大規模 시스템의 研究 動向

權 旭 鉉
(서울大 工大 敎授)
李 鍾 洙
(서울大 大学院 博士課程)

■ 차 례 ■

1 序 論

지난 30여년간 시스템의 모델링, 定性的 성질 연구 및 제어 법칙을 유도하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 이러한 방법들은 시스템內의 모든 정보처리와 계산이 한 場所에서 集中的으로 이루어짐을 전제로 하고 있다. 그러나 시스템의 규모가 커지거나 복잡한 구조를 가지게 되면, 集中的 정보 수집이 비경제적이거나 불가능하게 된다. 또한 集中的인 계산은 그 규모가 커져 신뢰성이 저하되고 이를 수용할 계산기의 결핍으로 인하여 기존의 制御 理論을 적용할 수 없다. 따라서 이러한 大規模 시스템에 이용 가능하고 경제적이며 신뢰성있는 이론이 연구되어 왔다.[1~3]

大規模 시스템에 속하는 응용 분야로는 電力 시스템, 大規模 네트워크, 大規模 회로망(예, VLSI), 社會經濟 시스템, 水資源 시스템등을 들 수 있으며, 서로 독립적으로 연구가 진행되어 왔다. 이들의 연구 동향은 컴퓨터의 개발과 더불어 정보처리 및 制御構造를 分散化, 非集中化, 階層化하여 多重 프로세서로 실현 가능한 이론을 개발하는 것으로 집약할 수 있다. 본고에서는 制御理論的 입장에서 大規模 시스템을 다루기로 하며, 모델 縮小化, 定性的 性質의 연구, 非集中 制御 및 階層 制御로서 분류하여, 각 분야의 연구 결과 및 최근(1978년 ~ 1983년)의 연구 동향을 중심으로 기술하였다. 그리고 위의 분류에서 제외되는 특수한 연구분야는 간단히 기술하였다.

편의상 각 수식에 나오는 벡터 및 행렬의 次數는 생략하였다.

2 모델 縮小化

制御의 해석, 설계 및 시뮬레이션에 관한 계산량을 줄이고 간단한 制御構造를 얻기 위해 모델을 縮小化하는 방법들이 제시되었다. 모델 縮小化는 集成法(Aggregation)과 攝動法(perturbation)으로 크게 구분할 수 있으며 그 외에도 많은 방법들이 있으나[8] 본고에서는 그 중요성에 비추어 위의 두 방법에 대하여 간단히 기술하겠다.

2.1 集成法

주어진 시스템 S_1을

$$S_1 : \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad x \in R^n \tag{1}$$

이라고 하고 S_1보다 차수가 낮으면서 S_1과 어떤 의미에서 유사한 성질을 갖는 모델

$$S_2 : \dot{z}(t) = Fz(t) + Gu(t) \quad z \in R^k \tag{2}$$

를 集成모델이라고 한다(여기서 $k<n$). S_1과 S_2의 유사한 성질로서 Aoki는 $z(t)$가 $x(t)$의 선형 결합으로 표현될 때 S_2를 S_1의 集成모델이라고 하였

다. 이 조건을 集成可能(Aggregability, Dynamic Exactness)이라고 하며

$$z(t)=Cx(t) \qquad C\in R^{k\times n} \tag{3}$$

을 만족하는 C가 존재함을 의미한다. (1), (2), (3)으로 부터

$$FC=CA,\ \ G=CB \tag{4}$$

가 만족되어야 하므로 적절한 C가 주어지면 조건(4)로 부터 (F, G)를 얻을 수 있다. 또한 (2)식과 (1), (3)식에서 $u(t)$에 대한 $z(t)$의 전달함수를 구하면

$$C(SI-A)^{-1}=(SI-F)^{-1}C \tag{5}$$

의 관계가 성립하므로 F의 固有値는 A의 固有値중 일부임을 알 수 있으며 A의 모우드중 시스템을 지배하는 중요한 모우드들이 F에 포함되도록 하는 集成행렬 C를 결정하기 위하여는 시스템의 모든 固有値를 알아야되어 大規模 시스템에는 비 실제적 이다. 그리하여 제어가능한 (F, G)가 먼저 주어 졌을 때 C를 구하는 방법이 제시되었다.[4] 집성이 의미를 갖기 위하여는 $z(t)$가 실제적인 물리 변수($y(t)=Lx(t)$)에 近似해야 하므로 이를 위해 여러 방법들이 제시되었다. 예를 들면 S_1과 S_2에 공통된 모우드들은 $y(t)$와 $z(t)$에서 같은 비율로 포함되어 있어야 한다는 조건을 주는 Modal 集成化가 있다.

S_2가 S_1의 집성 모델이 되기 위한 또 다른 조건으로서, 주어진 입력에 대한 $z(t)$와 $y(t)$의 정상상태 응답이 같도록 하거나, "$z(t)-y(t)$"에 의한 性能 指數를 最小化하는등의 오차 最小化 集成法이 있다.[5),6)]

기타 주어진 시스템을 縮小(Reduced)모델과 剩餘(Residue)모델로 구성하고 상호간에 궤한연결에 의해 연결된 일반화 Hessenberg 표현 (Generalized Hessenberg representation)으로 변환하여, 剩餘모델을 무시하고 縮小모델을 얻는 연쇄(Chained)집성법이 있다.[10)]

위에서 얻은 집성모델에 의하여 구한 近似的인 制御 法則을 실제의 시스템에 適用하는 것을 近似 最適制御라고 한다. 近似 制御를 할 때 주어진 시스템의 性能指数 값이 集成의 效率을 판단하는 중요한 요소이고, 그 밖에 전체 시스템의 安定 유지등을 고려한다.[4)]

결론적으로 集成法은 목적에 따라 접근 방법이 다르게 되며, 確率 制御를 고려하거나, 性能指数의 最適化를 고려하면 매우 복잡한 문제가 되며 앞으로 연구하여야 한다.

