



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2008-0015971
(43) 공개일자 2008년02월21일

(51) Int. Cl.

G06F 9/00 (2006.01) G06F 9/455 (2006.01)
G06F 9/44 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2006-0077415

(22) 출원일자 2006년08월17일

심사청구일자 2006년08월17일

(71) 출원인

고려대학교 산학협력단

서울 성북구 안암동5가1 고려대학교 내

(72) 발명자

허 훈

서울 종로구 부암동 208-24번지

조윤현

경기 용인시 기흥구 보정동 성호아파트 135동 202호

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

현종철

전체 청구항 수 : 총 11 항

(54) 실시간 확률 제어기를 이용한 불규칙 교란의 제어 방법 및 이를 기록한 기록매체

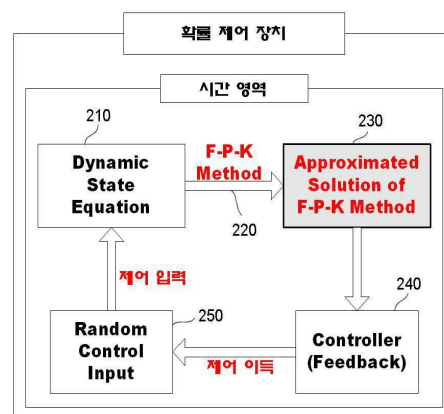
(57) 요약

실시간 확률 제어기의 설계 방법, 그 기록 매체 및 실시간 확률 제어 장치가 개시된다.

본 발명은 제어의 대상이 되는 시스템에 대한 시간 영역에서의 상태 방정식을 산출하는 단계, 상기 상태 방정식에 대해 시간 영역에서 확률 해석을 수행하여 시간 영역에서의 불규칙 교란의 정보를 파워 스펙트럼 밀도의 상수로 변환하는 단계, 상기 확률 해석을 수행한 시간 영역의 시스템에 대하여 확률 밀도 함수의 근사해를 구하고, 상기 근사해를 이용하여 확률 제어기를 설계하는 단계 및 상기 확률 제어기의 제어 이득 값을 시간 영역에서의 제어 신호로 변환하고 상기 제어 신호를 상기 시스템에서 상기 불규칙 교란을 통제하기 위한 제어 신호로 적용하는 단계를 포함한다.

본 발명에 의하면, 불규칙 교란에 대한 시스템의 강인성을 확보하면서 최적의 제어 효과를 기할 수 있는 새로운 형태의 제어기 설계가 가능하고, 확률 밀도 함수의 해를 구하는 방법과 불규칙 신호 발생기의 실시간 적용 알고리즘을 채택함으로써, 종래의 허-확률 제어기의 문제점으로 부각된 실시간 구현상의 문제점을 극복할 수 있는 강인한 제어 방법을 제공할 수 있다.

대표도 - 도2



(72) 발명자

이종복

서울 중구 신당1동 247-17번지

고일관

서울 중구 신당3동 남산타운아파트 25동 1204호

권동철

경기 안양시 동안구 평안동 초원한양아파트 607동
303호

특허청구의 범위

청구항 1

제어의 대상이 되는 시스템에 대한 시간 영역에서의 상태 방정식을 산출하는 단계;

상기 상태 방정식에 대해 시간 영역에서 확률 해석을 수행하여 시간 영역에서의 불규칙 교란의 정보를 파워 스펙트럼 밀도의 상수로 변환하는 단계;

상기 확률 해석을 수행한 시간 영역의 시스템에 대하여 확률 밀도 함수의 근사 해를 구하고, 상기 근사해를 이용하여 확률 제어기를 설계하는 단계; 및

상기 확률 제어기의 제어 이득 값을 시간 영역에서의 제어 신호로 변환하고 상기 제어 신호를 상기 시스템에서 상기 불규칙 교란을 통제하기 위한 제어 신호로 적용하는 단계를 포함하는 실시간 확률 제어기의 설계 방법.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 파워 스펙트럼 밀도의 상수로 변환하는 단계는

상기 상태 방정식에 대해 시간 영역에서 콜모고로프-포커-플랑크 방정식에 의한 확률 해석을 수행하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 실시간 확률 제어기의 설계 방법.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 확률 제어기를 설계하는 단계는

콜모고로프-포커-플랑크 방정식의 해를 구하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 실시간 확률 제어기의 설계 방법.

청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 확률 제어기를 설계하는 단계는

상기 확률 밀도 함수의 근사 해를 이용하여 확률 상태 변수를 구성하는 단계; 및

상기 확률 상태 변수를 이용하여 확률 제어기를 설계하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 실시간 확률 제어기의 설계 방법.

청구항 5

제 1 항에 있어서,

상기 확률 제어기를 설계하는 단계는

퍼지, 선형 이차 가우시안(Linear-Quadratic-Gaussian, LQG), 선형 이차 레귤레이터(Linear-Quadratic-Regulator, LQR), 강화학습 또는 인공지능 중 어느 하나의 알고리즘과 연동하여 시스템을 구성하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 실시간 확률 제어기의 설계 방법.

청구항 6

제 1 항에 있어서,

상기 확률 밀도 함수의 근사해는

백색잡음이 인가되는 시스템의 시스템 파라미터가 각각 A, B이고, c가 상수인 경우, $p(\underline{X}) = ce^{\left(-ABX_1^2 - BX_2^2\right)}$ 의 형태로 표현되는 것을 특징으로 하는 실시간 확률 제어기의 설계 방법.

청구항 7

제 1 항에 있어서,
상기 불규칙 교란은
평균이 0이고 백색잡음인 것을 특징으로 하는 실시간 확률 제어기의 설계 방법.

청구항 8

제 1 항 내지 제 7 항 중 어느 한 항의 방법을 컴퓨터에서 실행시키기 위한 프로그램을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체.

청구항 9

제어의 대상이 되는 시스템에 대한 시간 영역에서의 상태 방정식을 산출하는 상태 방정식 산출부;
상기 상태 방정식에 대해 시간 영역에서 확률 해석을 수행하여 시간 영역에서의 불규칙 교란의 정보를 파워 스펙트럼 밀도의 상수로 변환하는 확률 해석부;
상기 확률 해석을 수행한 시간 영역의 시스템에 대하여 확률 밀도 함수의 근사 해를 구하고, 상기 근사해를 이용하여 확률 제어기를 설계하는 제어기 설계부; 및
상기 확률 제어기의 제어 이득 값을 시간 영역에서의 제어 신호로 변환하고 상기 제어 신호를 상기 시스템에서 상기 불규칙 교란을 통제하기 위한 제어 신호로 적용하는 실시간 확률 제어부를 포함하는 실시간 확률 제어 장치.

