

저가 관성센서 기반의 시선안정화 제어시스템 설계

A Control System Design for the Line-of-Sight Stabilization based on Low-Cost Inertial Sensors

위 정 현, 홍 성 경
(Jung-Hyun Wee and Sung Kyung Hong)

Abstract : The line-of-sight stabilization system is an equipment which is loaded on a vehicle and stabilizes the direction of the line-of-sight of the vision sensor to obtain a not-swayed image in the existence of external disturbances. To obtain accurate Euler angles and angular velocities simultaneously we usually need a control system which uses high-price inertial sensors including Vertical Gyro(VG) or Rate Integrating Gyro(RIG). In this paper, we design and implement a control system of a gimbal, which is a line-of-sight stabilization system using a low-cost mixed algorithm of a rate gyro and an accelerometer instead of a VG and a RIG. In the experiment where we laid the implemented line-of-sight stabilization system on the rate table, we can see the stabilized performance to external disturbances.

Keywords : line-of-sight stabilization, rate gyro, accelerometer, gimbal modeling

I. 서론

시선 안정화 시스템(Line-of-Sight Stabilization System)은 영상센서 등의 임무장비가 탑재되는 관성 안정화 장치로서, 외란에 대한 영상의 흔들림을 제거하고 원하는 표적 방향으로 영상장비를 구동하여 운용자의 시야에 고정시키는 역할을 수행하는 장비이다[1]. 일반적인 시선 안정화 시스템의 적용체계는 군사적인 목적으로서 정밀 정찰 영상의 획득과 사격통제 정확도 향상에 주로 쓰인다. 현재에는 군사적 목적 이외에도 엔터테인먼트 산업과 관련하여 방송/영화 촬영 등 첨단 기술인 영상과 모션의 통합 시뮬레이션 기술에 사용되고, 스포츠 관련 산업 등에도 사용되고 있다.

기존의 관성 안정화 제어시스템의 센서로는 일반적으로 자체 안정화를 위해서 Rate Gyro(RG)는 필수적으로 채택하고 있으나[2][3] 관성 축에 대한 오일러 각(방위각/고각) 측정을 위한 센서는 운용적인 측면에서 변경될 수 있다. 즉, 안정화 시스템이 무인항공기 등과 같은 관성항법장치를 보유하고 있는 기동 운반체에 적용될 경우는 그 운반체의 오일러 각을 기준으로 김발(gimbal)의 방위각(heading angle)과 고각(elevation angle)을 측정하며 이를 위하여 각각 리졸버(resolver)와 포텐셔미터(potentiometer)를 주로 사용한다[4]. 한편, 위와 같은 적용 대상체에 대한 제한을 자유롭게 하기 위해서는 안정화 시스템이 독립적으로 오일러 각을 측정하여야 하며 이를 위하여 Vertical Gyro(VG), 또는 Rate Integrating Gyroscope(RIG)를 사용한다[5]. 그러나 위와 같은 기존의 시스템들은 전자의 경우 내구성과 제한적 운용 측면에서, 후자의 경우는 비용, 부피, 무게 측면에서 단점을 갖고 있다[6].

본 논문에서는 자체적으로 오일러 각을 측정하여 적용

대상체에 제한을 갖지 않으면서 소형, 경량, 저가의 요구조건을 만족하는 시선 안정화 제어시스템을 구현하였다. 즉, 기존의 김발 자세를 측정하는 VG 또는 RIG를 대체할 수 있는 저가, 소형의 RG와 가속도계를 사용한 혼합 알고리즘을 채택하여 비례-적분(proportional-integral)제어기와 함께 제어시스템을 구현하였다. 제어기의 구조는 이중루프로 구성하였으며, 내부루프는 시선방향의 안정화(stabilization)를 외부루프는 오일러 자세 추종(tracking)을 담당하도록 하였다. 제어시스템의 구동기(actuator)는 일반적으로 사용되는 고가의 토크모터(torque motor)나, AC/DC 서보모터(servo motor)가 아닌 PWM(Pulse Width Modulation)변조 방식의 저가 RC(Radio control) 서보 모터를 채택하였다.

