(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2013-0111044
(43) 공개일자 2013년10월10일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G05D 1/08 (2006.01) *G05D 13/00* (2006.01)
(21) 출원번호 10-2012-0033528
(22) 출원일자 2012년03월30일
심사청구일자 2012년03월30일

(71) 출원인
세종대학교산학협력단
서울특별시 광진구 능동로 209 (군자동, 세종대학교)
(72) 발명자
홍성경
서울특별시 서초구 반포동 99-2 이안애빌라 101호
황성필
대전광역시 동구 대별동 20-1번지
(74) 대리인
장수현

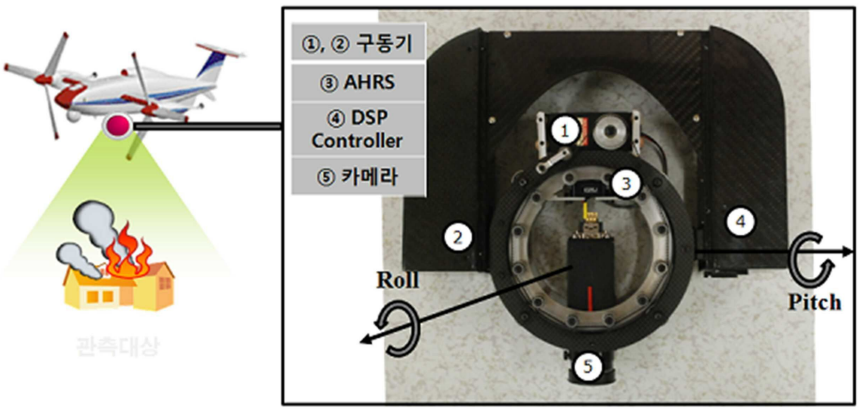
전체 청구항 수 : 총 14 항

(54) 발명의 명칭 **쿨롱마찰을 보상하는 무인항공기용 영상 안정화 시스템 및 쿨롱마찰 보상방법**

(57) 요 약

본 발명의 쿨롱 마찰을 보상하는 무인 항공기용 영상 안정화 시스템은 롤 축과 피치 축의 2축 영상 안정화 기구물; 상기 롤 축과 피치 축의 구동을 위한 구동기; 절대 오일러 자세각의 측정을 위한 자세각 측정기; 안정화 제어 알고리즘 연산을 위한 콘트롤러; 및 목표물의 영상을 촬영하기 위한 카메라를 포함한다. 본 발명에 의하면, 쿨롱마찰계수 추정을 위한 추정오차의 동적 안정성을 보장하는 리아프노프(Lyapunov) 기반의 추정기의 출력이 제어기의 제어출력에 반영됨으로써 적은 위치 추종 오차에 의한 정밀 위치 응답과 안정화 성능을 향상시킬 수 있는 효과가 있다.

대 표 도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	06국토정보B01
부처명	국토해양부
연구사업명	첨단도시기술개발사업
연구과제명	실시간 공중자료 획득시스템 개발 : 센서 안정화 시스템 개발
주관기관	서울 시립대학교
연구기간	2007.11.27 ~ 2012.04.26

특허청구의 범위

청구항 1

쿨롱 마찰을 보상하는 무인 항공기용 영상 안정화 시스템으로서,

롤 축과 피치 축의 2축 영상 안정화 기구물;

상기 롤 축과 피치 축의 구동을 위한 구동기;

절대 오일러 자세각의 측정을 위한 자세각 측정기;

안정화 제어 알고리즘 연산을 위한 콘트롤러; 및

목표물의 영상을 촬영하기 위한 카메라를 포함하는 쿨롱 마찰을 보상하는 무인 항공기용 영상 안정화 시스템.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

상기 2축 영상 안정화 기구물은 알루미늄과 가볍고 단단한 탄소섬유를 기본 재료로 하고, 상기 2축 영상 안정화 기구물이 장착되는 무인 항공기의 기체 축과 일치시켜 상기 롤 축과 피치 축의 구동이 가능한

것을 특징으로 하는 쿨롱 마찰을 보상하는 무인 항공기용 영상 안정화 시스템.

청구항 3

청구항 1에 있어서,

상기 구동기는 펄스폭 변조방식의 RC 서보모터가 가지고 있던 지연을 줄이고 속도제어가 가능한 기어드 DC 서보모터인

것을 특징으로 하는 쿨롱 마찰을 보상하는 무인 항공기용 영상 안정화 시스템.

청구항 4

청구항 1에 있어서,

상기 자세각 측정기는 상기 롤 축과 피치 축의 안정화를 위한 각속도 정보 및 상기 영상 안정화 시스템이 탑재된 무인 항공기와 독립적으로 카메라 시선 방향의 고정 기능을 위한 절대 자세 정보를 획득하는

것을 특징으로 하는 쿨롱 마찰을 보상하는 무인 항공기용 영상 안정화 시스템.

청구항 5

청구항 1에 있어서,

상기 영상 안정화 시스템에 들어가는 입력과 출력을 데이터로 사용하여 시스템의 모델 계수를 얻는 예측오차기법을 이용하여 추출한 영상 안정화 시스템의 수학적 모델에 기초하여 구성되는 제어기를 더 포함하는

것을 특징으로 하는 쿨롱 마찰을 보상하는 무인 항공기용 영상 안정화 시스템.

청구항 6

청구항 5에 있어서,

상기 예측오차기법을 이용하여 추출한 영상 안정화 시스템의 수학적 모델은,

$$G(q,\theta)=\frac{B(q)}{A(q)}=\frac{b_1q^{-nk}+b_2q^{-nk-1}+\ldots+b_{nb}q^{-nk-nb+1}}{1+a_1q^{-1}+\cdots+a_{na}q^{-na}}$$

$$H(q,\theta)=1,\ \theta=[a_1\ \cdots\ a_{na}\ b_1\ \cdots\ b_{nb}]^T$$

G : 시스템의 동적 특성

H : 외란이나 잡음특성

q : 지연 연산자

θ : 구하고자 하는 모델 계수의 벡터

인 것을 특징으로 하는 쿨롱 마찰을 보상하는 무인 항공기용 영상 안정화 시스템.

청구항 7

청구항 6에 있어서,

상기 영상 안정화 시스템의 수학적 모델의 롤 축과 피치 축의 전달함수는

Roll 축 : $G_{roll}(s)=\frac{183.3165}{0.05395s+1}$

Pitch 축 : $G_{Pch}(s)=\frac{4701.8552}{0.1718s+1}$

인 것을 특징으로 하는 쿨롱 마찰을 보상하는 무인 항공기용 영상 안정화 시스템.

청구항 8

청구항 5에 있어서,

상기 제어기는 안정화를 위한 각속도 제어루프를 내부루프로 하고, 관성 축에 대한 각도를 유지 및 추종하기 위한 자세 제어루프를 외부루프로 하는 다중루프로 구성되는

것을 특징으로 하는 쿨롱 마찰을 보상하는 무인 항공기용 영상 안정화 시스템.

청구항 9

청구항 8에 있어서,

상기 제어기는 상기 내부루프에 영상 안정화 시스템의 외부 플랫폼과 베어링 사이의 비선형 마찰력인 쿨롱 마찰을 추정하여 보상하는 쿨롱 마찰 추정기를 구비하는

것을 특징으로 하는 쿨롱 마찰을 보상하는 무인 항공기용 영상 안정화 시스템.

청구항 10

청구항 9에 있어서,

상기 쿨롱 마찰 추정기는 쿨롱 마찰 추정 오차의 동적 안정성을 보장하는 리아프노프 기반의 추정기로서, 상기

쿨롱 마찰 추정기의 출력은 상기 제어기의 제어출력에 반영되는

것을 특징으로 하는 쿨롱 마찰을 보상하는 무인 항공기용 영상 안정화 시스템.

