



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2013년08월12일  
(11) 등록번호 10-1292550  
(24) 등록일자 2013년07월29일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
B25J 9/16 (2006.01) B25J 19/00 (2006.01)  
(21) 출원번호 10-2011-0136544  
(22) 출원일자 2011년12월16일  
심사청구일자 2011년12월16일  
(65) 공개번호 10-2013-0069026  
(43) 공개일자 2013년06월26일  
(56) 선행기술조사문헌  
KR1019940006726 A  
KR1019990044574 A

(73) 특허권자  
한국과학기술연구원  
서울특별시 성북구 화랑로14길 5 (하월곡동)  
(72) 발명자  
오용환  
서울특별시 마포구 신수동 39-5  
류광현  
충청북도 청주시 상당구 금천동 장자마을1단지부  
영아파트 104동 304호  
김성균  
대전광역시 동구 가양1동 430-7  
(74) 대리인  
김 순 영, 김영철

전체 청구항 수 : 총 6 항

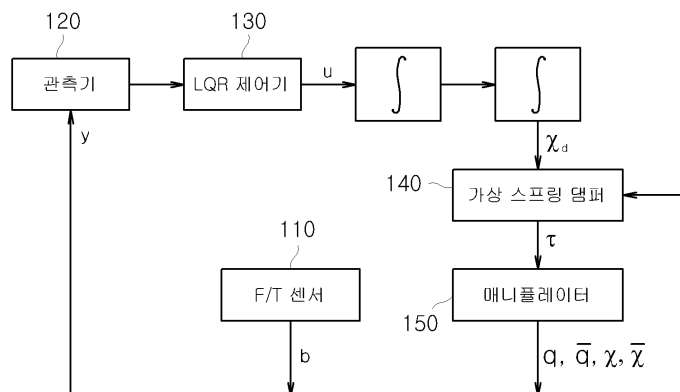
심사관 : 김상욱

(54) 발명의 명칭 **볼-온-플레이트 시스템 균형 제어 장치 및 방법**

(57) 요약

본 발명은 볼-온-플레이트 시스템 균형 제어 장치 및 방법에 관한 것으로, 더 상세하게는, F/T 센서와 관측기(observer)를 이용하여 볼(ball)의 상태를 추정하고 LQR제어기를 이용한 상태 피드백 제어의 출력 신호로 매니플레이터를 제어함으로써, 매니플레이터에 작용하는 외력에 순응(compliance)하여 볼-온-플레이트 시스템의 균형을 유지하는 제어 장치 및 방법에 관한 것이다. 본 발명의 일 실시예에 따른 볼-온-플레이트 시스템 균형 제어 장치는, F/T(force-torque) 센서를 통해 측정된 토크와 볼-온-플레이트(ball-on-plate) 시스템의 운동방정식을 적용하여 볼의 위치를 계산하는 연산부; 상기 연산부에서 계산된 볼의 위치와 플레이트의 상태벡터를 입력으로 하여 잡음이 제거된 볼의 상태 벡터를 추정하는 관측기; 상기 연산부에서 계산된 볼의 위치에 대한 상태 피드백 제어를 위해 상기 관측기에서 추정된 볼과 플레이트의 상태 벡터를 적용하는 LQR(linear quadratic regulator) 제어기; 및 상기 LQR 제어기에서 상태 피드백 제어를 통해 출력된 제어 입력 신호를 처리하여 상기 플레이트를 지지하는 매니플레이터 말단부의 궤적을 생성하는 매니플레이터 제어부를 포함한다.

대표도 - 도1



## 특허청구의 범위

### 청구항 1

F/T(force-torque) 센서를 통해 측정된 토크와 볼-온-플레이트(ball-on-plate) 시스템의 운동방정식을 적용하여 볼의 위치를 계산하는 연산부;

상기 연산부에서 계산된 볼의 위치와 플레이트의 상태벡터를 입력으로 하여 잡음이 제거된 볼의 상태 벡터를 추정하는 관측기;

상기 연산부에서 계산된 볼의 위치에 대한 상태 피드백 제어를 위해 상기 관측기에서 추정된 볼의 상태 벡터와 플레이트의 상태 벡터를 적용하는 LQR 제어기; 및

상기 LQR 제어기에서 상태 피드백 제어를 통해 출력된 제어 입력 신호를 처리하여 상기 플레이트를 지지하는 매니퓰레이터 말단부의 궤적을 생성하는 매니퓰레이터 제어부를 포함하고,

상기 LQR 제어기는 플레이트의 회전과 이동에 대한 제어입력 신호의 상대적 크기를 결정하며, 플레이트의 회전에 대한 제1 변수와 플레이트의 이동에 관한 제2 변수를 조절하여, 상기 매니퓰레이터를 이용한 플레이트의 이동 모션을 볼의 균형을 유지하기 위해 사용할지 또는 외력에 대한 순응에 사용할지 결정하는 것을 특징으로 하는 볼-온-플레이트 시스템 균형 제어 장치.

### 청구항 2

삭제

### 청구항 3

제1항에 있어서, 상기 상태 피드백 제어를 통해 출력된 제어 입력 신호를 기반으로 상기 매니퓰레이터의 말단부의 토크에 관한 정보를 처리하는 가상 스프링 댐퍼를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 볼-온-플레이트 시스템 균형 제어 장치.

### 청구항 4

F/T(force-torque) 센서를 통해 측정된 토크와 볼-온-플레이트(ball-on-plate) 시스템의 운동방정식을 적용하여 볼의 위치를 계산하는 단계;

관측기에서 추정된 볼의 상태 벡터와 플레이트의 상태 벡터에 LQR 제어기를 적용하여, 상기 F/T 센서의 측정값으로부터 계산되는 볼의 위치에 대해 상태 피드백 제어하는 단계; 및

상기 상태 피드백 제어를 통해 출력된 제어 입력 신호를 처리하여 상기 플레이트를 지지하는 매니퓰레이터 말단부의 궤적을 생성하는 단계를 포함하고,

상기 LQR 제어기는 플레이트의 회전과 이동에 대한 제어입력 신호의 상대적 크기를 결정하며, 플레이트의 회전에 대한 제1 변수와 플레이트의 이동에 관한 제2 변수를 조절하여, 상기 매니퓰레이터를 이용한 플레이트의 이동 모션을 볼의 균형을 유지하기 위해 사용할지 또는 외력에 대한 순응에 사용할지 결정하는 것을 특징으로 하는 볼-온-플레이트 시스템 균형 제어 방법.

