



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2018년05월31일  
(11) 등록번호 10-1849464  
(24) 등록일자 2018년04월10일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
G05B 11/42 (2006.01)

(52) CPC특허분류  
G05B 11/42 (2013.01)  
G05B 2219/41005 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2016-0109018

(22) 출원일자 2016년08월26일

심사청구일자 2016년08월26일

(65) 공개번호 10-2018-0024092

(43) 공개일자 2018년03월08일

(56) 선행기술조사문헌

KR101478450 B1

KR100507835 B1

KR101640931 B1

(73) 특허권자

한국로봇융합연구원

경상북도 포항시 남구 효자동 산 31

(72) 발명자

김무렵

경상북도 포항시 남구 지곡로 294, 효자그린2차 APT 210동 1002호

김민규

경상북도 포항시 남구 연일읍 유강길9번길 62, (대림한숲타운1차) 114동 1404호

김주현

부산광역시 남구 동명로145번나길 12 (용호동)

(74) 대리인

특허법인 아이퍼스

전체 청구항 수 : 총 5 항

심사관 : 강석제

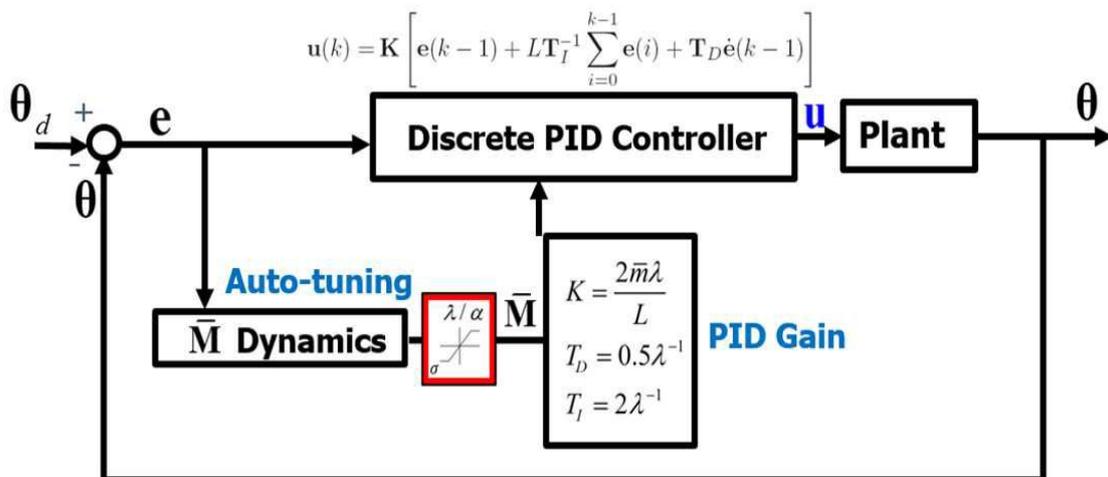
(54) 발명의 명칭 PID 게인 자동 튜닝 방법

(57) 요약

본 발명은 PID 제어기의 게인을 자동적이며 체계적으로 선정할 수 있는 PID 게인 자동 튜닝 방법을 제공하는 것이다. 또한, 본 발명은 제어시스템의 제어주기(sampling time L)와 원하는 오차동역학을 묘사하기 위한 슬라이딩 면의 기울기 파라미터만 정해주면, PID 제어 게인 들을 자동으로 업데이트하는 것이 가능한 PID 게인 자동 튜닝

(뒷면에 계속)

대표도 - 도7



방법을 제공하는 것이다.

이를 위해 본 발명의 일 실시예는 본 발명의 일 실시예에 따른 PID 제어기는 슬라이딩 모드의 기울기 및 시스템의 제어 주기를 설정하는 파라미터 설정부; 상기 슬라이딩 모드의 기울기 및 시스템의 제어 주기를 이용하여 계인을 자동으로 조절하는 계인 자동 조절부; 및 조절된 상기 계인 들을 통해 제어 입력을 계산해주는 제어 입력 산출부; 를 포함하고, 상기 계인 자동 조절부는 [수학식 1]을 이용하여, 상기 계인을 조절하고, 상기 제어 입력 산출부는 [수학식 2]을 이용하여, 상기 제어 입력을 계산하는 것을 특징으로 하는 PID 계인 자동 튜닝 방법을 개시한다.

(52) CPC특허분류

G05B 2219/42018 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1415145069

부처명 산업통상자원부

연구관리전문기관 한국산업기술진흥원

연구사업명 로봇산업클러스터조성사업

연구과제명 부품조립공정 생산성향상(20%이상)과 인력난해소를 위한 인간협업 양팔보조로봇 개발

기 여 율 1/1

주관기관 (주)케디엠

연구기간 2015.10.01 ~ 2017.09.30

명세서

청구범위

청구항 1

비선형 시스템을 위한 PID 제어기에 있어서,

슬라이딩 모드 기울기 및 시스템의 제어 주기를 설정하는 파라미터 설정부;

상기 슬라이딩 모드 기울기 및 시스템의 제어 주기를 이용하여 계인을 자동으로 조절하는 계인 자동 조절부; 및

조절된 상기 계인 들을 통해 제어 입력을 계산해주는 제어 입력 산출부; 를 포함하고,

상기 계인 자동 조절부는 하기 [수학식 1]을 이용하여, 상기 계인을 조절하고,

상기 제어 입력 산출부는 하기 [수학식 2]을 이용하여, 상기 제어 입력을 계산하는 것을 특징으로 하는 PID 제어기.

