

논문 2011-48CI-5-1

# 전자광학 추적장비의 정보 전송지연에 따른 좌표지향 오차보상

## ( Compensation of Geo-Pointing Error due to Information Transport Delay for Electro-Optical Tracking System )

임 정 빈\*, 문 성 만\*, 유 준\*\*

( Jongbin Yim, Seongman Moon, and Joon Lyou )

### 요 약

전자광학추적장비는 영상신호를 이용하여 이동하는 목표물을 추적하며 안정화된 영상을 제공하는 장비이다. 또한, 특정 위치를 자동으로 관측하는 좌표지향 기능을 수행한다. 좌표지향은 항공기의 급격한 기동이나 외란 등의 외적 요인에 방해받지 않고 시선을 지향점에 고정하도록 하는 기능이다. 본 논문에서 좌표지향시의 주요 오차 요소들의 영향을 검토하여 항법정보의 전송지연이 주요 오차임을 확인하였다. 또한 지연된 항법정보로부터 현재 항공기의 항법정보를 추정하기 위해 병합칼만필터를 설계하였다. 실제 항공기의 비행데이터를 이용한 시뮬레이션을 통해 제안한 방법이 전송지연으로 인한 좌표지향 오차를 절반 이하로 줄일 수 있음을 보였다.

### Abstract

EOTS(Electro-Optical Tracking System) provides stabilized images while tracking a moving target. The key of geo-pointing is the function that fixes EOTS's sight to a specific position(geo-point) throughout aircraft maneuvers. In this paper, a major error source for the geo-pointing is identified as the transport delay of navigation information, and an augmented Kalman filter is designed to estimate the present attitude of aircraft using delayed navigation information. Simulation results including the presented scheme shows that the error due to the information transport delay reduces under half.

**Keywords :** Electro-Optical Tracking System, Geo-Pointing, Kalman Filter, Time Delay

## I. 서 론

전자광학 추적장비(Electro-Optical Tracking System, EOTS)는 영상 신호를 이용하여 이동하는 목표물을 자동적으로 추적하면서 관측자에게 목표물에 대한 안정화된 영상을 제공하고 표적의 속도, 각속도 등의 표적정보를 사격통제 시스템에 제공하는 장치이다.

최근 전자광학 기술을 비롯하여 메카트로닉스 기술,

항공전자 기술, 위성/관성 항법 시스템과의 융합 및 연동을 통해 관측 또는 항법 보조와 같은 기본적인 기능 뿐 아니라 사격통제를 위한 TADS(Target Acquisition Designation Sight) 기능 및 정보, 감시, 정찰 및 추적을 위한 ISR (Intelligence, Surveillance & Reconnaissance) 기능을 보유한 복합 시스템으로 진화하고 있다.

헬기, 전투기, 무인 정찰기(UAV)와 같은 항공기에 탑재되는 EOTS 및 적외선 전방 감시장비(Forward Looking InfraRed, FLIR)는 목표물을 추적하며 안정화된 전자광학 영상을 제공하는 기능 뿐 아니라 특정 위치를 자동으로 관측하는 좌표지향(geo-pointing) 기능을 수행한다<sup>[1~2]</sup>.

좌표지향은 그림 1과 같이 전자광학 추적장비의 시

\* 정회원, 삼성탈레스  
(Samsung Thales Co., Ltd.)

\*\* 정회원-교신저자, 충남대학교 전자공학과  
(Department of Electronics Engineering, Chungnam National University)

접수일자: 2011년 8월16일, 수정완료일: 2011년9월6일

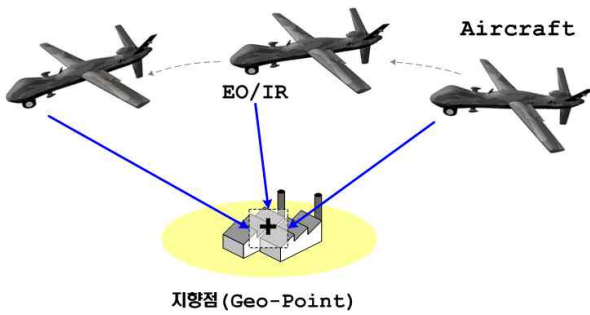


그림 1. 좌표지향(Geo-Pointing) 개념도  
Fig. 1. Concept of geo-pointing.

