

# 표적추적센서의 측정 바이어스 오차 보상에 의한 사격통제장치 성능 향상 기법

A performance improvement method in the gun fire control system  
compensating for measurement bias error of the target tracking sensor

김재훈\*      유준\*\*  
Kim, Jae-Hun      Lyou Joon

## ABSTRACT

A practical method is proposed to improve hit probability of the digital gun fire control system, when the measured rate of the tracking sensor becomes biased under some operational situation. For ground moving target it is shown that the well-known Kalman filter which uses position measurement only can be optimally used to eliminate the rate bias error. On the other hand, for 3D moving aircraft we present a new algorithm which incorporate FIR-type filter, which uses position and rate measurement at the same time, and the fixed-lag smoother using position measurement only, and show that it has the optimal performance in terms of both estimation accuracy and response time.

주요기술용어 : target state estimator(표적상태추정기), finite impulse response filter(fir 필터),  
fixed-lag smoother(고정지연시간스무더), rate measurement bias error(속도측정 바이어스오차),  
digital fire control system(디지털 사격통제장치)

## 1. 서론

지상 및 대공 표적에 대응하기 위한 지상 무기체계의 사격통제장치는 최신의 전자 및 컴퓨터 기술의 덕택으로 완전한 디지털 신호 처리 방식으로 전환되는 추세에 있으며, 이에 따라 현저한 성능의 향상은 물론 운용의 신뢰성과 편의성 그리고 장비의 정비 및 유지성 등의 측면에서 괄목할 만한 발전을 이

룩하고 있다. 이러한 사격통제장치는 종전에는 표적에 대한 수동 추적 기능만을 보유하고 있었으나 최근에는 신호 처리 기법의 발달에 따라 영상추적기(Image tracker)를 도입하거나, 자동영상추적기(Automatic Video Tracker)를 구현함으로써 추적 정확성을 증가시켜 이동표적에 대한 성능이 개선되고 있다. 한편 추적기, 사격통제컴퓨터 및 서보구동장치로 이어지는 연동 계통에 고속의 디지털 신호처리 방식을 구현함으로써, 기존의 속도 계통을 기본으로 한 저속의 지상표적에 대한 방식에서 위치와 속도 계통을 동시에 최

\* 국방과학연구소 선임연구원

\*\* 충남대학교 전자공학과 교수

적으로 제어할 수 있어, 지상 표적뿐만 아니라 빠른 대응 시간을 필요로 하는 대공 표적 등에 대해서도 적용할 수 있는 사격통제장치로 발전하고 있다.

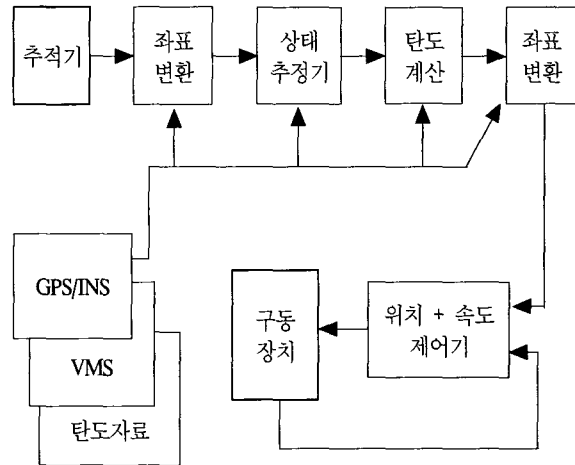
본 연구는 이러한 위치 및 속도를 동시에 적용할 수 있는 디지털 사격통제장치에 있어, 추적기의 속도 측정값에 바이어스 오차가 존재할 경우 이에 의한 영향을 효율적으로 배제할 수 있는 기법에 대한 연구이다. 추적기의 경우 표적의 위치에 대한 측정값은 양호한 경우라 하더라도 속도 측정값은 바이어스를 갖는 상황이 발생할 수가 있는 데, 예를 들어 속도 측정으로 널리 사용되는 자이로 센서 등에 있어 발생하는 편류 오차라든지 근접하는 대공표적일 경우 동적 특성에 따른 영향으로 위치는 정확하나 속도 측정값이 상대적으로 부정확하게 되는 상황이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 추적기로부터 위치 및 속도 측정값을 동시에 받아 3차원 표적상태추정기(Target State Estimator)를 구현하고, 이와는 별도로 위치 측정값만을 이용한 추정기를 활용함으로써 속도측정값이 바이어스 오차를 가지는 경우 이를 대처할 수 있는 방안을 제시하고자 한다. 위치 측정값만을 이용한 필터는 위치 및 속도 측정값을 동시에 활용한 상태 추정기와 비교하여 안정화 시간이 많이 소요되며, 표적의 운동 특성이 많이 변화할 경우 모델링 오차에 기인한 추정 정확성의 결여로 측정값의 속도 바이어스 제거에 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고 지상 및 대공 표적에 대해 효과적으로 보상할 수 있는 기법을 제시한다.

