

2축 gimbal을 사용한 영상 추적 시스템의 추적 루프 설계

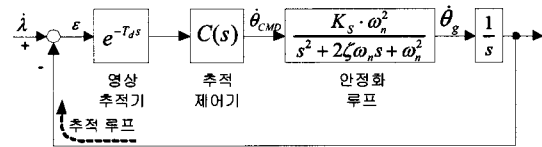
강호균*, 백경훈*, 진상훈*, 김성운*, 여보연*
*LIGNex1(주)

Track Loop Design of Image Tracking System using a Two Axis Gimbal

Ho-Gyun Kang*, Kyoung-Hoon Baek*, Sang-Hun Jin*, Sung-Un Kim*, Bo-Yeoun Yeou*
*LIGNex1 Co.,Ltd.

Abstract - 항공기, 차량, 고속의 비행체 등과 같은 동적인 플랫폼에서 표적을 추적하기 위한 영상 추적 시스템은 시선을 안정화하는 외부의 추적루프와 내부의 안정화 루프를 포함하는 구조로 되어 있다. 2축 gimbal을 사용하는 영상 추적 시스템의 추적루프는 크게 영상 추적기, 추적 제어기, 안정화 루프 등으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 영상 추적 시스템의 추적 제어기를 설계하여 성능을 분석하고, 또한 설계된 제어기를 적용하여 영상 추적기의 시간지연에 의한 추적 루프 특성을 분석하였다. 마지막으로 설계된 추적 제어기를 영상 추적 시스템 시뮬레이터에 적용하여 고기동 고속의 비행체 환경에서 추적 루프 성능을 분석하였다.

해 전달함수로 나타낸 블록선도이다.



<그림 2> 추적 루프 블록선도

여기서, T_d 는 영상 추적기의 시간 지연, K_S 는 단위변환상수[rad/sec/V], ζ 는 안정화 루프 감쇄계수, ω_n 은 안정화 루프 고유 주파수이다. $C(s)$ 는 추적 제어기로서 추적 루프의 원하는 성능을 만족하도록 설계된다. <그림 2>로부터 추적 루프 개루프 전달함수는 다음과 같다.

$$G_{op}(s) = e^{-T_d s} \cdot \frac{C(s)}{s} \cdot \left(\frac{K_S \cdot \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \right) \quad (1)$$

$$\approx \frac{s^2 - as + b}{s^2 + as + b} \cdot \frac{C(s)}{s} \cdot \left(\frac{K_S \cdot \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \right)$$

여기서, a , b 는 시간 지연 $e^{-T_d s}$ 를 2차 Pade 근사화하여 얻어지는 상수이다. 일반적으로 안정화 루프 대역폭을 추적 루프 대역폭 보다 충분히 크게 설계하므로 식 (1)은 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$G_{op}(s) \approx \frac{s^2 - as + b}{s^2 + as + b} \cdot \frac{C(s)}{s} \quad (2)$$

2.2 추적루프 설계

추적 루프는 외란이나 잡음에 의한 영향을 최소화하여 안정된 표적 정보를 측정하도록 설계해야 한다. 또한 상태 안정도를 만족하면서 표적 운동에 잘 반응하도록 설계해야 한다. 앞에서 언급했듯이 추적 제어기는 일반적으로 P 제어기 또는 PI 제어기를 많이 사용한다. 두 경우의 추적 제어기로 추적 루프 성능을 만족하도록 설계하고, 그 성능을 비교할 것이다.

2.2.1 P 제어기 설계 (Type-I)

추적 루프에 P 제어기를 사용했을 경우(즉, $C(s) = K_P$), 식 (2)로부터 추적 루프 개루프 전달함수는 다음과 같다.

$$G_{op}(s) = \frac{s^2 - as + b}{s^2 + as + b} \cdot \frac{K_P}{s} \quad (3)$$

위 식에서 이득 여유 및 위상 여유는 다음 식과 같이 계산된다.

$$PM = \angle G_{op}(j\omega_{gc}) = 180^\circ + \left[-90^\circ - 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{a \cdot \omega_{gc}}{b - \omega_{gc}^2} \right) \right] \quad (4)$$

$$GM = |G_{op}(j\omega_{pc})| = \frac{K_P}{\omega_{pc}} \quad (5)$$

여기서 ω_{gc} 는 이득교차 주파수, ω_{pc} 는 위상교차 주파수이다. ω_{gc} 에서 개루프 이득은 1이므로 식 (5)를 이용하면 $K_P = \omega_{pc}$ 가 되고, PM이 45도 이상이 되기 위해서 K_P 는 다음 식을 만족해야 한다.

