

PPGA 기반의 시스템 파라미터 추정과 PID 제어기 동조

System Parameter Estimation and PID Controller Tuning Based on PPGAs

신 명 호, 김 민 정, 이 윤 형, 소 명 옥, 진 강 규*
(Myung-Ho Shin, Min-Jeong Kim, Yun-Hyung Lee, Myung-Ok So, and Gang-Gyoo Jin)

Abstract : In this paper, a methodology for estimating the model parameters of a discrete-time system and tuning a digital PID controller based on the estimated model and a genetic algorithm is presented. To deal with optimization problems regarding parameter estimation and controller tuning, pseudo-parallel genetic algorithms(PPGAs) are used. The parameters of a discrete-time system are estimated using both the model adjustment technique and a PPGA. The digital PID controller is described by the pulse transfer function and then its three gains are tuned based on both the model reference technique and another PPGA. A set of experimental works on two processes are carried out to illustrate the performance of the proposed method.

Keywords : pseudo-parallel genetic algorithm, parameter estimation, digital PID controller, optimal tuning

I. 서론

근래 제어분야에서 많은 이론과 기술 발전이 있어왔음에도 불구하고 아직도 산업현장에 PID 제어가 널리 이용되고 있는 것은 그 구조가 단순하여 구현이 쉽고, 동조할 파라미터수가 적어 다루기가 용이하기 때문이다[1-3]. PID 제어기 설계 시 중요한 문제 중의 하나는 주어진 설계사양을 만족하도록 세 계수(비례이득, 적분시간, 미분시간)를 적절히 선택하는 것으로서 이를 동조(tuning)라 한다.

PID 제어기의 동조에는 여러 방식이 있고 대표적인 것으로는 Ziegler-Nichols법[4], Cohen-Coon법[5] 등이 있다. 이들은 경험적이고 실험적인 접근법으로서 시스템으로부터 동조용 매개변수를 얻는 과정에 시스템이 불안정해질 수 있고, 잡음이 클 경우에는 정확한 매개변수를 얻는 것이 불가능하고 또 예기치 못한 부하 외란에 대해 민감한 특징이 있다. 이런 문제점을 보완하면서 불확실한 시스템의 PID 제어기의 계수를 결정하는 방법으로는 릴레이궤환 자동동조법[6], 초기 계수의 실시간 적응동조법[7], 패턴을 이용한 전문가 동조법[8] 등이 있다. 또 최근에는 진화적 기법을 이용하여 최적의 계수를 구하고자 하는 연구가 진행되고 있다. Wang과 Kwok[9]는 단순 유전알고리즘(Genetic Algorithm: GA)을 이용하여 pH를 증성화하는 프로세스에서 PID 제어기를 최적 동조하는 문제를 다루었고, 김과 진[10]은 시스템의 연속시간 모델과 실수코딩 유전알고리즘(Real-Coded Genetic Algorithm: RCGA)을 기반으로 PID 제어기의 동조규칙을 제안하고 기존의 방법과 비교하였다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2005. 9. 1., 채택확정 : 2006. 4. 11.

신명호 : 부양전자산업(주) 연구소 (mhshin95@hotmail.com)

김민정 : 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과

(cleanheart@naver.com)

이윤형 : 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학과

(domse54@bada.hhu.ac.kr)

소명옥 : 한국해양대학교 선박전자기계공학부(smo@mail.hhu.ac.kr)

진강규 : 한국해양대학교 IT 공학부(ggjin@mail.hhu.ac.kr)

일반적으로 처리할 변수가 많은 곳에 기존의 직렬 GA를 적용하면 GA는 지역해 수렴문제를 극복하기 위해 큰 집단을 요구하게 되고 이는 연산부담을 과중시키는 요인이 된다. 이러한 문제는 다수의 프로세서가 각자 소집단의 GA를 독립적으로 실행하고 주기적으로 이들 간에 정보를 교환하는 병렬 구조를 갖는 GA를 이용함으로써 해결될 수 있다[11].

따라서 본 연구에서는 중규모 이상의 조합최적화 문제 해결에 적합한 이주모델과 링구조 기반의 병렬 GA를 단일 프로세서에서 구현한 의사병렬 유전알고리즘(Pseudo-Parallel Genetic Algorithm: PPGA)을 이용하여 디지털 PID 제어기를 최적으로 동조하는 문제를 다룬다. 이를 위해 먼저 시스템의 이산시간 모델의 파라미터 추정 문제를 다루고, 기준모델 제어기법[12]과 PPGA를 결합하여 모델의 출력이 기준모델의 출력을 정밀하게 추종하도록 PID 제어기를 최적 동조한다. 제안하는 방법은 시뮬레이션을 통해 그 성능을 밝힌다.

