



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2016-0020108

(43) 공개일자 2016년02월23일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G05B 13/00 (2006.01) G05D 13/00 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2014-0105015

(22) 출원일자 2014년08월13일

심사청구일자 2014년08월13일

(71) 출원인

인하대학교 산학협력단

인천광역시 남구 인하로 100, 인하대학교 (용현동)

(72) 발명자

이영삼

인천광역시 연수구 용담로 14 하나아파트 107동 1503호

(74) 대리인

이원희

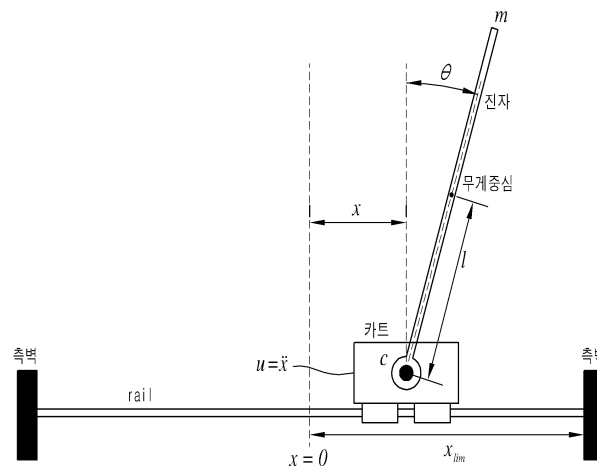
전체 청구항 수 : 총 6 항

(54) 발명의 명칭 입력 및 출력의 제약을 갖는 도립진자의 스윙업 제어 시스템

(57) 요약

카트의 동작으로 도립진자가 스윙업 제어되는 시스템에 있어서, 상기 스윙업 제어가 이루어지는 동안, 상기 도립진자가 만족해야 하는 제약 조건을 만족시키면서, 제 1 비용함수 및 제 2 비용함수를 이용하여 상기 도립진자의 스윙업을 제어하는 제어부; 및 상기 제약 조건, 제 1 비용함수 및 제 2 비용함수를 저장하는 저장부를 포함하는 입력 및 출력의 제약을 갖는 도립진자의 스윙업 제어 시스템을 제공한다.

대표도 - 도2



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 NIPA-2014-H0401-14-1003

부처명 미래창조과학부

연구관리전문기관 정보통신산업진흥원

연구사업명 IT 융합 고급인력과정 지원사업

연구과제명 IT 융합 재활의료기기 센터(생체신호를 이용한 IT기반 재활의료기기 개발)

기 여 율 1/1

주관기관 한국산업기술대학교

연구기간 2011.06.01 ~ 2014.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

카트의 동작으로 독립진자가 스윙업 제어되는 시스템에 있어서,

상기 스윙업 제어가 이루어지는 동안, 상기 독립진자가 만족해야 하는 제약 조건을 만족시키면서, 제 1 비용함수 및 제 2 비용함수를 이용하여 상기 독립진자의 스윙업을 제어하는 제어부; 및

상기 제약 조건, 제 1 비용함수 및 제 2 비용함수를 저장하는 저장부

를 포함하는 입력 및 출력의 제약을 갖는 독립진자의 스윙업 제어 시스템.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 제어부는,

스윙업이 이루어지는 동안 독립진자가 만족해야 하는 제약 조건을 만족시키면서, 제 1 비용함수 및 제 2 비용함수를 이용하여 피드포워드 궤적을 산출하고, 상기 산출된 피드포워드 궤적을 이용하여 상기 독립진자의 스윙업을 최적으로 제어하는 것을 특징으로 하는 입력 및 출력의 제약을 갖는 독립진자의 스윙업 제어 시스템.

청구항 3

제 1항에 있어서,

상기 제약 조건은 상기 스윙업이 이루어지는 동안 만족해야 하는 상기 카트의 변위, 속도, 가속도의 범위이고,

상기 카트의 변위, 속도, 가속도의 범위는 각각 $|x_1| \leq x_{lim}$, $|\dot{x}_2| \leq \dot{x}_{lim}$, $|u| \leq u_{lim}$ 인 것을 특징으로 하는 입력 및 출력의 제약을 갖는 독립진자의 스윙업 제어 시스템.

청구항 4

제 1항에 있어서,

상기 제약 조건은 스윙업을 시작하는 시간($t=0$) 및 스윙업에 소요되는 시간($t=T$)에서 만족시켜야 하는 경계치 조건인 것을 특징으로 하는 입력 및 출력의 제약을 갖는 독립진자의 스윙업 제어 시스템.

청구항 5

제 1항에 있어서,

상기 제 1 비용함수는 하기 식(1)이고, 제 2 비용함수는 하기 식(2)인 것을 특징으로 하는 입력 및 출력의 제약을 갖는 독립진자의 스윙업 제어 시스템:

$$J = \int_0^T (a\xi_1^2 + bu^2) dt$$

식(1)

여기서, ξ_1 는 변위, u 는 가속도이고, a 및 b 는 변위 및 가속도에 가중치를 주는 변수이며, $a, b \geq 0$ 이고,

$$J = \int_0^T 1 dt$$

식(2)

청구항 6

제 4항에 있어서,

상기 경계치 조건은 변위를 의미하는 ξ_1 , 속도를 의미하는 ξ_2 , 각변위를 의미하는 ξ_3 , 각속도를 의미하는 ξ_4 , 가속도를 의미하는 u 를 포함하며, 상기 ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 , ξ_4 및 u 의 경계치 조건은

$$\xi_1(0) = 0, \xi_2(0) = 0, \xi_3(0) = -\pi, \xi_4(0) = 0$$

$$\xi_1(T) = 0, \xi_2(T) = 0, \xi_3(T) = 0, \xi_4(T) = 0$$

$$u(0) = 0, u(T) = 0$$

이며, 상기 T 는 스윙업 소요시간인 것을 특징으로 하는 입력 및 출력의 제약을 갖는 도립진자의 스윙업 제어 시스템.