실시간 구현을 위한 안정화 제어시스템의 하드웨어의 구성은 우선 1축 운동이 가능한 김발, 오일러 각과 각속도 측정을 위한 관성 센서 부, RG/가속도계 혼합 알고리즘과 안정화/추종 제어 알고리즘의 실시간 계산을 위한 제어 부, 그리고 제어 시스템 모니터링 부로 구성하였다. 관성센서로는 Crossbow사(미국)의 CXL04LP3 가속도계와 Silicon Sensing Systems사(일본)의 CRS03-02 자이로를 사용하였으며, 제어부는 Texas Instruments사(미국)의 TMS320C31 DSP가 장착되고, A/D컨버터20채널, D/A 컨버터 8채널, 입력 값과 출력의 데이터를 실시간으로 저장할 수 있는 dSpace사(독일)의 ACE1103 KIT(Advanced Control Education)를 사용하였고, 모니터링 시스템은 일반 PC를 사용하여 구현하였다. 한편, 위와 같이 구축된 시선 안정화 시스템을 레이트 테이블에 장착하여 외란에 대한 안정화 성능을 입증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2절에서는 RG/가속도계 혼합 알고리즘의 구성에 대해서 설명하고 3절에서는 1축 김발에 대한 동적 파라미터 값 추출을 하고, 추출 값을 근거로 한 동역학 모델링, 4절에서는 제어기설계와 정적 시뮬레이션/실험결과를 제시한다. 5절에서는 레이트 테이블에 안정화시스템을 장착하여 시선방향에 대한 안정화 성능을 검증하고 마지막으로 6절에서 결론을 맺는다.

논문접수 : 2002. 12. 3., 채택확정 : 2003. 2. 4.

위정현, 홍성경 : 세종대학교 항공우주공학과

(1014wee@hanmail.net/skhong@sejong.ac.kr)

※ 본 논문은 과학기술부 민군 겸용 사업에서 지원하여 연구하였습니다.

II. RG/가속도계 혼합 필터의 구성

일반적으로 관성 축(inertial axis)에 대한 동적시스템의 오일러 자세를 추정하기 위하여 VG 또는 RIG를 대체하는 스트랩다운(strapdown) 방식을 사용할 경우 RG/가속도계 혼합 필터가 유용하다[7]. 이러한 스트랩다운 혼합 필터의 주요 개념은 다음과 같다. 즉, RG의 출력을 계속 적분할 경우 RG의 바이어스로 인한 오차 누적 현상이 발생하게 되는데, 이를 가속도계로부터 추출된 자세 정보를 이용하여 오차 발산을 억제한다는 것이다[8].

그림 1은 RG/가속도계 혼합 알고리즘의 기본적인 블록선도이다. 우선, RG 출력을 좌표 변환하여 관성 축에 대한 오일러 각속도를 계산하고, 그 각속도를 적분하여 자세 각의 정보를 추출한다[9]. 다음, 가속도계 출력을 사용하여 자세 각을 계산하여야 한다. 일반적으로 가속도계는 동체 좌표 축에 대한 가속도를 측정하게 되는데, 그 가속도 성분 중 동체좌표계에서 측정한 중력가속도 성분을 이용하여 오일러 자세를 계산할 수 있다. 동체좌표계에서 측정한 중력가속도 f^b 와 관성 좌표계로 표현한 중력가속도 f^n 는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$f^b = C_n^b f^n \tag{1}$$

여기서, $f^b = [f_x, f_y, f_z]^T$, $f^n = [0, 0, -g]^T$ 이며 C_n^b 는 관성좌표계에서 동체좌표계로의 변환을 위한 방향코사인 행렬을 나타낸다[9]. (1)에서 C_n^b 을 롤, 피치, 요 각의 오일러 순서를 사용하여 다시 표현하면 (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g \sin \theta \\ -g \sin \phi \cos \theta \\ -g \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \tag{2}$$

(2)부터 다음과 같이 오일러 자세에 대한 정보를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta &= \sin^{-1}(f_x/g) \\ \phi &= \sin^{-1}(-f_y/g \cos \theta) \end{aligned} \tag{3}$$

그림 1에서 $\dot{\phi}_g$ 는 자이로스코프 출력을 이용하여 얻은 자세 변화율이고, ϕ_a 는 가속도계 출력을 사용하여 얻은 자세 각을 나타내고 있다. 또한 ϕ_m 은 필터링을 통하여 최종적으로 얻고자하는 자세 각에 대한 추정치를 나타낸다. 블록선도에서 ϕ_m 에 대한 $\dot{\phi}_g$ 와 ϕ_a 의 관계를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$e = \phi_m - \phi_a \tag{4}$$

$$bias = K_p e + K_i \frac{1}{s} e \tag{5}$$

$$\phi_m = \frac{1}{s} (\dot{\phi}_g - bias) \tag{6}$$

(4)를 (5)에 대입한 결과를 (6)에 대입하면, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있으며,

