

리졸버를 이용한 2축 gimbal 시스템의 공간 안정화 루프 설계에 대한 연구

강호균\*, 성기준\*, 김성운\*, 여보연\*  
\*LIGN엑스원(주)

A Study of Stabilization Loop Design for a Two Axis Gimbal System Using Resolver

Ho-Gyun Kang\*, Ki-Jun Seong\*, Sung-Un Kim\*, Bo-yeoun Yeou\*  
\*LIGNex1 Co.,Ltd.

**Abstract** - 항공기, 차량, 유도탄 등과 같은 동적인 플랫폼에서 표적을 추적하기 위해서 시선을 안정화하는 외부의 추적 루프와 내부의 안정화 루프(또는 속도 루프)가 있고, 또한 표적을 추적하기 전 표적을 지향하고 포착하기 위해 gimbal을 동체에 대해 일정한 각도로 유지하기 위한 위치 루프도 가지고 있다. 일반적으로 안정화 루프는 각속도를 측정하기 위한 검출기로서 자이로를 사용하고, 위치 루프는 gimbal각을 제어하기 위한 위치 검출기를 사용한다. 그러나 안정화 루프에 사용되는 자이로는 루프 성능을 최적으로 하기 위해서 고성능/고가의 자이로가 사용되는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 위치 루프에 사용되는 위치 센서인 리졸버를 사용하여 고성능/고가의 자이로 센서 없이 안정화 루프를 설계하였고, 리졸버를 사용하여 설계된 안정화 루프가 동적인 플랫폼에 사용될 수 있는지 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 통해 분석하였다.

1. 서 론

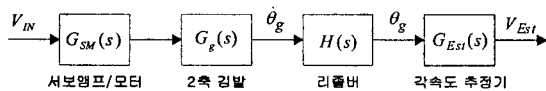
항공기, 차량, 유도탄 등과 같은 동적인 플랫폼에서 표적을 추적하기 위해서는 gimbal 플랫폼을 필요로 한다. gimbal 플랫폼은 일반적으로 2축 gimbal을 사용하고, 2축 gimbal은 각 축을 구동하기 위한 모터, gimbal의 각속도 측정을 위한 각속도 검출기, 그리고 각도를 측정하기 위한 위치 검출기 등으로 구성되어 있다. gimbal 플랫폼을 사용하는 표적 추적 시스템의 제어 구조는 추적 루프와 안정화 루프로 이루어져 있다. 안정화 루프는 기동 및 진동과 같은 외란이 존재하는 환경에서 gimbal 플랫폼과 표적간의 시선(Line-of-Sight, LOS)을 관성 공간상에서 외란의 영향으로부터 분리시켜 표적 추적 시스템이 표적을 안정하게 추적하여 표적 정보를 추정하는 관성 센서로 동작할 수 있도록 하는 것이다[1, 2, 3]. 또한 gimbal 플랫폼은 동적인 플랫폼이 기동하는 동안 gimbal이 동체에 대해 일정한 각도를 유지하고, 표적의 위치가 주어졌을 때 빠른 속도로 표적을 지향하기 위해 위치 루프를 가지고 있다. 일반적으로 안정화 루프는 관성 공간상에서 표적의 각속도를 정밀하고 안정하게 측정하기 위해서 고성능/고가의 2축 동조 자이로를 사용하고, 위치 루프는 gimbal 플랫폼의 gimbal각을 정밀하고 강인하게 제어하기 위해서 위치 검출기로 포텐쇼미터, 리졸버, 싱크로 등이 사용될 수 있으나 본 개발된 2축 gimbal 시스템은 리졸버를 사용한다.

본 논문에서는 안정화 루프에 사용되고 있는 고성능/고가의 자이로 대신 위치 루프에 사용되고 있는 리졸버를 사용하여 각속도를 추정하고, 추정된 각속도 값을 이용하여 개발된 2축 gimbal 시스템의 안정화 루프를 설계하였다. 이러한 각속도 추정은 gimbal 제어를 위해 제작된 DSP(Digital Signal Processor) 보드를 이용하여 디지털로 구현하였다. 또한 안정화 루프 제어기도 디지털 제어기로 구현하였다. 리졸버로부터 추정된 각속도를 적용한 안정화 루프의 시간 응답 특성은 실험 결과와 Matlab을 이용한 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하고, 주파수 응답 특성은 CSA(Control System Analyzer)를 이용하여 측정하고 Matlab의 시뮬레이션 결과와 비교/분석하였다.