발명의 설명

기술 분야

[0001]

본 발명은 입력 및 출력의 제약을 갖는 도립진자의 스윙업 제어 시스템에 관한 것이다. 보다 상세하게는 입력 및 출력에 제약을 갖는 도립진자를 제어함에 있어 제약 조건을 조직적으로 고려함으로써 구동부 선택에 더 큰 자유도를 줄 수 있는 제어 시스템에 관한 것이다.

배경 기술

[0002]

학생들에게 제어공학에 대한 흥미를 유발하고 피드백제어의 효용성을 효과적으로 전달하기 위해 오래전부터 도립진자 시스템이 교육에 사용되어 왔다.

[0003]

도립진자 시스템은 불안정 시스템이고, 비선형 특성을 가지고 있기 때문에 제어기 설계의 측면에서 보았을 때, 비교적 난이도가 높은 시스템에 속한다고 볼 수 있다. 또한, 구동기의 개수에 비해 제어의 대상 변수가 더 많은 시스템이기도 하다. 이러한 이유로, 지금까지 도립진자의 제어에 대한 다양한 연구들이 진행되어 왔으며, 이때, 도립진자의 제어는 도립 상태에서의 제어보다는 진자를 아래쪽에서부터 위쪽으로 흔들어 올리는 스윙업 제

어에 초점을 맞추어 연구들을 진행하여 왔다.

[0004] 스윙업 제어의 가장 기본이 되는 방법은 에너지 기반 제어를 이용하는 방법이다. 에너지 기반의 제어를 이용한 스윙업 제어는 진자가 가지는 에너지를 상태변수를 이용하여 정의하고, 도립 상태의 진자가 가지는 에너지 값을 가지게끔 진자를 흔들어 에너지를 주입함으로써 진자를 도립시키는 제어방식을 말한다. 이를 위해 진자를 움직여주는 카트(cart)의 가속도를 제어입력으로 본 수학적 모델식을 사용한다. 초창기 스윙업 제어에서는 카트가 무한한 길이의 레일위에서 운동하는 것을 가정하였으나, 대부분의 도립진자 시스템의 레일 길이는 제약이 있으므로 이를 고려하기 위한 제어 기법이 제안되었다.

[0005] 하지만, 이러한 방법들에서도 제어가 설계 단계에서부터 스윙업이 이루어지는 동안 카트가 어느 정도 범위 내에서 머무를 것인지는 알 수 없고, 단지 계수 튜닝을 통해서 시행착오적으로 카트의 변위에 영향을 주는 방식으로 레일의 길이 제약을 고려할 수 있을 뿐이다.

[0006] 종전의 스윙업 제어가 흔들는 동작을 여러 번으로 나누어 점진적으로 진자를 흔들어 올리기 때문에 스윙업까지 소요되는 시간이 비교적 긴 방식인데 비해 최근 연구된 스윙업 제어는 진자를 흔들어 올리기 위해 필요한 카트의 궤적 자체를 사전에 계산해 놓고, 계산된 궤적을 카트가 잘 추종하게끔 피드포워드 제어와 피드백 제어를 같이 사용하여 단시간에 진자를 세워 올리는 방식을 사용한다.

[0007] 하지만, 이러한 방식에서는 피드포워드 궤적을 특정한 형태의 함수집합내에서 찾아내는 방식을 사용하기 때문에 자유도에 제약이 있고, 도립진자의 입력 및 출력 제약조건을 조직적으로 고려하지 못하는 단점이 있다.

[0008] 따라서, 상기 단점을 극복할 수 있는 새로운 도립진자를 스윙업하는 방법을 제안될 필요성이 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는 시행착오 없는 스윙업 제어를 제공하는 입력 및 출력의 제약을 갖는 도립진자의 스윙업 제어 시스템을 제공하는데 있다.

[0010] 본 발명이 이루고자 하는 다른 기술적 과제는 자유도에 대한 제약을 줄이고, 도립진자의 입력 및 출력 제약 조건을 조직적으로 고려하기 위한 입력 및 출력의 제약을 갖는 도립진자의 스윙업 제어 시스템을 제공하는데 있다.

과제의 해결 수단

[0011] 상기 목적을 달성하기 위한, 본 발명에 따른 입력 및 출력의 제약을 갖는 도립진자의 스윙업 제어 시스템은 스윙업이 이루어지는 동안 도립진자가 만족해야 하는 제약 조건을 만족시키면서, 제 1 비용함수 및 제 2 비용함수를 이용하여 상기 도립진자의 스윙업을 제어하는 제어부; 및 상기 제약 조건, 제 1 비용함수 및 제 2 비용함수를 저장하는 저장부를 포함할 수 있다.

