

매니플레이터의 비집중 적응 제어기 설계

(Decentralized Adaptive Controller Design for Manipulators)

柳 鐔*, 黃 錫 鎔*

(Joon Lyou and Suk Young Hwang)

要 約

본 논문에서는 로봇 매니플레이터가 관절공간상에 주어진 기준궤적을 추적하도록 하는 비집중 적응제어기가 설계되었다. 제시된 제어기는 분산형 구조를 가지고 있고 복잡한 매니플레이터의 동적 모델을 직접 필요로 하지 않아, 계산량의 관점에서 매우 효과적이다. 각 관절은 비례·적분·미분 피드백 부분과 속도·가속도 관련 앞먹임 부분에 의해 독자적으로 제어되며, 2-관절 매니플레이터를 대상으로 시뮬레이션을 수행한 결과 본 비집중 방식이 유효함을 확인하였다.

Abstract

This paper presents a decentralized adaptive controller design for a robot manipulator to track the given desired trajectory in the joint space. The controller is of distributed structure and does not require the complex manipulator dynamic model, thereby it is computationally very efficient. Each joint is independently controlled by a PID feedback part and a velocity-acceleration feedforward part. Simulation results for a two-link direct drive manipulator conform that the proposed decentralized scheme is feasible.

I. 서 론

산업용 로봇에 적용되고 있는 제어기는 일반적으로 미리 결정된 상수 이득(gain)에 의해 각 관절(joint)이 독립적으로 제어되는 독립 관절제어기를 기본으로 하고 있어 집어서 옮겨 놓기(pick and place)와 같은 단순 반복적인 작업은 원만히 수행할 수 있으나, 부하(payload)가 빈번히 변할 때나 빠른 궤적을 추적할 경우에 만족할 만

한 성능을 기대할 수 없다. 이는 비선형적이고, 관절운동 간의 상호연관(interactions)이 심하게 나타나며, 시스템 파라미터(parameters)의 불확실성이 내포된(예: 부하 하중의 변동) 매니플레이터의 동특성을 직접적으로 고려하지 않았기 때문이다.

독립 관절제어기가 갖는 미비점을 보완하기 위하여 매니플레이터의 동적(dynamic) 모델에 기반을 둔 방법(Model-based Method)과 적응제어를 이용하는 방법이 활발히 연구되어 왔다^[1-2]. Computed Torque Method^[1]로 대표되는 전자의 방법은 상당히 정확한 동적 모델을 요구하여 모델링 오차가 큰 경우에 성능저하가 현저하고, 복잡한 모델의 사용으로 인하여 제어 계산량이 방대해지는 단점을 가진다. 반면에 후자의 방법은 동적 모델에 관한 자세한 사전 지식이 없이도 적응기구를 통하여 제어입력을 구하므로 전자의 방법에 비해 계산량을 많이 줄일 수 있으나, 대부분^[2]이 집중식 구조로 편성되어 계산량

*正會員, 忠南大學校 電子工學科

(Dept. of Elce. Eng., Chungnam Nat'l Univ.)

接受日字: 1992年 4月 3日

(※본 논문은 1990년도 문교부 지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제와 1992년도 지방대학육성과제 학술연구구조성비에 의하여 연구되었음.)

측면에서 여전히 개선의 여지를 남긴다. 근래에 비집중 적응 제어기법을 매니플레이터에 도입하는 연구가 관심 있게 진행되고 있다^[3,4]. 이는 각 관절을 하나의 부시스템(subsystem)으로 간주하여 각 부시스템마다 국부(local) 적응제어기를 구성하는 접근방식이다. 분산형의 간단한 제어구조를 도입함으로써 계산량 부담이 더욱 줄고 매니플레이터의 넓은 동작 범위에 대해 비교적 만족스러운 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 [3]의 설계 개념을 바탕으로 매니플레이터의 경로추적을 위한 비집중 적응 제어방식이 제시되었다. 본 방식과 [3]의 방식을 비교해 보면 국부 제어기가 앞먹임(feedforward)과 되먹임(feedback) 부분으로 구성되는 측면에서 구조상 비슷하나, 국부 제어입력을 구하는데 필요한 제어 파라미터가 다르므로 따라서 적용기구에 차이가 있고 적용법칙은 [3]의 것에 비해 간단한 형태로 유도된다. 이는 [3,5]의 Lyaunov 설계법을 응용하여 얻어진 결과이다.