청구항 10

제 9 항에 있어서,
상기 확률 해석부는
상기 상태 방정식에 대해 시간 영역에서 콜모고로프-포커-플랑크 방정식에 의한 확률 해석을 수행하는 것을 특징으로 하는 실시간 확률 제어 장치.

청구항 11

제 9 항에 있어서,
상기 제어기 설계부는
콜모고로프-포커-플랑크 방정식의 해를 구하는 것을 특징으로 하는 실시간 확률 제어 장치.

명 세 서

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

- <8> 본 발명은 불규칙 교란에 노출되어 잡음 저감을 필요로 하는 시스템에 관한 것으로, 특히, 실시간 확률 제어기의 설계 방법, 그 기록 매체 및 실시간 확률 제어 장치에 관한 것이다.
- <9> 확률 제어 방법은 시스템 내외부의 불규칙 교란에 대한 정보를 확률 영역에서 고려하는 것이다.
- <10> 불규칙 교란에 노출된 시스템의 제어에 대해서 많은 기술들이 제안되었다. 또한 이를 확률적으로 해석하기 위한 방법으로 LQG, LQR, Kalman 방법 및 허-확률 제어 방법등이 있었다. 그러나 LQG, LQR 그리고 Kalman등의 방법은 불규칙 교란의 정보를 체계적으로 활용하지 못한다.
- <11> 반면, 2002년에 발명된 "허-확률 제어 방법"은 불규칙 교란에 대한 정보를 상수로 변환하는 등 최초로 체계적이고 총체적으로 정보를 활용하는 획기적인 방법이다.

- <12> 도 1은 종래의 확률 제어 방법의 개념도이다.
- <13> 종래의 허-확률 제어기를 이용한 확률 제어 방법은 불규칙 교란에 노출된 시스템을 확률해석을 통하여 노이즈(Noise)나 교란(Disturbance) 등의 불규칙한 교란정보를 상수로 변환시켜 확률 영역에서 제어기를 설계하는 방법이다.
- <14> 도 1의 확률 제어 방법은 시간 영역에서의 시스템 방정식을 F-P-K(Fokker-Planck-Kolmogorov)방정식(이하 "콜모고로프-포커-플랑크 방정식"이라 한다)을 통하여 확률 해석을 수행하게 된다. 이렇게 수행된 확률 해석 결과 구성된 확률 시스템은 실제 물리적인 시간 영역에서의 불규칙 교란의 정보가 상수로 변환된다. 변환된 상수를 이용하여 제어기를 설계하며, 설계된 제어 이득 값은 시간 영역에서의 제어 신호로 사용하는 등 시뮬레이션(Simulation)과 실험을 통하여 입증된 획기적인 확률 제어 개념이다.
- <15> 종래의 "허-확률 제어기"는 이를 적용함에 있어, 콜모고로프-포커-플랑크 방정식을 이용하여 시스템을 구성하였는바, 피드백(Feedback) 과정 및 제어신호의 생성 등의 과정에서 시간 지연이 발생하고, 사용할 수 있는 확률 밀도 함수의 해석적인 해를 구할 수 없는 등의 제한조건이 있다.
- <16> 종래의 "허-확률 제어 방법"은 시간 영역에서의 시스템을 확률 영역에서 해석하기 위하여 콜모고로프-포커-플랑크 방정식을 이용하여 확률 영역에서의 동적 모멘트(Dynamic Moment)방정식으로 변환한다. 이렇게 변환된 동적 모멘트 방정식을 이용하여 제어기를 설계하여 시간 영역에서의 확률제어 신호로 사용한다.
- <17> 그러나, 콜모고로프-포커-플랑크 방정식의 정확한 해를 구할 수 없기에, 동적 모멘트 방정식을 구성하고 이용한다. 또한 시간 영역에서 시스템을 동적 모멘트 방정식으로 변환할 경우 시스템의 차수(Order)가 증가한다. 이러한 이유로 종래의 "허-확률 제어 방법"은 실시간 적용이 곤란하다. 즉, 필수적으로 야기되는 콜모고로프-포커-플랑크 방정식의 구성, 이를 적용하는 과정에서 많은 수작업적인 노력 및 시간이 소요되는 등 실시간으로 확률 제어기를 적용하기가 용이하지 않다.
- <18> 따라서, 종래의 확률 제어 방법은 시스템의 차수(Order)가 지나치게 증가하고, 실시간으로 제어 하기가 용이하지 않은 문제점이 있다.

발명이 이루고자 하는 기술적 과제

- <19> 따라서, 본 발명이 이루고자 하는 첫번째 기술적 과제는 불규칙 교란의 모든 정보를 체계적이고 합리적으로 활용하여 확률 밀도 함수의 해를 구하는 방법을 확보하고 "허-확률 제어 방법"에서의 시스템의 차수가 증가하는 문제점을 해결할 수 있는 실시간 확률 제어기의 설계 방법을 제공하는데 있다.
- <20> 본 발명이 이루고자 하는 두번째 기술적 과제는 상기의 실시간 확률 제어기의 설계 방법을 컴퓨터에서 실행시키기 위한 프로그램을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체를 제공하는데 있다.
- <21> 본 발명이 이루고자 하는 세번째 기술적 과제는 실시간 확률 제어기의 설계 방법이 적용된 실시간 확률 제어 장치를 제공하는데 있다.

발명의 구성 및 작용

- <22> 상기의 첫번째 기술적 과제를 이루기 위하여, 본 발명은 제어의 대상이 되는 시스템에 대한 시간 영역에서의 상태 방정식을 산출하는 단계, 상기 상태 방정식에 대해 시간 영역에서 확률 해석을 수행하여 시간 영역에서의 불규칙 교란의 정보를 파워 스펙트럼 밀도의 상수로 변환하는 단계, 상기 확률 해석을 수행한 시간 영역의 시스템에 대하여 확률 밀도 함수의 근사 해를 구하고, 상기 근사해를 이용하여 확률 제어기를 설계하는 단계 및 상기 확률 제어기의 제어 이득 값을 시간 영역에서의 제어 신호로 변환하고 상기 제어 신호를 상기 시스템에서 상기 불규칙 교란을 통제하기 위한 제어 신호로 적용하는 단계를 포함하는 실시간 확률 제어기의 설계 방법을 제공한다.
- <23> 상기의 두번째 기술적 과제를 이루기 위하여, 본 발명은 상기의 실시간 확률 제어기의 설계 방법을 컴퓨터에서 실행시키기 위한 프로그램을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체를 제공한다.
- <24> 상기의 세번째 기술적 과제를 이루기 위하여, 본 발명은 제어의 대상이 되는 시스템에 대한 시간 영역에서의 상태 방정식을 산출하는 상태 방정식 산출부, 상기 상태 방정식에 대해 시간 영역에서 확률 해석을 수행하여 시간 영역에서의 불규칙 교란의 정보를 파워 스펙트럼 밀도의 상수로 변환하는 확률 해석부, 상기 확률 해석을 수행한 시간 영역의 시스템에 대하여 확률 밀도 함수의 근사 해를 구하고, 상기 근사해를 이용하여 확률 제어기를