2. 본 론

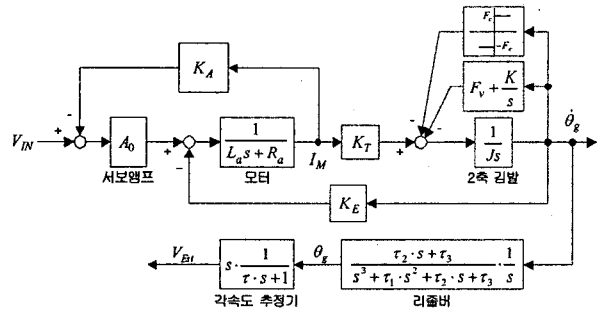
2.1 2축 gimbal 플랫폼 구조 및 수학적 모델링

2축 gimbal 플랫폼의 구조는 내부 gimbal과 외부 gimbal로 구성되어 있고, 각 gimbal 축에는 gimbal을 구동하기 위한 모터와 gimbal의 각도를 측정하기 위한 위치 검출기가 장착되어 있다. 2축 gimbal 플랫폼 구조를 포함한 전체 2축 gimbal 플랫폼의 간략화된 블록선도는 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 간략화된 2축 gimbal 플랫폼 블록선도

위 그림에서 서보앰프는 전류제어 방식을 사용하고, 리졸버 후단의 각속도 추정기는 gimbal의 각속도를 추정하여 안정화 루프에 사용하기 위한 것이다. 각 전달함수를 수학적으로 모델링하여 블록선도로 나타내면 <그림 2>와 같고, <그림 1>과 <그림 2>로부터 2축 gimbal 플랫폼의 근사화된 전달함수는 식 (1)과 같다.



<그림 2> 2축 gimbal 플랫폼 상세 블록선도

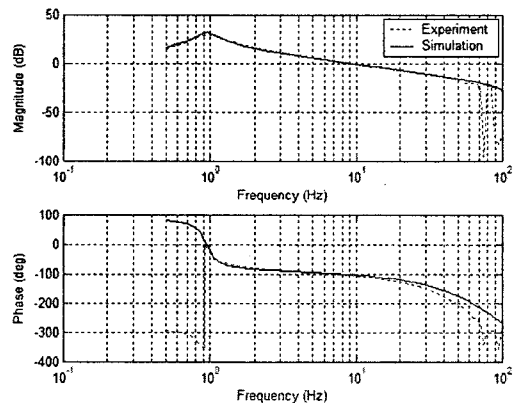
$$\frac{V_{Est}}{V_{IN}} \approx \frac{K_T}{K_A} \cdot G_g(s) \cdot H(s) \cdot G_{Est}(s) \quad (1)$$

<그림 2>에서  $K_T$ 는 토크상수,  $K_A$ 는 서보앰프 전류-전압 변환 이득,  $\tau$ 는 각속도 추정기 LPF의 시정수, 그리고  $\tau_1 \sim \tau_3$ 은 리졸버의 동특성 시정수이다.

2.2 2축 gimbal 시스템의 주파수 응답 특성 측정

2축 gimbal 시스템의 안정화 루프 제어를 최적으로 설계하기 위해서는 2축 gimbal 시스템의 모델링을 정확하게 하는 것이 중요하다. 앞에서 2축 gimbal 시스템의 수학적 모델의 타당성을 검증하기 위해서 2축 gimbal 시스템의 주파수 응답을 측정하였다. CSA를 이용하여 서보앰프 입력 단  $V_{IN}$ 에 Sine Sweep 신호를 인가하고 각속도 추정기 출력신호  $V_{Est}$ 를 측정하였다.

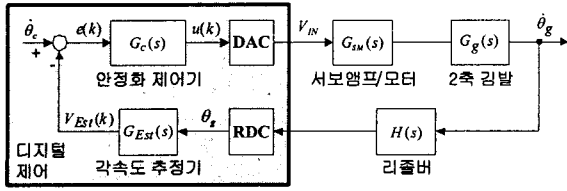
실제 측정된 2축 gimbal 시스템의 주파수 응답과 2축 gimbal 시스템의 전달함수인 식 (1)을 시뮬레이션한 주파수 응답을 <그림 3>에 비교하였다. 그림에서 보듯이 두 결과가 거의 유사함을 알 수 있다. 따라서 2.1절에서 수행한 수학적 모델이 타당함을 알 수 있다.



<그림 3> 2축 gimbal 시스템의 주파수 응답

2.3 안정화 루프 제어기 설계

안정화 루프는 외란이 2축 gimbal 플랫폼에 미치는 영향을 최소화하고 관성계에 대한 안정된 표적 정보를 추출할 수 있도록 설계해야 한다. <그림 4>는 안정화 루프 블록선도를 나타낸 것이다.



