電氣學會 論文誌 37巻 12號 1988年 12月

論 文
37～12～6

오프셋 모형화 기법을 이용한 상호연관 시스템의 분산형 적응제어

Decentralized Adaptive Control of Interconnected System using Off-Set Modeling

梁 興 錫*·朴 溶 植** 朱 成 淳§
(Heung-Suk Yang · Yong-Sik Park · Sung-Soon Joo)

요 약

대규모 시스템이 상수 기준 입력과 선형 시불변 상호 연관을 갖는 경우의 분산형 적응 제어 기법으로 오프셋 모형화를 이용한 분산형 적응제어를 제안하였다. 이 방식에서는 상호 연관항을 오프셋으로 모형화하여 각 부시스템을 독립적으로 분리시키고, 이에 대해 확정모델을 이용하여 오프셋의 영향을 내재적으로 제어 입력에 보상 시킴으로써 오프셋에 대한 강인성을 갖는 자기 동조 제어기를 구성하여 각 부시템을 안정하게 한다. 결과를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 보였다.

Abstract – In this paper, self tuning control of interconnected systems are dealt in view point of large scale system control. The plant model is given in MIMO ARMA procss. This process is simlified as independent SISO ARMA processes having offset terms, which are considered as effects of interconnections. In each decentralized system, self tuning controller with instrumental variable method is adopted. As a result, this algorithm enables the paramter estimation to be unbiased and non-drift. This controller contains a new implicit offset rejection technique. Simulation results consider well with the analysis in case of linear interconnection.

1. 서 론

일반적으로 대규모 시스템이라 함은 자원또는수단을 공유하며, 서로 밀접한 관계가 있는일련의목적과 제약조건에 의해 통제되는 상호 의존적인 구성체들로 이루어진 시스템을 일컫는 것으로서 대규모시스템의 외적 특징은 시스템의 차수가 큰것이라 할 수 있고, 내적 특징은 시스템의 결정 변수(decision variable)들간의 결합(coupling) 형태로 나타나는 구성체간의 복잡한 상호작용이라 할 수 있다. 이들은 시스템의 해석 및 제어를 까다롭게 하고, 과다한 계산량의 부담을 주는 원인이 된다.[1),2),3)] 따라서 효과적인 제어를 위하여, 많은 경우 분산형제어방식을 사용하게 된다.

그런데 대규모 시스템의 비집중제어이론에 관한 대부분의 연구가 시스템이 선형이고 시스템 계수와 상호 연관정도 등에 대하여 충분한 사전 지식이 주어진 경우를 상정하고 있으나, 실제로는 그와 같은

*正 會 員：서울대 工大 電氣工學科 敎授·工博
**正 會 員：明知大 電氣工學科 專任講師·工博
§正 會 員：서울대 大學院 電氣工學科 博士課程
接受日字：1988年 4月16日
1次修正：1988年 6月27日
2次修正：1988年 9月29日

조건들이 충족되지 않는 경우가 많다. 따라서 약간의 비 선형성을 지니거나 계수가 미지이고 사전 지식이 불충분한 시스템의 제어 및 자동화를 위해 적응제어 이론의 도입이 제기되었다. 그러나 적응제어 이론 자체의 안정도 해석이 1980년 초에야 정립되었고 최근에는 이 이론의 강인성 문제의 연구가 진행중인 추세에서 적응제어 이론의 대규모시스템 적용에 관한 연구는 현재 초기 단계에 있다.[4),5),6)]

대규모 시스템을 분산형 모델로 모형화하여 적응제어 시스템을 구성할 경우 가장 문제가 되는 것은 상호 연관항에 관한 정확한 정보부족으로 인하여 전체 시스템의 안정도가 보장되지 않는 것이다.[4)] 따라서 본 논문에서는 전체 시스템의 안정도 보장을 위하여 상호연관항을 오프셋으로 모형화하여 그 영향을 각 부 시스템별로 독립적으로 분리(decoupling)시켜 오프셋 제거 방식을 이용한 자기 동조 제어기의 형태로 분산형 적응제어기를 구성하였다.

