

Laguerre 모델을 이용한 미지 시스템의 온-라인 시스템 동정에 관한 연구

論 文
48A-6-10

A Study on the On-Line Systems Identification of Unknown Systems using Laguerre Models

吳顯哲* · 金潤相** · 李在春*** · 安斗守§
(Hyun-Cheol Oh · Yoon-Sang Kim · Jae-Chun Lee · Doo-Soo Ahn)

Abstract - An on-line system identification scheme of unknown system is proposed based on a Laguerre models representation. The unknown parameters are determined using recursive least-square identification. The proposed method have the advantage that an unknown system can be modelled without structural knowledge and assumption about the true model order and time delay. Therefore, the proposed method can make the design procedure very simple when compared to widely-used conventional method.

Key Words : Laguerre models, state-space form, on-line system identification, RLS

1. 서 론

제어시스템을 설계하기 위해서는 우선 제어하려는 시스템의 수학적 모델링이 선행되어야 하는데 만일 제어 대상에 대한 모델링이 정확하다면 이를 위한 제어 시스템의 설계는 이미 잘 알려진 방법을 이용하여 쉽게 설계될 수 있다. 그러나, 외란이나 잡음, 및 동적 불확실성(dynamic uncertainty)과 파라미터 불확실성(parameter uncertainty) 등으로 인하여 제어 대상시스템에 대한 정확한 모델링이 어렵고, 이는 제어시스템 설계에 있어서 전체시스템의 성능 저하(performance degradation)를 유발할 뿐만 아니라 수렴성(convergence)을 보장할 수 없게 하는 원인 된다[1-2]. 따라서, 미지의 동적 시스템(dynamic systems)에 대한 파라미터 동정(identification)과 모델링은 회로 및 시스템 이론, 제어 이론과 신호처리 분야 등 많은 분야에서 중요하게 다루어지고 있다. 시스템 동정은 일반적으로 시스템 차수, 시스템의 구조, 시간지연과 같은 선행정보를 알고 있는 경우, 측정 가능한 입출력 데이터를 이용하여 만족스런 결과를 얻을 수 있지만, 시스템의 선행정보를 모르는 경우 시스템 동정 및 시스템 모델링이 쉽지 않다[3].

최근 제어시스템 설계에 있어서 시스템 동정과 근사화를 위하여 정규직교(orthonormal) 특성이 있는 Laguerre 함수는 네트워크 구성이 용이하다는 점과 과도응답신호의 유사성[3]때문에 시스템 모델링과 시스템해석 분야에서 널리 쓰이고 있다.

Makila, Glader *et al*, Fu and Dumont[4-6]등은 신호 및 시스템 이론분야에서 Laguerre 함수와 Kautz 함수 등을 적용하였으며, Olivier, Zervos *et al*, Partington, Gu *et al*, Makila [7-11] 등은 시스템 동정에 Laguerre 함수를 이용하였다.

그러나, 시스템 동정 분야에서는 Laguerre 함수를 이용한 방법들은 시스템의 모든 정보를 획득하는데 한계를 가지고 있는데, 이는 주로 주파수 영역과 오프-라인(off-line)방식으로 이루어졌기 때문이다.

따라서, 본 연구에서는 미지 시스템의 선행조건 없이 단지 입출력 정보만을 이용하여 시스템의 파라미터를 구할 수 있는 온-라인 시스템 동정 기법을 제시하고자 한다. 제안하는 방법은 Laguerre 모델로부터 연속시간 상태공간형 표현을 가능하게 하고, 표현된 상태공간형 모델로부터 반복 최소자승기법(RLS)에 기초한 온-라인 시스템 동정을 수행함으로써 시스템의 모든 정보를 획득할 수 있다. 또한, 시스템의 별도의 선행정보 없이 입출력 정보만을 사용하기 때문에 모델링을 위한 추가의 동정 과정이 불필요하다.

또한, 제안한 방법은 시스템의 고차인 경우 허용 근사 오차 범위 내에서 저차 모델을 얻는데 이용할 수 있을 것으로 사료되며, 단지 입출력 관계를 이용한 온라인 적응시스템의 설계에 적용 가능할 것으로 기대된다.