II. 분산형 적응제어기 설계

1. 매니플레이터 동력학 모델

n 개의 관절로 구성된 매니플레이터의 동력학 방정식은 다음과 같이 비선형 벡터 미분 방정식으로 표현될 수 있다.

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

여기서 q 는 n 차원의 각 위치(angular position) 벡터, \dot{q} 는 각 속도 벡터, \ddot{q} 는 각 가속도 벡터이고, $H(q)$ 는 대칭·정칙인(symmetric positive-definite) $n \times n$ 차원의 관성행렬, $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 은 n 차원의 원심력과 코리올리스(Coriolis)력 벡터, $g(q, \dot{q})$ 은 n 차원의 중력 및 마찰력 벡터, τ 는 관절에 가해지는 n 차원의 토크(torque) 벡터이다. H , C , g 의 요소들은 q 와 \dot{q} 의 비선형 함수이며, 또한 H , C 가 비대각 행렬이므로 매니플레이터의 동력학 방정식은 관절간에 심한 상호작용이 존재함을 나타낸다.

분산형 제어기의 설계를 위하여 매니플레이터의 각 관절을 하나의 부시스템으로 간주하고, 관성결합, 코리올리스력, 중력 등에 의해 부시스템간의 상호간섭 작용이 이루어진다고 생각하자. 그러면 (1)의 동적모델을 n 개의 비선형 스칼라 미분방정식으로 분해하여 다시 쓸 수 있다.

$$h_{ii}(q)\ddot{q}_i + c_{ii}(q, \dot{q})\dot{q}_i + d_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \tau_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$d_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n \{h_{ij}(q)\ddot{q}_j + c_{ij}(q, \dot{q})\dot{q}_j\} + g_i(q, \dot{q}) \quad (2.a)$$

여기서 i 번째 미분방정식은 τ_i 를 입력으로, q_i 를 출력으로 하는 i 번째 관절의 입출력 모델이고, d_i 는 i 번째 관절에 총체적으로 작용하는 외란(disturbance) 토크로 볼 수 있다. 참고로 (2)에 주어진 n 개의 미분방정식들은 계수들 h_{ii} , c_{ii} , d_i 를 통하여 상호결합되어 있고, 계수들은 \sin , \cos 등의 비선형 성분을 다수 포함하고 있다.

2. 제어기 구조

매니플레이터의 관절공간 제어기 설계문제는 주어진 관절공간 궤적을 충실히 추적할 수 있도록 관절에 가해질 토크 벡터 τ 를 구하는 것이다. 본 연구에서는 간단한 구조의 분산형 제어방식을 채택하여, 즉 국부제어기 사이에 정보교환없이 해당 관절로 부터 취득가능한 정보만을 사용하여 제어입력을 구하도록 한다. 또한 제어 파라미터를 자동 생성하는 적용기구를 도입함으로써 계산량 부담을 줄이도록 한다. 각 관절에서는 위치(q_i) 및 속도(\dot{q}_i) 성분만이 측정가능하다고 가정한다.

