

시간지연을 가지는 전자광학 추적 시스템의 칼만필터를 이용한 표적 추적 성능 개선 방법

A Target Tracking Accuracy Improvement Method by Kalman Filter for EOTS with Time Delay

마 진 석(Jin Suk, Ma) · 권 우 현(Woo Hyun, Kwon)

요 약

본 논문에서는 전자광학 추적 시스템의 영상추적부가 가지는 시간지연 특성을 보상하여 추적 성능을 향상할 수 있는 방법을 제시하였다. 제안된 방법은 Smith 예측기와 칼만 필터를 사용하여 시선의 시간 지연 현상 및 표적의 기동정보 지연에 대한 보상을 가능하게하여 기존의 PI 또는 Smith 예측기만의 제어루프를 사용한 경우보다 추적 오차를 매우 줄일 수 있다. 제안된 방법의 타당성 확인을 위하여 실제 EOTS에 적용하여 다양한 모의실험 및 실험을 실시하여 그 성능 향상을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we present a tracking accuracy enhancement method by compensating the time delay of the video tracker in an EOTS. The proposed method has two functional parts, which can cope with the time delay of LOS and maneuvering target informations by Smith predictor and Kalman filter. So it can dramatically reduce the tracking error over conventional PI control or Smith predictor control. To verify the proposed method, various and extensive simulation and experimental results are given.

1. 머리말

1990년대부터 국내에서는 국방과학연구소와 기업 및 대학을 중심으로 전자광학 추적시스템 (Electro-Optical Tracking System: EOTS)에 대한 꾸준한 연구

개발을 진행하고 있으며,⁽¹⁻³⁾ 현재 이에 대한 독자적인 기술을 획득한 상태이다. 그러나 고성능 EOTS의 구현을 위해서는 아직도 해결하여야할 문제점⁽⁴⁾이 남아 있으며, 그 중 가장 큰 문제점으로 영상 센서부가 가지는 고유한 시간 지연 현상이 영상 추적부에 영향을 주

* 경북대학교 전자전기공학부
School of Electronic and Electrical Engineering
Kyungpook National University

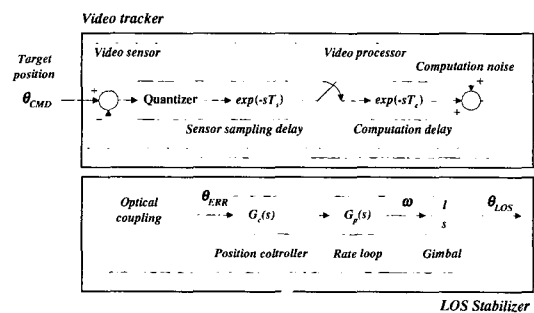
어 추적 성능을 저하시키는 것이다. 일반적인 시스템의 시간지연 문제를 다루는 방법으로는 1959년 Smith⁽⁶⁾에 의하여 제안되었으며 이는 고전적인 제어기를 포함하는 페루프에 플랜트와 같은 수학적 모델을 사용하여 시간 지연의 영향을 받지 않고 제어기를 설계할 수 있는 구조이다. Hang⁽⁷⁾등은 Smith 예측기와 PI제어기의 성능을 비교하였고, Watanabe⁽⁸⁾, Astrom⁽⁹⁾, Matausek⁽¹⁰⁾등에 의해 Smith 예측기의 단점으로 지적되어온 적분형시스템의 외란에 대한 보상 방법을 보완한 변형된 Smith 예측기들이 제안되었다. 또한 예측제어기법을 사용한 Smith 예측기가 Hagglund⁽¹¹⁾에 의해 발표되었으나 이는 Smith 예측기의 특수형으로 볼 수 있으며 최근에는 가변하는 시간지연특성을 보상하기 위하여 이를 적응 추정하여 보상하는 방법이 Tsang⁽¹²⁾등에 의해 발표되어 시간지연을 가지는 시스템에 대한 해석 및 제어기 설계, 안정도 분석등에서 커다란 발전을 이루고 있다. 그러나 이러한 Smith 예측기의 성능개선에도 불구하고 과도상태시에는 출력이 시간지연을 가지고 입력을 추종하므로 명령 추종 오차가 커지는 현상은 개선하지 못하고 있는 실정이다. 특히 이러한 문제점은 움직이는 목표를 실시간 추적하고 그 추적정보를 실시간으로 화기 통제 시스템에 전달하는 목적으로 하는 EOTS에서는 반드시 해결하여야 하는 문제이다. 즉 영상센서 및 영상처리부를 가지면서 동작하는 전자광학 위치 추적시스템의 경우, 단순한 Smith 예측기에 기반을 둔 제어기 설계는 Sharkey⁽¹³⁾등에 의하여 이루어졌고, EOTS의 경우에도 적용⁽⁵⁾하여 향상된 성능을 검증한 바 있으나 Smith 예측기의 고유특정상 입력과 출력의 시간 지연 현상을 없애는 것이 아니라 궤환 루프 밖으로 추출함으로써 제어기의 이득을 높일 수 있게 한 것이므로 출력은 항상 일정한 시간 지연을 가지고 느리게 입력을 추종하게 되며, 이는 실제 EOTS에서 표적이 출력화면의 중

앙에 놓이지 못함과 움직이는 표적의 경우 지연에 의해 화면이 흔들리게 된다. 본 논문에서는 영상센서와 영상처리부의 시간지연 현상이 추적 시스템에 주는 영향을 설명하고 이의 영향을 극소화시키는 방법을 제안한다. EOTS의 경우 외란에 의한 영향은 속도 루프의 자이로스코프를 이용하여 시간지연없이 상쇠를 시킬 수 있으므로 영상 정보의 시간지연만을 보상한다. 제안된 방법은 표적의 기동을 모델링한 후 Smith 예측기와 칼만 필터를 이용하여 표적의 기동 정보를 추정, 예측하여 추적기의 서보 제어 루프에 제공함으로써 시간 지연에 의한 영향을 보상하며, 추적 시스템의 성능이 향상됨을 보인다. 그리고 컴퓨터 모의실험을 통하여 제안된 방법의 타당성을 확인하며, 실제 전자광학 추적시스템에 적용하여 실험적으로도 추적 성능이 향상됨을 보인다.