청구항 11

예측오차기법에 의해 추출된 영상 안정화 시스템의 수학적 모델을 이용하는 무인 항공기용 영상 안정화 시스템의 쿨롱 마찰 보상방법으로서,

(a) 상기 영상 안정화 시스템의 수학적 모델에 의해 영상 안정화 시스템의 제어기가 구성되는 단계;

(b) 쿨롱 마찰 추정기가 상기 영상 안정화 시스템의 외부 플랫폼과 베어링 사이의 쿨롱 마찰을 추정하여 보상하는 단계; 및

(c) 상기 쿨롱 마찰 추정기의 출력이 상기 영상 안정화 시스템의 제어기의 제어출력에 반영되는 단계를 포함하는 무인 항공기용 영상 안정화 시스템의 쿨롱 마찰 보상방법.

청구항 12

청구항 11에 있어서,

상기 영상 안정화 시스템의 수학적 모델은 상기 영상 안정화 시스템에 들어가는 입력과 출력을 데이터로 사용하여 시스템의 모델 계수를 얻는 예측오차기법에 의해 추출되는

것을 특징으로 하는 무인 항공기용 영상 안정화 시스템의 쿨롱 마찰 보상방법.

청구항 13

청구항 12에 있어서,

상기 예측오차기법에 의해 추출되는 영상 안정화 시스템의 수학적 모델은,

$$G(q,\theta)=\frac{B(q)}{A(q)}=\frac{b_1q^{-nk}+b_2q^{-nk-1}+\ldots+b_{nb}q^{-nk-nb+1}}{1+a_1q^{-1}+\cdots+a_{na}q^{-na}}$$

$$H(q,\theta)=1,\ \theta=[a_1\ \cdots\ a_{na}\ b_1\ \cdots\ b_{nb}]^T$$

G : 시스템의 동적 특성

H : 외란이나 잡음특성

q : 지연 연산자

θ : 구하고자 하는 모델 계수의 벡터

인 것을 특징으로 하는 무인 항공기용 영상 안정화 시스템의 쿨롱 마찰 보상방법.

청구항 14

청구항 13에 있어서,

상기 영상 안정화 시스템의 수학적 모델의 롤 축과 피치 축의 전달함수는

$$\text{Roll 축 : } G_{roll}(s)=\frac{183.3165}{0.05395s+1}$$

Pitch 축 : $G_{Pch}(s) = \frac{4701.8552}{0.1718s + 1}$

인 것을 특징으로 하는 무인 항공기용 영상 안정화 시스템의 쿨롱 마찰 보상방법.

명 세 서

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 쿨롱마찰을 보상하는 무인항공기용 영상 안정화 시스템 및 쿨롱마찰 보상방법에 관한 것으로, 보다 상세하게는 무인 항공기에 탑재된 영상 안정화 시스템의 제어기의 제어출력에 쿨롱마찰을 추정하여 보상하는 추정기의 출력이 반영된 쿨롱마찰을 보상하는 무인항공기용 영상 안정화 시스템 및 쿨롱마찰 보상방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 영상 짐벌(gimbal) 시스템은 탑재된 항공기의 기동에 의한 외란과 장착부위 진동의 영향을 받음에도 불구하고 영상의 흔들림을 제거하고 원하는 표적 방향으로 영상장비를 유지하는 장치이다. 이 시스템은 무인항공기(UAV) 등에 탑재되어 군사용 목적의 공중 감시 및 정찰 뿐만 아니라 산불 관측, 항공촬영 및 측량 등에 활용되어 민수 산업 분야에서도 급속한 수요증대가 예상된다.

[0003] 이러한 영상 짐벌 시스템은 각 축과 외부 플랫폼이 상호 베어링으로 연결되어 있으므로 기구학적인 특성상 필연적으로 마찰력이 항상 존재하게 된다. 이러한 기계적 마찰은 동적 선형 마찰과 정적 비선형 마찰로 구분할 수 있다. 동적 선형 마찰은 그 선형성으로 인하여 대부분의 경우 제동 효과를 크게 주므로 안정도를 높이는데 긍정적인 역할을 한다. 이에 비하여 통상 쿨롱 마찰(coulomb friction)이 라고 지칭되는 정적 비선형 마찰은 거의 모든 시스템에 그 크기가 무시할 수 없을 정도로 존재하는 경우가 많다. 이러한 쿨롱 마찰은 시스템의 움직임이 시작될 때 접촉 표면의 상대 운동에 반하는 정적 마찰로서 고정밀 시스템의 제어 성능에 영향을 미쳐 위치 오차와 느린 응답의 원인이 된다. 특히 고정밀을 요하는 영상 짐벌 시스템의 경우 안정화 성능뿐만 아니라 목표물 추적 제어시에도 그 영향이 매우 크다.

[0004] 따라서 최근 짐벌 시스템 설계시 위와 같은 비선형 쿨롱 마찰을 극복할 수 있는 다양한 제어기 설계에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 그 대표적인 예로써 비선형 정적 마찰력의 수학적 모델링 또는 룩업 테이블(Look-up Table)을 기반으로 하는 제어기 설계 기법이 제안되었다. 이러한 방법을 통하여 제어성능을 크게 향상시킬 수는 있으나 수학적 모델링이 많은 실험에 의존하고 있어 실제적인 적용에 한계가 있다. 한편 쿨롱 마찰력의 실시간 추정을 위하여 적응 추정기를 설계하고 그 추정치를 제어기 출력의 계산에 반영시키는 마찰 추정보상제어 기법이 제안되었다. 그러나 이들은 마찰력 추정시 시스템의 속도의 양에 제한조건이 부가되어 있어 그 성능이 제한적이며, 또한 계산량에 대한 부하가 커서 저가 시스템에 적용시 실시간성 보장이 어려운 문제점이 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 본 발명은 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 창안된 것으로서, 쿨롱마찰계수 추정을 위한 추정오차의 동적 안정성을 보장하는 리아프노프(Lyapunov) 기반의 추정기의 출력이 제어기의 제어출력에 반영되도록 한 쿨롱마찰을 보상하는 무인항공기용 영상 안정화 시스템 및 쿨롱마찰 보상방법을 제공함을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

[0006] 상기한 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 쿨롱 마찰을 보상하는 무인 항공기용 영상 안정화 시스템의 일 측면에 따르면, 롤 축과 피치 축의 2축 영상 안정화 기구물; 상기 롤 축과 피치 축의 구동을 위한 구동기; 절대 오일러 자세각의 측정을 위한 자세각 측정기; 안정화 제어 알고리즘 연산을 위한 콘트롤러; 및 목표물의 영상을 촬영하기 위한 카메라를 포함한다.

[0007] 상기한 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 예측오차기법에 의해 추출된 영상 안정화 시스템의 수학적 모델을 이용하는 무인 항공기용 영상 안정화 시스템의 쿨롱마찰 보상방법의 일 측면에 따르면, (a) 상기 영상 안정화 시스템의 수학적 모델에 의해 영상 안정화 시스템의 제어기가 구성되는 단계; (b) 쿨롱 마찰 추정기가 상기 영

상 안정화 시스템의 외부 플랫폼과 베어링 사이의 쿨롱 마찰을 추정하여 보상하는 단계; 및 (c) 상기 쿨롱 마찰 추정기의 출력이 상기 영상 안정화 시스템의 제어기의 제어출력에 반영되는 단계를 포함한다.

발명의 효과

[0008] 본 발명에 의하면, 쿨롱마찰계수 추정을 위한 추정오차의 동적 안정성을 보장하는 리아프노프(Lyapunov) 기반의 추정기의 출력이 제어기의 제어출력에 반영됨으로써 적은 위치 추종 오차에 의한 정밀 위치 응답과 안정화 성능을 향상시킬 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0009] 도 1은 본 발명의 일실시예에 따른 2축 영상 짐벌 시스템의 구성을 나타내는 도면.

도 2는 영상 짐벌 시스템의 블랙박스 모델을 나타내는 도면.

도 3은 롤 축의 실험 데이터와 시뮬레이션 응답 비교를 나타내는 도면.

도 4는 피치 축의 실험 데이터와 시뮬레이션 응답 비교를 나타내는 도면.

도 5는 영상 안정화 시스템의 제어기 구성을 나타내는 도면.

도 6은 롤 축과 피치 축의 위치 추종 응답을 나타내는 도면.

