

2축 김발 시스템의 디지털 와인드업 방지 비례적분 제어기 설계

강호균*, 김지열*, 김성운*, 여보연*, 이호평**
 *넥스원퓨처(주), **국방과학연구소

Digital Anti-windup PI Controller Design for a Two Axis Gimbal System

Ho-Gyun Kang*, Chi-Yeol Kim*, Sung-Un Kim*, Bo-Yeoun Yeou*, Ho-Pyeong Lee**
 *NEX1 Future, **Agency for Defense Development

Abstract - 항공기, 차량, 유도탄 등과 같은 동적인 플랫폼에서 표적을 추적하기 위해서는 시선을 안정화하는 외부의 추적루프와 내부의 속도 루프를 포함하는 서보 구조가 필요하다. 본 논문에서는 내부의 속도 루프인 안정화 루프에 큰 입력 전압이 인가되었을 때 구동기(Actuator) 포화 현상에 의해서 공간 안정화 루프 성능이 나빠지지 않게 와인드업 방지(Anti-windup) 기능을 가진 디지털 비례적분(Proportional Integral, PI) 제어기를 설계한다. 디지털 와인드업 방지 비례적분 제어기는 일반적으로 SISO 시스템 설계를 위한 방법으로 와인드업 방지 기능을 가진 R, S, T 다항식으로 표현되는 입출력 형태의 제어기를 이용하여 설계하였다. 설계된 제어기는 모델링에 의한 시뮬레이션 결과와 실험결과를 통해 성능을 분석하였다.

1. 서 론

항공기, 차량, 유도탄 등과 같은 동적인 플랫폼에서 표적을 추적하기 위해서는 김발 플랫폼을 필요로 한다. 김발 플랫폼은 일반적으로 2축 김발을 사용하고, 2축 김발은 각 축을 구동하기 위한 모터, 김발의 각속도 측정을 위한 자이로, 그리고 각도를 측정하기 위한 위치 검출기 등으로 구성되어 있다. 김발 플랫폼을 사용하는 표적 추적 시스템의 제어 구조는 추적 루프와 안정화 루프로 이루어져 있다. 안정화 루프는 기동 및 진동과 같은 외란이 존재하는 환경에서 김발 플랫폼과 표적간의 시선(Line-of-Sight, LOS)을 관성 공간상에서 외란의 영향으로부터 분리시켜 표적 추적 시스템이 표적을 안정하게 추적하여 표적 정보를 추정하는 관성센서로 동작할 수 있도록 하는 것이다[1, 2, 3].

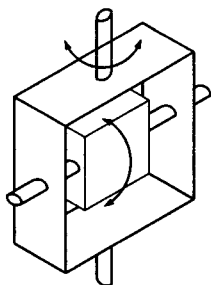
2축 김발 플랫폼에서 관찰되는 비선형성 중의 하나는 제어 입력의 포화(Saturation) 현상이다. 이러한 포화 현상은 모터의 전기자에 일정 전류 이상을 흘릴 수 없으므로 발생하고, 2축 김발 시스템의 성능을 저하시킨다.

본 논문에서는 이러한 포화 현상에 의한 개발된 2축 김발 플랫폼의 성능 저하를 방지하기 위해서 포화 요소가 존재하지 않는 선형 영역에서 안정화 루프의 만족할 만한 응답 특성을 주는 비례적분 제어기를 설계하고, 포화 상황 하에서 성능 저하를 방지하기 위한 추가적인 와인드업 방지 보상을 설계한다. 와인드업 방지 보상은 일반적으로 SISO 시스템 설계를 위한 방법으로 와인드업 방지 기능을 가진 R, S, T 다항식으로 표현되는 입출력 형태의 제어기를 이용하여 디지털 제어기로 설계한다. 설계된 와인드업 방지 비례적분 제어기는 DSP 보드를 이용하여 디지털 제어기로 구현하고, 모델링에 의한 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교하여 성능을 분석한다.

