

오프셋 제거방식을 이용한 상호연관 시스템의 적응제어

양 홍 석 김 영 철 허 명 준 오 박 용 식
서울대학교 전기공학과

Self Tuning Control of Interconnected System Using Offset
Rejection Techniques

Heung Suk Yang, Young Chol Kim, Myung Joon Hur, Yong Sik Park
Department of Electrical Engineering, Seoul National University

A B S T R A C T .

In this paper self tuning control of inter-connected systems are dealt in view point of large scale system control. The plant model is given in multiple ARMA process. This process is simplified as independent SISO ARMA process having offset terms. This offset was 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 parameter estimation to be unbiased and non-drift. This controller contains a new implicit offset rejection technique. Simulation results considers well with the analysis in case of linear interconnection.

1. 서 론

현대의 산업 및 경제는 그 규모가 대단히 커지고 점점 복잡해져가고 있다. 따라서 이를 뒷받침하기 위한 전력 계통, 통신망, 운송시스템이 점점 다양화 되고 있으며 석유화학, 제철, 자동차공업등에 관한 대규모의 공장이 경제의 큰 부분을 이루고 있다. 제어대상도 기존의 개념으로는 모형화가 어렵든가 또는 제어에 상당한 부담이 따르게 된다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 대규모 시스템의 개념이 도입 되었다. [1, 2] 대규모 시스템 제어의 개념은 제어변수의 갯수가 많다는

점에서는 다변수 시스템과 밀접한 관계가 있으나 분산 제어방식, 계층제어방식, 다중시간 스케일, aggregation 방법등이 도입된다는 점에서 다르다. 이런 방법들이 도입되는 까닭은 거리상으로 데이터의 측정 및 전송이 용이하지 않은 경우, 모형화시 condition number 가 매우 크게 나타나는 경우인데 기존의 집중제어 방식으로는 좋은 효과를 올릴수 없기 때문이다. 대규모 시스템 제어의 분야에서는 기본적으로 상태제한 방식을 사용하고 상위제어기에서 안정도 보장을 위한 보상입력을 계산하는 형태가 많이 쓰인다. 그러나, 집중제어방식에서는 1980년대에 들어서면서 정밀도등에서 뛰어나면서도 싼값으로 실시간 구현이 가능한 적응제어 방식이 각광을 받고 있다. 또한 적응제어방식이 모형화되지 않은 운동의 부잡음등에서도 강인성(Robustness)을 가짐이 계속 밝혀지고 있다. 이러한 흐름속에서 상호연관된 시스템의 분산형 적응제어를 시도하였고 [3], 그외에는 대규모 시스템의 제어에 적응제어 방식을 이용한 주목을 끌 만한 연구 결과들이 발표되지 않고 있다. 본 논문에서는 대규모 시스템에 분산형 적응제어를 시도하였다. 여기서 고려하는 대규모 시스템은 상호연관(Interconnection)된 형태이다. 제어를 위하여 각각의 부분시스템(sub-system)들이 독립적인 시스템이고 오프셋(offset)을 갖는 형태도 모형화하고, 오프셋은 시변직류특성과 영평균 유색 잡음의 합으로 고려하였다. 제어시스템의 안정도 파괴요인을 시스템변수의 흐름(drift)에 기인하는 것으로 간주하고 유색잡음을 포함하는 상호결합 영향을 부분시스템의 다이나믹스와 구분하기 위하여 기구변수

법(Instrumental Variable Method)을 이용한 계수식별 과정을 이용한다.

2. 대규모 시스템의 분산형 모델

선형 시불변 대규모 시스템의 분산형 모델을 다음과 같이 N 개의 부분시스템이 상호결합된 ARMA 프로세스로 표현하였다.

$$A_i(q^{-1}) y_i(t) = q^{-k_i} B_i(q^{-1}) U_i(t) + \sum_{j=1}^N q^{-k_{ij}} H_{ij} y_j(t) + W_i(t) \quad (2.1)$$

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

$$A_i(q^{-1}) = 1 + a_{i1}q^{-1} + a_{i2}q^{-2} + \dots + a_{in_i}q^{-n_i} \quad (2.2)$$

$$B_i(q^{-1}) = b_{i0} + b_{i1}q^{-1} + \dots + b_{im_i}q^{-m_i} \quad (2.3)$$

$$H_{ij} \in \mathbb{R}^{1 \times 1}$$

여기서 $[y_i(\cdot)]$, $[u_i(\cdot)]$ 는 각각 부분시스템의 출력과 입력의 샘플시퀀스이고, $w_i(\cdot)$ 는 백색잡음 (0 , σ_i^2)라 가정한다. 계수 A_i , B_i , H_{ij} 는 미지이며 적응제어를 위해 다음 가정이 주어진다.