## 2. 본 론

### 2.1 디지털 사격통제장치<sup>(1)</sup>

현대식 사격통제체계는 그림 1에서 보는 바와 같이 추적기의 측정값으로부터 정확한 표적의 상태 변

수를 추정하고 이를 이용해 탄도계산을 수행하여 탄 자비행시간 후의 표적 위치에 대해 포구동 명령값을 계산하여 포구동 오차가 최소가 되도록 제어하는 역할을 수행한다.



(그림 1) 디지털 사격통제장치

### 2.2 표적상태추정기

표적의 운동 모델에 대해 사전에 지식이 있을 경우 추적기의 측정값과 운동 모델에 의한 예측 정보를 통계적으로 결합하여 최적으로 표적의 상태에 대한 추정을 하기 위한 것이 표적상태추정기이다. 표적의 상태추정기로는 표적의 운동 모델을 기반으로 한 시간 영역의 필터가 사용되며, 칼만필터 등이 이에 해당한다. 이러한 칼만 필터 방식은 표적의 운동 모델을 정확히 알 경우에는 이상적인 추정값을 계산할 수가 있다. 그러나 실제 운동이 예측한 모델과 다를 경우에는 정확성이 떨어지게 되며, 심지어는 발산하게 되어 전혀 쓸 수가 없게 된다. 이러한 경우에는 단순 칼만 필터 대신에 적응 추적필터를 사용하여야 하며, 통상 다음과 같은 세가지 방식이 알려져 있다. 첫째는 추정오차에 대한 감시를 통해 추정기 상

태를 감시할 수 있는 방법을 두고, 추정 오차가 증가 시에 모델링 불확실성 통계량(Q)을 변경하거나, 운동 모델의 차수를 변경하거나<sup>(2)</sup>, 운동 모델에 직접 인가된 외란 입력을 추정하여 보상하는<sup>(3)</sup> 등 모델에 대한 스위칭을 하는 방식이며, 둘째는 가능성이 있는 여러 개의 운동 모델을 선정하여 각각에 대한 상태 추정기를 동시에 구현하고, 이들이 선택될 확률을 적절히 마련함으로써 적응된 추정값을 계산하도록하는 방식<sup>(4)(5)</sup>이며, 셋째로는 운동 모델이 유효한 시간을 제한하여 과거의 모든 추정값을 사용하는 기존의 칼만필터 방식에 대해 현재로부터 일정한 시간 이전의 추정값만을 사용함으로써 필터의 발산을 방지하고 모델의 변화에 적응할 수 있는 방식<sup>(6)(8)</sup>이다.

본 논문에서는 표적의 기동의 변화가 작은 지상표적인 경우에는 표적 상태 추정기로서 칼만필터를 사용하며, 기동의 변화가 큰 대공 표적을 위해서는 유한시간모델에 의해 유도된 FIR 필터를 적용하였다.