2. Laguerre 모델

라구에르 함수는 $L_2[0, \infty)$ 에서 완전 정규직교 집합이며, 네트워크 구현이 편리하고 과도응답 신호의 유사성 때문에 자주 사용되고 있다. Laguerre 함수는 연속 시간계에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

* 正 會 員 : 成均館大 電氣電子컴퓨터工學部 · 工博
** 正 會 員 : 韓國科學技術研究員 휴먼로봇研究센터 · 工博
*** 正 會 員 : 瑞逸大 電子科 教授 · 工博
§ 正 會 員 : 成均館大 電氣電子컴퓨터工學部 教授 · 工博
接受日字 : 1998年 4月 11日
最終完了 : 1999年 5月 6日

$$L_i(t) = \sqrt{2p} \frac{e^{pt}}{(i-1)!} \frac{d^{i-1}}{dt^{i-1}} [t^{i-1} e^{-2pt}] \quad (1)$$

여기서, i 는 Laguerre 함수의 차수 ($i=1, 2, \dots, N$)이고, p 는 시간스케일요소(time scale factor)이다. 이 함수는 시간영역 $[0, \infty)$ 에서 정규직교 특성을 가지며 식(1)로부터 Laplace 변환은 다음과 같다.

$$L_i(s) = \sqrt{2p} \frac{(s-p)^{i-1}}{(s+p)^i}, \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

식(2)를 이용함으로써 그림1과 같이 간단하게 Laguerre 모델로 구성할 수 있다.

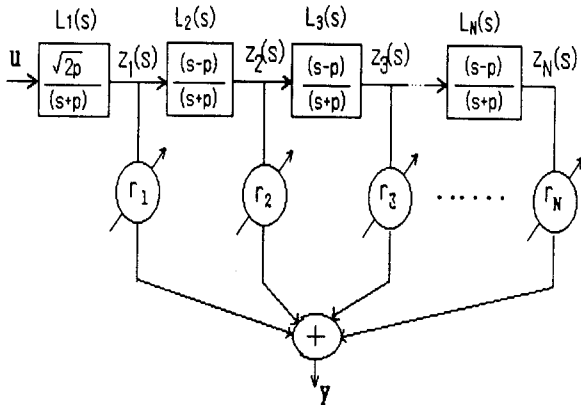


그림 1 라구에르 모델
Fig. 1 Laguerre model

적분 가능한 임의의 연속함수 $f(t)$ 에 대하여 정의구간 $[a, b]$ 에서 Laguerre 함수의 완전정규직교 (complete orthonormal) 특성을 이용하면, 다음을 만족하는 정수 N 과 $\epsilon > 0$ ($\epsilon \approx 0$)를 얻을 수 있다.

$$error = \int_a^b |f(t) - S(t)|^2 dt < \epsilon \quad (3)$$

여기서

$$S(t) = \sum_{i=1}^N r_i z_i(t) = \mathbf{r}^T \mathbf{Z}(t) \quad (4)$$

$$\mathbf{r}^T = [r_1 \ r_2 \ \dots \ r_N],$$

$$\mathbf{Z}^T(t) = [z_1(t) \ z_2(t) \ \dots \ z_N(t)]$$

이다. 상수 r_i 는 Laguerre 이득이며, 다음 식으로부터 얻을 수 있다.

$$r_i = \int_a^b f(t) z_i(t) dt \quad (5)$$

그러므로, 식(3)의 r_i 에 대한 편미분이 영(zero)이 되도록 함으로서 평균자승오차가 최소가 되는 Laguerre 이득 r_i 는 식(5)와 같다.

3. Laguerre 모델의 상태공간형 표현

안정한 선형 시불변 시스템은 시간영역 $[0, \infty)$ 적분 가능한 임펄스 응답으로 표현할 수 있으며, 임펄스 응답 $g(t)$, 전달함수 $G(s)$ 와 입력 $u(t)$ 인 시스템을 Laguerre 모델로 나타내면

$$g(t) = \sum_{i=1}^{\infty} r_i z_i(t), \quad G(s) = \sum_{i=1}^{\infty} r_i z_i(s) \quad (6)$$

