

유연성 관절 매니플레이터에 대한 적응제어기 설계 및 응용

* 노희석 김용석 이건영 양해원
한양대학교 전기공학과

An Adaptive Controller Design and its Application for a Flexible Joints Manipulator

* Hee-Seok Rho Eung-Seok Kim Keon-Young Yi Hai-Won Yang

Dept. of Electrical Eng. Han-Yang Univ.

Abstract - This paper proposes an adaptive control system using a 80286 microprocessor-based system and DC servo motors for the control of flexible joint manipulator. In this paper, we construct the controller based on a singular perturbation strategy damping out the elastic oscillations at the joints. we added to the controller the compensator for damping the joint and the term for decreasing the position error between the actuator and the link in order to improve the asymptotical convergence of the position of the link.

It is shown that the implementation of this control algorithm can be practical.

1. 서론

최근에 보다 경량화된 매니플레이터가 개발되는 경향이 있는데, 이로 인해 관절이 유연성을 갖게 된다[5]. 그러므로, 매니플레이터를 모델링하고 제어할 경우 보다 우수한 성능을 얻으려면, 관절의 유연성이 고려되어야 한다. 그런데, 과거에는 강체로봇 매니플레이터에 대한 적응제어문제를 해결하기 위해 관절의 강성이 ∞ 라는 가정하에서는 많은 연구를 해왔으나, 유연성을 갖는 경우에 대한 연구와 실험은 많지 않았다.

매니플레이터의 축과 actuator를 연결하는 축이 유연한 경우에 각각의 관절에 독립적인 입력이 존재, system passivity성질 등을 만족하지 않아서 궤환 선형화를 통한 선형화를 할 수 없다. 또한 그 유연성이 클수록 관절의 탄성진동이 심해져서, 시스템의 성능이 떨어져 기대하는 제어목적을 이루지 못할 경우도 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 특이 섭동이론에 근거하고 참고문헌[6]처럼 사전에 계산하여 고정된 보상기 이득값이 아닌 실시간 추정된 이득값을 갖는 보상기를 추가한 알고리즘을 사용한다. 그리고, 이 알고리즘을 실험적으로 구현하기 위한 제어로 80286 마이크로 프로세서를 이용하였다. 이와함께 전동기 구동장치, 디지털 접속장치, 전동기와 알루미늄관 등으로 실험장치를 구성하였다. 이 실험을 통해 참고문헌[7]에서 제시된 알고리즘이 실제적으로 잘 적용될 수 있음을 보이고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2절에서는 유연성 관절 매니플레이터 시스템의 모델 및 특성을 설명하고, 3절에서는 이에 대한 적응제어를 기술하고, 4절에서는 실험설비 및 구조를 설명하고, 5절에서는 실험방법 및 결과를 보인 후에 마지막 절에서 결론을 내린다.

2. 유연성 관절 매니플레이터 시스템의 모델 및 특성

유연성 관절 매니플레이터 시스템은 다음과 같은 미분 방정식으로 표현할 수 있다.

$$D(q_1)\ddot{q}_1 + C(q_1, \dot{q}_1)\dot{q}_1 + G(q_1) = K(N^{-1}q_m - q_1) \quad (2.1)$$

여기서

$$J_m\ddot{q}_m + B_m\dot{q}_m + N^{-1}K(N^{-1}q_m - q_1) = u \quad (2.2)$$

- 1) $q_1, q_m \in R^n$ 은 각각 축과 전동기 회전축의 변위 (n 은 링크의 수)
- 2) $D(q_1) : R^n \rightarrow R^{n \times n}$ 은 모든 $q_1 \in R^n$ 에 대해서 symmetric positive definite 인 강체 축의 관성 행렬
- 3) $C(q_1, \dot{q}_1) : R^{n \times n} \times R^n \rightarrow R^n$ 은 전항력 및 구심력 벡터 (Coriolis and Centrifugal vector)
- 4) $G(q_1) : R^n \rightarrow R^n$ 은 중력 벡터
- 5) $N, K \in R^{n \times n}$ 은 각각 diagonal positive definite matrix인 gear ratio matrix와 스프링 상수 행렬
- 6) $J_m \in R^{n \times n}$ 은 전동기의 관성 행렬
- 7) $B_m \in R^{n \times n}$ 은 전동기 회전축의 점성 마찰 계수 행렬 (Viscous friction coefficient matrix)
- 8) $u \in R^n$ 은 전동기 actuator로 부터 발생하는 토크 입력

위의 식(2.1)과 식(2.2)는 관절의 유연성을 고려한 운동 방정식이다. 따라서 $N=1$ 이고 $K=\infty$ 라는 가정하에서 식(2.1), 식(2.2)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$(D + J_m)\ddot{q}_1 + (C + B_m)\dot{q}_1 + G = u \quad (2.3)$$

윗 식은 각 관절의 스프링 상수(또는 관절 강성) $K=\infty$ 라는 가정하에서 유도된 운동방정식이다. 식(2.3)으로 주어진 강체로봇 매니플레이터에 대한 가정은 다음과 같다[3].

