omega_1 = \{\frac{1}{2} e^T K_p e + \frac{1}{2} s^T M(q) s \leq 240\}$ 로 정하면 입력 토크

크의 포화함수 값은 각각 $S_1 = 1880, S_2 = 980$ 이 된다.

함수 $\hat{F}(\cdot)$ 를 유한하게 하기 위한 집합을

$$\Omega_s = \{\frac{1}{2} e^T K_p e + \frac{1}{2} s^T \hat{M}(\hat{e} + q_d) \hat{s} \leq 300\}$$

로 정한다.

추정되는 파라미터의 초기치가 각각 $\hat{\theta}_1(0) = 8.33,$

$\hat{\theta}_2(0) = 1.66, \hat{\theta}_3(0) = 2.5, \hat{\theta}_5(0) = 5, \hat{\theta}_6(0) = 2.5$ 이고,

초기조건 $e_1(0) = e_2(0) = -0.1$ 일 때 $\epsilon = 0.001$ 과 $\epsilon = 0.01$ 에

대한 시뮬레이션 결과는 그림 2와 그림 3과 같다. $\epsilon = 0.01$ 일 때 입력 토크는 포화함수 값보다 작으므로 입력의 크기를 제한하지 않으며 제어효과는 $\epsilon = 0.001$ 일 때보다 나쁘다. 두 결과로부터 출력제한 적응제어시스템의 성능은 $\epsilon \rightarrow 0$ 일 때 상태제한 시스템의 성능을 복원시킨다.

6. 결론

본 논문에서는 강체 로봇에 대한 관절의 위치 측정치만을 사용하는 출력제한적응제어를 설계하고 상태제한 제어에 의해 얻어지는 성능을 점진적으로 복원시킬 수 있음을 보였다. 관절의 속도를 추정하기 위한 고이득 관측기의 구조는 오차 동특성방정식의 구조와 유사하도록 하여 추정오차를 줄이도록 하였다. 고이득 관측기를 사용할 때 발생될 수 있는 피어링이 제거되도록 제어입력을 포화시켰다. 제안된 출력제한 적응제어시스템의 성능은 설계 파라미터 ϵ 이 감소함에 따라 상태제한에 의해 얻어지는 제어성능을 복원시킬 수 있음을 2-링크 로봇매니플레이터의 궤적제어에 적용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 입증하였다.

참고문헌

- [1] M. W. Spong and R. Ortega, "On adaptive inverse dynamics control of rigid robots," IEEE Trans. Automat. Contr., vol.35, no.1, pp.92-95, 1990.
- [2] J. J. Craig, P. Hsu, and S. S. Sastry, "Adaptive control of mechanical manipulators," Int. J. Robotics Res., vol.6, no.2, pp. 16-28, 1987.
- [3] J.-J. E. Slotine, "On the adaptive control of robot manipulators," Int. J. Robotics Res., vol.6, no.3, pp.16-28, 1987.
- [4] S. Nicosia and P. Tomei, "Robot control by using only joint position measurements," IEEE Trans. Automat. Contr., vol.35, no.9, pp.1058-1061, 1990.
- [5] S. Nicosia and A. Tornambe', "High-gain observers in the state and parameter estimation of robots having elastic joints," Syst. Contr. Lett., vol.13, pp.331-337, 1989.
- [6] S. Nicosia, A. Tornambe', and P. Valigi, "Experimental results in state estimation of industrial robots," Proc. 29th C DC, Honolulu, Hawaii, Dec. 1990, pp.360-365.
- [7] F. Esfandiari and H. Khalil, "Output feedback stabilization of fully linearizable systems," Int. J. Contr., vol.56, no.5, pp. 1007-1037, 1992.
- [8] H. Khalil, "Adaptive output feedback control of nonlinear systems represented by input-output models," IEEE Trans. Automat. Contr., vol.41, no.2, pp. 177-188, 1996.
- [9] H. Berghuis, R. Ortega, and H. Nijmeijer, "A robust adaptive robot controller," IEEE Trans. Robotics Automat., vol.9, no.6, pp.825-830, 1993.
- [10] J. J. Craig, *Adaptive Control of Robotic Manipulators*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1988.
- [11] H. Khalil, *Nonlinear Systems*, MacMillan, 1992.
- [12] M. W. Spong and M. Vidysagar, *Robot Dynamics and Control*. New York: John Wiley, 1989.