[0012] 또한, 상기 제어부는 스윙업이 이루어지는 동안 도립진자가 만족해야 하는 제약 조건을 만족시키면서, 제 1 비용함수 및 제 2 비용함수를 이용하여 피드포워드 궤적을 산출하고, 상기 산출된 피드포워드 궤적을 이용하여 상기 도립진자의 스윙업을 최적으로 제어할 수 있다. 이때, 상기 제약 조건은 상기 스윙업이 이루어지는 동안 만

축해야 하는 변위, 속도, 가속도의 범위이다.

발명의 효과

- [0013] 본 발명에 따른 제목에 의하면, 궤적생성 단계에서 스윙업 제어의 제약 조건을 고려하여 더 유연하고, 조직적인 스윙업 제어를 제공할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

- [0014] 도 1은 본 발명에 따른 독립진자의 스윙업 제어 시스템을 도시한 블록도이다.
 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 독립진자 시스템의 개념도를 도시한다.
 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 독립진자 시스템의 실제 이미지를 도시한다.
 도4는 본 발명의 일 실시예에 따른 2-자유도 스윙업 제어 구조를 도시한 블록도이다.
 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 비용함수를 다르게 하여 얻어진 독립진자의 스윙업 궤적을 도시한 그래프이다.
 도 6은 종래의 독립진자의 스윙업 제어의 실험 결과를 도시한 그래프이다.
 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 모델계수에 따른 스윙업 제어의 실험 결과를 도시한 그래프이다.
 도 8은 본 발명의 다른 실시예에 따른 2-자유도 스윙업 제어 구조를 도시한 블록도이다.
 도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 스윙업 제어의 실험 결과를 도시한 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0015] 이하 본 발명의 실시예를 첨부된 도면들을 참조하여 상세히 설명할 수 있다. 우선 각 도면의 구성요소들에 참조 부호를 부가함에 있어서, 동일한 구성요소들에 대해서는 비록 다른 도면상에 표시되더라도 가능한 한 동일한 부호를 가지도록 하고 있음에 유의해야 할 수 있다. 또한 본 발명을 설명함에 있어, 관련된 공지 구성 또는 기능에 대한 구체적인 설명이 당업자에게 자명하거나 본 발명의 요지를 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명은 생략할 수 있다.

- [0016] 도 1은 본 발명에 따른 독립진자의 스윙업 제어 시스템을 도시한 블록도이다.

- [0017] 도 1을 참조하면, 독립진자의 스윙업 제어 시스템(1)은 입력부(110), 제어부(130), 출력부(150) 및 저장부(170)를 포함할 수 있다. 독립진자의 스윙업 제어 시스템(1)은 도 2를 참조하여 하기에 설명한다.

- [0018] 입력부(110)는 독립진자가 독립상태가 되도록 하는 스윙업 제어를 위해, 스윙업동안 독립진자가 만족해야 하는 제약 조건을 입력할 수 있다.

[0019]

- [0020] 제어부(130)는 입력부(110)에서 입력받은 제약 조건을 기초로 제 1 비용함수 및 제 2 비용함수를 이용하여 독립진자의 스윙업을 제어할 수 있다. 즉, 제어부(130)는 스윙업이 이루어지는 동안 독립진자가 만족해야 하는 제약 조건을 만족시키면서, 제 1 비용함수 및 제 2 비용함수를 이용하여 피드포워드 궤적 산출을 할 수 있으며, 이를 통해, 독립진자의 스윙업을 제어할 수 있다.

- [0021] 상기 제약 조건은 스윙업이 이루어지는 동안 만족해야 하는 카트의 변위, 속도, 가속도의 범위일 수 있으며, 상

기 카트의 변위, 속도, 가속도의 범위는 각각 $|x_1| \leq x_{lim}$, $|x_2| \leq \dot{x}_{lim}$, $|u| \leq u_{lim}$ 이다. 여기서, x_{lim} , $\dot{x}_{lim}$,

$u_{\lim}$ 는 각각 양수로써, 변위, 속도, 가속도의 절대값에 대한 상한치를 나타낸다.

[0022]

또한, 상기 제약 조건은 스윙업을 시작하는 시간($t=0$) 및 스윙업에 소요되는 시간($t=T$)에서 만족시켜야 하는 경계치 조건일 수 있으며, 상기 경계치 조건은,

$$\xi_1(0)=0, \xi_2(0)=0, \xi_3(0)=-\pi, \xi_4(0)=0$$

$$\xi_1(T)=0, \xi_2(T)=0, \xi_3(T)=0, \xi_4(T)=0$$

$$u(0)=0, u(T)=0$$

[0023]

[0024]

일 수 있다. 이 때, T 는 스윙업에 소요되는 시간을 나타낸다. 또한, ξ_1 , ξ_2 는 각각 변위와 속도를 의미하며, ξ_3 , ξ_4 는 각각 각변위와 각속도를 의미한다.

[0025]

또한, 상기 제약 조건은 독립진자 시스템의 수학적 모델식을 나타내는 미분 방정식으로부터 형성된 운동 방정식일 수 있다. 상기 운동 방정식은 수학식 5이며, 도 2를 참조하여 하기에 설명될 것이다.

[0026]

상기 제 1 비용함수 및 제 2 비용함수는 $J(\xi, u, T)$ 이다. 이 때, 제 1 비용함수의 예를 들면, 하기의 수학식 1과 같다. 제 1 비용함수는 스윙업을 수행하는 동안 카트의 변위와 카트의 가속도를 중점적으로 고려하는 비용함수로써, a와 b의 상대적인 값을 조정하여 카트의 변위와 카트의 가속도 중 어떤 값에 더 비중을 둘 것인지 조절할 수 있다. 또한, 스윙업에 소요된 시간을 최소로 만들고자 하는 경우는 하기의 수학식 2와 같은 제 2 비용함수를 사용할 수 있다.

