

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.1.001>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

외란토크 추정 및 보상을 이용한 관성안정화 플랫폼의 제어

최 경 준* · 원 문 철**
* 충남대학교 메카트로닉스공학과

Control of Inertially Stabilized Platform Using Disturbance Torque Estimation and Compensation

Kyungjun Choi* and Mooncheol Won**

* Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received November 21, 2014 ; Revised November 6, 2015 ; Accepted November 18, 2015)

Key Words: Inertially Stabilized Platform(관성안정화플랫폼), Disturbance Torque Estimation(외란토크추정), Disturbance Torque Compensation Control(외란토크보상제어), Stabilization(안정화), 6 DOF Simulator(6자유도시뮬레이터), Control Simulation Test Bed(제어시뮬레이션환경구축)

초록: 본 논문에서는 기존의 관성안정화 플랫폼에서 보편적으로 사용됐던 PID 제어에 외란관측기를 적용하는 알고리즘 제안한다. 외란관측기 알고리즘을 적용하기 위하여 직접구동 모터로 구동되는 안정화 플랫폼 축의 관성모멘트와 축 마찰 특성을 실험적으로 구하고, 시뮬레이션과 실험결과를 비교하여 정확도를 검증하였다. 또한 차수와 상대차수가 다른 여러 가지 Q-filter 적용실험을 통하여 필터 특성에 따른 시스템의 안정성을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 6 자유도 시뮬레이터를 이용하여 차량 모션 인가실험을 통해 이중 PID 제어 루프의 결과와 비교/검증하였다.

Abstract: In this study, we propose a control algorithm for Inertially Stabilized Platforms (ISP), which combines Disturbance Observer (DOB) with conventional proportional integral derivative (PID) control algorithm. A single axis ISP system was constructed using a direct drive motor. The joint friction was modeled as a nonlinear function of joint speed while the accuracy of the model was verified through experiments and simulation. In addition, various Q-filters, which have different orders and relative degrees of freedom (DOF), were implemented. The stability and performance of the ISP were compared through experimental study. The performance of the proposed PID-plus-DOB algorithm was compared with the experimental results of the conventional double loop PID control under artificial vehicle motion provided motion simulator with six DOF.

- 기호설명 -

$Q(s)$: 큐-필터
 $G(s)$: 제어 대상 시스템
 $G_n(s)$: 제어 대상 시스템의 수학적 모델
 J_t : 시스템의 전체 관성모멘트
 J_n : 시스템의 노미널 관성모멘트
 ΔJ : 관성모멘트의 불확실성
 T_m : 제어 토크

T_c : 참조 입력 토크
 T_t : 전체 입력 토크
 T_d : 전체 외란 토크
 T_{ed} : 조인트 마찰을 제외한 외란 토크
 \hat{T}_d : 추정된 전체 외란 토크
 \hat{T}_m : 추정된 모터 토크
 \hat{T}_t : 추정된 전체 입력 토크
 i_c : 참조 입력 전류
 \hat{i}_d : 추정된 외란 전류

† Corresponding Author, mcwon@cnu.ac.kr

1. 서 론

관성안정화 플랫폼(Inertially Stabilized Platform, ISP)은 100여 년 전부터 선박, 항공기, 자동차 등 다양한 용도로 사용되고 있으며, 현재에는 위성 안테나, 카메라의 흔들림 보정, 망원경 및 무기 시스템 등 여러 분야에서 움직이는 물체에 장착되어 LOS(Line Of Sight)를 원하는 방향으로 지향하는 것을 목적으로 사용된다.

최근에는 무인 경계감시 항공기, 군용 차량 및 선박의 요구가 증가하고 있고, 이들에 탑재되는 카메라나 위성안테나에는 ISP가 필수적이다. 이에 관한 연구로는 선박용 위성안테나에 장착된 ISP⁽¹⁾와 포신 등 무기시스템의 안정화를 목적으로 하는 연구 등⁽²⁾이 있다. ISP가 여러 분야에서 지속적으로 쓰이고 있는 만큼, 현재보다 높은 정밀도를 갖는 시스템의 성능 향상에 대한 연구가 필요하다. 비포장 고속 야지주행 차량이나 소형 선박의 심한 해상상태 운용 시 카메라나 위성안테나를 장착한 ISP 베이스에 심한 외란입력이 있다. 외란에는 ISP의 기구 부 관성질량 불평형, 조인트의 마찰 등으로 생기는 외란토크가 포함된다. 외란의 영향을 줄이기 위해서는 피드백 이득을 크게 해주어야 하는데, 이 경우 센서 노이즈나 센서 다이내믹스의 영향으로 필요한 만큼 피드백 제어 이득을 크게 하는 것은 불가능하다.