2.2 攝動法

攝動法은 非特異 攝動과 特異 攝動으로 나뉘어 지나 보통 特異 攝動을 의미한다. 선형 時不變 시스템을 예로 들어 설명하기로 한다.

非特異 攝動은 微方 右邊에 攝動이 존재하는 것으로

$$\begin{pmatrix}\dot{x}_1(t)\\ \dot{x}_2(t)\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}A_{11} & \epsilon A_{12}\\ \epsilon A_{21} & A_{22}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1(t)\\ x_2(t)\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}B_1 & 0\\ 0 & B_2\end{pmatrix}\begin{pmatrix}u_1(t)\\ u_2(t)\end{pmatrix} \tag{6}$$

과 같이 나타낼 수 있다. $\epsilon=0$이면 구조적으로 완전히 분리된 부시스템으로 되어 각 부 시스템에서 간단화된 制御 法則을 얻을 수 있으며 이를 $\epsilon\neq 0$인 실제 시스템에 적용할 때 近似 정도를 평가한다. 또는 실제 시스템의 제어 법칙을 유도하는 알고리즘을 ϵ에 대해 전개하여 높은 차수의 ϵ에 대한 항을 무시하며, $\epsilon=0$일때 각 부시스템으로 부터 얻은 해를 이용하여 近似解를 얻는 등으로 연구가 진행되고 있다.[3)]

特異 攝動은 微方 左邊에 攝動이 존재하는 것으로서

$$\dot{x}_1(t)=A_{11}x_1(t)+A_{12}x_2(t)\cdots\text{느린 시스템} \tag{7}$$

$$\epsilon\dot{x}_2(t)=A_{21}x_1(t)+A_{22}x_2(t)\cdots\text{빠른 시스템} \tag{8}$$

과 같이 나타낼 수 있고, $\epsilon=0$에 의해 近似化시키면 (단, A_{22}는 非特異행렬이다)

$$x_2(t)=-A_{22}^{-1}A_{21}x_1(t) \tag{9}$$

$$\dot{x}_1(t)=(A_{11}-A_{12}A_{22}^{-1}A_{21})\,x_1(t) \tag{10}$$

가 되어 간단히 계산할 수 있다. 이것을 零次 近似化라고 한다. 섭동법에서는 零次 近似化 및 高次 近似化를 통해 시스템의 성질을 연구하며, 위의 二時間尺度외에 多時間尺度(Multi-Time Scale)를 갖는 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다 攝動法을 실제 시스템에 적용할 경우 시간적으로 분리된(샘플링 시간이 서로 다른) 階層 構造의 제어부와 필터등을 얻게 된다.[11),12)]

攝動法의 문제점으로는 실제의 시스템이 (6), (7), (8)에서와 같이 구체적으로 ϵ이 나타나거나, 빠르고 느린 변수로서 분리되어 주어지지 않으므로 체계적인 모델링 방법이 필요하다는 것을 들 수 있다. 特異攝動에서는 대부분 有限 시간 구간내에서만 연구되고 있는데 이를 無限 시간 구간 $[0, \infty]$에로 확장시켜 해석해야 하며, 離散 시스템에서의 연구가 부족함을 지적할 수 있다.[13)]

2. 3 기타의 모델 縮小化

시스템의 동작을 나타내는 물리적 변수를 이용하여 시스템을 縮小 표현하면 주어진 大規模 모델의 여러 성질을 가장 정확하게 유지할 수 있다는 개념으로 부터 描寫(descriptive) 변수 방법이 제안되었다.[4] 이상에서는 시간영역에서의 모델 縮小化를 언급하였으나 주파수 영역에서의 모델 縮小化도 많은 결과가 발표되고 있으며, 대표적인 것으로서는 連分法(Continued Fraction Method), 시스템의 낮은 차수의 모멘트가 같다는 조건으로 부터 縮小모델을 찾는 모멘트 整合法, 安定한 시스템은 반드시 安定한 縮小모델이 되는 것을 장점으로 하는 Routh 近似化 방법 등이 있으며 기타 Pade 近似化 방법 및 이를 보다 넓은 주파수영역으로 확대하기 위해 원하는 주파수 범위에서 Chebyshev 다항식 전개를 하여 縮小모델을 찾는 일반화 Pade 近似化 방법등이 있다.[7),8)]

3 定性的 性質의 연구

定性的 性質의 연구는 安定度에 집중되어 있다. 大規模 시스템의 定性的 性質 연구의 접근 방법은 대체로 1)大規模 시스템을 차수가 낮은 부시스템들이 상호 연결된 구조로서 표현하고 2)각 독립 부시스템과 상호 연관부의 定性的 性質을 이용하여 전체 시스템을 분석하는 것이다.[14),15)]