[수학식 1]

$$K = \frac{2\bar{m}\lambda}{L}, T_D = 0.5\lambda^{-1}, T_I = 2\lambda^{-1}$$

(여기서, K, T<sub>I</sub>, T<sub>D</sub>는 이산공간에서의 계인이고, λ는 목표로 하는 슬라이딩 모드 동역학의 슬라이딩 기울기,  $\bar{m}$ 는 실수 범위에서 정해지는 대각 계인 행렬이다.)

[수학식 2]

$$u(k) = K \left[ e(k-1) + L T_I^{-1} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + T_D \dot{e}(k-1) \right]$$

(여기서, L은 제어 주기고, u(k)는 k번째 제어 주기에 해당하는 제어입력이고, e(k)는 k번째 오차이다.)

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기  $\bar{m}$ 는 하기 [수학식 3]을 이용하여 정의되는 것을 특징으로 하는 PID 제어기.

[수학식 3]

$$\begin{cases} \dot{\bar{m}} = \alpha s^2 - \alpha \omega \bar{m}, & \text{if } \sigma < \bar{m} < \frac{\lambda}{\alpha} \\ \bar{m} = \sigma, & \text{if } \bar{m} < \sigma \\ \bar{m} = \frac{\lambda}{\alpha} - \sigma & \text{if } \bar{m} > \frac{\lambda}{\alpha} \end{cases}$$

(여기서, α, ω, σ는 사용자에게 의해 결정되는 상수이고, S는 슬라이딩 변수이며,  $\dot{\bar{m}}$ 는  $\bar{m}$ 에 대한 변화율이다.)

**청구항 3**

제 2항에 있어서,

상기 슬라이딩 변수(S)는 하기 [수학식 4]을 이용하여 정의되는 것을 특징으로 하는 PID 제어기.

[수학식 4]

$$s = \dot{e} + \lambda e$$

(여기서,  $\dot{e}$  은 오차의 변화율,  $e$  는 추종오차이다.)

**청구항 4**

비선형 시스템의 PID 게인 자동 튜닝 방법에 있어서,

슬라이딩 모드의 기울기 및 시스템의 제어 주기를 설정하는 단계;

오차를 이용해  $\bar{m}$  (실수 범위에서 정해지는 대각 게인 행렬)를 정의하는 단계;

상기  $\bar{m}$  로, 게인( $K, T_I, T_D$ )을 조절하는 단계;

상기 게인( $K, T_I, T_D$ )으로 제어입력( $u(k)$ )을 계산하는 단계; 및

상기 제어입력을 시스템에 입력하는 단계를 포함하고,

상기 게인( $K, T_I, T_D$ )은 하기 [수학식 1]을 이용하여, 조절되고,

상기 제어 입력은 하기 [수학식 2]을 이용하여, 계산되고,

상기  $\bar{m}$  는 하기 [수학식 3]을 이용하여 정의되는 것을 특징으로 하는 PID 게인 자동 튜닝 방법.

[수학식 1]

$$K = \frac{2\bar{m}\lambda}{L}, T_D = 0.5\lambda^{-1}, T_I = 2\lambda^{-1}$$

(여기서,  $K, T_I, T_D$ 는 이산공간에서의 게인이고,  $\lambda$ 는 목표로 하는 슬라이딩 모드 동역학의 슬라이딩 기울기,  $\bar{m}$ 는 실수 범위에서 정해지는 대각 게인 행렬이다.)

[수학식 2]

$$u(k) = K \left[ e(k-1) + LT_I^{-1} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + T_D \dot{e}(k-1) \right]$$

(여기서,  $L$ 은 제어 주기고,  $u(k)$ 는  $k$ 번째 제어 주기에 해당하는 제어입력이고,  $e(k)$ 는  $k$ 번째 오차이다.)

[수학식 3]

$$\begin{cases} \dot{\bar{m}} = \alpha s^2 - \alpha \omega \bar{m}, & \text{if } \sigma < \bar{m} < \frac{\lambda}{\alpha} \\ \bar{m} = \sigma, & \text{if } \bar{m} < \sigma \\ \bar{m} = \frac{\lambda}{\alpha} - \sigma & \text{if } \bar{m} > \frac{\lambda}{\alpha} \end{cases}$$

(여기서,  $\alpha$ ,  $\omega$ ,  $\sigma$  는 사용자에게 의해 결정되는 상수이고, S는 슬라이딩 변수이고,  $\dot{m}$ 는  $\bar{m}$ 에 대한 변화율이다.)

**청구항 5**

제 4항에 있어서,

상기 슬라이딩 변수(S)는 하기 [수학식 4]을 이용하여 정의되는 것을 특징으로 하는 PID 게인 자동 튜닝 방법.

[수학식 4]

$$s = \dot{e} + \lambda e$$

(여기서,  $\dot{e}$ 은 오차의 변화율,  $e$ 는 추종오차이다.)

**발명의 설명**

**기술 분야**

[0001] 본 발명은 PID 게인 자동 튜닝 방법에 관한 것이다. 보다 상세하게 본 발명은 PID 제어기의 게인을 자동적이며 체계적으로 선정할 수 있는 PID 게인 자동 튜닝 방법에 관한 것이다.

**배경 기술**

[0002] PID 제어기(Proportional Integral Derivative Controller)는 제어 시스템 분야의 산업 현장에서 널리 사용되는 제어기 중의 하나이다. PID 제어기는 비례, 적분, 미분 부분으로 구성되는 간단한 구조로 되어 있다. PID 제어기의 게인(gain)은 각각 위치 오차, 속도 오차 및 적분 오차에 대응하는 등 명확한 물리적 의미를 가지고 있지만, 엔지니어가 조정해야 할 PID 제어기의 게인을 튜닝 시 1개씩 튜닝하기보다는 여러 개의 게인을 동시에 튜닝해야 하므로 최종적으로 선정한 게인이 가장 좋은 게인인지 확인하기도 어렵다.