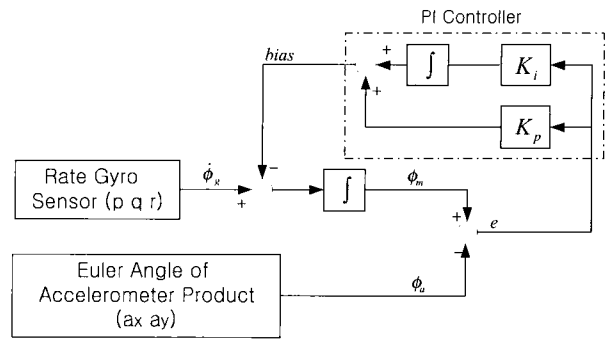


그림 1. RG/가속도계 혼합 알고리즘.

Fig. 1. RG/Accelerometer Mixing Algorithm.

$$\begin{aligned} \phi_m &= \frac{1}{s} \dot{\phi}_g - \frac{1}{s} \left[K_p (\phi_m - \phi_a) + K_i \frac{1}{s} (\phi_m - \phi_a) \right] \\ &= \frac{1}{s} \dot{\phi}_g - K_p \frac{1}{s} (\phi_m - \phi_a) - K_i \frac{1}{s^2} (\phi_m - \phi_a) \end{aligned} \tag{7}$$

위식을 ϕ_m 에 대한 전달함수(transfer function)로 표현하면,

$$\phi_m = \frac{s \dot{\phi}_g + K_p s \phi_a + K_i \phi_a}{s^2 + K_p s + K_i} \tag{8}$$

으로 표현되어진다.

위의 (8)에서 K_p , K_i 는 필터의 이득 값을 나타내며, 비례-적분 제어의 특성을 갖고 있다는 것을 알 수 있다.

각 이득 값은 $K_p = 2\zeta w$, $K_i = w^2$ 의 관계식을 이용하여 필터의 감쇠비 ζ 를 0.707로 가정하면 분리주파수(cutoff frequency)인 w 에 의해서 값이 정해진다. 이 값을 여러 가지 실험을 통하여 $w=5$ (rad/sec)로 정하였다. 그림 2는 위와 같이 구성한 필터를 이용하여 RG의 바이어스가 적절히 보상됨을 보여주고 있다.

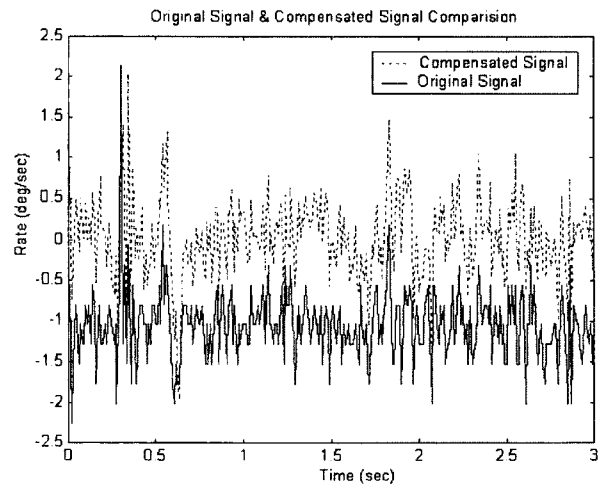


그림 2. 바이어스 보정후 신호와 보정전 신호의 비교.

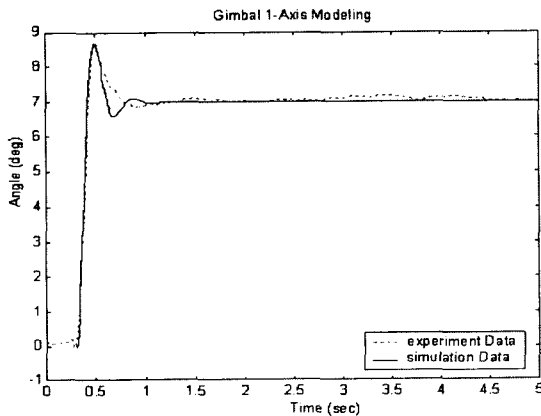
Fig. 2. Comparison of Original and Compensated Signals.