II. 이산시간 시스템의 파라미터 추정

디지털 PID 제어기의 최적 동조 문제를 다루기에 앞서 본 연구에서는 구조가 미리 알려진 시스템의 파라미터를 추정하는 문제를 다룬다.

1. 제어대상 시스템의 모델

제어대상 시스템으로 다음과 같은 ARX 모델을 고려한다.

$$A(z^{-1})Y(z) = B(z^{-1})z^{-d}U(z) + V(z) \quad (1a)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n} \quad (1b)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_mz^{-m} \quad (1c)$$

여기서 u 와 y 는 각각 모델의 입력과 출력이고, v 는 잡음이며, z^{-1} 는 후방차분 연산자로서 $y(k-1) = z^{-1}y(k)$ 의 관계를 가지며, n 과 m 은 다항식 $A(z^{-1})$ 와 $B(z^{-1})$ 의 차수이고, d 는 시간지연이다. 한편 (1)은 안정한 최소위상 시

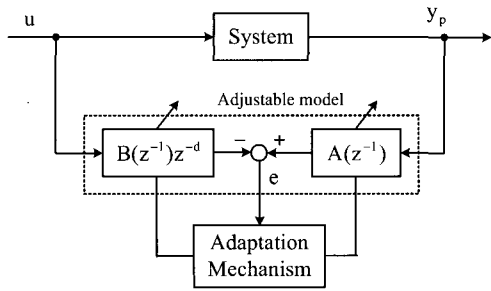


그림 1. 모델 조정 기법.

Fig. 1. Model adjustment technique.

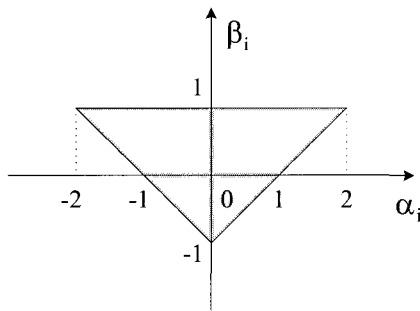


그림 2. 모델의 안정 영역.

Fig. 2. Stability domain for the model.

시스템이며, 두 다항식 $A(z^{-1})$ 와 $B(z^{-1})$ 은 서로소이며, v 는 백색잡음인 것으로 간주한다.

시스템의 파라미터 추정 문제에 GA를 적용할 때 모델의 파라미터가 시스템의 파라미터와 선형관계를 가질 필요가 없으므로 2차항(또는 1차)의 곱의 다항식으로 표시되는 (2)를 이용한다. 이렇게 함으로써 GA가 최적의 파라미터를 찾는 동안 모델이 안정하도록 탐색구간을 정하는 것이 쉬워진다.

$$A(z^{-1})Y(z) = B(z^{-1})z^{-d}U(z) + V(z) \tag{2a}$$

$$A(z^{-1}) = (1 + \alpha_1 z^{-1} + \beta_1 z^{-2})(1 + \alpha_2 z^{-1} + \beta_2 z^{-2}) \dots (1 + \alpha_n z^{-1} + \beta_n z^{-2}) \tag{2b}$$

$$B(z^{-1}) = b_0(1 + \gamma_1 z^{-1} + \delta_1 z^{-2})(1 + \gamma_2 z^{-1} + \delta_2 z^{-2}) \dots (1 + \gamma_m z^{-1} + \delta_m z^{-2}) \tag{2c}$$

위 식에서 n 과 m 이 짝수이면 각각 $n' = n/2$, $m' = m/2$ 이 되고, 홀수이면 $n' = (n+1)/2$, $m' = (m+1)/2$ 인 동시에, $\beta_{n'} = 0$, $\delta_{m'} = 0$ 이 된다.

2. 파라미터 추정

본 연구에서 다룰 파라미터 추정 문제는 그림 1과 같은 구조로 표시된다. 시스템과 조정모델(adjustable model)에 같은 입력이 인가되면 적응 메커니즘으로서의 PPGA는 시스템과 조정모델의 동특성이 일치될 때까지 모델의 파라미터를 조정하게 된다.

