



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2012-0098203
(43) 공개일자 2012년09월05일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G05B 6/00 (2006.01) G05B 11/36 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2011-0017996
(22) 출원일자 2011년02월28일
심사청구일자 2011년02월28일

(71) 출원인
고려대학교 산학협력단
서울 성북구 안암동5가 1
(72) 발명자
허훈
서울특별시 종로구 자하문로40길 36 (부암동)
김진성
서울특별시 강남구 삼성로 14, 주공아파트 453동
405호 (개포동)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인충현

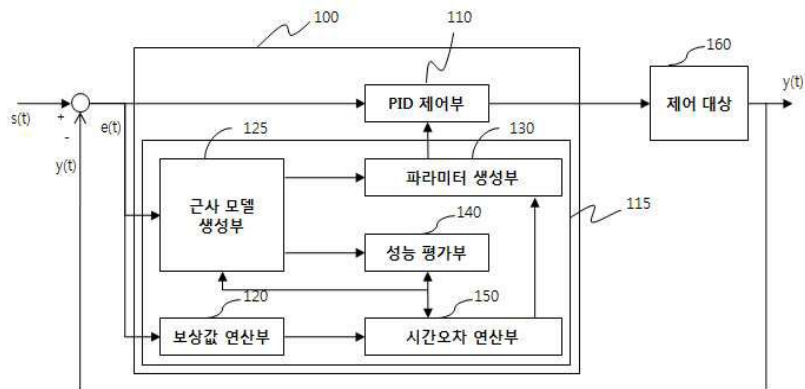
전체 청구항 수 : 총 13 항

(54) 발명의 명칭 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 P I D 제어 방법 및 이를 이용한 P I D 제어 장치

(57) 요약

본 발명은 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 방법에 관한 것으로서, 입력신호와 제어 대상의 출력신호로부터 계산된 오차를 이용하여 제어신호에 대한 보상값을 연산하고, 계산된 오차를 이용하여 근사 모델을 생성한 후, 생성된 근사 모델을 이용하여 제어신호 생성에 사용되는 제어 파라미터와 평가정보를 생성하며, 생성된 제어 파라미터를 이용하여 제어 대상을 제어하는 제어신호를 출력한다. 그 다음, 연산된 보상값, 생성된 평가정보, 및 출력된 제어신호에 상응하는 출력신호로부터 생성된 평가정보를 이용하여 시간 오차를 연산하고, 연산된 시간 오차를 이용하여 제어 파라미터와 평가정보를 업데이트하면, 업데이트된 제어 파라미터를 이용하여 제어신호를 출력하는 것을 특징으로 한다. 본 발명에 따르면, 가공 정밀도를 한층 더 향상시킬 뿐만 아니라 가공 소요 시간을 단축시킬 수 있다.

대 표 도 - 도1



(72) 발명자

전중현

서울특별시 도봉구 해동로 231, 한양2차아파트 5
동 405호 (쌍문동)

이동호

부산광역시 기장군 정관면 산단5로 100-61

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 C7210-1001-0002

부처명 지식경제부

연구사업명 심층기업지원

연구과제명 자동 계측 보정 기술 국산화 대책 연구

주관기관 (사단법인)대학산업기술지원단

연구기간 2010.09.01 ~ 2011.02.28

특허청구의 범위

청구항 1

입력신호와 제어 대상의 출력신호로부터 계산된 오차를 이용하여 제어신호에 대한 보상값을 연산하는 단계;

상기 계산된 오차를 이용하여 근사 모델을 생성하는 단계;

상기 생성된 근사 모델을 이용하여 상기 제어신호 생성에 사용되는 제어 파라미터와 평가정보를 생성하는 단계;

상기 생성된 제어 파라미터를 이용하여 제어 대상을 제어하는 제어신호를 출력하는 단계;

상기 연산된 보상값, 상기 생성된 평가정보, 및 상기 출력된 제어신호에 상응하는 출력신호로부터 생성된 평가정보를 이용하여 시간 오차를 연산하고, 상기 연산된 시간 오차를 이용하여 상기 제어 파라미터와 상기 평가정보를 업데이트하는 단계; 및

상기 업데이트된 제어 파라미터를 이용하여 제어신호를 출력하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 방법.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 보상값은 상기 오차와 상기 오차의 변화율을 각각에 가중치를 부여하여 합산한 것을 특징으로 하는 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 방법.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 근사 모델은 RBF(radial basis function)을 이용하여 생성되는 것을 특징으로 하는 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 방법.

청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 제어 파라미터와 상기 평가정보는 상기 근사 모델에 가중치를 부여하여 생성되는 것을 특징으로 하는 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 방법.

청구항 5

제 1 항에 있어서,

상기 연산된 시간오차를 이용하여 상기 근사 모델을 업데이트하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 방법.

청구항 6

제 1 항에 있어서,

상기 근사 모델은 가우시안 함수인 것을 특징으로 하는 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 방법.

청구항 7

입력신호와 제어 대상의 출력신호로부터 계산된 오차를 이용하여 제어신호에 대한 보상값을 연산하는 보상값 연산부;

상기 계산된 오차를 이용하여 근사 모델을 생성하는 근사 모델 생성부;

상기 생성된 근사 모델을 이용하여 상기 제어신호 생성에 사용되는 제어 파라미터를 생성하는 파라미터 생성부;

상기 생성된 근사 모델에 소정의 가중치를 부여하여 평가정보를 생성하는 성능 평가부;

상기 생성된 제어 파라미터를 이용하여 제어 대상을 제어하는 제어신호를 출력하는 PID 제어부; 및

상기 연산된 보상값, 상기 생성된 평가정보, 및 상기 출력된 제어신호에 상응하는 출력신호로부터 생성된 평가정보를 이용하여 시간 오차를 연산하고, 상기 연산된 시간 오차를 이용하여 상기 제어 파라미터와 상기 평가정보를 업데이트하는 시간오차 연산부를 포함하고,

상기 PID 제어부는 상기 업데이트된 제어 파라미터를 이용하여 제어신호를 출력하는 것을 특징으로 하는 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 장치.

청구항 8

제 7 항에 있어서,

상기 보상값은 상기 오차와 상기 오차의 변화율을 각각에 가중치를 부여하여 합산한 것을 특징으로 하는 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 장치.

청구항 9

제 7 항에 있어서,

상기 근사 모델은 RBF(radial basis function)을 이용하여 생성되는 것을 특징으로 하는 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 장치..

청구항 10

제 7 항에 있어서,

상기 제어 파라미터와 상기 평가정보는 상기 근사 모델에 가중치를 부여하여 생성되는 것을 특징으로 하는 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 장치.

청구항 11

제 7 항에 있어서,

상기 연산된 시간오차를 이용하여 상기 근사 모델을 업데이트하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 장치.

청구항 12

제 7 항에 있어서,

상기 근사 모델은 가우시안 함수인 것을 특징으로 하는 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 장치.

청구항 13

제 1 항 내지 제 6 항 중에 어느 한 항의 방법을 컴퓨터에서 실행시키기 위한 프로그램을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체.

명세서

기술분야

본 발명은 PID 제어 방법에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 가공 정밀도를 한층 더 향상시킬 뿐만 아니라 가공 소요 시간을 단축하도록 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 방법 및 이를 이용한 PID 제어 장치에 관한 것이다.