### 2.2.1 칼만필터

이 필터는 운동 모델이 잘 알려진 경우 최적의 추정값을 제공할 수가 있는 데, 운동 모델의 불확실성 및 측정센서의 오차의 통계적인 특성이 백색 가우시안으로 기술될 때 표적상태에 대한 바이어스 오차가 없는 최적 선형추정값(BLUE; Best Linear Unbiased Estimate)을 제공하며, 추정오차가 최소분산(Minimum variance)을 갖는다<sup>(8)(10)</sup>.

필터모델식:

$$x(k+1) = A \cdot x(k) + B \cdot w(k) \quad (1)$$

$$y(k) = C \cdot x(k) + v(k) \quad (2)$$

$$E[w_k \cdot w_m^T] = Q \cdot \delta(k-m) \quad (3)$$

$$E[v_k \cdot v_n^T] = R \cdot \delta(k-n) \quad (4)$$

$$E[v_k] = E[w_k] = 0, \text{ 모든 } k\text{에 대해}$$

측정정보 결합식:

$$\hat{x}(k) = \bar{x}(k) + K(k) \cdot [y(k) - C \cdot \bar{x}(k)] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \hat{P}(k) &= \bar{P}(k) - K(k) \cdot C \cdot \bar{P}(k) \\ &= K(k) \cdot (C \cdot \bar{P}(k) \cdot C^T + R) \cdot K(k)^T \end{aligned} \quad (6)$$

1단계 예측식:

$$\bar{x}(k+1) = A \cdot \hat{x}(k) \quad (7)$$

$$\bar{P}(k+1) = A \cdot \hat{P}(k) \cdot A^T + B \cdot Q \cdot B^T \quad (8)$$

$$K(k+1) = \bar{P}(k+1) C^T (C \bar{P}(k+1) C^T + R)^{-1} \quad (9)$$

등속모델 시 사용한 시스템 행렬 A, B, C는 다음과 같으며 측정센서의 오차 분산(R)은 센서에 대한 정보를 바탕으로 선정하며, 모델에 대한 오차 분산(Q)은 실제 대상 체계에 대해 추정오차가 최소가 되도록 조정(Tuning) 된다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} \\ T \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{위치, 속도 추정값 사용 시}) \quad (11)$$

$$C = [1 \ 0] \quad (\text{위치 추정값 사용 시}) \quad (12)$$

T: 샘플 주기

### 2.2.2 FIR 필터

표적의 운동 모델이 유한한 시간 동안만 유효할 경우에는 과거에 측정한 값은 현재의 모델에 대한 정보가 거의 없게된다. 이와 같은 경우 유한 구간 시간 동안의 추정값과 운동 모델을 결합한 표적 상태 추정기를 구현할 수가 있는 데 FIR 필터 형태로 유도가 된다. 이 필터의 특성은 추정값에 대해 Non-recursive 계산을 하여야 하나, 운동 모델이 변경 시 적용이 빠르고, 모델의 변동에 덜 민감하므로 한가지 필터로서 여러 운동 모델에 대처할 수 있는 장점이 있다. 이 필터는 구조적으로 필터의 안정성(BIBO

stability)이 보장되어 칼만필터 등에서 나타나는 발산 현상이 근본적으로 발생되지 않는 데, 자료 구간을 무한히 크게 하면 대수적으로 칼만필터와 동등함을 보일 수가 있다<sup>(6),(7)</sup>. 한편 이 방식은 자료구간이 늘어지면 연산량이 비례적으로 늘어나서 연산부담이 늘어나며, 자료구간을 짧게 하면 운동 모델의 변동에 대한 기동성이 증가하는 반면, 추정을 위한 정보량의 크기가 제한되게 되어 추정 성능이 떨어져서 측정 잡음을 제거하는 능력이 떨어진다.