PPGA 적용 시 탐색구간을 잘못 정하면 어떤 파라미터 조합에서는 모델이 불안정하게 되어 탐색이 불가능하게 되므로 모델이 안정하도록 탐색구간을 적절히 정할 필요가

있다. (2)가 안정하기 위해서는 분모의 2차항의 특성방정식

$$Q(z^{-1}) = 1 + \alpha_i z^{-1} + \beta_i z^{-2} = 0, i \in [1, n'] \tag{3}$$

이 모두 안정한 근을 가져야 한다. 여기에 Jury의 안정성 테스트를 적용하고 정리하면

$$\beta_i < 1 \tag{4a}$$

$$\beta_i > |\alpha_i| - 1, i \in [1, n'] \tag{4b}$$

(4)를 얻게 된다. 따라서 $\alpha_i, \beta_i, i \in [1, n']$ 의 탐색구간은 (4)가 만족되도록 정하면 된다. 그림 2는 안정한 영역을 α_i, β_i 평면상에 도시한 것이다.

PPGA가 최적의 파라미터 추정치 $\hat{A}(z^{-1}), \hat{B}(z^{-1}), \hat{d}$ 를 탐색할 때 다음 목적함수가 이용된다.

$$F(\theta) = \sum_{i=1}^W e^2(k-i) \tag{5a}$$

$$e(k) = Z^{-1}\{A(z^{-1})Y_p(z) - B(z^{-1})z^{-d}U(z)\} \tag{5a}$$

여기서 $\theta = [b_0, \gamma_1, \delta_1, \dots, \gamma_m, \delta_m, \alpha_1, \beta_1, \dots, \alpha_n, \beta_n, d]^T$ 는 모델의 파라미터로 구성되는 벡터이고, W 는 데이터 윈도우로서 적절히 선택되는 매개변수이다.

따라서 입력력 데이터 쌍 $\{u(k), y_p(k)\}$ 이 얻어지면 PPGA는 (5a)의 목적함수 값이 최소가 되도록 θ 를 조정해 나간다. 이 때 입력신호로는 정현파의 조합신호를 이용한다[12].

III. 디지털 PID 제어기의 최적 동조

여기서는 추정된 모델과 기준모델 제어기법으로 디지털 PID 제어기를 최적 동조하는 문제를 다룬다.

1. 디지털 PID 제어기

아날로그 PID 제어기의 표준 전달함수는 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \tag{6}$$

여기서 K_p 는 비례이득, T_i 는 적분시간, T_d 는 미분시간을 의미한다.

(6)의 세 제어동작 중 미분제어는 과도응답을 개선해주지만 잡음에 민감해서 오동작의 원인을 제공하게 되는데 이 때문에 다음의 전달함수가 자주 이용된다[13]. 본 논문에서도 이를 이용한다.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + \frac{T_d}{N} s}) \tag{7}$$

여기서 $\frac{T_d}{N}$ 는 미분동작의 필터링 효과를 주는 요소이고, N 은 최대미분이득(maximum derivative gain)으로 고주파 성분에 대하여 미분이득이 N 으로 제한되며, N 이 T_d 에 비해 상대적으로 클 경우에는 표준 PID 전달함수와 같은 구조를 갖게 된다.

디지털 PID 제어기를 얻기 위해 (7)에 쌍선형 변환(bilinear transformation)을 적용하면,

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{T(z^{-1})}{S(z^{-1})} = \frac{t_0 + t_1 z^{-1} + t_2 z^{-2}}{1 + s_1 z^{-1} + s_2 z^{-2}} \quad (8a)$$

$$t_0 = K_p \left[\frac{Nh^2 + 2h(NT_i + T_d) + 4T_i T_d(1+N)}{2T_i(Nh + 2T_d)} \right] \quad (8b)$$

$$t_1 = K_p \left[\frac{Nh^2 - 4T_i T_d(1+N)}{T_i(Nh + 2T_d)} \right] \quad (8c)$$

$$t_2 = K_p \left[\frac{Nh^2 - 2h(NT_i + T_d) + 4T_i T_d(1+N)}{2T_i(Nh + 2T_d)} \right] \quad (8d)$$

$$s_1 = -\frac{4T_d}{Nh + 2T_d} \quad (8e)$$

$$s_2 = \frac{2T_d - Nh}{Nh + 2T_d} \quad (8f)$$

여기서 h 는 샘플링 시간을 의미한다.