이며, 주파수 영역에서의 출력은

$$\begin{aligned} Y(s) &= G(s) U(s) = \sum_{i=1}^{\infty} z_i(s) U(s) r_i \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} W_i(s) r_i = \sum_{i=1}^{\infty} Y_i(s) \end{aligned} \quad (7)$$

이다. i 번째 Laguerre 모델에 대한 출력은

$$Y_i(s) = z_i(s) U(s) r_i = W_i(s) r_i \quad (8)$$

이며, $z_i(s) U(s) = W_i(s)$ 는 단지 입력 $U(s)$ 에 종속된 값이며, 파라미터에 대하여 독립이다. 그리고 그림1의 Laguerre 모델의 구조에서처럼 $i \geq 1$ 경우 다음과 같은 관계가 있다.

$$z_i(s) = z_{i-1}(s) \frac{s-p}{s+p} \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^N Y_i(s) = \sum_{i=1}^N z_i(s) U(s) r_i \quad (10)$$

$$= \sum_{i=1}^N W_i(s) r_i = \mathbf{W}(s) \mathbf{r}$$

위의 식에서 모델 파라미터 \mathbf{r} 은 시간영역에서 $W(t)$ 에 의한 측정 가능한 출력 $y(t)$ 와 선형적인 관계를 가지며, Laguerre 모델의 초기 단계를 미분방정식으로 표현하면

$$\dot{z}_1(t) = -pz_1 + \sqrt{2p}u(t), \quad W_1(t) = z_1(t) \quad (11)$$

이다, 그리고, $i \geq 2$ 일 때, i 번째 단계는 다음과 같은 미분방정식으로 구현 할 수 있다.

$$\dot{z}_i(t) = -pz_i(t) - 2pW_{i-1}(t) \quad (12)$$

$$\text{단, } W_i(t) = z_i(t) + W_{i-1}(t)$$

위에서 유도한 미분방정식을 상태방정식 형태로 재표현하면

$$\dot{\mathbf{Z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{Z}(t) + \mathbf{B}u(t) \quad (13)$$

여기서

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -p & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -2p & -p & 0 & \cdots & 0 \\ -2p & -2p & -p & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -2p & -2p & -2p & \cdots & -p \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \sqrt{(2p)} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

위의 상태공간 모델은 ($p > 0$)인 경우 항상 안정하며, 가 제어하다. 모델링 하기 위한 시스템의 출력은 각각 Laguerre 모델 출력의 합으로 근사화 할 수 있다.

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^N r_i z_i(t) = \mathbf{r}^T \mathbf{Z}(t) \quad (14)$$

Laguerre 모델은 식(13)으로부터 ($p > 0$)를 선택하면 시스템은 항상 안정하다. 그러나 시스템의 극으로 작용하므로 최적적 p 를 선택하여야 정확한 시스템 동정을 이룰 수 있다.

4. 미지시스템의 온-라인 시스템 동정

Laguerre 모델을 이용한 안정한 SISO 시스템의 파라미터의 동정은 오직 입력력 정보만으로 미지 시스템의 동정이 가능함을 알 수 있었다. 본 장에서는 이러한 미지 시스템 동정을 위해 요구되는 계수벡터 \mathbf{r} 를 결정하기 위한 방법에 대해 다루고자 한다.

식(14)의 벡터 \mathbf{r} 를 결정하기 위해 다음과 같은 일반적인 반복 최소자승법(RLS: recursive least squares)을 도입한다 [12].

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \mathbf{K}(t) [y(t) - \phi^T(t) \hat{\theta}(t-1)] \quad (15)$$

$$\mathbf{K}(t) = \mathbf{P}(t-1) \phi(t) [\lambda + \phi^T(t) \mathbf{P}(t-1) \phi(t)]^{-1} \quad (16)$$

$$\mathbf{P}(t) = [\lambda - \mathbf{K}(t) \phi^T(t)] \mathbf{P}(t-1) \quad (17)$$

여기서, \mathbf{P} 는 공분산 행렬(covariance matrix), ϕ 는 입력력(regression) 벡터이고, $y(t)$ 는 미지 시스템의 출력이다.