2. 분산형 대규모 시스템과 모델 분리

2.1 대규모 시스템의 분산형 모델

고려할 대규모 시스템은 N개의 선형 부시스템이 상호 연관된 형태로 다음 식으로 나타낸다.(그림 1)

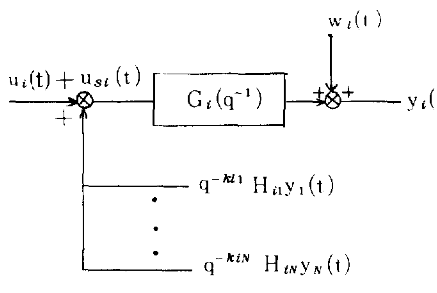

그림 1 대규모 상호 연관 시스템

Fig. 1 Large scale interconnected system.

$$u_{si}(t)=u_i(t)+\sum_{\substack{j=1\\ j\neq l}}^{N} q^{-k_{ij}}H_{ij}\, y_j(t) \tag{2.1}$$

$$y_i(t)=G_i(q^{-1})\; u_{si}(t)+w_i(t) \tag{2.2}$$

$$(i=1,\ 2,\ \cdots\cdots,\ N)$$

$$G_i(q^{-1})=\frac{q^{-K_i}B_i(q^{-1})}{A_i(q^{-1})} \tag{2.3}$$

여기서 $u_i(\cdot)$, $u_{si}(\cdot)$, $y_i(\cdot)$는 각각 i번째 부시스템의 제어기 출력, 부시스템 입력, 부시스템 출력을 나타낸다. 또 $G_i(\cdot)$는 부시스템의 전달 함수이며 $A_i(\cdot)$, $B_i(\cdot)$는 다항식이다. H_{ij}는 상호연관 연산자이며 $w_i(\cdot)$는 백색 잡음이다.

$$A_i(q^{-1})=1+a_{i1}q^{-1}+\cdots\cdots+a_{ini}q^{-ni} \tag{2.4}$$

$$B_i(q^{-1})=b_{i0}+b_{i1}q^{-1}+\cdots\cdots+b_{imi}q^{-mi} \tag{2.5}$$

제어 대상 대규모 시스템 (2.1) - (2.3)에 대해 다음을 가정한다.

가정 :

1) 각 부 시스템의 차수 n_i와 m_i는 안다.
2) 지연 시간 k_i, k_{ij}를 알고 있다.
3) 각 부 시스템에서 $A_i(\cdot)$와 $B_i(\cdot)$는 서로소(coprime)이다.
4) $b_{i0}\neq 0$, $\forall i$ (제어 방식이 최소 분산형인 경우에만 적용).
5) 상호 연관 연산자 H_{ij}는 상수이다.
6) 상호 연관항의 이득이 충분히 작다. (즉, weakly interconnected system)
7) 부시스템의 기준 입출력 y_{rj}는 상수이다.

2.2 모델 분리 (Model Decoupling)

2.3절에서 제시한 분산형 적응제어 알고리즘의 결과로서 각부시스템의 출력 y_i가 유계(bound)이면 식 (2.1) - (2.3)은 상호 연관항의 오프셋 처리에의해 N개의 부시스템으로 분리되며 ARMAX 모델로 표현될 수 있음을 다음 정리로 보인다.

정리 2,1 :

부 시스템의 출력이 유계(bound)이면 상호 연관 대규모 시스템은 N개의 독립된 부시스템으로 분리되고 다음 ARMAX 모델로 표현될 수 있다.

$$A_i(q^{-1})\,y_i(t)=q^{-1}B_i(q^{-1})\,u_i(t)+d_i(t)+c_i(q^{-1})\,v(t) \tag{2.6}$$

증명) 식 (2.1)-식 (2.3)으로 부터

$$\begin{aligned} y_i(t)&=G_i(q^{-1})\,u_{si}(t)+w_i(t)\\ &=G_i(q^{-1})\;\Big(u_i(t)+\sum_{\substack{l=1\\ j\neq i}}^{N} q^{-1}H_{ij}\,y_j(t)\Big)+w_i(t)\\ &=G_i(q^{-1})\,u_i(t)+\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N} q^{-1}\,G_i(g^{-1})H_{ij}y_j(t)\\ &\quad +w_i(t) \end{aligned} \tag{2.7}$$

식 (2.7)에서

$u_i(\cdot)$는 확정 시퀀스(deterministic sequences)이고

$y_j(\cdot)$, $w_i(\cdot)$는 확률 시퀀스(stochastic sequences)이다.

$y_j(\cdot)$를 확률분과 확정분으로 나누면

$$y_j(t)\triangleq y_{dj}(t)+y_{sj}(t) \tag{2.8}$$

여기서 $y_{dj}(\cdot)$는 확정분이고, $y_{sj}(\cdot)$는 영평균이고, 분산이 σ^2_{yj}인 유색 잡음으로 놓는다.