### 청구항 5

제4항에 있어서, 상기 F/T 센서와 볼-온-플레이트 시스템의 운동방정식을 적용하여 계산되는 잡음이 포함된 볼의 위치 데이터를 상기 관측기를 통해 잡음이 제거된 볼 상태로 추정되는 것을 특징으로 하는 볼-온-플레이트 시스템 균형 제어 방법.

### 청구항 6

제4항에 있어서, 상기 매니퓰레이터 말단부의 궤적을 생성하는 단계는, 상기 매니퓰레이터에 작용하는 외력에 순응하여, 매니퓰레이터 말단부의 회전과 이동 모션에 의해 볼의 균형을 유지하도록 상기 LQR 제어기에 의해 매니퓰레이터 말단부의 이동과 회전에 관한 제어 신호를 생성하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 볼-온-플

레이트 시스템 균형 제어 방법.

**청구항 7**

삭제

**청구항 8**

제4항에 있어서, 상기 매니플레이터 말단부의 궤적을 생성하는 단계는,

상기 상태 피드백 제어를 통해 출력된 제어 입력 신호에 가상 스프링 댐퍼를 적용하여 상기 매니플레이터의 말단부의 토크에 관한 정보를 처리하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 볼-온-플레이트 시스템 균형 제어 방법.

**명세서**

**기술분야**

[0001] 본 발명은 볼-온-플레이트 시스템 균형 제어 장치 및 방법에 관한 것으로, 더 상세하게는, F/T 센서와 관측기(observer)를 이용하여 볼(ball)의 상태를 추정하고 LQR제어기를 이용한 상태 피드백 제어의 출력 신호로 매니플레이터를 제어함으로써, 매니플레이터에 작용하는 외력에 순응(compliance)하여 볼-온-플레이트 시스템의 균형을 유지하는 제어 장치 및 방법에 관한 것이다.

**배경기술**

[0002] 볼-온-플레이트(Ball-on-plate) 시스템은 볼-온-빔(ball-on-beam) 시스템에서 시작되어 지금까지 다양한 방법으로 연구되어 왔다.

[0003] 볼-온-플레이트 시스템은 크게 볼(ball)의 상태(위치, 속도)를 찾는 부분과 균형을 유지시키기 위한 제어 부분으로 구분될 수 있다. 현재 볼의 상태를 찾아내기 위한 많은 방법들이 존재한다. 간단한 방법으로, 플레이트(plate)에 부착된 터치 센서나 터치 스크린을 이용하여 볼과 플레이트의 접촉 점을 찾아내는 방법이 있다. 이 방법은 간단하고 정확하게 볼의 상태를 찾을 수 있는 방법이지만, 로봇의 감각이 아닌 플레이트의 감각을 이용한다는 점에서 범용성이 떨어진다.

[0004] 볼의 상태를 찾아내기 위해 많이 적용되는 종래의 다른 방법은 인간의 눈 역할을 하는 비전 시스템을 이용하는 것이다. 비전 시스템을 이용한 방법은 앞으로의 발전 가능성은 크지만 현재는 카메라와 플레이트가 고정되어 있는 상태에서 진행되고 있고 주변 환경의 변화에도 민감하다는 단점이 있다.

[0005] 다른 방법으로는 F/T 센서를 이용한 방법이 있다. 이 방법은, 볼이 플레이트 상에서 이동함에 따라 F/T 센서에 작용하는 토크의 크기를 측정하여 볼의 위치를 찾는 방식이다. 이 방법은 F/T 센서의 잡음 문제가 단점으로 작용한다.

[0006] 상기와 같은 종래의 방법들은 볼-온-플레이트 시스템의 제어에 있어서, 플레이트를 제어하는 매니플레이터 또는 로봇 등의 장치에 작용하는 외력에 대응하기 위한 방법에 대해서는 논의하지 않고 있다.

**선행기술문헌**

**특허문헌**

[0007] (특허문헌 0001) 한국공개특허 10-2009-0124560호 (삼성전자주식회사) 2009. 12. 03. 요약, 청구항 1, 도면 3  
 (특허문헌 0002) 한국등록특허 10-0711314호 (가와사키 슈코교 가부시키키가이샤) 2007. 4. 18. 요약, 청구항 2, 도면 1

**발명의 내용**

**해결하려는 과제**

[0008] 본 발명은 상기와 같은 문제를 해결하기 위하여 안출된 것으로, 본 발명의 목적은 볼의 상태를 추정하기 위해 사용되는 F/T 센서의 잡음 문제를 해결하고, 볼 뿐만 아니라 매니플레이터에 외력이 작용하더라도 외력에 순응하여 볼-온-플레이트 시스템의 균형을 유지시킬 수 있는 장치 및 방법을 제공하는 것이다.

**과제의 해결 수단**

[0009] 전술한 목적을 달성하기 위한 본 발명의 일 실시예에 따른 볼-온-플레이트 시스템 균형 제어 장치는, F/T(force-torque) 센서를 통해 측정된 토크와 볼-온-플레이트(ball-on-plate) 시스템의 운동방정식을 적용하여 볼의 위치를 계산하는 연산부; 상기 연산부에서 계산된 볼의 위치와 플레이트의 상태벡터(각도, 각속도, 위치, 속도)를 입력으로 하여 잡음이 제거된 볼의 상태 벡터(위치, 속도)를 추정하는 관측기; 상기 연산부에서 계산된 볼의 위치에 대한 상태 피드백 제어를 위해 상기 관측기에서 추정된 볼의 상태 벡터와 플레이트의 상태 벡터를 적용하는 LQR(linear quadratic regulator) 제어기; 및 상기 LQR 제어기에서 상태 피드백 제어를 통해 출력된 제어 입력 신호를 처리하여 상기 플레이트를 지지하는 매니플레이터 말단부의 궤적을 생성하는 매니플레이터 제어부를 포함한다.