2. 본 론

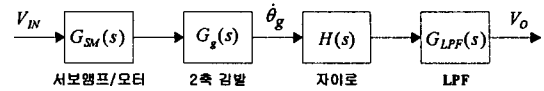
2.1 2축 김발 플랫폼 구조 및 수학적 모델링

2축 김발 플랫폼의 구조는 아래 <그림 1>과 같이 내부 김발과 외부 김발로 구성되어 있다. 각 김발 축에는 김발을 구동하기 위한 모터와 김발의 각속도 측정하기 위한 위치 검출기가 있고, 내부 김발에는 내부 및 외부 김발의 김발 각속도를 검출하여 김발의 운동을 안정화시키기 위한 관성 센서로 자이로가 장착되어 있다.



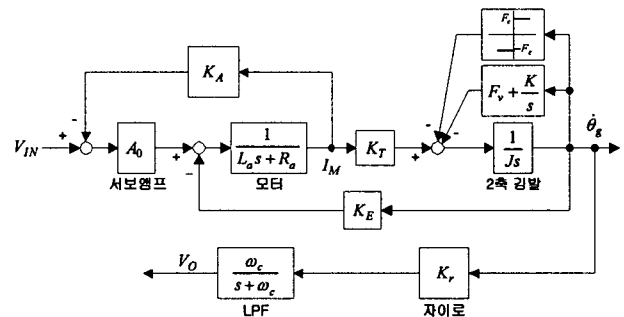
<그림 1> 2축 김발 플랫폼 구조

<그림 1>의 2축 김발 플랫폼 구조를 포함한 전체 2축 김발 플랫폼의 간략화된 블록선도는 <그림 2>와 같다.



<그림 2> 간략화된 2축 김발 플랫폼 블록선도

위 그림에서 서보앰프는 전류제어 방식을 사용하고, 자이로 뒤에 저역 통과 필터(Low Pass Filter, LPF)는 자이로 잡음을 제거하기 위한 것이다. 각 전달함수를 수학적으로 모델링하여 블록선도로 나타내면 <그림 3>과 같은 <그림 2>와 <그림 3>으로부터 2축 김발 플랫폼의 근사화된 전달함수는 식 (1)과 같다.



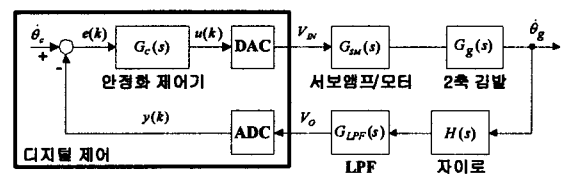
<그림 3> 2축 김발 플랫폼 상세 블록선도

$$\frac{V_O}{V_{IN}} \approx \frac{K_T}{K_A} \cdot G_g(s) \cdot H(s) \cdot G_{LPF}(s) \tag{1}$$

<그림 3>에서 K_T 는 토크상수, K_A 는 서보앰프 전류-전압 변환 이득, ω_c 는 LPF의 컷오프 주파수, 그리고 K_r 은 자이로 비례 계수(Scale factor)이다. 입력 전압 V_{IN} 은 모터의 전기자에 흐르는 최대 전류(I_{max})에 의해서 제한되고, 위 블록선도의 전류제어 방식에서는 $V_{IN_{max}} = K_A \cdot I_{max}$ 로 제한된다. 따라서 제어기 출력이 최대 입력 전압($V_{IN_{max}}$)보다 클 경우 포화 현상이 발생하게 된다.

2.2 안정화 루프 제어기 설계

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



<그림 4> 안정화 루프 블록선도

<그림 4>에서 볼 수 있듯이 안정화 루프에 적절한 감쇠를 주기 위해 안정화 제어기와 자이로를 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 개루프 이득을 가지도록 설계해야 한다.