가정 :

- 1) 각 부분시스템의 차수 n_i 와 m_i 는 안다.
- 2) 지연시간 k_i 를 알고 있다.
(여기서는 $k_i=1, \forall i$ 로 가정함)
- 3) 상호결합의 지연시간 $k_{ij}=1, \forall i$ 로 가정한다.
- 4) 각 부분시스템에서 A_i 와 B_i 는 서로소(coprime)이다.
- 5) $b_{i0} \neq 0, \forall i$ (제어방식이 최소분산형인 경우에만 적용).
- 6) 간단히 하기 위해 $n_i=n, m_i=m$ 으로 가정한다.

$$7) \left| \frac{B_i(q^{-1})}{A_i(q^{-1})} \right| \gg \left| \frac{\sum_{j=1}^N H_{ij} y_j}{A_i(q^{-1})} \right| \quad (\text{여기서 } y_j \text{는 } j \text{ 번째 부분시스템의 기준입력})$$

3. 수정 모델과 적응제어

3.1 수정 모델

(2.1) 모델에 대해 적응제어방식을 적용하려면 각 부분시스템에서 $(n+m+N-1)$ 개의 계수를 실시간 추정해야 되므로 대규모 시스템에서는 실현하기 곤란하다. 그런데 식(2.1)과 같이 상호결합이 선형이며 그 크기가 가정

7)에 의해 각 부분시스템 독립의 이득보다 작고 각 기준입력이 상수이면, 상호결합의 영향은 다음과 같이 오프셋과 유색잡음으로 근사화할 수 있다.

$$A_i(q^{-1}) y_i(t) = q^{-1} B_i(q^{-1}) U_i(t) + X_i(t) \quad (3.1)$$

$$X_i(t) = \sum_{k=1}^N H_{ik} y_k(t-1) + W_i(t) \approx d_i(t) + c_i(q^{-1}) W_i(t) \quad (3.2)$$

여기서

$$c_i(q^{-1}) = 1 + c_{i1}q^{-1} + \dots + c_{in_i}q^{-n_i} \quad (3.3)$$

(일반적으로 $1 \leq n, \forall i$)

$d_i(\cdot)$ 는 오프셋이다.

(3.1), (3.2)의 수정 모델에 대해 self-tuning control (STC) 방식을 적용하고자 할때, 일반적으로 계수추정 알고리즘은 최소자승추정자(least squares estimator : LSE)를 많이 사용하는데 (3.2)와 같이 오프셋이 시변이고 유색잡음을 갖는 모델에 대해서는 A, B, d의 추정이 편이(bias)되거나 유동(drift)할 수 있다. 특히 추정계수의 유동은 시변오프셋과 관련이 크며 부분시스템의 안정도를 해치는 주요 원인이 된다. 다시말해서 STC 형 적응제어 방식에서는 시스템의 안정도에 관한 모든 정보가 모델 계수로 표현되기 때문에 추정 계수의 유동은 불안정 극, 영점의 상쇄를 일으키거나 b_{i0} 가 작아지게 될 수 있어 안정도를 보장하기 어렵게 된다. [4, 5, 6]. 또한 상관잡음 프로세스의 비편이 추정자(unbiased estimator)인 기구변수법(Instrumental Variable Method : IV)도 잡음이 영평균(zero mean)이어야 한다. 그러나 오프셋의 추정 또는 제거가 적절히 이루어지면 A, B의 추정치도 수렴되어 부분시스템의 안정된 제어가 가능할 것이다. 이러한 관점에서 본 논문에서는 기구변수 발생을 위한 확정예측모델을 이용 오프셋의 내재적 제거 방식을 제안하게 된다. IV 방식은 다음과 같다.

기구변수식별알고리즘 :

$$\hat{\Theta}(t) = \hat{\Theta}(t-1) + L(t) [y(t) - \hat{\Theta}^T(t-1) Z(t)] \quad (3.4)$$

$$L(t) = \frac{P(t-1) Z(t)}{1 + Z^T(t) P(t-1) Z(t)} = P(t) Z(t) \quad (3.5)$$

$$P(t) = P(t-1) - \frac{P(t-1) Z(t) Z^T(t) P(t-1)}{1 + Z^T(t) P(t-1) Z(t)} \quad (3.6)$$

여기서,

$$\hat{\theta}^T(t) = [\hat{a}_1(t) \dots \hat{a}_n(t) \hat{b}_1(t) \dots \hat{b}_m(t)] \quad (3.7)$$

$$\phi^T(t) = [-y(t-1) \dots -y(t-n), u(t-1) \dots u(t-m)] \quad (3.8)$$

$$z^T(t) = [-y_M(t-1) \dots -y_M(t-n), u(t-1) \dots u(t-m)] \quad (3.9)$$

$$y_M(t) = \hat{a}_1 y(t-1) + \dots + \hat{a}_n y(t-n) + \hat{b}_1 u(t-1) + \dots + \hat{b}_m u(t-m) \quad (3.10)$$

$[y_M(\cdot)]$ 는 기구변수벡터 $z(\cdot)$ 를 발생시키기 위해 플랫폼 입력 $[u(t)]$ 에 의해 유도된 확정시스템의 출력시퀀스이다.