III. 동역학적 모델링

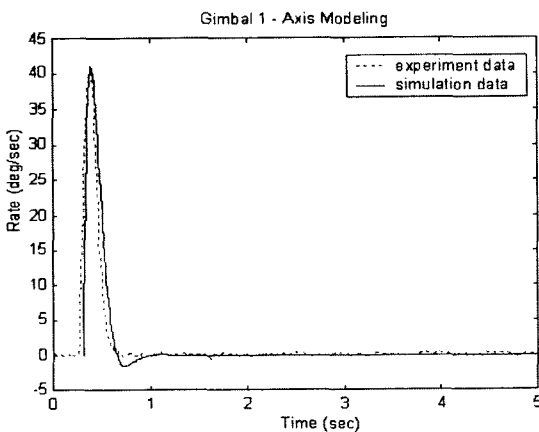
시선 안정화 시스템의 제어루프 설계를 위하여 서보 모터, 김발구조, 센서모듈을 포함한 1 축에 대한 개루프(open loop)의 실험적 모델링을 추출 하여야 한다. 이를 위하여 RC 서보 모터에 인가되는 펄스 폭 계단과 입력 값은 정규치(1.5ms)에서 0.01ms 더해진 값으로 하였으며, 이때 김발 축의 각속도와 자세 데이터를 각각 RG와 RG/가속도계 혼합필터를 통하여 획득하였다. 시선 안정화 전체 시스템은 여러 구성요소를 갖고 있으므로 이론적으로 고차 시스템으로 모델링 되어져야 하나 실험결과 2차 시스템의 특성이 지배적임을 알 수 있었다. 따라서 2차 시스템으로 근사화가 가능하다는 가정 하에 동적 파라미터인 고유진동수(w_n)와 감쇠비(ζ)를 추출하였다. 파라미터 추출방법은 획득한 김발의 자세 시간응답 실험데이터를 기준으로 M_p (maximum overshoot)와 T_r (rising time)의 값을 측정한다. 다음, 아래 공식을 이용하여 고유진동수(w_n)와 감쇠비(ζ)를 추출한다[10].

$$M_p = e^{-\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}}, \quad 0 \leq \zeta < 1$$

$$T_r = \frac{1.8}{w_n} \tag{9}$$



(a) 각도 비교



(b) 각속도 비교

그림 3. 모델링 시뮬레이션과 실험 데이터 비교.
Fig. 3. Comparison of Modeling Simulation and Experimental Data.

실험결과 측정된 M_p 와 T_r 은 각각 24.6%와 0.1초였으며, 이 값들을 (9)에 대입하여 추출된 w_n 과 ζ 는 각각 18(rad/s)과 0.41이었다. 한편, 0.01 ms의 펄스 폭 입력에 대한 자세 정상상태(steady state)값은 7(deg)이고 따라서 정상상태 이득(k_s)은 700이다. 위 결과를 바탕으로 펄스 폭 입력(δ_{PW})에 대한 김발의 자세(θ) 응답 특성을 전달함수 형태로 표시하면

$$\frac{\theta(s)}{\delta_{PW}(s)} = \frac{k_s w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \tag{10}$$

이고, 이를 상태 공간(state space) 방정식 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -324 & -14.76 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 226800 \end{bmatrix} [\delta_{PW}] \tag{11}$$

이상과 같이 추출된 시선 안정화 시스템의 동역학적 모델에 대한 시뮬레이션 결과와 실험을 통해 획득한 결과는 그림 3과 같다. 비교 결과가 매우 유사한 응답 특성을 보여주고 있으므로 이상의 동역학적 모델은 실제 시스템을 근사화적으로 잘 묘사하고 있음을 확인할 수 있다.

IV. 제어기 설계

본 논문의 시선 안정화 시스템 제어기 구조를 그림 4와 같이 설계하였다. 즉, 안정화(stabilization)를 위한 각속도 제어루프를 내부루프로 하고, 관성 축에 대한 각도를 유지/추종(tracking)하기 위한 자세 제어루프를 외부루프로 하는 다중루프로 구성하였다. 안정화 제어 루프는 비례-적분 제어기로 설계하였고, 추종(tracking) 제어루프는 비례 제어기로 설계하였다. 각 루프에 대한 이득 값을 결정하기 위하여 근 궤적법(root locus method)을 이용하였다. 그림 5(a)에서 보는 바와 같이, 안정화 루프에서는 김발의 개루프 감쇠비가 0.41로 비교적 작고, 또한 비례제어의 외부루프 설계시 감쇠비가 작아지므로, 충분한 감쇠비를 확보하여야 하며, 또한 정상상태 오차를 억제하여야 한다. 이를 위하여 근 궤적상에 제로(zero)와 극점(pole)을 추가하여 감쇠비를 0.9가 되도록 하는 비례-적분 이득을 설정하였다.

한편, 그림 5(b)와 같이 내부루프에서 확보된 새로운 극점에서 각도 유지/추종을 위한 외부루프를 단순 비례제어로 설계하였다.