3. 1 리아프노프 安定度

다음과 같이 여러 부시스템들의 연결로 표현되는 大規模 시스템을 생각하자.

$$S_i : \dot{x}_i = f_i(x_i, t) + g_i(x_i, \cdots, x_N, t) \qquad i_1 = 1, \cdots, N \qquad (11)$$

여기서 $g_i(x_1, \cdots, x_N, t)$를 상호연관이라고 하며 이를 무시하면 다음과 같은 N개의 독립 부시스템을 얻게된다.

$$\tilde{S}_i : \dot{x}_i(t) = f_i(x_i, t) \qquad i = 1, \cdots, N \quad (12)$$

각 독립 부시스템 $\tilde{S}_i$의 Lyapunov 함수를 $v_i(x_i, t)$ 라고 할 때, 스칼라 Lyapunov 방법은

$$v(x, t) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i v_i(x_i, t), \ \alpha_i > 0 \qquad i = 1, \cdots, N \qquad (13)$$

와 같은 함수를 정의하여 전체 시스템이 安定되기 위하여 $v_i(x_i, t)$와 상호 연관 $g_i(x, t)$의 量的 指標에 의해 구성된 試(Test)행렬이 M-행렬이 되는 조건을 찾는다.

벡터 Lyapunov 방법은

$$V(x, t) = [v_1(x_1, t), \cdots, v_N(x_N, t)]^T \qquad (14)$$

와 같은 벡터 함수를 구성한 후, 比較 原理(Comparison Principle)를 이용하여 전체 시스템의 連結的(Connective) 安定을 보장 하는 방법이다. 連結的 安定이란 상호 연관중 일부가 끊겨도 전체 시스템이 安定性을 유지함을 의미한다. 벡터 Lyapunov 방법의 결과는 상호 연관의 크기가 작아야 한다는 弱結合의 特性을 지니고 있으나, 스칼라 Lyapunov 의 경우에는 항상 그렇지는 않다는 점에 주의해야 한다. Lyapunov 방법은 후에 기술할 非集中 極配置 制御의 증명 과정에서 중요한 역할을 한다.[16),17)]

3.2 入出力(I/O) 安定度

Lyapunov 安定度는 상태 공간에서 시스템을 해석하는 방법인데 비해, I/O 안정도는 시스템을 作用素(Operator)로서 표현하여 Banach 공간이나 內積공간까지도 해석 가능한 방법이며 利得 이론과 Dissipative 이론으로서 구분할 수 있다. 大規模 시스템을 다음과 같이 [그림 1 참조]

$$y_i = \sum_{j=1}^{N} H_{ij} e_j \qquad e_i = x_i + w_i + z_i$$

$$z_i = \sum_{j=1}^{N} B_{ij} f_i \qquad f_i = u_i + v_i + y_i$$

$$i = 1, \cdots, N \qquad (15)$$

여기서 x_i, u_i는 입력, w_i, v_i는 기준입력, y_i, z_i는 출력이다.

표현하고 作用素 H_{ij}, B_{ij}의 norm에 해당하는 利得을 구하여, 이를 이용해 구성한 試행렬이 M-행렬이 되기 위한 조건을 다루는 것을 利得 理論이라고 하며 결과는 항상 弱結合 조건이 된다.

(15)식에 대한 전형적인 利得理論의 결과를 예로 들기위해 각 作用素의 利得을 $g(H_{ij})$ 및 $g(B_{ij})$로 표시하고 이들을 원소로 하는 행렬을 $G(H)$, $G(B)$라고 하면 다음과 같다.

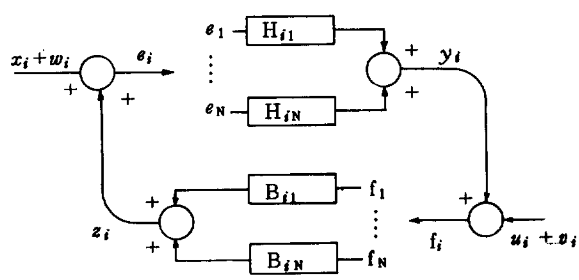

그림 1. 다입력 다출력 대규모 시스템

정리 : $g(H_{ij})$, , $g(B_{ij})$로 주어지는 利得들이 有限하고, 試행렬 $I-G(B)\,G(H)$의 연속 主 minor 들이 양의 값이면(즉, 시행렬이 M—행렬 이면) (15)으로 주어지는 시스템은 I/O안정이다.

그리고 大規模 시스템을 (15)식과 다른 형태로 표현하면, 약간 수정된 결과를 얻는다.

利得 理論은 Norm공간에서 정의되어 있으므로 주로 $L_P(l_P)$공간, $P\in[1,\infty]$에 적용되고 있다.[15), 18), 19)]

일종의 에너지 함수인 Dissipative 개념은 内積 공간에서 정의되는 것으로서,

$$y = Gu \tag{16}$$

로서 入出力 관계가 표현되는 시스템이 (Q, S, R)—dissipative 하다는 것은

$$\langle y,\ Qy\rangle_T + 2\langle y,\ Su\rangle_T + \langle u, Ru\rangle_T \geq O \quad {}^{\forall}T\in R^{+} \tag{17}$$

로서 定義하며 (Q, S, R)의 형태에 따라 다음과 같은 여러가지 종류가 있다.