수학식 1

$$J = \int_0^T (a\xi_1^2 + bu^2) dt, a, b \geq 0$$

[0027]

[0028]

여기서, ξ_1 는 변위, u 는 가속도이고, a 및 b 는 변위 및 가속도에 가중치를 주는 변수이다.

수학식 2

$$J = \int_0^T 1 dt$$

[0029]

- [0030] 또한, 제어부(130)는 피드포워드 제어와 피드백 제어를 함께 사용하는 2-자유도 스윙업 제어 구조를 이용하여 스윙업 제어를 할 수 있다. 즉, 제어부(130)는 2-자유도 스윙업 제어 구조를 이용하여 스윙업 궤적을 생성한다.
- [0031] 보다 상세하게, 제어부(130)는 피드포워드 제어가 독립 진자에 인가한 가속도 궤적을 이용하여 스윙업이 이루어 지도록 하고, 보다 정확한 스윙업 궤적을 얻기 위해, 보상기 역할을 하는 피드백 제어를 같이 사용한다. 상기 2-자유도 스윙업 제어 구조는 도 4를 참조하여 하기에 설명한다.
- [0032] 출력부(150)은 제어부(130)에서 제어한 독립진자의 스윙업을 기초로 독립진자를 스윙업할 수 있다. 즉, 출력부(150)은 진자를 진자를 아래쪽에서부터 위쪽으로 흔들어 독립시킬 수 있다.
- [0033] 저장부(170)은 제어부(130)에서 산출된 값들을 저장할 수 있다. 즉, 저장부(170)은 스윙업 제어가 되도록 산출된 값들, 예를 들면, 피드포워드 궤적을 저장할 수 있다. 또한, 저장부(170)은 제약 조건, 제 1 비용함수, 제 2 비용함수를 저장할 수 있다.
- [0034] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 독립진자 시스템의 개념도를 도시한다.
- [0035] 도 2를 참조하면, 독립진자 시스템은 카트형이고, 스윙업 제어를 다룰 수 있다.
- [0036] 상기 독립진자 시스템은 보통의 중력 진자에서 중심의 위치가 회전 중심보다 연직 방향으로 아래쪽에 있는 것과 상반되게, 연직 방향으로 위쪽에 중심이 있는 진자를 이용한 시스템이다. 즉, 독립진자 시스템은 진자를 뒤집은 상태의 시스템으로 불안정하며, 임의의 입력값을 넣어 평형 상태를 유지하도록 제어기를 설계하는 방법을 학습하는 용도로 많이 사용된다.
- [0037] 상기 스윙업 제어는 에너지 조절을 통해 독립진자 시스템의 진자를 늘어뜨린 상태에서 진자를 흔들어서 수직으로 위치시키고, 진자가 수직 가까이에 위치하면 제어한다.

- [0038] 여기서, 도 2를 참조하여 독립진자 시스템의 구조를 보다 상세하게 설명하면, x 는 레일 중심으로부터 측정된 카트의 변위를, θ 는 지면과 수직을 이루는 선으로부터 진자막대가 가지는 회전변위, m 은 진자의 질량, l 은 진자의 회전축에서 진자의 무게중심까지의 거리, c 는 진자의 회전축에서 나타나는 회전 마찰계수, x_{lim} 은 레일의 중심으로부터 양끝의 벽까지의 거리를 나타낸다. 이러한 독립진자 시스템을 통해, 독립진자 시스템의 수학적 모델을 추출할 수 있다. 이 때, 독립진자 시스템의 수학적 모델의 상세한 수학적식은 수학식 3과 같다.

수학식 3

[0039]
$$(I+ml^2)\ddot{\theta}+ml(\cos\theta)\ddot{x}=mgl(\sin\theta)-c\dot{\theta}$$

- [0040] 이 때, I 는 진자의 무게중심에 대한 회전관성 모멘트, $g=9.8m/s^2$ 이다. 수학식 1에서 나타낸 바와 같이, 독립진자 운동은 카트의 가속도에 의해 결정된다. 카트의 가속도 $\ddot{x}$ 를 독립진자 시스템의 제어 입력 u 로 보면 독립진자의 운동방정식의 상세한 수학적식은 수학식 4와 같다.

수학식 4

$$\ddot{x} = u,$$

$$\ddot{\theta} = \frac{mgl(\sin\theta) - c\dot{\theta}}{I + ml^2} - \frac{ml(\cos\theta)}{I + ml^2}u$$

[0041]

[0042]

이 때, $\xi_1 = x$, $\xi_2 = \dot{x}$, $\xi_3 = \theta$, $\xi_4 = \dot{\theta}$ 로 선정하면, 도립진자 시스템은 4차원 비선형 상태 방정식으로 나타낼 수 있으며, 4차원 비선형 상태 방정식은 하기의 수학식 5와 같다.

수학식 5

$$\dot{\xi}_1 = \xi_2$$

$$\dot{\xi}_2 = u$$

$$\dot{\xi}_3 = \xi_4$$

$$\dot{\xi}_4 = \frac{mgl(\sin\xi_3) - c\xi_4}{I + ml^2} - \frac{ml(\cos\xi_3)}{I + ml^2}u$$

[0043]

[0044]

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 도립진자 시스템의 실제 이미지를 도시한다.