[0010] 상기 LQR 제어기는 플레이트의 회전과 이동에 대한 제어입력 신호의 상대적 크기를 결정하며, 플레이트의 회전에 대한 제1 변수와 플레이트의 이동에 관한 제2 변수를 조절하여, 상기 매니플레이터를 이용한 플레이트의 이동 모션을 볼의 균형을 유지하기 위해 사용할지 또는 외력에 대한 순응에 사용할지 결정할 수 있다.

[0011] 상기 볼-온-플레이트 시스템 균형 제어 장치는, 상기 상태 피드백 제어를 통해 출력된 제어 입력 신호를 기반으로 상기 매니플레이터의 말단부의 토크에 관한 정보를 처리하는 가상 스프링 댐퍼를 더 포함할 수 있다.

[0012] 본 발명의 일 실시예에 따른 볼-온-플레이트 시스템 균형 제어 방법은, F/T(force-torque) 센서를 통해 측정된 토크와 볼-온-플레이트(ball-on-plate) 시스템의 운동방정식을 적용하여 볼의 위치를 계산하는 단계; 관측기에서 추정된 볼의 상태 벡터와 플레이트의 상태 벡터에 LQR 제어기를 적용하여, 상기 F/T 센서의 측정값으로부터 계산되는 볼의 위치에 대해 상태 피드백 제어하는 단계; 및 상기 상태 피드백 제어를 통해 출력된 제어 입력 신호를 처리하여 상기 플레이트를 지지하는 매니플레이터 말단부의 궤적을 생성하는 단계를 포함한다.

[0013] 상기 F/T 센서와 볼-온-플레이트 시스템의 운동방정식을 적용하여 계산되는 잡음이 포함된 볼의 위치 데이터는 상기 관측기를 통해 잡음이 제거된 볼 상태로 추정될 수 있다.

[0014] 상기 매니플레이터 말단부의 궤적을 생성하는 단계는, 매니플레이터 말단부의 회전과 이동 모션에 의해 볼의 균형을 유지하도록 상기 LQR 제어기에 의해 매니플레이터 말단부의 이동과 회전에 관한 제어 신호를 생성하는 단계를 포함할 수 있다.

[0015] 상기 LQR 제어기는 플레이트의 회전과 이동에 대한 제어입력 신호의 상대적 크기를 결정하며, 플레이트의 회전에 대한 제1 변수와 플레이트의 이동에 관한 제2 변수를 조절하여, 상기 매니플레이터를 이용한 플레이트의 이동 모션을 볼의 균형을 유지하기 위해 사용할지 또는 외력에 대한 순응에 사용할지 결정할 수 있다.

[0016] 상기 매니플레이터 말단부의 궤적을 생성하는 단계는, 상기 상태 피드백 제어를 통해 출력된 제어 입력 신호에 가상 스프링 댐퍼를 적용하여 상기 매니플레이터의 말단부의 토크에 관한 정보를 처리하는 단계를 포함할 수 있다.

**발명의 효과**

[0017] 본 발명의 볼-온-플레이트 시스템 균형 제어 장치 및 방법은, F/T 센서를 이용하여 계산된 잡음이 포함되어 있는 볼의 상태변수를 직접 사용하지 않고, 관측기를 통해 응답 속도의 지연 없이 잡음이 제거된 볼의 상태를 추정할 수 있는 효과가 있다.

[0018] 또한, 본 발명의 볼-온-플레이트 시스템 균형 제어 장치 및 방법은, 여유자유도(redundant)를 갖는 매니플레이터를 이용하므로, 매니플레이터에 외력이 작용하더라도, 그에 순응하여 균형 제어가 가능하다는 효과가 있다.

[0019] 또한, 본 발명의 볼-온-플레이트 시스템 균형 제어 장치 및 방법은, 다중입력 시스템(이동과 회전 모션에 의한 제어)을 제어기의 변경 없이 파라미터의 변화만으로 단일입력 시스템(회전 모션에 의한 제어)으로 변경하여, 팔꿈치 뿐만 아니라 매니플레이터의 어느 위치에서 외력이 작용하더라도 그에 순응하며 균형 제어가 가능하다는 효과가 있다.

**도면의 간단한 설명**

- [0020] 도1은 본 발명의 일 실시예에 따른 볼-온-플레이트 시스템 균형 제어 장치의 구성을 개략적으로 도시한 도면이다.
- 도 2는 볼-온-플레이트 시스템의 운동방정식 설정에 관련된 도면이다.
- 도 3은 볼과 매니플레이터에의 팔꿈치에 외력이 가해진 상태에서, 매니플레이터 말단부의 이동모션과 회전모션에 의해 균형이 유지되는 상태를 도시하는 실험 사진이다.
- 도 4는 도 3의 실험에 대한 결과 그래프들이다.
- 도 5는 매니플레이터에 외력이 가해진 상태에서, 매니플레이터 말단부의 회전모션에 의해 균형이 유지되는 상태를 도시하는 실험 사진이다.
- 도 6은 도 5의 실험에 대한 결과 그래프들이다.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

- [0021] 이하에서는 첨부한 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 볼-온-플레이트 시스템 균형 제어 장치 및 방법에 대하여 상세히 설명한다.
- [0022] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 볼-온-플레이트 시스템 균형 제어 장치의 구성을 개략적으로 도시한 도면이다.
- [0023] 도 1을 참조하면, 우선 F/T 센서(110)를 통해 측정된 토크와 볼-온-플레이트(ball-on-plate) 시스템의 운동방정식을 이용하여 연산부(미도시)에서 볼의 위치를 계산한다. 도 2는 볼-온-플레이트 시스템의 운동방정식 설정에 관련된 도면으로, 라그랑지 방정식을 이용하여 계산된 비선형 방정식을 선형화 하면 하기 식들과 같은 선형 방정식들을 얻을 수 있다.

