

논문 2004-41SC-6-2

# 변형된 적분 파라미터를 가진 PID 제어방식

## (PID Control Method with Modified Integral Parameter)

엄기환\*, 강성호\*, 이정훈\*\*

(Ki-Hwan Eom, Seong-Ho Kang, and Jeong-Hun Lee)

### 요약

본 논문에서는 PID제어기의 적분항이 정상상태오차를 없애는 장점은 그대로 유지하되 과도응답에서 오차가 누적되어 응답을 나쁘게 하는 구조적인 단점은 개선하는 PID 제어 방식을 제안하였다. 제안한 방식은 변형된 적분 파라미터를 가진 PID 제어 방식으로 오차가 커지는 구간에서는 오차를 누적하고 오차가 작아지는 구간에서는 누적을 하지 않으므로 기존의 일반적인 PID 제어기에 대해 오버슈트(overshoot)를 감소시키고, 정착시간(settling time)을 빠르게 하여 성능을 개선한다.

### Abstract

The integral term of PID controller have the advantage of reduced steady state error and the disadvantage of accumulated errors. We proposed a method that maintains its advantage and improves the disadvantage in transient response. The proposed PID control method with modified integral parameter accumulates errors in increment section and ignores errors in decrement section. Therefore, the proposed PID control method decreases overshoot, and makes settling time faster than conventional PID control method.

**Keywords :** Intergral term, PID, overshoot, settling time

## I. 서론

PID 제어기는 오차에 대한 비례, 적분, 미분항과 각각의 파라미터로 이루어져 간단하면서도 응답특성이 좋은 제어기로 알려져 있다. PID제어기는 적용대상인 플랜트에 따라 비례, 적분, 미분항의 특징에 따라 파라미터를 최적화해서 사용한다. 이러한 PID 제어기의 파라미터를 선정하기 위하여 지글러-니콜스(Ziegler-Nichols)법 등이 파라미터 선정방법에 적용되고 있다<sup>1-3)</sup>.

그러나 이러한 방법들은 실험에 의한 근사화(approximation) 방법이므로 최근에는 최적의 파라미터 선정과 외란에 강한 가변적인 파라미터 기법 등이 연구되고 있다. 최근 대부분의 제어기에 대한 연구는 이러한 PID 제어기의 파라미터를 자동 동조하는 방향으로 대부분

진행되어 적응제어, 신경망, 퍼지, 유전자 알고리즘 등의 방식으로 파라미터 최적동조에 대한 연구가 주종을 이루고 있다<sup>4-6)</sup>.

그러나 이러한 방식은 제어기가 복잡해지고 계산량이 많아 실제 시스템에 적용하기 어려운 단점이 있다. 또한 PID 파라미터를 최적으로 설정하였다 하더라도 외란이나 부하효과(load effect)에 의해 시스템 특성이 달라져 시스템이 불안정해 지는 경우가 있다. 특히 비례, 미분파라미터보다 적분파라미터가 응답특성에 가장 민감하게 된다.

PID 제어기의 파라미터 중 적분항은 정상 상태 오차(steady state error)를 없애기 위한 오차의 누적항으로 정상상태에서 미소한 오차를 보정해 주지만, 과도응답시 오차가 누적되어 오버슈트를 크게 하는 구조적인 단점이 있다.

본 논문에서는 PID 제어기의 적분항이 정상상태오차를 없애는 장점은 그대로 유지하되, 과도응답에서 오차가 누적되어 응답을 나쁘게 하는 구조적인 단점을

\* 정회원, 동국대학교  
(Dongguk University)

\*\* 정회원, 삼성전자  
(Samsung Electronics CO., LTD. )

접수일자: 2004년6월10일, 수정완료일: 2004년11월3일

개선하기 위한 PID제어방식을 제안한다. 제안한 방식은 오차가 커지는 구간에서는 오차를 누적하고 오차가 작아지는 구간에서는 누적을 하지 않음으로써 기존의 일반적인 PID 제어기에 대해 오버슈트(overshoot)를 감소시키고, 정착시간(settling time)을 빠르게 하여 성능을 개선한다.