표 1. Dissipative 의 종류

Q, S, R	Dissipative 의 이름
$-\delta I,\ \frac{1}{2}I,\ -\varepsilon I$	Pseudo strict passivity
$O,\ \frac{1}{2}I,\ O$	수동성 (Passivity)
$-I,\ O,\ k^2 I$	유한 이득
$I,\ O,\ -l^2 I$	이득에 하계 (下界) 존재
$-I,\ \frac{1}{2}(a+b)I,\ -abI$	inside sector [a, b]
$I,\ -\frac{1}{2}(a+b)I,\ abI$	outside sector [a, b]

여기서 δ, ε, k, l, a, b 는 스칼라 양이다.

Dissipative 安定理論에서는 (Q_i, S_i, R_i)—dissipative 한 각 독립 부시스템들이

$$y_i = G_i\ u_i \tag{18}$$

로서 표시되고, 여기서 입력 u_i 가

$$u_i = u_{ei} - \sum_{j=1}^{N} H_{ij}\cdot y_i \quad \text{(단, } u_{ei}\text{는 외부 입력)} \tag{19}$$

의 관계에 의해 상호 연결된 大規模 시스템을 고려하며, Q_i, S_i, R_i, H_{ij}를 이용하여 구성한 試행렬이 正値행렬 (Positive Definite Matrix)이 되기위한 조건을 다루고 있다.

(18), (19)로 주어지는 시스템에 대한 전형적인 Dissipative 理論의 결과를 보이기 위해 $H=[H_{ij}]$, $Q=\mathrm{diag}[Q_1, \cdots, Q_N]$, $R=\mathrm{diag}[R_1, \cdots, R_N]$, $S=\mathrm{diag}[S_1, \cdots, S_N]$이라고 하고 試행렬 $\hat{Q}$를

$$\hat{Q} = SH + H^T S^T - H^T RH - Q \tag{20}$$

이라고 하자.

정리 : $\hat{Q}$가 正値행렬이면 (18), (19)식으로 표현되는 시스템은 有限 利得 I/O안정이다. (즉 入力이 有限하면 出力도 有限하다.)

Dissipative는 内積 공간에서 정의되어 있으므로 $L_2(l_2)$—공간에서 적용되며, 内積 공간이 아닌 L_∞—공간에 적용하기 위하여 指数的加重을 주기도 한다.[19)]

利得理論의 결과는 항상 弱結合 조건으로 되나, Dissipative 理論의 결과는 그렇지 않다. 그러나 이것이 일종의 에너지 함수라는 점을 이용하여 Lyapunov 安定 理論에 適用함으로서 이 두 방법을 一致시키고자 시도한 논문이 발표되었다.[15), 21)]

시스템 安定에 대한 유용한 필요 충분조건이 발표되지 않았으므로 不安定에 대한 연구가 병행되고 있으며,[20), 21)] 그래프이론을 이용하여 시스템을 블록 하부 삼각형태로 변환시킨 후 Lyapunov 방법이나 入出力방법을 적용시키는 분야가 있다.[15), 16), 19)] 안정도 이론의 결과중 弱結合 결과는 상호 간섭의 크기가 주어진 조건에 따라 어떤 범위 이내에 있으면 안정하다는 결과이므로, 연관이 끊기는 경우에도 안정함을 의미하며 連結的(Connective) 안정과 같다.

安定度 이론은 거의 완성 단계에 있으며 이를 뒷받침할 Computer—Aided 설계 및 알고리즘의 개발과 응용이 큰 과제로 남아 있다.

3.3 기타 定性的 性質의 연구

안정의 개념과 유사한 개념으로서 시스템 방정식의 유일한 해가 존재할 조건인 well—posedness가 있고, 전체 시스템이 well—posed이기 위한 충분 조건 및 well—posed가 되도록 보상해 주는 방법이 연구되고 있다.[24)] 정현과 입력에 대한 비선형 대형 시스템의 응답 및 limit cycle의 존재 여부를 판단하는 분야가 있고,[22)] 주파수 영역에서 利得 및 位相餘裕를 구하는 분야, 각 부시스템의 根軌跡으로 부터 전체 시스템의 根軌跡을 구하는 방법, 可制御性에 관한 연구등이 진행되고 있다.[22)~27)]

4 非集中 制御

여러 부시스템의 제어부가 자신이 속한 부시스템 내의 정보만을 이용하여 궤환 제어를 함으로써, 경제

적이고 신뢰성 있는 제어를 하는 방법을 非集中 制御라고 한다. 이는 極配置 방법과 準最適 制御 방법으로 크게 구분할 수 있다.

4.1 非集中 極配置

비집중 極配置 방법은 각 부시스템이 制御可能하다는 가정에서 출발하여, 각 부시스템을 자신의 정보만을 이용하여 충분히 안정하게 하고, 이때 전체 시스템이 안정하기 위하여 상호 연결부가 가지는 조건을 찾고 있다.[28]~[31] 전체 시스템이 非集中 制御에 의해 안정되기 위한 필요 충분 조건을 찾는 것이 목적이나, 현재 까지는 충분 조건을 완화시키는 단계에 있다. 특히 그래프 이론을 이용한 결과는 효과적으로 충분 조건을 확장시킬 수 있다.[16]~[28]