도 7은 롤 축과 피치 축의 안정화 응답을 나타내는 도면.

도 8은 쿨롱 마찰의 일예를 나타내는 도면.

도 9는 쿨롱 마찰 추정기의 구성을 나타내는 도면.

도 10은 쿨롱 마찰 추정기가 포함된 시스템 제어기의 구성을 나타내는 도면.

도 11은 쿨롱 마찰 추정기가 포함된 롤 축 위치 추정 응답을 나타내는 도면.

도 12는 쿨롱 마찰 추정기가 포함된 피치 축 위치 추정 응답을 나타내는 도면.

도 13은 쿨롱 마찰 추정기가 포함된 안정화 응답을 나타내는 도면.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0010] 이하 첨부된 도면을 참조로 본 발명의 바람직한 실시예를 상세히 설명하기로 한다. 이에 앞서, 본 명세서 및 청구범위에 사용된 용어나 단어는 통상적이거나 사전적인 의미로 한정해서 해석되어서는 아니되며, 발명자는 그 자신의 발명을 가장 최선의 방법으로 설명하기 위해 용어의 개념을 적절하게 정의할 수 있다는 원칙에 입각하여 본 발명의 기술적 사상에 부합하는 의미와 개념으로 해석되어야만 한다. 따라서, 본 명세서에 기재된 실시예와 도면에 도시된 구성은 본 발명의 가장 바람직한 일 실시예에 불과할 뿐이고 본 발명의 기술적 사상을 모두 대변하는 것은 아니므로, 본 출원시점에 있어서 이들을 대체할 수 있는 다양한 균등물과 변형예들이 있을 수 있음을 이해하여야 한다.

[0011] 도 1은 본 발명의 일실시예에 따른 2축 영상 짐벌 시스템의 구성을 나타내는 도면이다.

[0012] 도시된 바와 같이, 본 발명의 2축 영상 짐벌 시스템은 2축(롤/피치 축) 영상 짐벌 기구물과 각 축의 구동을 위한 DC 서보모터(1,2)와, 절대 오일러 자세각의 측정을 위한 자세제어 시스템(AHRS: Attitude Heading Reference System)(3)와, 안정화 제어 알고리즘 연산을 위한 DSP 콘트롤러(4)와, 카메라(5)를 포함한다.

[0013] 짐벌 구조물은 알루미늄과 가볍고 단단한 탄소섬유를 기본 재료로 하고 장착되는 UAV 기체 축과 일치시켜 롤 축과 피치 축의 구동이 가능하다. 구동기인 DC 서보모터(1,2)의 경우 PWM 변조방식의 저가 RC 서보모터를 Geared DC 모터로 개조하여 사용한다. 이로 인해 RC 서보가 기존에 가지고 있던 지연(Delay)을 줄이고 속도제어가 가능하게 된다. 각 축에 선정된 모터의 주요 성능은 하기의 표 1과 같다.

표 1

[0014]

주요 제원	roll 축 구동기	pitch 축 구동기
Model	Hitec사의 HS-5755MG	Hitec사의 HSR-5990TG
Supply voltage	6 V	6 V
Torque	25 kg·cm	24 kg·cm
Rated speed	0.19 sec/60°	0.17 sec/ 60°
Size	59*29*52mm	40×20×37 mm
Weight	172.3 g	68 g

[0015] 한편 롤, 피치 축의 안정화를 위한 각속도 정보 및 탑재 비행체와 독립적으로 카메라 시선 방향의 고정 기능을 위한 절대 자세 정보를 획득하기 위하여 소형, 경량의 AHRS(3)를 사용하였다. AHRS(3)의 주요 성능은 하기의 표 2와 같다.

표 2

[0016]

주요 제원	Attitude Heading Reference System (AHRS)
Model	MicroStrain사의 3DM-GX3-25
Supply voltage	5V
Data rate	1 to 1000 Hz
Orientation Accuracy	+/- 0.5° typical for static +/- 2.0° typical for dynamic
Orientation resolution	<0.1°
Dimensions	44 x 25 x 11 mm
Weight	18 g

[0017] 하기에서는 전술한 영상 짐벌 시스템의 수학적 모델을 추출하는데 이용되는 예측 오차 기법(Prediction Error Method)에 대해 설명하기로 한다.

[0018] 제어대상의 수학적 모델을 얻기 위한 시스템 식별은 제어시스템의 체계적 설계를 위하여 선행되어야 한다. 따라서, 본 발명에서는 이를 위하여 예측오차기법을 사용한다. 예측오차기법은 실제 시스템에 들어가는 입력 u와 시스템 출력 y를 데이터로 사용하여 시스템의 모델 계수를 얻는 방법이다. 일반적으로 선형 시스템의 모델은 하기의 수학식 1과 같이 표현될 수 있다.

수학식 1

[0019]

$$y(t) = G(q)u(t) + v(t)$$
$$v(t) = H(q)e(t)$$

[0020] 여기서, 출력 y는 입력 u에 의한 것과 외란 v에 의한 것의 합으로 생각할 수 있다. 위 모델 구조는 하기의 수학식 2와 같이 표현될 수 있다.

수학식 2

[0021] $$y(t) = G(q,\theta)u(t) + H(q,\theta)e(t)$$

[0022] 이 때, G는 시스템의 동적 특성을 나타내고, H는 외란이나 잡음특성, q는 지연 연산자, θ는 구하고자 하는 모델 계수의 벡터이다. 이 때, 예측 오차는 하기의 수학식 3으로 변환된다.

수학식 3

[0023] $$e(t,\theta) = H^{-1}(q,\theta)[y(t) - G(q,\theta)u(t)]$$

[0024] 예측오차 e는 예측된 값과 측정된 값의 차이를 말하며, 이를 비선형 최소 자승반복법을 이용하여 비용 함수 V(G,H)를 최소화하여 모델의 계수를 구한다. 비용 함수는 하기의 수학식 4와 같이 정의된다.

수학식 4

[0025] $$V_N(G,H) = \sum_{t=1}^{N} e^2(t)$$

[0026] 도 2는 영상 짐벌 시스템의 블랙박스 모델을 나타내는 도면이다. 본 발명에서는 도 2에 나타난 바와 같이 예측 오차 기법 중에 선형 블랙박스 모델(linear black-box models) 접근법 즉, n차의 전달함수로 가정하여 예측 오차 기법을 사용한다. 또한, 수학식 2에서의 외란이나 잡음특성 $H(q,\theta)$는 고려하지 않고 모델을 하기의 수학식 5와 같이 가정하기로 한다.

수학식 5

[0027] $$G(q,\theta) = \frac{B(q)}{A(q)} = \frac{b_1 q^{-nk} + b_2 q^{-nk-1} + \cdots + b_{nb} q^{-nk-nb+1}}{1 + a_1 q^{-1} + \cdots + a_{na} q^{-na}}$$

[0028] $$H(q,\theta) = 1,\ \theta = [a_1 \cdots\ a_{na}\ b_1 \cdots\ b_{nb}]^T$$

[0029] 예측 오차 기법을 사용하기 위해서는 시스템에 인가되는 입력과 그 때의 출력 값을 알아야 한다. 따라서 영상 짐벌 시스템에 임의의 계단파형과 사인파(Sine Wave)를 각 축에 인가하며, 이때 각 축의 각도와 각속도를 자세 제어 시스템(AHRS)을 통하여 획득한다. 실험을 통해 획득한 데이터는 MathWorks사의 MATLAB/Parameter Identification Tool 소프트웨어를 이용하여 모델 계수를 추출하며 그 결과 얻어진 각 축의 전달함수는 하기의 수학식 6과 같다.