2. PPGA와 기준모델 제어기법을 이용한 최적동조

2.1 기준모델

주어진 입력에 대하여 전체 폐루프 시스템이 원하는 출력을 내도록 적절한 모델을 선정하는 것은 시스템의 성능을 규정짓는 유용한 방법 중의 하나이다. 일반적으로 선택되는 모델은 제어 시스템과 환경에 따라 다를 수도 있겠지만, 과감쇠 시스템에서는 (9a)과 같이 시간지연을 갖는 표준 1차 시스템, 부족감쇠 시스템에서는 (9b)의 시간지연을 갖는 표준 2차 시스템이 자주 이용된다.

$$\frac{Y_m(s)}{R(s)} = \frac{e^{-Ls}}{1 + \tau s} \quad (9a)$$

$$\frac{Y_m(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2 e^{-Ls}}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (9b)$$

여기서 r 와 y_m 은 각각 기준모델의 입력과 출력, τ 는 시정수, ζ 는 감쇠계수, ω_n 는 고유각 주파수, L 은 시간지연을 의미한다.

(9)를 이산시간 형태로 고치면 다음과 같다.

$$\frac{Y_m(z)}{R(z)} = \frac{D(z^{-1})}{C(z^{-1})} z^{-v} \quad (10)$$

여기서 $C(z^{-1})$ 와 $D(z^{-1})$ 는 이산화 방법에 따라 적절히 결정되는 다항식이고, $v=L/h$ 관계를 갖는 정수이다

2.2 PPGA를 이용한 최적 동조

PID 동조는 여러 가지 방법[2-9]으로 가능하지만, 본 논

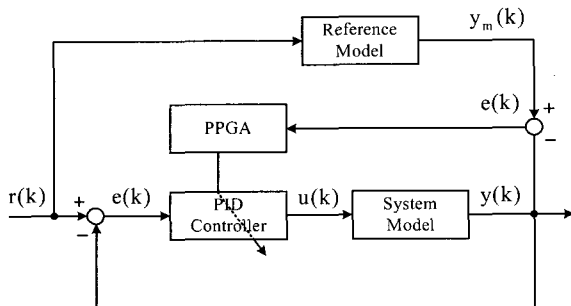


그림 3. 제안한 동조 방법.
Fig. 3. Block diagram of the proposed tuning method.

문에서는 PPGA를 이용한다. 그림 3은 제안한 방법의 블록 선도이다.

기준모델 출력과 시스템 모델 출력과의 오차를 $e(k)$ 라 하면

$$e(k) = y_m(k) - y(k) \quad (11a)$$

$$y_m(k) = Z^{-1} \left\{ \frac{D(z^{-1})}{C(z^{-1})} z^{-v} R(z) \right\} \quad (11b)$$

$$y(k) = Z^{-1} \left\{ \frac{T(z^{-1})B(z^{-1})z^{-d}}{S(z^{-1})A(z^{-1}) + T(z^{-1})B(z^{-1})z^{-d}} R(z) \right\} \quad (11c)$$

PPGA는 두 모델의 출력 차가 최소가 되도록, 즉 다음 목적함수가 최소가 되도록 PID 제어기의 계수를 조정하게 된다.

$$F(\phi) = \sum_{i=0}^W e^2(k-i) \quad (12)$$

여기서 $\phi = [K_p, T_i, T_d]^T$ 이고, W 는 데이터 윈도우이다.

IV. 시뮬레이션 및 검토

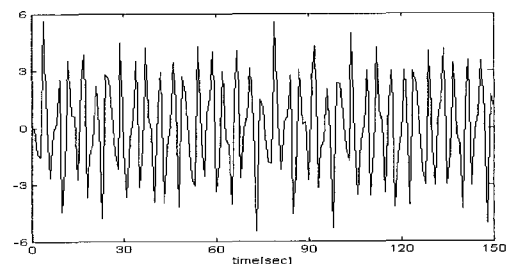
시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 유효성을 검토한다. 추정과 동조 문제에 사용되는 PPGA의 매개변수로 지역집단의 수 4, 집단의 크기 10, 재생산 계수 μ_i 는 $1.7(1 \leq i \leq 10)$, 교배확률 P_c 는 0.9, 돌연변이 확률 P_m 은 0.1, 스케일링 윈도우 W_s 은 1이 사용되었고, 고립시간은 10세대로 하였다[14].