선을 지향점 또는 지정 위치에 고정시키는 기능으로써, 전자광학 추적장비를 탑재한 플랫폼의 움직임 및 외란을 실시간 보상하여 정확하고 안정되게 지향하도록 하는 기능이다.

이러한 좌표지향은 지향점과 전자광학 추적장비의 시선 벡터를 실시간 계산하여 지향하기 때문에 지향점의 위치 정보를 정확히 인지하고 있어야 하며, 지향점의 위치 및 전자광학 추적장비가 장착된 플랫폼의 위치/자세 정보의 정확성과 업데이트 시간에 따라 그 성능이 좌우된다.

좌표지향은 항법정보의 측정오차 및 전송지연, EOTS의 센서오차 및 정렬오차, 시선제어오차, 구동 소요시간 등의 다양한 오차요소를 포함하고 있으므로, 좌표지향 정확도를 높이기 위해서는 다양한 오차를 분석하고 이를 보상하는 기법에 관한 연구가 필요하다.<sup>[2]</sup> 특히 항법정보 전송지연에 따른 오차는 헬기의 기동 특성에 따라 가변되어, 헬기가 급 기동할 경우 좌표지향 성능에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다.

측정값에 시간 지연 현상이 있을 때, 이를 극복하기 위한 방법으로 지연된 시간만큼의 상태 값을 보정하고, 그 이후를 예측하는 방법이 있다<sup>[3~4]</sup>. 하지만, 각 시각의 추정치 사이에 관계들을 명시적으로 계산해 주어야 하는 어려움 등이 있으며, 지연된 시간만큼 상태값을 보정하는 과정은 비선형 시스템의 경우 그 과정이 간단하지 않다.

본 논문에서는 병합 칼만필터(Augmented Kalman filter, AKF)를 이용한 방법을 사용하고자 한다<sup>[5]</sup>. 병합 칼만필터를 이용하여 항법정보를 추정할 때, 상태 변수는 현재의 항법정보 뿐 아니라 과거 스텝의 항법정보를 포함한다. 앞서 언급한 방식과는 달리 각 시각의 추정치 사이의 관계가 암시적으로 표현되어 추가적으로 복잡한 계산 과정이 없이 지연된 측정값으로부터 현재의

상태 값을 추정할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 본문의 1장에서 좌표지향의 방법에 대해 다루었고, II장에서 좌표지향시의 주요 오차요소들의 영향을 검토하여, 항법정보의 시간지연이 가장 큰 오차 요소임을 확인하였다. III장에서는 항법데이터의 시간지연을 보상하기 위한 방법으로 병합 칼만필터를 이용한 방법을 제안하였다. IV장에서는 실제 항공기 데이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과를 정리하였다. 결론에서 본 논문의 주요결과를 요약하였으며, 추후 연구에 대해 언급하였다.

## II. 본 론

### 1. 좌표지향 개요

좌표지향은 항공기의 급격한 기동이나 외란 등의 외적 요인에 방해받지 않고 시선을 지향점에 고정하도록 하는 기능이다.

좌표지향을 수행하기 위한 시스템 구성은 그림 2와 같다. 항공기의 항법정보를 제공하는 위성/관성 항법장비인 GPS/INS와 실시간으로 시선 지향각을 계산하여 센서 구동을 수행하는 전자광학 추적장비부, 그리고 위의 두 시스템의 연동과 제어를 담당하는 제어 컴퓨터로 구성된다.

GPS/INS는 항공기의 위치 및 자세에 관련된 다양한 항법 데이터를 측정하여 제어 컴퓨터로 주기적으로 전송한다. 제어 컴퓨터는 운용자가 지정한 지향점 위치 정보와 GPS/INS에서 전송받은 항공기의 위치/자세 정보를 취합하여 전자광학 추적장비로 주기적으로 전송한다. 전자광학 추적장비는 항공기에서 지향점으로의 시선 벡터를 계산하여 실제로 지향해야 하는 방위각(azimuth), 고각(elevation)을 계산한다. 계산된 방위각,

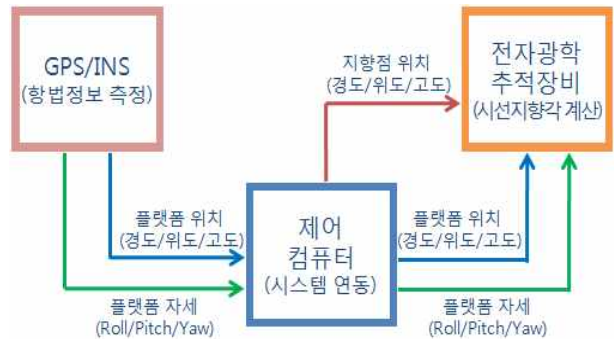


그림 2. 좌표지향 시스템 구성  
Fig. 2. Block diagram of geo-pointing system.