- A1) 관성 행렬 $D(q_1)$ 는 symmetric positive definite이며 $D(q)$ 와 $D(q)$ 는 모두 항상 유계(uniformly bounded)이다.
- A2) 각 관절에 대한 독립적인 입력이 존재한다.
- A3) 축의 질량, 관성 모멘트와 같은 모든 상수 매개변수들은 일관화된 좌표계에 대한 기지의 함수들의 계수들로서 나타내어진다. 즉, 독립적인 매개변수로서 각각의 계수들을 정의하므로써 선형관계로 부터 식(2.3)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$(D+J_m)\ddot{q}_1 + (C+B_m)\dot{q}_1 + G = Y(q_1, \dot{q}_1, \ddot{q}_1)\theta = u \quad (2.4)$$

여기서 $Y(q_1, \dot{q}_1, \ddot{q}_1) \in R^{n \times r}$ 는 기지의 함수들을 요소로 갖는 regressor matrix, $\theta \in R^r$ 는 매개변수 벡터

- A4) $C(q_1, \dot{q}_1)$ 을 적절히 선정하므로써 $D - 2C$ 가 skew symmetric 성질을 만족하게 된다.

식(2.3)으로 주어진 강체 로보트 매니플레이터에 대한 4가지 가정 중에서 실제 유연성 관절 매니플레이터에 대해서는 A2), A3) 및 passivity 성질 등이 만족되지 못한다. 이렇게 유연성 관절 매니플레이터에 대해 앞의 4가지 가정이 성립되도록 하여 기존의 강체로보트 매니플레이터에 대한 적응제어 방식 [1], [2]을 그대로 적용할 수 있도록 하는 알고리즘은 다음과 같다.

3. 적응제어

식(2.1), (2.2)로 나타낸 유연성 관절 매니플레이터 시스템이 안정되도록 하기 위해 특이성동이론[4]에 근거하여 참고문헌[7]에서 제시된 제어 알고리즘은 다음과 같다.

$$u = N^{-1} \{ (D + N_1 M^{-1} N) \ddot{q}_r + C \dot{q}_r + N B_m N^{-1} \dot{q}_r + G - K_v \dot{e} - K_p e \} \quad (3.1a)$$

여기서 $q_r = \dot{q}_d - \Lambda q_e$, $q_e = q_1 - q_d$, $s = \dot{q}_1 - \dot{q}_r = \dot{q}_e + \Lambda q_e$
 $K_D = K_P T > 0$, $e = N^{-1} q_m - q_1$, $K_v > 0$, q_d 는 원하는 궤적, $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$
 $K_s = k_g s e^T$, $k_g > 0$ 상수 (3.1b)

적용칙은 Gradient Method로 다음과 같다.

$$\dot{\theta} = -\Gamma^{-1} Y(q_1, \dot{q}_1, q_r, \dot{q}_r, e) s \quad (3.2)$$

이제 이 제어방법을 실험적으로 적용해 보기로 한다.

4. 실험 설비 및 구조

제어대상의 하드웨어적인 구조는 그림 1.과 같다[8].