위와 같이 근 궤적법(root locus method)을 이용하여 설정한 각 루프의 이득 값 결과는 표 1과 같다. 한편 이 때의 추종/안정화 시뮬레이션 결과는 그림 6과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 양호한 추종 특성과 약 0.26 rad의 외란에

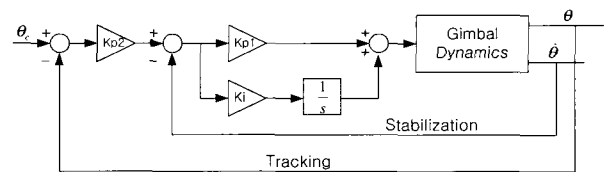
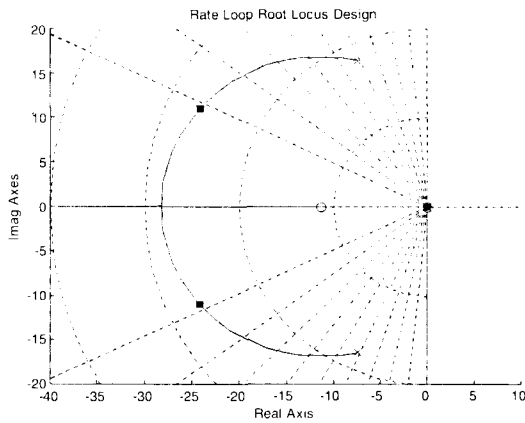
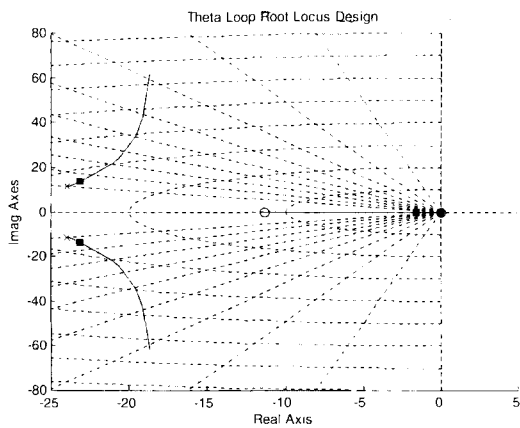


그림 4. 제어루프 구조.
Fig. 4. Control loop mechanization.



(a) 내부루프 근 궤적



(b) 외부루프 근 궤적

그림 5. 근 궤적선도.

Fig. 5. Root locus Diagram.

표 1. 각 제어루프의 게인 값.

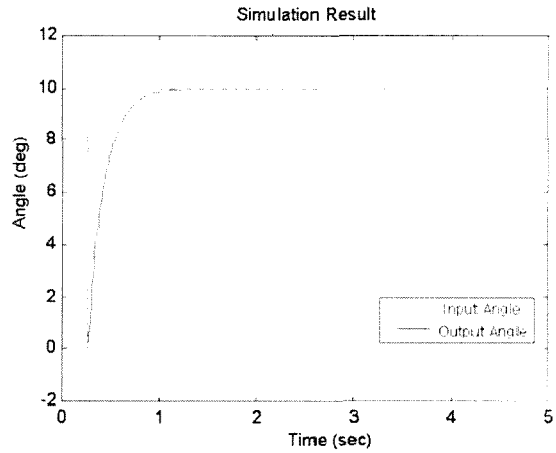
Table 1. The gain for each control loop.

	비례 이득 값	적분 이득 값
Tracking Loop	5	
Stabilization Loop	0.0002	0.002

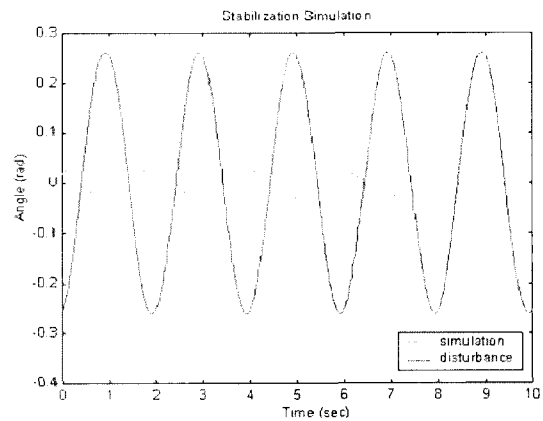
대하여 0.02 rad 이내로 진동을 억제하는 안정화 특성을 보여주고 있다.