식(15)~식(17)을 이용하기 위하여 3장의 Laguerre 모델의 상태공간표현은

$$\dot{\mathbf{Z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{Z}(t) + \mathbf{B}u(t) \quad (18)$$

이며, 위의 상태공간 모델은 ($p > 0$)인 조건에서, 동정하기 위한 미지 시스템 출력 $y(t)$ 는 Laguerre 모델 출력

$$\hat{y}(t) = \mathbf{r}^T \mathbf{Z}(t) \quad (19)$$

에 의하여 근사화할 수 있다. 식(19)의 Laguerre 모델의 계수벡터 \mathbf{r} 를 구할 수 있다면, 단지 실제 시스템의 입력, 출력

정보만으로 시스템의 근사화가 가능하다. 미지 시스템 근사화를 위해 요구되는 벡터 \mathbf{r} 은 다음과 같이 결정할 수 있다.

식(19)을 regression 모델로 표현하면 Laguerre 모델의 계수 벡터와 모델의 입출력벡터는

$$\mathbf{r} = [r_1 \ r_2 \ \cdots \ r_N]^T \quad (20)$$

$$\mathbf{Z}(t) = [z_1(t) \ z_2(t) \ \cdots \ z_N(t)]^T \quad (21)$$

라고 정의할 수 있다. 그리고, 추정오차

$$e(t) = y(t) - \hat{y}(t) = y(t) - \mathbf{r}^T \mathbf{Z}(t) \quad (22)$$

라고 정의하면, 식(15)~식(17)을 이용하여 평균자승오차를 최소로 하는 Laguerre 모델의 계수벡터 \mathbf{r} 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{r}(t-1) + \frac{\mathbf{P}(t-1)\mathbf{Z}(t)}{1 + \mathbf{Z}^T(t)\mathbf{P}(t-1)\mathbf{Z}(t)} \times [y(t) - \mathbf{r}^T(t-1)\mathbf{Z}(t)] \quad (23)$$

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{P}(t-1) - \frac{\mathbf{P}(t-1)\mathbf{Z}(t)\mathbf{Z}^T(t)\mathbf{P}(t-1)}{1 + \mathbf{Z}^T(t)\mathbf{P}(t-1)\mathbf{Z}(t)} \quad (24)$$

여기서, \mathbf{P} 는 공분산 행렬(covariance matrix), $\mathbf{Z}(t)$ 는 Laguerre 모델의 입출력(regression) 벡터이고, $y(t)$ 는 미지 시스템 출력이다. 식(23)과 (24)를 통해 결정된 벡터 \mathbf{r} 은 미지 시스템의 온-라인(on-line) 파라미터 정보를 포함하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 미지의 물리적 시스템의 동특성을 나타내고 이를 활용할 수 있도록 시스템 구현을 위하여 Laguerre 모델을 이용하여 연속시간 상태공간 모델로부터 온-라인으로 파라미터를 갱신하도록 함으로써 시스템의 모든 정보를 획득할 수 있을 뿐만 아니라, 시스템의 별도의 선행정보 없이 입출력 정보만을 사용하므로 추가의 동정 과정이 불필요하다.

5. 적용예

5.1 적용예1

제안된 방법을 검증하기 위하여 다음과 같은 12차의 시스템을 미지 시스템으로 가정하고, 시스템의 입·출력 정보는 알고 있다고 가정하여 모의실험을 수행하였다.

$$G(\cdot) = \frac{(15s+1)^2(4s+1)(2s+1)}{(20s+1)^3(10s+1)^3(5s+1)^3(0.5s+1)^3}$$

모의 실험에 사용된 조건은 각각 $p=0.06$, $\mathbf{P} = 100 \times \mathbf{I}$ 이며 이때의 4장에서 제안된 방법을 적용하였을 경우의 Laguerre 모델의 계수 \mathbf{r} 은 표1의 값으로 수렴하였으며, 계

수의 궤적은 각각 그림2, 3, 4에 도시하였다. 그리고, 미지시스템 $y(t)$ 와 Laguerre 모델의 출력 $\hat{y}(t)$ 의 오차, 단위계단 입력에 대한 응답특성은 각각 그림5, 6과 같으며, 출력추종 응답특성을 그림7에 도시하였다.