非集中 固定 모드란 非集中 饋還 制御로서 변경할 수 없는 시스템의 極을 지칭하며, 시스템의 非集中 固定 모드가 복소 평면의 開(open) 左平面에 존재하면, 시스템은 非集中 制御에 의하여 안정하게 된다는 명제에 근거를 두고, 시스템이 非集中 固定 모드를 갖지 않기 위한 충분 조건을 연구하고 있다.[36]~[37]

이에 대한 최근의 결과를 간단히 소개하면 다음과 같다.[25],[37]

정리 : 주어진 大規模 시스템이 連結的 可制御性을 가지면(임의로 추출한 부시스템들로서 조합되는 시스템들이 制御可能이면), 非集中 固定 모우드를 갖지 않는다. 〔즉, 비집중 상태 궤환에 의해 안정 가능하다〕

최근에 非集中 固定 모드가 右平面에 존재할 때 時變 궤환 制御에 의하여 시스템을 安定化 시키는 방법이 발표되었다.[38]

강하게 연결된 시스템(그래프 이론의 개념으로서)에서 단 하나의 부시스템이 전체 시스템을 제어(관측)할 수 있도록 부시스템으로 부터의 궤환이 존재하는가를 다루는 것을 D-가제어(관측)성 이라하며 많은 결과가 발표되었다.[41],[42] 또한 代數 位相學 및 微分 位相學에 근거하여, 非集中 制御의 極配置로부터 전체 시스템의 極配置로 embed 하는 連結化(Co-tinuation) 방법[43] 및 時間遲延 시스템의 非集中制御에 관한 논문이[40] 발표되었고, 그래프 이론의 개념과 入出力 안정의 개념을 동시에 이용한 논문이 발표되었다.[39] 非集中 制御에 의해 안정되기 위해 각 부시스템이 모두 制御 可能해야 할 필요가 없다는 점, 또한 전체 시스템이 安定할 때 부시스템은 不安定해야 하는 경우도 있다는 점등을[29] 고려하여 非集中制御에 의한 안정의 필요 충분 조건이 연구되어야 할 것이다.

4.2 非集中 準最適 制御

각 부시스템의 性能指數가

$$J_i = \frac{1}{2}\int_0^\infty \{x_i(t)^T Q_i\, x_i(t) + u_i(t)^T R_i\, u_i(t)\}\, dt \quad i = 1, \cdots, N \qquad (21)$$

이고 전체 시스템의 性能 指數 J 가

$$J = \sum_{i=1}^{N} J_i \qquad (22)$$

로 주어지는 最適制御를 생각하자. 이때 일반적으로 구해지는 制御法則 $u = -Gx$ 를 이용하기 위해서는 시스템의 모든 정보를 필요로하기 때문에 비 경제적이며, 제어 입력의 계산이 實時間 계산으로는 어려우므로, 각 부시스템내의 상태 정보만을 이용하여 非集中 궤환 制御를 할 필요가 있다. 이를 위하여

$$G = \mathrm{diag}\,\{G_i\} \qquad (23)$$

가 만족되어야 한다. (23)의 구조를 가지며 (21), (22)로 주어진 性能指數를 最適化하는 G_i 를 옾라인으로 계산하는 알고리즘에 대해 많은 논문이 발표되었으며 결과는 2단계 혹은 3단계등에 의한 階層 構造的 계산 방법이 된다.[32]~[34]

이제 分離 非集中(decomposition Decentralization) 방법에 대하여 간단히 기술하겠다. i 번째 부시스템의 궤환 入力 u_i 는

$$u_i = u_i^l(x_i) + u_i^g(x) \qquad (24)$$

과 같이 주어지고 여기서 $u_i^l(x_i)$는 상호 연결을 무시한 독립 부시스템이 J_i를 最適化하는 局部(local) 入力이며, 각 부시스템에서 리카티 代數 방정식을 풀어 구하게된다. 그리고 $u_i^g(x)$는 全体(global) 入力으로서 상호 연결의 영향을 감소하여 전체 시스템의 안정을 보장하거나 性能指數를 개선하기 위해 사용한다. 全体 入力은 시스템 내의 모든 정보의 함수이므로 局部 入力과는 별도의 계산 단계가 필요하고 다음에 기술할 階層 制御의 의미를 가진다.[16] 이 알고리즘을 산업용 로보트의 제어에 적용하면, 각 구동부는 局部 제어기에 의하여, 제어되고 기계적인 연결부의 동작(토오크)은 全体 入力에 의하여 제어되는 형태로 되어 Master와 여러개의 slave로 구성되는 多重 프로세서로서 실현할 수 있다.[35]

非集中 準最適 制御는 옾라인에 의한 계산이 큰 단점이며, 性能 指數와 계산 소요시간 사이의 적절한 타협으로서 온라인계산이 가능하도록 해야 더 넓은 분야에 적용될 수 있으리라 생각한다.

5 階層制御

階層制御는 多層 (Multilayer) 構造와 多段階 (Multilevel) 構造로서 구분할 수 있다.[45] 多層構造는 制御 構造를 여러개의 層으로 분리하여 각 層마다 다른 시간 간격에서 작동하는 구조를 말하며, 앞에서 언급한 特異 攝動法을 적용한 제어 구조가 예가 되며, 分離 非集中 방법에서 $u_i^g(x)$의 샘플링 시간이 길어지면 多層 構造로서 볼 수 있다.