설계하는 제어기 설계부 및 상기 확률 제어기의 제어 이득 값을 시간 영역에서의 제어 신호로 변환하고 상기 제어 신호를 상기 시스템에서 상기 불규칙 교란을 통제하기 위한 제어 신호로 적용하는 실시간 확률 제어부를 포함하는 실시간 확률 제어 장치를 제공한다.

- <25> 본 발명은 확률 밀도 함수의 근사해를 구함으로써, 전술한 많은 노력과 시간이 소요되지 않으면서 종래의 "허-확률 제어기"를 실용화하는 설계 방법 및 구현 방법을 제공한다.
- <26> 본 발명에 따르면, "허-확률 제어 방법"의 불규칙 교란을 받는 시스템의 제어를 위하여, 강인성을 확보하면서 실시간 적용을 위한 방법으로 확률 밀도 함수의 해를 구하는 방법을 확보하고 이를 이용한 실시간 "허-확률 제어기"의 설계가 가능하다.
- <27> 이하에서는 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예를 설명하기로 한다. 그러나, 다음에 예시하는 본 발명의 실시예는 여러 가지 다른 형태로 변형될 수 있으며, 본 발명의 범위가 다음에 상술하는 실시예에 한정되는 것은 아니다.
- <28> 도 2는 본 발명에 따른 실시간 확률 제어 장치의 개념도이다.
- <29> 도 2의 알고리즘은 확률 영역에서 제어 방법을 적용하는 것이 아니라 시간 영역에서 확률 해석을 수행한 후, 콜모고로프-포커-플랑크 방정식의 해를 이용하여 시간 영역에서 확률제어 신호를 생성하는 알고리즘이다.
- <30> 도 2에서, 먼저, 시간 영역에서의 상태 방정식을 구성한다(210).
- <31> 다음, 콜모고로프-포커-플랑크 방정식에 의한 확률 해석을 통하여 불규칙 교란의 정보를 상수로 변환 한다(220).
- <32> 불규칙 교란의 정보를 상수로 변환되면, 콜모고로프-포커-플랑크 방정식의 확률밀도 함수의 근사 해를 구한다(230).
- <33> 다음, 근사 해를 통해 구해진 확률 변수를 통하여 확률 시스템을 구성하고 확률 영역에서 제어기를 설계한다(240).
- <34> 위에서 구성한 확률 시스템의 제어 이득 값을 시간 영역에서의 제어 신호로 변환하여 사용한다(250).
- <35> 이에 따르면, 실시간으로 적용이 가능할 뿐만 아니라 시스템 차수(Order)의 증가 등 종래 "허-확률 제어기"의 문제를 해결할 수 있다.
- <36> 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 실시간 확률 제어 장치의 블록도이다.
- <37> 상태 방정식 산출부(310)는 제어의 대상이 되는 시스템에 대한 시간 영역에서의 상태 방정식을 산출한다.
- <38> 확률 해석부(330)는 상태 방정식에 대해 시간 영역에서 확률 해석을 수행하여 시간 영역에서의 불규칙 교란의 정보를 파워 스펙트럼 밀도의 상수로 변환한다. 바람직하게는, 확률 해석부(330)는 상태 방정식에 대해 시간 영역에서 콜모고로프-포커-플랑크 방정식에 의한 확률 해석을 수행할 수 있다.
- <39> 제어기 설계부(340)는 확률 해석을 수행한 시간 영역의 시스템에 대하여 확률 밀도 함수의 근사 해를 구하고, 구해진 근사해를 이용하여 확률 제어기를 설계한다. 바람직하게는, 제어기 설계부(340)는 제어기 설계를 위해 콜모고로프-포커-플랑크 방정식의 해를 구할 수 있다.
- <40> 실시간 확률 제어부(350)는 확률 제어기의 제어 이득 값을 시간 영역에서의 제어 신호로 변환하고 제어 신호를 시스템에서 불규칙 교란을 통제하기 위한 제어 신호로 적용한다.
- <41> 일반적인 시스템에 대한 실시간 허-확률 제어기의 설계를 위하여 아래 예를 들고자 한다.
- <42> 수학적 1과 같이, 어떤 이차(2nd-order) 계가 백색잡음형태의 일정한 파워 스펙트럼 밀도(PSD)를 갖는 불규칙한 랜덤 노이즈(Random Noise) 형태의 외부교란 $f(t)$ 를 받을 때에 이를 제어하고자 한다.

수학적 1

<43>
$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = f(t)$$

- <44> 여기서, ζ 와 ω^n 은 시스템 변수이며, $f(t)$ 는 불규칙 교란이고 평균이 0이며, 백색잡음이다.
- <45> 이때 제어기설계는 다음과 같은 과정을 통하여 설계가 이루어진다.
- <46> F-P-K 과정은 내, 외부 및 상호 영향적인 불규칙 교란에 노출되는 계의 확률밀도 함수의 거동을 해석하는 방법 중에 하나이다. 이러한 콜모고로프-포커-플랑크 방정식의 해는 계의 응답의 확률적인 거동을 제공해준다. 콜모고로프-포커-플랑크 방정식을 유도 하는데 두 가지의 기본적인 가정이 필요하다.
- <47> 첫째, 교란되는 움직임이 불규칙 변동의 1차 미소 값의 중첩으로 연속적인 궤적의 형태로 표현될 수 있도록 불규칙 입력은 항상 충분히 작아야 한다.
- <48> 둘째, 랜덤 과정은 과거에 영향을 받지 않는 마코프 과정이어야 한다. 부유(1차 증분모멘트)계수와 확산(2차 증분모멘트)계수로 구성된 일반적인 형태의 콜모고로프-포커-플랑크 방정식은 다음의 수학식 2와 같다.