[0045]

도 3을 참조하면, 도면에 도시된 도립진자 시스템은 본 발명의 실험을 위해 개발된 카트형 도립진자 시스템으로, 카트를 움직이기 위한 구동기로서 DC 모터를 사용하고 있으며, 동력 전달을 위해 타이밍벨트를 사용하고 있다. 또한, 상기 DC모터는 토크증폭을 위해 4:1의 감속기어를 사용하고 있다. 2개의 회전형 엔코더는 x 및 θ 를 측정하기 위해 사용되며, 엔코더의 해상도는 5000PPR(Pulse per revolution)이다. 이 때, 실험에 사용된 도립진자 시스템은 변위, 속도 및 가속도에 대하여 제약을 가진다. 변위 및 속도는 도립진자 시스템의 출력, 가속도는 도립진자 시스템의 입력이므로 도립진자 시스템의 스윙업 제어를 효과적으로 수행하기 위해서는 입력 제약 조건을 만족시키면서, 출력을 특정범위에 머물도록 제어해야한다.

[0046]

예를 들어, 본 발명의 실험을 위해 개발된 카트형 도립진자 시스템에 있어서, 출력 제약 조건 중 변위는 $|x| \leq 0.4m$ 와 같은 범위를 가지며, 변위의 제약은 카트의 충돌을 방지하기 위한 제약이다. 또한, 출력 제약 조건 중 속도는 $|\dot{x}| \leq 1.3m/s$ 와 같은 범위를 가지며, 속도의 제약은 구동기의 성능으로 인해 발생하는 하드웨어적인 제약이다.

[0047]

도4는 본 발명의 일 실시예에 따른 2-자유도 스윙업 제어 구조를 도시한 블록도이다.

[0048]

도 4를 참조하면, 2-자유도 스윙업 제어 구조는 본 발명에서 이용되는 스윙업 제어 구조로써, 피드포워드 제어(410), 피드백 제어(430) 및 도립진자(Inverted Pendulum)(450)로 구성된다.

- [0049] 피드 포워드 제어(410)는 미리 산출된 가속도계적 u^* 을 독립진자(450)에 인가하여 스윙업이 이루어지도록 하는 역할을 수행한다. 그러나, 피드포워드 제어만을 사용할 경우, 미리 산출한 스윙업 궤적과 일치하는 스윙업이 일어나지 않으므로, 이를 보상하기 위해 피드백제어(430)를 같이 사용한다. 이 때, 본 발명에서 제안된 피드포워드 궤적 생성방법은 u 를 특정한 형태의 함수로 가정하지 않고, 제약 조건을 만족하는 비선형 최적제어 문제의 풀이를 통해 얻을 수 있다. 따라서, 구동기의 제약 조건에 대한 고려가 궤적 생성 단계에서 이루어지므로, 구동부의 선정의 폭을 넓힐 수 있고, 이를 통해, 스윙업 제어 시스템의 유연성을 높일 수 있다.
- [0050] 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 비용함수를 다르게 하여 얻어진 독립진자의 스윙업 궤적을 도시한 그래프이다.
- [0051] 도 5를 참조하면, 각각의 그래프는 $x_{\lim} = 0.3m, \dot{x}_{\lim} = 1.3m/s, u_{\lim} = 22m/s^2$ 인 경우, 제 1 비용함수 및 제 2 비용함수를 이용하여 얻어진 독립진자의 스윙업 궤적을 도시한 그래프이다.
- [0052] 보다 상세하게, 각 그래프에서 dash-dot 형태의 선으로 나타난 궤적은 스윙업 소요시간 T 를 최소화하기 위해 제 2 비용함수인 수학적 2를 이용하여 구한 궤적이고, 점선 형태의 궤적은 $T=1.4$ 인 경우, 제 1 비용함수인 수학적 1에서, 카트의 변위만을 고려하기 위해 $a=1, b=0$ 로 가정하여 산출한 궤적이다. 또한, 실선 형태의 궤적은 $T=1.4$ 인 경우, 제 1 비용함수인 수학적 1에서, 카트의 변위와 가속도를 동시에 고려하기 위해 $a=0.5, b=0.5$ 로 하여 산출한 궤적이다.
- [0053] T 를 최소화하기 위한 비용함수를 사용했을 때 T 는 1.3초가 구해졌다. 이것은 위의 제약조건을 만족하면서 독립진자를 최대한 빨리 스윙업할 수 있는 시간이 1.3초임을 의미한다. 짧은 시간 내에 스윙업을 수행하기 위해서 카트를 흔드는 동작들이 다른 두 가지 경우보다 더 역동적인 것을 볼 수 있고 카트의 속도가 제약조건에 해당하는 1.3 m/s에 오랫동안 머물러 있는 것을 볼 수 있다. 카트의 변위만을 고려한 경우의 궤적은 다른 두 경우에 비해 카트의 변위 최대치가 작은 것을 볼 수 있다. 카트변위와 가속도를 동시에 고려한 경우에는 카트변위만을 고려한 경우보다 가속도의 최대값이 더 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. 세 가지 모두 주어진 제약조건을 만족시키면서 생성되었으므로 생성된 궤적을 효과적으로 추종하게만 한다면 스윙업을 수행하는 동안 제약조건을 모두 만족하리라는 것을 예상할 수 있다.
- [0054] 본 발명과 같이, 제약 조건을 가지는 독립진자의 스윙업 제어와 비교하여, 카트의 궤적을 미리 산출하고, 산출된 궤적을 카트가 추종하는 방식을 가지는 종래의 독립진자의 스윙업 제어의 실험 결과를 도 6를 참조하여 하술한다.
- [0055] 도 6는 종래의 독립진자의 스윙업 제어의 실험 결과를 도시한 그래프이다.
- [0056] 도 6를 참조하면, 그래프는 종래의 독립진자의 스윙업 제어에 있어서, 카트의 변위와 속도에 대한 궤적을 나타낸다. 보다 상세하게, 그래프는 스윙업 소요시간을 $T=1.2$ (dash-dot), $T=1.3$ (실선), $T=1.4$ (점선)와 같이 변화시켜가며 생성한 궤적을 나타낸다.
- [0057] 그래프에 보여지는 바와 같이, $T=1.3$ 또는 $T=1.4$ 인 경우에는 카트의 변위 및 카트의 속도가 모두 제약조건을 크게 벗어나는 것을 볼 수 있다. 또한, $T=1.2$ 인 경우 카트의 변위는 제약조건을 만족하지만, 카트의 속도가 제약조건을 벗어나는 것을 볼 수 있다. 이와 같이, 카트의 변위 제약조건을 만족시키지 못할 경우, 스윙업을 하는 동안 카트의 충돌이 발생하게 되며, 카트의 속도 제약조건을 만족시키지 못할 경우에는 사용하고 있는