〈그림 4〉 안정화 루프 블록 선도

〈그림 4〉에서 볼 수 있듯이 안정화 루프에 적절한 감쇠를 주기 위해 안정화 제어기와 리졸버를 이용한 각속도 추정기를 가지고 있다. 일반적으로 2축 김발 플랫폼의 마찰, 스프링 상수, 그리고 질량 불균형(Mass Imbalance) 등은 2축 김발 플랫폼에 외란으로 작용한다. 이러한 외란은 대부분의 경우 저주파에서 발생하고, 따라서 안정화 루프는 외란을 제거하기 위해 저주파에서 높은 게우프 이득을 가지도록 설계해야 한다.

### 2.3.1 안정화 제어기 설계

안정화 루프가 저주파에서 높은 게우프 이득을 가지기 위해 안정화 제어기로 비례적분 제어를 사용한다. 안정화 루프 제어기 설계는 2.1에서 수학적으로 모델링한 2축 김발 플랫폼의 모델을 이용하여 비례적분 제어기를 안정화 루프의 요구 성능에 맞게 설계한다. 안정화 루프 제어기는 식 (2)와 같이 비례이득 \$K\_P\$는 안정화 루프에서 설계하고자 하는 이득 교차 주파수 (\$\omega\_{gc}\$)를 만족하도록 선정하고, 적분 시정수(\$T\_i\$)는 비례이득을 선정할 후 저주파에서 안정화 루프의 게우프 이득이 설계하고자 하는 값이 되도록 선정한다. 식 (3)과 식 (4)는 비례적분 제어기를 사용했을 때 근사적인 안정화 루프 이득 교차 주파수와 저주파에서 게우프 이득(\$G\_{OP}\$)을 나타낸다.

$$G_c(s) = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (2)$$

$$\omega_{gc} \approx \frac{K_T \cdot K_P}{K_A \cdot J} \quad (3)$$

$$G_{OP} \approx 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{K_P}{T_i} \cdot \frac{K_T}{K_A \cdot \sqrt{(F_x \omega)^2 + K^2}} \right) \quad (4)$$

앞에서 설계된 연속시간 PI 제어기를 디지털로 구현하기 위해 쌍선형 변환을 이용하여 이산시간 PI 제어기로 변환된 전달함수는 아래 식과 같다[4,5].

$$G_c(z) = K_{DP} \cdot \frac{(1 + a z^{-1})}{(1 - z^{-1})} \quad (5)$$

여기서, \$K\_{DP} = K\_P \cdot (1 + h\omega\_i/2)\$, \$a = \frac{h\omega\_i/2 - 1}{h\omega\_i/2 + 1}\$ 이다.

디지털 안정화 제어기는 정밀한 계산을 위해 32비트 부동소수점 연산을 수행할 수 있는 DSP로 구현하였고, RDC 및 DAC는 16비트 데이터를 사용한다.

### 2.3.2 각속도 추정기 설계

각속도 추정기는 리졸버로부터 김발의 각속도를 추정하는 역할을 한다. 〈그림 2〉에서 볼 수 있듯이 각속도 추정기는 LPF(Low Pass Filter)를 가진 미분기이다. 미분기는 잡음에 매우 민감하므로 LPF의 시정수 \$\tau\$를 최적으로 설정하는 것이 중요하다. 시정수가 크면 잡음을 제거하여 각속도 추정치에 잡음이 적어지지만, 안정화 루프의 위상여유를 감소시켜 상대 안정도 성능이 저하되고 과도응답 특성이 나빠지게 된다. 각속도 추정기를 DSP로 구현하기 위하여 쌍선형 변환을 이용하여 디지털로 변환한다[4, 5]. 변환된 이산시간 전달함수는 아래 식과 같다.

$$G_{Est}(z) = K_{DLPF} \cdot \frac{(1 - z^{-1})}{(1 + P_{DLPF} \cdot z^{-1})} \quad (6)$$

여기서, \$K\_{DLPF} = \frac{1}{h/2 + \tau}\$, \$P\_{DLPF} = \frac{h/2 - \tau}{h/2 + \tau}\$ 이다.

### 2.4 안정화 루프 성능 분석

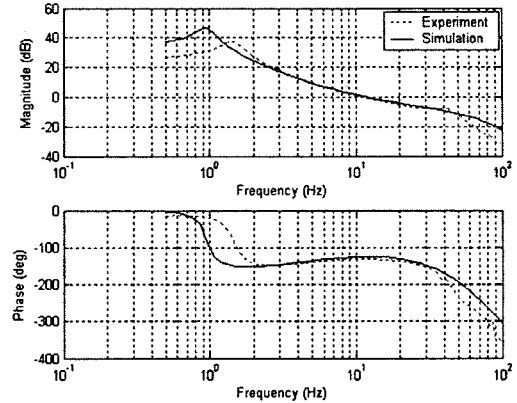
안정화 루프는 이득여유, 위상여유, 이득 교차 주파수의 주파수 응답 성능과 김발이 1도/초의 각속도로 움직일 때 각속도 신호의 잡음 특성을 분석하였다.