3.2 시변 오프셋을 고려한 STC

먼저 식(3.1), (3.2)의 모델에 대해 표준형 STC를 요약해본다. 최소분산제어가 되도록 목적함수를 주면

$$J = E\{[(y(t+1)-y_r(t+1))]^2\} \quad (3.11)$$

예측자는 간단히 하기위해 $c(q^{-1})=1$ 이라 하면

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

$$\text{여기서 } \alpha(q^{-1}) = q(1-A(q^{-1})) \quad (3.13)$$

$$\beta(q^{-1}) = B(q^{-1}) \quad (3.14)$$

계수를 추정하면 (3.11)을 최소화하는 제어칙은

$$\hat{\beta}(q^{-1})u(t) = y_r(t+1) - \hat{\alpha}(q^{-1})y(t) - \hat{d}(t) \quad (3.15)$$

그런데 (3.15)로 표현되는 표준형 STC는 3.1절에 언급한 바와같이 차수 확장방식에 의해 A, B와 함께 d를 추정하면 추정계수의 유동현상이 일어날 수 있기 때문에 안정도 보장이 어려운 문제점이 있다. 본 논문에서는 (3.15)를 다음식으로 수정하였다.

$$\hat{\beta}(q^{-1})u(t) = y_r(t+1) - \hat{\alpha}(q^{-1})y_M(t) - \bar{d}(t-n+1) \quad (3.16)$$

$$\text{여기서, } \bar{d}(t) \triangleq y(t) - y_M(t) \quad (3.17)$$

이고 $[y_M(\cdot)]$ 는 (3.10)의 확정모델의 출력시퀀스이다. (3.16), (3.17)의 제어방식은 개념적으로 상호결합의 영향이 없을때의 확정모델에 대한 제어기 구조이다. 즉 상호결합의 영향을 오프셋으로 보고 이것을 제거한후 부분시스템 본래의 dynamics에 대해 제어를 수행하는 형태이다. 이 방식에서는 오프셋을 내재적으로 입력에 보상시켜 (3.4)의 잔차(residual)가 영평균이 되도록함으로써 \hat{A}, \hat{B} 의 추정이 유계(bound)로 되고,

\hat{A}, \hat{B} 가 수렴되면 (3.17)에 의해 상호결합의 영향인 $\bar{d}(t)$ 의 값도 수렴하게 된다. \hat{A}, \hat{B} 의 추정치가 유계이면 부분시스템의 안정된 제어기 설계는 용이하다.

(3.16)에서 $\bar{d}(t)$ 대신 $\bar{d}(t-n+1)$ 을 사용하는 것은 IV방식에서의 기구변수벡터 $z(\cdot)$ 가 잡음과의 상관성을 갖지 않게 하기 위해서이다. 따라서 초기에는 계수의 불확정성 때문에 오프셋의 변화도 크게 나타나고 (n-1)만큼 뒤진 값을 사용함에 따라 전시스템의 수렴이 늦어지는 문제점이 있다. 그러나 초기 기동정책만 개선시킨다면 정상상태에서 안정성이 크게 개선되었으므로 매우 간단한 분산적응제어 방식이라고 생각된다.

4. 시뮬레이션 및 검토

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

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

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

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

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

$$A_3(q^{-1}) = 1 - q^{-1} + 0.24q^{-2}$$

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

$$H_{11} = -0.25, \quad H_{12} = 0.07, \quad H_{21} = 0.13,$$

$$H_{22} = 0.1, \quad H_{31} = 0.11, \quad H_{32} = 0.2$$

$$Y_{r1} = 15, \quad Y_{r2} = 10, \quad Y_{r3} = 7$$

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

새로 제시된 제어방식에 의한 시뮬레이션 결과는 그림1과 같다. 각 부분 시스템에서 계수추정은 모두 수렴되었고 유동 현상을 일으키지 않음에 따라 안정된 제어가 이루어짐을 보였다. 수렴이 다소 늦은 것은 3.2에서 검토한 바와 같이 $\bar{d}(t-n+1)$ 을 사용하는데 기인한 것이다.