고각으로 전자광학 추적장비가 구동되면, 시선방향의 주간영상 또는 적외선 영상이 운용자에게 최종적으로 전시된다.

### 2. 정보 전송지연 오차

좌표지향시의 주요 오차 요소로는 항법정보의 측정 오차 및 전송지연에 따른 오차, 전자광학 추적장비의 센서오차 및 정렬오차, 시선제어오차, 구동 소요시간 지연 등의 다양한 오차요소가 있다.

그림 3은 실 장비 시험 영상으로 붉은색 점은 목표지점이며 파란색 박스는 전자광학 추적장비의 지향점을 나타낸다. 목표지점과 지향점의 위치 차이는 지향오차를 나타낸다. 플랫폼의 기동에 따라 지향오차의 변화가 있으나 영상의 시야각(field of view)를 고려할 때, 고각 방향으로 약 0.6°, 방위각 방향으로 약 0.2°의 오차가 있음을 확인할 수 있다.

정보 전송지연 오차를 제외한 오차 요소들은 장비 장착 시 시험절차를 통하여 보정을 하므로 좌표지향에 미

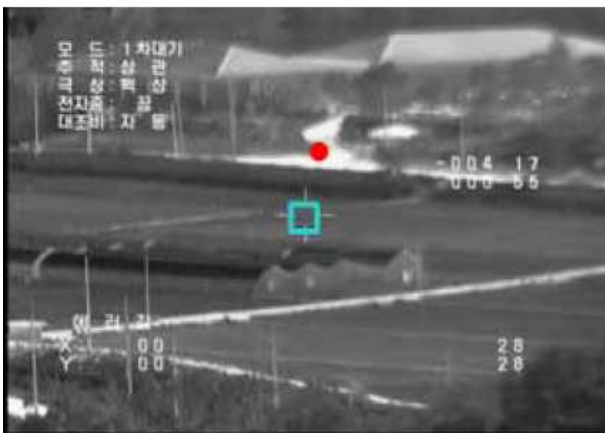


그림 3. 고정위치에서의 좌표지향 시험영상  
Fig. 3. Test images at a geo-point.

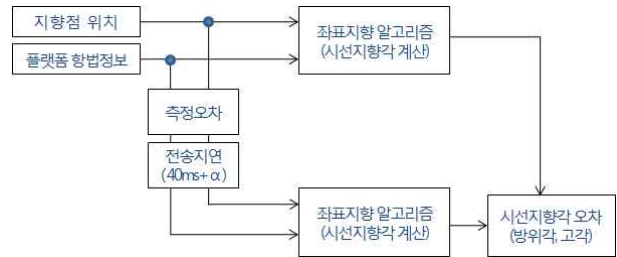


그림 4. 정보 전송지연 시뮬레이션 구성도  
Fig. 4. Simulation diagram for information transport delay.

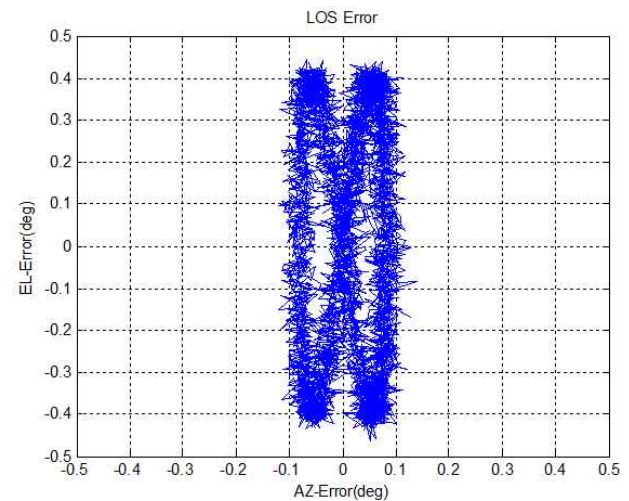


그림 5. 정보 전송지연 시뮬레이션 결과  
Fig. 5. Simulation result due to information transport delay.