큰 피드백 제어 이득을 사용하는 대안으로 외란에 의한 오차 정밀도를 향상시키기 위해 외란 추정 이후, 이를 피드포워드 방식의 직접 보상을 하는 외란관측기(Disturbance Observer, DOB)⁽³⁾가 효과적이다.

DOB는 제어되는 시스템의 수학적 모델을 기반으로 외란을 추정하는 알고리즘이다. 시스템의 출력 측정 후, 다시 시스템의 수학적 모델의 역(Inverse)을 통과하여 시스템에 입력되는 실제 토크를 추정하여 추정된 토크로부터 제어 지령 토크와의 차를 구해 외란토크를 추정하는 방법이다. 외란관측기에 대한 연구로는 움직이는 물체에 탑재된 카메라의 시선안정화 시스템,⁽⁴⁾ 외란토크에 의한 오차를 최소화하여 X-Y Table의 정밀도 향상,⁽⁵⁾ 로봇의 팔 제어에 DOB를 적용하여 움직임에 대한 정밀도의 향상에 대한 연구⁽⁶⁾ 및 DC servomotor의 강인 제어에 DOB를 적용한 연구⁽⁷⁾ 등이 있다.

본 논문에서는 MEMS 타입 자이로 센서와 경사각 센서를 사용하여 기존의 ISP에서 가장 좋은 기법으로 사용됐던 이중 PID 제어 루프에 DOB를 적용하여 1축 안정화 시스템의 제어각도 오차를 최소화 하는 연구를 하였다. 또한, 본 논문은 차량용 2축 ISP의 기초연구로써 6 자유도 시뮬레이터에서 SUV차량 주행 시의 Roll모션을 구현하여, 이중 PID 제어의 결과와 PID+DOB 제어의 결과를 비교하여 DOB의 성능을 검증하였다.

2장에서는 1축 ISP 제어 시스템의 구성 및 제어 알고리즘에 대해 설명하고, 3장에서는 ISP 시스템의 모델링 및 검증을 설명하였다. 4장에서는 DOB의 설계에 대한 설명을 하였고 마지막으로 5장에서는 6 자유도 시뮬레이터에서의 실험을 하여 기존의 ISP 제어방법과 DOB가 적용된 ISP 제어방법의 결과를 비교하였다.

2. 1축 ISP 제어 시스템 및 제어 알고리즘 개요

6 자유도 시뮬레이터에서 DOB 알고리즘이 적용된 ISP의 제어 성능을 검증하기 위해 센서 모듈을 부착한 ISP와 LabVIEW를 통한 제어시스템을 구현하였다.

2.1 1축 ISP 시스템 구성

본 논문에서 사용된 1축 ISP 제어 시스템은 Fig. 1과 같이 ISP의 상판에 경사각 센서와 자이로 센서로 이루어진 센서 모듈을 부착하였다. 센서들은 각각 1차 Analog anti-aliasing 필터를 통과하고, 측정된 ISP의 각도와 각속도가 컴퓨터로 전송된다. 컴퓨터에서는 National Instruments사의 LabVIEW를 이용하여 Moving average 디지털 필터와 1차 Complementary filter^(8,9)로 센서 신호의 노이즈와 경사각 센서의 횡가속도 영향을 최소화 하였다. 또한, LabVIEW에서는 제어 알고리즘을 구성하고 알고리즘에 의한 제어 명령에 따라 ISP

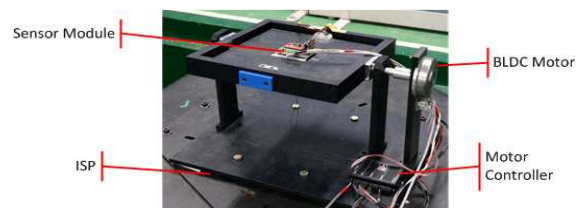


Fig. 1 Single axis ISP system composition

를 제어한다. 컴퓨터와 ISP는 데이터 수집보드를 통해 데이터 전송을 한다.

본 연구에서는 플랫폼을 기어나 풀리 등에 연결하지 않고 직접구동(Direct Drive)방식을 채택하고 높은 토크를 출력할 수 있는 모터를 사용하였다. 사용한 Pancake형 BLDC 모터는 회전자가 외부에 있어 모터의 외부가 회전하는 형식으로 되어있다. 다른 모터와 상대적으로 높은 관성모멘트를 갖고 있으나, 토크 암이 커서 높은 토크를 출력할 수 있기 때문에 본 연구에 적합하다.

2.2 제어 알고리즘 개요

본 논문에서는 이중 PID 제어루프와 DOB를 이용해 외란 토크를 추정하고 이를 보상하여 ISP의 제어각도 오차를 줄인다. Fig. 2는 본 논문에서 사용한 1축 ISP 제어알고리즘의 블록 다이어그램을 나타낸다. 각도와 각속도를 이용해 이중 PID 제어를 한다. 그리고 각속도를 ISP의 수학적 모델의 역을 통과하여 토크 정보를 얻어 이를 입력 토크와 비교하여 외란토크를 추정하고, 전류 명령으로 보상을 한다.