흔히 階層 制御라 하면 多段階 構造를 지칭하며 이에 대하여 간단히 살펴보기로 하겠다. 多段階 構造란 각 부시스템마다 局部 制御部 (下層 段階) 가 있고, 이들을 보다 높은 段階에서 調停해 주는 調停者 (Coordinator, 上層 段階) 가 필요한 制御 構造를 의미한다. 여기서 局部 制御部가 추구하는 목적의 성질에 따라 協同 (Team) 상황과 競争 상황으로 볼 수 있다.[47]

協同 상황에서는 공동 목적의 달성을 위하여 局部 制御部가 공동 노력을 하는 상태이며 静的(Static) 協同理論과 動的 (Dynamic) 協同理論이 있다. 静的 協同理論은 開루우프 제어 개념이며 調停者가 원칙적으로 쓰이지 않고, 動的 協同理論은 閉루우프 제어 개념으로서 조정자는 공동 목적의 성취도 향상 및 안정 유지를 위해 필요하다. 앞 절에서 非集中 制御는 모두 여기에 해당한다고 볼 수 있다.[44),46),47]

競争 상황은 국부 시스템들의 목적이 서로 背致하여 각 局部 시스템이 자신의 성취를 위해 서로 競争하므로, 이를 調停하여 전체 시스템의 성취 향상을 고려하는 調停者가 반드시 필요하다. 調停者의 기능에 따라 直接 (Direct) 法과 價格 (Price) 法으로 분류하며 다음에 설명할 INPRE (상호 작용 예측) 방법은 前者에, INBAL (상호 작용 균형)방법은 後者에 해당한다.[47),50]

INPRE 방법 (모델 調停) 에서는 局部 시스템의 분쟁의 요인이 되는 것 (상호 연결 입력, 공동 資源 등) 을 調停 變数로 하여 局部 시스템에 예측한 값을 주어 전체 시스템을 N개의 독립된 부시스템으로 만든다. 이때 각 부시스템은 性能 指数를 最適化하는 入力을 구하게 되며, 이 入力을 실제 시스템에 인가하여 調停 變数에 해당하는 것의 값을 측정하고 이 값이 주어진 調停 변수와 같으면 最適이며, 다르면 調停 變数를 변경하여 두 값이 같을 때까지 収斂시킨다.

INBAL 방법 (목적 조정) 에서는 1)각 부시스템의 性能指数에 調停 變数 (가격) 가 포함되도록 적절히 변경하여, 2) 각 부시스템은 분쟁을 무시하고, 변경된 性能指数를 最適化하는 入力과 상호연관 ($\hat{g}$)을 구하게 되며, 3)이 入力을 실제 시스템에 인가할 때 측정한 실제의 상호연관이 앞서구한 $\hat{g}$ 과 같으면 最適이며, 4) 다르면 같은 값으로 収斂하도록 調停 變数를 반복 교정한다.[3),47),50]

특히 공동 資源을 사용하는 것이 분쟁의 요인이 되는 水資源 시스템에 응용되는, 資源分配에 관한 결과들이 많이 발표되었다.[2),46),48]

이상은 調停者의 목적이 局部 制御部의 목적과 一致하는 경우이나, 이들이 背致될 경우 調停者를 지도자 (Leader) 로 하고 각 局部 制御部는 추종자 (Follower)가 되는 지도자-추종자 게임이 되며 게임이론에서 다루고 있다. 대표적인 게임 이론은 Stackelberg 게임이며 確率制御의 입장에서 연구가 진행되고 있다.[49]

階層 制御는 그 범위가 매우 넓으며 개념적으로 이들을 일관성있게 인식하기가 어렵다. 性能 指数를 고려할 때 大規模시스템의 여러가지 制御 理論中 가장 합리적이라고 할 수 있으나 실제로 응용되기 위하여는 빠른 속도로 수렴하는 알고리즘이 개발되어야 한다.

6 기타 연구 분야

이상에서 기술한 決定的 (Deterministic) 시스템의 제어 이외에 確率的 시스템의 状態推定, 確率制御에 대한 결과들이 많이 발표되고 있으나 근본적인 접근 방법은 동일하다.[51] 특히 게임 이론을 포함한 階層制御 및 非集中 準最的 制御에서 주로 다루어져 왔으나 최근에는 確率的 시스템의 縮小 모델을 구하려는 시도가 이루어 지고 있다.[52),53]

또한 大規模 시스템의 모델링이 불가능하거나 불확실할 경우, 매개 변수 認識 (Indentification)을 통해 시스템의 모델을 결정한 후 제어하는 방법이나, 非集中 구조의 適應制御 (모델 추종 방식등)에 대한 이론이 발표되었다.[54),55]

이외에도 제어의 관점에서 볼 때 독특한 이론들이 있으나 소개하기에는 아직 연구 결과가 미약하다.

7 結 論

이상과 같이 大規模 시스템의 제어이론을 개관해 보았다. 이를 간단히 요약하면, 목적에 따라 중요한 特性을 유지하며 시스템의 차수를 줄이는 集成法과,

시스템내의 일부 動的 상호 작용을 무시하여 階層的 계산 구조의 制御部를 얻는 攝動法이 있고, 안정도를 중심으로 하여 시스템의 定性的 性質을 각 부시스템 및 상호연관의 적절한 척도에 의해 판단하는 定性的 性質 연구, 非集中 되어 있는 局部 제어부에 의해 각 부시스템을 제어하고 전체 시스템의 安定 및 性能指数 向上을 고려하는 非集中 制御, 그리고 각 부시스템의 制御部를 調停하기 위해 전체 시스템을 관장하는 調停者가 있는 구조의 階層 制御등이 大規模 시스템 制御의 接近方法이 된다.