배경기술

- [0002] 대부분 머시닝 센터의 성능 평가는 얼마나 빠르고 정밀하게 공작물을 가공해 내느냐에 달려있다. 그러나 일반적으로 머시닝센터에서 고정밀도와 고속 가공을 동시에 실현시키는 것은 매우 어려운 문제인데, 이는 가공 속도를 올리면 가감속 회로와 서보기구 구동계의 지연시간의 영향이 커져서 더 큰 윤곽 오차가 발생하기 때문이다.
- [0003] 또한, 머시닝 센터로 원의 형상을 가공할 때 원의 크기와 이송속도에 따라 가공된 실제 원의 크기가 감소하며 특히 X축이나 Y축의 이송방향이 바뀌는 곳에서는 점착운동(stick motion)에 의하여 큰 오차가 발생하게 된다. 그로 인해 가공의 정밀도를 향상시키기 위한 노력으로 앞먹임제어(Feed forward control), 예견제어(Predictive control) 등을 비롯하여 기계 특성의 시간경과에 따른 변화에 적응하거나 이를 보정해 주는 견실제어(Robust control), 신경망제어(Neural network), 학습제어(Learning control) 등의 방법들이 실용화 또는 연구되고 있으며, 원호 보간 시의 오차 측정에 1차원 프로브(Probe)나 DBB(Double ball bar)를 이용하여 측정하는 방법 등이 소개되었다. 그러나 이러한 방법들은 측정 장치의 제작, 설치 및 운용과정이 복잡하고 아직까지 상품화하여 적용한 사례는 극히 드물다.
- [0004] 또한, 머시닝센터의 가공 정도 및 그 성능은 머시닝센터의 운동기구가 가지고 있는 기하오차와 절삭작업 중에 발생하는 진동, 열, 절삭력에 의해서 공작기계의 구조계, 주축계, 이송계의 변형을 야기시킨다. 현재 머시닝센터의 오차보정은 가공 작업 초기에 제어기의 매개변수(Parameter)값을 변형시키고 이 값을 고정시킴으로서 원하는 정밀도 및 속도를 유지하는 것이 대부분이다. 하지만 이러한 방법을 쓰면 절삭작업 중에 발생하는 외란에 의해 야기되는 오차는 이 고정된 매개변수(Parameter)들 만을 가지고는 정밀하게 보정 할 수 없다.
- [0005] 따라서 머시닝 센터의 가공정도, 동시에 신속한 절삭 작업을 위해서는 절삭가공 중에 발생하는 오차를 최소화시켜야 하고, 이를 실시간으로 보정해야 한다. 이러한 연구는 국내 경우 공작기계에 부분적으로 적용되고 있으나 아직까지 상품화하여 적용한 사례는 극히 드물고, 일본의 경우 오쿠마기공에서 개발한 공작기계에 뉴로-퍼지(Neuro-Fuzzy) 시스템을 적용하여 상품화한 사례가 있다. 하지만 이 또한 인공 신경망을 이용한 것으로 신경망을 통하여 얻은 결과에 대해서 설명할 수 없으며 그 결과 또한 최적의 상태라고 보증(Guarantee)할 수 없다.
- [0006] 강화학습(Reinforcement learning)은 시간이 진행됨에 따라 최적의 의사결정을 내려야 하는 순차적 의사결정 문제를 해결하는 방안의 하나로써, 에이전트(agent, 제어기)와 환경(environment)의 상호작용에 따라 관찰되는 상태(State), 입력(Action) 및 보상값을 효과적으로 활용하여 최적의 정책을 찾아가는 방향으로 학습을 진행하는 방법론이다.
- [0007] 그러나 일반적인 강화학습은 이산(Discrete)인 저차원 공간을 가지는 문제에서는 쉽게 적용되지만, 하드웨어가 결합된 연속적(Continuous)인 고차원 시스템에서는 계산속도 문제와 시스템이 가지는 공간을 정확하게 표현할 수 없는 문제 등으로 인해 학습이 성공적으로 이루어지지 않는 경우가 종종 발생한다.
- [0008] 따라서, 강화학습을 통하여 머시닝센터의 기존 오차 보정뿐만 아니라 운전 중에 발생하는 오차에 대한 보정 및 전체적인 성능 향상을 시킬 필요성이 있다. 또한, 기존 머시닝 센터의 제어장치에 부가하여 효과적으로 강화학습을 할 수 있고 가공의 정밀도를 향상시킬 수 있는 기술이 요구되고 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0009] 따라서, 본 발명이 해결하고자 하는 첫 번째 과제는 가공 정밀도를 한층 더 향상시킬 뿐만 아니라 가공 소요 시간을 단축시킬 수 있는, 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 방법을 제공하는 것이다.
- [0010] 본 발명이 해결하고자 하는 두 번째 과제는 가공 정밀도를 한층 더 향상시킬 뿐만 아니라 가공 소요 시간을 단축시킬 수 있는, 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 장치를 제공하는 것이다.
- [0011] 또한, 상기된 방법을 컴퓨터에서 실행시키기 위한 프로그램을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록 매체를 제공하는데 있다.

과제의 해결 수단

- [0012] 본 발명은 상기 첫 번째 과제를 달성하기 위하여, 입력신호와 제어 대상의 출력신호로부터 계산된 오차를 이용하여 제어신호에 대한 보상값을 연산하는 단계; 상기 계산된 오차를 이용하여 근사 모델을 생성하는 단계; 상기 생성된 근사 모델을 이용하여 상기 제어신호 생성에 사용되는 제어 파라미터와 평가정보를 생성하는 단

계; 상기 생성된 제어 파라미터를 이용하여 제어 대상을 제어하는 제어신호를 출력하는 단계; 상기 연산된 보상값, 상기 생성된 평가정보, 및 상기 출력된 제어신호에 상응하는 출력신호로부터 생성된 평가정보를 이용하여 시간 오차를 연산하고, 상기 연산된 시간 오차를 이용하여 상기 제어 파라미터와 상기 평가정보를 업데이트하는 단계; 및 상기 업데이트된 제어 파라미터를 이용하여 제어신호를 출력하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 방법을 제공한다.

[0013] 본 발명의 일 실시예에 의하면, 상기 보상값은 상기 오차와 상기 오차의 변화율을 각각에 가중치를 부여하여 합산할 수 있다.

[0014] 또한, 상기 근사 모델은 RBF(radial basis function)을 이용하여 생성될 수 있다.

[0015] 또한, 상기 제어 파라미터와 상기 평가정보는 상기 근사 모델에 가중치를 부여하여 생성될 수 있다.

[0016] 본 발명의 다른 실시예에 의하면, 상기 연산된 시간오차를 이용하여 상기 근사 모델을 업데이트하는 단계를 더 포함할 수 있다. 이때, 상기 근사 모델은 가우시안 함수일 수 있다.

[0017] 본 발명은 상기 두 번째 과제를 달성하기 위하여, 입력신호와 제어 대상의 출력신호로부터 계산된 오차를 이용하여 제어신호에 대한 보상값을 연산하는 보상값 연산부; 상기 계산된 오차를 이용하여 근사 모델을 생성하는 근사 모델 생성부; 상기 생성된 근사 모델을 이용하여 상기 제어신호 생성에 사용되는 제어 파라미터를 생성하는 파라미터 생성부; 상기 생성된 근사 모델에 소정의 가중치를 부여하여 평가정보를 생성하는 성능 평가부; 상기 생성된 제어 파라미터를 이용하여 제어 대상을 제어하는 제어신호를 출력하는 PID 제어부; 및 상기 연산된 보상값, 상기 생성된 평가정보, 및 상기 출력된 제어신호에 상응하는 출력신호로부터 생성된 평가정보를 이용하여 시간 오차를 연산하고, 상기 연산된 시간 오차를 이용하여 상기 제어 파라미터와 상기 평가정보를 업데이트하는 시간오차 연산부를 포함하고, 상기 PID 제어부는 상기 업데이트된 제어 파라미터를 이용하여 제어신호를 출력하는 것을 특징으로 하는 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 장치를 제공한다.

[0018] 상기 다른 기술적 과제를 해결하기 위하여, 본 발명은 상기된 PID 제어 방법을 컴퓨터에서 실행시키기 위한 프로그램을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록 매체를 제공한다.

발명의 효과

[0019] 본 발명에 따르면, 가공 정밀도를 한층 더 향상시킬 뿐만 아니라 가공 소요 시간을 단축시킬 수 있다. 또한, 본 발명에 따르면, 기존의 PID 제어기에 손쉽게 부가하여 설치함으로써, 기존 안정성 및 신뢰성의 저해를 가져오지 않는다.

도면의 간단한 설명

[0020] 도 1은 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따른 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 장치의 구성도이다.

도 2는 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따른 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 방법의 흐름도이다.