2.2.1 포화가 없을 경우 비례적분 제어기 설계

안정화 루프가 저주파에서 높은 개루프 이득을 가지기 위해 안정화 제어기로 비례적분 제어기를 사용한다. 안정화 루프 제어기 설계는 2.1에서 수학적으로 모델링한 2축 김발 플랫폼의 모델을 이용하여 비례적분 제어기를 안정화 루프의 규격에 맞게 설계한다. 안정화 루프 제어기는 식 (2)와 같고 비례이득 K_P 는 안정화 루프에서 설계하고자 하는 이득 교차 주파수(ω_{gc})를 만족하도록 선정하고, 적분 시정수(T_i)는 비례이득을 선정 한 후 저주파에서 안정화 루프의 개루프 이득이 설계하고자 하는 값이 되도록 선정한다. 식 (3)과 식 (4)는 비례적분 제어기를 사용했을 때 근사적인 안정화 루프 이득 교차 주파수와 저주파에서 개루프 이득(G_{OP})을 나타낸다.

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

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

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

2.2.1 포화가 있을 경우 디지털 와이드업 방지 비례적분 제어기 설계

2축 김발 플랫폼에 사용되는 자이로는 최대 각속도 검출 범위가 제한되어 있어 큰 입력 전압에 의해 구동기의 포화가 있을 경우 2축 김발 플랫폼의 성능이 저하되고, 그 결과 자이로 검출 범위를 초과한 입력이 인가되어 자이로가 손상을 입을 수 있다. 따라서 이러한 안정화 루프의 성능 저하 및 각속도 검출기의 손상 가능성을 방지하기 위해서는 와이드업 방지 기능이 필요하다.

본 논문에서 적용되는 와이드업 방지 비례적분 제어기는 일반적으로 입력력 표현 형태의 아래 식과 같은 제어기를 통해서 설계할 수 있다.

$$R(z)u(k) = T(z)u_c(k) - S(z)y(k) \quad (5)$$

여기서, $R(z)$, $S(z)$, $T(z)$ 는 다항식이고, $u_c(k)$ 는 제어 명령 신호, $u(k)$ 제어기 출력 신호, $y(k)$ 는 플랫폼 출력 신호이다. 식 (5)는 3개의 입력($u_c(k)$, $u(k)$, $y(k)$)으로 동작되는 관측기 동역학(Observer Dynamics)을 가진 동적 시스템 방정식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} A_{ow}(z)v(k) &= T(z)u_c(k) - S(z)y(k) + \{A_{ow}(z) - R(z)\}u(k) \\ u(k) &= \text{sat}\{v(k)\} \end{aligned} \quad (6)$$

포화가 없을 때 식 (6)은 식 (5)와 동일하고, 제어기 출력 신호가 포화되면 다항식 $A_{ow}(z)$ 로 주어진 동역학을 가진 관측기(Observer)로서 해석할 수 있다. 다항식 $A_{ow}(z)$ 는 최고차항의 계수가 1이고, 안정해야 한다[4, 5].

쌍선형 변환(Bilinear Transformation) 방법을 이용한 디지털 비례적분 제어기인 경우 $R(z)$, $S(z)$, $T(z)$ 는 식 (7)과 같이 1차 다항식으로 표현되고, 와이드업 방지 관측기의 원하는 특성 다항식 $A_{ow}(z)$ 은 식 (8)과 같다.

$$R(z) = (z-1) \quad (7)$$

$$S(z) = K_P \cdot (1+b_1)z - K_P \cdot (1-b_1) = T(z) \quad (8)$$

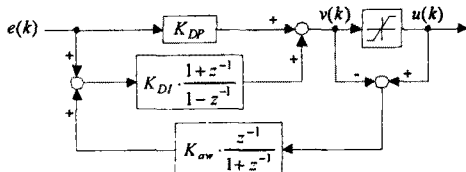
$$A_{ow}(z) = (z+a_{ow})$$

여기서, $b_1 = h/T_i$, h 는 샘플링 시간이고, a_{ow} 는 다항식 $A_{ow}(z)$ 가 안정하도록 선정해야 한다. 식 (7)과 (8)을 식 (6)에 대입하여 정리하면 식 (9)와 같이 정리할 수 있다.

$$v(k) = K_{DP}e(k) + K_{DI} \cdot \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \cdot \left\{ e(k) + K_{ow} \cdot \frac{z^{-1}}{1+z^{-1}} \{u(k) - v(k)\} \right\} \quad (9)$$

여기서, $K_{DP} = K_P$, $K_{DI} = K_P \cdot \frac{h}{2T_i}$, $K_{ow} = \frac{2T_i \cdot (a_{ow} + 1)}{K_P \cdot h}$ 이다.