수학식 6

[0030] $$\text{Roll 축 : } G_{roll}(s) = \frac{183.3165}{0.05395s + 1}$$

[0031] $$\text{Pitch 축 : } G_{Pch}(s) = \frac{4701.8552}{0.1718s + 1}$$

[0032] 이와 같이 추출된 수학적 모델의 충실도를 검증하기 위하여 동일한 입력 신호에 대한 추정된 모델의 시뮬레이션

응답과 실험을 통해 얻은 응답을 비교한다. 도 3은 롤 축의 실험 데이터와 시뮬레이션 응답 비교를 나타내는 도면이고, 도 4는 피치 축의 실험 데이터와 시뮬레이션 응답 비교를 나타내는 도면이다. 도 3, 4에 나타난 바와 같이 예측 오차 기법을 통해 추정된 모델이 상당히 정확하다. 하기의 표 3은 시뮬레이션을 통한 모델의 응답 데이터와 실제 얻어진 응답 데이터와의 정확도를 나타낸다.

표 3

	roll 축	pitch 축
모델의 전달함수	$G(s)=\frac{183.3165}{0.05395s+1}$	$G(s)=\frac{4701.8552}{0.1718s+1}$
Sine wave	88.6 %	84.2 %
Step input	92.3 %	91.1 %

[0033]

[0034] 하기에서는 전술한 예측오차기법을 이용하여 추출한 영상 짐벌 시스템의 수학적 모델을 바탕으로 영상 짐벌 시스템의 제어기에 대해 설명하기로 한다.

[0035] 영상 짐벌 시스템의 기본 제어기 구조는 도 5와 같이 설계된다. 도 5는 영상 안정화 시스템의 제어기 구성을 나타내는 도면으로서, 안정화를 위한 각속도 제어루프를 내부루프로 하고, 관성 축에 대한 각도를 유지/추종하기 위한 자세 제어루프를 외부루프로 하는 다중루프로 구성된다. 안정화 및 추종 제어루프는 비례 제어기로 설계하고 각 루프에 대한 이득 값을 결정하기 위하여 근 궤적법을 이용한다. 도 5와 같은 영상 안정화 시스템의 최종 제어 신호는 하기의 수학식 7과 같다.

수학식 7

$$E(k)=r(k)-x(k)$$
$$u(k)=K_p(K_\phi E(k)-F(k))$$
$$\frac{x(k)}{r(k)}=\frac{K_pK_\phi K}{\tau s^2+(1+K_pK)s+K_pK_\phi K}$$

[0036]

[0037] 여기서 r(k)는 절대자세 명령치(deg), x(k)는 측정치(deg), E(k)는 자세오차, F(k)는 가속도 오차, u(k)는 제어기 출력으로 실제 구동기 드라이버에 입력되는 PWM duty 비이다.

[0038] 제어기 성능 요구조건은 통상적으로 롤 시정수(1.5 rad/s 가정)가 가장 빠른 응답특성을 가지므로 그 응답 특성보다 10배 이상 큰 고유진동수를 갖으며, 오버슈트는 영상의 질의 저하를 야기하므로 최소화한다(ζ=0.9 이상, ω_n =15(rad/s) 이상).

[0039] 근 궤적법을 이용하여 설정한 각 루프의 이득 값 결과는 하기의 표 4와 같다.

표 4

	롤 축	피치 축
	비례 이득 값	비례 이득 값
Tracking Loop	23	30
Stabilization Loop	0.01	0.01

[0040]

[0041] 제어기가 실제 실험과 동일한 성능 응답을 보이는지 확인하기 위하여 시뮬레이션 응답 데이터와 실제 실험 응답

데이터를 비교해 본다.

[0042] 위치 추종 성능을 확인하기 위하여 각 축에 사인파(Amplitude 10, Frequency 1rad/sec)를 자세 명령으로 인가한다. 하기의 표 5와 도 6은 롤 축, 피치 축의 자세명령의 위치 추종 응답에 대한 시뮬레이션 및 실험 결과이다. 시뮬레이션 결과에서는 롤, 피치 축 모두 위치오차가 없었으나 실제 실험에서는 위치 오차가 존재한다.

표 5

[0043]

	Simulation(RMS)	Experiment(RMS)
롤 축	0 (deg)	0.7 (deg)
피치 축	0 (deg)	1.0 (deg)

[0044] 안정화 성능을 확인하기 위해서는 외란으로 사인파(Amplitude 10, Frequency 1rad/sec)를 인가한다. 하기의 표 6과 도 7은 안정화 응답에 대한 시뮬레이션 및 실험 결과이다. 위치 추종 실험과 마찬가지로 실험 결과 시뮬레이션보다 더 저하된 안정화 성능을 나타낸다. 이러한 성능저하는 제어기 설계시 쿨롱마찰의 비선형성을 고려하지 않았기 때문이며, 이로서 본 발명의 영상 짐벌 시스템에서는 쿨롱마찰의 크기가 무시할 수 없을 정도로 존재하고 있음을 확인할 수 있다.

표 6

[0045]

	Simulation		Experiment	
	Error Max	감소율	Error Max	감소율
롤 축	0.7 (deg)	93 (%)	1.0 (deg)	90 (%)
피치 축	0.4 (deg)	96 (%)	1.4 (deg)	86 (%)

[0046] 전술한 제어기를 실제 영상 안정화 시스템에 적용하게 되면 시뮬레이션 응답과는 달리 위치오차와 안정화 성능이 상당히 저하되었음을 확인할 수 있다. 이는 영상 안정화 시스템의 외부 플랫폼과 베어링 사이의 비선형 마찰력에 의한 것으로 통상 쿨롱 마찰이라 지칭된다. 따라서 하기에서는 이러한 쿨롱 마찰계수 추정을 위한 쿨롱 마찰 계수 추정기에 대해 설명하기로 한다.

[0047] 본 발명에서는 쿨롱마찰계수 추정을 위한 추정기 설계 방법으로서 추정오차의 동적 안정성을 보장하는 리아프노프(Lyapunov) 기반의 추정기 설계기법을 제안하였으며, 설계된 추정기의 출력이 기존의 제어기의 제어출력에 반영되도록 한다.

[0048] 쿨롱 마찰은 속도의 크기에 상관없이 방향에 대해서만 종속되어 일정한 크기의 힘으로 발생되는 비선형성을 지닌 마찰력으로서 시스템의 제어 입력에 반하는 값이다. 따라서 실제 쿨롱 마찰을 추정하여 보상해 주면 쿨롱 마찰에 의한 시스템의 성능 저하는 일어나지 않는다. 쿨롱 마찰력의 일반적인 형태는 도 8과 같고 일반적인 모델은 하기의 수학식 8과 같다.

수학식 8

[0049]
$$T_f(v,a) = a\ sgn(v)$$

[0050] a 는 쿨롱 마찰 계수이고 sgn 은 부호 함수이다. 여기서 속도 역학 방정식은 하기의 수학식 9와 같다.

수학식 9

[0051] $$\dot{v} = -T_f(v,a) + W$$

[0052] 수학식 9에서 W 는 쿨롱 마찰을 제외한 짐벌 시스템에 작용하는 제어 입력 값이다.

[0053] 쿨롱 마찰력 추정에 사용할 비선형 추정기는 하기의 수학식 10과 같다.

수학식 10

[0054] $$\hat{a} = z - k|v|^{\mu}$$

[0055] 여기서 $\hat{a}$ 은 쿨롱 마찰력의 계수 a 의 추정 값이고 z 는 추정기 변수이다. $k > 0,\ \mu > 0$ 이면 z 는 하기의 수학식 11과 같다.

수학식 11

[0056] $$\dot{z} = k\mu|v|^{\mu-1}\left[W - T_f(v,\hat{a}) \right] sgn(v)$$

[0057] 추정기의 성능을 검증하기 위해 리아프노프(Lyapunov) 함수 기반의 오차 동역학 분석을 수행한다. 실제 마찰력과 추정기에 의해 추정된 마찰력과의 추정오차를 $e = a - \hat{a}$ 으로 정의하면,

수학식 12

[0058] $$\begin{aligned}\dot{e} &= -\dot{\hat{a}} \\ &= -\dot{z} + k\mu|v|^{\mu-1}\dot{v}sgn(v) \\ &= k\mu|v|^{\mu-1}sgn(v)[\dot{v} - W + T_f(v,\hat{a})]\end{aligned}$$

[0059] 수학식 12에 수학식 9를 대입하면,

수학식 13

[0060] $$\begin{aligned}\dot{e} &= k\mu|v|^{\mu-1}sgn(v)[-T_f(v,a) + T_f(v,\hat{a})] \\ &= k\mu|v|^{\mu-1}sgn(v)[-(a-\hat{a})sgn(v)] \\ &= -k\mu|v|^{\mu-1}e\end{aligned}$$

[0061] 여기서 추정기 계수 k 와 지수항 μ 가 $k > 0, \mu > 0$ 이라 정한다면 수학식 13에서 주어진 추정기의 추정오차는 시간이 지남에 따라 결국 0으로 수렴하게 된다. 이것은 추정기의 추정치 $\hat{a}$ 가 실제 쿨롱 마찰력 a 로 수렴한다는 것을 나타낸다.