치는 영향은 적을 것으로 판단되었다. 따라서 좌표지향을 수행하는데 있어서 가장 중요한 요소는 항법정보의 정확성을 비롯한 전송지연 오차인 것으로 예측할 수 있다. 이를 확인하기 위해 실시험의 목표지점 좌표 및 플랫폼 기동 데이터를 이용하여 그림 4와 같이 시뮬레이션을 구성하였다.

그림 5는 실시험 데이터에 정보 전송지연을 인가한 경우의 시뮬레이션 결과이다. 시선지향오차의 변화를 나타낸 것으로, 실시험과 유사한 오차수준 및 패턴을 나타내는 결과를 얻었다. 따라서 좌표지향 성능을 향상시키기 위해서는 항법정보의 전송지연보상이 가장 중요한 항목임을 판단할 수 있다.

### 3. 병합칼만필터를 이용한 전송지연 오차보상

전송지연 현상을 극복하기 위한 여러가지 방법들이 제안 되어 있으나<sup>[3~4]</sup> 본 논문에서는 병합 칼만필터<sup>[5]</sup>를 이용한 방법을 사용하였다. 과거의 상태 값을 상태변수

로 포함하고 있기 때문에, 다른 방법들과 달리 지연된 시간만큼 되돌아가는 과정 없이 지연된 측정값으로부터 현재의 상태 값을 추정할 수 있다.

선형 시스템은 일반적으로 식 (1),(2)와 같이 상태방정식과 출력방정식으로 간단하게 기술할 수 있다.

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + v_k \quad (1)$$

$$z_k = Hx_k + w_k \quad (2)$$

이때,  $x$ 는 상태벡터이고,  $u$ 는 제어입력이며,  $A$ 와  $B$ 는 시스템 모델이다.  $z$ 는 측정값이고,  $H$ 는 측정값과 상태벡터 사이의 관계식이다.  $k$ 는 시간의 인덱스이며,  $v$ 와  $w$ 는 각각 시스템 및 측정값의 외란으로 평균이 0인 백색잡음으로 가정한다.

좌표지향 시, 항법시스템의 데이터가 EOTS로 전송될 때, 지연이 발생하는 상황은 출력방정식에서 측정값의 지연이 있는 것으로 볼 수 있으며, 이를 고려하면 출력방정식은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_k = Hx_{k-\tau} + w_{k-\tau} \quad (3)$$

$\tau$ 는 현재 시각과 측정값의 시각 차이 즉, 지연시간을 뜻한다. 측정값이 과거의 상태변수와 관련이 있기 때문에 현재의 상태변수를 직접적으로 보정할 수는 없다. 지연된 측정값을 상태변수를 보정하는데 직접적으로 사용하기 위해 상태변수를 확장하여 과거의 상태변수를 포함하도록 하였다. 예를 들어, 한 스텝의 시간 지연이 있다면 식 (1)은 식 (4)와 같이 변형할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_k \\ x_{k-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ x_{k-2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u_k + \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} v_k \quad (4)$$

만약, 여러 스텝의 전송지연이 있다면 상태방정식을 식 (5)와 같이 변형할 수 있다. 여기서  $n$ 은 측정값이 가지는 최대 시간 지연이다.

$$\begin{bmatrix} x_k \\ x_{k-1} \\ x_{k-2} \\ \vdots \\ x_{k-n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 & \dots & 0 \\ I & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & I & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ x_{k-2} \\ x_{k-3} \\ \vdots \\ x_{k-n-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} u_k + \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} v_k \quad (5)$$

또한,  $m$ 주기만큼 지연된 상태벡터를 측정할 수 있다고 한다면, 식 (2)의 출력방정식은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$z_k = [0 \dots H_m \dots 0] \begin{bmatrix} x_k \\ \vdots \\ x_{k-m} \\ \vdots \\ x_{k-n} \end{bmatrix} + w_{k-m} \quad (6)$$

이때,  $H$ 는 측정값과 상태벡터 사이의 관계식이다.

상태방정식과 출력방정식을 식 (5),(6)과 같이 나타내고, 시간 지연이 불확실하지 않고 고정되어 있다고 가정하면, 일반적인 칼만필터나 확장형 칼만필터를 사용하여 상태변수를 추정할 수 있다.