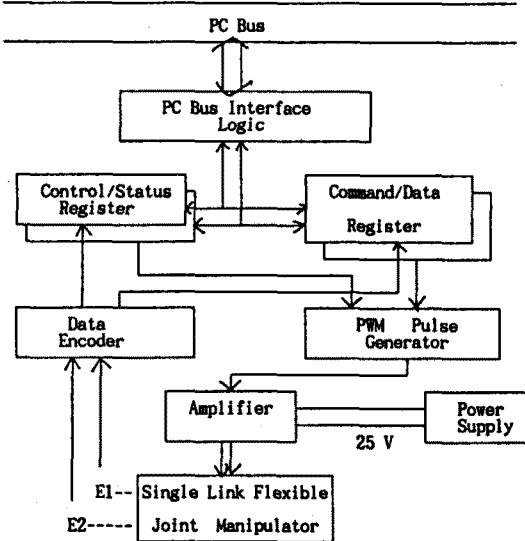


그림 1. 하드웨어 블록 선도

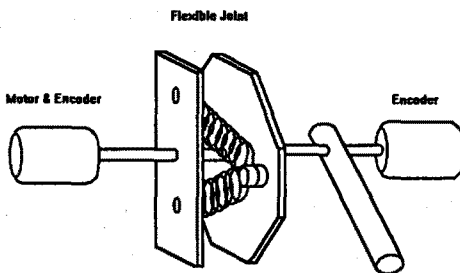


그림 2. 단일축 유연성 관절 매니플레이터 (Single Link Flexible Joint Manipulator)

본 논문에서는 앞 절의 알고리즘을 DC 서보모터를 이용하여 적용하기 위해 80287이 부착된 16 bit 12 Mhz IBM PC/AT를 이용하였다.

그리고, 단일축 유연성 관절 매니플레이터는 그림 2.와 같이 구동축 모터와 부하축 모터, 알루미늄판 두 장,

부하역할을 하는 철도 된 봉, 두 장의 알루미늄판을 연결하는 용수철부 등으로 이루어져 있다. 부하축 모터는 부하의 위치를 감지하는 역할을 한다. 관절의 유연성은 알루미늄판을 연결하는 용수철로부터 생긴다. 즉, DC 서보모터인 구동모터가 한 쪽 알루미늄판을 회전시키면 용수철의 탄성력에 의해 다른 한 쪽 알루미늄판이 구동부와 약간의 위상차를 이루면서 회전하며 구동부가 정지한 후에도 용수철의 탄성력에 의해 움직이게 된다. 본 실험에 사용하기 위해 특별히 제작된 제어기는 제어 알고리즘 소프트웨어만 수정하면 다양한 방식의 제어가 될 수 있는 82C54 Programmable interval timer를 이용하여 모터의 구동에 필요한 신호를 발생시키며 16Mhz의 시스템 클럭과 동기되어 동작하는 PC Bus 형식의 Card로 설계되었다. 또한 제어기에서 실시간 구현을 위한 인터럽트를 초당 1000회 발생시키고 매 12 msec마다 한 번씩 구동축과 부하축의 위치 및 속도를 샘플링하여 제어입력을 발생시킨다.

모터구동회로는 컴퓨터 외부에 설치하였고 별도의 Power Supply를 통해 PC 내부에 장착된 카드로부터 나오는 TTL level의 PWM펄스를 증폭하여 모터를 구동한다. 모터를 동작시키는 원리는 PWM방식을 이용하며, 이를 위해서 PWM Pulse Generator 회로 및 pulse폭 조정을 위한 (period는 H/W level) PC Interface를 제공한다.

본 실험에서 컴퓨터는 user-interface 및 알고리즘 수행을 위한 실시간 계산을 담당한다. 속도 및 위치정보는 두 개의 모터에 부착된 Encoder E1, E2를 통해서 나오는 펄스수를 측정하여 계산하였고, 출력된 제어입력은 82C54 counter 값을 이용하여 PWM펄스의 on-time을 조정하므로써 모터에 가해지는 전류를 조절하는 방식이다.

소프트웨어는 C언어를 사용하였고 인터럽트 서비스 루틴을 이용하여 양쪽 모터의 위치 및 속도를 계산한다. 이 정보는 제어알고리즘 수행루틴에 이용되며 이때 사용된 알고리즘[7]은 특이성동이론에 의한 유연성 관절 매니플레이터의 적응제어이며, 수치계산을 위해 Runge-Kutta method with Gill's coefficient법을 이용하였다. 또한 실시간 처리기능 및 제어입력 데이터를 하드웨어에 보내는 기능을 갖는다.

본 실험에서 컴퓨터는 user-interface 및 알고리즘 수행을 위한 실시간 계산을 담당한다. 속도 및 위치정보는 두 개의 모터에 부착된 Encoder E1, E2를 통해서 나오는 펄스수를 측정하여 계산하였고, 출력된 제어입력은 82C54 counter 값을 이용하여 PWM펄스의 on-time을 조정하므로써 모터에 가해지는 전류를 조절하는 방식이다.