**수학식 1**

[0024] 
$$\tau_x = I_{px} \ddot{\phi}_x - m_b g b_z$$

**수학식 2**

[0025] 
$$\tau_z = I_{pz} \ddot{\phi}_z + m_b g b_x$$

**수학식 3**

[0026] 
$$0 = \frac{5}{3} \ddot{b}_x + \ddot{p}_x + g \phi_z$$

**수학식 4**

[0027] 
$$0 = \frac{5}{3} \ddot{b}_z + \ddot{p}_z + g \phi_x$$

[0028] 여기서,  $I_p$  는 플레이트의 관성 모멘트,  $m_b$  는 볼의 질량,  $g$  는 중력 가속도,  $\ddot{\phi}$  은 플레이트의 각가속도,  $\ddot{p}$  은 플레이트의 선가속도, 그리고  $\ddot{b}$  는 볼의 선가속도를 나타낸다.

[0029] 상기 수학식 1과 수학식 2를 이용하면, 하기 식과 같이 볼의 위치를 계산할 수 있다.

**수학식 5**

[0030] 
$$b_x = \frac{-I_{pz}\ddot{\phi}_z + \tau_z}{m_b g}$$

**수학식 6**

[0031] 
$$b_z = \frac{I_{px}\ddot{\phi}_x - \tau_x}{m_b g}$$

[0032] 그러나, 상기와 같이 계산된 볼의 위치는 F/T 센서(110) 자체의 잡음과  $\ddot{\phi}_x$  와  $\ddot{\phi}_z$ 를 구하기 위해 필요한 수치미분으로 인해 상당한 잡음이 포함된다. 특히, 볼의 속도를 구하기 위한 수치미분은 잡음을 더욱 증폭시킨다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 본 발명은 관측기(120)를 이용한다.

[0033] 상기와 같이 계산된 볼의 위치와 LQR 제어기(130)의 상태 피드백 제어 설계를 위해 제어 입력 신호를 하기 식과 같이 정의한다.

**수학식 7**

[0034] 
$$\mathbf{u}_1 = \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_z \\ \ddot{p}_x \end{bmatrix} \quad \mathbf{u}_2 = \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_x \\ \ddot{p}_z \end{bmatrix}$$

[0035] 상기 수학식 7을 적용하여, 상기 수학식 3과 4를 정리하면, 하기와 같은 상태 공간 모델(state space model)로 표현할 수 있다.

**수학식 8**

[0036] 
$$\dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{A}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{B}_1 \mathbf{u}_1$$
  

$$\mathbf{y}_1 = \mathbf{C}_1 \mathbf{x}_1$$

수학식 9

$$\dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{A}_2 \mathbf{x}_2 + \mathbf{B}_2 \mathbf{u}_2$$

$$\mathbf{y}_2 = \mathbf{C}_2 \mathbf{x}_2$$

[0037]

[0038] 여기서,  $x_1, y_1, x_2, y_2$ 는 각각 하기 식과 같다.

수학식 10

$$\mathbf{x}_1 = \begin{bmatrix} b_x & \dot{b}_x & \phi_z & \dot{\phi}_z & p_x & \dot{p}_x \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{y}_1 = \begin{bmatrix} b_x & \phi_z & \dot{\phi}_z & p_x & \dot{p}_x \end{bmatrix}^T$$

[0039]

수학식 11

$$\mathbf{x}_2 = \begin{bmatrix} b_z & \dot{b}_z & \phi_x & \dot{\phi}_x & p_z & \dot{p}_z \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{y}_2 = \begin{bmatrix} b_z & \phi_x & \dot{\phi}_x & p_z & \dot{p}_z \end{bmatrix}^T$$

[0040]

[0041] LQR 제어기(130)는 관측기(120)와 결합하여 상태 피드백 제어를 통해 불에 외력이 작용하더라도 불-온-플레이트 시스템의 균형을 유지시킨다.

[0042] 관측기(120)의 수학적 모델은 다음과 같이 정의 된다.

수학식 12

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{L}(\mathbf{y} - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}})$$

[0043]

[0044] 여기서  $\hat{\mathbf{x}}$  는 추정된 상태 벡터이다. 관측기(120)는 상기 수학식 8과 수학식 9의 부정확함을 보정하기 위해 측정된 출력( $\mathbf{y}$ )과 추정된 출력( $\mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}$ )과의 오차를 보상하기 위한 항이 포함된다. 관측기 오차 방정식을 얻기 위해 수학식 8에서 수학식 12를 빼면 하기 식과 같이 정리된다.

수학식 13

$$\dot{\mathbf{x}} - \dot{\hat{\mathbf{x}}} = (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})$$

[0045]

[0046] 수학식 13으로부터 ( $\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C}$ )의 고유값(eigen value)에 따라 오차벡터( $\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$ )는 0으로 수렴하기 때문에 시스

템이 완전 상태 가관측이면 관측기 이득(gain) 행렬  $\mathbf{L}$  을 적절히 선택하여 관측기 극점을 원하는 위치에 위치시킬 수 있다. 즉, 추정된 상태변수  $\hat{\mathbf{x}}$  는 측정된 상태변수  $\mathbf{x}$  에 수렴하게 된다. 그러나, 정확히 측정할 수 있는 상태변수는 관측기(120)에 의해 추정될 필요가 없으며,  $[\phi \ \dot{\phi} \ p \ \dot{p}]^T$  과 같은 상태 변수들은 상대적으로 정확히 측정할 수 있는 변수들이다. 이 변수들은 엔코더(encoder)와 타코미터(tachometer)를 통해 매니플레이터(150)의 관절각과 각속도를 측정된 후, 기구학(forward kinematics)을 통해 계산된다. 따라서  $\hat{\mathbf{x}}$  을 다음과 같이 재정의 할 수 있다.

**수학식 14**

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \hat{b} & \dot{\hat{b}} & \phi & \dot{\phi} & p & \dot{p} \end{bmatrix}^T$$

[0047]

결과적으로, 관측기(120)에 기반한 상태피드백 제어는 다음과 같다.

