

GMDH알고리즘에 의한 직류 서보 전동기의 모델추종형 제어계 구성에 관한 연구

A Design on Model Following Control System of DC Servo Motor Using GMDH Algorithm

황 창 선* · 김 문 수** · 이 양 우*** · 김 동 원^S

*부산대학교 전기공학과 (Tel: 051)510-2367; Fax: 051)513-0212)

**동의공업전문대학 전기과 (Tel: 051)860-3200; Fax: 051)860-3327)

***동의대학교 전기공학과 (Tel: 051)890-1667; Fax: 051)895-3727)

^S부산대학교 생산기술연구소 (Tel: 051)510-2367; Fax: 051)513-0212)

Abstract - In this paper, GMDH(Group Method of Data Handling)algorithm, which is based on heuristic self organization to predict and identify the complex system, is applied to the control system of DC servo motor. The mathematical relation between input voltage and motor speed is obtained by GMDH algorithm. A design method of model following control system based on GMDH algorithm is developed. As a result of applying this method to DC servo motor, the simulation and experiment have shown that the developed method gives a good performance in tracking the reference model and in rejection of disturbance, in spite of constant load and changing load.

Key Words : GMDH, Heuristic Self Organization, Mathematical Relation, Model Following Control System

1. 서 론

최근 산업의 발달과 더불어 자동제어에 관한 연구가 많이 이루어지고 있고, 이러한 자동화 설비의 바탕이 되는 것으로 직류 서보 전동기가 여러 분야에 사용되고 있으며 이의 효율적인 속도 제어 방법이 많이 보고되어 왔다.

외란 억제와 동특성 변화에도 강한 제어기를 설계하기 위해서는 제어대상에 대한 정확한 모델링이 중요하나, 실제 제어계에는 비선형적인 특성을 포함하고 있다. 비선형성이 높은 경우나 시스템 변수의 변화가 크고 부하의 변화가 심한 복잡한 시스템 또는 시스템의 구조를 정확히 알 수 없는 경우에는 대상 시스템의 특성을 나타내는 수학적 모델을 정확히 구하기가 어렵다.

비선형 시스템 식별 방법 중의 하나로 작은 입출력 데이터로부터 다변수 비선형의 복잡한 시스템 식별에 효과적이고 계층구조와 병렬계산 알고리즘을 특징으로 한 GMDH(Group Method of Data Handling)알고리즘을 1960년대 후반에 A. G. Ivakhnenko가 제안하여 영국 경제 모델 수식화 문제에 적용하였다. Kondo는 정보량 기준 AIC(Akaike's Information Criterion)를 평가규범으로 하여 부분 표현식을 자기 선택하는 개량형 GMDH알고리즘을 제안하였다. Akizuki는 프로세스에 대한 최적 PI제어기 파라미터 값을 미리 계산하여, 그 관계를 비선형 함수로 정식화시키는 방법을 제안하였다.

본 논문에서는 GMDH알고리즘을 이용한 직류 서보 전동기의 모델추종형 제어계 설계법을 제안하고자 한다. 제어대상인 직류 서보 전동기의 파라미터 변동, 모델링 오차 등과 같은 불확실성을 고려한 전압과 속도의 비선형 관계를 AIC를 최소로 하는 개량형 GMDH알고리즘으로 구한다. GMDH알고리즘을 이용하면 전동기에 인가하는 전압과 속도를 입력 데이터로 하여 전압의 관계식을 얻

을 수 있고, 이 관계식에 의해 GMDH제어기를 구한다. GMDH제어기와 정상상태에서 오차를 제거할 수 있는 PI제어기를 이용하여 기준모델의 응답에 빠른 추종성과 외란제거특성을 가지는 직류 서보 전동기의 모델추종형 제어계를 구성한다. 제안한 방법의 유효성을 입증하기 위해 제어계의 성능을 시뮬레이션과 실험을 통하여 보이고자 한다.