1. 이산시간 모델의 파라미터 추정

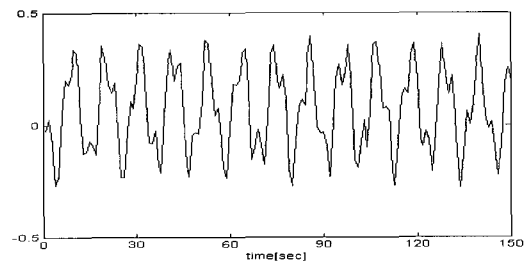
1.1 시스템 I

먼저 시간지연이 없는 2차 시스템[15]을 고려하였다.

$$\frac{Y_p(z)}{U(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (13)$$



(a) Input



(b) Output

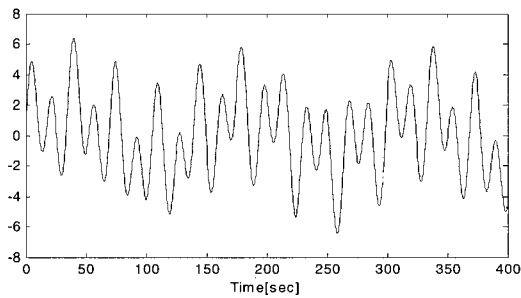
그림 4. 시스템 I의 입출력 신호.

Fig. 4. Input and output signals for system I.

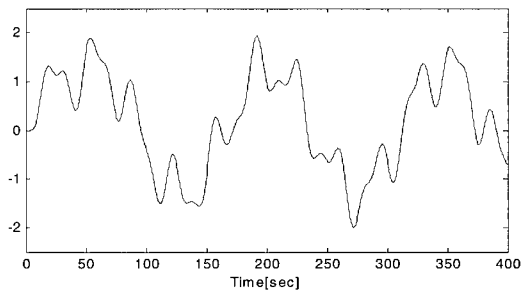
표 1. 시스템 I의 추정 결과.

Table 1. Estimation results for system I.

System parameters	
True	Estimated
$b_1 = 0.0484$	$\hat{b}_1 = 0.0487 \pm 0.9329 \times 10^{-3}$
$b_2 = 0.0468$	$\hat{b}_2 = 0.0465 \pm 0.9465 \times 10^{-3}$
$a_1 = -1.9048$	$\hat{a}_1 = -1.8984 \pm 0.5172 \times 10^{-2}$
$a_2 = 0.9048$	$\hat{a}_2 = 0.8984 \pm 0.5252 \times 10^{-2}$



(a) Input



(b) Output

그림 5. 시스템 II의 입력력 신호.

Fig. 5. Input and output signals for system II.

샘플링 시간은 $h = 1[\text{sec}]$ 이고, 파라미터는 $b_1 = 0.0484$, $b_2 = 0.0464$, $a_1 = -1.9048$, $a_2 = 0.9048$ 의 값을 갖는다. 이 문제에서는 (13)과 같은 구조의 모델을 가정하여 4개의 파라미터 $b_1, b_2, a_1(=a_1), a_2(=a_2)$ 가 추정된다. 각 파라미터들의 탐색 구간은 $-1 \leq b_1, b_2 \leq 1, -2 \leq a_1 \leq 2$ 로 하였고, a_2 는 (4)를 만족하도록 조정된다.

한편 입력으로 그림 4와 같은 0.1~0.8Hz 주파수 대역의 정현파의 조합신호를 사용하였다. 이때 출력 y_p 에는 N/S=5[%]인 백색잡음을 부과하였다.

표에서 알 수 있듯이 추정된 파라미터의 값은 시스템의 실제 값에 근접함을 알 수 있다

1.2 시스템 II

다음은 시간지연을 갖는 3차 시스템[15]을 고려하였다.

$$\frac{Y_p(z)}{U(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3}} z^{-d} \quad (14)$$

여기서 $h = 0.5[\text{sec}]$ 이고 $a_1 = -2.7287, a_2 = 2.4789, a_3 = -0.7496, b_1 = 0.001174, b_2 = 0.000244, b_3 = 0.00090, d = 8$ 이다.

여기서는 3차 시스템으로부터 2차 모델의 파라미터를 추정한다. 이 문제는 고차 시스템으로부터 축소차수 모델을 얻어 안정한 저차 제어를 설계하고자 할 때 응용될 수 있다.