소프트웨어는 C언어를 사용하였고 인터럽트 서비스 루틴을 이용하여 양쪽 모터의 위치 및 속도를 계산한다. 이 정보는 제어알고리즘 수행루틴에 이용되며 이때 사용된 알고리즘[7]은 특이성동이론에 의한 유연성 관절 매니플레이터의 적응제어이며, 수치계산을 위해 Runge-Kutta method with Gill's coefficient법을 이용하였다. 또한 실시간 처리기능 및 제어입력 데이터를 하드웨어에 보내는 기능을 갖는다.

본 실험에서 컴퓨터는 user-interface 및 알고리즘 수행을 위한 실시간 계산을 담당한다. 속도 및 위치정보는 두 개의 모터에 부착된 Encoder E1, E2를 통해서 나오는 펄스수를 측정하여 계산하였고, 출력된 제어입력은 82C54 counter 값을 이용하여 PWM펄스의 on-time을 조정하므로써 모터에 가해지는 전류를 조절하는 방식이다.

본 실험에서 컴퓨터는 user-interface 및 알고리즘 수행을 위한 실시간 계산을 담당한다. 속도 및 위치정보는 두 개의 모터에 부착된 Encoder E1, E2를 통해서 나오는 펄스수를 측정하여 계산하였고, 출력된 제어입력은 82C54 counter 값을 이용하여 PWM펄스의 on-time을 조정하므로써 모터에 가해지는 전류를 조절하는 방식이다.

본 실험에서 컴퓨터는 user-interface 및 알고리즘 수행을 위한 실시간 계산을 담당한다. 속도 및 위치정보는 두 개의 모터에 부착된 Encoder E1, E2를 통해서 나오는 펄스수를 측정하여 계산하였고, 출력된 제어입력은 82C54 counter 값을 이용하여 PWM펄스의 on-time을 조정하므로써 모터에 가해지는 전류를 조절하는 방식이다.

본 실험에서 컴퓨터는 user-interface 및 알고리즘 수행을 위한 실시간 계산을 담당한다. 속도 및 위치정보는 두 개의 모터에 부착된 Encoder E1, E2를 통해서 나오는 펄스수를 측정하여 계산하였고, 출력된 제어입력은 82C54 counter 값을 이용하여 PWM펄스의 on-time을 조정하므로써 모터에 가해지는 전류를 조절하는 방식이다.

본 실험에서 컴퓨터는 user-interface 및 알고리즘 수행을 위한 실시간 계산을 담당한다. 속도 및 위치정보는 두 개의 모터에 부착된 Encoder E1, E2를 통해서 나오는 펄스수를 측정하여 계산하였고, 출력된 제어입력은 82C54 counter 값을 이용하여 PWM펄스의 on-time을 조정하므로써 모터에 가해지는 전류를 조절하는 방식이다.

본 실험에서 컴퓨터는 user-interface 및 알고리즘 수행을 위한 실시간 계산을 담당한다. 속도 및 위치정보는 두 개의 모터에 부착된 Encoder E1, E2를 통해서 나오는 펄스수를 측정하여 계산하였고, 출력된 제어입력은 82C54 counter 값을 이용하여 PWM펄스의 on-time을 조정하므로써 모터에 가해지는 전류를 조절하는 방식이다.

본 실험에서 컴퓨터는 user-interface 및 알고리즘 수행을 위한 실시간 계산을 담당한다. 속도 및 위치정보는 두 개의 모터에 부착된 Encoder E1, E2를 통해서 나오는 펄스수를 측정하여 계산하였고, 출력된 제어입력은 82C54 counter 값을 이용하여 PWM펄스의 on-time을 조정하므로써 모터에 가해지는 전류를 조절하는 방식이다.

본 실험에서 컴퓨터는 user-interface 및 알고리즘 수행을 위한 실시간 계산을 담당한다. 속도 및 위치정보는 두 개의 모터에 부착된 Encoder E1, E2를 통해서 나오는 펄스수를 측정하여 계산하였고, 출력된 제어입력은 82C54 counter 값을 이용하여 PWM펄스의 on-time을 조정하므로써 모터에 가해지는 전류를 조절하는 방식이다.

$$J_1 \ddot{q}_1 + B_1 \dot{q}_1 + M_g \sin(q_1) = k(q_m - q_1) \quad (5.1)$$

$$J_m \ddot{q}_m + B_m \dot{q}_m + k(q_m - q_1) = u \quad (5.2)$$

식(5.1), (5.2)로 주어진 매니플레이터 즉 모터의 부하축이 추종해야 할 궤적은 아래의 미분 방정식으로 주어지며, 부하축이 초기 위치에서 90° 만큼 회전하도록 한다.

$$\ddot{q}_d + a_1 \dot{q}_d + a_2 q_d = 1.57 a_2 \quad (5.3)$$

여기서 $a_1, a_2 > 0$ 이다.