도 3는 $\frac{1}{s+1} \exp^{-0.1\text{sec}}$ 의 전달함수를 갖는 머시닝센터 내 서보 모터에 대한 기존 PID 제어 방식과 본 발명에 따른 PID 제어 장치를 이용하였을 시, Set point tracking 성능 비교 시뮬레이션 결과를 나타낸 도면이다.

도 4는 $\frac{1}{s+1} \exp^{-0.1\text{sec}}$ 의 전달함수를 갖는 머시닝센터 내 서보 모터에 대한 기존 PID 제어 방식과 본 발명에 따른 PID 제어 장치를 이용하였을 시, Set point tracking 성능 비교 시뮬레이션 결과를 나타낸 도면이다.

도 5는 $\frac{1}{s^2+2s+1} \exp^{-0.2\text{sec}}$ 의 전달함수를 갖는 머시닝센터 내 서보 모터에 대한 기존 PID 제어 방식과 본 발명에 따른 PID 제어 장치를 이용하였을 시, Set point tracking 성능 비교 시뮬레이션 결과를 나타낸 도면이다.

도 6은 $\frac{1}{s^2+2s+1} \exp^{-0.2\text{sec}}$ 의 전달함수를 갖는 머시닝센터 내 서보 모터에 대한 기존 PID 제어 방식과 본 발명에 따른 PID 제어 장치를 이용하였을 시, Set point tracking 성능 비교 시뮬레이션 결과를 나타낸 도면이다.

도 7은 $\frac{s+1}{s^2+2s+1} \exp^{-1\text{sec}}$ 의 전달함수를 갖는 머시닝센터 내 서보 모터에 대한 기존 PID 제어 방식과 본 발명에 따른 PID 제어 장치를 이용하였을 시, Set point tracking 성능 비교 시뮬레이션 결과를 나타낸 도면이다.

도 8은 $\frac{s+1}{s^2+2s+1} \exp^{-1\text{sec}}$ 의 전달함수를 갖는 머시닝센터 내 서보 모터에 대한 기존 PID 제어 방식과 본 발명에 따른 PID 제어 장치를 이용하였을 시, Set point tracking 성능 비교 시뮬레이션 결과를 나타낸 도면이다.

도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 장치를 이용하여 머시닝센터의 X, Y, Z 서보모터 축의 정밀제어 및 오차를 보정하기 위한 제어 구조를 개괄적으로 설명하는 도면이다.

도 10은 PID 제어부(110)와 업데이트부(115) 간의 상호 연결 관계를 나타낸 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0021] 본 발명에 관한 구체적인 내용의 설명에 앞서 이해의 편의를 위해 본 발명이 해결하고자 하는 과제의 해결 방안의 개요 혹은 기술적 사상의 핵심을 우선 제시한다.
- [0022] 본 발명의 일 실시예에 따른 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 방법은 입력신호와 제어 대상의 출력신호로부터 계산된 오차를 이용하여 제어신호에 대한 보상값을 연산하는 단계; 상기 계산된 오차를 이용하여 근사 모델을 생성하는 단계; 상기 생성된 근사 모델을 이용하여 상기 제어신호 생성에 사용되는 제어 파라미터와 평가정보를 생성하는 단계; 상기 생성된 제어 파라미터를 이용하여 제어 대상을 제어하는 제어신호를 출력하는 단계; 상기 연산된 보상값, 상기 생성된 평가정보, 및 상기 출력된 제어신호에 상응하는 출력신호로부터 생성된 평가정보를 이용하여 시간 오차를 연산하고, 상기 연산된 시간 오차를 이용하여 상기 제어 파라미터와 상기 평가정보를 업데이트하는 단계; 및 상기 업데이트된 제어 파라미터를 이용하여 제어신호를 출력하는 단계를 포함한다.
- [0023] 이하 첨부된 도면을 참조하여 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 본 발명을 용이하게 실시할 수 있는 바람직한 실시 예를 상세히 설명한다. 그러나 이들 실시예는 본 발명을 보다 구체적으로 설명하기 위한 것으로, 본 발명의 범위가 이에 의하여 제한되지 않는다는 것은 당업계의 통상의 지식을 가진 자에게 자명할 것이다.
- [0024] 본 발명이 해결하고자 하는 과제의 해결 방안을 명확하게 하기 위한 발명의 구성을 본 발명의 바람직한 실시예에 근거하여 첨부 도면을 참조하여 상세히 설명하되, 도면의 구성요소들에 참조번호를 부여함에 있어서 동일 구성요소에 대해서는 비록 다른 도면상에 있더라도 동일 참조번호를 부여하였으며 당해 도면에 대한 설명시 필요한 경우 다른 도면의 구성요소를 인용할 수 있음을 미리 밝혀둔다. 아울러 본 발명의 바람직한 실시예에 대한 동작 원리를 상세하게 설명함에 있어 본 발명과 관련된 공지 기능 혹은 구성에 대한 구체적인 설명 그리고 그 이외의 제반 사항이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우, 그 상세한 설명을 생략한다.
- [0025] 덧붙여, 명세서 전체에서, 어떤 부분이 다른 부분과 '연결'되어 있다고 할때, 이는 '직접적으로 연결'되어 있는 경우뿐만 아니라, 그 중간에 다른 소자를 사이에 두고 '간접적으로 연결'되어 있는 경우도 포함한다. 또한 어떤 구성 요소를 '포함'한다는 것은, 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라, 다른 구성요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미한다.
- [0026] 도 1은 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따른 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 장치의 구성도이다.
- [0027] 도 1을 참조하면, 본 실시예에 따른 PID 제어 장치(100)는 PID 제어부(110) 및 업데이트부(115)로 구성된다. 업데이트부(115)는 보상값 연산부(120), 근사 모델 생성부(125), 파라미터 생성부(130), 성능 평가부(140), 및 시간오차 연산부(150)로 구성된다.
- [0028] PID 제어부(110)는 제어 대상(160)을 제어하는 실제 제어신호를 출력한다.
- [0029] 업데이트부(115)는 현재 시점의 상태와 시간오차 연산부(150)의 시간 오차(Temporal difference, TD)를 이용해 PID 제어부(110)의 제어 파라미터를 변경시킨다. 제어 파라미터는 비례 제어, 적분 제어, 미분 제어에서 사용되는 K_p , K_i , K_d 가 될 수 있다. 현재 상태에서부터 향후 획득하게 될 보상값의 총합을 최대화하는 방향으로

제어신호를 출력하고 또한 최적의 성능을 위하여 내부 파라미터를 지속적으로 업데이트한다. 이때 제어목표를 향해 가장 빠른 기울기로 추종하도록 PID 제어부(110)가 조절된다.

[0030] 보상값 연산부(120)는 외부 환경을 제어한 결과에 대한 보상값 $r(t)$ 을 오차값 $e(t)$ 를 이용하여 연산하고, 연산된 보상값을 시간오차 연산부(150)로 전달한다.

[0031] 여기서 보상값 $r(t)$ 은 제어대상(160) 내의 오차와 오차의 변화율을 동시에 이용해 다음의 수학적 식 1과 같이 연산할 수 있다.

수학적 식 1

$$r(t) = \alpha r_e(t) + \beta r_{ed}(t)$$

$$r_e(t) = \begin{cases} C_1 & |e(t)| \leq \varepsilon \\ C_2 & otherwise \end{cases}, r_{ed}(t) = \begin{cases} C_3 & |e(t)| \leq |e(t-1)| \\ C_4 & otherwise \end{cases}$$

[0032]

[0033] $r_e(t)$ 는 제어대상(160) 내의 오차, $r_{ed}(t)$ 는 제어대상(160) 내의 오차의 변화율, α 와 β 는 가중치이며, ε 는 허용 오차 범위이다. 또한, C_1 , C_2 , C_3 , C_4 는 적용할 제어대상(160)을 고려하여 사용자에게 의해 결정되는 상수이다. 또한, 현재 상태에서 향후 획득하게 될 보상값의 총합을 최대화하는 방향으로 제어신호를 출력할 수 있다.