**수학식 15**

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{L} \begin{bmatrix} (b - \hat{b}) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}$$

[0049]

여기서 시스템이 완전상태 가제어이고, 관측기(120)에 의해 볼의 모든 상태를 이용할 수 있으므로, 상태 피드백 이득 행렬  $\mathbf{K}$  를 적절히 선택하여 제어기 극점을 원하는 곳에 위치시킬 수 있다.  $\mathbf{K}$  를 결정하는 방법으로 LQR 제어기(130)를 이용한다.

[0050]

본 발명의 볼-온-플레이트 시스템은 다중입력 시스템이다. 즉, 본 발명의 볼-온-플레이트 시스템은 플레이트의 이동과 회전에 관련된 두 개의 입력을 통해 제어목적을 달성할 수 있다. LQR 제어기(130)는 제어성과 에너지의 상대적 중요성을 결정할 수 있고, 두 입력 중 어느 것에 더 큰 비중을 둘 것인지 결정할 수 있다는 장점이 있다. LQR 제어기(130)는 다음과 같은 성능지수(performance index)를 최소화 시키는 행렬  $\mathbf{K}$  를 구한다.

**수학식 16**

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt$$

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x}$$

[0052]

여기서  $\mathbf{Q}$  는 양의 반한정 대칭행렬(positive-definite symmetric matrix)이고,  $\mathbf{R}$  은 양의 한정

[0053]



대칭행렬이다. 행렬  $\mathbf{Q}$  와  $\mathbf{R}$  에 따라서 제어성능과 에너지 효율의 상대적 중요성이 결정된다. 본 발명에서 LQR 제어기(130)는 플레이트의 회전과 이동에 대한 제어입력 신호의 상대적 크기를 결정하는데 사용된다.

[0054] 상기  $\mathbf{R}$  을 다음과 같이 정의한다.

**수학식 17**

$$\mathbf{R} = \text{diag}(r1, r2)$$

[0055]

[0056] 여기서,  $r1$  과  $r2$  는 플레이트의 회전과 이동에 대한 상대적인 제어 에너지 소모량의 크기를 결정하는 가중치이다. 제1 변수  $r1$  이 커지면 플레이트의 회전에 대한 제어 에너지 소모량이 작아지고, 제2 변수  $r2$  가 커지면 플레이트의 이동에 대한 제어 에너지 소모량이 작아진다. 이러한 원리를 이용하면 플레이트의 이동 모션을 볼의 균형을 유지하기 위해 사용할지, 외력에 대한 순응에 사용할지 결정할 수 있다.

[0057] 매니플레이터 제어부(미도시)는 LQR 제어기(130)에서 상태 피드백 제어를 통해 출력된 제어 입력 신호를 처리하여, 상기 플레이트를 지지하는 매니플레이터 말단부의 궤적을 생성한다. 상기 매니플레이터 말단부의 궤적 생성을 위해 LQR 제어기(130)에서 출력된 제어 입력 신호를 적분할 수 있다.

[0058] 여기서, 상기 매니플레이터 말단부의 궤적을 상기 매니플레이터 말단부의 목표 위치-방위 벡터라 명하고,  $\chi_d$  기호를 쓴다.

[0059] 가상 스프링 댐퍼(virtual spring damper)는 상기 상태 피드백 제어를 통해 출력된 제어 입력 신호를 기반으로 상기 매니플레이터 말단부의 토크에 관한 정보를 처리한다.

[0060] 구체적으로, 상기 매니플레이터 말단부의 궤적을 추종하기 위한 여유자유도 매니플레이터의 제어 부분은 다음과 같이 표현된다.

**수학식 18**

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}_A^T(\mathbf{q})\mathbf{f} - \mathbf{K}_d\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \boldsymbol{\tau}_f(\dot{\mathbf{q}})$$

[0061]

[0062] 여기서  $\mathbf{q}$  와  $\dot{\mathbf{q}}$  은 각각 매니플레이터 관절의 각과 각속도 벡터이고,  $\mathbf{J}_A^T(\mathbf{q})$  는 해석적 자코비안(analytical Jacobian)의 전치행렬(transpose matrix)이고,  $\mathbf{K}_d$  는 관절 공간에서의 댐핑(damping) 요소이며, 대각행렬로 이루어진다.  $\mathbf{g}(\mathbf{q})$  와  $\boldsymbol{\tau}_f(\dot{\mathbf{q}})$  는 각각 중력과 마찰력 보상 항이고,  $\mathbf{f}$  는 매니플레이터 말단부의 작업공간에서의 가상 힘으로 다음 식과 같다.

**수학식 19**

$$\mathbf{f} = \mathbf{K}_p\Delta\boldsymbol{\chi} - \mathbf{K}_v\dot{\boldsymbol{\chi}}$$

[0063]

[0064]  $\mathbf{K}_p$  와  $\mathbf{K}_v$  는 작업 공간에서의 강성 이득(stiffness gain)과 댐핑 요소를 나타내고,  $\Delta\boldsymbol{\chi}$  는 매니플레이터 말단부의 목표 위치-방위 벡터와 현재 위치-방위 벡터의 차를 나타낸다. 매니플레이터 말단부의 현재 위치-방위 벡터는 ZYX 오일러 각을 사용한 기구학을 풀어 계산될 수 있다.

[0065] 이하에서는, 본 발명의 볼-온-플레이트 시스템 균형 제어 장치에 의한 실험예를 기술한다. 그러나, 본 발명은

이하의 실험예에 한정되는 것은 아니다.

[0066] (실험예)

[0067] 실험 예에서는 수학적 식 16의 제2 변수  $r^2$  값을 변화시켜 두 가지의 실험을 실시하였다.

[0068] 도 3은 볼과 매니플레이터의 팔꿈치에 외력이 가해진 상태에서, 매니플레이터 말단부의 이동모션과 회전모션에 의해 균형이 유지되는 상태를 도시하는 실험 사진으로, 제1 변수  $r^1$  과 제2 변수  $r^2$  의 크기를 적절히 선택하여 볼-온-플레이트 시스템이 매니플레이터 말단부의 이동모션과 회전모션에 의해 제어되는 상태를 도시한다. 매니플레이터(150)는 여유자유도를 가지므로, 볼과 팔꿈치 부근에 외력(disturbance)이 가해지더라도 외력에 순응하며 볼의 균형을 유지할 수 있다.