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} z^{-d} \quad (15)$$

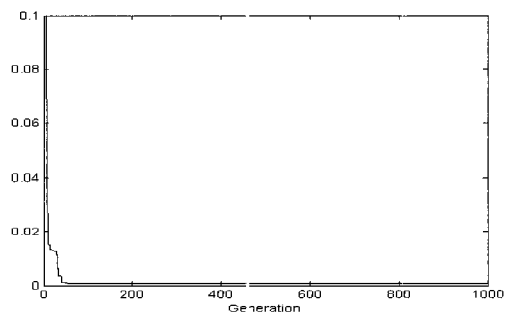
따라서 5개의 파라미터 b_1, b_2, a_1, a_2, d 가 추정된다. 각 파라미터들의 탐색구간은 $-1 \leq b_1, b_2 \leq 1, -2 \leq a_1 \leq 2$ 로 하였고, a_2 는 (4)를 만족하도록, 시간지연 파라미터의 탐색구간은 $0 \leq d \leq 15$ 로 하였다. 입력으로는 0.01~0.06Hz 주파수 대역의 정현파 조합신호를 사용하였고 입력력 신호는 그림 5와 같다.

여기서도 독립된 seed로 각 10회의 모의실험을 행하고 평균한 추정치와 표준편차는 표 2와 같다.

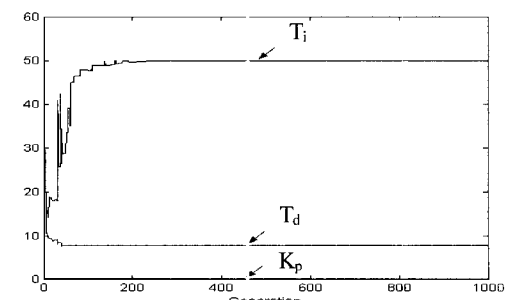
표 2. 시스템 II의 추정 결과.

Table 2. Estimation results for system II.

System parameters	
True	Estimated
$b_1 = 0.001174$	$\hat{b}_1 = 0.001783 \pm 0.2679 \times 10^{-3}$
$b_2 = 0.000244$	$\hat{b}_2 = 0.001148 \pm 0.3000 \times 10^{-3}$
$b_3 = -0.00090$	$\hat{b}_3 = -1.893817 \pm 0.11834 \times 10^{-2}$
$a_1 = -2.7287$	$\hat{a}_1 = 0.896762 \pm 0.11527 \times 10^{-2}$
$a_2 = 2.4789$	$\hat{a}_2 = 8.61 \pm 0.28$
$a_3 = -0.7496$	
$d = 8$	



(a) Objective function



(b) Parameters

그림 6. 시스템 I의 디지털 PID 제어기 동조.

Fig. 6. Tuning of the digital PID controller for system I.

2. 디지털 PID 제어기의 최적 동조

2.1 시스템 I

앞 절에서 식별한 시스템 I의 모델에 대한 PID 제어기의 동조에는 표준 2차형의 기준모델이 사용되었다.

$$C(z^{-1})Y_m(z) = D(z^{-1})R(z) \tag{16a}$$

$$C(z^{-1}) = 1 - 1.5841z^{-1} + 0.6570z^{-2} \tag{16b}$$

$$D(z^{-1}) = 0.0390z^{-1} + 0.0339z^{-2} \tag{16c}$$

단위계단입력에 대한 이 모델의 응답은 오버버슈트(M_p) 4.6%, 도달시간(t_r) 7.1[sec], 2% 정정시간(t_s) 19.9[sec]의 성능을 갖는다. 모의실험에서는 $N=5$ 로 고정하고 (8)을 사용하여 계수 K_p, T_i, T_d 를 동조하도록 하였다. PID 제어기의 세 계수의 탐색범위는 각각 $0 \leq K_p \leq 10, 0 \leq T_i \leq 5000, 0 \leq T_d \leq 50$ 으로 설정하였다.

그림 6(a)는 PID 제어기의 파라미터 탐색 시 최적성능을 그림 6(b)는 K_p, T_i, T_d 의 탐색과정을 그린 것이다. 여기서 적분시간 T_i 의 추정치는 편의상 1/100로 스케일링한 값으로 나타낸 것이다.