본 실험에서는 $a_1 = 24$, $a_2 = 100$ 으로 한다. 식(5.1), (5.2)는 $k \rightarrow \infty$ 라고 가정하면 다음식과 같이 표현될 수 있다.

$$(J_1 + J_m) \ddot{q}_1 + (B_1 + B_m) \dot{q}_1 + M_g \sin(q_1) = u \quad (5.4)$$

따라서, 식(5.4)를 근거로 하여 제어입력토크 u 를 결정하면,

$$u = \hat{\theta}_1 \ddot{q}_r + \hat{\theta}_2 \sin(q_1) + \hat{\theta}_3 \dot{q}_1 - k_{d4} \dot{q}_e - k_{e4} e \quad (5.5)$$

이다[7]. 여기에서 실제 파라미터는 $\theta_1 = J_1 + J_m$, $\theta_2 = M_g$, $\theta_3 = B_1 + B_m$, $\theta_4 = k_v$ 이다.

위의 식(5.5)에서 $-\hat{\theta}_4 e - k_{e4} e$ 가 새롭게 추가된 항이다. 이제 파라미터 적용칙은 다음 식으로 주어진다.

$$\dot{\theta}_1 = -g_1 \dot{q}_r s, \quad \dot{\theta}_2 = -g_2 \sin(q_1) s, \quad \dot{\theta}_3 = -g_3 \dot{q}_1 s, \quad \dot{\theta}_4 = -g_4 e s \quad (5.6)$$

각각의 이득값들은 $\lambda = 26.0$, $k_d = 3.0$, $k_g = 4.0$, $g_1 = 0.003$, $g_2 = 13.0$, $g_3 = 0.001$, $g_4 = 3.0$ 이다.

$k \rightarrow \infty$ 인 강체 매니플레이터인 경우에 적용되는 제어입력은

$$u = \hat{\theta}_1 \ddot{q}_r + \hat{\theta}_2 \sin(q_1) + \hat{\theta}_3 \dot{q}_1 - k_d s \quad (5.7)$$

과 같고, 이득값들은 $\lambda = 26.0$, $k_d = 3.0$, $g_1 = 0.003$, $g_2 = 13.0$, $g_3 = 0.001$ 이다. 이것을 본 실험에 적용한 결과인 그림 3. 에서 알 수 있듯이 시간이 지나도 진동이 계속되고 있다.

참고문헌[6]에 근거한 제어칙은 다음과 같다.

$$u = \hat{\theta}_1 \ddot{q}_r + \hat{\theta}_2 \sin(q_1) + \hat{\theta}_3 \dot{q}_1 - k_d s + k_v (q_1 - q_a) \quad (5.8)$$

이득값들은 $\lambda = 26.0$, $k_d = 3.0$, $k_v = 1.0$, $g_1 = 0.003$, $g_2 = 13.0$, $g_3 = 0.001$ 이다. 식(5.5)와 식(5.8)은 관절의 유연성을 고려한 것으로 이를 실험에 적용한 결과가 그림 4.와 같다. 그림 3.과 비교할 때 진동이 없어지고 매니플레이터 관절의 위치가 원하는 관절의 위치에 잘 수렴함을 알 수 있다. 그리고, 그림 4.에서 볼 때, 과도상태에서 (b)가 (c)보다 단조롭게 증가하고 있음을 알 수 있다. 그림 5.에서는 정상상태 오차가 0으로 수렴하는 속도는 거의 비슷함을 알 수 있다. 그림 6.은 식(5.5)에 의한 제어입력 토크이다.

본 실험에서 유연성 관절 매니플레이터의 위치를 제어하기 위해 참고문헌[6]과 참고문헌[7]의 알고리즘을 적용하여 비교하였다. 참고문헌[7]에 의한 알고리즘이 참고문헌[6]과 비슷한 성능을 보였다. 그리고, 이미 기대하는 위치에 도달한 부하측에 약간의 진동현상이 일어나는 경우가 간혹 있었다.