식 (2.8)을 식 (2.7)에 대입하면

$$y_i(t)=G_i(q^{-1})u_i(t)+\sum_{j=1,\,j\neq i}^{N}q^{-1}G_i(q^{-1})H_{ij}y_{dj}(t)+\sum_{j=1,\,j\neq i}^{N}q^{-1}G_i(q^{-1})H_{ij}y_{sj}(t)+w_i(t)$$

$$\begin{aligned}A_i(q^{-1})y_i(t)=\;&q^{-1}B_i(q^{-1})u_i(t)+\\&+\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N}q^{-1}B_i(q^{-1})H_{ij}y_{dj}(t)\\&+\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N}q^{-1}B_i(q^{-1})H_{ij}y_{sj}(t)\\&+A_i(q^{-1})w_i(t)\end{aligned}\qquad(2.9)$$

조건에 의해 $y_{dj}(\cdot)$가 유계이므로 식 (2.9)의 우변 둘째항은 $B_i(\cdot)$, H_{ij}가 시불변이므로 i번째 부시스템의 유한 오프셋으로 간주하고, 우변 셋째,넷째항은 영평균 확률 잡음이므로 다음식으로 근사화 시킬 수있다.

$$d(t)\triangleq\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N}q^{-1}B_i(q^{-1})H_{ij}y_{dj}(t)\qquad(2.10)$$

$$c_i(q^{-1})v(t)\approx\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N}q^{-1}B_i(q^{-1})H_{ij}y_{sj}(t)+A_i(q^{-1})w_i(t)\qquad(2.11)$$

여기서

$$c_i(q^{-1})=1+c_{i1}q^{-1}+c_{i2}q^{-2}+\cdots+c_{il}q^{-l}\qquad(2.12)$$

$$v(t)\sim N(0,\sigma_N^2)\qquad(2.13)$$

식 (2.11)에서 근사화 기호로 놓은 것은 식 (2.11)의 좌변이 무한차수이므로 식 (2.12)로 저차화 시키는데 따른 것이다. 따라서 식 (2.10), 식 (2.11) 을 식 (2.9)에 대입하면 식 (2.6)이 주어지며 $y_i(\cdot)$ 가 $y_j(\cdot)$ $(j\neq i)$와 무관하게 표현될 수 있으므로 독립된 부시스템이 됨을 의미한다.

부언(remark) 2.1 :

식 (2.7)의 우변 첫째항은 부시스템의 국부제어기(local controller)에 의한 가제어 부분(controllable part)이며 둘째항은 u_i로는 제어 불가능한 부분이다. 따라서 식 (2.10)과 같이 오프셋으로 간주하려면 식 (2.7)의 우변 둘째항은 우변 첫째항에 대해 작아야 한다. 이것은 각 부 시스템의 출력 y_j가 유계이고 가정 6) 의 상호연관항의 약결합에 의해 성립된다.

3. 오프셋 모형화 기법을 이용한 분산형 적응 제어기의 구성

제안된 수정 모델과 같은 입출력 모델에 대해서는 적응제어 방식으로 자기동조제어(Self-Tuning Control : STC)방식이 많이 사용된다. STC형 적응 제어 방식에서는 시스템의 안정도에 관한 모든 정보가 모델계수로 표현되기 때문에 정확한 계수추정이 이루어져야한다. 따라서 유색 잡음과 오프셋에 의한 편이와 유동 현상을 막기위한 고려가 필요하다.

이러한 관점에서 본 논문에서는 추정자로서 기구변수법을 사용하며 이를 위한 기구변수발생기로 확정 예측 모델을 이용하는 오프셋의 내재적 제거 방식을 제안하게 된다. 계수 추정을 위한 일반적인 기구변수 알고리즘은 다음과 같다.