3. ISP 및 제어시스템의 수학적 모델링 및 검증

본 논문에서 DOB는 시스템 수학적 모델의 역을 이용하여 외란토크를 추정하기 때문에 시스템의 수학적 모델링이 필요하다. 하지만 시스템의 완벽한 수학적 모델링은 사실상 매우 어렵다. 실험을 통해 구한 조인트 마찰 모델과 관성모멘트는 완벽하다고 볼 수 없다. 하지만 모델링되지 않은 부분은 추정된 외란에 포함되어 있어 DOB로 보상을 통해 보완할 수 있다.

3.1 ISP 시스템의 수학적 모델 및 검증

PTC사의 Pro-E로 ISP를 모델링하여 회전축에 대한 관성모멘트를 구하고 모터 로터의 관성모멘트와 더하여 전체관성모멘트(J_t)를 구하였다.

또한, 3상 Y-결선 BLDC 모터는 식 (1)과 같이 1차 시스템으로 모델하고, 전류 흐름은 두개의 저항(R)과 인덕터(L)를 지나기 때문에 저항과 인덕턴스를 두 배로 하여 입력하였다. 이 밖에 모터 Back EMF와 토크 상수는 모터 스펙을 활용하였다.

$$V(t) = Ri(t) + L\frac{di}{dt} + k_e\omega(t) \quad (1)$$

여기서 $V(t)$ 는 모터에 인가되는 전압, k_e 는 모터 Back EMF 상수, i 는 전류이다.

모터 컨트롤러는 전류 피드백 PI 컨트롤러를 사용하므로 PI 제어기로 모델하고 제어이득은 모터 드라이버 오토튜닝 결과로 정해진 이득을 사용하였다.

3.2 조인트 마찰 모델의 실험적 측정 및 검증

ISP 시스템의 운동방정식은 식 (2)과 같다. 모터의 조인트 마찰모델은 모터에 스텝전류를 가하고 최종적으로 얻어진 속도 측정치를 이용하여 모터 속도에 따른 비선형 정적 시스템($f(\omega)$)으로 모델 하였다. 모터의 속도가 정상 상태에 도달하면 $\frac{d\omega}{dt}$ 가 0이 되기 때문에 식 (3)이 성립한다.

$$J\frac{d\omega}{dt} + f(\omega) = T_m = k_m i \quad (2)$$

$$f(\omega) = T_m \quad (3)$$

여기서 k_m 은 모터 토크상수이다.