매니플레이터의 각 관절이 추종할 원하는 궤적이(q_{di} , \dot{q}_{di} , \ddot{q}_{di})로 주어졌을 때 위치, 속도, 가속도 오차와 국부 제어기가 활용하게 될 신호들을 다음과 같이 정의하자.

$$\begin{aligned} \tilde{q}_i &= q_i - q_{di}, \quad \tilde{\dot{q}}_i = \dot{q}_i - \dot{q}_{di}, \quad \tilde{\ddot{q}}_i = \ddot{q}_i - \ddot{q}_{di}, \\ s_i &= \tilde{\dot{q}}_i + \lambda_i \tilde{q}_i, \quad \tilde{q}_i = \dot{q}_i - \lambda_i \tilde{q}_i, \quad \dot{\tilde{q}}_i = \ddot{q}_i - \lambda_i \dot{\tilde{q}}_i, \\ i &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 λ_i 는 양의 상수로 선정되는 설계변수이다. 이제 추종오차를 (가능하면 빨리) 0으로 보내기 위하여 Lyapunov 설계법^[3,5]에 입각한 비집중 적응제어기를 다음과 같이 제시한다.

$$\begin{aligned} \tau_i &= \hat{h}_{ii}(t)q_{ii} + \hat{c}_{ii}(t)q_{ii} + \hat{d}_i(t) - k_i s_i, \\ \dot{\hat{h}}_{ii} &= -r_{11} s_i \dot{\tilde{q}}_i, \quad \dot{\hat{c}}_{ii} = -r_{12} s_i \dot{\tilde{q}}_i, \quad \dot{\hat{d}}_i = -r_{13} s_i \\ i &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (4.a)$$

여기서 $\hat{h}_{ii}(t)$, $\hat{c}_{ii}(t)$, $\hat{d}_i(t)$ 는 h_{ii} , c_{ii} , d_i 의 추정치로서 적용기구를 통하여 매순간 발생된다. r_{11} , r_{12} , r_{13} 는 가중치로서 양의 상수로 선택되며, $k_i > 0$ 은 고정된 비례·미분(PD) 이득으로서 추종오차의 과도특성을 개선하기 위하여 첨가되었다. (3)의 정의식을 이용하여 (4)의 각 항을 풀어 쓴 뒤 관련항끼리 모아 정리하면 다음과 같다.

$$\tau_i = \beta_1(t)\ddot{q}_{di} + \beta_2(t)\dot{q}_{di} + \beta_3(t)\tilde{q}_i + \beta_4 \int \tilde{q}_i dt + \beta_5(t)\dot{\tilde{q}}_i \quad (5)$$

여기서 $\beta_1 = h_{ii}$, $\beta_2 = c_{ii}$, $\beta_3 = -\lambda_i k_i - r_{i3} - \lambda_i \hat{c}_{ii}$, $\beta_4 = -r_{i3} \lambda_i$, $\beta_5 = k_i - \lambda_i \hat{h}_{ii}$, (5)의 처음 두항은 기준계적 정보를 이용한 앞먹임 부분이고, 나머지 세항은 추종오차에 대해 비례·적분·미분(PID) 작용을 취하는 되먹임 부분이다. 즉 국부제어기는 적용법칙 (4)에 의해 매순간 생성되는 가변이득을 사용하여 앞먹임 및 되먹임 보상을 동시에 수행한다(그림 1 참조). 참고로 [3]의 (6)~(10)식으로 주어지는 비집중 적용 방식은 국부제어기마다 6개의 조정변수를 둔 반면, 본 방식은 [5]의 설계기법을 적절히 이용하여 조정변수를 3개씩으로 줄임으로써 적용기구가 간편해지고 더 나아가 제어보강(update) 속도를 높힐 수 있어 실제 적용에 유리한 면을 갖는다.

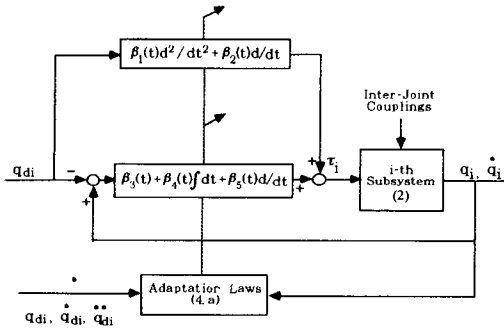


그림 1. 관절공간 비집중 적용 제어기의 구조
 Fig. 1. Structure of the local adaptive controller in joint space.