#### 4. 좌표지향 시뮬레이션

전자광학 추적장비를 탑재한 항공기의 움직임은 가속도 운동방정식을 사용하여 나타낼 수 있다. 등가속운동의 경우 각가속도의 미분값은 '0'이나, 실제 운동에서 각가속도의 미분에 작은 값을 갖게 되는 것이 일반적이기 때문에 각가속도의 미분을 평균이 영인 백색 잡음으로 모델링한다. 이러한 각가속도는 상태변수에 적분관계를 가지므로, 각가속도는 상태방정식에 식 (7)과 같이 영향을 미치게 된다.

$$x_k = Fx_{k-1} + \Gamma v_k \quad (7)$$

여기서,  $x$ 는 상태벡터이며, 식(8)과 같다.  $F$ 는 상태전이 행렬,  $\Gamma$ 는 잡음 이득 행렬이다.

$$x_k = [\theta \ d\theta \ d^2\theta]^T \quad (8)$$

샘플링이 시간 간격  $T$ 마다 이루어질 경우,  $F$ 와  $\Gamma$ 는 식 (9), (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{1}{2}T^2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}T^2 \\ T \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

이때,  $\Gamma v_k$ 의 공분산은 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$Q = \Gamma \sigma_v^2 \Gamma^T = \sigma_v^2 \times \begin{bmatrix} \frac{1}{4}dt^4 & \frac{1}{2}dt^3 & \frac{1}{2}dt^2 \\ \frac{1}{2}dt^3 & dt^2 & dt \\ \frac{1}{2}dt^2 & dt & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

본 연구의 대상인 전자광학 추적장비의 경우 50Hz로 항법정보를 전송 받으며, 이때 실 시험에서 40ms~60ms의 시간지연이 발생하였다. 앞 절에서 제안한 방법을 이용하여, 최대 3스텝의 시간지연이 발생하는 것으로 가정하면, 식 (12)와 같이 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_k \\ x_{k-1} \\ x_{k-2} \\ x_{k-3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 & 0 \\ I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ x_{k-2} \\ x_{k-3} \\ x_{k-4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_k + \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_k \quad (12)$$

이때, 상태벡터  $x_k$ 는 식 (8), 시스템 모델  $A, B$ 는 식 (9),(10)과 같다.

또한, 지연된 자세 각만을 측정할 수 있으므로, 측정 방정식은 식 (13)과 같다.

$$z_k = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & H_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ x_{k-1} \\ x_{k-2} \\ x_{k-3} \end{bmatrix} + w_{k-3} \quad (13)$$

이때,  $H_n$ 은 아래와 같이 주어진다.

$$H_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

제안한 방법의 성능을 검증하기 위하여 그림 6과 같이 시뮬레이션을 구성하였다.

먼저 전송지연 및 오차가 없는 플랫폼의 위치 및 자세 데이터를 이용하여 기준이 되는 시선 지향각을 계산하였고, 전송지연 및 오차가 포함된 데이터를 이용하여 계산된 시선 지향각과 칼만 필터를 적용해서 보정된 시

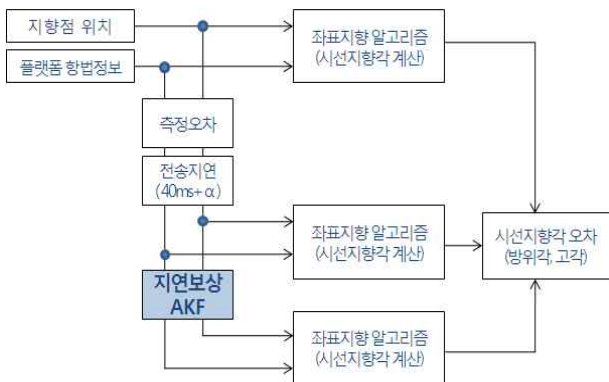


그림 6. 좌표지향 시뮬레이션 구성도  
Fig. 6. Geo-pointing simulation diagram.

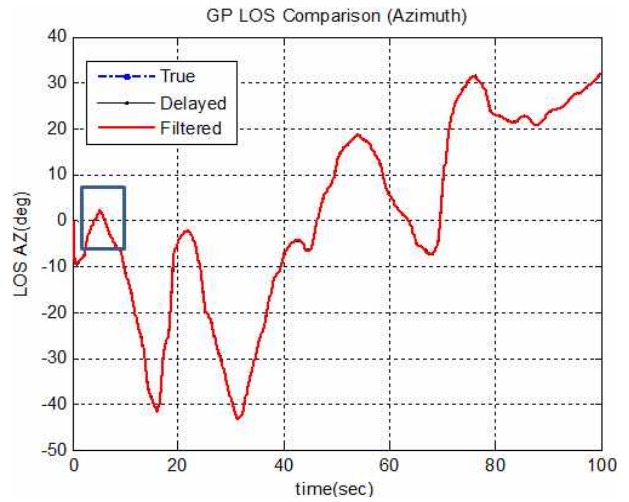


그림 7. 좌표지향 시뮬레이션 결과  
Fig. 7. Simulation result for geo-pointing with compensation.