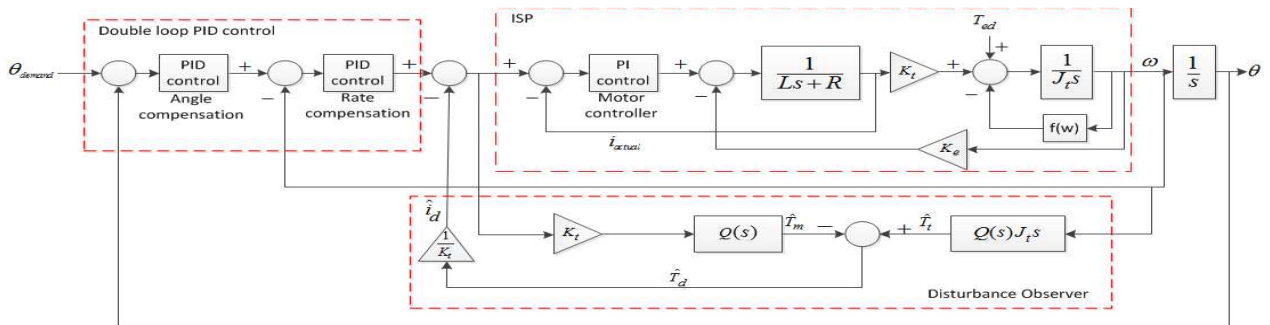


Fig. 2 Block diagram of double loop PID+DOB

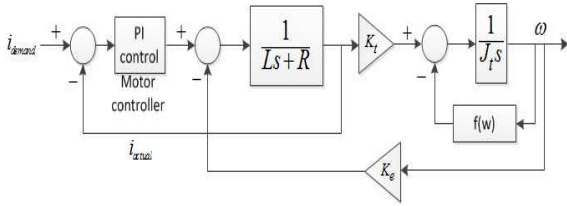


Fig. 3 Block diagram of current control ISP

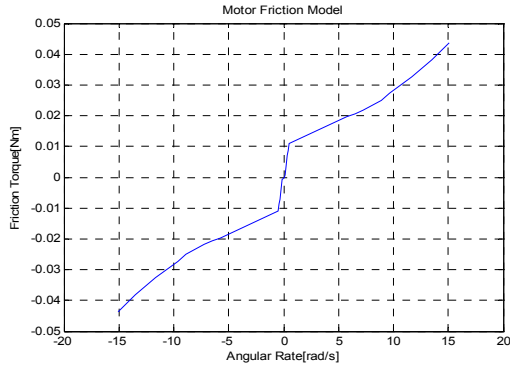


Fig. 4 Joint friction model from experiments

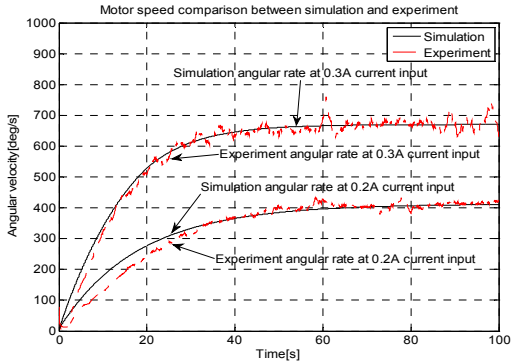


Fig. 5 Motor angular rate compare simulation with experiment at current input

전류 입력에 대한 속도를 구하기 위해 Fig. 3과 같이 시스템 모델을 구성하였다. 이를 이용하여 정상 상태의 속도를 측정 후, Fig. 4와 같이 모터 마찰모델에 대한 Lookup table을 구성하였다. 모터의 Dead Zone 이내 범위에서는 실험이 불가능하므로, 이 범위에서는 모터 속도와 조인트 마찰을 선형으로 가정하였다. 구해진 모델을 시뮬레이션의 조인트 마찰모델에 적용하여 스텝전류 인가 시뮬레이션과 실험과의 결과 비교로 ISP 시스템 모델의 정확성을 검증하였다.

Fig. 5는 스텝전류 입력에 대한 각속도 그래프이다. 엔코더를 통해 얻은 ISP의 실제 각속도와 비교한 결과 약간의 노이즈는 있지만 비교적 정확하게 모델링 된 것을 확인하였다.

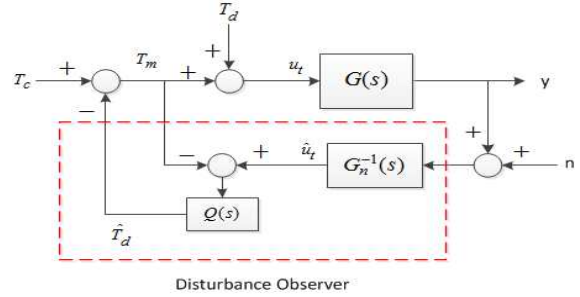


Fig. 6 Conceptual diagram of DOB

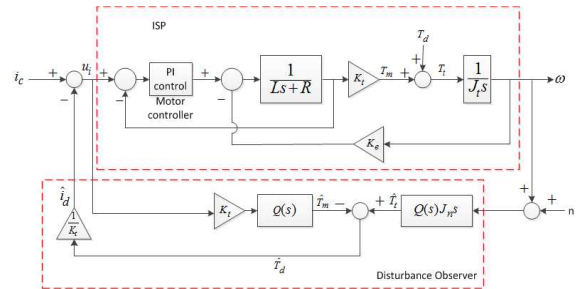


Fig. 7 Block diagram of DOB applied to ISP

4. 외란관측기(Disturbance Observer)

DOB는 1987년 Onish에 의해 처음으로 제안됐다. 이후 DOB는 모터 제어 서보시스템에 널리 사용된 바가 있다.^(5,7,10) DOB의 기본 개념은 Fig. 6과 같이 시스템의 수학적 모델을 기반으로 외란을 추정하여 이를 피드포워드 보상을 한다. 본 논문에서 ISP는 Fig. 7과 같이 전류 제어를 하기 때문에 추정된 외란을 전류로 환산하여 보상하도록 DOB를 적용하였다. Fig.7에서 추정된 외란토크 \hat{T}_d 는 마찰에 대한 외란 $f(\omega)$ 을 포함한다.

4.1 Q-filter Design

DOB를 설계하기 위한 시스템의 수학적 모델에서 모터의 마찰모델은 고려하지 않고 식 (4)와 같이 구성하였다. 이를 역을 취하면 식 (5)와 같다. 센서의 출력이 식 (5)를 통과하면 미분 연산에 의해 노이즈가 증폭되어 DOB 출력이 불안정해지기 때문에 Q-filter를 적용한다.

$$G(s) = \frac{1}{J_t s} \tag{4}$$

$$G^{-1}(s) = J_t s \tag{5}$$

Q-filter를 설계하는 가장 중요한 단계 중 하나는 Q-filter의 상대차수가 시스템 수학적 모델의

상대차수보다 크거나 같아야한다는 것이다.⁽⁷⁾ Q-filter는 Binomial model이 많이 쓰이고 있다.⁽⁶⁾

$$Q_{NM}(s) = \frac{\sum_{k=0}^M A_{Nk}(\tau s)^k}{(\tau s + 1)^N}, (M=0, 1, \dots, N-1) \quad (6)$$

$$A_{Nk} = \frac{N!}{(N-k)!} \quad (7)$$

여기서 N은 분모의 차수, M은 분자의 차수, τ 는 설계하는 필터의 시상수를 나타낸다.