[0034] 근사 모델 생성부(125)는 파라미터 생성부(130)의 변경 정보와 성능 평가부(140)의 평가 정보를 생성하기 위해 제어대상(160)의 상태인 오차 $e(t)$, $\Delta e(t)$, $\Delta^2 e(t)$ 를 이용하여 근사 모델을 생성한다. 한편, 근사 모델 생성부(125)는 RBF(Radial basis function)을 이용할 수 있다.

[0035] 본 실시예에서는 근사 모델의 커널 함수를 가우시안 함수(Gaussian function)로 채택하였으나, 제어대상의 특성에 따라 다양한 커널 함수를 사용할 수 있다.

[0036] 임의의 j 번째 커널 함수의 출력은 다음의 수학적 식 2와 같다.

수학적 식 2

$$\phi_j(t) = \exp\left(-\frac{\|x(t) - \mu_j(t)\|^2}{2\sigma_j^2(t)}\right), j=1, 2, \dots, h$$

[0037]

[0038] 여기서 $\mu_j = [\mu_{1j}, \mu_{2j}, \mu_{3j}]^T$ 와 σ_j 는 각 j 번째 커널 함수의 평균값과 표준편차를 의미하며, h 는 커널 함수의 갯수를 의미한다. 이때 $x(t)$ 에 $e(t)$ 를 대입하여 임의의 j 번째 커널 함수의 출력을 연산한다.

[0039] 파라미터 생성부(130)는 PID 제어부(110)의 파라미터를 변경하는 변경정보를 생성하여 PID 제어부(110)로 출력한다.

[0040] 파라미터 생성부(130)의 m 번째 변경정보 $K_m(t)$ 는 다음의 수학적 식 3과 같이 연산된다.

수학적 식 3

$$K_m(t) = \sum_{j=1}^h w_{mj}(t) \phi_j(t), m=1, 2, 3$$

[0041]

[0042] 여기서 ω_{mj} 는 임의의 j 번째 커널 함수와 m 번째 변경정보 간의 가중치이다.

[0043] 제어대상(160)이 머시닝 센터인 경우를 예로 들면, 변경정보 $K_m(t)$ 는 머시닝센터의 각 축 서보 모터에 연결되어 있는 PID 제어부(110)의 각 계인 파라미터들로 정해지게 된다.

[0044] 성능 평가부(140)는 PID 제어 장치(100)의 성능평가를 위한 부분으로서 현재 상태의 정보(오차정보 $e(t)$, $\Delta e(t)$, $\Delta^2 e(t)$ 등)를 수신하고, 수신된 정보를 이용하여 계산된 평가정보 $V(t)$ 를 시간오차 연산부(150)로 전달한다.

[0045] 성능 평가부(140)의 평가정보 $V(t)$ 는 다음의 수학적 식 4와 같이 연산된다.

수학적 식 4

$$V(t) = \sum_{j=1}^h v_j(t) \phi_j(t)$$

[0046]

[0047] 여기서, v_j 는 임의의 j 번째 커널 함수와 평가정보 간의 가중치이다.

[0048] 시간 오차 연산부(150)는 실제 제어에 대한 적합성 정도를 알 수 있도록 하는 시간 오차(Time Difference, TD)를 연산한다. 즉, 보상값 연산부(120)로부터 얻은 정보인 보상값 $r(t)$ 와 성능 평가부(140)로부터 얻은 평가정보 $V(t)$ 및 $V(t+1)$ 을 이용하여 실제 제어에 대한 적합성 정도를 측정할 수 있다.

[0049] 파라미터 생성부(130)의 변경정보 $K_m(t)$ 와 성능 평가부(140)의 평가정보 $V(t)$ 를 업데이트하기 위해 다음의 수학적 식 5를 이용하여 시간 오차를 연산할 수 있다.

수학적 식 5

$$\delta_{TD}(t) = r(t) + \gamma V(t+1) - V(t)$$

[0050]

[0051] 여기서 $r(t)$ 는 보상값을, γ 는 할인율로써, 0에서 1 사이의 값을 갖는 값이다. γ 가 0에 가까운 값을 가지게 되면 현재 시점에서 얻게 되는 보상값만을 중요시하면서, 향후 얻게 되는 보상값은 경시하는 것이다. 반대로 γ 가 1 근처의 값을 가지게 되면 먼 미래에 얻게 될 보상값까지 중요시하는 것이다. 주로 할인율은 1에 가까운 값을 선택하면 충분히 학습이 잘 이루어짐을 볼 수 있다.

[0052] 시간 오차는 실제 동작에 대한 적합성 정도를 알 수 있게 하는 척도이다. 따라서 시스템 학습 성능 지표 $E(t)$ 는 아래의 수학적 식 6과 같이 정의할 수 있다.

수학적 식 6

$$E(t) = \frac{1}{2} \delta_{TD}^2(t)$$

[0053]

[0054] 수학적 식 6의 학습 성능 지표를 참조하여, 파라미터 생성부(130)와 성능 평가부(140)는 각각 아래의 수학적 식 7과 수학적 식 8과 같이 업데이트를 수행한다.

수학적 식 7

$$w_{mj}(t+1) = w_{mj}(t) + \alpha_A \delta_{TD}(t) \phi_j(t)$$

[0055]

- 9 -

수학식 8

$$v_j(t+1) = v_j(t) + \alpha_c \delta_{TD}(t) \phi_j(t)$$

여기서 α_A , α_c 는 파라미터 생성부(130)와 성능 평가부(140)의 학습률이다.

또한, 근사 모델 생성부(125)도 파라미터 생성부(130)와 성능 평가부(140)의 입력으로 사용되는데, 아래의 수식 9와 수학식 10과 같이 평균값과 표준편차에 대한 업데이트를 수행한다.

수학식 9

$$\mu_{ij}(t+1) = \mu_{ij}(t) + \eta_\mu \delta_{TD}(t) v_j(t) \phi_j(t) \frac{x_i(t) - \mu_{ij}(t)}{\sigma_j^2(t)}$$

수학식 10

$$\sigma_j(t+1) = \sigma_j(t) + \eta_\mu \delta_{TD}(t) v_j(t) \phi_j(t) \frac{\|x(t) - \mu_j(t)\|^2}{\sigma_j^3(t)}$$

여기서 η_μ , η_σ 는 각각 근사 모델의 커널 함수인 Gaussian function의 평균값과 표준편차의 학습률이다.

도 2는 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따른 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 방법의 흐름도이다.

도 2를 참조하면, 본 실시예에 따른 PID 제어 방법은 도 1에 도시된 PID 제어 장치에서 시계열적으로 처리되는 단계들로 구성된다. 따라서, 이하 생략된 내용이라 하더라도 도 1에 도시된 PID 제어 장치에 관하여 이상에서 기술된 내용은 본 실시예에 따른 PID 제어 방법에도 적용된다.

200 단계에서 PID 제어 장치는 PID 제어부(110)의 제어 파라미터를 초기화한다. 도 10을 참조하면, 제어 파라미터는 K_I , K_P , K_D 임을 알 수 있다.

210 단계에서 PID 제어 장치는 입력신호 $s(t)$ 와 제어 대상의 현재 출력신호 $y(t)$ 로부터 계산된 오차 $e(t)$ 를 이용하여 제어신호에 대한 보상값 $r(t)$ 을 연산한다. 보상값 $r(t)$ 는 수학식 1과 같이 계산될 수 있으며, 제어 대상(160) 내의 오차와 오차의 변화율을 동시에 이용하여 결정된다. 이때, 보상값 $r(t)$ 는 오차 $e(t)$ 와 오차 $e(t)$ 의 변화율 각각에 가중치를 부여하여 생성될 수 있다.

220 단계에서 PID 제어 장치는 계산된 오차를 이용하여 근사 모델을 생성한다.

230 단계에서 PID 제어 장치는 생성된 근사 모델을 이용하여 제어 파라미터와 평가 정보를 생성한다. 제어 파라미터는 파라미터 생성부(130)의 m 번째 출력 $K_m(t)$ 이고, 평가 정보는 성능 평가부(140)의 평가 정보 $V(t)$ 이다.

240 단계에서 PID 제어 장치는 생성된 제어 파라미터 $K_m(t)$ 을 이용하여 제어신호를 출력한다.