기구변수 식별 알고리즘 :

$$\hat{\theta}(t)=\hat{\theta}(t-1)+S(t)\,[y(t)-\hat{\theta}^T(t-1)\phi(t)]\qquad(3.1)$$

$$S(t)=\frac{P(t-1)Z(t)}{1+\phi^T(t)P(t-1)Z(t)}=P(t)\,Z(t)\qquad(3.2)$$

$$P(t)=P(t-1)-\frac{P(t-1)Z(t)\phi^T(t)P(t-1)}{1+\phi^T(t)P(t-1)Z(t)}\qquad(3.3)$$

여기서,

$$\hat{\theta}^T(t)=[\hat{a}_1(t)\cdots\hat{a}_n(t)\;\;\hat{b}_0(t)\cdots\hat{b}_m(t)]\qquad(3.4)$$

$$\phi^T(t)=[-y(t-1)\cdots-y(t-n),\,u(t-1)\cdots u(t-m-1)]\qquad(3.5)$$

$$Z^T(t)=[-\bar{y}_M(t-1)\cdots\bar{y}_M(t-n),\,u(t-1)\cdots u(t-m-1)]\qquad(3.6)$$

$\{\bar{y}_M(\cdot)\}$는 기구변수벡터 $Z(\cdot)$를 발생시키기 위한 다음과 같은 확정 시스템의 출력 시퀀스이다.

$$\bar{y}_M(t)=\hat{a}_1\bar{y}_M(t-1)+\cdots+\hat{a}_n\bar{y}_M(t-n)+\hat{b}_0u(t-1)+\cdots+\hat{b}_mu(t-m-1)\qquad(3.7)$$

위의 계수 추정 알고리즘에 의해 계수가 추정되고 식 (2.6)의 모델에 대해 표준형 STC를 적용하면 다음과 같다. (편의상 i생략)

최소분산제어가 되기위한 목적함수는

$$J=\min_{u(t)}E[(y(t+1)-y_r(t+1))^2]\qquad(3.8)$$

기준 입력이 상수이면 $c(q^{-1})$의 영향을 오프셋으로 처리할 수 있으므로 $c(q^{-1})=1$로 놓을 수 있다.[7]

그러므로

$$\hat{y}(t+1)=\alpha(q^{-1})y(t)+\beta(q^{-1})u(t)+d^0(t)\qquad(3.9)$$

여기서 $\alpha(q^{-1})=q(1-A(q^{-1}))$ (3.10)

$\beta(q^{-1})=B(q^{-1})$ (3.11)

식 (3.9)에서 오프셋 $d^0(t)$는 미지이고 시변이므로 $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$와 함께 온라인 추정이 필요하다. 계수 추정하면 식 (3.8)을 최소화하는 제어칙은

$$\hat{\beta}(q^{-1})u(t)=y_r(t+1)-\hat{\alpha}(q^{-1})y(t)-\hat{d}^0(t)\qquad(3.12)$$

여기서

$$\hat{\alpha}(q^{-1}) = q(1-\hat{A}(q^{-1}))$$

$$\hat{\beta}(q^{-1}) = \hat{B}(q^{-1})$$

위와 같은 추정 방식에 의해 $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$와 함께 $d^0(t)$를 추정하면 $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$는 상수값 혹은 서서히 변하는 계수인 반면에 과도기에서 $d^0(t)$는 빠르게 변하는 시변계수이므로 계수 추정시 유동 현상이 일어나며 이는 자기동조 제어기의 안정도에 심각한 영향을 주어 시스템 전체를 불안정하게 하는 요인이 된다.[8]

이러한 문제를 해결하기 위하여 새로운 오프셋 모형화 기법을 이용한 제어법칙을 제안한다. 식(2.6)을 다시쓰면

$$y(t) = \frac{q^{-1}B(q^{-1})}{A(q^{-1})}u(t) + \frac{d(t)}{A(q^{-1})} + \frac{C(q^{-1})}{A(q^{-1})}v(t) \tag{3.13}$$

$$= y_M(t) + X(t)$$

$$\bar{d}(t) = E[y(t) - y_M(t)] = E[X(t)]$$

$$= \frac{1}{L}\sum_{k=t-L+1}^{t} X(k) \tag{3.14}$$

여기서,

$$y_M(t) = \frac{q^{-1}B(q^{-1})}{A(q^{-1})}u(t), \quad X(t) = \frac{d(t)}{A(q^{-1})} + \frac{C(q^{-1})}{A(q^{-1})}v(t),$$

L은 시스템 차수의 보통 2 ~ 3배

$y_M(t)$는 부언 2.1에서 언급한 바와 같이 국부제어기에 의한 가제어부(controllable part)이며, 상호연관항과 외란이 배재된 확정 모델의 출력이다. $\bar{d}(t)$는 순수 오프셋치이다.