본 논문에서는 여러 가지 차수의 Binomial Q-filter를 설계하고 시뮬레이션을 통하여 필터 파라미터 튜닝 및 안정성을 판별하고, 실험을 통하여 설계된 Q-filter의 차수와 상대차수에 따른 특징을 확인했다. Binomial filter의 설계와 필터 계수 설정은 식 (6)과 식 (7)을 이용하여 구했다.

고차의 Q-filter는 유효숫자의 영향을 많이 받는다. 고차 필터에서는 유효숫자의 개수가 작은 경우 필터가 정확하지 않아 DOB가 발산하고 전체적으로는 시스템이 불안정하게 되는 경우가 있음을 실험적으로 확인하였다.

시뮬레이션과 실험을 통해 본 연구에 적용할 적절한 Q-filter의 차수를 구하였다. 시뮬레이션에

서는 여러 가지 차수의 Q-filter가 실험적응에 이상 없었지만 실험에서는 Q_{20} 와 Q_{21} 의 경우 두 가지의 $\tau(10\text{msec}, 15\text{msec})$ 에서 제어는 됐지만 필터의 차수가 낮아 시스템의 수학적 모델에 입력되는 센서 노이즈를 효과적으로 감소시키지 못해 모터의 소음과 진동이 커지는 현상을 보였다. Q_{30} 와 Q_{31} 에서는 Q_{20} , Q_{21} 보다 소음과 진동이 줄었다. 하지만 Q_{40} , $\tau=10\text{ms}$ 의 실험 결과, 필터의 차수와 상대차수가 높아 앞의 네 가지 경우의 실험보다 효과적으로 전류 보상의 노이즈를 감소시켜 모터의 진동과 소음이 발생하지 않았다.

Table 1은 Q-filter의 차수, 상대차수와 시상수에 따른 DOB의 발산 유, 무를 보여준다. 시뮬레이션에서 발산하지 않는 경우는 S이고, 실험에서 발산하지 않는 경우는 E로 표시하였다. X는 시뮬레이션과 실험에서 모두 발산한 경우이다. Table 1에서 나타난 것과 같이 Q_{40} , $\tau=15\text{ms}$ 의 경우 시뮬레이션과 실험에서 모두 제어가 되지 않고 발산함을 보였다. 본 논문에서는 성능 비교 결과 가장 안정적이라고 판단되는 $\tau=10\text{ms}$ 의 Q_{40} 필터를 적용하였다.

DOB적용과 관련하여 센서 신호처리에 Moving average 필터를 사용하지 않았을 경우, 자이로 센서의 시스템의 수학적 모델을 통과할 때, 센서 노이즈의 영향으로 실험한 모든 종류의 Q-filter에서 불안정함을 보였다. 또한, Complementary filter를 사용하지 않은 경우에는 경사각 센서의 노이즈가 각도 PID 제어에 많은 영향을 끼쳐 시스템의 불안함을 보였다.

본 연구에서 DOB 알고리즘에 사용되는 Q-filter는 시스템 수학적 모델의 상대차수를 고려하여 선정해야 한다. 이론으로는 Q-filter의 상대 차수는 시스템 수학적 모델의 상대차수보다 크거나 같아야 한다. 본 논문의 실험 결과에서는 Q-filter의 상대차수가 시스템 수학적 모델의 상대차수보다 3차 클 경우, 제어 성능이 가장 많이 향상됨을 확인하였다.

Table 1 Result of DOB by each types of Q-filter

| | Rate PID+DOB | | Double PID+DOB | |
|----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | $\tau = 10\text{ms}$ | $\tau = 15\text{ms}$ | $\tau = 10\text{ms}$ | $\tau = 15\text{ms}$ |
| Q_{20} | S, E | S, E | S, E | S, E |
| Q_{21} | S, E | S, E | S, E | S, E |
| Q_{30} | S, E | S, E | S, E | S, E |
| Q_{31} | S, E | S, E | S, E | S, E |
| Q_{40} | S, E | X | S, E | X |
| Q_{41} | S, E | Not tried | S, E | Not tried |