2. 본론

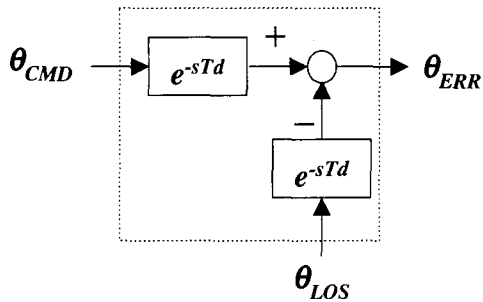
(1) 전자광학 추적시스템의 시간 지연 특성

전자광학 추적시스템(Electro-Optical Tracking System: EOTS)은 영상 신호를 이용하여 이동하는 목표물을 자동적으로 추적하면서 관측자에게 목표물에 대한 안



(그림 1) EOTS의 단순화된 시스템 블록도

정된 시선 (Line Of Sight:LOS)을 제공하고 표적의 속도, 각속도 등의 표적정보를 사격 통제 시스템에 제공하는 장치이다. 그림 1에는 간략화된 EOTS의 블록도를 나타내었다.



(그림 2) 영상추적부의 등가 모델

여기에서

θ_{CMD} : 추적 명령각, θ_{LOS} : 시선 각도(추적결과),

θ_{ERR} : 추적 오차각, ω : 시선 속도,

T_s : 영상 센서부 샘플링 시간지연,

T_c : 영상 처리부 시간지연

을 나타낸다.

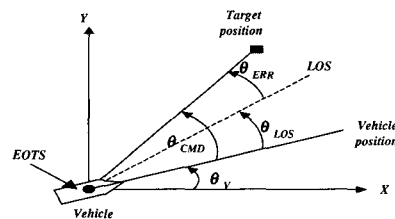
그림 1에 나타낸 것과 같이 EOTS[®]는 크게 영상 센서부, 영상 처리부, 안정화 구동부로 구성되는데 영상 센서부는 TV 카메라나 열상 장비 등으로부터 영상을 받아 영상 데이터로 변환후 이를 영상 추적부에 제공하여주며, 영상 처리부는 영상 데이터를 처리하여 표적을 인식하고 추적하여 그 정보를 안정화 구동부로 전달한다. 여기에서 영상 센서부 및 영상 처리부를 합하여 영상 추적부라 한다. 안정화 구동부는 영상 추적부로부터 들어오는 위치나 속도 정보를 이용하여 영상 센서부를 구동시켜 계속적으로 표적을 추적하게 된다. 표적 이동 정보에 대한 영상 추적부의 시간 지연 특성은 다음과 같다. 영상 추적부는 영상 센서부에

서 인가된 위치정보를 가지는 영상 신호를 양자화하여 디지털 신호로 변환한 후 영상 처리부에 저장한다. 영상 신호는 직렬입력이므로 한 영상을 완전히 입력시키는데 최소한 1 TV 프레임(Frame)이 요구된다. 또 이것이 처리되어 오차 위치 정보로 나오는데도 연산 시간이 소요되며 이는 영상 처리기의 처리속도에 따라서 다르게 나타난다. 그러나 영상 신호가 TV 필드(Field)에 동기 되어 있으므로 1 TV필드에 대하여 영상 처리부가 동작하게 되면 최소 계산 시간지연은 1 TV 필드가 된다. 현재 국내에서 운용중인 대부분의 EOTS는 T_s 와 T_c 모두 1/60초의 고정된 특성을 가진다. 영상 추적부의 전달특성⁽⁶⁾은 등가적으로 식 (1)과 같고 이를 그림 2에 나타내었다.

$$\begin{aligned} \theta_{ERR}(s) &= e^{(-sT_d)}(\theta_{CMD} - \theta_{LOS}) \\ &= e^{(-sT_d)}\theta_{CMD} - e^{(-sT_d)}\theta_{LOS} \quad (1) \end{aligned}$$

여기에서, $T_d = T_s + T_c = 1/30$ [sec]

식 (1)에서 알 수 있는 바와 같이 영상 추적부의 출력은 표적의 이동에 의하여 발생하는 추적 명령각과 추적 결과인 시선각과의 오차와 이의 시간 지연성분이 결합된 차로 생성됨을 알 수 있다. 즉 영상 추적부에 의하여 전체 시스템은 등가적으로 입력과 출력에 각각 시간지연을 가지게 된다. 이러한 시간 지연의 영상이 어떤 영향을 시스템에 주는 가를 정성적으로 설명하기 위하여 관성 공간 내에서 실제 표적의 위치와 EOTS의 시선 관계를 그림 3에 나타내었다.



(그림 3) 표적과 EOTS의 상관 관계

그림 3에서 보면 우선 항체의 자세 θ_V 는 EOTS가 항체에 탑재되어 표적을 추적하므로 EOTS의 추적 성능에 크게 영향을 받지 때문에 고려의 대상에서 제외한다. 항체에 대한 상대적인 시선의 위치 θ_M 은 EOTS에 부착되어 있는 위치 센서인 레졸버로부터 실시간으로 알 수 있다. 그러나 시선에 대한 실제 표적의 위치오차 θ_{ERR} 은 영상 추적부에서 계산되어 출력되므로 시간지연을 가지게 된다. 만약 표적이 EOTS와 상당히 근접한 거리에서 급격한 기동을 한다면 위에서 설명한 시간지연으로 인하여 표적의 실제위치 θ_{CMD} 를 정확히 알 수 없으며 따라서 추적오차가 영이 될 수 없으므로 EOTS는 잘못된 표적정보를 사격 통제시스템에 전송함으로써 급격한 명중률 감소 결과를 초래할 수 있다.