제안한 PID 제어방식의 유용성을 확인하기 위하여 DC 모터의 위치제어에 대하여 시뮬레이션 및 실험 등을 통하여 기존의 일반적인 PID 제어기와 비교 검토한다.

## II. 제안한 PID제어기

일반적인 PID 제어기(PID controller)는 구조가 간단하고 제어성능이 우수하며 제어이득 조정이 비교적 쉽기 때문에 모터제어를 비롯한 프로세스 제어기에 널리 사용되고 있다.

PID 제어기는 비례(P), 적분(I), 미분(D) 제어의 세 부분을 병렬로 조합하여 구성하는 제어기로서 전달함수로 표시하면 다음과 같다<sup>6,7)</sup>.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + s \cdot K_d \quad (1)$$

여기서  $K_p$ 는 비례파라미터,  $K_d$ 는 미분파라미터,  $K_i$ 는 적분파라미터이다.

시간영역에서 PID 제어신호를 표시하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2)$$

여기서  $K_p, K_i, K_d$ 는 PID 제어기의 비례, 적분, 미분의 파라미터를 나타낸 것으로 모두 조절 가능하다.

이러한 일반적인 PID 제어기에서 문제점은 적분제어에 의해 나타나는 과도응답특성의 불안정성과 적분파라미터의 출력에 대한 민감성이다. 적분제어는 정상상태에서 오차를 개선시키기 위해 사용하지만 전형적으로 과도응답을 나쁘게 한다. 이러한 이유는 오차가 작을 경우 오차가 점점 누적되어 제어기 출력을 크게 하므로 정상상태오차를 없애는 효과가 있지만 오차가 큰 경우나 진동을 하고 있을 경우에는 이 큰 오차의 값이 더욱 누적됨으로써 오차가 0이 되어도 과거의 오차가 적분기에 축적되어 어떠한 값으로 남게 되기 때

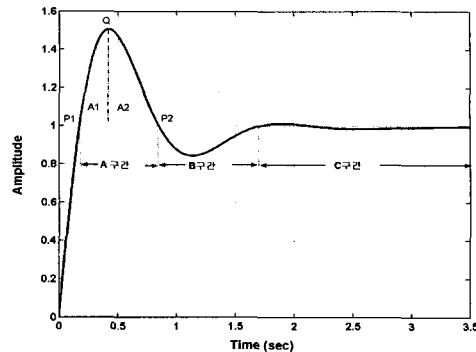


그림 1. 일반적인 PID 제어기의 스텝응답 곡선  
Fig. 1. Step response curve of conventional PID controller.

문이다.

예를 들면, 그림 1은 식 (3)과 같은 전달함수를 갖는 일반적인 PID 제어기를 사용한 페루프 시스템의 스텝(Step) 응답곡선이다.

$$T(s) = \frac{K(s^2 + 4s + 3)}{3[s^3 + 5s^2 + (6 + K)s + K]} \quad (3)$$

$K = 20.5775$

그림 1의 응답곡선을 구간별로 나누어 보면 과도응답에 해당하는 A, B 구간과 정상상태에 해당하는 C 구간으로 나눌 수 있다.

위의 응답을 초기위치 0에서부터 1의 목표치를 가진 모터의 위치제어 응답이라 생각하면, 초기위치에서 목표위치를 향하여 PID 제어기는 오차의 비례, 적분, 미분값의 선형결합으로 제어기 출력인 조작량을 만들어 모터에 전달하게 된다. P1점에 이르러 오차가 0이 되고 이 점에서 PID 제어기의 비례항은 0이 되어 작용하지 않지만 그 전에 적분항에 의해 누적된 오차와 관성 등의 영향으로 오차가 커지는 오버슈트구간 A가 발생하게 된다. 목표위치를 지나게 되면 PID 제어기는 그 누적된 오차를 반대로 소거하며 결국 반대방향으로의 제어기 출력을 낸다. P2 지점에 이르러 다시 오차 0인 점에 있어서도 앞의 과정을 되풀이 하면서 점차로 정상상태로 수렴하게 된다.