[0003] 특히 로봇과 같은 다변수 비선형 시스템의 제어에 필요한 PID 게인의 튜닝은 엄청난 시간과 노력을 필요로 한다. 따라서 전문적인 지식이 없는 사용자가 게인을 설정하기 위해서는 자동적으로 게인을 튜닝할 수 있는 절차 및 튜닝 알고리즘이 요구된다.

[0004] PID 제어기의 게인 설계에 관한 많은 기법이 있다. 예를 들면 지글러-니콜스(Ziegler-Nichols) 방법은 간단하고, PID 게인을 쉽게 조정할 수 있지만 비선형 시스템에서는 만족할 성능을 발휘하지 못하는 것으로 알려졌다. 일반적으로 PID 제어기에 관한 많은 연구에 의해 선형 시스템에서는 양호한 성능을 보이는 것을 볼 수 있으나, 비선형 시스템에서의 성능은 예측이 어렵거나 종종 충분하지 못한 경우도 있다.

[0005] 등록특허 10-1640931에서는 어떤 수식에 의한 초기 값을 정하고, 미분 게인을 증가시켜 조건을 만족하면, 미분 게인에 0.8을 곱한 값을 새로운 미분게인 값으로 정하고, 미분 게인을 고정하고, 비례게인을 증가하면서 PID 제어를 실시하고, 조건을 만족 시 비례게인에 0.8을 곱한 값을 새로운 비례게인 값으로 고정시키고, 다시 미분 게인을 증가시키고, 또 성능지수가 최소화되는 미분 게인을 새로운 미분게인 값으로 설정하고, 미분 게인을 고정하고 다시 비례게인을 올리면서 성능지수를 최소화하는 비례게인을 새로운 비례게인 값으로 설정한다. 마지막으로 비례게인, 미분 게인을 고정된 후 적분 게인을 올리면서 PID 제어를 실시하여 최종적으로 튜닝하게 된다. 등록특허 10-1640931의 기존 PID 게인 튜닝은 미분 게인을 튜닝 후, 비례게인을 튜닝하고, 다시 미분 게인을 튜닝하고, 또다시 비례게인을 튜닝하는 등 반복적인 trial-and-error 방식을 사용하여 최적의 게인에 접근해가는 방식을 취하고 있다. 따라서 최적의 성능지수가 나오는지 언제쯤 이 반복적인 과정을 정지해야 하는지 등 문제를 포함하고 있으며 게인 튜닝 단계가 많고 복잡하다.

[0006] 등록특허 10-1242678에서는 RBF(Radial Basis Function)을 이용한 근사모델을 이용하여 PID 파라미터를 생성하고 있다. 강화학습(Reinforcement learning)을 이용하여 오차 보정 및 운전 중에 발생하는 오차에 대한 보정 및 전체적인 성능을 향상시키고 있다. 이런 방식은 기존의 PID 제어방식에 비해 향상된 성능을 보이고 있으나 적용의 복잡성 때문에 실제사용하기 힘들다. 예를 들면 이 방식은 많은 가중치, 할인율에 대한 설정과 많은 계산량을 요구하는 가우시언(Gauss Function)함수를 계산해야 하고, 오차, 커널함수의 평균값, 표준편차 등을 계산해

야 하는 등 적용하기 위해 많은 파라미터의 설정 및 튜닝해나가야 하며 또한 고등함수의 사용으로 인하여 많은 계산량을 요구하며 그 적용이 복잡한 측면이 있다.

**발명의 내용**

**해결하려는 과제**

- [0007] 본 발명은 PID 제어기의 계인을 자동적이며 체계적으로 선정할 수 있는 PID 계인 자동 튜닝 방법을 제공하는 것이다.
- [0008] 또한, 본 발명은 제어시스템의 제어주기(sampling time L)와 원하는 오차 동역학을 묘사하기 위한 슬라이딩 면의 기울기 파라미터만 정해주면, PID 제어 계인 들을 자동으로 업데이트하는 것이 가능한 PID 계인 자동 튜닝 방법을 제공하는 것이다.
- [0009] 한편, 본 발명에서 이루고자 하는 기술적 과제들은 이상에서 언급한 기술적 과제들로 제한되지 않으며, 언급하지 않은 또 다른 기술적 과제들은 아래의 기재로부터 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

**과제의 해결 수단**

- [0010] 본 발명의 일 실시예에 따른 PID 제어기는 슬라이딩 모드의 기울기 및 시스템의 제어 주기를 설정하는 파라미터 설정부; 상기 슬라이딩 모드의 기울기 및 시스템의 제어 주기를 이용하여 계인을 자동으로 조절하는 계인 자동 조절부; 및 조절된 상기 계인 들을 통해 제어 입력을 계산해주는 제어 입력 산출부; 를 포함하고, 상기 계인 자동 조절부는 하기 [수학식 1]을 이용하여, 상기 계인을 조절하고, 상기 제어 입력 산출부는 하기 [수학식 2]을 이용하여, 상기 제어 입력을 계산한다.

[0011] [수학식 1]

[0012] 
$$K = \frac{2\bar{m}\lambda}{L}, T_D = 0.5\lambda^{-1}, T_I = 2\lambda^{-1}$$

[0013] (여기서, K, T<sub>I</sub>, T<sub>D</sub>는 이산공간에서의 계인이고, λ는 목표로 하는 슬라이딩 모드 동역학의 슬라이딩 기울기,  $\bar{m}$ 는 실수 범위에서 정해지는 대각 계인 행렬이다.)