$$\bar{K}_P \leq \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4 \cdot b \cdot \tan(22.5^\circ)}}{2 \cdot \tan(22.5^\circ)} \quad (6)$$

고속의 비행체가 고기동할 경우 큰 각속도 신호가 발생되고, 추적 제어기가

1. 서 론

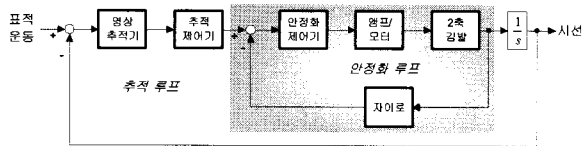
항공기, 차량, 고속의 비행체 등과 같은 동적인 플랫폼에서 표적을 추적하기 위해서는 gimbal 플랫폼을 필요로 한다. gimbal 플랫폼은 일반적으로 2축 gimbal을 사용하고, 2축 gimbal은 각 축을 구동하기 위한 모터, gimbal의 각속도 측정을 위한 자이로, 그리고 각도를 측정하기 위한 위치 검출기 등으로 구성되어 있다. gimbal 플랫폼을 사용하는 영상 추적 시스템의 제어 구조는 일반적으로 추적 루프와 안정화 루프로 이루어져 있다. 안정화 루프는 기동 및 진동과 같은 외란이 존재하는 환경에서 gimbal 플랫폼과 표적간의 시선(Line-of-Sight, LOS)을 관성 공간상에서 외란의 영향으로부터 분리시켜 영상 추적 시스템이 표적을 안정하게 추적하여 표적 정보를 추정하는 관성 센서로 동작할 수 있도록 하는 것이다[1, 2, 3]. 추적루프는 고정 또는 운동하는 표적을 안정화된 gimbal 플랫폼을 이용하여 정확하게 추적하고, 동적인 플랫폼을 운용하는 장치에서 필요로 하는 정보를 제공하는 역할을 한다.

고속의 비행체에 장착되는 영상 추적 시스템의 경우 원거리 표적을 인식 및 추적하기 위해서 협시계의 고해상도 영상을 사용하여 표적을 정밀하게 추적한다. 또한 고속의 비행체가 고기동할 경우 표적을 정밀하게 추적하기 위해서는 표적이 영상의 중심에 항상 있도록 하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 고기동하는 고속의 비행체에 사용되는 영상 추적 시스템의 추적 제어기를 설계한다. 영상 추적 시스템이 표적을 정밀하게 추적하기 위한 추적 제어기로 P 및 PI 제어기를 각각 설계하여 성능을 비교 분석한다. 또한 영상 추적기의 시간지연에 따른 추적 루프의 안정도를 분석한다. 마지막으로 고속의 비행체 환경을 모사하는 영상 추적 시스템 시뮬레이터에 설계된 추적 제어기를 적용하여 추적 루프 성능을 분석한다.

2. 본 론

2.1 영상 추적 시스템 구성 및 수학적 모델링

영상 추적 시스템은 시선을 안정화하는 외부의 추적루프와 내부의 안정화 루프로 구성되어 있다. 영상 추적 시스템의 추적루프는 크게 영상 추적기, 추적 제어기, 안정화 루프 등으로 구성되어 있고, 고유의 적본기가 포함되어 있다. 영상 추적 시스템의 간략화된 블록선도는 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 영상 추적 시스템의 간략화된 블록선도

영상 추적기는 영상센서의 시계 내에 있는 표적 위치를 측정하는 장치로서 추적 루프의 핵심 구성요소이다. 일반적으로 영상 추적기는 다음과 같은 5가지 기능을 한다. 1) 입력 영상에서 표적 정보를 생성하는 데이터 처리, 2) 영상 추적기 알고리즘이 동작하는 영역 식별 및 선택하는 Gate sizing, 3) 추적 영역 내에서 표적의 위치를 측정하는 알고리즘 동작(즉, 추적), 4) 영상 추적기와 추적 루프의 동작 상태를 결정 및 측정하기 위한 해석을 수행하는 고장 검출, 5) 영상 추적기의 동작을 제어하는 조준점 제어(Aimpoint Control).

일반적으로 고속의 비행체에 적용되는 추적제어기는 P 제어기 또는 PI 제어기가 사용되고, 추적 루프의 동특성을 결정한다.

다음 그림은 영상 추적 시스템의 추적 루프를 수학적으로 모델링하기 위

P 제어기 일 경우 추적 오차 ϵ 이 커지게 되므로 추적 루프의 상대 안정도를 만족하는 범위 내에서 추적 오차가 최소가 되도록 K_p 를 선정한다.