이들 이론의 공통점은 주어진 시스템을 次数가 낮은 시스템 (예 ; 각 부시스템 혹은 縮小모델) 의 제어로 바꾸어 여기에 기존의 制御理論을 適用하며, 이때 무시되었던 부분 (상호 연결부, 次数 縮小 時 제외된 일부 시스템) 의 영향을 고려하여 전체 시스템의 安定이나 性能 指数 向上을 도모한다는 것이다. 이러한 방법들은 階層的 계산구조를 가지게 되며 컴퓨터의 발달로 階層的 계산 구조를 가지는 제어기의 실현이 용이해졌으나, 현재의 수학적 技法 (예, 動的 計劃 등) 이 非集中 制御나 階層的 制御에 適合하지 않아 실제적 응용은 미진한 상태이다. 따라서 大規模 시스템의 制御에 유용한 수학적 도구를 개발하여야 한다.

또한 전통적인 性能指数의 개념에서 탈피하여 신뢰도, 계산기 주변장치의 비용, 정보 전달의 비용, 시스템 복잡성의 尺度등이 最適制御의 性能指数에 포함되도록 문제를 설정하여야 하리라고 생각한다.

참 고 문 헌

1) J.D. Palmer and R. Saeks ed., *The World of Large Scale Systems, IEEE Press*, 1982.

2) M.G. Singh and A. Titli ed., *Handbook of Large Scale Systems*, North-Holland, 1979.

3) N.R. Sandell, JR., P. Varaiya, M. Athans, M.G. Safonof, "Survey of decentralized control methods for large scale systems", IEEE *Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-23, pp.108-128, Apr., 1978.

4) M. Jamshidi, "An overview on the aggregation of large-scale systems", *IFAC Proc. of the 8-th Triennial Congress*, vol. 2, pp.1309-1314, 1981.

5) E. Eitelberg, "Model reduction and perturbation struotures", *Int. J. of Contr.*, vol. 35, pp.1029-1050, 1982.

6) C. Commault, "Optimal choice of modes for aggregation", *Automatica*, vol. 17, pp.397-399, Feb., 1981.

7) Y. Bistritz and G. Langholz, "Model reduction by chebyshev polynomial techniques", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol.AC-24, pp.741-747, Oct., 1979.

8) V. Singh, "Nonuniqueness of model reduction using the Routh approach", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol.AC-24, pp.650-651, Aug., 1979.

9) J. Hickin, N.K. Sinha, "Model reduction for linear multivariable systems", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol.AC-25, pp.1121-1127, Dec., 1980.

10) C.P. Kwong, "Optimal chained aggregation for reduced-order modelling", *Int. J. if Contr.*, vol.35, pp.965-982, 1982.

11) P.V. Kokotovic, R.E. O'Malley, Jr., and P. Sannuti, "Singular perturbations and order reduction in control theory-An Overview", *Automatica*, vol.12, pp.123-132, 1976.

12) H.K. Khalil, "Asymptotic stability of nonlinear multiparameter singularly perturbed systems" *Automatica*, vol. 17, pp.797-804, Jun., 1981.

13) M. Coderch, A.S. Willsky, S.S. Sastry, and D.A. Castanon, "Hierarchical aggregation of linear systems with multiple time scales", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol.AC-28, pp.1017-1030, Nov., 1983.

14) A.N. Michel and R.K. Miller, *Qualitative Analysis of Large Scale Dynamical Systems*, Academic Press, 1977.

15) A.N. Michel, "On the status of interconnected systems", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-28, pp.639-653, Jun., 1983.

16) D.D. Siljak, *Large-Scale Dynamic Systems: Stability and Structure*, North-Holland, 1978.

17) M. Ikeda and D.D. Siljak, "Generalized Decomposition of dynamic systems and vector lyapunov functions", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-26, pp.1118-1125, 1981.

18) G. Zames, "On the input-output stability of time-varying nonlinear feedback systems: Part 1-2", *IEEE Trans. Automat. Contr., vol.Ac-11,*

pp.228-238, pp.465-476, 1966.

19) M. Vidyasagar, Input-Output Analysis of Large-Scale Interconnected Systems, .

19) M. Vidyasagar, *Input-Output Analysis of Large-Scale Interconnected Systems,* springer-Verlag, 1981.

20) M. Vidyasagar, "L_2-instability criteria for interconnected systems". *SIAM J. of Contr. & Opt.,* vol. 15, pp.312-328, Feb., 1977.

21) D.J. Hill and P.J. Moylan, "General instability results for interconnected systems", *SIAM J. Contr. & Opt.,* vol.21., pp.256-279, Mar., 1983.

22) S.J. Scar, R.K. Miller, and A.N. Michel, "On existence and nonexistence of limit cycles in interconnected systems", *IEEE Trans. Automat. Contr.,* vol. AC-26, pp.1153-1169, Oct., 1981.

23) M.E. Sezer and D.D. Siljak, "Robustness of suboptimal control: gain and phase margin", *IEEE Trans. Automat. Contr., vol. AC-26,* pp.907-911, 1981.

24) M. Vidyassagar, "On the well-posedness of large scale interconnected systems", *IEEE Trans. Automat. Contr.,* vol. AC-25, pp.413-421, Jun., 1980.