250 단계에서 PID 제어 장치는 보상값과 평가 정보를 이용하여 시간 오차를 연산한다. 240 단계에서 출력된 제어 신호가 제어대상(160)에 입력되고, 다음 시간의 제어 대상(160)의 출력인 $y(t+1)$ 을 이용하여 다음 시간의 평가 정보 $V(t+1)$ 을 계산한 다음, 보상값 $r(t)$, 평가정보 $V(t)$, $V(t+1)$ 를 이용하여 시간 오차 $\delta_m(t)$ 를 연산할 수 있다.

- [0070] 260 단계에서 PID 제어 장치는 연산된 시간 오차를 이용하여 파라미터 생성부(130)의 제어 파라미터와 성능 평가부(140)의 평가 정보를 업데이트한다.
- [0071] 270 단계에서 PID 제어 장치는 업데이트된 제어 파라미터를 이용하여 제어신호를 출력한다.
- [0072] 도 3는 $\frac{1}{s+1} \exp^{-0.1 \text{sec}}$ 의 전달함수를 갖는 머시닝센터 내 서보 모터에 대한 기존 PID 제어 방식과 본 발명에 따른 PID 제어 장치를 이용하였을 시, Set point tracking 성능 비교 시뮬레이션 결과를 나타낸 도면이다.
- [0073] 도 3(a)는 Set point 변경 시 응답 결과를 나타낸 것이고, 도 3(b)는 응답 결과의 일부분을 확대한 도면이다.
- [0074] 도 4는 $\frac{1}{s+1} \exp^{-0.1 \text{sec}}$ 의 전달함수를 갖는 머시닝센터 내 서보 모터에 대한 기존 PID 제어 방식과 본 발명에 따른 PID 제어 장치를 이용하였을 시, Set point tracking 성능 비교 시뮬레이션 결과를 나타낸 도면이다.
- [0075] 도 4(a)는 적분절대오차(IAE: Integrated Absolute Error) 결과를 도시한 것이고, 도 4(b)는 적분시간 절대오차(ITAE: Integrated Time Absolute Error) 결과를 나타내는 도면이다.
- [0076] 도 5는 $\frac{1}{s^2+2s+1} \exp^{-0.2 \text{sec}}$ 의 전달함수를 갖는 머시닝센터 내 서보 모터에 대한 기존 PID 제어 방식과 본 발명에 따른 PID 제어 장치를 이용하였을 시, Set point tracking 성능 비교 시뮬레이션 결과를 나타낸 도면이다.
- [0077] 도 5(a)는 Set point 변경 시 응답 결과를 나타낸 것이고, 도 5(b)는 응답 결과의 일부분을 확대한 도면이다.
- [0078] 도 6은 $\frac{1}{s^2+2s+1} \exp^{-0.2 \text{sec}}$ 의 전달함수를 갖는 머시닝센터 내 서보 모터에 대한 기존 PID 제어 방식과 본 발명에 따른 PID 제어 장치를 이용하였을 시, Set point tracking 성능 비교 시뮬레이션 결과를 나타낸 도면이다.
- [0079] 도 6(a)는 적분절대오차(IAE: Integrated Absolute Error) 결과를 도시한 것이고, 도 6(b)는 적분시간 절대오차(ITAE: Integrated Time Absolute Error) 결과를 나타내는 도면이다.
- [0080] 도 7은 $\frac{s+1}{s^2+2s+1} \exp^{-1 \text{sec}}$ 의 전달함수를 갖는 머시닝센터 내 서보 모터에 대한 기존 PID 제어 방식과 본 발명에 따른 PID 제어 장치를 이용하였을 시, Set point tracking 성능 비교 시뮬레이션 결과를 나타낸 도면이다.
- [0081] 도 7(a)는 Set point 변경 시 응답 결과를 나타낸 것이고, 도 7(b)는 응답 결과의 일부분을 확대한 도면이다.
- [0082] 도 8은 $\frac{s+1}{s^2+2s+1} \exp^{-1 \text{sec}}$ 의 전달함수를 갖는 머시닝센터 내 서보 모터에 대한 기존 PID 제어 방식과 본 발명에 따른 PID 제어 장치를 이용하였을 시, Set point tracking 성능 비교 시뮬레이션 결과를 나타낸 도면이다.
- [0083] 도 8(a)는 적분절대오차(IAE: Integrated Absolute Error) 결과를 도시한 것이고, 도 8(b)는 적분시간 절대오차(ITAE: Integrated Time Absolute Error) 결과를 나타내는 도면이다.
- [0084] 도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 제어 파라미터를 적응적으로 변화시키는 PID 제어 장치를 이용하여 머시닝센터의 X, Y, Z 서보모터 축의 정밀제어 및 오차를 보정하기 위한 제어 구조를 개괄적으로 설명하는 도면이다.
- [0085] 도 9를 참조하면, PID 제어부(100)와 업데이트부(115)는 하나의 제어기(100)인 에이전트를 형성한다.
- [0086] 에이전트(100)는 머시닝센터의 각 서보축의 위치 즉, 상태를 PID 제어부(110) 및 업데이트부(115)의 입력으로 받게 된다. 또한 PID 제어부(110)의 출력은 머시닝 센터의 각 축에 있는 서보모터의 입력이 되고, 입력에 따른 성능평가 지표인 보상값(Reward)이 피드백될 수 있다. 이러한 과정의 반복을 통해 최종적으로 누적된 보상값이 최대화가 되는 행동들을 탐색하고 그 결과를 머시닝센터 서보모터의 최종 입력으로 하여 머시닝센터의 기존 오차 보정뿐만 아니라 운전 중에 발생하는 오차에 대한 보정 및 전체적인 성능 향상을 시킬 수 있다.
- [0087] 본 발명에 따르면, 머시닝센터의 각 축의 서보모터를 제어함에 있어 정밀도를 한층 더 향상시킬 뿐만 아니라 가공 소요 시간을 단축시킬 수 있다. 또한 이미 정해진 정밀도의 제어기를 가진 제품화된 머시닝센터에서 그 제어기 자체를 수정하는 것은 불가능한 일이다. 따라서 본 발명에서는 기존 제어기의 많은 수정 사항 없이 업데이트부(115) 부분만을 추가해 줌으로써 그 적용이 용이하며 머시닝센터의 기존 안전성 및 신뢰성의 저해를

가져오지 않는다. 따라서 일정한 가공 처리속도를 갖는 종래의 방법에 비해 가공 처리 속도 개선뿐만 아니라 그 정밀도까지 향상시킴으로써 머시닝센터의 전체적인 성능을 향상시킬 수 있다.

[0088] 도 10은 PID 제어부(110)와 업데이트부(115) 간의 상호 연결 관계를 나타낸 도면이다.

[0089] 도 10을 참조하면, 업데이트부(115)는 PID 제어부(110)의 제어 파라미터 K_p , K_i , K_d 를 업데이트하고 있음을 알 수 있다. 이러한 업데이트 과정은 머시닝센터가 동작하는 한 지속적으로 반복되어 실행된다.

[0090] 본 발명의 실시예들은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 상기 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체에 기록되는 프로그램 명령은 본 발명을 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체(magnetic media), CD-ROM, DVD와 같은 광기록 매체(optical media), 플롭티컬 디스크(floptical disk)와 같은 자기-광 매체(magneto-optical media), 및 롬(ROM), 램(RAM), 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함한다. 상기된 하드웨어 장치는 본 발명의 동작을 수행하기 위해 하나 이상의 소프트웨어 모듈로서 작동하도록 구성될 수 있으며, 그 역도 마찬가지이다.

[0091] 이상과 같이 본 발명에서는 구체적인 구성 요소 등과 같은 특정 사항들과 한정된 실시예 및 도면에 의해 설명되었으나 이는 본 발명의 보다 전반적인 이해를 돕기 위해서 제공된 것일 뿐, 본 발명은 상기의 실시예에 한정되는 것은 아니며, 본 발명이 속하는 분야에서 통상적인 지식을 가진 자라면 이러한 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다.