기존의 일반적인 PID 제어기의 응답곡선에서 적분제어의 역할을 자세히 살펴보면, 오차가 충분히 작은 정상상태구간인 C 구간에서는 작은 오차들이 적분제어기에 의해 누적됨으로써 단순 비례제어로는 해결할 수 없는 정상상태오차를 제거하는 역할을 하게 된다. 그러나 과도응답이라 볼 수 있는 A, B구간에서는 오차가 누적되어 목표값에 도달하여 오차가 0일지라도 적분제

어의 오차의 누적성분 때문에 오버슈트를 크게 하여 과도응답특성을 좋지 않게 하는 역할을 한다.

여기서 A 구간에서 오차가 커지는 A1 구간과 오차가 작아지고 있는 A2 구간으로 나누어 보면, A1 구간은 목표값과 멀어지는 구간이고 A2 구간은 목표값을 향하여 가까워지고 있는 구간이다. 따라서 Q 점은 플랜트가 힘의 방향을 바꾸는 순간으로 일시 정시상태이다. 적분제어의 역할을 더 자세히 살펴보면 오차가 커지는 A1 구간에서는 적분항의 영향으로 오차가 누적되어 오차가 적어지는 방향으로 제어기 출력을 발생한다. 이로 인하여 오버슈트를 감소시키며, 우리가 원하는 역할을 하게 된다. 그러나 오차가 작아지고 있는 A2 구간에서도 오차를 누적시켜 목표값을 지나치는 P2 지점에서 더 큰 힘을 가하게 되어 반대편 B 구간의 오버슈트를 더 크게 발생시키게 된다. 결국 오차가 작아지고 있는 구간에서 적분제어의 역할은 반대방향의 오버슈트를 크게 만들고 정착시간을 지연시키게 되는 것이다.

본 논문에서는 이와 같은 일반적인 PID 제어기 적분항의 장·단점을 구간으로 나누어 오차가 점점 커지고 있는 구간 A1 에서는 적분항을 동작시키고, 오차가 작아지고 있는 구간 A2 에서는 적분항을 0으로 하여 동작시키지 않음으로써 오버슈트를 줄이고 수렴속도도 줄일 수 있는 개선된 PID 제어기를 제안한다. 제안한 PID 제어기는 오버슈트 구간을 나누어서 적분제어를 함으로써 불필요한 오차의 누적을 막아 오버슈트를 줄이고 정착시간을 단축시킴으로써 시스템의 상호대립적인 응답속도와 오버슈트 모두를 개선시킨다.

제안한 PID 방식을 시간영역에서 PID 제어신호를 표시하면 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u(t) = K_p e(t) + h \cdot K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

$$h = \begin{cases} 1, & \text{sgn}(e) \cdot e'(n) \leq 0 \\ 0, & \text{sgn}(e) \cdot e'(n) > 0 \end{cases} \quad (4)$$

여기서  $\text{sgn}(e)$  는 오차  $e$  의 부호이며  $e'(n)$  는 오차의 변화율이다.  $h$  파라미터는 오차의 변화율과 부호를 곱한 값으로 오차가 커지는 구간에서 1의 값을 가지며 오차가 작아지는 구간에서는 0이 된다.