5. 결 론

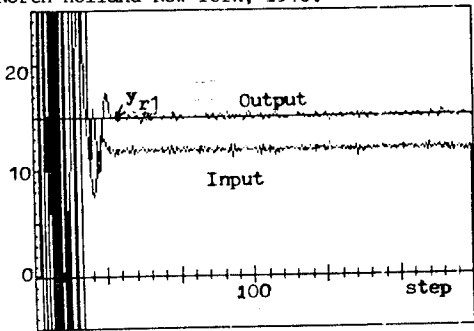
상호결합항을 포함한 분산시스템을 STC 방식에 적용하기에는 너무많은 계수를 식별해서 control해야 하므로 상당히 많은 계산량이 필요하게 된다.

본 논문에서는 상호결합항을 offset항으로 고려하여 계산량을 줄였고 기구변수법을 사용하여 불안정도의 원인

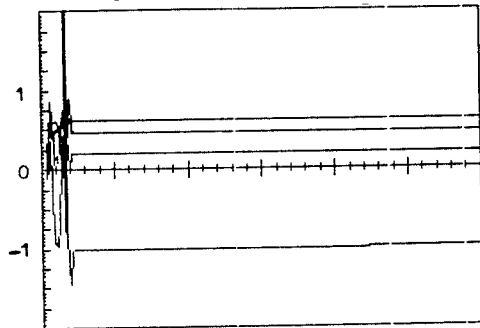
이 되는 계수 유동을 막았다. 시뮬레이션을 통해 control 이 잘됨을 보았으나 아직도 기동정책 문제나 상호결합이 비선형인 경우에 대해서는 추후 연구과제로 남아 있다.

참 고 문 헌

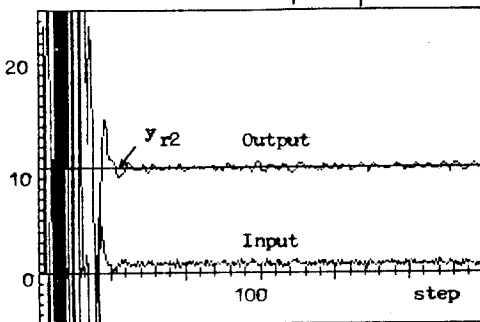
- 1) Magdi S. Mahmoud et al, Large-Scale Control Systems, Dekker, 1985.
- 2) Dragoslav D. Siljak, Large-Scale Dynamic System, North-Holland-New York, 1978.
- 3) Petros A. Ioannou, "Decentralized Adaptive Control of Interconnected Systems," IEEE Trans. on A.C., Vol.AC-31, No.4, APRIL 1986.
- 4) D.W. Clarke and P.J. Gawthrop, "Self-Tuning Controller," Proc. IEE, Vol.122, No.9, pp.781-787, Sep. 1975.
- 5) Wittenmark, B. and K.J. Astrom, "Practical Issue in the Implementation of Self-Tuning Control," Automatica, Vol.20, No.5, pp.595-605, 1984.
- 6) 김영철, "생체시스템을 위한 적응제어에 관한 연구," 박사 학위논문, 서울대, 1987. 8월



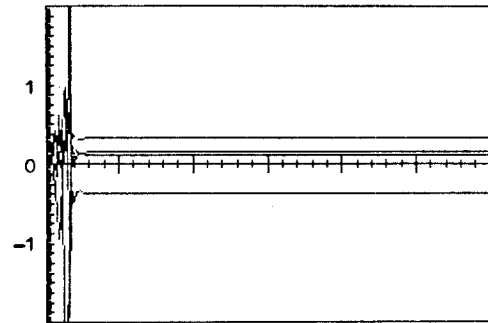
Output and Input of Subsystem 1



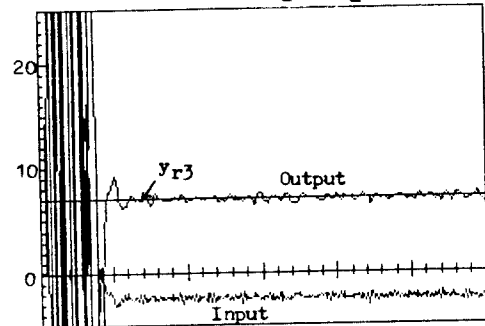
Parameters of A_1 and B_1



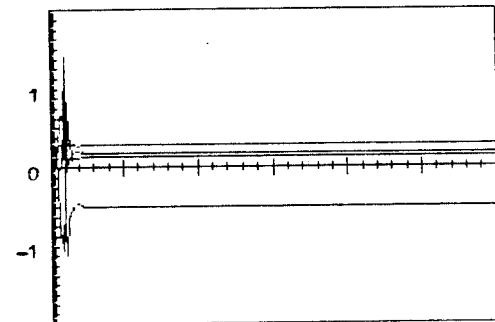
Output and Input of Subsystem 2



Parameters of A_2 and B_2



Output and Input of Subsystem 3



Parameters of A_3 and B_3

Fig. 1. New STC of Interconnected System