기존의 Smith 예측기는 식 (1)의 두 번째 항인 시선의 시간지연 현상은 효과적으로 보상함으로써 위치 제어기의 안정된 설계를 가능하게 하였지만, 식 (1)의 첫 번째 항인 표적의 기동정보의 시간지연 성분은 고려하지 않는 상태로 설계되어짐으로써 과도상태를 가지는 표적에 대해서는 추적오차가 그다지 감소하지 않는 특성을 보였다. 또한 일반적인 미분기를 예측기로 사용함으로써 위상지연을 개선하여 추적성능을 개선할 수 있는 방법 또한 고려될 수 있으나 시간지연이 존재하는 경우에는 현재의 입력신호 자체가 지연됨으로 이를 사용하여 다음 순간의 입력신호를 예측하는 부적절하다. 따라서 표적의 실제 위치를 추적하기 위해서는 현재의 표적의 위치를 예측하고 그 결과를 사용하여 표적을 추적한다면 보다 우수한 추적결과를 얻을 수 있음을 예상할 수 있다.

(2) 제안된 방법

제안된 EOTS의 위치 제어기는 크게 두 가지의 기

능 블록으로 구성된다. 1장에서 살펴본 바와 같이 시선의 지연현상은 Smith 예측기를 사용하여 보상하도록 하며, 표적의 기동을 예측하기 위하여 칼만 필터를 사용하여 위치오차를 예측하고 그 결과를 속도 루프에 인가함으로써 추적오차를 매우 감소시킬 수 있다. 먼저 Smith 예측기는 일반적인 제어기로 구성하고 다음으로 표적의 기동을 예측하기 위하여 우선 기동하는 표적의 특성을 모델링하고 그 결과를 상태예측기와 함께 사용하여 표적의 기동정보에 대한 최적의 상태를 예측하도록 제어루프를 설계한다.

1) 기동 표적 모델링

시선 안정화부는 직교하는 고저축과 방위축의 2축이 있으므로 3차원 공간상에서 영상신호에 의한 기동 표적의 운동은 거리 정보는 없고 각도 정보만을 이용하는 2축 방향으로 표적을 모델링한다. 거리 정보는 별도의 센서를 사용하며 측정하며, 실제 구동 정보 또한 각도 정보만 주어지므로 거리에 대한 사항은 고려하지 않기로 한다. 표적 모델링은 실제 상태 추정기가 일반적으로 이산 시간 영역에서 구현되므로 이산 시간 영역의 모델만을 고려한다.

등가속 운동하는 물체는 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d^3\theta}{dt^3} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

식 (2)는 각 가속도의 미분(Jerk)이 영임을 나타내나, 실제 운동에서 이러한 경우는 드물고 각 가속도의 미분에 작은 값을 갖게 되는 것이 일반적이기 때문에 각 가속도의 미분을 다음 식 (3) 및 식 (4)와 같이 평균이 영인 백색 잡음 $\tilde{v}(t)$ 로 모델링 할 수 있다.

$$\frac{d^3\theta}{dt^3} = \tilde{v}(t) \dots\dots\dots (3)$$

$$E[\dot{v}(t)] = 0, \\ E[\dot{v}(t)\dot{v}(\tau)] = \dot{q}(t)\delta(t-\tau) \dots\dots\dots (4)$$

식 (4)의 \dot{q} 는 확률 과정의 잡음 강도를 나타내는 것으로 위의 모델을 이용한 추정 필터의 설계 변수가 된다. 이산 시간 영역에서는 이러한 백색 잡음이 샘플링되어 동적 시스템의 입력이 된다고 볼 수 있으므로 이산 시간 영역에서의 각가속도의 미분은 평균이 영인 화이트 시퀀스 $v(k)$ 로 나타낼 수 있다. 식 (5)는 이산 시간 영역에서의 잡음 강도를 나타낸 것이다.

$$E[v(k)v(j)] = \sigma_v^2 \delta_{kj} \dots\dots\dots (5)$$

이러한 잡음은 식 (6)와 같은 형태로 동적 시스템에 영향을 미치게 된다.

$$x(k+1) = Fx(k) + \Gamma v(k) \dots\dots\dots (6)$$

여기서

$x = [\theta \ d\theta \ d(d\theta)]^T$: 표적의 상태,

F : 상태 천이 행렬,

Γ : 잡음 이득

을 나타낸다.

샘플링이 시간 간격 T 주기마다 이루어질 경우 이들은 식 (7) 및 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{1}{2} T^2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} T^2 \\ T \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

이때 $\Gamma v(k)$ 의 공분산은 식 (9)과 같다.

$$Q = \Gamma \sigma_v^2 \Gamma \\ = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} T^4 & \frac{1}{2} T^3 & \frac{1}{2} T^2 \\ \frac{1}{2} T^3 & T^2 & T \\ \frac{1}{2} T^2 & T & 1 \end{bmatrix} \sigma_v^2 \dots\dots\dots (9)$$

2) 상태 추정기

표적의 상태 추정기로는 칼만 필터를 사용한다. 칼만 필터는 초기 상태오차를 포함한 모든 잡음이 정규 분포를 따르고 서로 독립일 경우 최적의 MMSE (Minimum Mean Square Error) 상태 추정기가 되며 정규분포가 아닐 경우에도 가장 좋은 LMMSE (Linear Minimum Mean Square Error) 상태 추정기가 된다. 상태 방정식과 측정 방정식이 식 (10) 및 식 (11)과 같이 주어지는 선형 시스템의 칼만 필터⁽¹⁵⁾는 참고문헌을 참고하면 된다.