디지털 제어를 위하여 이산 시간 PID 제어기에서 1 번 샘플링한 주기의 변화분인 제어기의 출력은 식 (5) 과 같다.

$$u(n) = K_p e(n) + h \cdot K_i \sum_{m=0}^n e(m) + K_d (e(n) - e(n-1))$$

$$h = \begin{cases} 1, & \text{sgn}(e) \cdot e'(n) \leq 0 \\ 0, & \text{sgn}(e) \cdot e'(n) > 0 \end{cases} \quad (5)$$

여기서,  $n$  은 이산화된 현재의 시간이다. 식 (5)에서 적분은 오차의 합으로, 미분은 오차의 편차

$$u(n) = u(n-1) + K_p (e(n) - e(n-1)) + h \cdot K_i e(n) + K_d (e(n) - 2e(n-1) + e(n-2))$$

로 근사화하면 다음 식 (6)과 같다.

$$h = \begin{cases} 1, & \text{sgn}(e) \cdot e'(n) \leq 0 \\ 0, & \text{sgn}(e) \cdot e'(n) > 0 \end{cases} \quad (6)$$

여기서,  $e(n)$  은 이산시간  $n$  시점에서의 오차이고,  $u(n)$  은 이산 시간  $n$  시점에서 제어기의 출력인 조작량이다.

$\text{sgn}(e)$  는 오차  $e$  의 부호이며  $e'(n)$  는 오차의 변화율로  $e'(n) = e(n) - e(n-1)$  로 근사화 할 수 있다. 따라서 식 (6)은 오차가 커지고 있거나 0인 구간에서는  $h$  파라미터가 1로 되어 적분항이 누적되고, 오차가 감소되고 있는 구간에서는  $h$  파라미터가 0이 되어 적분항이 소거되는 형태이다. 여기서 주의할 점은 오차의 변화율이 0인 구간에서 적분항을 0으로 해주면 정상상태오차가 있는 C 구간에서 오차가 누적되지 않아 정상상태오차를 제거하는데 지연이 될 수 있으므로 오차가 커지는 구간 A1과 함께 오차의 변화율이 0인 구간에서도 적분항을 누적시켜야한다.

그러므로 제안한 PID 방식은 기존의 PID 파라미터가 시스템에 맞게 결정되었을 때 그 성능을 더욱 좋게 하고, 기존 PID 파라미터가 갖는 제어기 성능에 예민했던 적분항의 파라미터 범위를 더욱 넓게 설정할 수 있게 해주어 외란에 강인함을 더해준다.

또한 제안한 PID 방식은 구성이 간단하여 구현이 용이하다는 기존 PID 제어방식의 장점은 그대로 가지며, 오버슈트와 정착시간의 성능개선을 이룬 제어방식이다. 따라서 현재 널리 사용되는 PID 제어방식을 대체할 수 있으리라 사료된다.

### III. 시뮬레이션

제안한 PID 방식의 유용성을 비교 검토하기 위하여 DC 모터를 모델링하여 MATLAB 으로 시뮬레이션을 하고, 일반적인 PID 제어기와 비교하였다.

DC 모터의 스텝응답 시뮬레이션을 위하여 DC 서보 모터를 모델링하였으며, 모델링한 모터의 상태변수 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{matrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{matrix} = \begin{matrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T} \end{matrix} \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \end{matrix} + \frac{1}{T} u(t) \quad (9)$$

여기서,  $x_1$  은 거리,  $x_2$  속도,  $T$  는 시간상수로  $T = 30 \times 10^{-3}[\text{sec}]$ 이며  $K_t$  는 회전속도상수로  $K_t = 262 \times 2 \times \pi/60[\text{rad/V}\cdot\text{sec}]$  이다.

시뮬레이션에 사용한 컴퓨터의 사양 및 조건은 표 1 과 같다.

PID 제어기의 파라미터는 일반적인 PID 제어기를 기준으로 스텝응답법을 이용하여 설정하였으며, 정확한 성능개선을 알아보기 위해 일반적인 PID 제어기와 제안한 PID 제어기에 같은 값을 사용하였다.

설정된 PID 제어기의 파라미터 값은  $K_p = 2$ ,  $K_i = 0.06$ ,  $K_d = 2$  이다.

표 1. 시뮬레이션 사양 및 조건

Table 1. Simulation conditions.