3. 안정 해석

제어기를 포함한 전체 시스템의 안정성을 보이기 위하여, 먼저 시스템 파라미터들이 제어보강 속도에 비해 느리게 변한다고 가정한다^[2-4]. 즉 제어계산 주기동안에 $\dot{h}_{ii} \cong 0$, $\dot{c}_{ii} \cong 0$, $\dot{d}_i \cong 0$ 이라 하자. 참고로 본 제어방식은 분산형이기 때문에 계산량 부담이 훨씬 적어서 이러한 가정을 정당화 시키기에 유리하다.

Lyapunov 함수를 다음과 같이 선정하자.

$$V(s_i, \phi_{i1}, \phi_{i2}, \phi_{i3}; i=1, 2, \dots, N) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \{ h_{ii}(q) s_i^2 + r_{i1}^{-1} \phi_{i1}^2 + r_{i2}^{-1} \phi_{i2}^2 + r_{i3}^{-1} \phi_{i3}^2 \} \quad (6)$$

여기서 $\phi_{i1} = \hat{h}_{ii} - h_{ii}$, $\phi_{i2} = \hat{c}_{ii} - c_{ii}$, $\phi_{i3} = \hat{d}_i - d_i$. V를 시간에 따라 미분하고, 동적 모델 (2)를 따라 평가하면 다음과 같다.

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^n \left\{ s_i (\tau_i - h_{ii} \ddot{q}_i - c_{ii} \dot{q}_i - d_i) + 1/2 s_i^2 (\dot{h}_{ii} - 2c_{ii}) + r_{i1}^{-1} \dot{\phi}_{i1} \phi_{i1} + r_{i2}^{-1} \dot{\phi}_{i2} \phi_{i2} + r_{i3}^{-1} \dot{\phi}_{i3} \phi_{i3} \right\} \quad (7)$$

(7)의 두번째 항 ($\dot{h}_{ii} - 2c_{ii}$)은 c_{ii} 의 적절한 표기에 의해 (관절 좌표계의 적절한 선정을 통하여) 0으로 소거될 수 있고^[5], 제어법칙 (4)와 (4.a)를 (7)에 대입·정리하면 다음의 결과식을 얻는다.

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^n \left\{ -k_i s_i^2 + \delta_i (\dot{h}_{ii}, \dot{c}_{ii}, \dot{d}_i) \right\} \quad (8)$$

여기서 $\delta_i = -r_{i1}^{-1} \phi_{i1} \dot{h}_{ii} - r_{i2}^{-1} \phi_{i2} \dot{c}_{ii} - r_{i3}^{-1} \phi_{i3} \dot{d}_i$.

(8)의 δ_i 는 가정에 의해 작은 값이며, δ_i 가 엄밀히 0이 아니어도 k_i 를 큰 값으로 취하여 $\dot{V} \leq 0$ 이 되게 할 수 있다. 이상에서 $V \geq 0$, $\dot{V} \leq 0$ 이므로, Lyapunov 안정이론의 표준논리^[6]에 따르면, $s_i(t)$, $\phi_{i1}(t)$, $\phi_{i2}(t)$, $\phi_{i3}(t)$ 는 이들의 유한한 초기치 및 모든 t에 대하여 유한하다 (globally uniformly bounded). 또한 $\delta_i = 0$ 이라는 가정 아래서 (8)의 \dot{V} 은 모든 i에 대하여 $s_i = 0$ 일 때만 0이므로, s_i 는 시간이 경과함에 따라 0으로 수렴한다. 동시에 $s_i = 0$ 이면 (3)으로부터 $\dot{q}_i = -\lambda_i \tilde{q}_i$, $\lambda_i > 0$ 이므로, 추종오차 \tilde{q}_i 은 지수함수적으로 (감쇄율 λ_i) 0에 수렴한다.