$$x(k+1) = F(k)x(k) + G(k)u(k) + v(k) \dots\dots (10)$$

$$z(k+1) = H(k+1)x(k) + w(k+1) \dots\dots\dots (11)$$

여기서,

$E[v(k)v(k)'] = Q(k)$, $E[w(k)w(k)'] = R(k)$ 이고

$x(k)$: 표적 상태, $F(k)$: 상태 천이 행렬,

$u(k)$: 입력, $G(k)$: 입력의 이득,

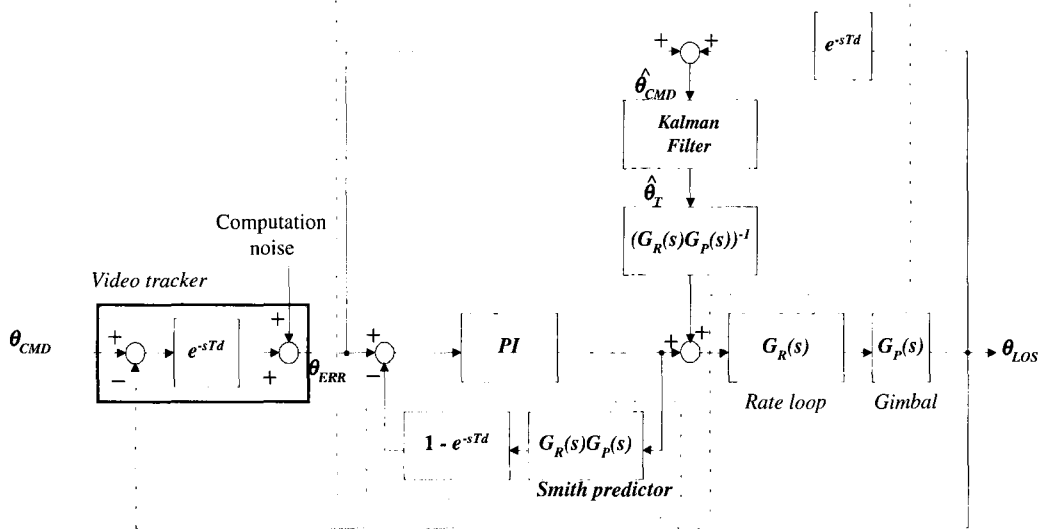
$v(k)$: 상태변화 잡음, $z(k)$: 상태의 측정치,

$H(k)$: 측정치의 이득 행렬, $w(k)$: 측정치 잡음

을 나타낸다.

그림 4는 앞 절에서 설명한 방법을 사용하여 영상 추적부의 시간지연을 보상을 위하여 사용한 제안된 제어 방법을 블록도로 나타낸 것이다. 그림 4의 점선 부분이 제안된 위치 제어기를 나타낸다.

The proposed position controller



(그림 4) 제안된 제어 방법

여기서

$$G_R(s) = \frac{(80\pi)^2}{s^2 + 1.4 \times 80\pi s + (80\pi)^2} \dots\dots\dots (12)$$

$$G_P(s) = \frac{25.4}{s} \dots\dots\dots (13)$$

$$(G_R(s)G_P(s))^{-1} = \frac{s}{25.4(s/(200\pi) + 1)} \dots\dots\dots (14)$$

를 나타낸다.

식 (12)의 $G_R(s)$ 는 속도 루프의 전달함수를 나타내었으며 이의 대역폭은 40Hz이고 감쇠상수는 0.7임을 알 수 있다. 식 (13)의 $G_P(s)$ 는 안정화 짐발의 이득을 나타내었다. 식 (14)의 $(G_R(s)G_P(s))^{-1}$ 항에서는 속도 루프의 대역폭이 요구되어진 추적루프의 대역폭보다 매우 높으므로 속도 루프의 전달함수는 1로 가정하고 $G_R(s)$ 만의 역함수를 나타내었으며, 이를 구현하기 위하여 100Hz 정도의 고주파 영역에 보조 극점을 할당한 결과식이다. 여기에서 $(G_R(s)G_P(s))^{-1}$ 는 예측된 표적의 위치를 속도루프에 인가하는 과정에서

속도명령을 만들기 위하여 사용하였으며 칼만필터 블록과 직렬로 연결되어 피드포워드루프를 만들어 필터의 이득이 수렴한 정상상태에서 루프의 전체이득을 1로 만들기 위하여 사용하였다. 이러한 결과는 아래에서 정량적으로 설명되어질 것이다.

시선의 시간지연을 보상하기 위하여 Smith 예측기를 사용하고 표적의 기동은 시간지연이 있는 추적 오차 성분과 레졸버로부터 측정된 짐발의 현재 위치의 지연성분을 더하여 칼만 필터의 입력으로 사용하였으며 이를 식으로 나타내면 식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned} \widehat{\theta}_{CMD}(s) &= \theta_{ERR} + e^{(-T_d s)} \theta_{LOS} \\ &= e^{(-T_d s)} \theta_{CMD} \end{aligned} \dots\dots\dots (15)$$

칼만 필터는 식 (15)를 입력신호로 사용하여 T_d 시간이후의 표적의 상태를 추정할 수 있으므로 칼만 필터의 출력은 현재의 표적의 기동 상태의 최적의 추정치를 바탕으로 시선을 표적에 추종시키기 위한 위치오차 명령을 만들어 기존의 위치오차 명령에 가산함으로써 추적오차를 극소화시킬 수 있도록 하였다. 만

약 지연된 추적 명령신호를 입력으로 칼만 필터가 정상 상태에 도달하였다면 제안된 제어 방법은 그림 5와 같은 등가 블록도로 나타내어질 수 있다. 그림 5로부터 명령추종에 대한 전달 함수는 식 (16)과 같다. 단 식에서 $G_R(s)$ 는 PI 제어기의 전달함수를 나타낸 것이다.

$$\frac{\theta_{LOS}(s)}{\theta_{CMD}(s)} = \frac{1 + G_C(s)G_R(s)G_P(s) + G_C(s)G_R(s)G_P(s)(1 - e^{-T_s s})}{1 + G_C(s)G_R(s)G_P(s)(1 - e^{-T_s s}) + G_C(s)G_R(s)G_P(s)e^{-T_s s}}$$

$$= 1 + \frac{G_C(s)G_R(s)G_P(s)(1 - e^{-T_s s})}{1 + G_C(s)G_R(s)G_P(s)} \quad \dots (16)$$

칼만 이득이 수렴하고 입력이 정상 상태에서는 식 (16)에 $s=0$ 을 대입하면 되므로 제안된 방법은 추적 명령에 대한 추적 결과 각도가 1이 되어 최상의 명령 추종 성능을 가짐을 알 수 있다.