25) E. Sezer and Ö. Hüseyin, "On the controllability of composite systems", *IEEE Trans. Automat. Contr.,* vol.AC-24, pp.327-329, Apr., 1979.

26) R.A. Decarlo and R. Saeks, "A root locus technique for interconnected systems", *IEEE Trans. S.M. & C.,* vol. SMC-9, pp.53-55, 1979.

27) V. Pichai, M.E. Sezer, and D.D. Siljak, "Vulnerability of dynamic systems", *Int. J. of Contr.,* vol. 34, pp.1046-1060, 1981.

28) M. Ikeda and D.D. Siljak, "On decentrally stabilizable large-scale systems", *Automatica,* vol. 16, pp.331-334, 1980.

29) M.E. Sezer and Ö . Hüseyin, "Comments on decentralized state feedback stabilization", *IEEE Trans. Automat. Contr.,* vol. AC-26, pp.547-549, 1981.

30) H. Khalil and A. Saberi, "Decentralized stabilization of nonlinear interconnected systems using high-gain feedback", *IEEE Trans. Automat. Contr.,* vol.AC-27, pp.265-268, Feb., 1982.

31) Ö . Hüseyin, M.E. Sezer, D.D. Siljak, "Robust decentralized control using output feedback", *IEEE Proc. D,* pp.310-314, Nov., 1982.

32) M.F. Hassan, A. Titli, M.G. Singh, and R. Hurteau, "Stability, stabilization and performance of multilevel controllers under structural perturbations: Part 1-2", *IE Proc. D,* pp.207-219, Sep., 1980.

33) T.C. Xinogalas, M.S. Mahmoud, and M.G. Singh, "Hierarchical computation of decentralized gains for interconnected systems", *Automatica, vo.18, pp.473-478, Apr., 1982.*

34) M. Ikeda, D.D. Siljak, and K. Yasuda, "Optimality of decentralized control for large-scale systems", *Automatica,* vol. 19, pp.309-316, 1983.

35) M. Vukobratovic and V. Potkonjak, *Dynamics of Manipulation Robots: Theory and Application,* vol. 2, Springer-Verlag, 1982.

36) S.H. Wang and E.J. Anderson, "On the stabilization of decentralized control systems", *IEEE Trans. Automat, Contr.,* vol. AC-18, pp.473-478, Oct., 1973.

37) E.J. Davison and Ü. Özgüner, "Characterizations of decentralised fixed modes for interconnected systems", *Automatica,* vol. 19, pp.169-182, Feb., 1983.

38) B.D.O. Anderson and J.B. Moore, "Time-varying feedback laws for decentralized control", *IEEE Trans. Automat. Contr.,* vol. AC-26, pp.1133-1143, Oct., 1981.

39) M. Vidyasagar, "Decomposition techniques for large scale systems with nonaddative interactions: stability and stabilizability", *IEEE Trans. Automat. Contr.,* vol. AC-25, pp.773-779, Aug., 1980.

40) I.H. Suh and Z. Bien, "A note on the stability of large scale systems with delays", *IEEE Trans. Automat. Contr.,* vol. AC-27, pp.256-258, Feb., 1982.

41) P. Fessas, "D-controllability of linear systems defined by their transfer matrices", *IEEE Proc. D, pp.206-210, Sep.,*
D, pp.206-210, Sep., 1982.

42) J.P. Corfmat and A.S. Morse, "Decentralized

control of linear multivariable systems", *Automatica*, vol. 12, pp.479-495, Sept., 1976.

43) S.L. Richter R.A. Decarlo, "Continuation methods: Theory and Applications", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-28, pp.660-665, Jun., 1983.

44) L.S. Lasdon, *Optimization theory for large systems.* The Macmillan Company, 1970.

45) W. Findeisen et.al., *Control and Coordination in Hierarchical Systems, John* Wiley & Sons, 1980.

46) M.G. Singh and A. Titli, *Systems: decomposition, optimization and control,* Pergamon Press, 1978.

47) W. Findeisen, "Decentralized and hierarchical control under consistency or disagreement of interests", *Automatica.*, vol. 18, pp.647-664, Jun., 1982.

48) B. Friedlander, "A decentralized strategy for resource allocation", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-27, pp.260-265, Feb., 1982.

49) J.B. Cruz., JR., Leader-Follower Strategies multilevel systems", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-23, pp.244-255, Apr., 1978.

50) M.S. Mahmoud, "Multilevel systems control and applications: A Survey", *IEEE Trans. Syst., Man, & Cyber.*, vol. SMC-7, pp.125-143, Mar., 1977.

51) K.Hsu and S.I. Marcus, "Decentralized control of finite state Markov processes", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-27, pp.426-431, Apr., 1982.

52) Y. Baram and Y.Be'eri, "stochastic model simplification", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-26, pp.379-390, 1981.

53) R.G. Phillips and P.V. Kokotovic, "A singular perturbational approach to modeling and control of markov chains", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-26, pp.1087-1094, 1981.

54) A.J. Koive and T.H. Guo, "Adaptive linear controller for robotic manipulators", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-28, pp.162-170, 1983.

55) C. Yuliu and M.G. Singh, " Certain practical considerations in the model-following method of decentralised control", *IEEE Proc. D*, pp.149-156, Jul., 1981.