III. 시뮬레이션 결과

수직 평면상을 움직이고, 동력이 기어(gear)를 통하지 않고 직접 전달되는 수직 2관절 직결구동형(direct drive) 강체(rigid) 매니플레이터를 시뮬레이션 대상으로 삼았다. 이의 실제 외관은 PUMA 560 매니플레이터의 링크(link) 2와 3이 연결된 모습에 해당되며, 대상모델의 동적 파라미터들은 다음과 같이 주어진다^[3].

$$\begin{aligned} h_{11} &= 3.82 + 2.12 \cos(q_2) + 2m(0.432)^2 (1 + \cos(q_2)) \\ h_{12} &= h_{21} = 0.71 + 1.06 \cos(q_2) + m(0.432)^2 (1 + \cos(q_2)) \\ h_{22} &= 0.71 + m(0.432)^2 \\ c_{11} &= -1.06 \sin(q_2) \dot{q}_2 - m(0.432)^2 \sin(q_2) \dot{q}_2 \\ c_{12} &= -1.06 \sin(q_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) - m(0.432)^2 \sin(q_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ c_{21} &= 1.06 \sin(q_2) \dot{q}_1 + m(0.432)^2 \sin(q_2) \dot{q}_1 \\ c_{22} &= 0 \\ g_1 &= 81.82 \cos(q_1) + 24.06 \cos(q_1 + q_2) + q_1 + 0.5 \operatorname{sgn}(\dot{q}_1) + m(4.328) \{ \cos(q_1) + \cos(q_1 + q_2) \} \end{aligned}$$

$$g_2 = 24.06\cos(q_1 + q_2) + \dot{q}_2 + 0.5\text{sgn}(\dot{q}_2)$$

$$+ m(4.328)\cos(q_1 + q_2)$$

$$m = 10 \times g(\text{부하 질량})$$

기준궤적이 초기위치($q_{d1} = -\pi/2, q_{d2} = 0$)에서 최종위치($q_{d1} = 0, q_{d2} = \pi/2$)로 3초동안에 완만하게 움직이도록 계획되었다. $q_{di}(t)$ 는 아래와 같이 주어지며, $\dot{q}_{di}, \ddot{q}_{di}$ 은 q_{di} 로부터 미분하여 구할 수 있다. 이러한 경로는 직교좌표상에서 볼 때 Cycloid 모양을 그린다. 참고로 대상 매니플레이터가 이러한 궤적을 따라 움직일 때, 이의 동적 파라미터들은 비교적 심하게 변한다. 예를 들어, 관성결합 $h_{12}(q)$ 항을 보면 초기위치에서 5.51인 값이 최종 위치에서 2.58로 크게 변한다.

$$q_{d1}(t) = -\pi/2 + 1/4\{2\pi t/3 - \sin(2\pi t/3)\} \text{ rad}, \quad 0 \leq t \leq 3$$

$$= 0, \quad 3 < t$$

$$q_{d2}(t) = 1/4\{2\pi t/3 - \sin(2\pi t/3)\} \text{ rad}, \quad 0 \leq t \leq 3$$

$$= \pi/2, \quad 3 < t$$

이제 대상 매니플레이터에 대해 제시된 국부 적응제어를 적용한 컴퓨터 모사가 수행되었다. 참고로 매니플레이터의 미분방정식은 4차 Runge-Kutta 방법을 이용하여 풀었고, 적응법칙 (4.a)를 5ms의 표본시간으로 이산화하여 매주기마다 제어입력 (4)를 보강하였다. 부하 조건으로 다음의 두가지 경우를 고려하였다.