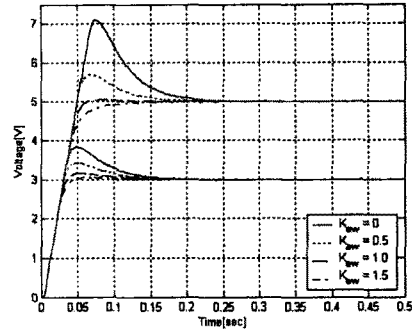
식 (9)는 설계된 와이드업 방지 비례적분 제어기이고, K_P 및 T_i 는 2.2.1절에서 결정되었으므로 K_{ow} 를 조정하여 구동기 포화에 의한 응답 특성을 결정하게 된다. 설계된 와이드업 방지 비례적분 제어기의 블록선도는 아래 그림과 같다.



〈그림 5〉 디지털 와이드업 방지 비례적분 제어기 블록선도

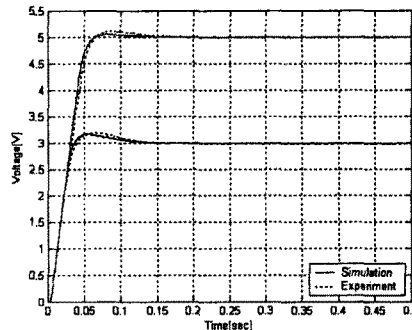
2.3 와이드업 방지 비례적분 제어기 성능 분석

2.2절에서 설계된 와이드업 방지 비례적분 제어기의 와이드업 방지 이득 K_{ow} 은 2.1절의 2축 김발 플랫폼 모델링과 설계된 제어기를 이용하여 MATLAB SIMULINK의 시뮬레이션을 통해 결정하였다. 아래 그림은 K_{ow} 에 따른 계단 응답 특성을 시뮬레이션 한 결과를 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과로부터 $K_{ow} = 1.0$ 으로 선정하였다.



〈그림 6〉 와이드업 방지 이득 K_{ow} 에 따른 3[V]/5[V] 계단 응답 특성

설계된 디지털 와이드업 방지 비례적분 제어기는 정밀한 계산을 위해 32비트 부동소수점 연산을 수행할 수 있는 DSP로 구현하였다. 아래 그림은 구현된 제어기를 이용하여 2축 김발 플랫폼에 적용한 실험결과를 시뮬레이션 결과와 비교하여 나타내었고, 그림에서 알 수 있듯이 실험결과와 시뮬레이션 결과가 거의 유사하다.



〈그림 7〉 3[V]/5[V] 계단 입력에 대한 시뮬레이션 및 실험결과

3. 결 론

본 논문에서는 개발된 2축 김발 플랫폼의 구동기 포화 현상에 의한 성능 저하를 방지하기 위하여 포화 요소가 존재하지 않는 선형 영역에서 안정화 루프 성능을 만족하는 비례적분 제어기를 설계한 후, 구동기가 포화 되었을 때 와이드업 현상을 방지하기 위해 디지털 와이드업 방지 비례적분 제어기를 설계하였다. 설계된 디지털 와이드업 방지 비례적분 제어기의 와이드업 방지 이득은 모델링 & 시뮬레이션을 통해 적절한 값을 선정하여 DSP를 이용하여 구현하였고, 실험을 통해 그 성능을 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 결과에서 볼 수 있듯이 설계된 제어기는 만족스러운 계단 응답 특성을 보인다는 것을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 강호근, 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 Tracking 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.