시뮬레이션 사양 및 조건	
▪ PC 기종	Pentium III 900Mhz
▪ OS(Operating System)	WINDOWS XP
▪ 사용 S/W Tool	MATLAB 6.1
▪ 모델링한 모터	maxon F2260.811-51.216-200 (DC 18V, 23.8A, 40W)
▪ Sampling	200[Hz], 0.005[ms]

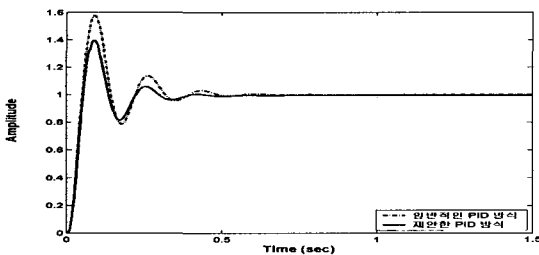


그림 2. DC 모터 시뮬레이션 결과

Fig. 2. Result of DC motor simulation.

표 2. DC 모터 시뮬레이션 결과

Table 2. Result of DC motor simulation.

	일반적인 PID	제안한 PID	결과
Overshoot	0.58	0.40	31.0% 감소
Settling Time	0.47 [sec]	0.37 [sec]	21.3% 감소

DC 모터의 위치제어에 대하여 일반적인 PID 제어기와 제안한 PID 방식의 시뮬레이션 결과는 그림 2와 같다.

그림 2의 그래프에서 가로축은 시간영역이고 세로축은 위치이다.

일반적인 PID 제어방식으로는 오버슈트가 0.58인 반면 제안한 PID 제어방식은 0.40으로 감소하였다. 일반적으로 사용하는 제어기 수렴속도의 척도는 2% 정착 시간을 사용한다. 시뮬레이션 결과 정착시간은 0.47초에서 0.37초로 감소함을 볼 수 있다.

표 2는 그림 2의 응답곡선에 대한 성능 결과이다.

시뮬레이션 결과 제안한 방식이 기존의 PID 제어방식보다 오버슈트와 정착시간에 대해서 각각 31.0%, 21.3% 감소함을 확인하였다.

#### IV. 실험 및 검토

제안한 PID제어기의 유용성을 확인하기 위하여 1-링크 매니퓰레이터에 대하여 실험을 하였다.

전체적인 실험 시스템의 시스템 블록선도는 다음 그림 3과 같다.

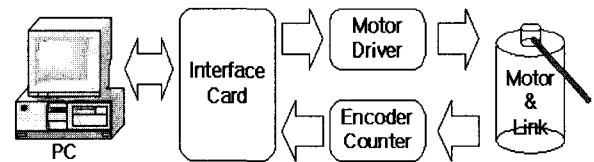


그림 3. 1-링크 매니퓰레이터 제어 시스템 블록선도

Fig. 3. The block diagram of one-link manipulator control system.

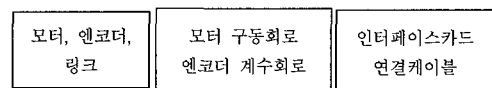
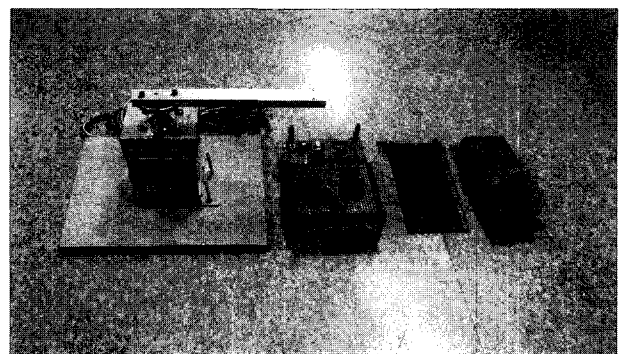


그림 4. 1-링크 매니퓰레이터 제어실험 장치 사진

Fig. 4. A picture of experimental equipment for one-link manipulator.

표 3. 위치제어실험의 시스템사양  
Table 3. Specification for position control experiment.