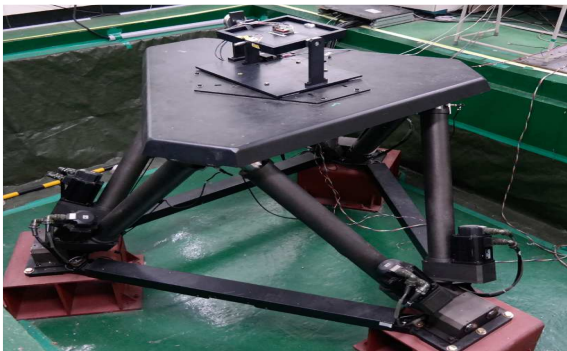


Fig. 8 Six Degree Of Freedom Simulator used in experiments

5. 이중 PID 제어 루프와 DOB를 이용한 ISP 제어 실험

일반적인 ISP 제어 방법인 이중 PID 제어루프에 DOB 알고리즘을 적용하여 Fig. 2와 같이 구성하고 6 자유도 시뮬레이터에서 실험하여 제어 성능을 비교, 검증하였다. 실험에 사용된 6 자유도 시뮬레이터에서는 Sine wave motion과 SUV 차량의

지붕이 받는 각도 외란 인가 실험이다. 원하는 제어각도를 0° 로 지향하게 하고 실험하였다.

5.1 Sine wave 실험

시뮬레이터의 Base motion을 1)진폭 1° , 주파수 1Hz 와 2)진폭 3° , 주파수 0.1Hz 인 Sine wave로 설정하고 실험하였다. Fig. 9-12는 각 실험의 PID제어와 PID+DOB 제어의 경우 ISP의 제어각도를 나타내고 Fig. 13과 Fig. 14는 각 실험의 제어각도 오차를 비교한 그래프이다. 실험 1)에서는 오차 범위의 큰 차이가 없었지만, 상대적으로 저주파수인 실험 2)에서는 이중 PID 제어의 실험 결과 각도 오차가 0.02° 이고, PID+DOB 제어의 실험 결과는 각도 오차가 0.01° 로 50%의 성능이 향상되었다. 수치적으로는 제어각도오차가 크지 않았지만 PID와 DOB를 함께 사용한 알고리즘이 더 오차가 적은 것을 확인하였다.

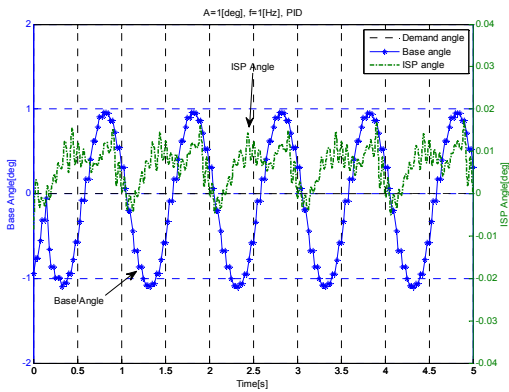


Fig. 9 PID control experiment under Sine wave base motion, Amplitude 1[deg], Frequency 1[Hz]

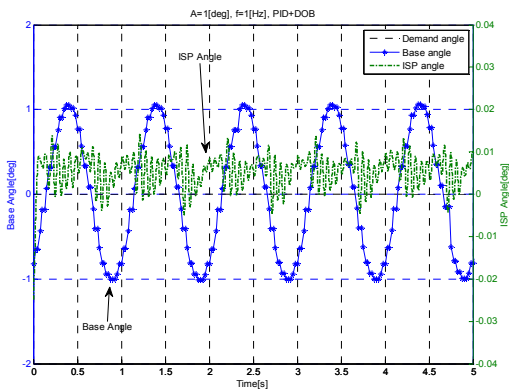


Fig. 10 PID-plus-DOB control experiment under Sine wave base motion, Amplitude 1[deg], Frequency 1[Hz]

5.2 SUV 차량의 주행 시 외란 하에서의 실험
SUV 차량이 Fig. 15와 같은 구조로 설치되어 있는 15cm 높이의 과속방지턱을 8Km/h의 속도로 주행하는 경우 발생하는 외란을 실험조건으로 설정하였다. Fig. 16과 Fig. 17은 각각 PID 제어와

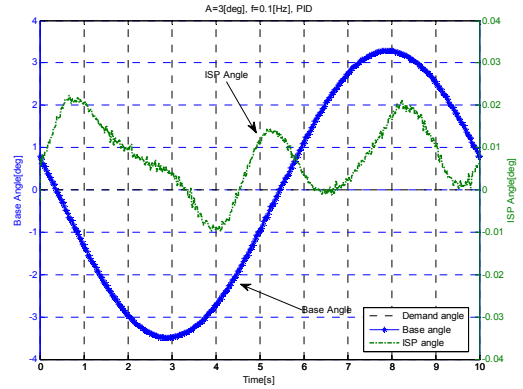


Fig. 11 PID control experiment under Sine wave base motion, Amplitude 3[deg], Frequency 0.1[Hz]