수학식 2

- <49>
$$\frac{\partial}{\partial t} p(\underline{X}, t) = - \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial t} \{a_i(\underline{X}, t) p(\underline{X}, t)\} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2}{\partial X_i \partial X_j} \{b_{ij}(\underline{X}, t) p(\underline{X}, t)\}$$
- <50> 여기서, $a_i(\underline{X}, t)$ 는 부유계수이고 $b_{ij}(\underline{X}, t)$ 는 확산계수이다. 즉, $a_i(\underline{X}, t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} E[x_i(t+\Delta t) - x_i(t)]$ 이고, $b_{ij}(\underline{X}, t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} E[\{x_i(t+\Delta t) - x_i(t)\}\{x_j(t+\Delta t) - x_j(t)\}]$ 이다.
- <51> 콜모고로프-포커-플랑크 방정식은 백색잡음 형태의 불규칙 교란에만 사용할 수 있다. 방정식의 해는 응답의 확률론적인 거동을 나타낸다. 그러나, 종래에는 대부분의 경우에 해석적인 방법으로 대상 물리계에 대한 콜모고로프-포커-플랑크 방정식의 해석적인 해를 유도하는 것은 거의 불가능하다고 알려져 있다.
- <52> 많은 연구들은 확률 영역에서 콜모고로프-포커-플랑크 방정식의 정상(Stationary) 혹은 비정상(Non-stationary) 확률 밀도 함수의 해를 구하는 대신, 모멘트 응답을 구하는데 에 집중되었다. 종래의 콜모고로프-포커-플랑크 방정식의 해석과정을 살펴보면 $\Phi(\underline{X})$ 를 일반적인 좌표계 $\underline{X}$ 에 대한 응답이라고 하면 다음의 수학식 3과 같이 표현된다.

수학식 3

- <53>
$$\Phi(\underline{X}) = X_1^{k_1} X_2^{k_2} \cdots X_n^{k_n} = \prod_{i=1}^n X_i^{k_i}$$
- <54> k_i 차 모멘트는 다음의 수학식 4와 같이 표현된다.

수학식 4

- <55>
$$m_{k_1, k_2, \dots, k_n} = E[\Phi(\underline{X})] = \int \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\underline{X}) p(\underline{X}, t) dX_1 dX_2 \cdots dX_n$$
- <56> 여기서, $N = \sum_i k_i$ 이다. 동적모멘트 미분방정식은 콜모고로프-포커-플랑크 방정식의 양변에 $\Phi(\underline{X})$ 를 곱하여 $-\infty < X < \infty$ 영역에 대해 적분을 하면 얻을 수 있다.
- <57> 즉,
$$\dot{m}_{k_1, k_2, \dots, k_n} = \int \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\underline{X}) \frac{\partial p(\underline{X}, t)}{\partial t} dX_1 dX_2 \cdots dX_n =$$
- <58>
$$- \int \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\underline{X}) \sum_{i=1}^n a_i(\underline{X}, t) \frac{\partial p(\underline{X}, t)}{\partial X_i} dX_1 dX_2 \cdots dX_n + \frac{1}{2} \int \cdots$$

<59>
$$\int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\underline{X}) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}(\underline{X}, t) \frac{\partial^2 p(\underline{X}, t)}{\partial X_i \partial X_j} dX_1 dX_2 \cdots dX_n$$
 이다.

<60> 그리고, 일반적인 형태의 동적모멘트 방정식은 다음의 수학식 5와 같다.

수학식 5

<61>
$$\frac{\partial}{\partial t} E[X_1^i X_2^j] = \iint_{-\infty}^{\infty} X_1^i X_2^j \frac{\partial}{\partial t} p(\underline{X}, t) dX_1 dX_2$$

<62> 동적모멘트 방정식은 평균(1차 모멘트)과 자기 상관계수(autocorrelation), 상호 상관계수(2차 모멘트, cross-correlation), 파워 스펙트럼 밀도(PSD)값과 계의 상수 등으로 구성된다. 동적모멘트 방정식에서는 불규칙한 교란에 의해 발생하는 시스템파라미터의 변동이 상수나 간단한 함수 형태의 파워 스펙트럼 밀도(PSD)값으로 표현되고, 시간 영역에서의 계의 변수들은 모멘트 형태로 변형된다. 이 모멘트와 파워 스펙트럼 밀도(PSD)값은 확률 영역에서 계의 거동을 이해하는데 유용한 값들이 된다. 그러므로, 동적모멘트 방정식은 확률 영역에서의 계의 거동에 대하여 설명한다. 즉, 동적모멘트 방정식은 계의 확률론적인 동적특성을 파악할 수 있다.

<63> 그러나, 계산과정에 있어서 위에서 본 것과 같이 종래의 방법은 $\Phi(X)$ 값을 대입해서 적분과정을 직접 손으로 풀어야 가능했고 계산과정 또한 복잡하다. 따라서 종래의 '허-확률 제어기'는 불규칙한 교란을 제어할 수 있는 획기적인 개념이기는 하지만 실시간 제어가 곤란하고 시스템 차수(system order) 또한 증가하는 문제가 있다.

<64> 본 발명은 이전과 같은 복잡한 응답모멘트를 이용하는 대신에 콜모고로프-포커-플랑크 방정식의 근사 해를 구하는 방법을 제공한다. 또한 본 발명은 계산하기 어려운 부분을 수치해석을 이용하여 처리한다.

<65> 콜모고로프-포커-플랑크 방정식의 해는 시스템 확률 밀도 함수의 거동을 보여준다. 이하에서는 콜모고로프-포커-플랑크 방정식의 근사 해를 구하는 방법을 상술한다. 수학식 2를 확산 계수와 부유 계수를 이용하여 Ito의 확률미분방정식으로부터 재정리하면 다음의 수학식 6과 같다.

수학식 6

<66>
$$\frac{\partial p(\underline{X}, t)}{\partial t} = -X_2 \frac{\partial}{\partial X_1} p(\underline{X}, t) + (X_1 + X_2) \frac{\partial}{\partial X_2} p(\underline{X}, t) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial X_2^2} p(\underline{X}, t)$$

<67> 양변에 $\lim$ 을 취해주면 다음의 수학식 7과 같다.