[0069] 도 4는 도 3의 실험에 대한 결과 그래프들이다.

[0070] 우선 도 3의 실험 사진에서 실험 시작 후, 약 3.5초가 되었을 때 볼에 외력을 가하였다. 도 4의 (a)는 F/T센서(110)와 볼-온-플레이트 시스템의 운동 방정식을 이용해 계산된 볼의 위치와 관측기(120)를 통해 추정된 볼의 위치를 대비하여 나타낸다.

[0071] F/T 센서(110) 자체의 잡음과 수치 미분으로 인하여 볼의 위치에 많은 잡음이 포함되어 있음을 확인할 수 있다. 또한, 관측기(120)에서 추정된 볼의 위치는 잡음이 상당히 제거 되었음을 알 수 있고, 약 6초가 되었을 때 0으로 수렴함을 알 수 있다.

[0072] 도 4의 (b)는 관측기(120) 기반의 볼의 속도 그래프이다. 볼의 속도를 측정할 수 있는 센서가 없지만 잡음을 증폭시키는 수치 미분 없이 관측기(120)를 통해 볼의 속도를 추정할 수 있다. 도 4의 (c)와 (d)는 매니플레이터 말단부가 목표 위치와 방위를 잘 추종함을 보인다.

[0073] 도 5는 매니플레이터에 외력이 가해진 상태에서, 매니플레이터 말단부의 회전모션에 의해 균형이 유지되는 상태를 도시하는 실험 사진으로, 제2 변수  $r^2$  를 제1 변수  $r^1$  에 비해 훨씬 큰 값으로 설정하여 실험한 상태를 나타낸다.

[0074] 도 5에서, 만약 제2 변수  $r^2$  가 무한대라면 볼-온-플레이트 시스템의 균형을 유지하기 위한 매니플레이터 말단부의 이동모션이 제거될 수 있다. 이에 따라 플레이트를 지지하는 매니플레이터 말단부의 회전 모션만이 균형 제어에 이용되며, 이동 모션은 매니플레이터에 작용하는 외력에 대한 순응에 이용될 수 있다.

[0075] 도 6은 도 5의 실험에 대한 결과 그래프들이다.

[0076] 우선 도 5의 실험 사진에서 실험 시작 후, 약 3.2초에서 4.0초까지 매니플레이터 말단부에 외력을 가하였다. 도 6의 (c)에서 매니플레이터 말단부는 외력에 순응하여 이동하고, 4.0초 후 0으로 수렴하기 시작한다. 매니플레이터 말단부의 회전 모션만이 균형제어에 이용되며 볼의 위치 또한 0으로 수렴한다.

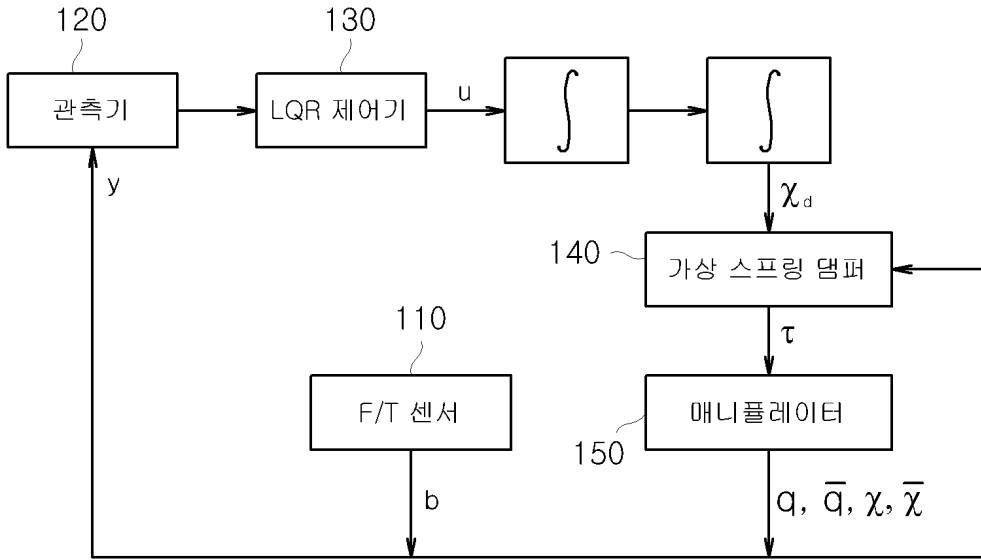
[0077] 상기에서는 본 발명의 바람직한 실시예에 대하여 설명하였지만, 본 발명은 이에 한정되는 것이 아니고 특허청구 범위와 발명의 상세한 설명 및 첨부한 도면의 범위 안에서 여러 가지로 변형하여 실시하는 것이 가능하고 이 또한 본 발명의 범위에 속하는 것은 당연하다.

**부호의 설명**

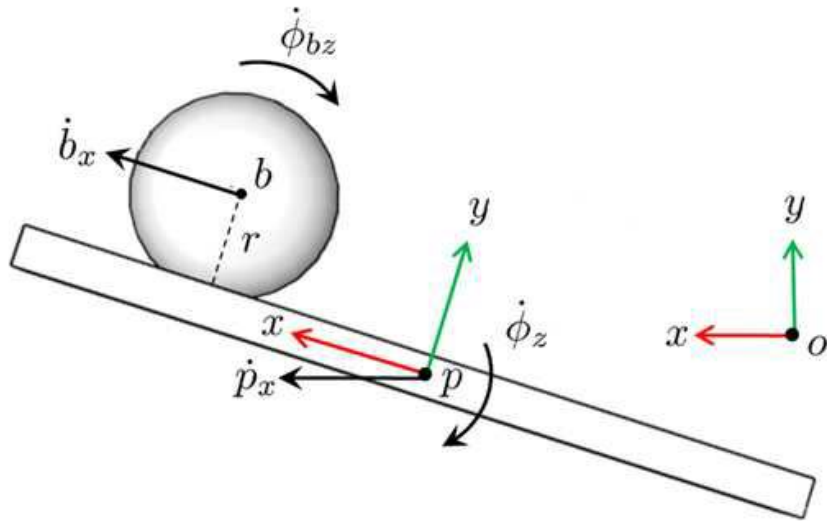
- [0078] 110: F/T 센서
- 120: 관측기
- 130: LQR 제어기
- 140: 가상 스프링 댐퍼
- 150: 매니플레이터