표 1 Laguerre 모델의 계수 r
Table 1 Coefficients r of Laguerre model for example1

	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6
N=4	0.0164	-0.0578	0.0732	-0.0257		
N=5	0.0163	-0.0581	0.0728	-0.0263	-0.0004	
N=6	0.0160	-0.0589	0.0715	-0.0282	-0.0028	-0.0014

파라미터 p 를 ($p>0$)와 같이 선정하면 Laguerre 모델은 항상 안정한 반면, 시스템 동정에서 모델의 극(pole)이 되기 때문에 시스템에 직접적인 영향을 미친다. 본 논문에서는 시행착오 범으로 파라미터 p 를 선정하였으며, 그 결과 실제 시스템의 우세극(dominant pole)에 가까운 값을 알 수 있었다. 적용예에서 시스템의 우세극은 -0.05 이고 Laguerre 모델의 극은 -0.06 이다.

표1에서 계수 r_5 와 r_6 은 영(zero)에 가까우며, 각각을 제거하여도 Laguerre 모델 출력은 실제시스템의 출력에 수렴함을 보였다. 따라서, Laguerre 모델의 차수N은 영에 가까운 계수들을 제거했을 때의 N을 선정하여도 최대오차는 각각 N=4일 때 -0.0031 , N=5일 때 0.0021 N=6일 때 0.0017 이다. 따라서, 12차 고차시스템을 4차까지 저차화 할 수 있을 것으로 사료된다.