2.2.2 PI 제어기 설계 (Type-II)

추적 루프에 PI 제어기를 사용했을 경우(즉, $C(s) = K_p + K_I/s$), 추적 루프의 개루프 전달함수는 식 (2)로부터 다음과 같다.

$$G_{op}(s) = \frac{s^2 - as + b}{s^2 + as + b} \cdot \frac{K_I(1 + K_p s/K_I)}{s^2} \quad (7)$$

위 식에서 이득 여유 및 위상여유는 다음 식과 같이 계산된다.

$$PM = \angle G_{op}(j\omega_{gc}) \quad (8)$$

$$= 180^\circ + \left[-180^\circ + \tan^{-1} \left(\frac{K_p \cdot \omega_{gc}}{K_I} \right) - 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{a \cdot \omega_{gc}}{b - \omega_{gc}^2} \right) \right]$$

$$GM = |G_{op}(j\omega_{pc})| = \frac{K_I \cdot \sqrt{1 + (K_p \cdot \omega_{pc}/K_I)^2}}{\omega_{pc}^2} \quad (9)$$

ω_{gc} 에서 개루프 이득은 1이므로 식 (9)를 이용하면 K_I 는 다음과 같다.

$$K_I = \frac{\omega_{gc}^2}{\sqrt{1 + (K_p \cdot \omega_{gc}/K_I)^2}} \quad (10)$$

PM이 45도 이상이 되기 위해서 K_p, K_I 는 다음 식을 만족해야 한다.

$$\frac{K_p \cdot \omega_{gc}}{K_I} \geq \tan \left\{ 45^\circ + 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{a \cdot \omega_{gc}}{b - \omega_{gc}^2} \right) \right\} \quad (11)$$

$$K_I \leq \frac{\omega_{gc}^2}{\sqrt{1 + \left[\tan \left\{ 45^\circ + 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{a \cdot \omega_{gc}}{b - \omega_{gc}^2} \right) \right\} \right]^2}} \quad (12)$$

$$K_p \geq \frac{K_I}{\omega_{gc}} \cdot \tan \left\{ 45^\circ + 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{a \cdot \omega_{gc}}{b - \omega_{gc}^2} \right) \right\} \quad (13)$$

고속의 비행체가 고기동할 경우 큰 각속도 신호가 발생되지만, P 제어기와 달리 추적 제어기가 PI 제어기 일 경우 큰 각가속도가 발생되지 않으면 추적 오차 ϵ 가 커지지 않으므로 추적 루프의 상대 안정도를 만족하는 범위 내에서 K_p, K_I 를 선정한다.

2.3 추적 루프 성능 분석

앞 절에서 추적 제어기로 P 및 PI 제어기인 경우에 대한 각각의 추적 루프 개루프 전달함수와 PM 및 GM의 계산식을 유도하였다. 유도된 수식으로부터 영상 추적기의 시간지연이 $T_d = 20\text{msec}, 40\text{msec}, 80\text{msec}$ 각각의 경우에 대한 K_p, K_I 계수를 구하여 추적 루프 주파수 응답 특성인 이득 여유, 위상 여유, 이득교차 주파수를 분석한다. 그리고 영상 추적 시스템 시뮬레이터에 영상 추적기의 시간지연과 추적 제어기를 적용하여 시뮬레이션을 수행하고, 각각의 경우에 대한 추적 오차를 비교하여 성능을 분석한다.

2.3.1 영상 추적기의 시간 지연에 따른 추적 루프 주파수 응답 성능

추적 제어기가 P 제어기 일 경우, $T_d = 20\text{msec}$ 일 때 $K_p=21, T_d=40\text{msec}$ 일 때 $K_p=14, T_d=80\text{msec}$ 일 때 $K_p=9$ 이고, 각각의 경우에 대한 주파수 응답 특성은 <표 1>과 같다.

<표 1> 추적 제어기 P 제어기 일 경우 추적 루프 주파수 응답 성능

구분	요구 성능	$T_d=20\text{msec}$	$T_d=40\text{msec}$	$T_d=80\text{msec}$
이득 여유	$\geq 6.0\text{dB}$	6.4dB	6.6dB	6.3dB
위상 여유	$\geq 45^\circ$	63.9도	58.0도	49.4도
이득교차 주파수	$\geq 1\text{Hz}$	3.7Hz	2.3Hz	1.5Hz

추적 제어기가 PI 제어기 일 경우, $T_d = 20\text{msec}$ 일 때 $K_p=21/K_I=3.5, T_d=40\text{msec}$ 일 때 $K_p=14/K_I=3.0, T_d=80\text{msec}$ 일 때 $K_p=9/K_I=0.55$ 이고, 각각의 경우에 대한 주파수 응답 특성은 <표 2>와 같다.