수학식 7

<68>
$$\lim_{X \rightarrow \infty} \frac{\partial p(\underline{X}, t)}{\partial t} = \lim_{X \rightarrow \infty} \left\{ -X_2 \frac{\partial}{\partial X_1} p(\underline{X}, t) + (X_1 + X_2) \frac{\partial}{\partial X_2} p(\underline{X}, t) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial X_2^2} p(\underline{X}, t) \right\}$$

<69> 확률 밀도 함수 PDF(Probability Density Function)의 근사해를 다음의 수학식 8과 같이 전형적인 형태로 가정한다.

수학식 8

<70>
$$p(\underline{X}) = e^{(-ABX_1^2 - BX_2^2)}$$

<71> 여기서, 백색잡음을 받는 시스템에서, A 와 B 는 시스템 파라미터이다.

<72> 랜덤시스템(Random System)의 정상상태응답(Stationary Response)의 확률 밀도 함수(PDF) $p(\underline{X})$ 는 다음의 수학식 9를 만족한다.

수학식 9

$$p(\underline{X}) \geq 0$$

$$\lim_{X \rightarrow \infty} p(\underline{X}, t) = 0$$

$$\int p(\underline{X}) dX = 1$$

<73>

<74> 일반적으로 콜모고로프-포커-플랑크 방정식은 $p(X, t)$ 에 정확하게 만족하지 않는다. 그 이유는 $p(X, t)$ 는 단지 근사해이기 때문이다. 위의 과정을 통하여 다음의 수학식 10을 구한다.

수학식 10

$$\frac{\partial p(\underline{X}, t)}{\partial t} = -B e^{(-ABX_1^2 - BX_2^2)}$$

<75>

<76> 여기서 $\lim_{X \rightarrow \infty} \frac{\partial p(\underline{X}, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \lim_{X \rightarrow \infty} p(\underline{X}, t) = 0$, $\lim_{X \rightarrow \infty} e^{(-ABX_1^2 - BX_2^2)} = 0$ 이다.

<77> 따라서 위의 과정을 거친 확률 밀도 함수의 최종적인 해는 다음의 수학식 11과 같이 취한다.

수학식 11

$$p(\underline{X}) = c e^{(-ABX_1^2 - BX_2^2)}$$

<78>

<79> 여기서 c 는 상수 값, A, B 는 대상계의 시스템 파라미터(Parameter)이다. 위에서 구한 확률밀도 함수의 해를 이용하여 확률해석을 수행하며 이를 시스템의 상태변수와 결합하여 제어기를 설계한다.

<80> 도 4는 본 발명의 다른 실시예에 따른 실시간 확률 제어기의 설계 방법의 흐름도이다.

<81> 먼저, 제어의 대상이 되는 시스템에 대한 시간 영역에서의 상태 방정식을 산출한다(410 과정). 이 과정(410 과정)은 시간 영역의 지배방정식을 구하는 과정으로서, 제어의 대상이 되는 시스템에 대한 시간 영역에서의 지배 방정식을 구하는 과정이다. 구해진 시스템의 지배방정식은 상태방정식(state equation)의 형태로 나타낼 수 있다.

<82> 다음, 상태 방정식에 대해 시간 영역에서 확률 해석을 수행하여 시간 영역에서의 불규칙 교란의 정보를 파워 스펙트럼 밀도의 상수로 변환한다(420 과정). 즉, 시간 영역의 지배 방정식에 대한 확률해석을 수행한다. 시간 영역의 지배방정식에서 시스템에 가해지는 외부 나 내부 혹은 상호영향적(interactive)인 교란은 실 물리계에 있어서 다양한 잡음형태를 갖는 비결정적 시계열(indeterministic time series)형태로 나타나고, 이는 시스템의 파라미터들을 불규칙하게 가진시키기도 한다. 이러한 시간 영역에서의 불규칙 교란의 정보는 확률 해석을 통하여 파워 스펙트럼 밀도(Power Spectral Density, PSD)의 상수로 변환이 된다.

<83> 불규칙 교란의 정보가 파워 스펙트럼 밀도의 상수로 변환되면, 확률 해석을 수행한 시간 영역의 시스템에 대하여 확률 밀도 함수의 근사 해를 구하고, 근사해를 이용하여 확률 제어기를 설계한다(430 과정). 이 과정(430 과정)에서는, 콜모고로프-포커-플랑크 방정식을 이용하여 확률 해석을 수행한 시간 영역의 시스템에 대하여 확률 밀도 함수의 해를 이용하여 확률 제어기를 설계할 수 있다. 확률 밀도 함수의 해를 이용할 경우 시스템의 차수(Order)가 증가하지 않으며, 실시간 적용이 가능한 시스템으로 변환된다.

<84> 이렇게 변환된 시스템은 확률 영역이 아닌 시간 영역에서 종래 제어 방법들(퍼지, 선형 이차 가우시안(Linear-Quadratic-Gaussian, LQG), 선형 이차 레귤레이터(Linear-Quadratic-Regulator, LQR), 강화학습 또는 인공지능 등)의 알고리즘을 쉽게 연동하여 구성할 수 있는 장점을 갖게 된다.

<85> 또한 확률 해석을 통하여 불규칙 교란에 대한 정보가 상수로 되어 용이하게 제어기를 구성할 수 있다.