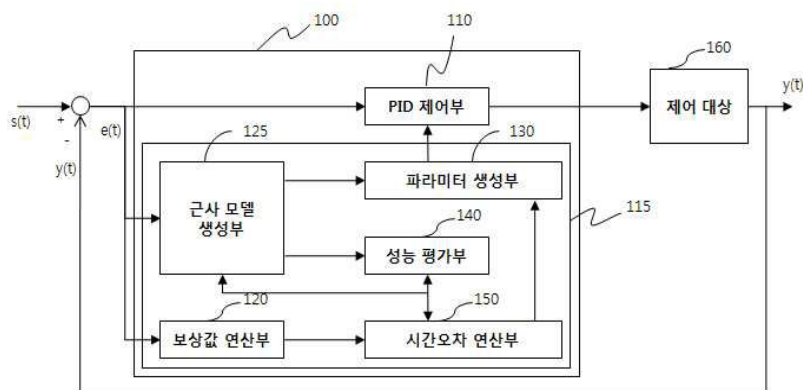
[0092] 따라서, 본 발명의 사상은 설명된 실시예에 국한되어 정해져서는 아니되며, 후술하는 특허청구범위뿐 아니라 이 특허청구범위와 균등하거나 등가적 변형이 있는 모든 것들은 본 발명 사상의 범주에 속한다고 할 것이다.

산업상 이용가능성

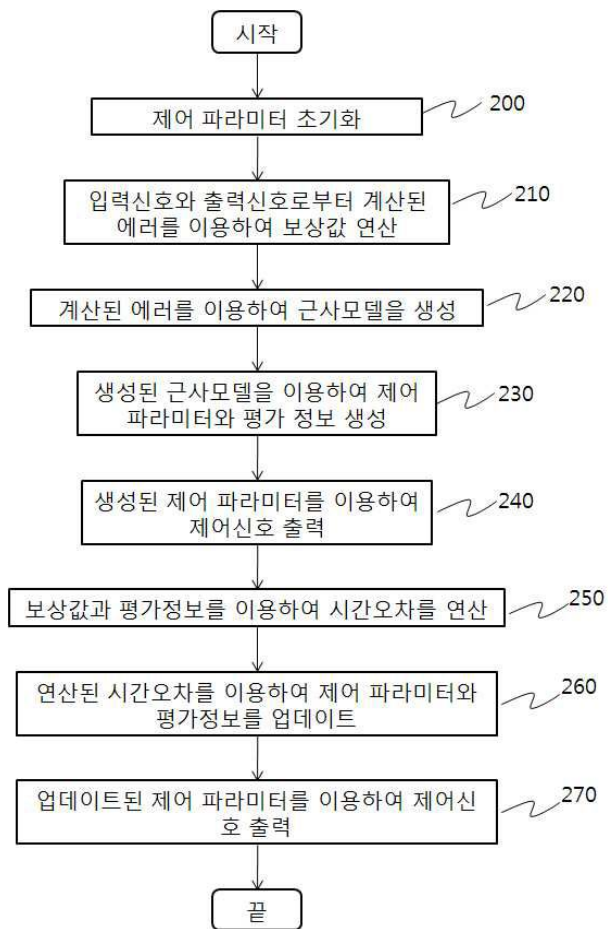
[0093] 머시닝 센터의 X, Y, Z 서보모터 축을 정밀제어하고, 오차를 보정할 수 있다.