그림 7은 앞에서 RCGA로 동조된 디지털 PID 제어시스템과 기준모델의 출력을 함께 그린 것이다. 이때 출력은 $N/S= 5[\%]$ 의 백색잡음이 부과되는 환경을 가정한 것이며, 기준모델의 출력을 만족스럽게 추종함을 확인할 수 있다.

2.2 시스템 II

여기서는 시간지연을 갖는 표준 2차형의 기준모델이 사용되었다.

$$C(z^{-1})Y_m(z) = D(z^{-1})z^{-8}R(z) \tag{17a}$$

$$C(z^{-1}) = 1 - 1.8949z^{-1} + 0.9003z^{-2} \tag{17b}$$

$$D(z^{-1}) = 0.0027z^{-1} + 0.0026z^{-2} \tag{17c}$$

이 모델의 단위계단응답은 $M_p= 4.6\%, t_r= 18.5[\text{sec}], t_s= 44.0[\text{sec}]$ 의 성능을 갖는다.

세 계수의 탐색범위는 각각 $0 \leq K_p \leq 10, 0 \leq T_i \leq 50, 0 \leq T_d \leq 50$ 으로 설정하였다. 그림 8(a)는 탐색 시 최적성능을 그림 8(b)는 K_p, T_i, T_d 의 수렴과정을 그린 것이다.

그림 9는 앞에서 동조된 디지털 PID 제어시스템의 출력과 기준모델의 출력을 함께 그린 것이다. 제어시스템의 응

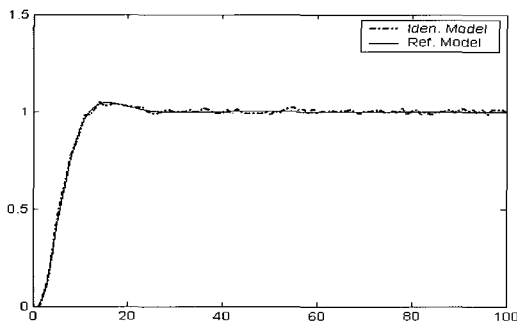
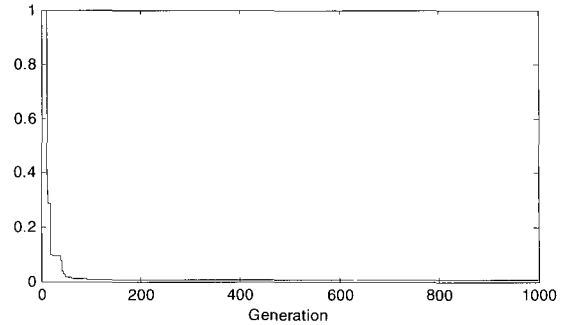
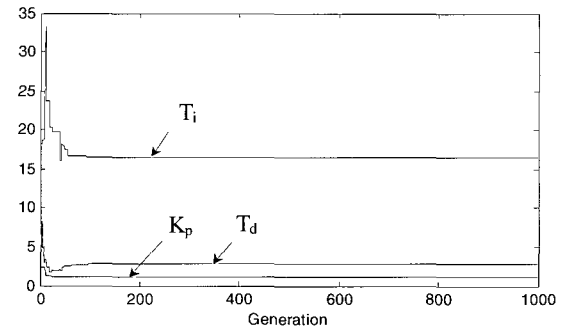


그림 7. 시스템 I의 디지털 PID 제어기 성능.
Fig. 7. Performance of the tuned digital PID controller for system I.



(a) Objective function



(b) Parameters

그림 8. 시스템 II의 디지털 PID 제어기 동조

Fig. 8. Tuning of the digital PID controller for system II.

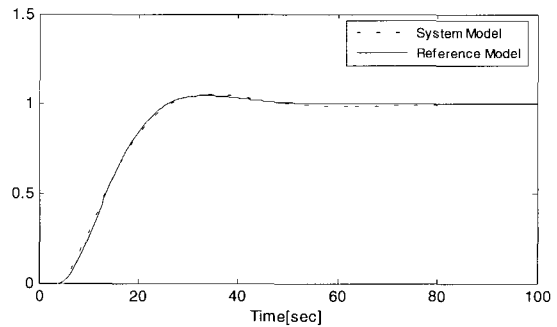


그림 9. 시스템 II의 디지털 PID 제어기 성능.

Fig. 9. Performance of the tuned digital PID controller for system II.