[0014] [수학식 2]

[0015] 
$$u(k) = K \left[ e(k-1) + LT_I^{-1} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + T_D \dot{e}(k-1) \right]$$

[0016] (여기서, L은 제어 주기고, u(k)는 k번째 제어 주기에 해당하는 제어입력이고, e(k)는 k번째 오차이다.)

[0017] 또한, 상기  $\bar{m}$ 는 하기 [수학식 3]을 이용하여 정의될 수 있다.

[0018] [수학식 3]

[0019] 
$$\begin{cases} \dot{\bar{m}} = \alpha s^2 - \alpha \omega \bar{m}, & \text{if } \sigma < \bar{m} < \frac{\lambda}{\alpha} \\ \bar{m} = \sigma, & \text{if } \bar{m} < \sigma \\ \bar{m} = \frac{\lambda}{\alpha} - \sigma & \text{if } \bar{m} > \frac{\lambda}{\alpha} \end{cases}$$

[0020] (여기서, α, ω, σ는 사용자에게 의해 결정되는 상수이고, S는 슬라이딩 변수이며,  $\dot{\bar{m}}$ 는  $\bar{m}$ 에 대한 변화율이다.)

[0021] 또한, 상기 슬라이딩 변수(S)는 하기 [수학식 4]을 이용하여 정의될 수 있다.

[0022] [수학식 4]

$$[0023] \quad s = \dot{e} + \lambda e$$

[0024] (여기서,  $\dot{e}$  은 오차의 변화율,  $e$  는 추종오차이다.)

[0026] 한편, 본 발명의 일 실시예에 따른 PID 게인 자동 튜닝 방법은 슬라이딩 모드 기울기 및 시스템의 제어 주기를 설정하는 단계; 오차를 이용해  $\bar{m}$  (실수 범위에서 정해지는 대각 게인 행렬)를 정의하는 단계; 상기  $\bar{m}$  로, 게인(K,  $T_I$ ,  $T_D$ )을 조절하는 단계; 상기 게인(K,  $T_I$ ,  $T_D$ )으로 제어입력(u(k))을 계산하는 단계; 및 상기 제어입력을 시스템에 입력하는 단계를 포함하고, 상기 게인(K,  $T_I$ ,  $T_D$ )은 하기 [수학식 1]을 이용하여, 조절되고, 상기 제어 입력은 하기 [수학식 2]을 이용하여, 계산되고, 상기  $\bar{m}$  는 하기 [수학식 3]을 이용하여 정의될 수 있다.

[0027] [수학식 1]

$$[0028] \quad K = \frac{2\bar{m}\lambda}{L}, T_D = 0.5\lambda^{-1}, T_I = 2\lambda^{-1}$$

[0029] (여기서, K,  $T_I$ ,  $T_D$ 는 이산공간에서의 게인이고,  $\lambda$ 는 목표로 하는 슬라이딩 모드 동역학의 슬라이딩 기울기,  $\bar{m}$ 는 실수 범위에서 정해지는 대각 게인 행렬이다.)

[0030] [수학식 2]

$$[0031] \quad u(k) = \mathbf{K} \left[ \mathbf{e}(k-1) + L\mathbf{T}_I^{-1} \sum_{i=0}^{k-1} \mathbf{e}(i) + \mathbf{T}_D \dot{\mathbf{e}}(k-1) \right]$$

[0032] (여기서, L은 제어 주기고, u(k)는 k번째 제어 주기에 해당하는 제어입력이고, e(k)는 k번째 오차이다.)

[0033] [수학식 3]

$$[0034] \quad \begin{cases} \dot{\bar{m}} = \alpha s^2 - \alpha \omega \bar{m}, & \text{if } \sigma < \bar{m} < \frac{\lambda}{\alpha} \\ \bar{m} = \sigma, & \text{if } \bar{m} < \sigma \\ \bar{m} = \frac{\lambda}{\alpha} - \sigma & \text{if } \bar{m} > \frac{\lambda}{\alpha} \end{cases}$$

[0035] (여기서,  $\alpha$ ,  $\omega$ ,  $\sigma$ 는 사용자에게 의해 결정되는 상수이고, S는 슬라이딩 변수이고,  $\dot{\bar{m}}$ 는  $\bar{m}$ 에 대한 변화율이다.)

[0036] 또한, 상기 슬라이딩 변수(S)는 하기 [수학식 4]을 이용하여 정의될 수 있다.

[0037] [수학식 4]

$$[0038] \quad s = \dot{e} + \lambda e$$

[0039] (여기서,  $\dot{e}$  은 오차의 변화율,  $e$  는 추종오차이다.)

**발명의 효과**

[0040] 본 발명에 따른 PID 게인 자동 튜닝 방법은 PID 제어기의 게인을 자동적이며 체계적으로 선정할 수 있다.

[0041] 또한, 본 발명에 따른 PID 게인 자동 튜닝 방법은 제어시스템의 제어주기(sampling time L)와 원하는 오차 동역

학을 묘사하기 위한 슬라이딩 면의 기울기 파라미터만 정해주면, PID 제어 게인들을 자동으로 업데이트하는 것이 가능하다.