구동부로는 생성된 스윙업 궤적을 추종할 수 없음을 의미하므로 더 좋은 성능을 갖는 모터로 교체해야만 하는 것을 의미한다.

도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 모델계수에 따른 스윙업 제어의 실험 결과를 도시한 그래프이다.

도 7을 참조하면, 그래프는 두 가지 모델계수를 사용하여 피드포워드 제어로 얻은 각과 각속도에 대한 궤적을 나타낸다.

도 7 (a)의 그래프는 모델계수를 추정하기 전의 모델계수(표 1)를 이용하여 산출한 궤적이고, 도 7 (b)의 그래프는 모델계수를 추정하고 난 후의 모델계수(표 2)를 이용하여 산출한 궤적이다. 이 때, 도 7 (a), (b) 각각의 경우에서 점선은 계산을 통해 얻은 궤적이고, 실선은 실제 실험을 통해 얻은 궤적이다.

표 1

Parameters	Values
m	$0.41\ Kg$
l	$0.22\ m$
I	$0.116\ Nm\ s^2$
c	$0.005\ Nm\ s$

표 2

Parameters	Values
m	$0.4\ Kg$
l	$0.24\ m$
I	$0.016\ Nm\ s^2$
c	$0.005\ Nm\ s$

도 7 (a), (b)통해, (a)의 경우는 계산된 궤적과 실제 실험 궤적간의 차이가 크다는 것을 알 수 있다. 이에 비해, (b)의 경우는 계산된 궤적과 실제 실험 궤적이 거의 유사하여, 발생한 미세한 오차는 피드백 제어를 통해 보정 가능함을 알 수 있다. 따라서, 계산된 피드포워드 궤적이 실제 실험궤적과 최대한 일치하도록 만드는 것은 더 큰 성능향상을 가져올 수 있음을 보여주고 있다. 이에, 본 발명은 추정된 모델계수(표 2)를 적용하여 스윙업 제어 실험을 수행하였다.

도 8은 본 발명의 다른 실시예에 따른 2-자유도 스윙업 제어 구조를 도시한 블록도이다.

도 8를 참조하면, 도4의 2-자유도 스윙업 제어 구조와 비교하여, 도 8의 2-자유도 스윙업 제어 구조는 실제 실험을 위한 구조로, 카트의 가속도 궤적을 2번 적분하여 카트의 위치궤적을 변환하며, 이를 추종하기 위하여 PD 형태의 위치 제어를 사용한다.

도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 스윙업 제어의 실험 결과를 도시한 그래프이다.

도 9를 참조하면, 그래프는 스윙업 제어를 수행했을 때, 카트의 위치 및 진자의 각도를 나타낸다. 보다 상세하게, 그래프의 실선은 본 발명의 제어 방법을 통해 생성된 피드포워드 궤적이고, dash-dot 형태의 선은 스윙업을

하는 동안 피드백 제어기는 사용하지 않고 피드포워드 제어기만 사용해서 스윙업을 수행한 후, $t = T$ 인 시점에 선형제어기로 스위칭 했을 때의 실험궤적이다. 또한, 점선형태의 선은 피드포워드 제어기와 피드백 제어기를 둘 다 사용한 2-자유도 스윙업 제어의 실험 궤적이다.

[0068] 피드백제어기를 사용하지 않았을 때에도 $t = T$ 시점까지 궤적이 계산된 피드포워드 궤적과 유사하게 나타나는 듯 보이기는 하지만 스위칭 이후 카트가 크게 요동치는 것을 볼 수 있다. 이것은 피드백제어기를 사용하지 않음으로 인해 발생하는 오차가 커서 제어기 스위칭시 선형제어기가 한꺼번에 큰 제어작용을 하기 때문이다. 피드백 제어기를 같이 사용한 경우에는 제어기를 교체한 시점에도 카트가 크게 요동치지 않고 부드럽게 스위칭이 이루어지는 것을 볼 수 있다.