(3) 모의 실험 및 실험

그림 6과 그림 7은 실험에 사용된 EOTS 및 실험장비와 추적용 안정화 짐발을 나타내었다. 실험에서는 TMS320C30 디지털 신호처리 프로세서를 4kHz의 샘플링시간을 가지도록 하였다. 표 1에는 모의실험 및 실험에 사용된 PI제어기의 계수를 나타내었으며, 이는 각각의 제어방법에 따라 최적의 PI 제어기의 계수들이 달라지기 때문이다. 단 Smith 예측기와 제안된 방법에서의 제어기값이 변동이 없는 것은 제안된 방법이 Smith 예측기를 설계한 상태에서 그 이득의 변화 없이 칼만 필터만을 추가 설계하여 제어루프에 인가할 수 있음을 의미한다. 또한 실제 EOTS는 내부 고저축과 내부 방위축이 동력학적 결합 특성을 보이나 이는 내부 속도루프의 이득을 높이면 그 영향을 줄일 수 있으며 본 논문에서는 그러한 결합에 대한 영향은 다루지 않으며 각 축에 대하여 독립적으로 제안된 제어를 설계하였으며 그 실험 결과를 제시하였다.

(표 1) 모의실험 및 실험에 사용된 PI제어기의 계수

	K_P	K_I
PI 제어기만 사용시	0.6	2.898
Smith 예측기 사용시	3.0	1.5
제안된 방법 사용시	3.0	1.5



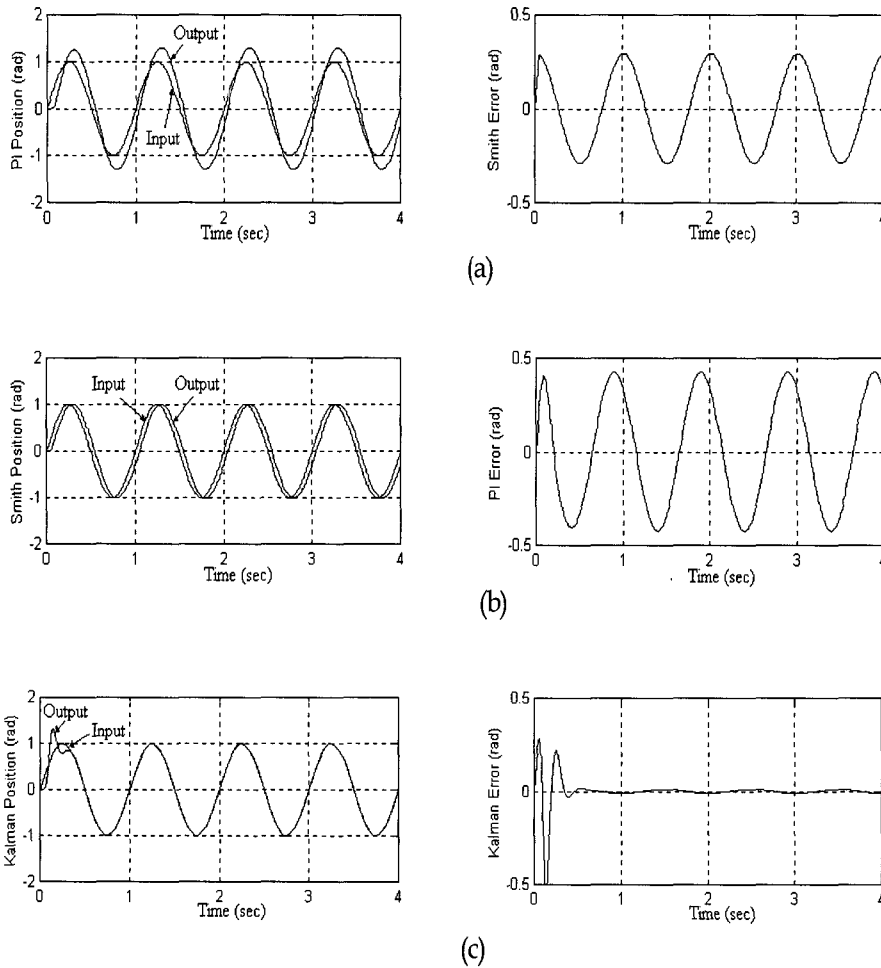
(그림 6) 실험 장비의 외관



(그림 7) 안정화 짐발의 모양

1) 모의 실험 결과

모의 실험은 PI 제어기만을 사용한 경우, Smith 예측기를 사용한 경우 및 제안된 방법을 사용한 경우의 3가지로 나누어 모의 실험을 수행하였다. 그림 8에서 그림 10까지의 그림에서 좌측 파형은 입력 명령 및 출력 파형을 나타내었으며 우측 파형은 그때의 추적오차를 나타낸 것이다. 그림 6에는 1Hz 정현파 입력에 대한 응답을 나타내었다.