- (i) 부하 변화가 없는 경우($m=10\text{kg}$)
 - (ii) 1.5초에 부하를 떨어뜨린 경우
- (4)에 주어진 설계변수, 초기 추종오차, 조정변수의 초기 추정치를 다음과 같이 정하여 시뮬레이션한 결과가 그림 2에 주어져 있다.

$$\lambda_1 = 100, \lambda_{11} = 100, \lambda_{12} = 100, \lambda_{13} = 600, k_1 = 250$$

$$\tilde{q}_i(0) = 0, \tilde{\dot{q}}_i(0) = 0, \hat{h}_{ii}(0) = 0, \hat{c}_{ii}(0) = 0, i = 1, 2$$

$$\hat{d}_1(0) = 10, \hat{d}_2(0) = 5$$

그림 2의 (a)는 부하조건 (i)에 대해 각 관절의 위치가 기준궤적을 1° 범위내의 오차를 가지고 잘 추종하고 있음을 보여준다. (b)는 조정변수의 하나인 $\hat{d}_1(t)$ 가 어느

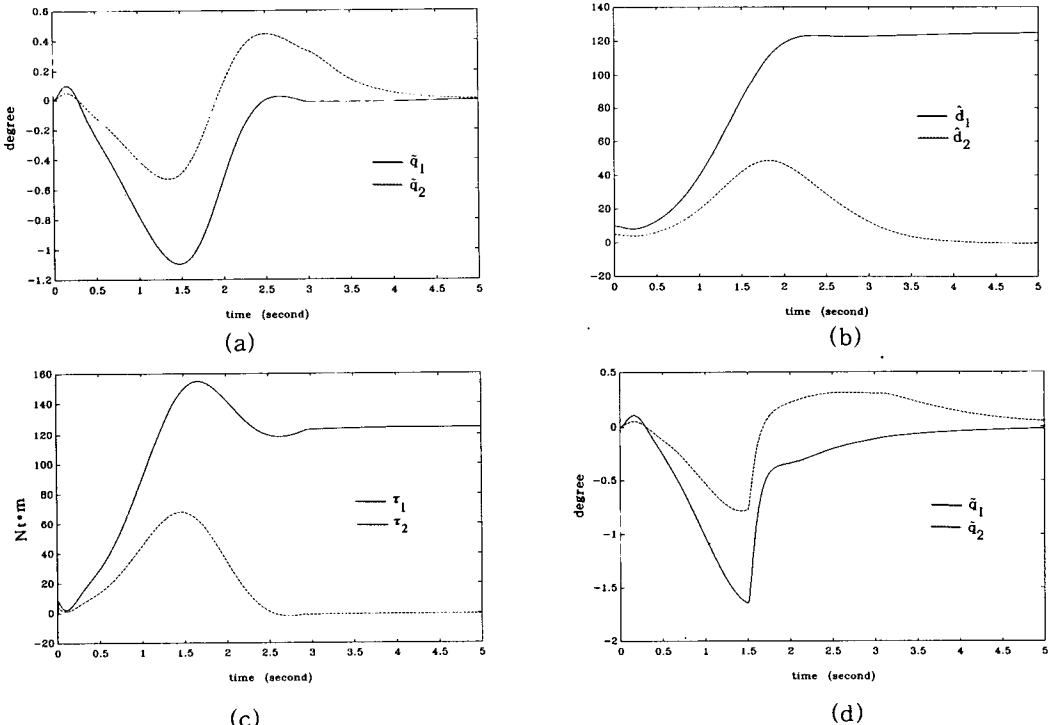


그림 2. 본 비집중 적응 제어기에 의한 응답들:
 (a) 추종오차 (b) 조정변수 (c) 토오크 입력 (d) 급격한 부하변동에 따른 추종오차
Fig. 2. Responses under the present decentralized adaptive controller.
 (a) tracking errors, (b) torque inputs, (c) adjustable parameters,
 (d) tracking errors with sudden payload change.