시 스템 사 양	
▪ PC 기종	Pentium MMX 300Mhz
▪ OS	MS-DOS
▪ 사용S/W Tool	Turbo C 3.0
▪ 모터	106-6004-11eo(SANYO DENKI)(DC 13.7V, 4.8A, 40W)
▪ 모터구동	L298 구동 회로
▪ 엔코더	2 CH(A,B상), 500 pulse/회전
▪ 모터제어방식	PWM(Pulse Width Modulation)
▪ Sampling	1390[Hz], 0.72[ms]
▪ 링크	무게 51 g , 길이 150mm, 알루미늄
▪ Interface card	ISA 방식(8255, 8253 내장)

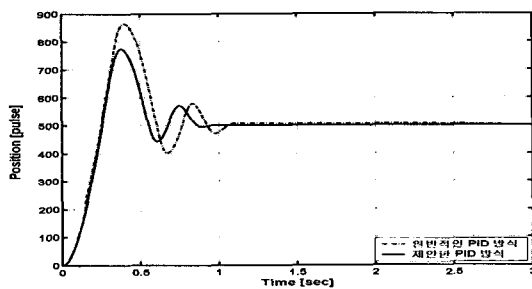


그림 5. 1-링크 매니퓰레이터 제어실험 응답곡선  
Fig. 5. Response of experiment for one-link manipulator control.

표 4. 1-링크 매니퓰레이터 제어실험 결과  
Table 4. Experimental result for one-link manipulator control.

	일반적인 PID	제안한 PID	결과
Overshoot	364 pulse	275 pulse	24.5% 감소
2% Settling Time	1.03 초	0.84 초	18.5% 감소

시스템은 PC와 내장형 인터페이스카드, 모터구동회로, 엔코더계수회로, 모터, 엔코더, 링크(link)로 구성되며, PC와 내장형 인터페이스카드를 이용하여 모터를 동작시키고, 링크의 현재 위치를 엔코더를 통해 입력받도록 설계하였다. 실험을 위하여 제작한 1-링크 매니퓰레이터 제어시스템의 사진은 그림 4와 같다.

실험장치는 40W급 DC 모터, 링크(link), 엔코더 계수회로, 모터 구동회로, 인터페이스카드 및 PC 연결용 케이블로 구성되어 있다. 부하로 작용하는 링크(link)는 알루미늄으로 길이는 150mm 이며 무게는 51g 이다.

실험에 사용된 시스템 사양과 실험 조건은 표 3과 같다.

PID 제어기의 파라미터는 시뮬레이션과 마찬가지로 일반적인 PID 제어기를 기준으로 설정하였으며 제안한 PID 제어기에도 같은 파라미터 값을 사용하였다. 사용한 PID 제어기의 파라미터 값은  $K_p = 200$ ,  $K_i = 0.05$ ,  $K_d = 100$  이다.

실험조건은 초기위치를 0°로 설정하고 360° 회전한 위치를 목표위치로 잡은 스텝응답의 결과로 산출하였다. 이때 엔코더 값은 초기위치 0 pulse, 목표위치 500 pulse가 된다.

그림 5는 일반적인 PID 방식과 제안한 PID 방식의 실험 결과이다. 결과 그래프는 실험용 PC 에서 데이터를 텍스트(text)파일로 저장하여 MATLAB 6.1에서 그 래프화한 것이다.

그림 5에서 가로축은 시간영역이고 세로축은 엔코더 에서 받은 값으로 위치를 나타낸다. 엔코더는 500 [pulse/turn] 의 분해능을 가지고 있으므로 500pulse 는 360°를 나타낸다. 표 4는 그림 5의 응답곡선에 의한 결과이다.

표 4와 같이 제안한 PID 제어방식은 오버슈트를 24.5%, 정착시간을 18.5%를 감소시켜 정상상태에 도달 하는 시간이 빨라짐을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 일반적인 PID제어기의 적분항이 정상상태오차를 없애는 장점은 그대로 유지하되, 과도응답에서 오차가 누적되어 응답을 나쁘게 하는 구조적인 단점을 개선하기 위한 PID제어방식을 제안하였다.