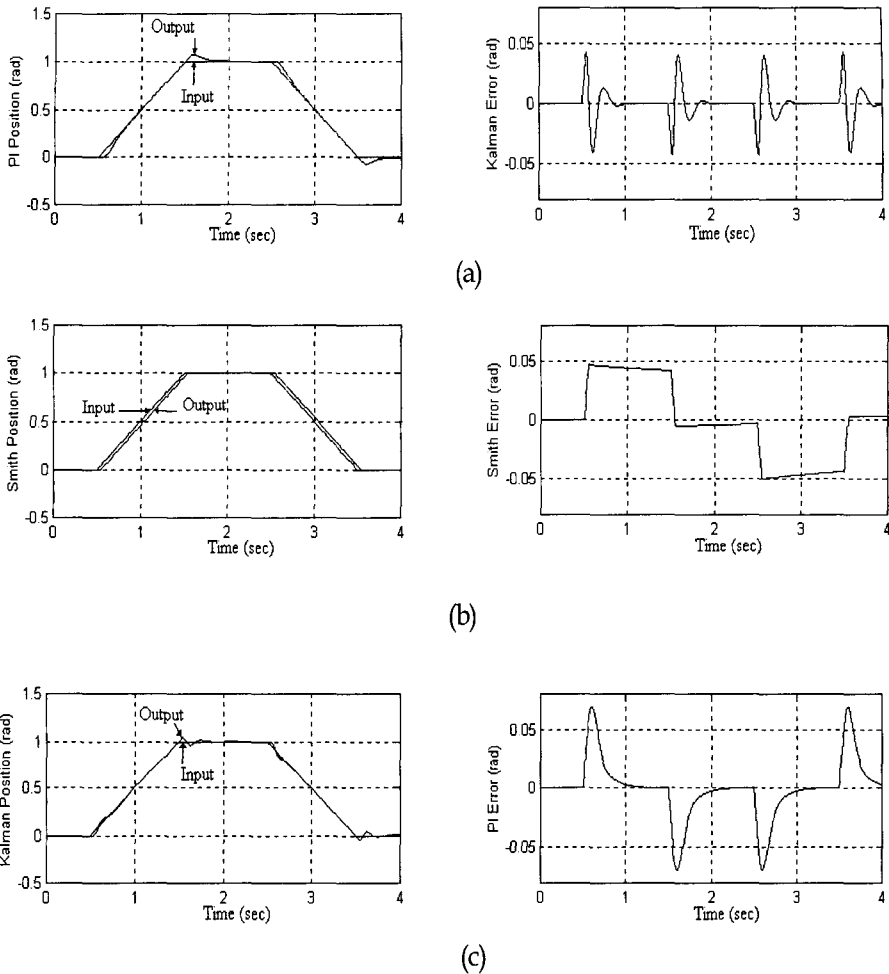


(그림 8) 정현파 입력에 대한 응답과 오차 파형(1Hz)
 (a) PI 제어기 (b) Smith 예측기 (c) 제안된 방법

그림 8의 (a)에서 보면 PI 제어기의 경우 실제 입력보다 출력이 더 커지는 경우가 발생하고 방향이 바뀌는 순간에 오차가 커지는 것을 알 수 있다. (b)의 Smith 예측기를 사용한 경우 출력이 입력보다 커지는 경우는 없지만 역시 시간 지연을 두고 출력이 입력을 추종한다는 것을 알 수 있다. 반면 (c)의 칼만 필터를 사용한 경우에는 초기에는 칼만 필터의 내부 변수들이 수렴하기 위한 과도상태에서는 추적오차가 크지만 그 이후를 경과하면 출력이 입력보다 커지는 경우도

경우도 없으며 Smith 예측기를 사용한 경우보다 빠르게 출력이 입력을 추종하고 추적 오차도 기존의 방법들과 비교하여 매우 향상된다는 것을 알 수 있으며 이는 칼만 필터가 시간 지연 요소를 보상하고 있음을 의미하는 것이다.

그림 9에는 사다리형 파형 입력에 대한 응답을 나타내었다. 사다리형 파형은 일정 위치에서 출발하여 등속으로 이동 후 일정시간 정지하였다가 다시 등속으로 원 위치로 복귀하는 운동을 모사한 것이다.



(그림 9) 사다리형 입력에 대한 응답과 오차
(a) PI 제어기 (b) Smith 예측기 (c) 제안된 방법

그림 9의 (a)에서 보면 PI 제어기의 경우 속도가 일정할 때는 정상 상태에서 출력이 입력을 추종하지만 갑자기 멈추거나 출발할 경우 전체적인 오차가 크다는 것을 알 수 있다. (b)에서 보면 Smith 예측기의 경우에도 갑자기 멈추거나 출발할 경우 오차가 발생하고 속도가 일정할 경우 역시 시간 지연을 가지고 있으므로 그 오차를 극복하지 못한다는 것을 알 수 있다.

(c)를 보면 칼만 필터를 사용한 경우는 속도가 일정하면 PI 제어기를 사용한 경우와 마찬가지로 정상상태에서 출력이 입력을 추종한다는 것을 알 수 있고 또한, PI 제어기를 사용한 경우보다 전체적인 오차가 매우 작다는 것을 알 수 있다. 그림 10에는 측정치에 평균이 영이고 분산이 0.001인 백색 잡음이 포함된 사다리형 입력 파형에 대한 응답을 나타내었다.