2. GMDH알고리즘

일반적인 비선형 시스템의 입력을 $x(t)$, 출력을 ϕ 로 할 때 이들 관계를 이산형 다항식으로 표현하면 식(1)과 같은 Kolmogrov-Gabor의 다항식으로 표현할 수 있다.

$$\phi = a_0 + \sum_i a_i x_i + \sum_j \sum_k a_{ij} x_i x_j + \sum_l \sum_m \sum_n a_{lmn} x_l x_m x_n + \dots \quad (1)$$

여기서, ϕ : 출력변수, m : 입력변수 수, x_i, x_j, x_k : 입력변수, a_i, a_{ij}, a_{lmn} : 계수

식(1)에서 입력 x_i 는 $x(t-iT)$ 으로 제 i step지연된 입력이며, T 는 샘플링 시간이다. 회귀추정 문제에서 모델구조를 모를 경우 추정해야 할 계수와 구조는 엄청난 수가 된다. 이와 같은 계산상의 어려움을 피하기 위해 부분표현식을 도입하고 각 층에서 최적인 부분 표현식을 찾아 층을 누적함으로써 모델구조를 자기 조직화하는 것이 GMDH알고리즘이다. 부분표현식 y_k 를 식(2)와 같이 2변수 2차 다항식으로 선택하는 것을 Basic GMDH알고리즘이라 한다.

$$y_k = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_1 + a_3 x_1 x_1 + a_4 x_1^2 + a_5 x_1^2 \quad (2)$$

Basic GMDH알고리즘은 부분표현식이 2차 식으로 고정되어 있어 다입력 저차수 시스템인 경우 고정된 부분표현식의 구조로는 파악할 수 없는 단점이 있다. 또한, 데이터를 트레이닝 데이터와 핵

킹 데이터로 분할하기 때문에 분할방법에 따라 식별 결과가 달라질 수 있으며, 파라미터 회귀추정에 이용되는 데이터의 양도 줄어들어 식별정도가 떨어진다. 이러한 단점을 보완하여 평가규범을 도입하고 부분표현식을 다양화한 것을 개량형 GMDH알고리즘이라 한다. N조의 입출력 데이터에 대해서 k 변수의 중회귀 모델을 식(3)으로 가정한다.

$$\phi = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + e \quad (3)$$

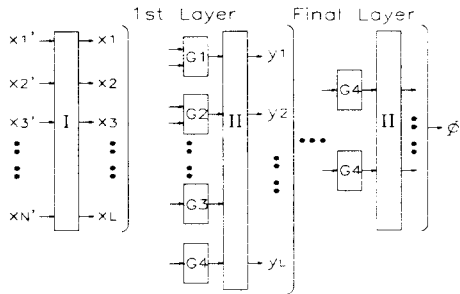
여기서 $x_i(i=1, 2, \dots, k)$ 는 입력변수, ϕ 는 출력변수, e 는 다른 항에 독립이면서 평균 0이고 분산 σ^2 인 정규분포라고 할 때, AIC는 다음 식으로 규정되며 값이 작을수록 정확한 모델이다.

$$AIC_k = N \log_e S_k^2 + 2(k+1) + C \quad (4)$$

$$S_k^2 = \frac{1}{N} \sum_{a=1}^N (\phi_a - \hat{\phi}_a)^2 \quad (5)$$

$$\hat{\phi}_a = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i \quad (6)$$

여기서 ϕ_a 는 a번째의 데이터의 출력값, $\hat{\phi}_a$ 는 N조의 데이터를 이용해서 얻은 중회귀식 (6)으로부터 계산된 회귀 추정값, k는 변수의 개수, C는 k에 무관한 상수, S_k^2 는 식(5)로부터 계산되는 오차 2승 평균이다. 또한, 2변수의 조합에 대해 동일한 부분표현식보다 다양한 부분표현식을 이용하면 식별할 수 있는 시스템의 범위가 넓게 되고 불필요하게 복잡한 모델이 생길 가능성을 배제할 수 있다. 그림 1은 개량형 GMDH알고리즘의 구조를 나타내고 있다.



- I : selection of input variables
- II : self selection of intermediate variables
- G1, G2, G3, G4 : generators of the optimal polynomials

그림 1. 개량형 GMDH알고리즘의 구조
Fig. 1. Structure of revised GMDH algorithm

3. GMDH알고리즘을 이용한 모델추종형 제어계 구성

제어대상인 직류 서보 전동기의 동특성은 일반적으로 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$v(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + k_e \omega(t) \quad (7)$$

$$k_t i_a(t) = J_m \frac{d\omega(t)}{dt} + D_m \omega(t) + T_L(t) \quad (8)$$

여기서 $v(t)$ 는 입력전압, $i_a(t)$ 는 입력전류, $\omega(t)$ 는 전동기의 속도, $T_L(t)$ 는 부하, J_m 는 관성모멘트, D_m 는 마찰계수이고 R_a , L_a , k_e , k_t 는 전동기의 정수이다.