V. 실험 결과

앞에서 설계된 제어시스템을 실시간으로 구현하기 위한 기능 블록도는 그림 7과 같다. 전체 시스템은 크게 시선 안정화 장치 김발에 장착된 자이로와 가속도계의 출력이 RG/가속도계 혼합 필터에 전달되어 자세 각 정보와 가속도 정보를 산출하는 센서모듈과 이 센서 모듈의 출력을 피드백 받아서 추종/안정화 제어를 수행하는 제어모듈로 구성이



(a) 추종 시뮬레이션 결과



(b) 안정화 시뮬레이션 결과

그림 6. 추종/안정화 시뮬레이션 결과.

Fig. 6. Result of tracking/stabilization Simulation.

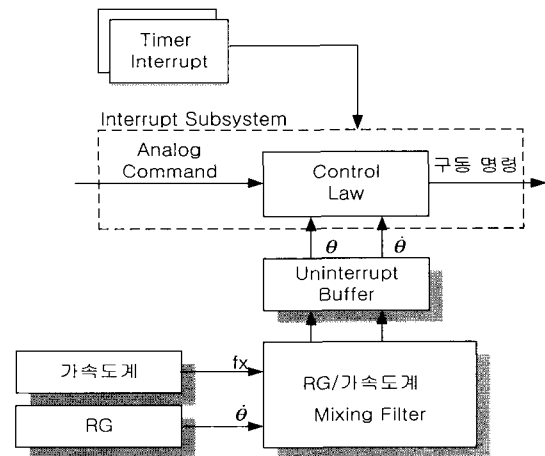


그림 7. 실험적인 제어 알고리즘 블록도.

Fig. 7. Block diagram of Experimental Control Algorithm.

되어 있다. 이 서로 다른 기능의 두 모듈이 조화롭게 작동을 하기 위하여 멀티-샘플링을 수행하여야 한다. 일반적으로 센서부의 처리속도가 제어기 처리속도보다 훨씬 빠르도록 설계하여야 하므로 타이머 인터럽트를 이용하여 각각의 샘플링 시간(sampling time)을 다르게 구성하였다[11][12]. 즉, 제어부의 샘플링 시간은 0.01초(100Hz)이고, 센서부의 샘플

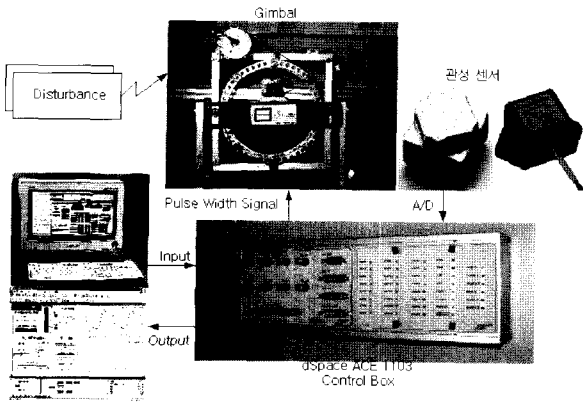
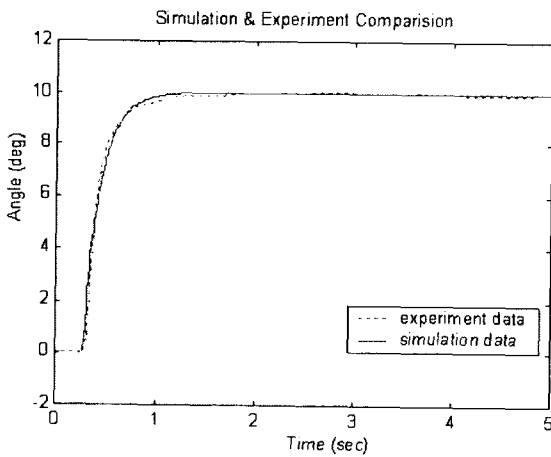
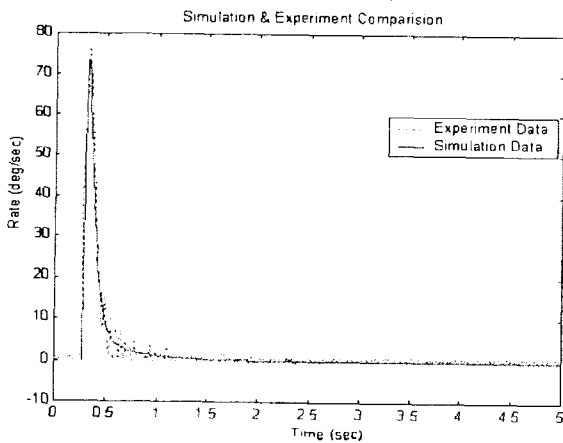


그림 8. 실험 시스템 구성도.
Fig. 8. Block diagram of Experimental System.