[0069] 따라서, 종래에서 사용했던 모델 계수 추정과 피드백 제어기 설계법을 적용하여 본 발명의 피드포워드 제어방식과 결합하여 2자유도 스윙업 실험을 통해, 본 발명이 도립진자 시스템의 입/출력 제약 조건을 효과적으로 만족하며 스윙업 제어를 수행해 냄을 검증하였다.

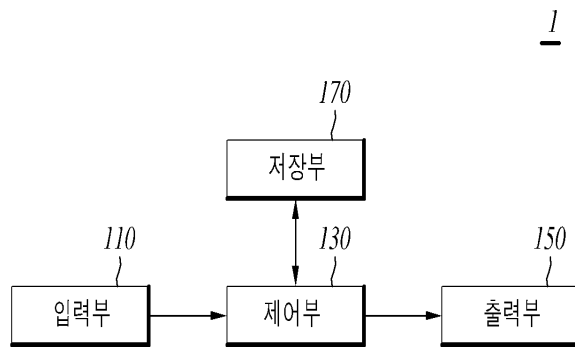
[0070] 이상에서 본 발명의 바람직한 실시예에 대해 도시하고 설명하였으나, 본 발명은 상술한 특징의 바람직한 실시예에 한정되지 아니하며, 청구범위에서 청구하는 본 발명의 요지를 벗어남이 없이 당해 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 누구든지 다양한 변형 실시가 가능한 것은 물론이고, 그와 같은 변경은 청구범위 기재의 범위 내에 있게 된다.

부호의 설명

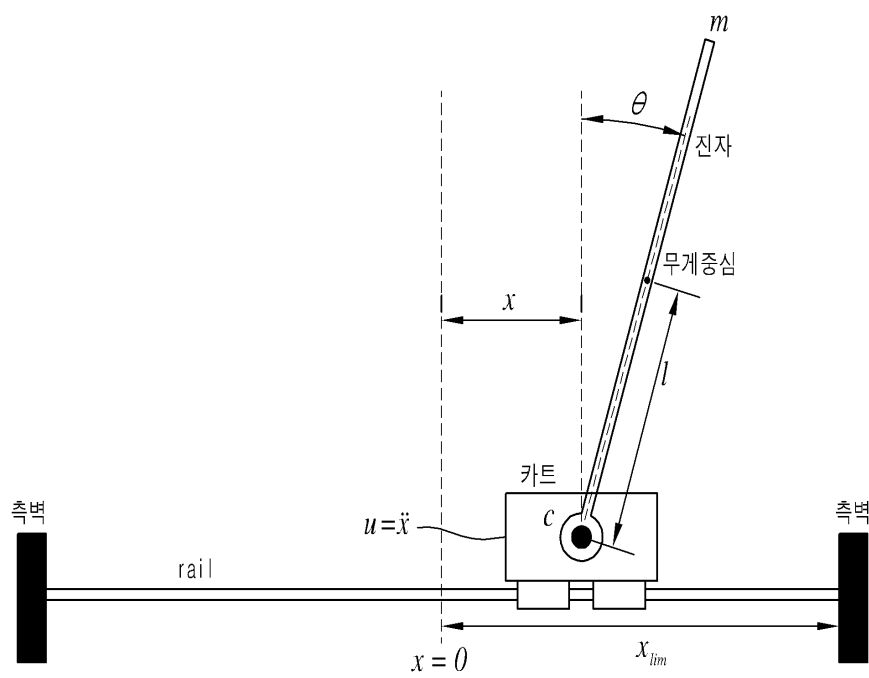
[0071] 110: 입력부
130: 제어부
150: 출력부
170: 저장부
410: 피드포워드 제어
430: 피드백 제어
450: 도립진자