전동기의 속도제어에서는 관성 및 온도상승에 의한 저항의 변화, 증폭기의 이득변화, 자기포화 등의 변화에 직접 영향을 받는다. 또

한 PWM구동방식을 사용하므로 불연속적인 전류로 인한 모델링되지 않는 부분도 존재한다. 이러한 불확실성을 고려하여 직류 서보 전동기를 2차의 비선형 방정식으로 표현할 경우, 부하 $T_L(t)$ 를 0으로 두고 이산시간형으로 변환하면 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega(k+1) = f_1 [\omega(k), \omega(k-1), v(k)] \quad (9)$$

식(9)를 입력전압 $v(k)$ 에 관해 이항 연산하여 정리하면 식(10)으로 된다.

$$v(k) = f_2 [\omega(k+1), \omega(k), \omega(k-1)] \quad (10)$$

여기서 함수 $f_2[\cdot]$ 는 미지의 함수이며, 임의의 입력전압 $v(k)$ 에 대한 직류 서보 전동기의 속도 $\omega(k+1)$ 와 $\omega(k)$, $\omega(k-1)$ 의 데이터를 이용하여 GMDH알고리즘으로 구할 수 있다. 직류 서보 전동기의 속도출력을 입력변수로 하여 입력전압을 추정하는 역모델의 구조를 나타내고 있다. GMDH알고리즘으로 추정된 입력전압은 식(11)과 같다.

$$\hat{v}(k) = g [\omega(k+1), \omega(k), \omega(k-1)] \quad (11)$$

여기서 $g[\cdot]$ 이란 GMDH알고리즘으로 구한 함수이며, $\hat{v}(k)$ 는 $v(k)$ 의 추정값을 나타낸다. 그러나 식(11)의 $\omega(k+1)$ 항은 미래값을 의미하므로 실제 구현을 위해서는 추정값에 의존할 수 밖에 없으며 그 추정값은 미리 규정한 기준모델과의 관계에서 얻을 수 있다.

기준모델은 안정한 2차 형태의 이산시간 모델로 식(12)와 같이 선정하며 계수 a, b는 실제사양과 직류 서보 전동기의 성능을 고려하여 결정할 수 있다.

$$\omega_m(k+1) = a \cdot \omega_m(k) + b \cdot \omega_m(k-1) + r(k) \quad (12)$$

여기서, $\omega_m(k)$: 기준모델 출력, $r(k)$: 기준입력

모델추종형 제어계의 목적은 직류 서보 전동기의 속도를 기준모델의 출력에 일치시키는 것이므로 GMDH알고리즘으로 구한 전압과 속도의 관계식 식(11)에서 $\omega(k)$ 대신에 기준모델의 출력 $\omega_m(k)$ 를 이용하며, 모델출력에 의한 입력전압의 추정식은 다음 식과 같다.

$$v_1(k) = g [\omega_m(k+1), \omega_m(k), \omega_m(k-1)] \quad (13)$$

GMDH제어기의 출력 $v_1(k)$ 는 식(13)에서 $\omega_m(k+1)$ 대신 식(12)를 대입하여 구성하며, 기준입력 $r(k)$ 와 기준모델의 출력 $\omega_m(k)$, $\omega_m(k-1)$ 의 함수로 나타나므로 실제 구현이 가능하다. PI제어기 정상상태에서 오차를 제거하기 위해 사용하며 식(15)와 같이 구성한다.

$$e(k) = \omega_m(k) - \omega(k) \quad (14)$$

$$v_2(k) = K_p e(k) + \sum_{j=1}^k K_i e(j) T \quad (15)$$

여기서 $v_2(k)$ 는 PI제어기 출력, $e(k)$ 는 출력오차, T는 샘플링 시간이며 K_p , K_i 는 각각 비례상수와 적분상수이다.

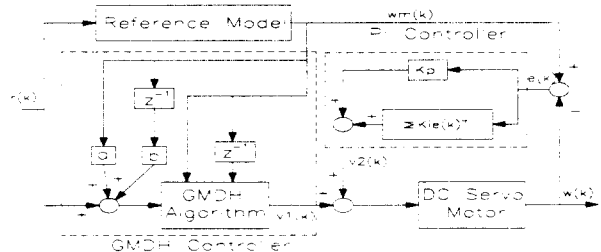


그림 2. 직류 서보 전동기의 모델추종형 제어계
Fig. 2. Model following control system of DC servo motor

제한한 직류 서보 전동기의 모델추종형 제어계 구조는 그림 2와 같다.