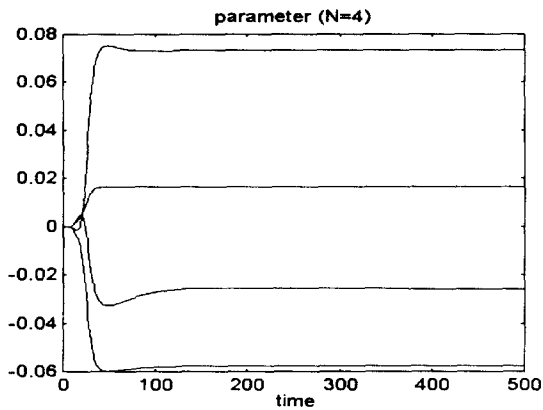


그림 2 Laguerre 모델 계수 r
Fig. 2 Laguerre model coefficients r

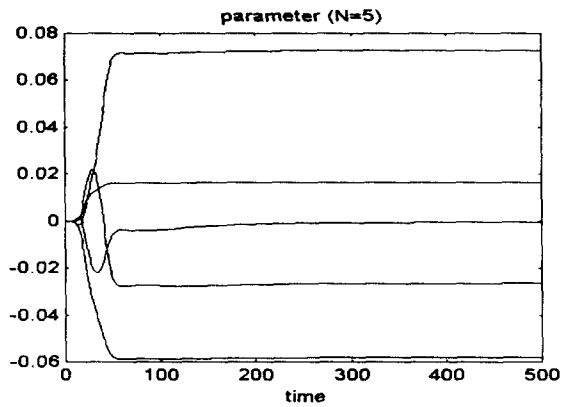


그림 3 Laguerre 모델 계수 r
Fig. 3 Laguerre model coefficients r

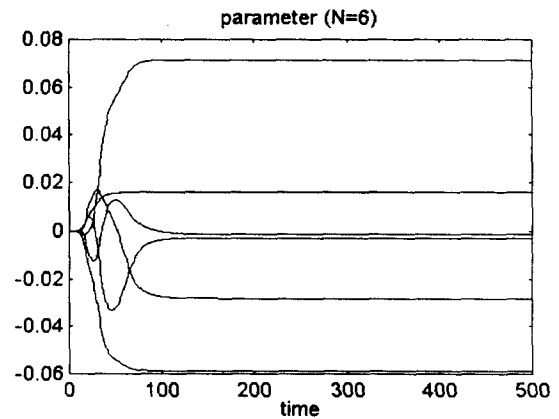


그림 4 Laguerre 모델 계수 r
Fig. 4 Laguerre model coefficients r

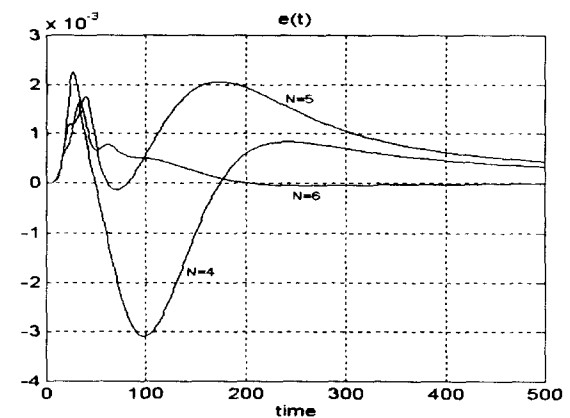


그림 5 근사 오차 $e(t)$
Fig. 5 Approximation errors for example 1

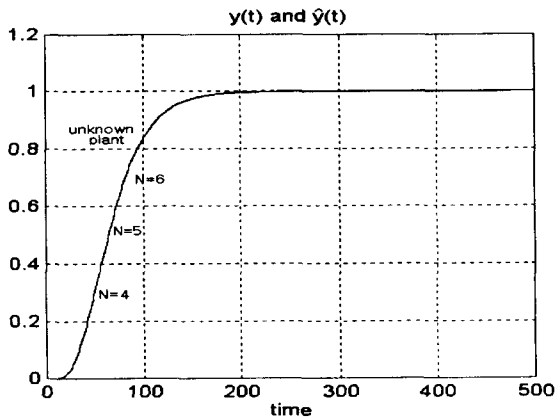


그림 6 미지시스템과 Laguerre모델의 출력(단위계단입력)
Fig. 6 Output of unknown system and Laguerre models (step response)

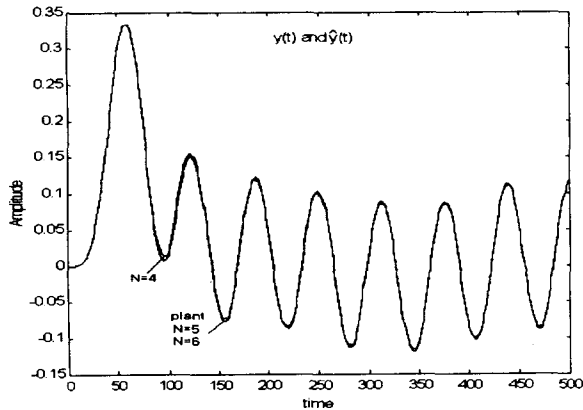


그림 7 미지시스템과 Laguerre 모델의 출력추종
Fig. 7 Tracking output of unknown system and Laguerre models

5.2 적용예2

미지 시스템 $G(\cdot)$ 가 시간지연을 갖는 전달함수에 적용하였다.

$$G(\cdot) = \frac{1}{s+1-e^{-2-s}}$$

모의 실험에 사용된 조건은 각각 $p=1$, $P=100 \times I$ 이며 시스템입력 $u(t)=\sin(t)+\sin(2t)$ 를 인가한 경우에 모델의 차수 $N=1, N=2, N=3$ 에 대하여 수행하였다. Laguerre 모델의 계수 r 은 표2의 값으로 수렴하였으며, 계수의 궤적은 각각 그림8, 9, 10에 도시하였다. 이때, 미지시스템 출력 $y(t)$ 와 Laguerre 모델의 출력 $\hat{y}(t)$ 의 오차 그리고 출력추종 응답 특성은 각각 그림11, 12와 같다.

표 2 Laguerre 모델의 계수 r

Table 2 Coefficients r of Laguerre model for example2

	r_1	r_2	r_3
N=1	0.7168		
N=2	0.7358	0.0274	
N=3	0.7445	0.0315	0.0075

제안된 방법은 선행정보 없이 만족스러운 근사 시스템을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 시스템의 우세극은 -1 이며 Laguerre 모델의 극은 -0.7 이다. 모의실험 결과 $N=3$ 에서 r_3 는 영(zero)에 가깝기 때문에 이를 제거하여 $N=2$ 로 하여도 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 추정최대오차는 $N=1$ 인 경우 0.0463 $N=2$ 일 때 0.0272 $N=3$ 인 경우 0.0270으로 나타났다.