[0062] 또한 위 수학식 9에 의해 W 는 하기의 수학식 14와 같다.

수학식 14

[0063] $$W = u + T_f(v, \hat{a})$$

[0064] 따라서 수학식 11은 하기의 수학식 15와 같이 간략화 될 수 있다.

수학식 15

[0065] $$\dot{z} = k\mu|v|^{\mu-1}usgn(v)$$

[0066] 즉 쿨롱마찰력 추정기는 주어진 영상 안정화 시스템 모델에 대해 실제 측정된 각속도와 제어 입력을 사용하여 쿨롱 마찰력 추정치 $\hat{T}_f$ 를 생성하고 이 값은 시간이 지남에 따라 실제 쿨롱 마찰력 T_f 로 수렴하게 된다. 도 9는 쿨롱 마찰 추정기의 구성도이고, 도 10은 쿨롱 마찰 추정기를 갖는 영상 짐벌 시스템의 제어기 구성도이다.

[0067] 이러한 본 발명의 쿨롱 마찰 추정기가 실제 쿨롱 마찰을 잘 추정하고 실제 실험과 동일한 성능 응답을 보이는지 확인하기 위하여 시뮬레이션 응답 데이터와 실제 실험 응답 데이터를 비교해 본다. 시뮬레이션을 위하여 필요한 실제 쿨롱 마찰 모델에서 계수 a =0.1(롤 축),0.02(피치 축)으로 설정한다.

[0068] 위치 추종 성능을 확인하기 위하여 각 축에 사인파(Amplitude 10, Frequency 1rad/sec)와 임의의 계단파형을 자세 명령으로 인가한다. 하기의 표 7 및 도 11, 12는 롤 축, 피치 축의 자세명령의 위치 추종 응답에 대한 시뮬레이션 및 실험 결과이다.

표 7

[0069]

	Simulation(RMS)		Experiment(RMS)	
	Sine input	Step input	Sine input	Step input
롤 축	0.1 (deg)	0.1 (deg)	0.1 (deg)	0.3 (deg)
피치 축	0.3 (deg)	0.3 (deg)	0.3 (deg)	0.35 (deg)

[0070] 안정화 성능을 확인하기 위해서는 외란으로 사인파(Amplitude 10, Frequency 1rad/sec)를 인가한다. 하기의 표 8 및 도 13은 안정화 응답에 대한 시뮬레이션 및 실험 결과이다.

표 8

[0071]

	Simulation		Experiment	
	Max	감소율	Max	감소율
롤 축	0.6 (deg)	94 (%)	0.55 (deg)	94.5 (%)
피치 축	1.0 (deg)	90 (%)	0.8 (deg)	92 (%)

[0072] 실험 결과 롤, 피치 축 모두 시뮬레이션과 실험 응답이 비슷한 성능을 보였음을 알 수 있다. 또한 쿨롱 마찰 추정기가 실제 쿨롱 마찰 계수 a =0.1(롤 축),0.02(피치 축)를 잘 추종하고 있다.

[0073] 전술한 기본적인 비례 제어기와 쿨롱 마찰보상제어기와의 실험적 성능 평가를 비교하기 위하여 설계 제작된 영상 짐벌 시스템을 3축 모션 테이블에 장착하여 자세 명령에 대한 위치 추종과 외란에 대한 안정화 성능을 비교

하여 그 효율성을 입증한다.

[0074] 1. 위치 추종 성능 실험

[0075] 자세 명령에 대한 위치 추종 성능 실험 방법은 2축 영상 짐벌 시스템의 각 축에 사인파(Ⅰ: Amplitude 10, Frequency 1rad/sec, Ⅱ: Amplitude 10, Frequency 2rad/sec)와 임의의 계단파형을 인가하며 이 때 각 축의 자세를 자세제어 시스템(AHRS)를 통하여 실시간으로 획득한다. 그 결과는 하기의 표 9와 같다.

표 9

[0076]

		Error of Controller (RMS)	Error of CFT Estimator(RMS)
Sine wave (I)	롤 축	0.7 (deg)	0.1 (deg)
	피치 축	1.0 (deg)	0.3 (deg)
Sine wave (II)	롤 축	0.7 (deg)	0.1 (deg)
	피치 축	1 (deg)	0.1 (deg)
Step input	롤 축	0.6 (deg)	0.3 (deg)
	피치 축	1.0 (deg)	0.35 (deg)

[0077] 실험 결과 비례 제어기의 경우에는 쿨롱 마찰에 의하여 위치 오차가 크게 발생하였다. 쿨롱 마찰 토크를 추정하여 보상하였을 때 더욱 개선된 성능을 나타낸다.

[0078] 2. 안정화 성능 실험

[0079] 안정화 성능 실험은 영상 짐벌 시스템의 각도를 0°로 유지하도록 하고 3축 모션 테이블을 통하여 사인파(Ⅰ: Amplitude 10, Frequency 1rad/sec, Ⅱ: Amplitude 10, Frequency 2rad/sec)를 외란으로 준다. 그 결과는 하기의 표 10과 같다.

표 10

[0080]

		Error of Controller		Error of CFT Estimator	
		Max	감소율	Max	감소율
Sine wave (I)	롤 축	1.0 (deg)	90 (%)	0.55 (deg)	94.5 (%)
	피치 축	1.45 (deg)	85.5 (%)	0.8 (deg)	92 (%)
Sine wave (II)	롤 축	1.15 (deg)	88.5 (%)	0.6 (deg)	94 (%)
	피치 축	1.65 (deg)	83.5 (%)	0.7 (deg)	93 %)

[0081] 실험 결과 위치 추종과 마찬가지로 비례 제어기의 경우에는 쿨롱 마찰에 의하여 위치 오차가 크게 발생한다. 하지만 쿨롱 마찰 계수 추정기를 설계함으로서 기존 제어기보다 더 뛰어난 안정화 성능을 확인할 수 있다.

[0082] 전술한 바와 같이, 영상 짐벌 시스템에는 하드웨어 구성상 각 축과 외부플랫폼 사이에 베어링으로 연결되어 있어 마찰력이 항상 존재하게 된다. 특히 비선형 마찰인 쿨롱 마찰 토크는 안정화 제어 시스템의 성능에 큰 영향을 미치므로 이를 극복하는 방법이 필요하다. 따라서 본 발명에서는 이러한 쿨롱 마찰 토크를 보상하기 위한 방법으로 내부 안정화 제어 루프에 쿨롱 마찰을 추정하여 보상하는 추정기를 설계하여 일반적인 비례제어기와 성능을 비교 분석한다. 설계된 제어기는 Matlab Simulink를 이용하여 시뮬레이션하고 3축 모션 테이블에 영상 짐벌 시스템을 장착하여 자세 명령에 따른 위치 추종과 사인파 외란에 대한 안정화 실험을 수행한다.

[0083] 실험 결과 일반적인 비례 제어기는 쿨롱 마찰 토크에 의해 위치 오차가 존재하였으며 쿨롱 마찰 추정기를 설계하여 쿨롱 마찰을 보상하였을 경우 기존 제어기보다 더 적은 위치 추종 오차와 1.8~2.2배 향상된 안정화 성능을 나타낸다. 따라서 안정화 제어 시스템의 정밀 위치 응답과 안정화 성능의 향상을 위해서는 쿨롱 마찰을 추정하여 보상해주는 것이 더 효율적인 방법이다.