[0042] 한편, 본 발명에서 얻을 수 있는 효과는 이상에서 언급한 효과들로 제한되지 않으며, 언급하지 않은 또 다른 효과들은 아래의 기재로부터 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

**도면의 간단한 설명**

[0043] 본 명세서에 첨부되는 다음의 도면들은 본 발명의 바람직한 실시예를 예시하는 것이며, 발명의 상세한 설명과 함께 본 발명의 기술사상을 더욱 이해시키는 역할을 하는 것이므로, 본 발명은 그러한 도면에 기재된 사항에만 한정되어 해석되어서는 아니 된다.

도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 PID 제어기를 개략적으로 나타내는 블록도이다.

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 PID 게인 자동 튜닝 방법을 나타내는 흐름도이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 추종 하려고 하는 경로를 나타낸 그래프이다.

도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 시간에 따른  $\bar{m}$ 와 슬라이딩 변수의 응답 관계를 나타낸 그래프이다.

도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른  $\bar{m}$ 와 슬라이딩 변수의 상관 궤적(Phase portrait)을 나타낸 그래프이다.

도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 제어 오차와 제어입력을 나타낸 그래프이다.

도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 PID 게인 자동 튜닝 방법을 나타내는 블록다이어그램이다.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

[0044] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예를 상세히 설명하기로 한다.

[0045] 본 발명의 실시예들은 당해 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 본 발명을 더욱 완전하게 설명하기 위하여 제공되는 것이며, 하기 실시예는 여러 가지 다른 형태로 변형될 수 있으며, 본 발명의 범위가 하기 실시예에 한정되는 것은 아니다. 오히려, 이들 실시예는 본 개시를 더욱 충실하고 완전하게 하고, 당업자에게 본 발명의 사상을 완전하게 전달하기 위하여 제공되는 것이다.

[0046] 또한, 이하의 도면에서 각 구성은 설명의 편의 및 명확성을 위하여 과장된 것이며, 도면 상에서 동일 부호는 동일한 요소를 지칭한다. 본 명세서에서 사용된 바와 같이, 용어 "및/또는"는 해당 열거된 항목 중 어느 하나 및 하나 이상의 모든 조합을 포함한다.

[0047] 본 명세서에서 사용된 용어는 특정 실시예를 설명하기 위하여 사용되며, 본 발명을 제한하기 위한 것이 아니다.

[0048] 본 명세서에서 사용된 바와 같이, 단수 형태는 문맥상 다른 경우를 분명히 지적하는 것이 아니라면, 복수의 형태를 포함할 수 있다. 또한, 본 명세서에서 사용되는 경우 "포함한다(comprise)" 및/또는 "포함하는(comprising)"은 언급한 형상들, 숫자, 단계, 동작, 부재, 요소 및/또는 이들 그룹의 존재를 특정하는 것이며, 하나 이상의 다른 형상, 숫자, 동작, 부재, 요소 및 /또는 그룹들의 존재 또는 부가를 배제하는 것이 아니다.

[0051] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 PID 제어기를 개략적으로 나타내는 블록도이고, 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 PID 게인 자동 튜닝 방법을 나타내는 흐름도이다.

[0052] 도 1 및 도 2를 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 PID 제어기(100)는 파라미터 설정부(110), 게인 자동 조절부(120) 및 제어 입력 산출부(130)를 포함하며, 이를 이용한 PID 게인 자동 튜닝 방법은 파라미터 설정 단계(S10),  $\bar{m}$  정의 단계(S20), 게인 조절 단계(S30), 제어입력 계산 단계(S40) 및 제어입력 입력 단계(S50)를 포함한다.

[0054] 파라미터 설정 단계(S10)에서는 상기 파라미터 설정부(110)를 통해 PID 게인 자동 튜닝 하기 위한 파라미터들을 설정한다.

[0055] 여기서, 상기 파라미터는 제어 주기(Sampling time, L)와 원하는 오차 동역학을 묘사하기 위한 슬라이딩 면의 기울기( $\lambda$ )를 포함한다.

[0056] 이러한 파라미터들은 사용자에게 의해 임의의 값으로 제안될 수 있다.

[0058] 이후, 상기  $\bar{m}$  정의 단계(S20)에서는 상기 단계(S10)에서 설정된 파라미터들과 오차를 통해  $\bar{m}$ 의 값을 정의한다.

[0059] 여기서,  $\bar{m}$ 는 실수 범위에서 정해지는 대각 계인 행렬이다.

[0060] 이러한 단계(S20)에서  $\bar{m}$ 은 다음의 수학식에 의해 연산된다.

$$[0061] \begin{cases} \dot{\bar{m}} = \alpha s^2 - \alpha \omega \bar{m}, & \text{if } \sigma < \bar{m} < \frac{\lambda}{\alpha} \\ \bar{m} = \sigma, & \text{if } \bar{m} < \sigma \\ \bar{m} = \frac{\lambda}{\alpha} - \sigma & \text{if } \bar{m} > \frac{\lambda}{\alpha} \end{cases}$$

[0062] 여기서,  $\alpha$ ,  $\omega$ ,  $\sigma$ 는 사용자에게 의해 결정되는 상수이고, S는 슬라이딩 변수이고,  $\dot{\bar{m}}$ 는  $\bar{m}$ 에 대한 변화율을 나타낸다.

[0064] 또한, 상기 슬라이딩 변수(S)는 다음의 수학식에 의해 정의된다.

$$[0065] s = \dot{e} + \lambda e$$

[0066] (여기서,  $\dot{e}$ 은 오차의 변화율,  $e$ 는 추종오차이다.)