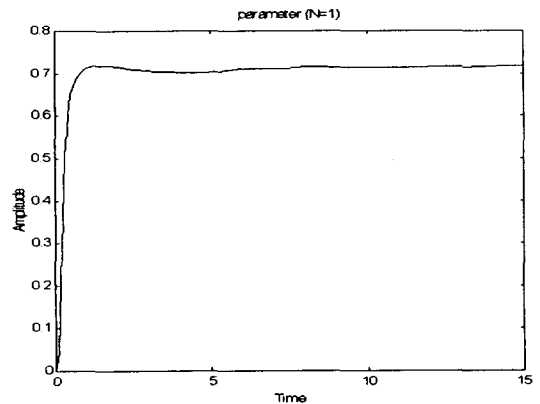


그림 8 Laguerre 모델 계수 r
Fig. 8 Laguerre model coefficients r

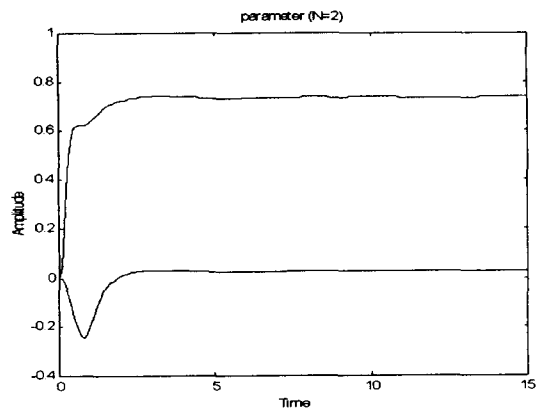


그림 9 Laguerre 모델 계수 r
Fig. 9 Laguerre model coefficients r

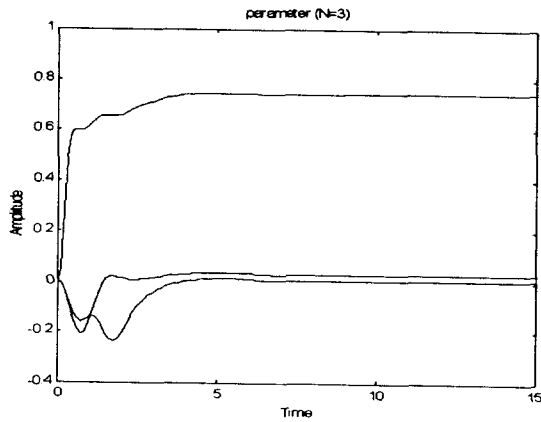


그림 10 Laguerre 모델 계수 r
 Fig. 10 Laguerre model coefficients r

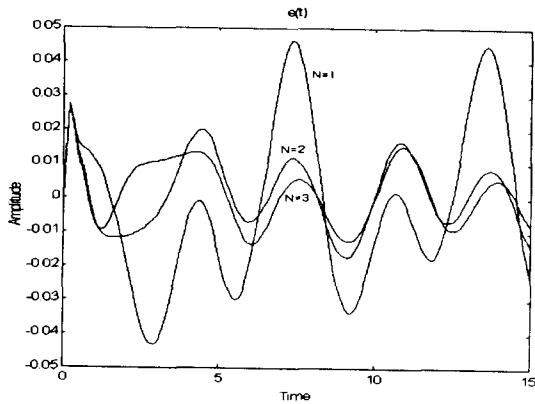


그림 11 근사 오차 $e(t)$
 Fig. 11 Approximation errors for example 2

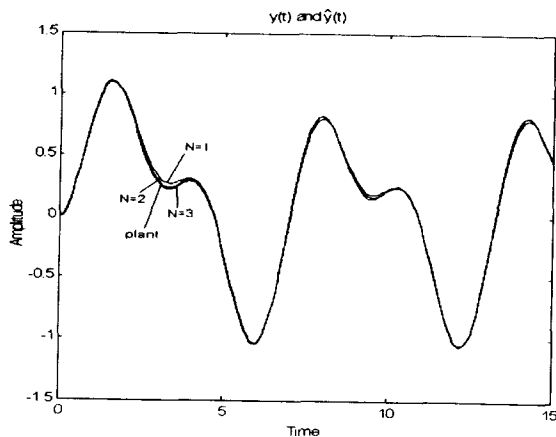


그림 12 미지시스템과 Laguerre 모델의 출력추종
 Fig. 12 Tracking output of unknown system and Laguerre models ($u(t)=\sin(t)+\sin(2t)$)