[0084] 이상과 같이, 본 발명은 비록 한정된 실시예와 도면에 의해 설명되었으나, 본 발명은 이것에 의해 한정되지 않으며 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 본 발명의 기술사상과 아래에 기재될 특허청구범위의 균등범위 내에서 다양한 수정 및 변형이 가능함은 물론이다.

부호의 설명

[0085] 1, 2 : DC 서보모터

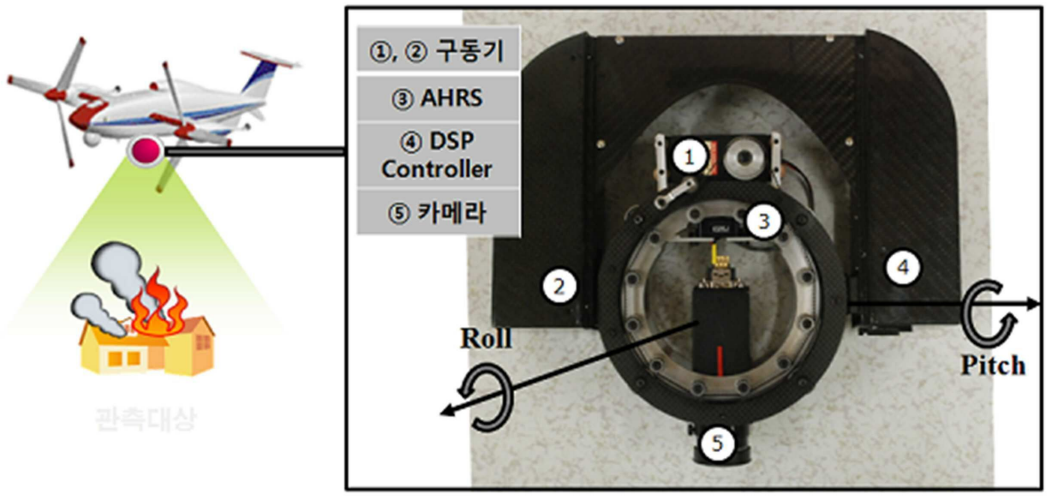
3 : 자세제어 시스템

4 : DSP 콘트롤러

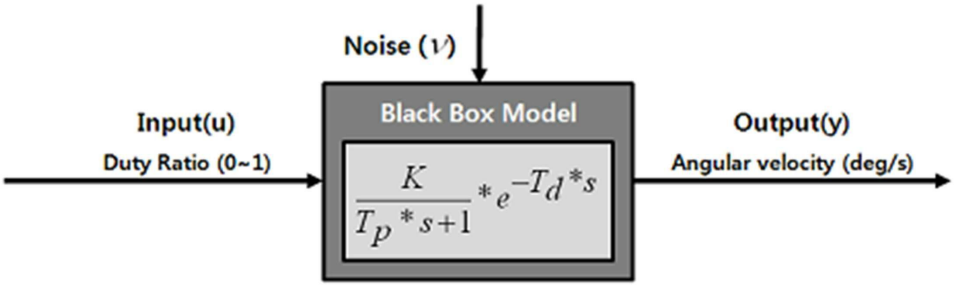
5 : 카메라

도면

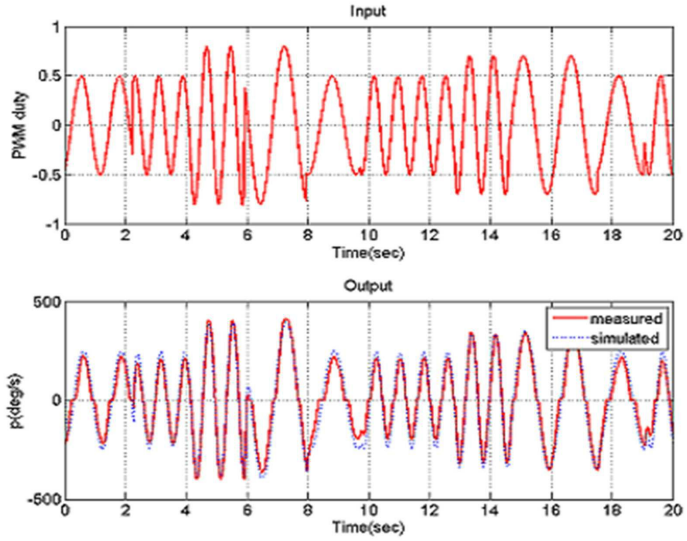
도면1



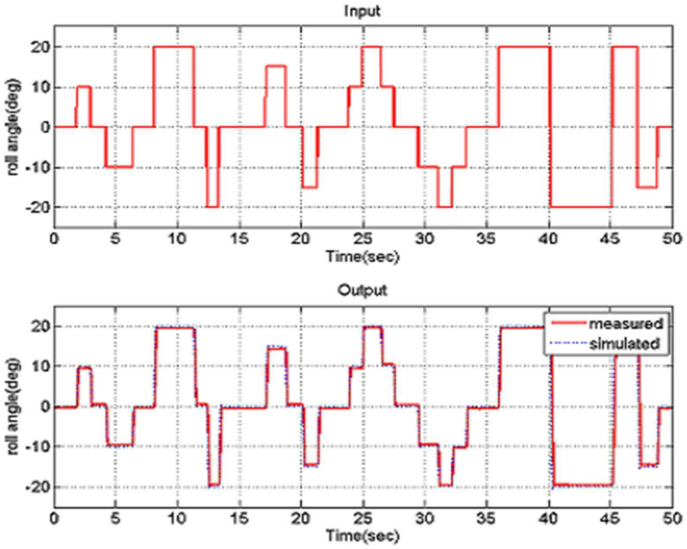
도면2



도면3

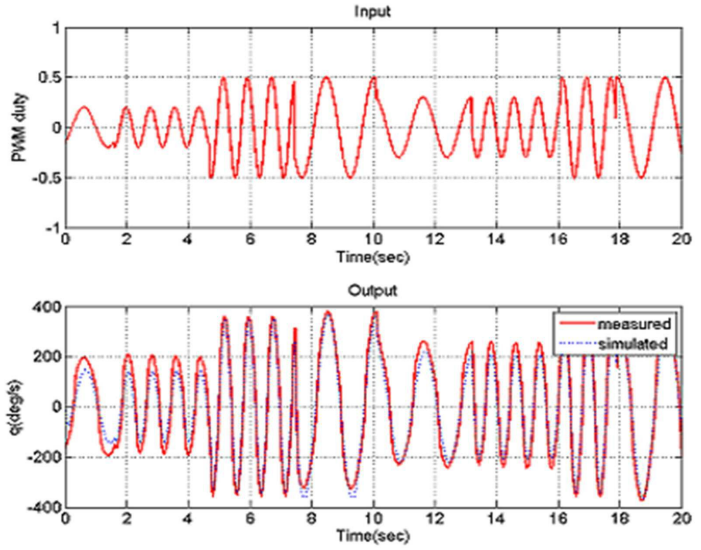


(a) Sine Wave