$y_M(t)$를 예측자 형태로 표현하면,

$$y_M(t+1) = \alpha(q^{-1})y_M(t) + \beta(q^{-1})u(t) \tag{3.15}$$

이 때 α, β는 미지이므로 식(3.7)에 의한 추정값으로 대치하고 식(3.12) 형태의 제어기를 나타내면 식(3.13)은

$$\bar{y}_M(t+1) = \hat{\alpha}(q^{-1})\bar{y}_M(t) + \hat{\beta}(q^{-1})\bar{y}_M(t) - \bar{d}(t+1)$$

또는, $\hat{\beta}_u(t) = y_r(t+1) - \hat{\alpha}(q^{-1})\bar{y}_M(t) - \bar{d}(t+1)$ (3.16)

그런데 오프셋을 갖는 식(2.6) 모델에 대해서 IV 추정 방식을 적용하려면 식(3.1)의 잔차(residual)가 영평균(zero mean)이어야하므로 잔차항을 다음과 같이 수정한다.

$$[y(t) - \bar{d}(t) - \phi^T(t-1)\,\theta(t-1)] \tag{3.17}$$

식(3.16)의 제어방식은 개념적으로 상호연관된 부시스템의 확정모델에 대한 제어기 구조이다. 즉, 상호연관의 영향을 오프셋으로 보고 이것을 모형화한 후 부시스템만의 다이나믹스에 대해 제어를 수행하는 형태이다. 이방식에서는 오프셋을 내재적으로 입력에 보상시켜 식(3.17)의 잔차(residual)가 영평균이 되도록 함으로써 $A(\cdot)$, $B(\cdot)$의 추정이 유계(bounded)로 되고, $A(\cdot)$, $B(\cdot)$가 수렴되면 상호연관의 영향인 $\bar{d}(t)$의 값도 수렴하게 된다.

4. 시뮬레이션 및 검토

시뮬레이션을 위한 모델은 식(2.1)에서 다음과 같이 3개의 부시스템이 상호 결합된 경우로 주어졌다.

$A_1(q^{-1}) = 1 - 0.9q^{-1} + 0.4q^{-2}$

$B_1(q^{-1}) = q^{-1}(0.6 + 0.2q^{-1})$

$A_2(q^{-1}) = 1 - 0.8q^{-1} + 0.15q^{-2}$

$B_2(q^{-1}) = q^{-1}(0.7 + 0.3q^{-1})$

$A_3(q^{-1}) = 1 - q^{-1} + 0.2q^{-2}$

$B_3(q^{-1}) = q^{-1}(0.6 + 0.4q^{-1})$

$H_{12} = 0.18$, $H_{13} = -0.1$, $H_{21} = 0.1$,

$H_{23} = -0.09$, $H_{31} = -0.22$, $H_{32} = 0.2$

$y_{r1} = 3$, $y_{r2} = 2$, $y_{r3} = 1$

$w(t) \sim (0,\ 0.01)$

(3.12)식을 사용한 결과는 그림 2와 같다. 여기서 정확히 시변인 $d(t)$의 값을 추정하지 못하므로 출력은 기준출력을 따라가지 못한다. 또한 부시스템 3의 계수 추정에서 유동현상이 일어나므로 안정도에도 문제가 있다. 새로 제시된 제어방식에 의한 시뮬레이션 결과는 그림 3과 같다. 각 부시스템에서 계수추정은 모두 수렴되었고 유동현상을 일으키지 않음에 따라 안정된 제어가 이루어짐을 보였다.

5. 결 론

대규모 시스템을 상호 연관된 여러개의 부시스템으로 나누어 제어기를 구성함에 있어 부시스템에대한 정보가 불충분하고 상호연관의 정도를 알지 못하는 경우에는 적응제어 기법을 적용하는 것이 좋으나 상호연관항의 영향으로 인하여 전체 시스템의 안정도를 보장하기가 힘들게 된다. 이의 해결책으로 본 논문에서는 상호기준입력과 선형 시불변 상호연관을 갖는 시스템에 대해 상호연관항을 오프셋으로 모형화하여 그 영향을 각 부시스템별로 독립적으로 분리시켜 분리된 각 부시스템에 강인성을 갖는 적응제어 방식을 적용하여 각 부시스템을 안