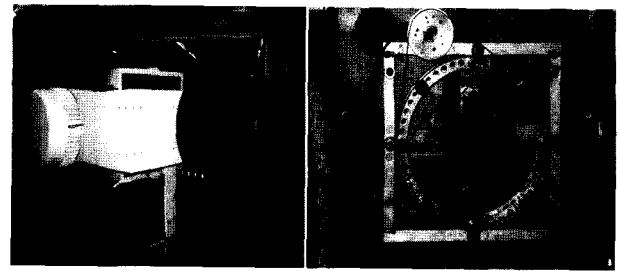
(a) 출력 각도 비교



(b) 출력 각속도 비교

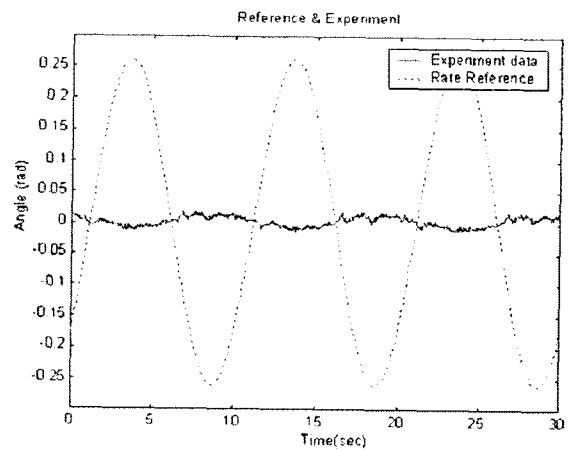
그림 9. 제어 알고리즘 시뮬레이션과 실험 데이터 비교.
Fig. 9. Comparison of Control Algorithm Simulation and Experimental Data.

링 시간은 이 보다 10배 빠른 0.001초 (1000Hz)로 하였다.
한편, 전체적인 하드웨어 실험 시스템은 그림 8과 같다. 크게 입력과 출력의 값을 저장하고 모니터링 할 수 있는 일반 PC, 센서부와 제어부의 실시간 연산을 위한 dSpace ACE1103 Board, 운동량 측정을 위한 관성 센서로서 RG와

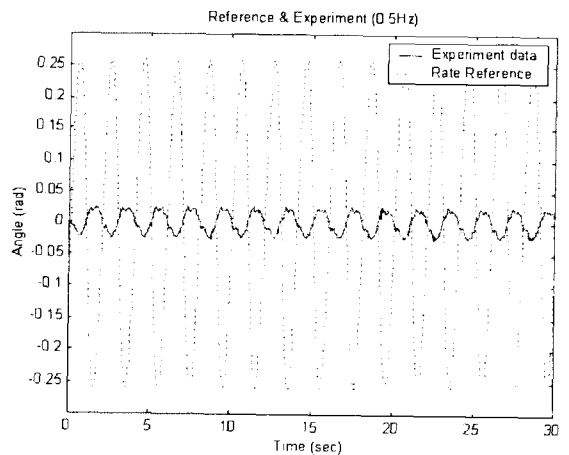


(a) 레이트 테이블 형상 (b) 안정화 실험

그림 10. 레이트 테이블 형상과 안정화 실험.
Fig. 10. Configuration of Rate table and Stabilization Experiment.



(a) 0.1Hz



(b) 0.5Hz

그림 11. 안정화 실험 결과.
Fig. 11. Result of Stabilization Experiment.

실험한 결과는 그림 9와 같다. 이는 시뮬레이션 결과와 가속도계, 영상센서인 카메라, 그리고 짐발로 구성된다. 이상과 같이 구축한 시스템을 통하여 자세 명령 추종을 매우 유사한 결과를 보여주고 있으며, 전체적인 시스템이 원활하게 작동됨을 확인할 수 있다. 한편, 정상적인 안정화 성능을 평가하기 위하여 안정화 s기발 시스템을 레이트 테이블(rate table)에 장착하여 실험을 수행하였다(그림 10).

안정화 실험은 김발의 각도를 0°로 유지 하도록 하고 레이트 테이블을 통하여 싸인 파(sine wave)외란을 인가하였다. 외란의 진폭은 0.26 rad (약 15°)으로 하고 주기는 0.1Hz 에서 0.5Hz까지로 하였다.

실험 결과는 그림 11과 같다. 주기 0.1Hz에서는 외란을 96%, 주기 0.5Hz에서는 93% 제거하는 안정화 성능을 확인하였다.