[0068] 즉,  $\alpha$ 와  $\omega$ 는 자동 계인 튜닝을 위한 파라미터로서  $\alpha$ 는 슬라이딩 변수의 크기가 클 때  $\bar{m}$ 를 증가시키는 역할을 하며,  $\omega$ 는 Leakage Term으로서 슬라이딩 변수가 0에 가까워(즉, 에러가 작을 때) 목표 오차에 가까울 때에  $\bar{m}$ 가 줄어드는 속도를 결정해준다. 따라서  $\bar{m}$ 는 오차가 크면 커지려고 하는 경향이 있으며, 오차가 작으면 자동으로 줄어들게 된다. 이에 따라  $\bar{m}$ 의 크기가 자동적으로 적절하게 조절되게 된다.

[0070] 여기서,  $\bar{m}$ 의 입력의 상한이  $\lambda/\alpha$ 에서 포화되며, 입력의 하한이  $\sigma$ 에서 포화될 수 있다.

[0071] 즉,  $\bar{m}$ 은  $[\sigma, \lambda/\alpha]$ 의 구간에 있게 된다.  $\sigma$ 와  $\lambda/\alpha$ 는  $\bar{m}$ 의 파라미터 입력 범위(parameter search space)를 정해주는 것으로, 사용자가 대략적으로  $\bar{m}$ 의 범위를 지정할 수 있는 것이다.

[0072] 여기서, 일반적으로  $\sigma$ 는 아주 작은 양의 값(예: 0.0000001)을 선택한다.

[0074] 이후, 상기 계인 조절 단계(S30)에서는 계인 자동 조절부(120)에서 정해진  $\bar{m}$ ,  $\lambda$  및 L을 통해, 자동으로 다음 수학적식과 같이 PID 계인 들을 유도한다.

$$[0075] K = \frac{2\bar{m}\lambda}{L}, T_D = 0.5\lambda^{-1}, T_I = 2\lambda^{-1}$$

[0076] 여기서, K,  $T_I$ ,  $T_D$ 는 이산공간에서의 계인을 나타낸다.

[0078] 이후, 제어입력 계산 단계(S40)에서는 제어 입력 산출부(130)에서 다음의 수학적식을 통해 제어 입력( $u(k)$ )을 계산한다.

$$u(k) = K \left[ e(k-1) + L T_I^{-1} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + T_D \dot{e}(k-1) \right]$$

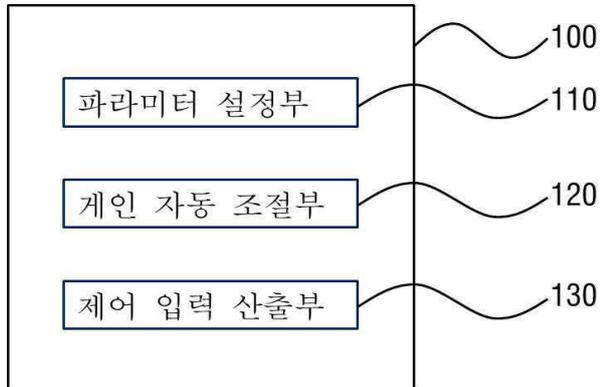
- [0079]
- [0080] 여기서,  $u(k)$ 는  $k$ 번째 제어 주기에 해당하는 제어입력이고,  $e(k)$ 는  $k$ 번째 오차,  $e(k-1)$ 은  $k-1$ 번째 오차를 뜻하고  $e(i)$ 는  $i$ 번째 오차를 나타낸다.
- [0082] 이후, 제어입력 입력 단계(S50)에서는 상술한 단계를 통해 얻어진 제어 입력 값을 플랜트에 입력하여 작용한다.
- [0084] 상술한 PID 게인 자동튜닝방법을 블록다이어그램으로 표시하면 도 7에 도시된 바와 같다.
- [0086] <실시예>
- [0087] 이하에서는 상술한 PID 게인 자동 튜닝 방법을 이용하여 얻어진 제어 입력을 통해 로봇 팔을 제어한 결과를 실시예로 설명한다.
- [0088] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 추종하려고 하는 경로를 나타낸 그래프이고, 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 시간에 따른  $\bar{m}$ 와 슬라이딩 변수의 응답 관계를 나타낸 그래프이며, 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른  $\bar{m}$ 와 슬라이딩 변수의 상관 궤적(Phase portrait)을 나타낸 그래프이고, 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 제어오차와 제어입력을 나타낸 그래프이다.
- [0090] 우선, 도 3을 참조하면, 추종하려고 하는 경로를 확인할 수 있다.
- [0091] 또한, 도 4에서는  $\bar{m}$ 은 아주 작은 값에서 급속히 증가하면서 일정 값 이상으로 가면  $\bar{m}$ 가 다시 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한, 로봇이 운동방향이 바뀔 때(급격한 쿨롱마찰을 경험할 때)에는  $\bar{m}$ 가 커지고, 오차가 적을 때에는  $\bar{m}$ 가 줄어 드는 것을 알 수 있다. 또한 위치오차가 커질 때 슬라이딩 변수(S)가 커지고 따라서  $\bar{m}$ 가 커지는 것을 확인할 수 있다.
- [0092] 한편, 이는 도 5에 도시된  $\bar{m}$ 과 슬라이딩 변수(S)의 상관 궤적(Phase portrait)을 통해서도 확인할 수 있다.
- [0094] 또한, 도 6을 참조하면, 추종제어오차(e)와 제어 입력(u(k))에서 본 발명의 PID 제어기의 추종오차(e)와 제어입력(u(k))을 확인할 수 있다. 제어오차(e)는 0에 근접하다가 로봇 팔의 방향이 바뀌는 시점에 쿨롱마찰의 영향에 의하여 약간 커지다가 다시 빠른 속도로 0으로 수렴함을 확인할 수 있다.
- [0095] 또한, 제어입력(u(k))은 로봇 팔의 운동방향이 바뀌는 시점에 반대방향으로 큰 제어입력(u(k))이 생성됨을 알 수 있다. 이는 쿨롱마찰을 보상하기 위함이다.
- [0096] 즉, 상술한 데이터 등을 토대로 본 발명의 PID 게인 자동 튜닝 방법으로 PID 오토튜닝이 가능하다는 것과 오토튜닝을 하는 본 발명의 PID 제어기를 통하여 만족스러운 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.
- [0098] 이상에서 설명한 것은 본 발명에 따른 PID 게인 자동 튜닝 방법을 실시하기 위한 하나의 실시예에 불과한 것으로서, 본 발명은 한 실시예에 한정되지 않고, 이하의 특허청구범위에서 청구하는 바와 같이 본 발명의 요지를 벗어남이 없이 당해 발명이 속하는 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 누구든지 다양한 변경 실시가 가능한 범위까지 본 발명의 기술적 정신이 있다고 할 것이다.