도면

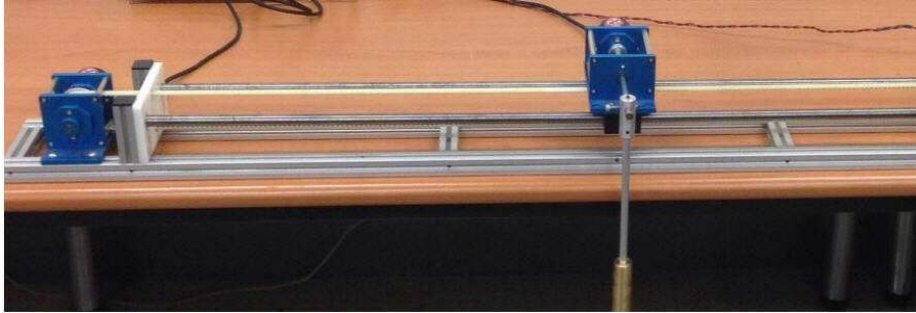
도면1



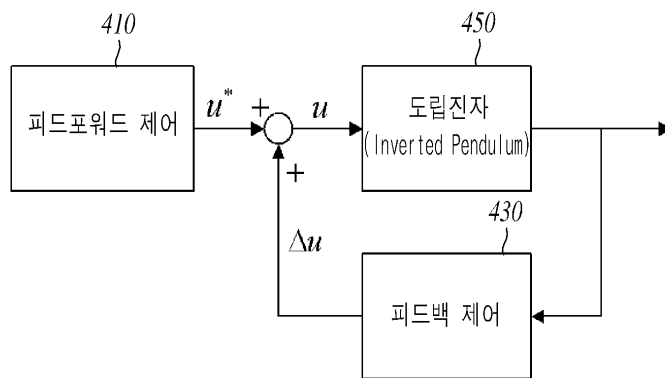
도면2



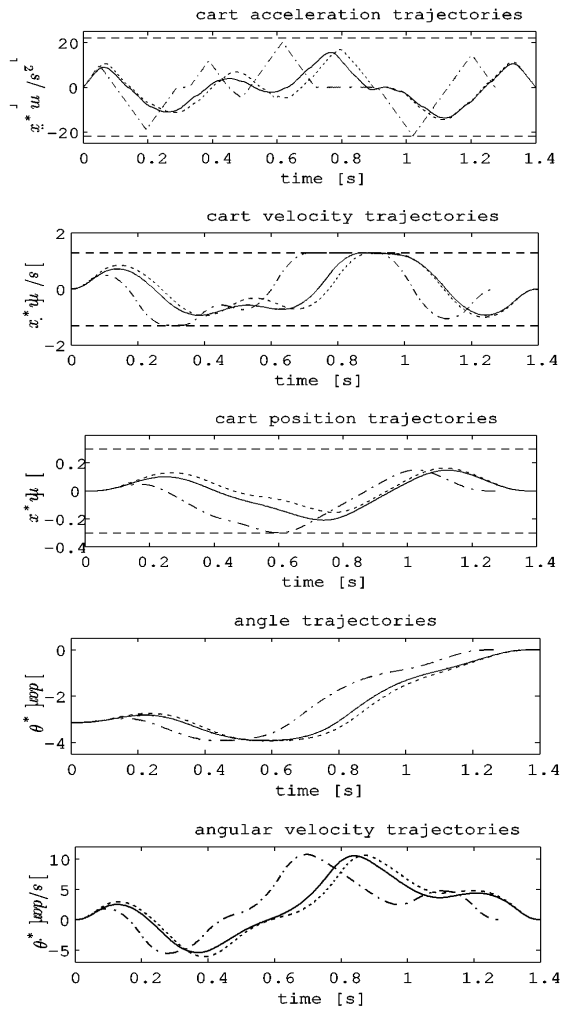
도면3



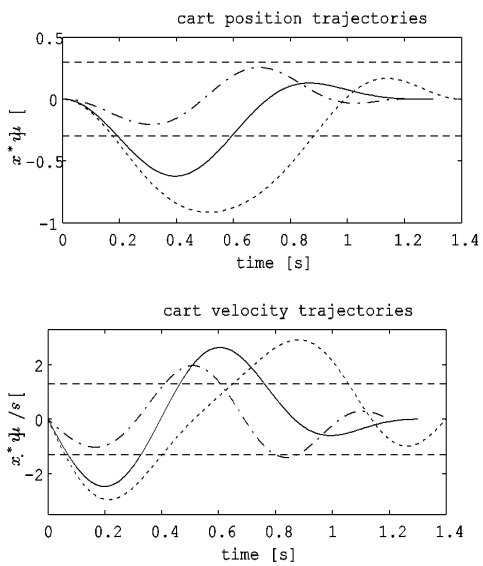
도면4



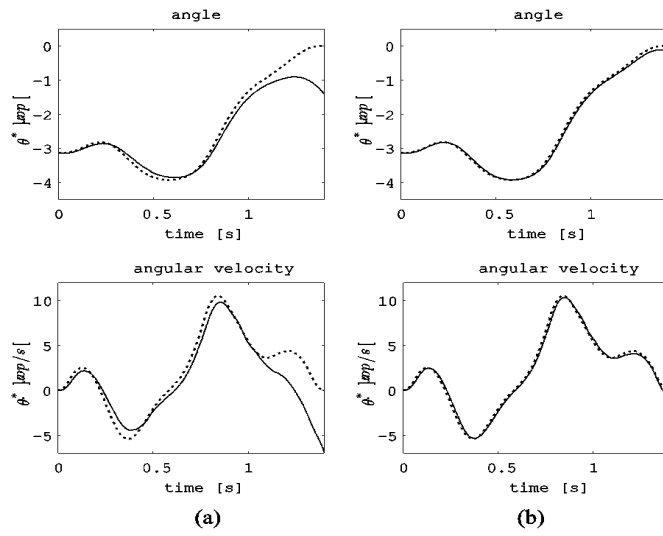
도면5



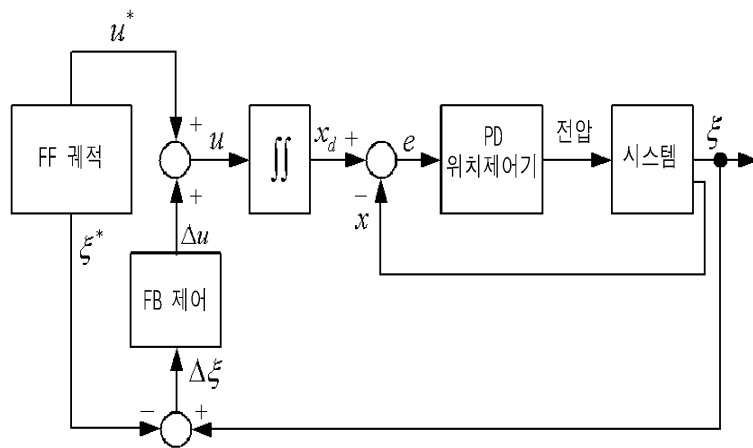
도면6



도면7



도면8



도면9