답에서 알 수 있듯이 응답은 기준모델의 출력을 만족스럽게 추종함을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 이주모델과 링구조 기반의 병렬 GA를 단일 프로세서에서 구현한 PPGA와 모델 조정기법을 결합하여 다 변수 이산시간 시스템의 파라미터를 추정하는 방법과 추정된 모델, 기준모델 제어기법, PPGA를 이용하여 디지털 PID 제어기를 최적 동조하는 방법을 제안하였다. PID 제어기의 계수들은 모델의 출력이 기준모델의 출력을 정밀하게 추종하도록 동조되었다. 제안한 방법은 두 종류의 시스템에서 모의실험을 실시한 결과 주어진 기준모델의 출력을 만족스럽게 추종함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

[1] Y. Nozaka, "Trend of new control theory application in industrial process control(survey)," *Proc. IFAC 12th Triennial World Cong.*, vol. 4, pp. 215-218, 1993.

[2] M. Morari and E. Zafiriou, "Robust process control," *Prentice-Hall*, Englewood Cliffs, NJ, 1989.

[3] S. W. Sung and I. B. Lee, "PID Controllers and automatic tuning," *A-Jin Publishing Co.*, Korea, 1999.

[4] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum setting for PID controllers," *Trans. ASME*, vol. 64, pp. 759-768, 1942.

[5] G. H. Cohen and G. A. Coon, "Theoretical considerations of retarded control," *Trans. ASME*, vol. 75, pp. 827-834, 1953.

[6] K. J. Åström and T. Hägglund, "Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins," *Automatica*, vol. 20, pp. 645-651, 1984.

[7] T. Yamamoto et al., "Intelligent tuning PID controllers," *Proc. IEEE Int. Conf. on SMC*, vol. 5, pp. 2610-2615, 1995.

[8] E. H. Bristol, "Pattern recognition: an alternative to parameter identification in adaptive control," *Automatica*, vol. 13, pp. 197-202, 1977.

[9] P. Wang and D. P. Kwok, "Optimal design of PID process controllers based on genetic algorithms," *Proc. 12th Triennial World Congress of IFAC*, Sydney, Australia, vol. 4, pp. 193-197, 1993.

[10] 김도웅, 진강규, "RCGA를 이용한 PID 제어기의 모델 기반 동조규칙," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제8권, 제12호, pp. 1056-1060, 2002.

[11] A. J. Chipperfield, P. J. Fleming, and A. Y. Zomaya, *Parallel genetic algorithms, parallel & distributed computing handbook*, McGraw-Hill, 1996.

[12] R. V. Monopoli, "Model reference adaptive control with an augmented error signal," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. AC-19, no. 5, pp. 474-484, 1974.

[13] I. D. Landau, "System identification and control design," *Prentice-Hall International Inc.*, 1988.

[14] 진강규, *유전알고리즘과 그 응용*, 교우사, 2000.

[15] R. Isermann, "Digital control systems," *Springer-Verlag*, NJ, 1977.



신 명 호

2002년 한국해양대학교 자동화정보공학부(공학사). 2004년 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과(석사). 현재 부양전자산업(주) 연구원. 관심분야는 제어 및 시스템 식별.



김 민 정

2005년 한국해양대학교 기계정보공학부(공학사). 현재 한국해양대학교 제어계측공학과 석사과정. 관심분야는 제어, 유전알고리즘 응용.



이 윤 형

2002년 한국해양대학교 기관시스템공학부(공학사). 2004년 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과(석사). 현재 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정. 관심분야는 제어이론, 유전알고리즘 응용.



소 명 옥

1980년 한국해양대학교 기관학과(학사). 1989년 한국해양대학교 대학원 기관학과 석사. 1997년 동 대학원 박사. 한국 횡만·운송노동연구원 연구위원. 현재 한국해양대학교 선박전자기계공학부 교수. 관심분야는 항만하역기계 제어, 퍼지제어.



진 강 규

1977년 한국해양대학교 기관학과(학사). 1985년 Florida Institute of Technology, 전기·전자·컴퓨터공학과(석사). 1996년 University of Wales Cardiff, 전기·전자·시스템공학과 박사. 현재 한국해양대학교 IT 공학부 교수. 관심분야는 유전알고리즘, 퍼지제어, 최적제어.

는 유전알고리즘, 퍼지제어, 최적제어.