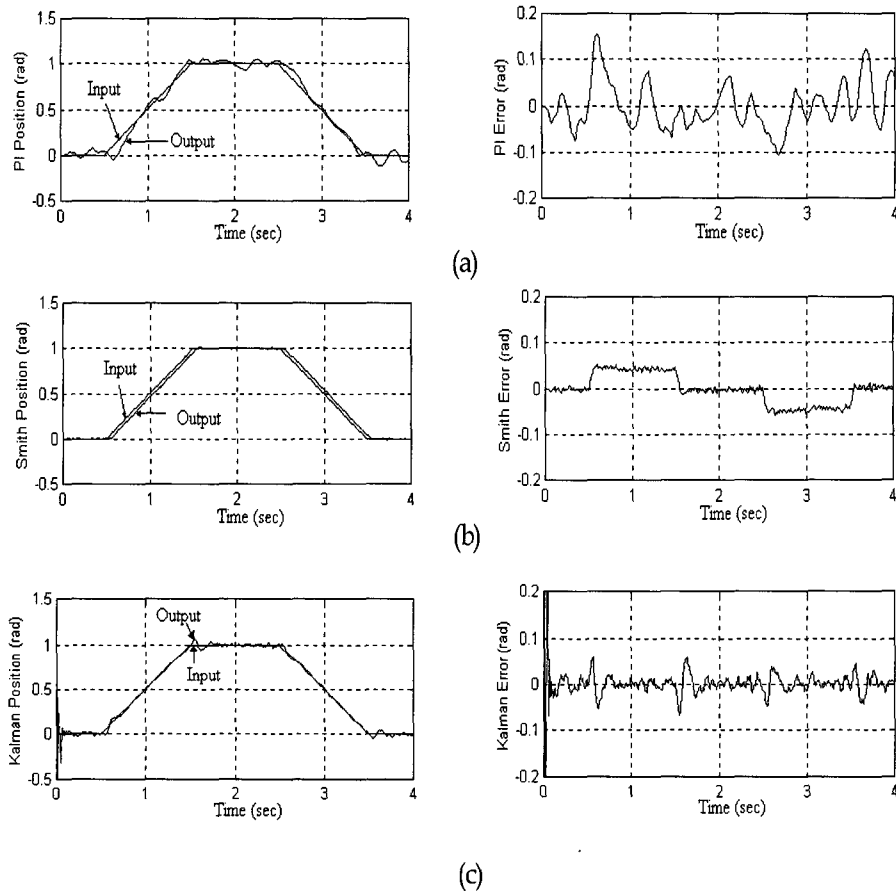


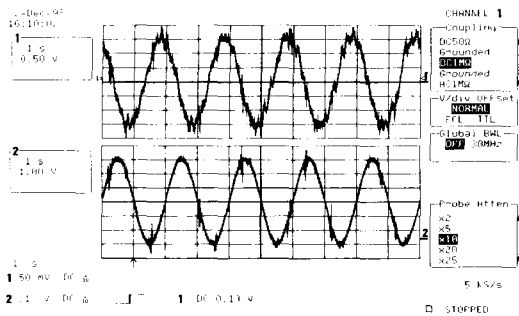
그림 10. 잡음이 포함된 사다리형 입력의 응답 및 오차 ($E[w(k)] = 0, \sigma_w^2 = 0.001$)
 (a) PI 제어기 (b) Smith 예측기 (c) 제안된 방법

그림 10 (a)의 PI 제어기만을 사용한 경우는 루프의 이득을 크게 할 수 없으므로 잡음에 의해 추적 성능이 매우 떨어지는 것으로 나타난다. (b)의 Smith 예측기를 사용한 경우 PI 제어기만 사용한 경우 보다 이득이 높기 때문에 잡음에 강인한 특성을 나타낸다. 하지만 역시 출력의 시간지연 특성은 여전히 존재한다. (c)의 칼만 필터를 사용한 경우 역시 이득이 높고 칼만 필터 또한 잡음이 있는 상태에서도 최적의 상태 추정기로 동작하므로 잡음에 강인한 특성을 나타내며, 초기 과

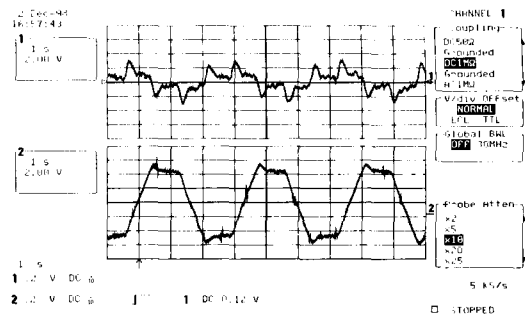
도 상태를 제외하고는 출력의 시간 지연 현상 역시 보 상함을 알 수 있다.

2) 실험 결과

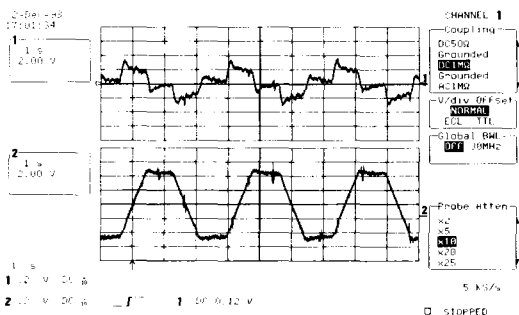
그림 11 (a)(b)(c)는 각 제어기의 0.5Hz 정현파 입력에 대한 응답을 나타내었고, 그림 11 (d)(e)(f)에는 사다리형 입력에 대한 응답을 나타내었다. 각 그림의 상단 파형(CH 1)은 추적 오차를 나타낸 것이며 하단 파형(CH 2)은 추적 결과를 나타낸다.



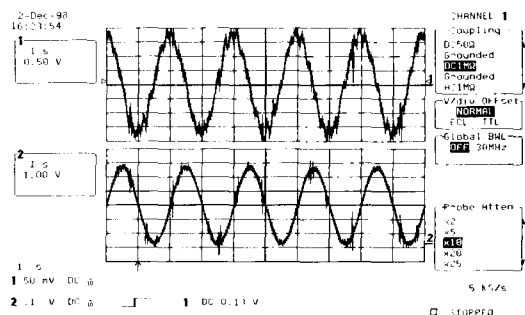
(a)



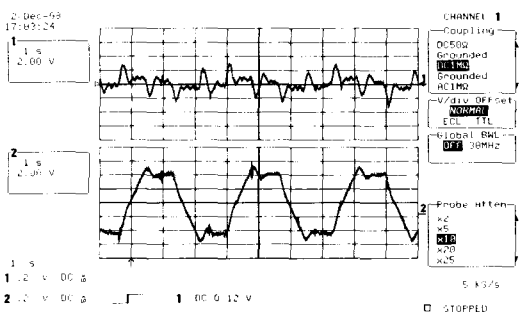
(d)