〈표 1〉 안정화 루프 주파수 응답 성능

구분	요구 성능	측정 결과	시뮬레이션	비고
이득 여유	\$\ge 6.0\$dB	7.95dB	9.98dB	
위상 여유	\$\ge 45\$도	48.9도	55.0도	
이득교차 주파수	\$\ge 15\$Hz	11.23Hz	12.12Hz	

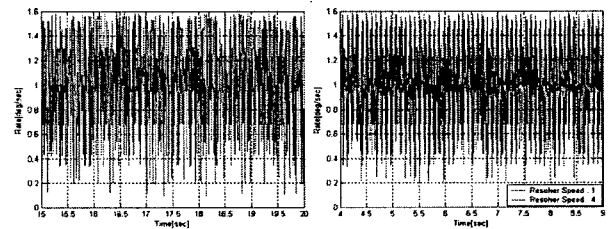
〈표 1〉은 안정화 루프 주파수 응답 성능을 정리한 것이고, 그림 5는 안정

화 루프 게우프 주파수 응답을 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 〈표 1〉에 이득 교차 주파수가 요구 성능을 만족하지 못하는 것은 리졸버 잡음으로 인하여 제어기 이득을 증가시키지 못했기 때문이다. 〈그림 5〉에 실제 실험 결과와 시뮬레이션 결과가 상당히 유사함을 알 수 있고, 2Hz 이하의 저주파 부분에서 차이는 실제 2축 김발 시스템 제작 시 나타나는 스프링 상수의 비선형성에 의한 것이다. 그리고 고주파 부분의 미세한 차이는 리졸버 신호 미분에 따른 잡음에 의해 나타난 것이다.



〈그림 5〉 안정화 루프 게우프 주파수 응답

〈그림 6〉은 김발이 1도/초로 움직일 때 각속도 신호 실험 결과 파형이다. 그림에서 각속도 신호가 최대 약 \$\pm 0.5\$도/초로 변화하는 것을 알 수 있다. 이것은 자이로의 잡음보다 약 5배 이상 큰 값이다. 그 이유는 리졸버의 분해능이 크기 때문에 발생한 것이다. 〈그림 7〉은 리졸버의 Speed에 따른 시뮬레이션 결과 파형이다. 그림에서 Speed가 1일 때 〈그림 6〉의 실험결과와 유사한 것을 알 수 있고, Speed가 4일 경우 잡음이 약 10배 감소되는 것을 볼 수 있다.



〈그림 6〉 김발이 1도/초로 움직일 때 각속도 신호 실험 결과

〈그림 7〉 김발이 1도/초로 움직일 때 리졸버 Speed에 따른 각속도 신호 시뮬레이션 결과

### 3. 결 론

본 논문에서는 개발된 2축 김발 시스템의 안정화 루프를 기존의 고성능/고가의 자이로를 사용하는 대신 리졸버를 이용하여 설계하였고, 실험을 통해 성능을 측정하고 분석하였다. 분석 결과 자이로를 이용하여 설계한 것보다 각속도 신호의 잡음이 5배 이상 크게 나왔지만, 리졸버의 Speed를 1에서 4로 증가시키면 자이로를 사용할 때 보다 더 나은 잡음 특성이 되도록 할 수 있다. 그래서 현재 리졸버 잡음에 의해 안정화 루프 이득교차 주파수 요구 성능을 만족하지 못하는 부분은 리졸버 Speed를 증가시키면 가능할 것이다.

### 〈참 고 문 헌〉

- [1] 강호균, 김치열, 이승하, 여보연, 이호평, 윤재룡, "플랫폼 운동이 있는 2축 김발 시스템의 디지털 안정화 루프 설계", 제13차 유도무기학술대회, pp 335~338, 2005.
- [2] Peter J. Kennedy, "Adaptive Compensation for Pointing and Tacking Systems Application", IEEE Proceeding, Control Application, pp279-282, Aug. 1999.
- [3] Bo Li, David Hullender, and Mike DiRenzo, "Nonlinear Induced Disturbance Rejection in Inertial Stabilization Systems", IEEE Transactions On Control Systems Technology, VOL. 6, NO. 3, May 1998.
- [4] KARL J. ÅSTRÖM, and BJÖRN WITTENMARK, *Computer-Controlled Systems Theory and Design*, 3rd Edition, Prentice-Hall International, Inc., pp293~369, 1997.
- [5] CHARLES L. PHILLIPS, and H. TROY NAGLE, *Digital Control System Analysis and Design*, 3rd Edition, Prentice-Hall International, Inc., pp465-492, 1995.