**부호의 설명**

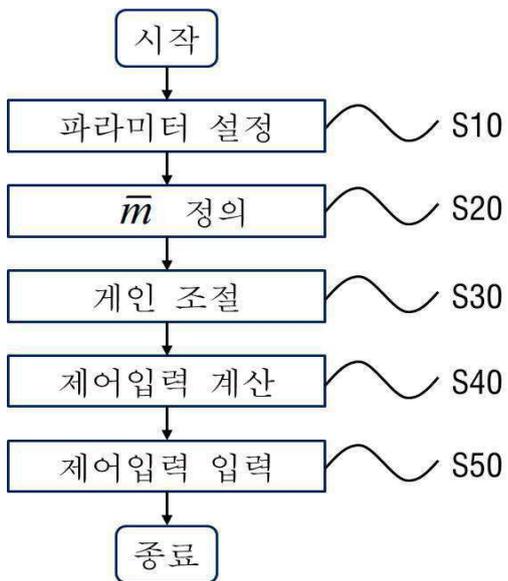
- [0100] 100: PID 제어기                    110: 파라미터 설정부
- 120: 게인 자동 조절부            130: 제어 입력 산출부

도면

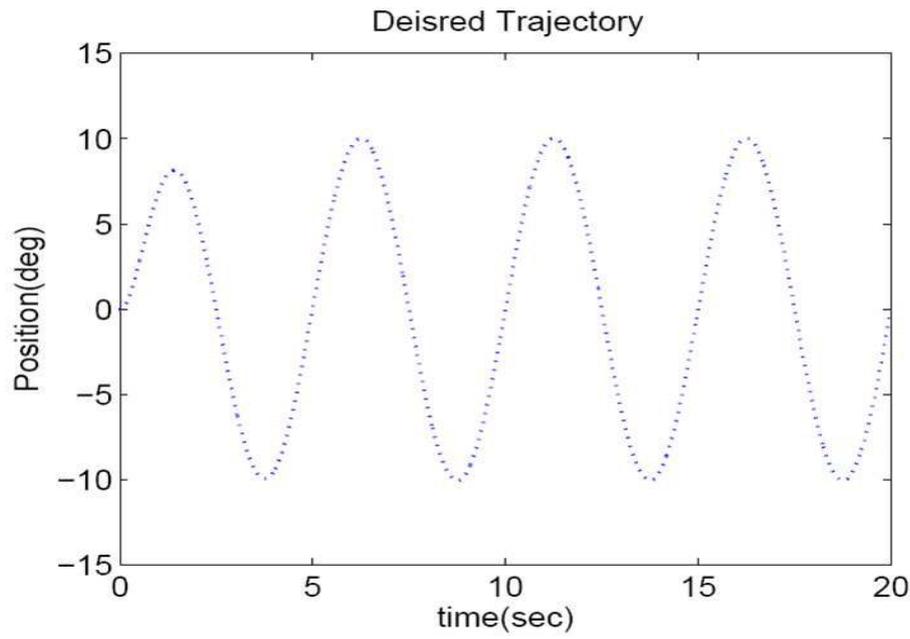
도면1



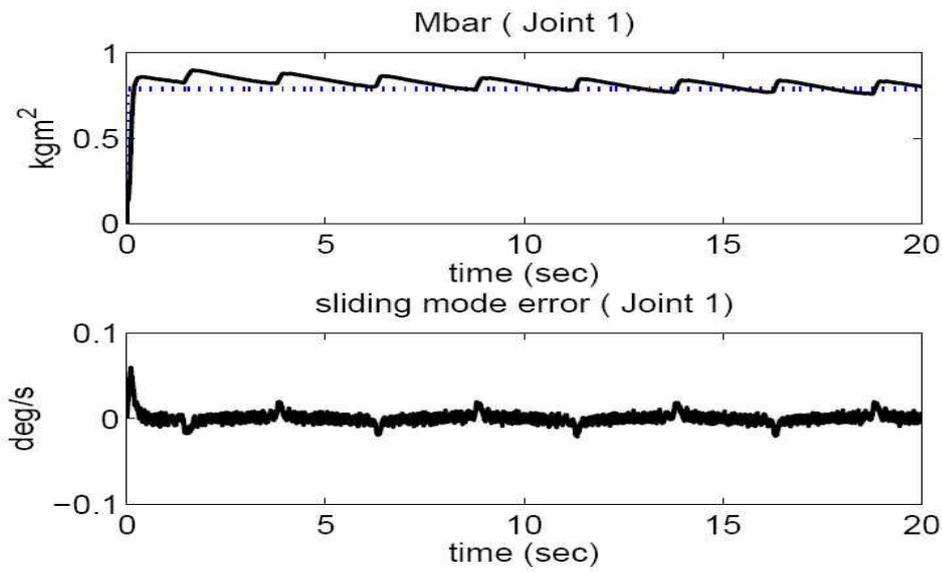
도면2



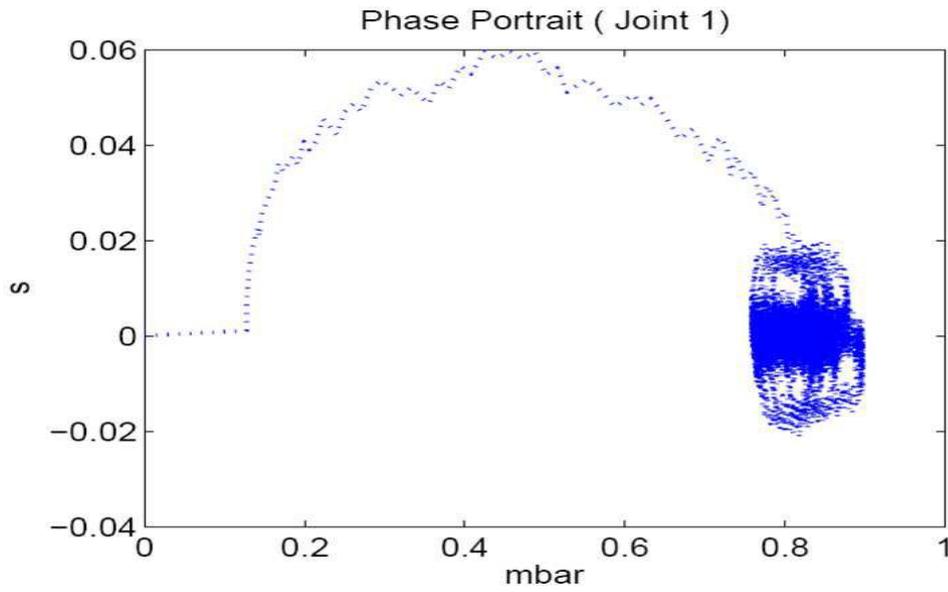
도면3



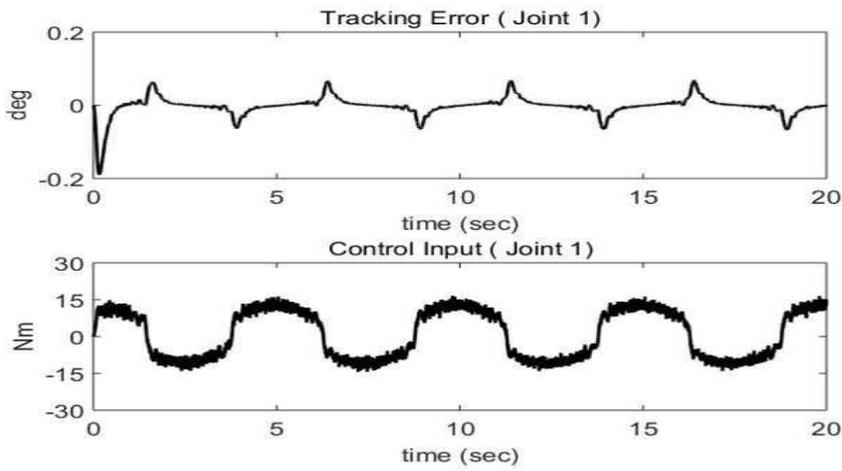
도면4



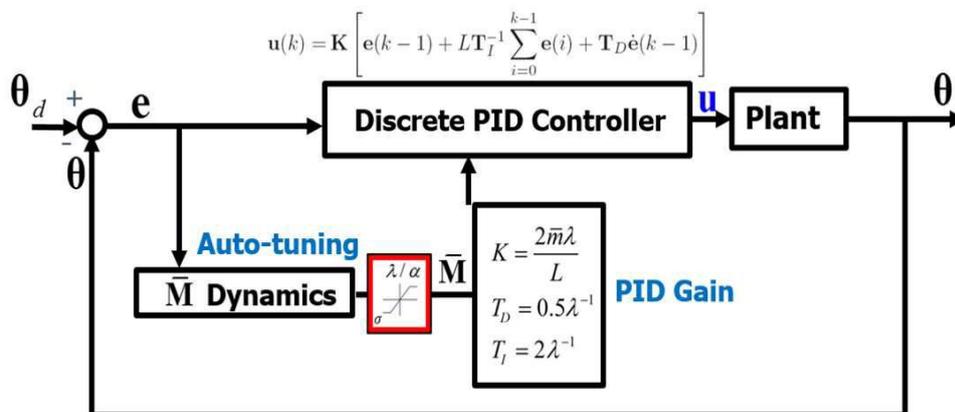
도면5



도면6



도면7



**【심사관 직권보정사항】**

**【직권보정 1】**

**【보정항목】** 발명(고안)의 설명

**【보정세부항목】** 식별번호 [0010]의 여섯번째줄

**【변경전】**

상기 제어 계인 산출부

**【변경후】**

상기 제어 입력 산출부

**【직권보정 2】**

**【보정항목】** 요약서

**【보정세부항목】** 열한번째줄

**【변경전】**

상기 제어 계인 산출부

**【변경후】**

상기 제어 입력 산출부

**【직권보정 3】**

**【보정항목】** 청구범위

**【보정세부항목】** 청구항 1의 열번째줄

**【변경전】**

상기 제어 계인 산출부

**【변경후】**

상기 제어 입력 산출부