도면

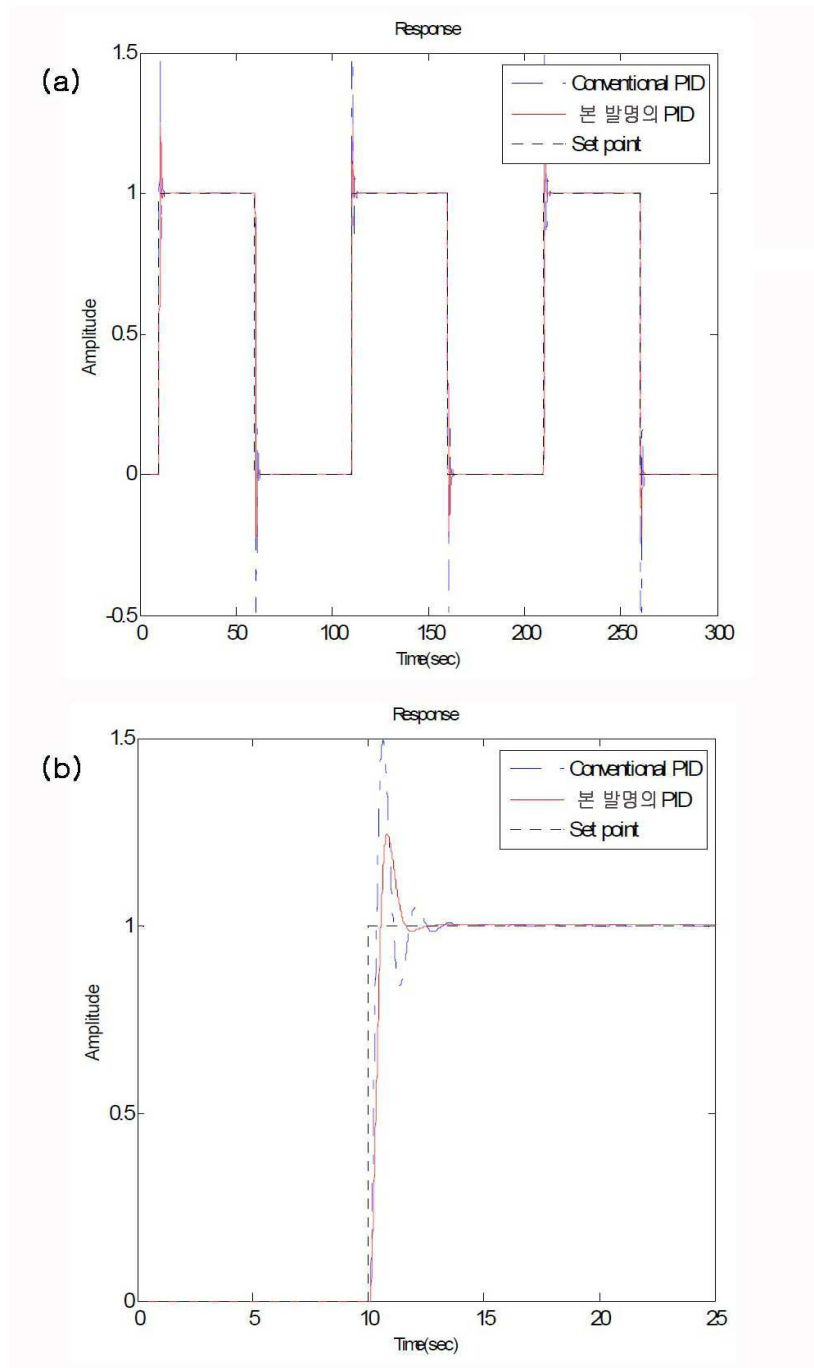
도면1



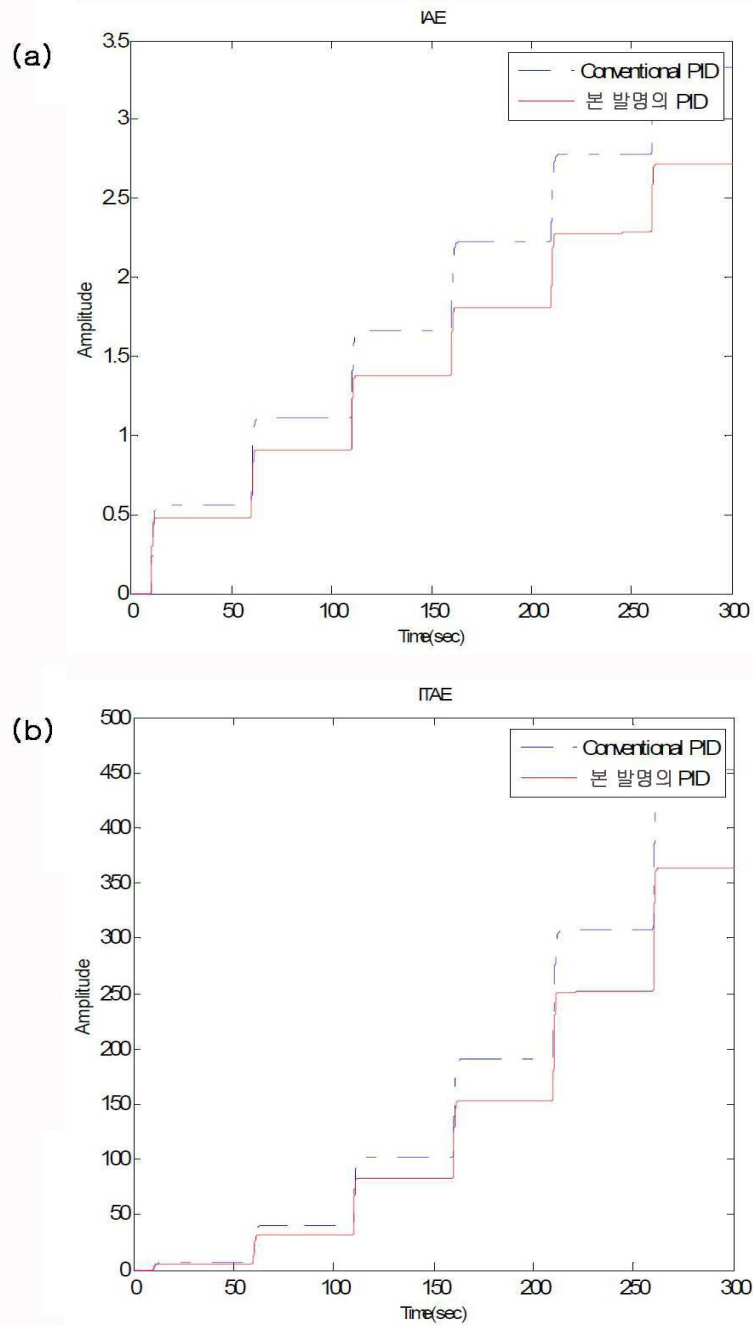
도면2



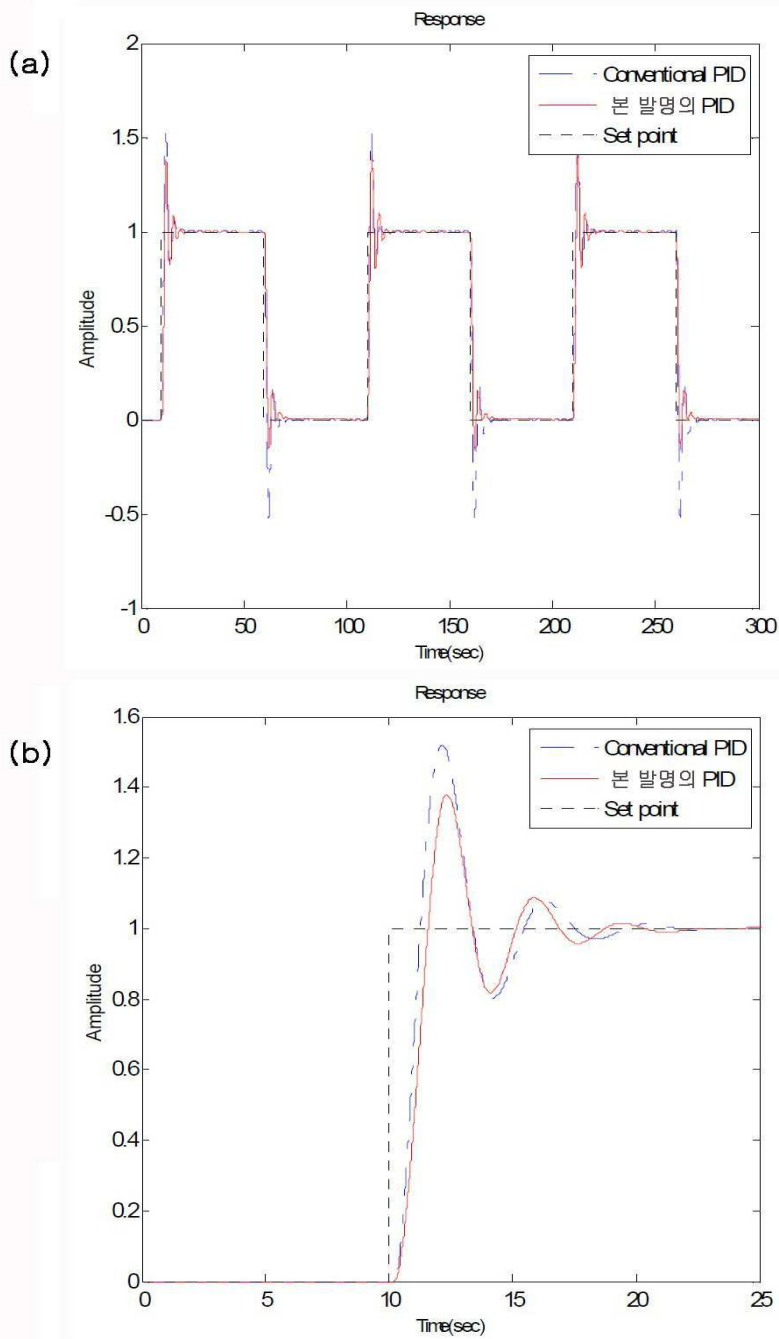
도면3



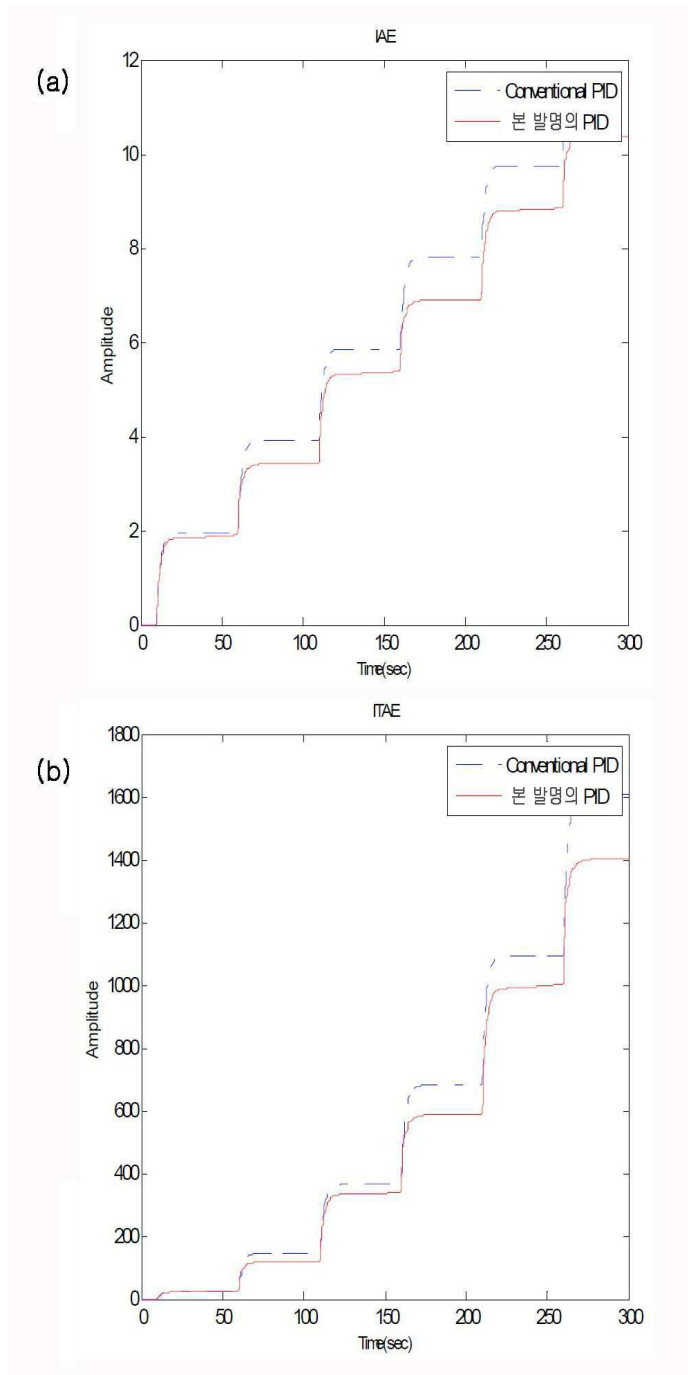