4. 시뮬레이션 및 실험

앞 절에서 제안한 설계법을 H_∞ 제어기를 이용한 Miyamoto의 방법과 비교하고, 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하고자 한다. 시뮬레이션과 실험에 사용된 직류 서보 전동기의 사양은 표 1과 같으며, $[a \ b] = [0.01 \ 0.9702]$ 인 기준모델을 선정하였다. 샘플링 시간은 1[msec]이며, PI제어기의 계수 K_p, K_i 는 각각 0.05, 5로 하였다.

표 1. 직류 서보 전동기 사양
Table 1. Parameter for DC servo motor

| | | | |
|-------|------------|---------|---------------------------|
| 정격출력 | 80[W] | 전기자인덕턴스 | 1.7[mH] |
| 정격전압 | 31.3[V] | 전기자저항 | 1.3[Ω] |
| 정격전류 | 3.26[A] | 관성모멘트 | 0.4[gcmsec ²] |
| 정격회전수 | 4000[rpm] | 토크오정수 | 0.66[kgcm/A] |
| 정격토크 | 2.0[kg cm] | 역기전력정수 | 6.8[V/Krpm] |

4.1 시뮬레이션

GMDH알고리즘으로 직류 서보 전동기의 전압 속도 관계식을 찾기 위하여 다양한 부분표현식을 사용하였으며, 평가규범으로서는 AIC를 사용하였다. 입력전압은 식(16)과 같은 임의의 전압을 선정하였다.

$$v(k) = 15\sin\left(\frac{2\pi kT}{7}\right) + 14.5\sin\left(\frac{2\pi kT}{3}\right) \quad (16)$$

전동기의 속도 $\omega(k+1), \omega(k), \omega(k-1)$ 을 각각 입력변수 x_1, x_2, x_3 로 두고 추정할 전압 $\hat{v}(k)$ 를 출력변수 $\hat{\phi}$ 로 두어 추정하였으며, 각 층에서 추정된 식과 AIC값을 표 2에 나타내었다.

표 2. 각 층에서의 추정식
Table 2. Estimated equation of each layer

| 층 | 추정식 | AIC값 |
|---|---|-----------------------|
| 1 | $y_1 = -0.0003 + 0.0213x_1 + 0.0608x_3$ | -1.1650×10^4 |
| | $y_2 = 0.0113 + 0.082x_2 - 0.0001x_1^2 + 0.0001x_2^2$ | -1.1649×10^4 |
| | $y_3 = -0.0002 + 0.0516x_1 + 0.0304x_3$ | -1.1648×10^4 |
| 2 | $z_1 = y_1$ | -1.1652×10^4 |
| | $z_2 = y_3$ | -1.1652×10^4 |
| | $z_3 = y_2$ | -1.1652×10^4 |

표 2에서 y_i, z_i 는 각 층의 부분표현식이며 2층에서 AIC값이 더 줄어들지 않아 최종적인 추정식 $\hat{\phi}$ 는 식(17)을 선택하였다.

$$\hat{\phi} = -0.0003 + 0.0213 x_1 + 0.0608 x_3 \quad (17)$$

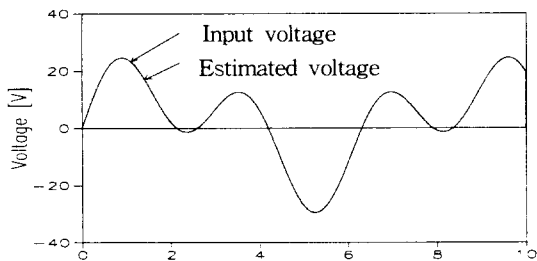


그림 3. 인가한 입력전압과 추정된 전압
Fig. 3. Applied input voltage and estimated voltage

그림 3은 임의의 입력전압 식(16)과 GMDH알고리즘으로 추정한 전압 식(17)의 결과이다. 최대오차는 0.15[v]로 나타나 추정식이 정확함을 알 수 있다.