- <86> 마지막으로, 확률 제어기의 제어 이득 값을 시간 영역에서의 제어 신호로 변환하고 제어 신호를 시스템에서 불규칙 교란을 통제하기 위한 제어 신호로 적용한다(440 과정). 이 과정(440 과정)에서는 구해진 제어입력의 파워 스펙트럼 밀도(PSD) 값을 제어신호로 사용할 수 있다.
- <87> 확률 해석을 통하여 구해진 제어 입력 값은 파워 스펙트럼 밀도(PSD) 값으로 적용되며 이를 시스템에 가해진 불규칙 교란을 통제하기 위한 제어신호로 사용된다.
- <88> 바람직하게는, 제어신호로 사용하기 위해 불규칙 신호 발생(Monte-Carlo)방법을 적용하여 시간 영역에서의 제어 신호를 생성할 수 있다. 불규칙 신호발생기 또한 실시간 적용을 위한 알고리즘에 따라 시간지연의 문제를 실용적으로 극소화 할 수 있다.
- <89> 도 5는 도 4의 제어기 설계 과정(430 과정)의 상세 흐름도이다.
- <90> 먼저, 확률 밀도 함수의 근사해를 산출한다(531 과정). 이때, 근사해는 수학식 11의 형태일 수 있다.
- <91> 다음, 산출된 확률 밀도 함수의 근사 해를 이용하여 확률 상태 변수를 구성한다(532 과정).
- <92> 마지막으로, 확률 상태 변수를 이용하여 확률 제어기를 설계한다(533 과정).
- <93> 본 발명에 따른 실시간 허-확률 제어 방법은 수치 모의실험(Simulation)을 통하여 그 가능성을 확인하였다. 또 실제 실험(Physical Experiment)을 통하여, 불규칙 교란을 받는 시스템에 본 발명에 따른 실시간 확률 제어 방법을 구현하였을 경우 실시간으로 제어가 가능한 것을 알 수 있다.
- <94> 도 6은 본 발명에 따른 실시간 확률 제어기의 설계 방법에 따른 시간 응답 X_1 을 도시한 그래프이다. 도 7은 본 발명에 따른 실시간 확률 제어기의 설계 방법에 따른 제곱평균의 시간응답 $E[X_1^2]$ 을 도시한 그래프이다.
- <95> 도 6 및 도 7에서와 같이, 점선으로 표시된 경우 즉, 본 발명에 따른 실시간 확률 제어를 적용하지 않은 경우(Uncontrolled Respose)는 시간에 따른 응답 편차가 큰 반면에 본 발명에 따른 실시간 확률 제어를 적용한 경우 즉, 실선으로 표시된 경우는 시간에 따른 응답 편차가 작다는 것을 알 수 있다.
- <96> 본 발명에 따른 실시간 확률 제어기는 상술한 단계들을 거쳐 설계가 이루어진다. 또한 확률 해석을 통하여 획득된 시스템에 대해서 상황에 따라 가장 적절한 최적의 제어 방법을 도입하여 제어기를 설계한다. 이를 통하여 불규칙 교란에 대한 시스템의 강인성을 확보하면서 최적의 제어 효과를 기할 수 있는 새로운 형태의 제어기 설계가 이루어진다. 또한, 본 발명은 확률 밀도 함수의 해를 구하는 방법과 불규칙 신호 발생기의 실시간 적용 알고리즘을 채택함으로써, 종래의 허-확률 제어기의 문제점으로 부각된 실시간 구현상의 문제점을 극복할 수 있는 강인한 제어 방법을 제공할 수 있다.
- <97> 바람직하게는, 본 발명의 실시간 확률 제어기의 설계 방법을 컴퓨터에서 실행시키기 위한 프로그램을 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체에 기록하여 제공할 수 있다.
- <98> 본 발명은 소프트웨어를 통해 실행될 수 있다. 소프트웨어로 실행될 때, 본 발명의 구성 수단들은 필요한 작업을 실행하는 코드 세그먼트들이다. 프로그램 또는 코드 세그먼트들은 프로세서 판독 가능 매체에 저장되거나 전송 매체 또는 통신망에서 반송파와 결합된 컴퓨터 데이터 신호에 의하여 전송될 수 있다.
- <99> 컴퓨터가 읽을 수 있는 기록매체는 컴퓨터 시스템에 의하여 읽혀질 수 있는 데이터가 저장되는 모든 종류의 기록 장치를 포함한다. 컴퓨터가 읽을 수 있는 기록 장치의 예로는 ROM, RAM, CD-ROM, DVD±ROM, DVD-RAM, 자기 테이프, 플로피 디스크, 하드 디스크(hard disk), 광데이터 저장장치 등이 있다. 또한, 컴퓨터가 읽을 수 있는 기록매체는 네트워크로 연결된 컴퓨터 장치에 분산되어 분산방식으로 컴퓨터가 읽을 수 있는 코드가 저장되고 실행될 수 있다.
- <100> 본 발명은 도면에 도시된 일 실시예를 참고로 하여 설명하였으나 이는 예시적인 것에 불과하며 당해 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 실시예의 변형이 가능하다는 점을 이해할 것이다. 그러나, 이와 같은 변형은 본 발명의 기술적 보호범위내에 있다고 보아야 한다. 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호범위는 첨부된 특허청구범위의 기술적 사상에 의해서 정해져야 할 것이다.

발명의 효과

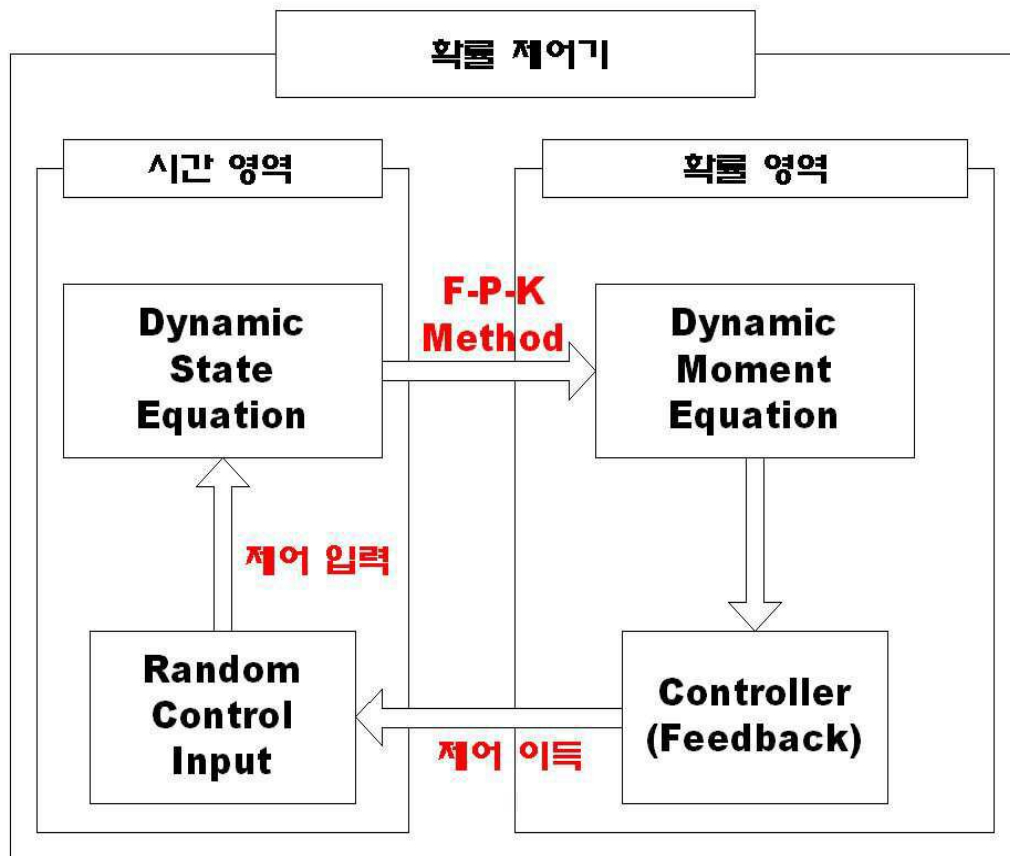
<101> 상술한 바와 같이, 본 발명에 의하면, 불규칙 교란에 대한 시스템의 강인성을 확보하면서 최적의 제어 효과를 기할 수 있는 새로운 형태의 제어기 설계가 가능하고, 확률 밀도 함수의 해를 구하는 방법과 불규칙 신호 발생기의 실시간 적용 알고리즘을 채택함으로써, 종래의 허-확률 제어기의 문제점으로 부각된 실시간 구현상의 문제점을 극복할 수 있는 강인한 제어 방법을 제공할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