일정 수준까지 증가함을 보여주고, (c)는 이때 각 관절에 가해지는 토크 입력 $\tau_i(t)$ 를 도시한 것이다. 그림 2의 (d)는 부하조건 (ii)에 대해 추종오차를 나타낸 것으로 모델 파라미터가 천천히 변한다는 가정을 위배함에도 불구하고 조건 (i)에 비해 추종오차가 약간 증가하지만 본 제어기의 성능이 여전히 우수함을 보여준다. 한편으로 본 방식과의 성능비교를 위하여 상수 PD이득 독립 관절 제어기를 적용한 컴퓨터 모사가 별도로 수행되었다. (4)의 k_i 만을 가동시켜 ($k_v=250$) 부하조건 (i)에 대해 시뮬레이션한 결과가 그림 3에 주어져 있다. 그림에서 보는 바와 같이 추종오차가 크게 증가하고 최종 위치오차가 더 이상 줄어들지 않음을 알 수 있다.

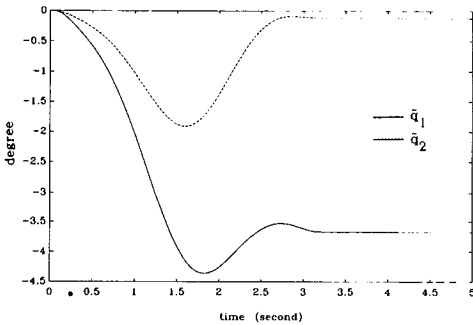


그림 3. 상수이득 독립 관절제어기에 의한 추종오차
Fig. 3. Tracking errors under the independent joint controller with constant PD gains.

IV. 결 론

매니플레이터 동적 모델의 비선형성, 관절간의 상호결합성, 링크 파라미터나 부하 하중의 불확실성을 효과적으

로 다루기 위한 방안으로, 적응 독립 관절 제어방식이 기존의 Lyapunov 설계법을 확장하여 제시되었다. 본 방식은 관절간의 정보교환 없이 해당 관절의 취득가능한 정보만을 사용하여 제어 입력을 구하는 분산형 구조를 가지며 국부제어기마다 적응기구를 도입하여 복잡한 동적 모델에 의존하지 않고 제어 파라미터를 생성해 낸다. 따라서, 제어 계산량이 적으면서 매니플레이터의 넓은 동작범위에서도 성능을 계속 유지시켜 실제 적용에 적합하다.

이러한 관절공간 제어기는 [3]에서와 마찬가지로 로봇 종단(End-effector)에 관한 작업공간 제어기로 쉽게 확장될 수 있다.

參 考 文 獻

- [1] R. P. Paul, Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control, MIT Press, 1981.
- [2] T. C. Hsia, "Adaptive Control of Robot Manipulators-A Review," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, San Francisco CA, pp. 133-189, 1986.
- [3] H. Seraji, "Decentralized Adaptive Control of Manipulators: Theory, Simulation and Experimentation," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 5, pp. 183-201, 1989.
- [4] D. T. Gavel and T. C. Hsai, "Decentralized Adaptive Control of Robot Manipulators," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Raleigh NC, pp. 1230-1235, 1987.
- [5] J. J. E. Slotine and W. Li, "On the Adaptive Control of Robot Manipulators," *Int. J. Robotics Research*, vol. 6, pp. 49-59, 1987.
- [6] K. S. Narendra and A. M. Annaswamy, *Stable Adaptive Systems*, Prentice-Hall, 1989.

著 者 紹 介



黃錫鎔(正會員)

1961년 2월 28日生. 1984년 8월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1992년 8월 충남대학교 전자공학과 졸업(공학석사). 1987년 5월~현재 한국원자력연구소 연구원. 주관심 분야는 로보틱스 및 로봇비전 등임.

柳 鐘(正會員) 第29卷 B편 第10號 參照

현재 충남대학교 전자공학과 부교수