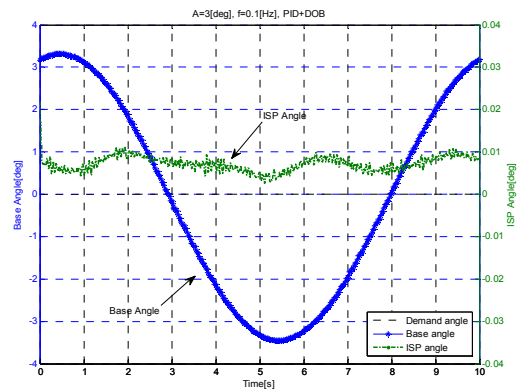


Fig. 12 PID-plus-DOB control experiment of Sine wave base motion, Amplitude 3[deg], Frequency 0.1[Hz]

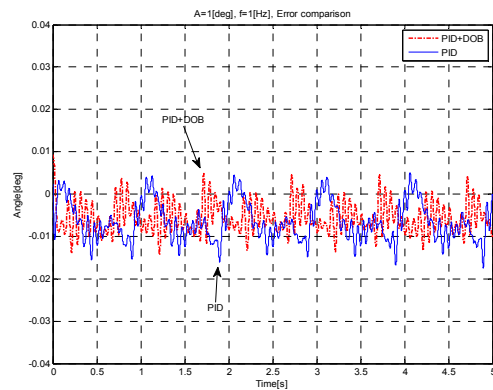


Fig. 13 Error compare PID with PID-plus-DOB, Amplitude 1[deg], Frequency 1[Hz]

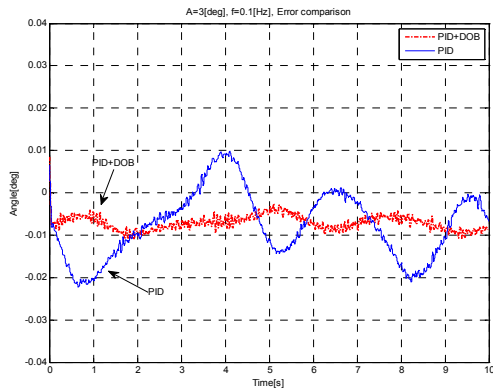


Fig. 14 Error compare PID with PID-plus-DOB, Amplitude 3[deg], Frequency 0.1[Hz]

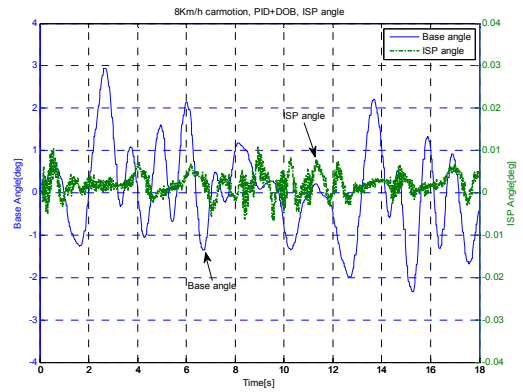


Fig. 17 PID-plus-DOB control experimental Result under vehicle motion disturbance