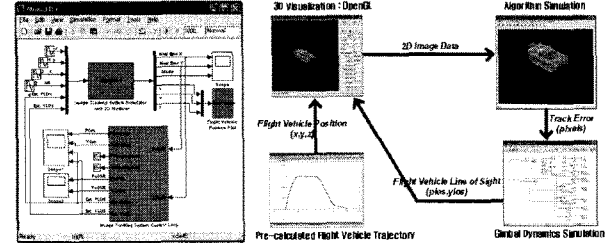
<표 2> 추적 제어기 PI 제어기 일 경우 추적 루프 주파수 응답 성능

구분	요구 성능	$T_d=20\text{msec}$	$T_d=40\text{msec}$	$T_d=80\text{msec}$
이득 여유	$\geq 6.0\text{dB}$	6.1dB	6.3dB	6.1dB
위상 여유	$\geq 45^\circ$	55.1도	45.9도	45.8도
이득교차 주파수	$\geq 1\text{Hz}$	3.8Hz	2.4Hz	1.5Hz

<표1>과 <표2>의 결과로부터 영상 추적기의 시간지연이 클수록 추적 제어기 이득이 제한되고, 위상 여유가 작아진다. 또한 추적 제어기로 PI 제어기를 사용할 경우 P 제어기를 사용했을 때 보다 I 제어기의 위상지연에 따른 위상여유가 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다.

2.3.2 영상 추적 시스템 시뮬레이터 소개 및 추적 루프 시뮬레이션 결과

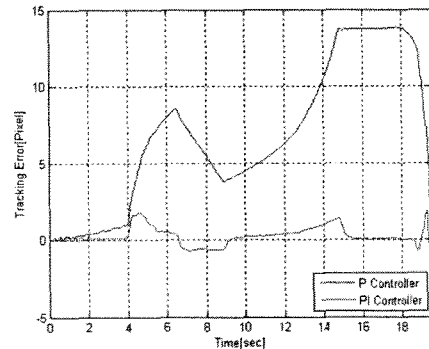
영상 추적 시스템 시뮬레이터는 비행체의 경로에 따른 영상 추적 시스템의 동작을 시뮬레이션 하는 것을 목적으로 한다. <그림 3>과 같이 구동 시뮬레이션 모델에서 간략화된 영상 추적 시스템을 비행체 경로에 따른 영상 생성을 포함하는 알고리즘 시뮬레이터로 대체하여 구현된다. 통합 시뮬레이션의 기본 동작 원리는 <그림 4>와 같다. 알고리즘 시뮬레이터와 구동 시뮬레이터의 통합은 윈도우즈 표준 기술인 COM(Common Object Module)을 이용한다. 이 때 알고리즘 시뮬레이터는 COM 서버(Server)로, MATLAB은 COM 클라이언트(Client)로 동작한다[4].



<그림 3> 영상 추적 시스템 시뮬레이터

<그림 4> 영상 추적 시스템 시뮬레이터 운용 개념

영상 추적기 시간지연이 $T_d = 40\text{msec}$ 일 때 설계된 P 및 PI 추적 제어기 각각의 경우에 대한 영상 추적 시스템 시뮬레이터를 이용한 시뮬레이션 결과는 다음 그림과 같다.



<그림 5> 고속 비행체의 동일 경로에 대한 추적오차 비교

<그림 5>로부터 추적 제어기로 P 제어기를 사용한 경우보다 PI 제어기를 사용한 경우 추적 오차가 약 7배 이상 작다는 것을 알 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 영상 추적 시스템의 추적 루프를 설계하였고, 설계된 추적 루프의 주파수 응답 특성 분석 및 영상 추적 시스템 시뮬레이터를 이용한 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하였다. 분석 결과 추적 제어기로 PI 제어기를 사용한 경우 고기동 고속의 비행체에 더 적합하다는 것을 알 수 있었다. 또한 추적 제어기로 PI 제어기를 사용했을 경우 마지막까지 표적의 중심점을 영상 센서의 중심점으로 잘 추적하고 있음을 확인하였다. 향후 과제로 실제 영상 추적 시스템의 파라미터를 도출/적용하여 최적의 추적 제어기를 설계하고, 추적 제어기를 영상 추적 시스템의 환경에 맞게 구현하여 성능을 분석하는 연구가 필요할 것이다.

[참고 문헌]

- [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 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] 진상훈, 강호균, 여보연, "영상 탐색기 시뮬레이션 기법에 대한 연구," 제14회 지상무기체계 발전 세미나, 2006.