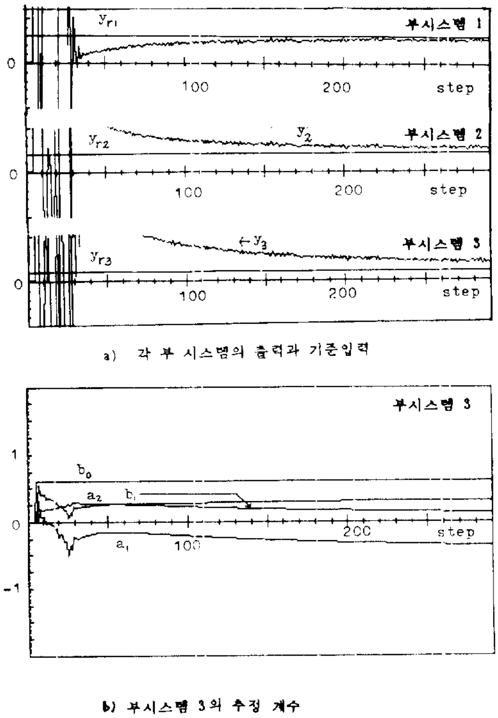

그림 2 확장 모델을 이용한 분산형 적응 제어
Fig. 2 Decentralized adaptive control using extended model.

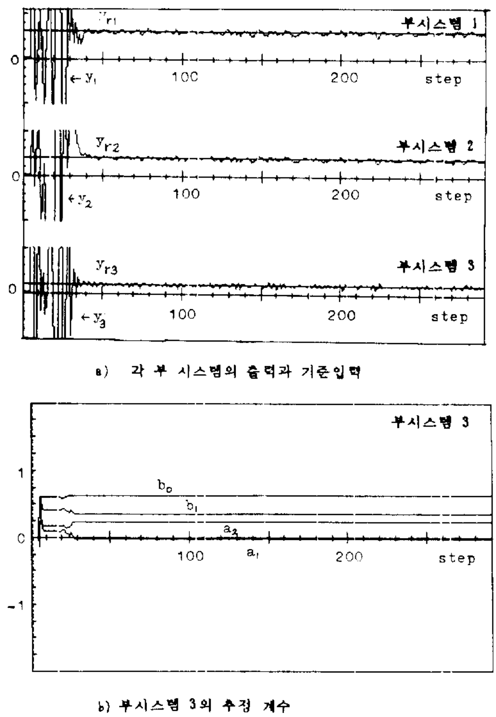

그림 3 오프셋 모형화 기법을 이용한 분산형적응제어
Fig. 3 Decentralized adaptive control using offset modeling.

정화시킴으로써 전체 시스템의 안정도를 보장하는 방식을 제안하였다. 적응제어기의 구성에 있어서 오프셋 제거 방식으로 확정모델을 사용하여 오프셋의 영향을 내재적으로 제어입력에 보상시켜 적응제어 방식의 사용시 부시스템의 안정도 파괴의 원인이 되는 계수 추정 과정에서의 계수 유동 현상을 방지하였다. 이러한 결과를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 보였다. 대규모 시스템의 분산형 적응제어 분야에서 상호연관의 크기와 적응제어의 안정도파괴의 관련성 해석문제나 기준입력이 시변이거나 과도한 비선형 상호연관이 존재할 경우의 적응제어문제는 앞으로도 계속 연구되어야 한다.

본 논문은 한국과학재단의 연구보조비로 이루어졌읍니다.

참 고 문 헌

1) Magdi S. Mahmoud et al, Large-Scale Control System, Dekker, 1985.

2) Dragoslav D. Siljak, Large-Scale Dynamic System, North-Holland-New York, 1978.

3) N.R Sandell, JR., P. Varaiya, M. Athans, M.G. Sanonof, "Survey of dcentralized control method for large scale systems", IEEE Trans. Automat. Control., vol. AC-23, pp. 108-128, Apr., 1978.

4) Petros A. Ioannou, "Decntrallized Adaptive Control of Interconnected Systems", IEEE Trans. on A.C., vol. AC-31, no.4, Aprll 1986.

5) M.K. Sundarshan, " A Condition for Decentralized in Model Reference Adaptive Systems", IEEE Trans. Automat. Contr., vol. AC-21, pp. 880-881, 1976.

6) A. Hmamed and L. Radouane, "Decentralized Nonlinear Adaptive Feedback Stabilization of Large-scal Interconnection Systems", IEEE Proc, D., Contr. Theory & Appl. vol. 130 pp. 57-62, 1983.

7) G.C. Goodwin, K. S. Sin, "Adaptive Filtering, Prediction and Control", Prectice Hall, 1984.

8) 김영철, "생체시스템을 위한 적응제어에 관한 연구", 박사학위논문, 서울대, 1987.8월.