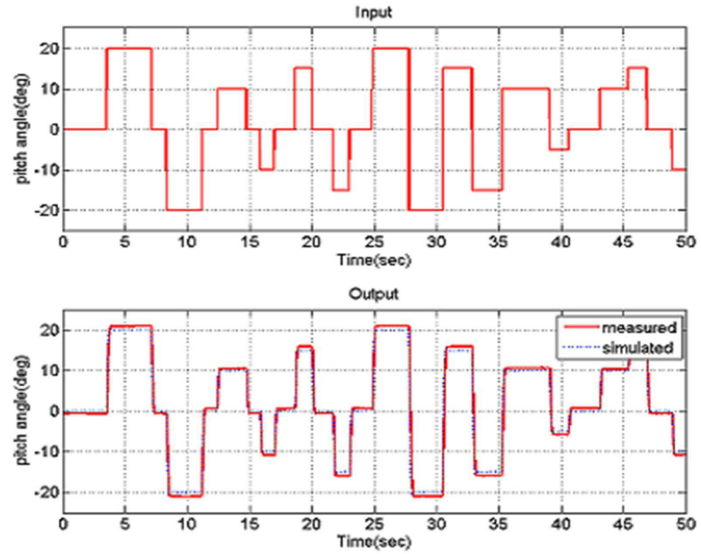


(b) Step input

도면4

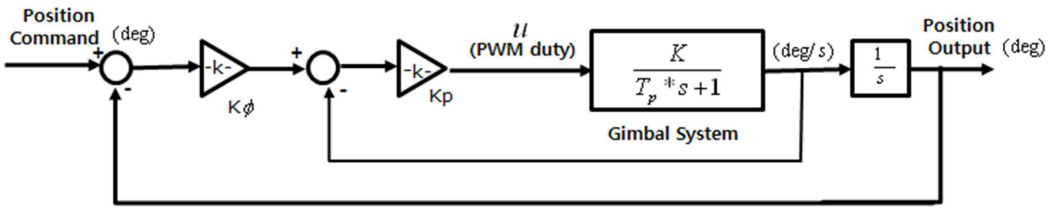


(a) Sine Wave

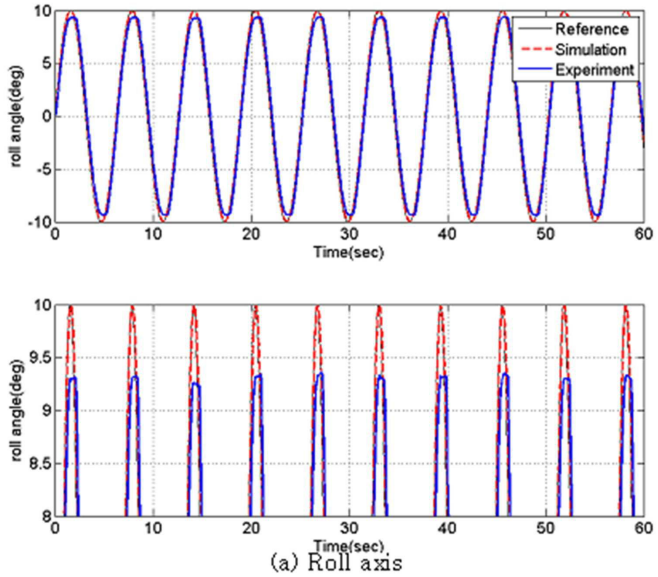


(b) Step input

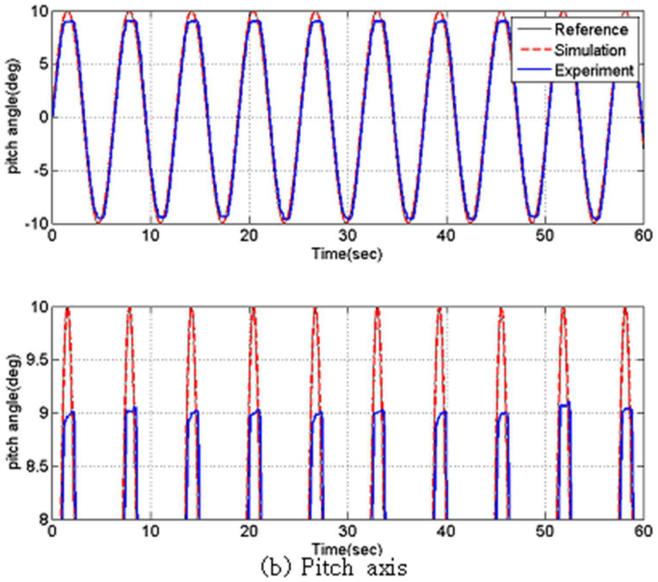
도면5



도면6

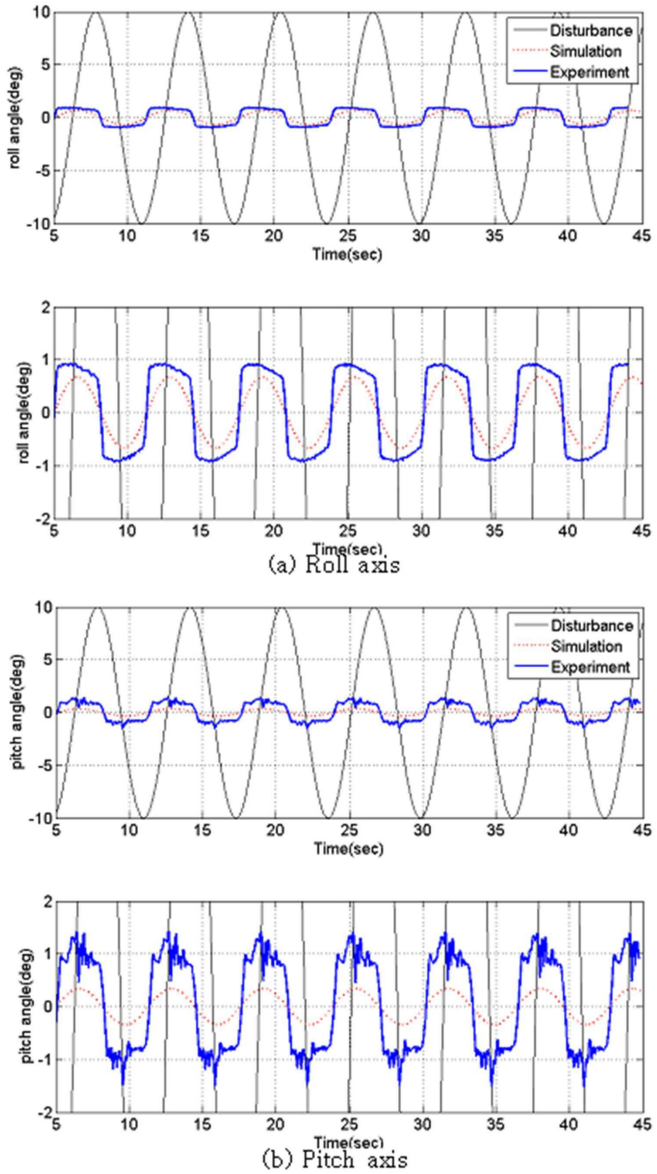


(a) Roll axis

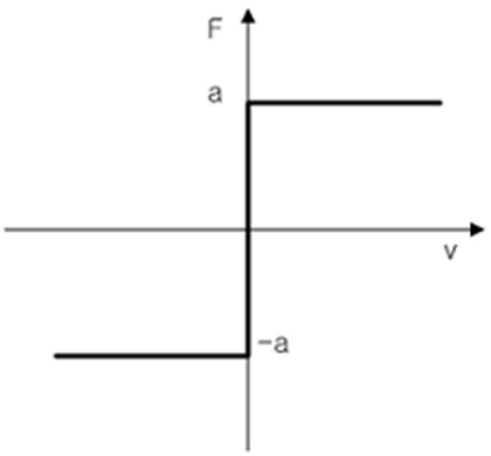


(b) Pitch axis

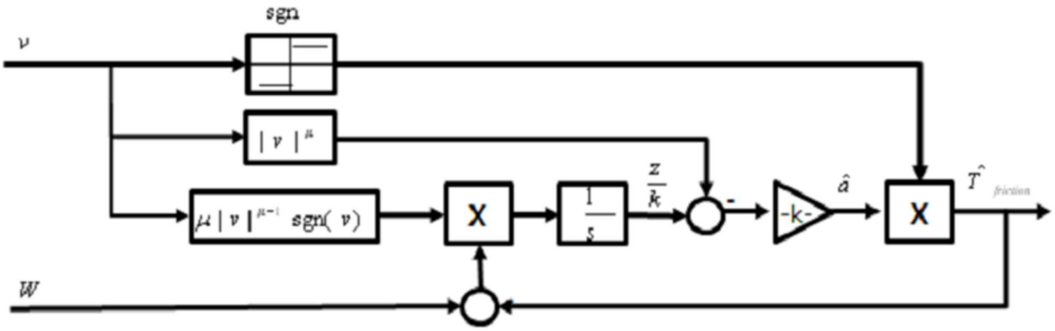
도면7


Disturbance
Simulation
Experiment
roll angle(deg)
pitch angle(deg)
Time(sec)
(a) Roll axis
(b) Pitch axis