도면

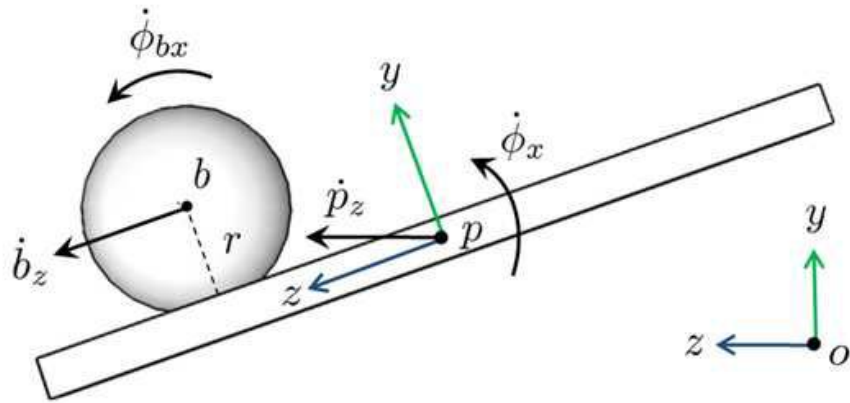
도면1



도면2

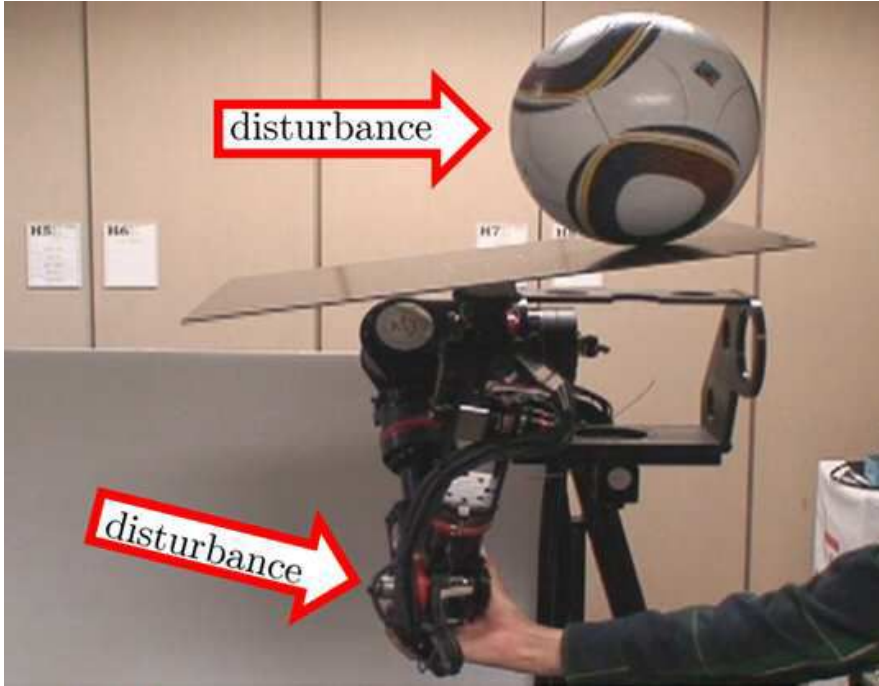


(a) x-y 평면

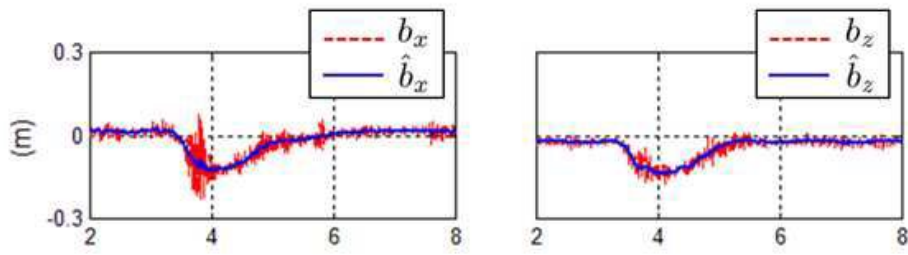


(b) y-z 평면

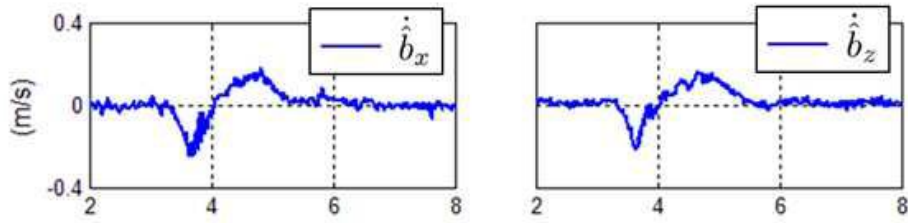
도면3



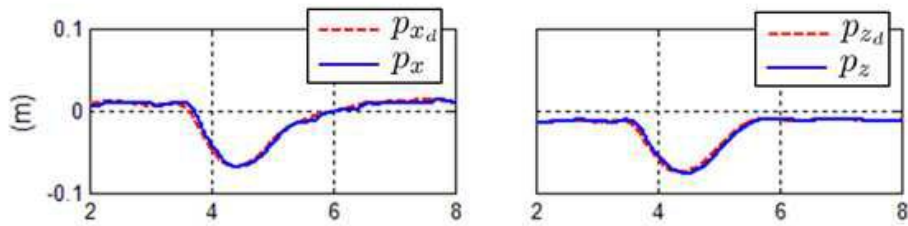
도면4



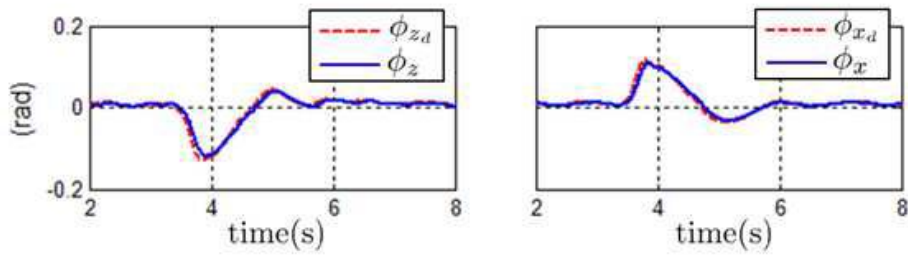
(a) 계산된 볼의 위치와 추정된 볼의 위치



(b) 추정된 볼의 속도