Miyamoto의 방법과 동일한 조건에서 제어계의 모델추종 성능을 비교하였다. 추종성능을 비교하기 위해 식(18)의 평가함수를 이용하였으며, 그 값이 작을수록 좋다.

$$J = \frac{\sum_{i=1}^N |\omega_{mi} - \omega_i|}{\sum_{i=1}^N \omega_{mi}} \times 100 \quad [\%] \quad (18)$$

여기서, N : 데이터 수, ω_{mi} : 기준모델 출력,
 ω_i : 직류 서보 전동기의 속도

그림 4는 계단입력에 대한 추종성능을 보여주고 있다. 제안한 방법과 참고문헌의 J값은 각각 0.3075[%], 0.8006[%]로 정상 상태에서는 두 방법 모두 모델에 대한 추종성이 우수하나 오차의 감소율은 제안한 방법이 더 빠른 것을 알 수 있다.

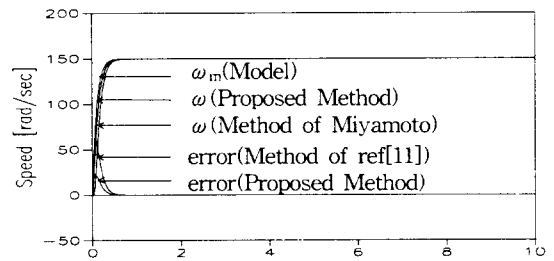


그림 4. 계단응답의 비교
Fig. 4. Comparison of step response

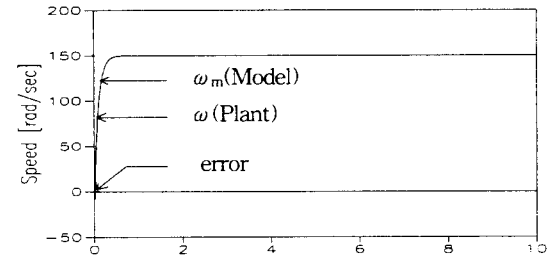


그림 5. 일정한 부하시 계단입력에 대한 제안한 제어계의 속도 (시뮬레이션)

Fig. 5. Speed of proposed control system for step input with constant load(simulation)

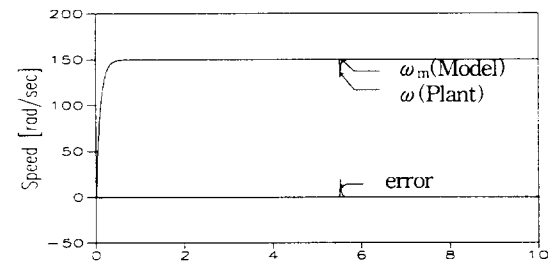


그림 6. 부하 변동시 계단입력에 대한 제안한 제어계의 속도 (시뮬레이션)

Fig. 6. Speed of proposed control system for step input with changing load(simulation)

본 논문에서 제안한 제어계의 모델추종성능을 부하가 일정한 경우와 변동하는 2가지 경우로 나누어 확인하였다.

그림 5, 6은 계단입력에 대한 모델의 출력과 제안한 제어계의 속도를 나타내고 있다. 그림 5는 일정한 부하가 인가된 경우로 기동시에만 오차가 발생함을 알 수 있다. 그림 6은 무부하 상태에서 동작중 일정한 부하를 인가한 경우의 모델추종성능을 나타낸 것으로 부하는 5.5[sec]에서 인가되었다. 부하 인가후 0.3[sec]만에 모델출력과 일치하였다.

4.2 실험결과

실험장치의 구성은 그림 7과 같으며 마이크로프로세스 보드는 32비트 MC68030 CPU, AD569 D/A컨버터를 사용하였다. 전동기의 속도를 검출하기 위한 엔코더는 전동기 축에 부착되어 있다. PWM파형을 발생시키기 위해 삼각파 발생부와 비교기를 구성하였으며, 부하장치로는 Sugawara사의 MTS-20KA를 사용하였다.

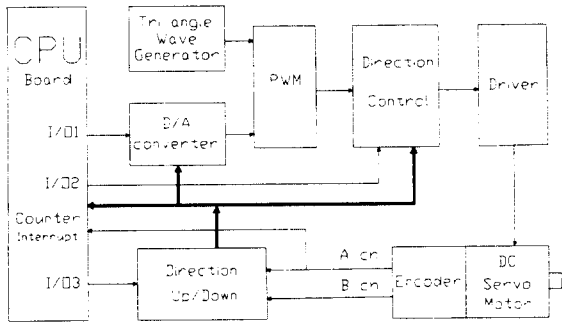


그림 7. 직류 서보 전동기의 실험장치 구성
Fig. 7. Experimental setup of DC servo motor

시뮬레이션과 동일한 조건에서 실험을 수행하였으며 제어 알고리즘은 어셈블리어와 C언어로 작성하였다. 부하는 전동기 축에 연결된 부하장치를 이용하였으며 부하토크는 0.5[Kgcm]이다.