도면4



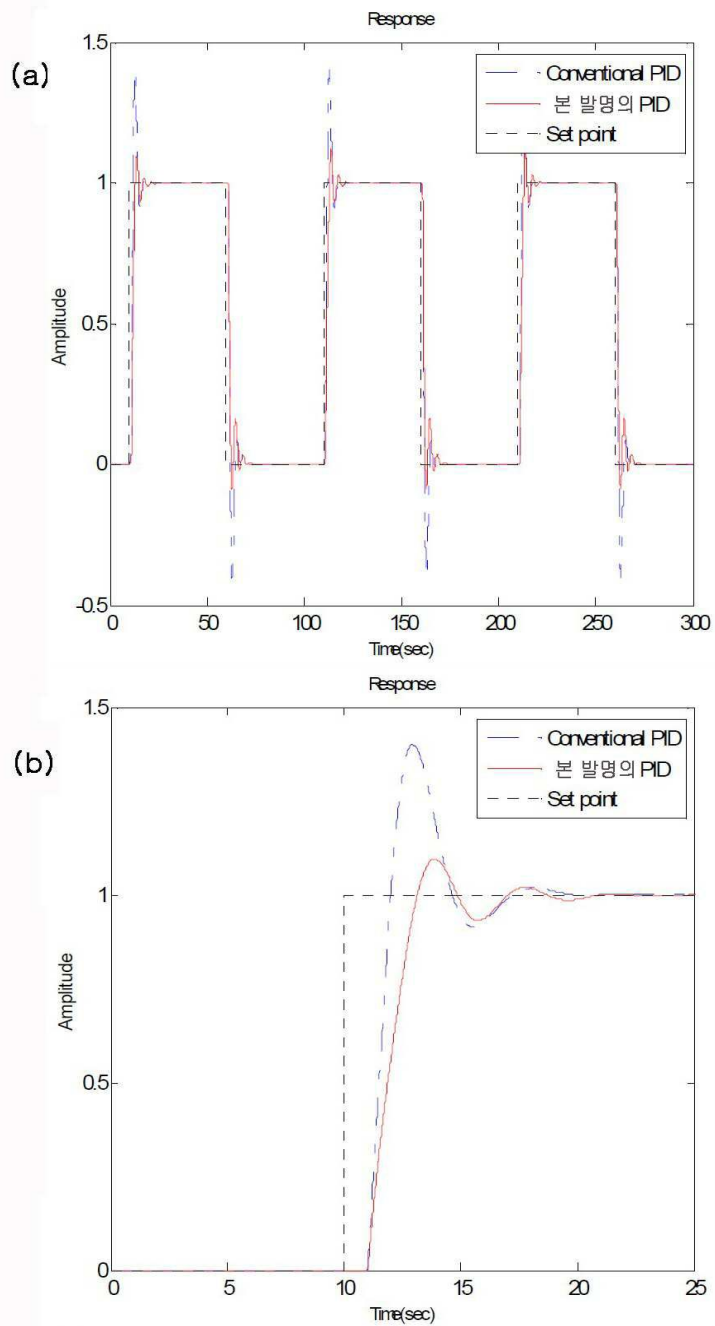
도면5



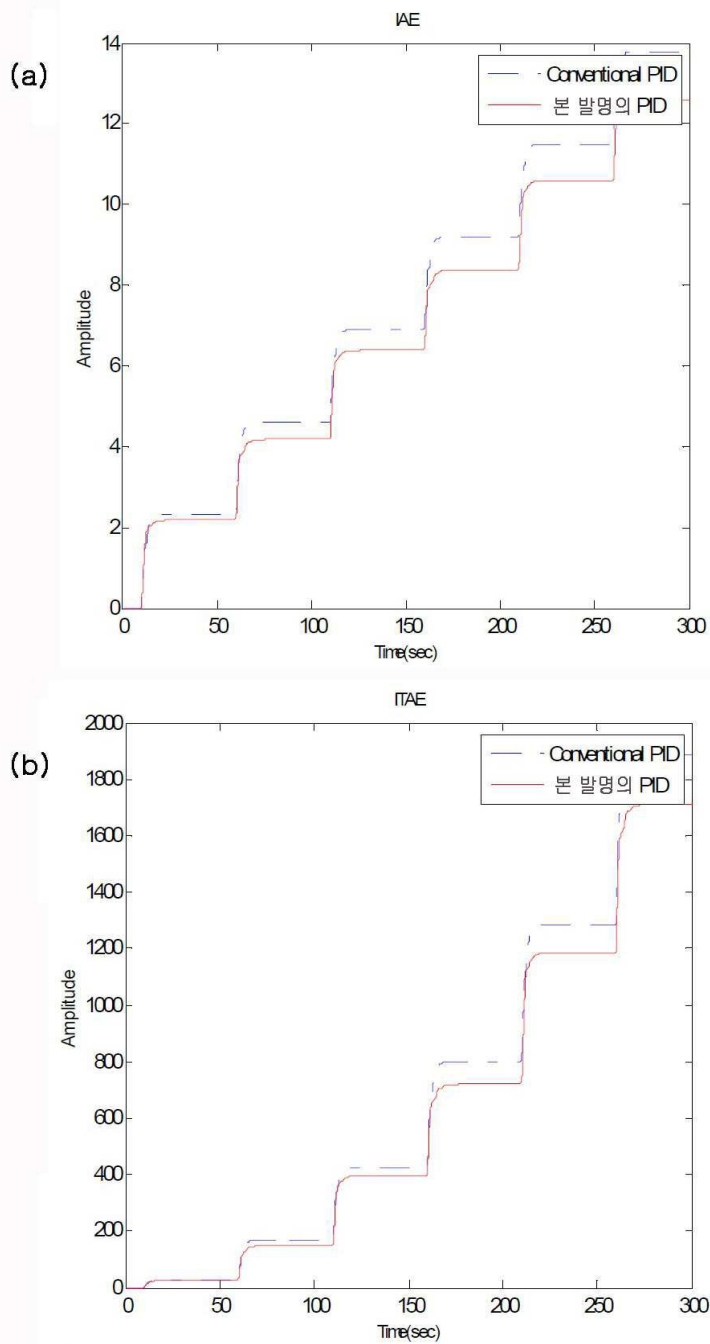
도면6



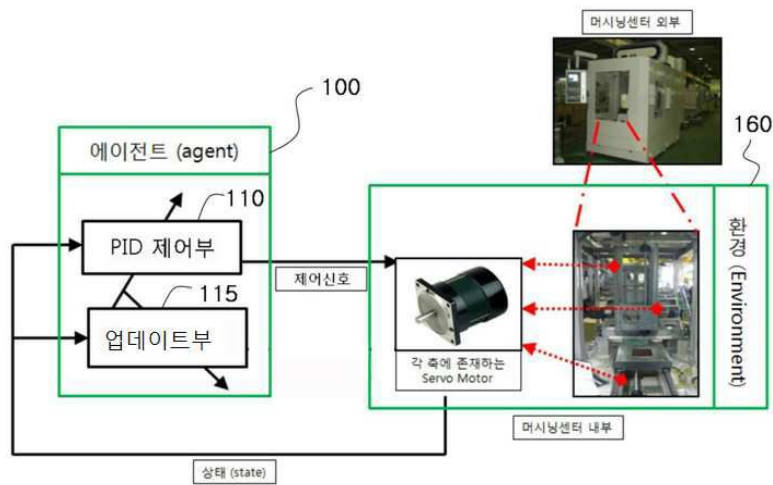
도면7



도면8



도면9



도면10