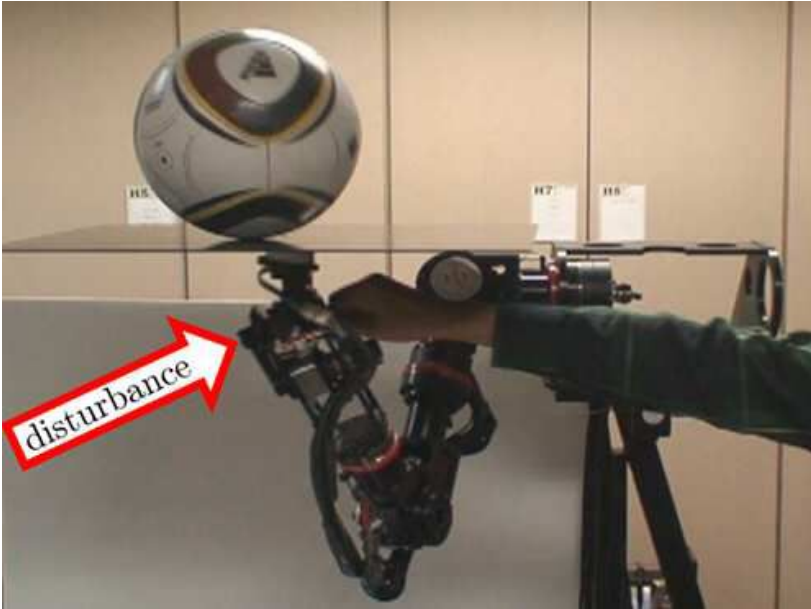


(c) 매니플레이터 말단부의 목표 위치와 현재 위치

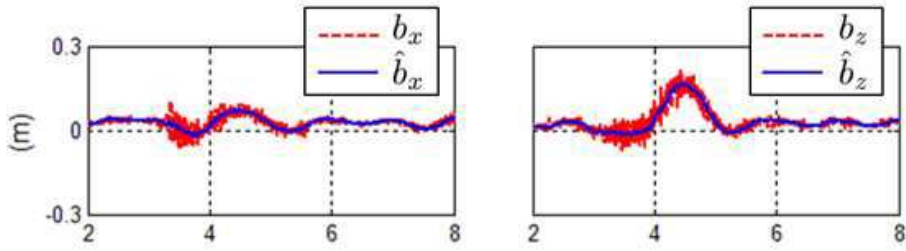


(d) 매니플레이터 말단부의 목표 방위와 현재 방위

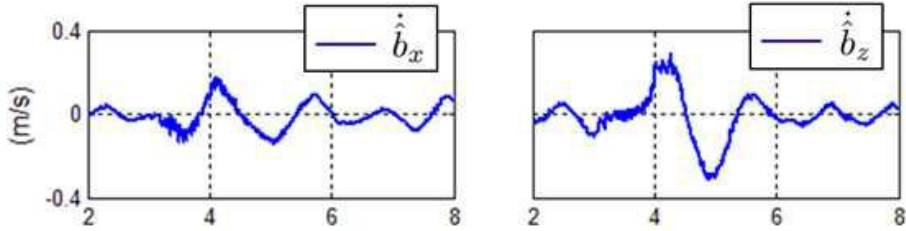
도면5



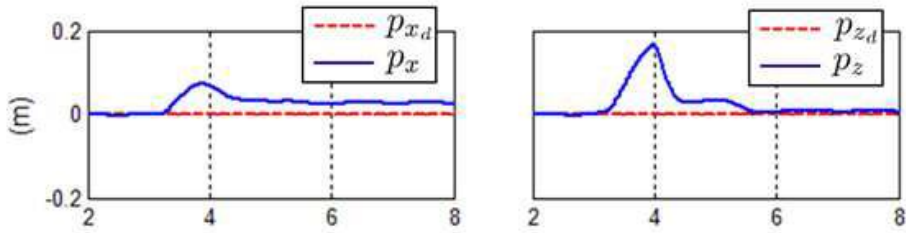
도면6



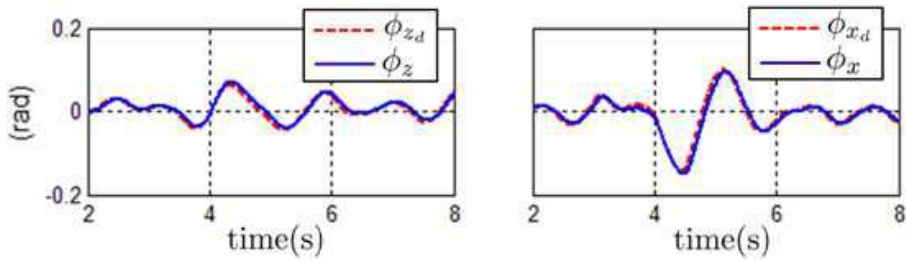
(a) 계산된 볼의 위치와 추정된 볼의 위치



(b) 추정된 볼의 속도



(c) 매니퓰레이터 말단부의 목표 위치와 현재 위치



(d) 매니퓰레이터 말단부의 목표 방위와 현재 방위