그림 8, 9는 계단입력에 대한 모델출력과 제안한 제어계의 속도를 나타내고 있다. 그림 8은 일정한 부하인 경우이며, 그림 9는 무부하 상태에서 동작중 부하를 인가한 경우의 모델추종성능을 보여주고 있다. 이때 부하는 5.5[sec]에서 인가되었으며 약 0.4[sec]후 모델출력과 일치함을 알 수 있다.

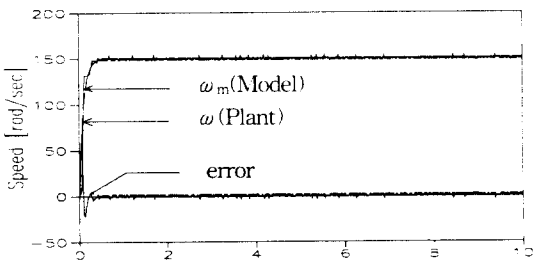


그림 8. 일정한 부하시 계단입력에 대한 제안한 제어계의 속도 (시뮬레이션)

Fig. 8. Speed of proposed control system for step input with constant load(simulation)

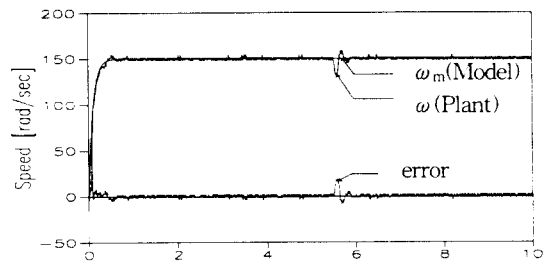


그림 9. 부하 변동시 계단입력에 대한 제안한 제어계의 속도 (시뮬레이션)

Fig. 9. Speed of proposed control system for step input with changing load(simulation)

그림 8~9의 실험결과에서도 그림 5~6의 시뮬레이션과 거의 비슷하게 일정한 부하에서는 기동시 약간의 오차가 발생하였으나 나머지 구간에서는 모델과 거의 일치함을 알 수 있다. 부하가 변하는 경우에도 전동기의 속도가 기준모델의 출력을 잘 추종하여 본 논문에서 제안한 설계법이 유효함을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 예측 및 비선형 함수의 식별에 많이 이용되고 있는 GMDH알고리즘을 직류 서보 전동기의 속도 제어에 응용하여 모델추종형 제어계 설계법을 제안하였다. GMDH제어기는 GMDH알고리즘으로 구한 관계식에 의해 구성되므로 구조가 간단한 장점이 있었다. 제안한 방법으로 속도가 일정한 모델출력에 대한 추종성능을 시뮬레이션과 실험을 통하여 고찰하였다. 그 결과, 일정한 부하 및 부하변동이 있는 경우에도 모델 추종성능과 외란제거특성이 우수함을 알 수 있었으며 시뮬레이션과 실험결과가 거의 일치하여 제안한 설계법이 유효함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] K. Akizuki, K. Ono and T. Shigemasa, "On a Design Method by GMDH for the Relation between Process Parameters and Optimal Control Parameters", SICE, Vol. 17, No. 6, pp. 696-698, 1981.
- [2] A. G. Ivakhnenko, "Polynomial theory of complex systems", IEEE Trans. Syst. Man and Cybern., Vol. SMC-1, pp. 364-378, Oct., 1971.
- [3] T. Kondo, H. Tamura, "Revised GMDH Algorithm of Self Selecting Optimal Intermediate Polynomials Using AIC", SICE, Vol. 15, No. 4, pp. 466-471, 1979.
- [4] S. Miyamoto, S. Arinaga, "Design of H_∞ Control for Plants that Have Integrators", SICE, Vol. 30, No. 10, pp. 1165-1171, 1994.
- [5] R. A. Roy and J. Sherman, "Learning Techique for Volterra Series Representation", IEEE Trans. Automatic Control, Vol. AC-12, pp. 761-764, 1967.