6. 결론

본 연구에서는 미지 시스템에 대한 시스템 차수, 시스템의 구조, 시간지연 등과 같은 선행정보 없이 단지 입출력 정보만을 이용하여 시스템의 파라미터를 구할 수 있는 온-라인 시스템 동정 기법을 제시하였다. 제안한 방법은, 추정할 계수 벡터 r 이 모델의 상태(state)와 독립이라는 장점을 갖고 있으며, Laguerre 모델로부터 연속시간 상태공간형 표현을 가능하게 하였다. 표현된 상태공간형 모델로부터 반복최소자승기법(RLS)에 기초한 온-라인 시스템 동정을 수행함으로써 시스템의 모든 정보를 획득할 수 있다. 또한, 시스템의 별도의 선행정보 없이 입·출력 정보만을 사용하기 때문에 모델링을 위한 추가의 동정과정이 불필요하다.

Laguerre 모델 파라미터 p 의 선정은 시스템의 우세극(dominant pole)을 이용하는 것이 최적의 방법임을 적용예를 통하여 알 수 있었다.

또한, 제안한 방법은 시스템의 고차인 경우 허용 근사 오차 범위 내에서 저차모델을 얻는 모델축소 기법(model reduction)으로써 이용할 수 있을 것으로 사료되며, 자기동조(self-tuning) 적응제어 시스템 설계에 적용 가능할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] A. Weinmann, "Uncertain models and robust control", New York, Springer-Verlag, 1991.
- [2] M. J. Grimble, "Robust Industrial Control", Prentice-Hall, 1994.
- [3] C. C. Zervos and G. A. Dumont, "Deterministic adaptive control based on Laguerre series representation", *Int. J. Control*, vol.48, pp2333-2359, 1988
- [4] P.M. Makila, "Approximation of stable systems by Laguerre filters", *Automatica*, vol.26, pp.333-345, 1990
- [5] Glader et al. "Approximation of delay systems - a case study", *Int. J. control*, vol.53, pp369-390, 1991
- [6] Y. Fu and G. A. Dumont, "An optimal time scale for discrete Laguerre network", *IEEE Trans. Automatic Control*, vol.38, pp934-938, 1993
- [7] P. D. Olivier, "Reduced-order models using optimal Laguerre approximations", *Electric lett.*, vol. 23, no.6, pp.257-259, 1987
- [8] C. Zervos, P. R. Belanger and G. A. Dumont, "On PID controller tuning using orthonormal series identification", *Automatica*, vol.24, no.2, pp165-175, 1988
- [9] J. R. Partington, "Approximation of delay systems by Fourier-Laguerre series", *Automatica*, vol.27, no.3, pp.569-572, 1991
- [10] G. Gu, P. P. Khargonekar and E. B. Lee, "Approximation of infinite dimensional systems",

- IEEE Trans. Automatic control*, vol.34, pp.610-618, 1989
- [11] P. M. Makila, "Laguerre series approximation of infinite dimensional systems", *Automatica*, vol.26, pp.985-995, 1990
- [12] K. J. Astrom and B. Wittenmark, "*Adaptive control*", Addison-Wesley publishing Inc., 1995
- [13] 오현철, 김윤상, 안두수, "라구에르 모델을 이용한 미지시스템의 근사화", *제어계측·자동화·로보틱스 연구회 합동 학술 대회 논문집*, pp.55-58, 1998

저 자 소 개

오 현 철(吳顯哲)

전기학회논문지 제48A권 제3호 참조

Tel : 0331-290-7167

E-mail : ohcl@chollian.net

김 윤 상(金潤相)

전기학회논문지 제48A권 제3호 참조

Tel : 02-958-5619

E-mail : yoonsang@kistmail.kist.re.kr

안 두 수(安斗守)

전기학회논문지 제48A권 제3호 참조

Tel : 0331-290-7101

E-mail : dsahn@ece.skku.ac.kr



이 재 춘 (李在春)

1957년 2월 23일 생. 1980년 성균관대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학교 대학원 졸업 석사. 1995년 동 대학교 대학원 졸업 박사. 현재 서일대학 전자과 교수

Tel : 02-490-7394

E-mail : LEEJC@hitel.net