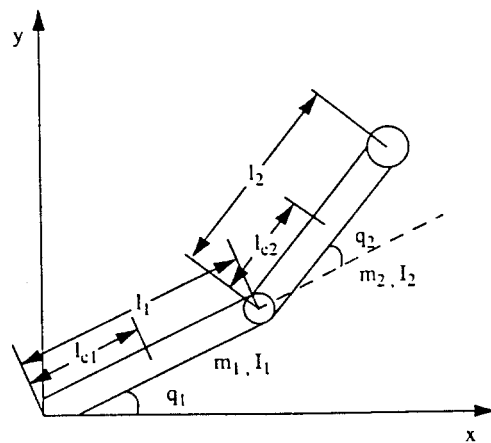


Figure 1: Two-link planar robot

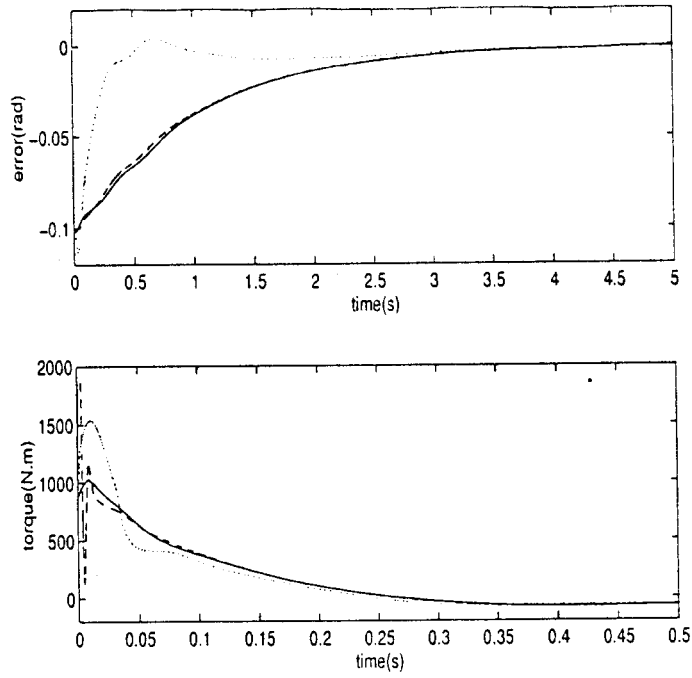


Figure 2: Tracking error and torque of link 1 for state feedback(solid) and output feedback with $\epsilon = 0.01$ (dotted) and $\epsilon = 0.001$ (dashed) under saturated control and $e_1(0) = e_2(0) = -0.1$

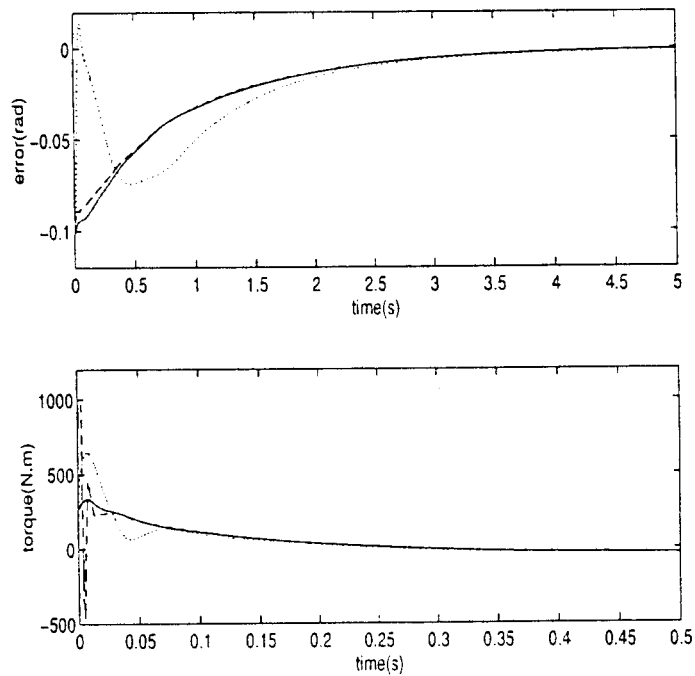


Figure 3: Tracking error and torque of link 2 for state feedback(solid) and output feedback with $\epsilon = 0.01$ (dotted) and $\epsilon = 0.001$ (dashed) under saturated control and $e_1(0) = e_2(0) = -0.1$