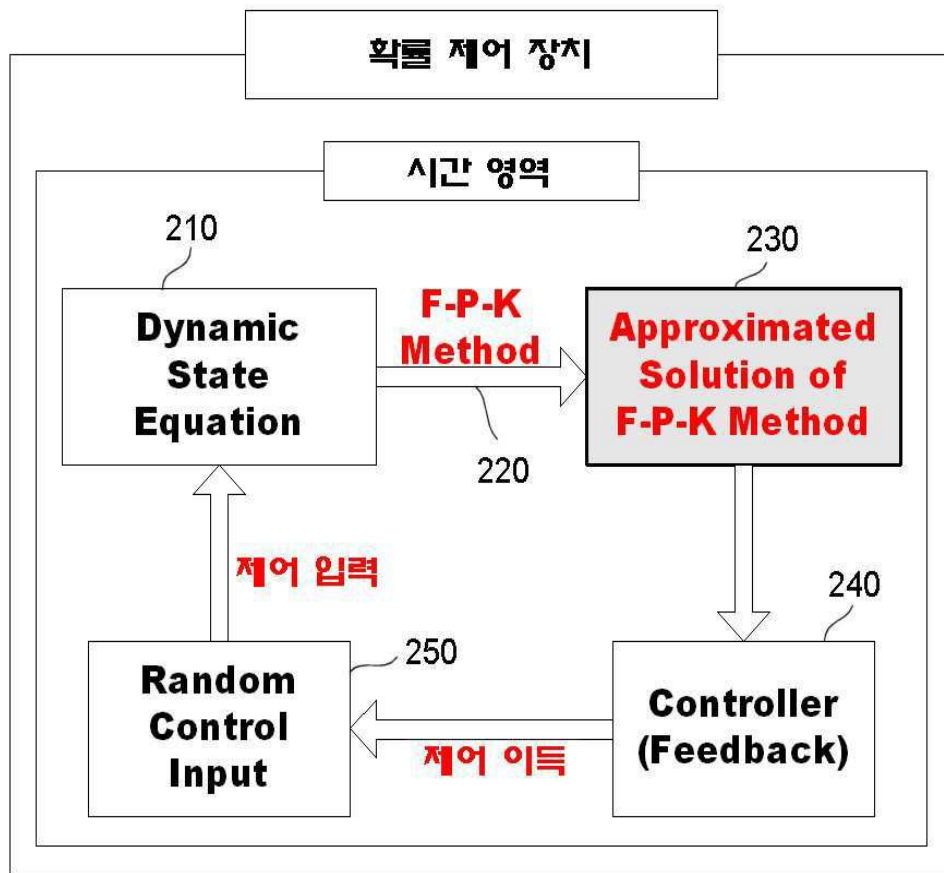
- <1> 도 1은 종래의 확률 제어 방법의 개념도이다.
- <2> 도 2는 본 발명에 따른 실시간 확률 제어 장치의 개념도이다.
- <3> 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 실시간 확률 제어 장치의 블록도이다.
- <4> 도 4는 본 발명의 다른 실시예에 따른 실시간 확률 제어기의 설계 방법의 흐름도이다.
- <5> 도 5는 도 4의 제어기 설계 과정의 상세 흐름도이다.
- <6> 도 6은 본 발명에 따른 실시간 확률 제어기의 설계 방법에 따른 시간 응답을 도시한 그래프이다.
- <7> 도 7은 본 발명에 따른 실시간 확률 제어기의 설계 방법에 따른 제어평균의 시간응답을 도시한 그래프이다.