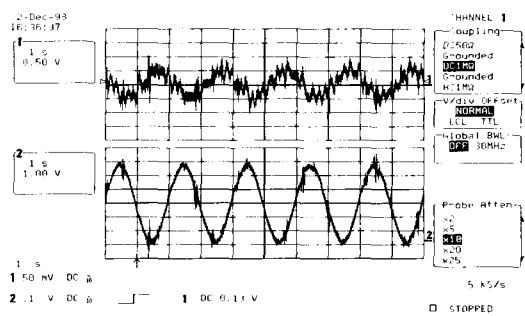
(b)



(e)



(c)



(f)

그림 11. 실험결과
 (a) PI 제어기 (b) Smith 예측기 (c) 제안된 방법
 (d) PI 제어기 (e) Smith 예측기 (f) 제안된 방법

시간 영역 응답 실험 결과를 살펴보면 모의 실험결과와 일치함을 알 수 있다. 그림 11 (a)(d)를 보면 PI 제어기를 사용한 경우 정현과 입력에 대하여 오차가

크게 발생하며 그림 11 (b)(e)를 보면 Smith 예측기를 사용한 경우 일정 속도를 가지는 부분에서 오차를 극복하지 못하지만 그림 11 (c)(f)에서 보이는 바와 같이

제안된 방법을 사용했을 경우 전체 오차가 줄어들었고, 일정 속도를 가진 경우에도 추적 오차가 향상됨을 알 수 있다.

3. 맺음말

본 논문에서는 EOTS에서 영상 추적부의 시간 지연 현상으로 인하여 발생하는 추적오차를 감소시킬 수 있는 방법을 다루었다. 영상 추적부의 등가모델을 사용하여 추적오차가 입력 신호와 출력신호의 시간지연을 동시에 가짐을 보였다. 이러한 문제의 해결을 위하여 먼저 Smith 예측기를 사용하여 추적기의 시간 지연 현상을 분리한 다음, 이를 칼만 필터를 사용하여 예측 제어하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 기존의 PI 제어방법 또는 Smith 예측기를 가진 PI 제어 방법보다 기동하는 표적에 대해서는 추적오차의 매우 감소시킬 수 있는 방법임을 보였다. 제안된 방법에서 Smith 예측기는 출력의 시간 지연을 보상하기 위하여 사용되었으며, 목표물의 기동 특성을 확률 과정으로 모델링하고, 칼만 필터를 이용하여 표적의 위치, 각속도, 각가속도 정보를 추정, 예측하여 추적기의 속도 명령에 추가함으로써 영상 추적부의 시간 지연에 의한 영향을 보상할 수 있어 추적 시스템의 성능을 향상할 수 있었다. 위의 결과를 실제 EOTS에 적용하여 컴퓨터 모의실험과 실험을 실시하여 제안된 방법의 타당성을 보였다.

참 고 문 헌

1. 구제선, 박양기, 김성수, "무인항공기용 광학추적기 구조해석", 제1회 통신/전자 학술대회, 1997, pp. 660-668.
2. 임성운, 마진석, 권우현, "EOTS에서의 동조자이로 스코프의 동작모드에 따른 특성비교", 제어·자동화·시스템 공학회 논문지, Vol. 3, No. 3, 1997, pp. 311-317.
3. 마진석, 임성운, 권우현, 변승완 "Friction compensation method by model reference approach for high performance LOS stabilization gimbal", 제2회 해상무기체계 발전 세미나, 1998, pp. 356-361.
4. W. J. Bigley and S. P. Tsao, "Optimal Motion Stabilization Control of an Electro-Optical Sight System", SPIE, Vol. 1111, 1989, pp. 116-120.
5. 마진석, 강명숙, 권우현, 임성운, 변승완, "전자광학추적기에서 영상센서의 시간지연 보상", 센서학회지, 7권, 1호, 1998, pp. 23-30.
6. O. J. M. Smith, "A Controller to Overcome Dead Time", ISA J., Vol. 6, No. 2, 1959, pp. 28-33.
7. Chang C. Hang, C. H. Tan, and W. P. Chan, "A Performance Study of Control Systems with Dead Time", IEEE Trans. on Indust. Elec. and Contr. Inst., Vol. 27, No. 3, Aug. 1980, pp. 234-241.
8. Keiji Watanabe and Masami Ito, "A Process-Model Control for Linear Systems with Delay", IEEE Trans. on Automat. Contr., Vol. 26, No. 6, Dec. 1981, pp. 1261-1269.
9. K. J. Astrom, C. C. Hang, and B. C. Lim, "A New Smith Predictor for Controlling a Process with an Integrator and Long Dead-Time", IEEE Trans. on Automat. Contr., Vol. 39, No. 2, Feb. 1994, pp. 343-345.
10. M. R. Matausek and A. D. Micic, "A Modified Smith Predictor for Controlling a Process with an Integrator and Long Dead-Time", IEEE Trans.

- on Automat. Contr., Vol. 41, No. 8, Aug. 1996, pp. 1199-1203.
11. Tore Hagglund, "A Predictive PI Controller for Processes with Long Dead-Times", IEEE Contr. Syst. Mag., Vol. 12, No. 1, Feb. 1992, pp. 57-60.
 12. K. M. Tsang, W. L. Lo and A. B. Rad, "Adaptive Delay Compensated PID Controller by Phase Margin Design", ISA Trans., Vol. 37, 1998, pp. 177-187.
 13. P. M. Sharkey and D. W. Murray, "Delays Versus Performance of Visually Guided Systems", IEE-Proc. Contr. Theo. and Appl., Vol. 143, No. 5, 1996, pp. 436-447.
 14. Y. Bar-Shalom, Xiao-Rong Li, Estimation and Tracking Principles, Techniques, and Software, Artech House, 1993, pp. 207-219.