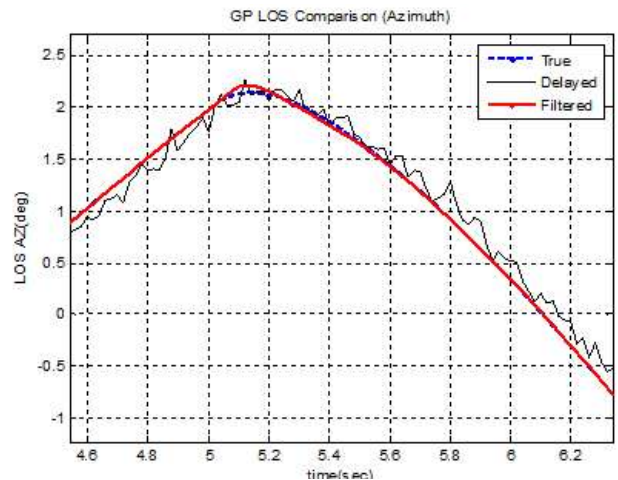


그림 8. 그림 6의 확대  
Fig. 8. Zoom-in of the Fig 6.

선 지향각을 계산하여 각각 비교함으로써 그 성능을 확인하였다.

그림 7은 좌표지향 시뮬레이션의 결과로 방위각의 변화에 대한 결과이며, 그림 8은 이를 확대한 것이다.

그림 7과 8에서 파란점선은 시간 지연 및 측정오차가 포함되지 않은 데이터를 이용한 결과이며, 검은색 실선은 시간 지연과 측정오차가 포함된 결과이다. 붉은색 굵은 실선은 앞 절에서 제안한 칼만필터를 적용하여 이를 보정한 결과이다. 시뮬레이션 결과를 통해 약 50ms에 이르는 시간지연과 측정오차가 적절하게 보상되어 시간지연이 최대 약 5ms 이내로 보상되었음을 확인하였다.

그림 9는 보상 전,후의 데이터를 이용하여 좌표지향

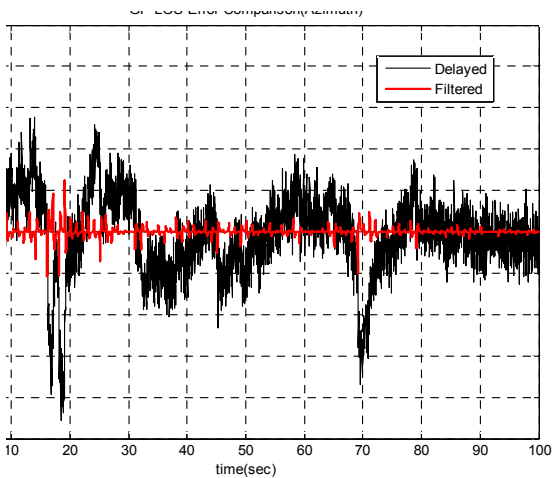


그림 9. 시선지향각 오차 비교

Fig. 9. Comparison of Line-Of-Sight errors.

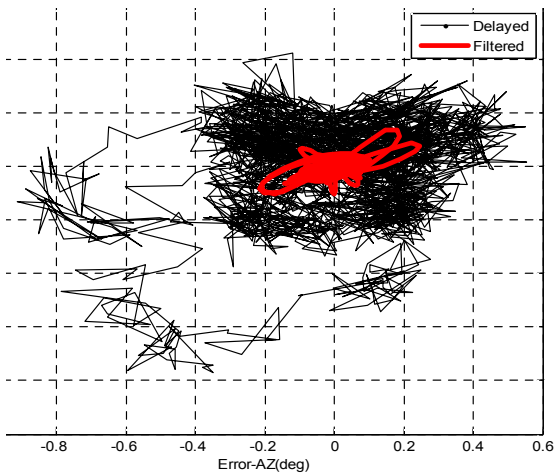


그림 10. 시선지향각 궤적들

Fig. 10. Trajectories of Line-Of-Sight.