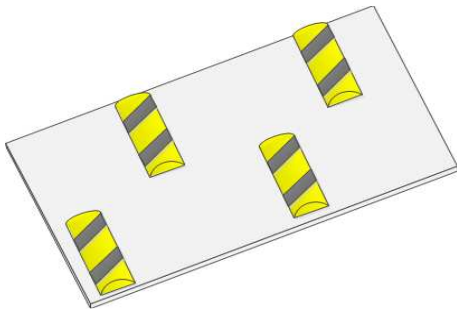


Fig. 15 Road condition of vehicle motion experiment

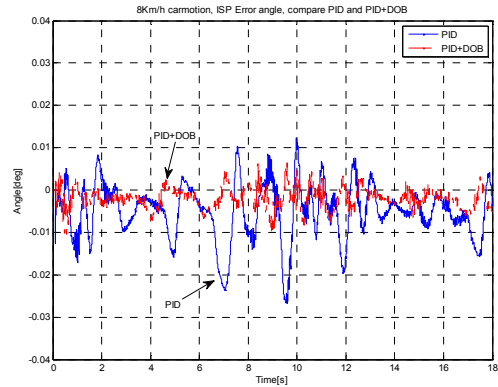


Fig. 18 Error compare PID with PID-plus-DOB under SUV vehicle motion disturbance

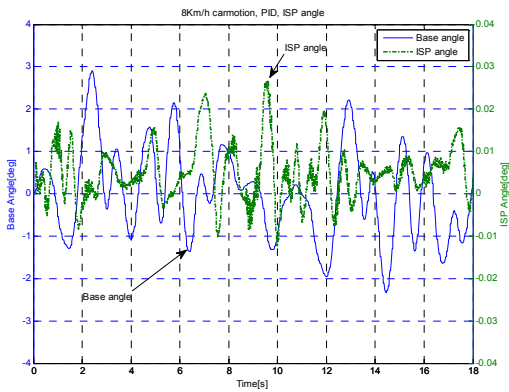


Fig. 16 PID control experimental Result under SUV vehicle motion disturbance

PID+DOB제어의 실험 결과이다. Fig. 18에서 제어 각도 오차의 비교 결과 PID 제어의 최대 각도 오차는 0.025° 이고, PID+DOB 제어의 경우 최대 각도 오차는 0.01° 로 40%의 제어 성능이 향상되어, 외란에 대해서는 DOB를 적용한 알고리즘의 결과가 각도 오차가 더 적다는 것을 확인하였다.

Fig. 18의 오차 그래프로 보아 PID 제어와 PID+DOB 제어의 각도 오차는 큰 차이가 없지만

외란에 대해서 오차의 변동이 크지 않은 것으로 보아 PID+DOB 제어가 비교적 안정적이라는 것을 확인하였다.

그래프에서 나타난 채터링의 폭은 이중 PID제어의 경우 0.001° , DOB를 적용한 경우 0.003° 로 측정된다. 기존의 DOB에 관한 제어연구⁽⁶⁾에서도 이러한 채터링 현상이 발견되는데, 이는 DOB의 알고리즘 과정의 시스템 수학적모델의 역(Inverse)을 통과하는 미분과정에 의해 발생한다.

6. 결론

본 논문에서는 저가의 MEMS 자이로 센서 및 가속도 센서를 이용하여 기존의 일반적인 ISP 제어 기법인 이중 PID 제어 루프에 DOB 알고리즘을 적용한 ISP의 제어에 대해 연구하였다.

본 연구의 실험을 통하여 모든 타입의 Binomial Q-filter가 DOB의 적용에 성공적이지는 않으며 최악

의 경우 15msec의 시상수를 가지는 Q_{40} 의 필터는 시스템 제어를 불안정하게 함을 확인하였다.

단순 PID 제어보다 DOB가 적용된 알고리즘이 외란에 의한 손실토크를 보상해주어 ISP 각도 제어 성능을 40% 정도 향상시킴을 범프통과 모사 차량 모션 실험을 통해 확인하였다. 사용된 6 자유도 시뮬레이터의 실험 여건 상, 심한 외란을 줄 수 없었지만 심한 외란 조건에서는 DOB의 제어 성능 개선이 극대화 되리라 판단된다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2013R1A1A4A01006421)의 결과임.

참고문헌 (References)

- (1) Yosida, T., Ohata, K. and Ueba, M., 2005, "Highly Accurate and Cost-Effective Auto-Tracking Antenna System for Satellite Broadband Communication on Vessels," *NTT Technical Review*, Vol. 3, No. 9 pp.60~71.
- (2) Hilkert, J. M., 2008, "Inertially Stabilized Platform Technology," *IEEE Control System Magazine*, pp. 26~46.
- (3) Nakao, M., Ohnishi, K. and Miyuki, K., 1987, "A Robust Decentralized Joint Control Based on Interference Estimation," *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 326~331.
- (4) Hurak, Z. and Rezac, M., 2012, "Image-Based Pointing and Tracking for Inertially Stabilized Airborne Camera Platform," *IEEE Transactions On System Technology*, Vol. 20, No. 5, pp. 1146~1159.
- (5) Crag, K., Rensselaer Polytechnic Institute, "http://multimechatronics.com/images/uploads/mech_n/Sensor_Fusion.pdf."
- (6) Lee, H., 1994, "Robust Digital Tracking Controllers for High-Speed, High-Accuracy Positioning System," Ph. D Thesis, Dept. of Mechanical Engr. U. C. Berkeley.
- (7) Lee, H., Oh, Y. and Song, J., 2010, "Torque Sensor Based Robot Arm Control Using Disturbance Observer," *International Conference on Control Automation and Systems*, pp. 1697~1700.
- (8) Umeno, T. and Hori, Y., 1991, "Robust Speed Control of DC Servo Motors Using Modern Two Degree of Freedom Controller Design," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 38, pp. 363~368.
- (9) Nakashima, T., Chang, M.-C. and Hong, S.-K., 2004, "Design and Performance Evaluation of a Complementary Filter for Inverted Pendulum Control with Inertial Sensors," *2004 Conference on Information and Control Systems*, Vol. 2004, No. 11, pp. 544~546.
- (10) Park, J.-K. and Jung, S., 2008, "A Design Approach of the Disturbance Observer for the Electro-optical Tracking System," *International Conference on Control, Automation and Systems* 2008, pp. 497~502.