IV. 결론

시선안정화 시스템은 기동 운반체에 탑재된 영상 센서의 시선방향을 외란에 대해 안정화하여 흔들림 없는 고화질의 영상을 획득하기위한 장치로서, 일반적으로 정밀한 오일러 각과 각속도를 동시에 얻기 위하여 VG, 또는 RIG 등의 고가 관성센서를 사용하는 제어시스템이 요구된다.

본 논문에서는 저가/소형의 시선 안정화 시스템 구현을 위하여 VG, RIG 등을 대체하기 위한 소형, 저가의 관성센서를 사용한 RG/가속도계 혼합 필터와 저가 RC 서보모터를 적용하여 관성 안정화 시스템인 김발의 제어 시스템을 설계하고 하드웨어로 구현하였다. 설계 제작된 시선 안정화 시스템을 레이트 테이블에 장착하여 외란에 대한 안정화 성능시험을 수행하였으며, 입력된 외란에 대해서 진폭을 93%이상 제거하는 우수한 안정화 성능을 입증하였다. 한편 안정화 성능을 보다 향상시키기 위해서는 김발 탑재체의 동력학적 운동에서 오는 외란 외에 김발 자체의 기구적인 마찰 등의 외란을 고려한 제어 방법 등이 추가적으로 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

[1] T. H. Lee, K. K. Tan, A. Mamun, M. W. Lee, and C. J. Khoh, "Composite control of a gyro mirror line-of-sight stabilization platform design and auto-tuning", *Intelligent Control and Automation*, vol. 5, pp. 3150-3155, 2000.

[2] B. Li, D. A. Hullender, and M. DiRenzo, "Nonlinear Induced Disturbance Rejection in Inertial Stabilization Systems", *IEEE Trans. of Automatic Control*, vol. 6, no. 3, pp. 421-427 May. 1998.

[3] B. Li and D. A. Hullender, "A self-tuning controller for nonlinear inertial stabilization systems", *IEEE Control Systems. Technology*, vol. 6, no. 3, 1998.

[4] H. Ambrose, Z. Qu, and R. Johnson, "Nonlinear Roust Control For A Passive Line-of-Sight Stabilization System", *IEEE Inter Conference* pp. 942-947, 2001.

[5] W. Vukovich, G. Zywiell, J. scherzinger, B. M. Russell, and H. Burke, "The Honeywell/DND helicopter integrated navigation system(HINS)", *IEEE Aerospace and Electronics system Magazine*, vol. 4, pp. 18-28, 1989.

[6] M. C. Algrain and J. Quinn, "Accelerometer based line-of-sight stabilization approach for pointing and tracking systems", *Second IEEE Conference*, vol. 1, pp. 159-163, 1993.

[7] 박찬국, 김광진, 박홍원, 이장규, "스트랩다운 관성항법 시스템의 초기 개략정렬 알고리즘 개발", 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 4 권, 제 5 호, pp. 674-679, October. 1998.

[8] D. H. Titterton and J. L. Weston, *Starupdown inertial navigation technology*, Peter Peregrinus Ltd, 1997.

[9] 김종혁, 문승욱, 이시호, 김세환, 황동환, 이상정, 나성웅, "스트랩다운 관성항법시스템의 초기정렬 알고리즘 구현," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 6 권, 제 2 호, pp. 138-145, February. 2000.

[10] F. Gene, J. Franklin, D. Powell, and A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, Addison-Wesley Publishing Company, 1995.

[11] J. Winkelhake, U. Konigorski and L. Wiebking, "Modelbased multirate cascade control of direct drives in automotive systems", *World Automation Congress, 2001. Proceedings of the 5th Biannual*, vol. 14, pp. 121-126 2002.

[12] U. Halldorsson, M. Fikar, and, H. Unbehauen, "Multirate nonlinear predictive control", *Proc. American Control Conference, 2002*, vol. 6, pp. 4922-4927, 2002.



홍성경

1987년 연세대 기계공학과 졸업. 동대학원 석사(1989), Texas A&M Univ. 기계공학 박사(1998). 1989년~2000 국방과학연구소 선임연구원. 현재 세종대학교 기계항공우주공학부 조교수. 관심분야는 지능제어, 강건제어 및 센서

응용.



위정현

1972년 10월 14일생. 2001년 서울산업대학교 기계설계학과 졸업(B.S). 2001년~현재 세종대학교 항공우주공학과 석사과정. 관심분야는 로봇트 진동 제어, Servo Motor 제어, 강건제어. 센서 응용.