6. 결론

본 논문에서는 연속 시간 계통의 유연성 관절 매니플레이터에 대한 직접 적응제어를 실험적으로 구현하였다. 특이섭동 이론에 입각하여 매니플레이터에 대한 아무런 사전정보 없이 그대로 전동기 회전속과 매니플레이터 관절의 위치간의 오차의 크기에 따라 원하는 관절의 위치와 매니플레이터 관절 위치간의 오차가 줄도록 하는 적응칙을 이용하였다. 모의실험[7]에서는 참고문헌[6]보다 좋은 성능을 보이고 있으나 본 실험에서는 비슷한 성능을 보이고 있다. 이 인연을 분석하는 일과 장시간 실험시 간혹 발생하는 진동현상을 완전히 없애지 못한 점이 연구되어야 할 과제로 남는다.

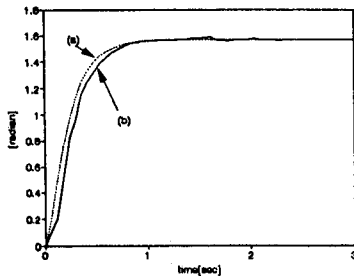


그림 3. $k=\infty$ 인 경우에 적용되는 제어입력을 사용한 경우의 유연성 관절 시스템의 위치 (a) q_d (b) q_1

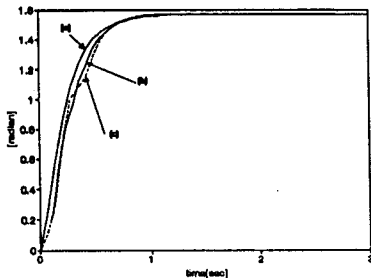


그림 4. 유연성 관절 시스템의 위치 (a) q_d (b) q_1 (참고문헌[6]) (c) q_1 (참고문헌[7])

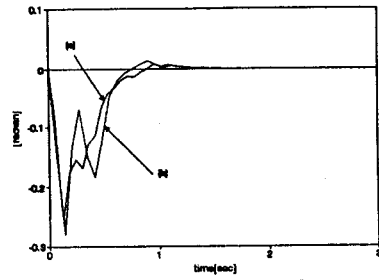


그림 5. 위치오차 (a)참고문헌[6] (b)참고문헌[7] (참고문헌[6]과 [7]을 이용한 경우)

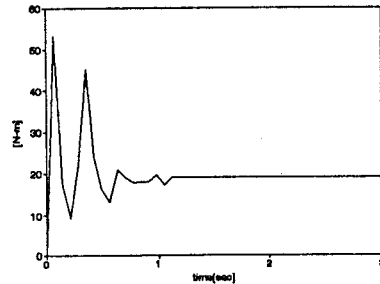


그림 6. 제어 입력 (참고문헌[7]을 이용한 경우)

참고문헌

- [1]. J.J.E. Slotine and Weiping Li, "Composite Adaptive Control of Robot Manipulators", Automatica, Vol.25, No.4., pp.509-519, 1989
- [2]. M.W.Spong and R.Ortega, "On Adaptive Inverse Dynamics Control of Rigid Robots", IEEE Trans. Automat. Contr., Vol.AC-35, No.1, pp.92-95, Jan, 1990
- [3]. R.Ortega and M.W.Spong, "Adaptive Motion Control of Rigid Robots : a Tutorial", Automatica, Vol.25, No.6, pp.877-888, 1989
- [4]. P.V.Kokotovic, "Applications of Singular Perturbation Techniques to Control Problems", SIAM Review, Vol.26, No.4, pp.501-550, Oct, 1984
- [5]. B. Siciliano and W.Book, "A Singular Perturbation Approach to Control of Lightweight Flexible Manipulators", Int., J., Robotics Res., Vol.7, No.4, pp.79-90, Aug, 1988
- [6]. F.Ghorbel, J.Y.Hung and M.W.Spong, "Adaptive Control of Flexible Joint Manipulators", Proc. IEEE Int. Conf.on Robotics and Automation Vol.2, pp.1188-1193, 1989
- [7]. 김용석, 양해원, "특이섭동이론에 의한 유연성 관절 매니플레이터의 적응제어", 한국 자동제어 학술회의 논문집, pp.7-11, 1991
- [8]. 김중석, 이진영, 양해원, "적응제어 알고리즘과 80286 마이크로 프로세서를 이용한 DC 서보모터의 강인한 속도 제어기의 구현", 추계학술대회 논문집, pp.353-356, 1991