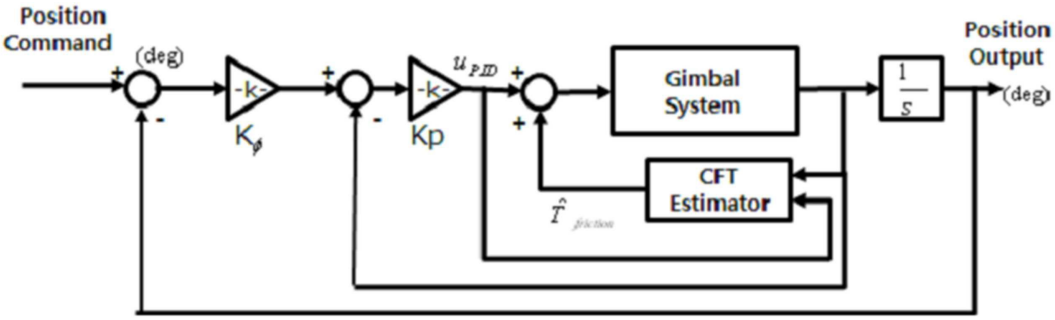
도면8


F
a
v
-a

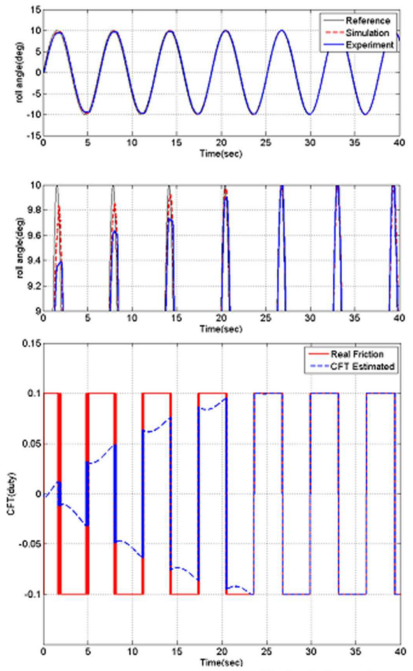
도면9


sgn
v
| v |^μ
μ | v |^(μ-1) sgn(v)
X
1/s
z/k
-
-k-
â
X
T̂ friction
W

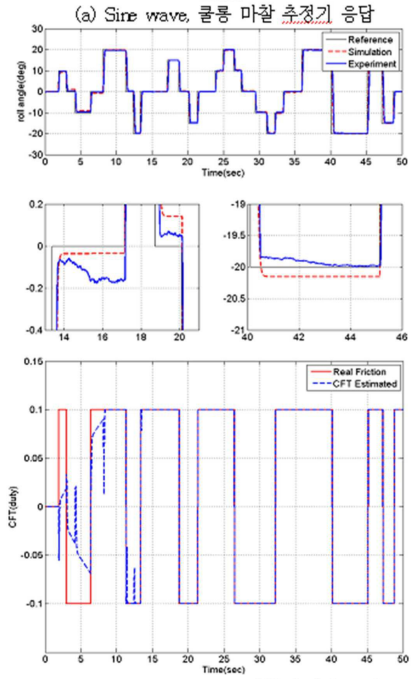
도면10


Position
Command
(deg)
+
-
-k-
Kφ
+
-
-k-
Kp
u PID
+
+
Gimbal
System
1/s
Position
Output
(deg)
CFT
Estimator
T̂ friction

도면11

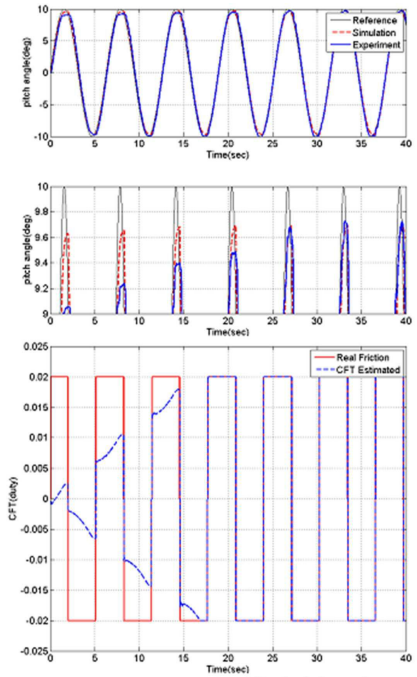


(a) Sine wave, 쿨롱 마찰 추정기 응답

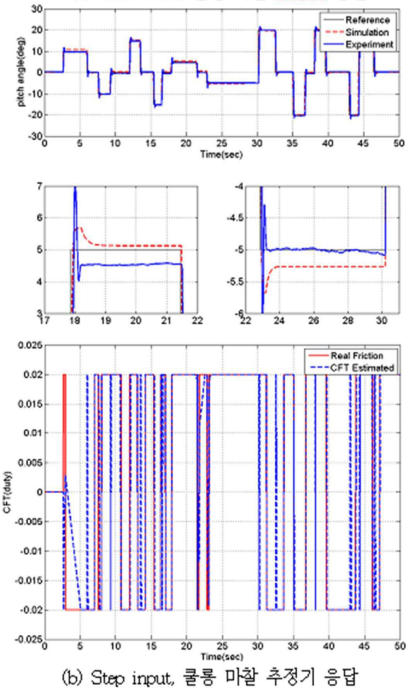


(b) Step input, 쿨롱 마찰 추정기 응답

도면12

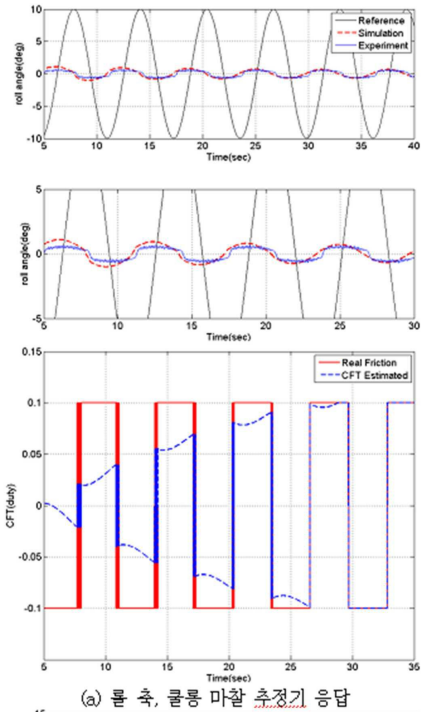


(a) Sine wave, 쿨롱 마찰 추정기 응답

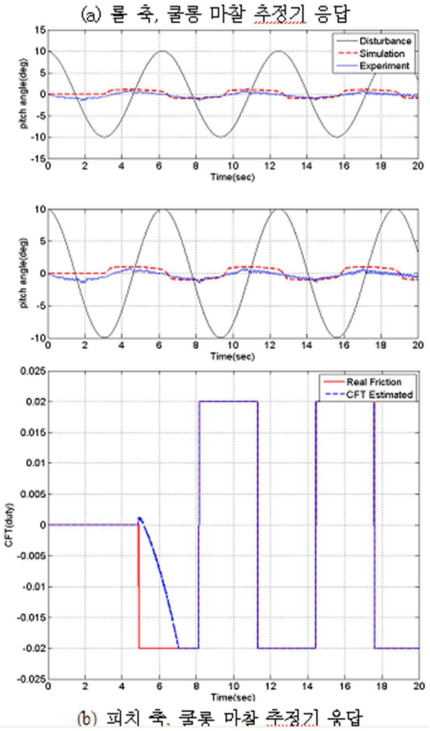


(b) Step input, 쿨롱 마찰 추정기 응답

도면13



(a) 롤 축, 쿨롱 마찰 추정기 응답



(b) 피치 축, 쿨롱 마찰 추정기 응답