을 수행하고, 그 결과인 방위각 지향 오차를 비교한 것이다.

검은 실선은 보상 전의 오차이며, 붉고 굵은 실선은 보상 후의 오차를 나타낸다. 오차 및 시간지연이 포함된 데이터를 이용하였을 경우, 최대  $0.5^\circ$  이상의 시선 지향 오차가 발생하였다. 반면 제안된 병합 칼만필터를 적용하여 보상한 경우 약  $0.2^\circ$  이하의 오차가 발생함을 확인하였다.

그림 10은 실제 항공기의 비행데이터를 이용하여 좌표지향을 수행한 경우의 결과이다. 검은 실선으로 나타낸 것이 시간지연이 있는 경우의 좌표지향 수행 결과이며, 시선이 항공기의 기동에 따라 고각과 방위각 방향으로 크게 흔들림을 관찰할 수 있다. 붉고 굵은 실선으로 나타낸 것은 제안된 방법을 이용하여 보상한 결과이

다. 시선의 흔들림이 절반이하로 감소되었음을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

좌표지향은 항공기의 급격한 기동이나 외란 등의 외적 요인에 방해받지 않고 시선을 지향점에 고정하도록 하는 기능이다. 좌표지향은 전자광학 추적장비를 이용하여 특수목적 항행, 관측 및 정찰 시 필요한 기능으로써 전자 영상 또는 적외선 영상으로 식별이 어려운 환경에서도 지향점 또는 표적을 지향하기 때문에 임무수행 능력을 극대화 하는데 필수적이다.

본 논문에서 좌표지향시의 주요 오차 요소들의 영향을 검토하였고, 실제 장비 시험과 유사한 시뮬레이션을 구성하여 항법데이터의 시간지연이 주요 오차임을 확인하였다. 또한 이를 보상하기 위해 병합 칼만필터를 이용한 방법을 제안하였으며, 실제 항공기의 비행데이터를 이용한 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 방법이 타당함을 확인하였다.

추후 본 논문의 결과를 이용하여 좌표지향 기능의 성능여유를 확보함으로써 항공기의 급격한 기동에도 좌표지향 성능이 보장될 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 김성수, 박주광, "EOTS 시선 안정화 제어기 연구 (III)," 연구보고서, 국방과학연구소, ATRC-409-940506, 1994년
- [2] 김성수, 신용산 외 "헬기 장착 전방관측적외선장비 좌표지향 성능 분석," 한국군사과학기술학회 종합 학술대회, pp.486-489, 2008년 8월
- [3] Y. Bar-Shalom, H. Chen, "One-step solution for multistep out-of-sequence-measurement problem in tracking," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 40, no. 1, pp. 27-37, 2004.
- [4] K. Zhang, X. Rong Li, and Y. Zhu, "Optimal update with out-of-sequence measurements," IEEE transactions on Signal Processing, vol. 53, no. 6, pp. 1992-2004, June 2005.
- [5] T. Larsen, M. Bak, "Location Estimation for an Autonomously Guided Vehicle using an Augmented Kalman Filter to Autocalibrate the Odometry," Fusion'98 International Conference, pp. 245-250, 1998.

저 자 소 개



임 정 빈(정회원)  
 2002년 충남대학교 전자공학과  
 학사 졸업.  
 2004년 충남대학교 전자공학과  
 석사 졸업  
 2006년 충남대학교 전자공학과  
 박사 수료

2006년~현재 삼성탈레스 선임연구원  
 <주관심분야 : 임베디드시스템, 항법시스템>



유 준(정회원)  
 1978년 서울대학교 전자공학과  
 학사 졸업.  
 1980년 한국과학기술원 산업전자  
 공학과 석사 졸업  
 1984년 한국과학기술원 전기전자  
 공학과 박사 졸업

1984년~현재 충남대학교 전자공학과 교수  
 <주관심분야 : 산업공정제어, 센서신호처리, IT기  
 반 로봇, 항법시스템>



문 성 만(정회원)  
 2003년 경희대학교 전과공학과  
 학사 졸업.  
 2010년 연세대학교 컴퓨터공학과  
 석사 졸업  
 2003년~현재 삼성탈레스  
 선임연구원

<주관심분야 : 실시간 시스템제어, 컴퓨터 통신>