제안한 PID 제어기는 오차가 커지는 구간과 작아지는 구간을 나누어 적분항을 동작시킨다. 오차가 커지는 구간에서는 적분항에 의해 오차를 누적시켜 제어기 출력을 크게 하여 오차가 감소되도록 하고, 오차가 작아지는 구간에서는 적분항을 동작시키지 않음으로써 목표점을 지나 반대편의 오버슈트가 발생하는 것을 억제하며, 또한 오버슈트가 효과적으로 감소함에 따라 정착 시간도 감소하게 되는 제어방식이다.

제안한 방식의 유용성을 확인하기 위하여 DC 모터 의 위치제어에 대하여 시뮬레이션 및 실험을 통하여 기존의 방식과 그 성능을 비교 검토하였다.

시뮬레이션 결과 제안한 PID 방식이 일반적인 PID 제어방식보다 오버슈트나 정착시간에 대해서 각각

31.0%, 21.3% 감소하여 제어 성능이 개선됨을 확인하였다. 또한 실험 결과 제안한 방식이 일반적인 PID 제어방식보다 오버슈트나 정착시간에 대해서 각각 24.5%, 18.5% 감소하여 제어 성능이 개선됨을 확인하였다.

제안한 PID 제어기는 오버슈트가 감소함에 따라 정착시간도 감소하게 됨으로써 일반적인 제어방식의 오버슈트와 정착시간사이의 대립적인 절충관계를 해소하여 오버슈트와 정착시간 모두 성능을 개선하는 우수한 성능을 보였다. 또한 산업현장에서 널리 사용되고 있는 일반적인 PID 제어기와 같이 그 구조가 단순하여 구현이 용이하며 성능은 더 우수하므로 앞으로 산업현장에 대치 될 수 있을 것으로 사료된다.

**참 고 문 헌**

[1] Richard C. Dorf & Robert H. bishop, "Modern Control System," Ninth- edition, Prentice Hall, 2002.

[2] Katsuhiko Ogata, "Modern Control Engineering," Third-edition, Prentice Hall, 1996.  
 [3] Jack Golten, Andy Verwer, "Control System Design and Simulation," "McGRAW-HILL international editions, 1992.  
 [4] Madan M. Gupta, Naresh K. Sinha "Intelligent Control Systems," IEEE PRESS, 1995.  
 [5] Karl J. Astrom, Bjorn Wittenmark, "Adaptive Control," Addison Wesley Publishing Company, Inc., 1995.  
 [6] T. Yamamoto et al., "Intelligent Tuning PID Controllers," Proc. IEEE int. Conf. on SMC, Vol. 5, pp. 2610-2615, 1995.  
 [7] K. Astrom, T. Hagglund, "PID Controllers: Theory, Design, and Tuning," International Society for Measurement and Con, 1995.

저 자 소 개



**엄 기 환**(정회원)  
 1972년 동국대학교 전자공학과 공학사  
 1986년 동국대학교 전자공학과 공학박사  
 1989년~1990년 Toho University, Post. Doc  
 2000년~2001년 University of Canterbury, Visitor Professor  
 1994년~현재 동국대학교 공과대학 전자공학과 교수  
 <주관심분야: 시스템 응용, 자동제어, 인공지능 알고리즘>



**강 성 호**(정회원)  
 2000년 진주산업대학교 전자공학과 공학사  
 2002년 동국대학교 전자공학과 공학석사  
 2002년~현재 동국대학교 전자공학과 박사과정  
 2003년~현재 밀리미터파신기술연구센터 연구원  
 <주관심분야: 시스템 응용, 인공지능 알고리즘, 자율이동 로봇>



**이 정 훈**(정회원)  
 1997년 동국대학교 전자공학과 공학사  
 1999년 동국대학교 전자공학과 공학석사  
 2004년 동국대학교 전자공학과 공학박사  
 2004년~현재 삼성전자 DM사업부 연구원  
 <주관심분야: 자동제어, 퍼지 이론, 신경회로망 >