도면

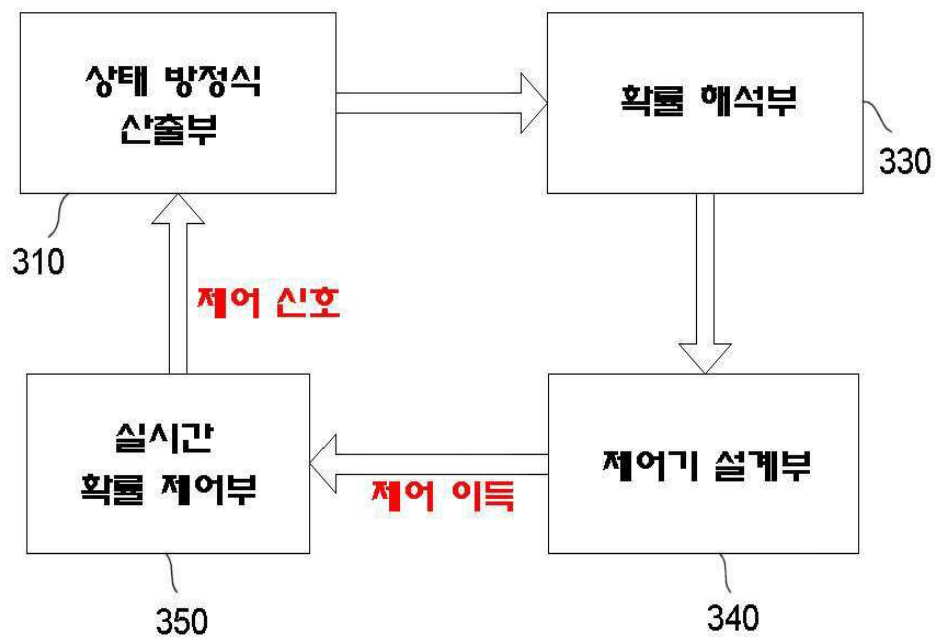
도면1



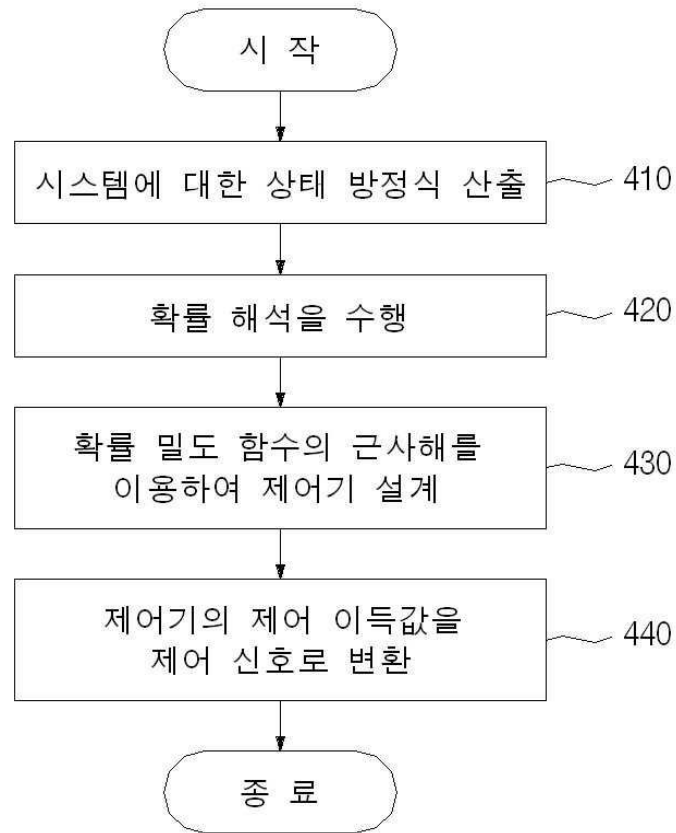
도면2



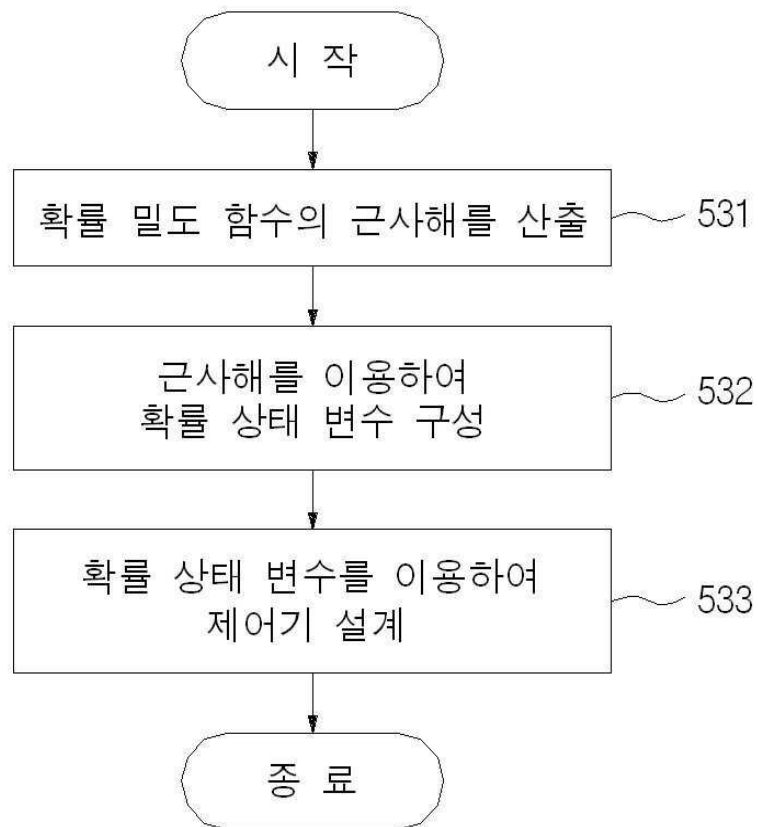
도면3



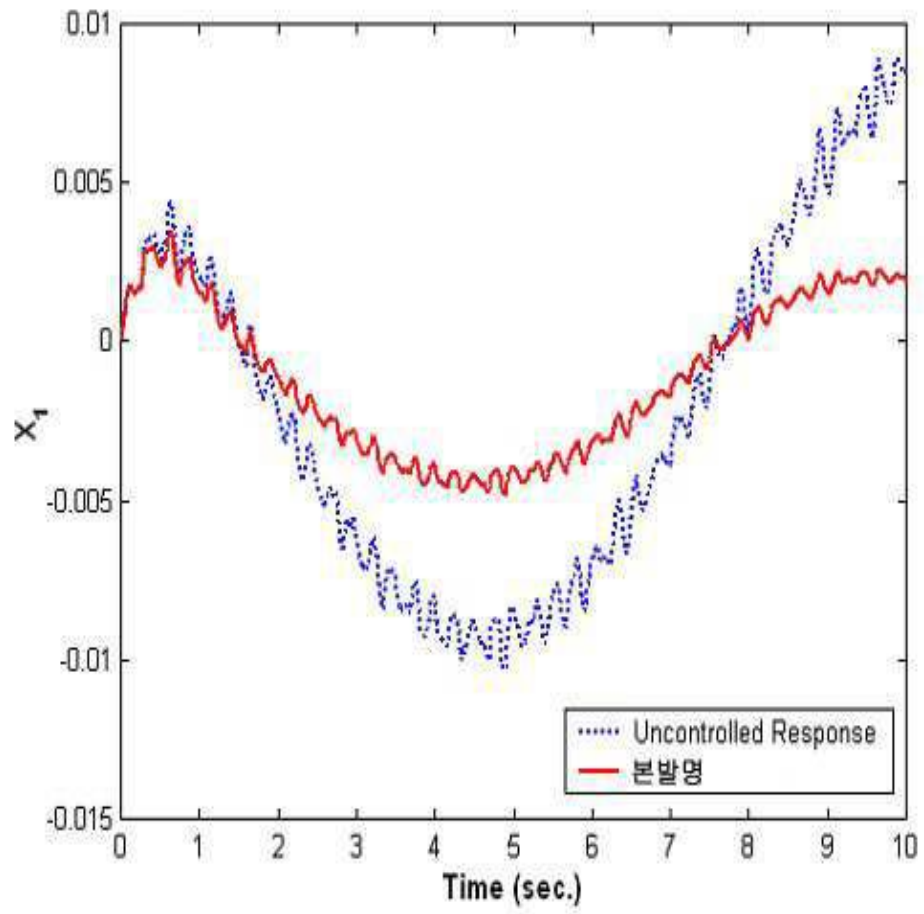
도면4



도면5



도면6



도면7