본 연구는 대공표적추정기로서 등가속도 모델을 기반으로 유도된 FIR필터를 사용하였다<sup>(6)</sup>. 필터에 사용한 운동 모델식은 식 (1)부터 (4)식과 동일하며, 사용된 매개변수는 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{T^3}{6} \\ \frac{T^2}{2} \\ T \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{위치, 속도 측정값 사용 시}) \quad (14)$$

$$C = [1 \ 0 \ 0] \quad (\text{위치 측정값 사용 시}) \quad (15)$$

FIR필터의 추정값은 측정자료 구간을 N이라 하면 다음과 같이 계산된다.

$$\hat{x}(k) = \sum_{i=0}^N H(i) \cdot y(k-i) \quad (16)$$

필터의 Gain H(i)는 국과연에서 기 개발된 제곱근 정보필터(SRIF; Square Root Information Filter)를 사용하거나<sup>[6],[8]</sup> FIR 필터<sup>[7]</sup>을 이용하여 계산할 수가 있는데 여기서는 후자의 계산 방법을 기술하였다.

Kwon-FIR 필터 Gain 계산방법<sup>(7)</sup>:

(17)-(22)식을 연속적으로 적용하여  $0 \leq i \leq N$ 인 각

i 에 대해  $H(i) = H(i;N)$  를 구하면 얻을 수가 있다.

$$H(i;N) = S^{-1}(N) \cdot L(i;N), \quad 0 \leq i \leq N, p \leq N < \infty \quad (17)$$

$$L(i; n+1) = A^{-T} [I - S(n) \bar{S}(n)] L(i; n), \quad N-i \leq n \leq N-1 \quad (18)$$

$$L(i; N-i) = C^T R^{-1} \quad (19)$$

$$S(n+1) = A^{-T} S(n) A^{-1} + C^T R^{-1} C \\ A^{-T} S(n) \bar{S}(n) S(n) A^{-1}, \quad -1 \leq n \leq N-1 \quad (20)$$

$$S(-1) = 0 \quad (21)$$

여기서 p는 상태 수이며,  $\bar{S}(n)$ 은 다음과 같다.

$$\bar{S}(n) = A^{-1} B Q^{1/2} \\ \times [I + Q^{1/2} B^T A^{-T} S(n) A^{-1} B Q^{1/2}]^{-1} (Q^T)^{1/2} \\ \times B^T A^{-T} \quad (22)$$

### 2.3 측정센서 속도 바이어스 보상기법

추적기로부터 위치 측정값 및 속도 측정값이 동시에 제공될 경우 속도 측정값이 불량한 경우에는 위치 측정값만을 사용한 상태추정기를 구현함으로써 속도 상태에 대한 추정을 할 수가 있다, 단, 이때 추정된 속도가 정확하기 위하여 정확한 운동 모델이 필요하며, 운동 모델의 불확실성이 증가할 경우에는 추정 성능이 떨어지게 되어 속도추정기로서 사용이 어려워진다.

#### 2.3.1 지상표적에 대한 속도 바이어스 보상기법

지상표적은 고도의 변화가 거의 없으며, 이동 속도의 크기가 작고 기동 가속도의 크기가 작아 등속도 운동 모델이 적합하다. 본 연구에서는 2.2.1에 기술된 칼만필터를 사용하여 상태추정기를 구현하였으며, 위치, 속도 측정값을 이용한 상태추정기와 위치

측정값만을 사용한 상태추정기를 각각 구현하였다.

최초 초기화 과정 시는 위치, 속도 측정값을 이용하여 추정을 수행하며, 필터의 안정화 기간 이후에는 위치측정값만을 사용한 속도 추정기의 출력과 위치 및 속도 측정값을 이용한 속도 추정기간의 오차를 구하여 바이어스가 존재 시는 위치 측정값으로 구한 속도 추정 값을 사용하면 빠른 안정시간과 추정성능의 요구조건을 둘 다 만족할 수가 있다.

### 2.3.2 대공표적에 대한 속도 바이어스 보상기법

#### (1) 표적상태추정기로서 FIR 선정사유

대공표적은 항적의 변화가 심하며, 특히 소형시험용 표적기 등은 바람의 영향이나 자체의 조종 안정성 등의 어려움으로 인해 운동 모델을 등속도 또는 등가속도 모델로 고정시켜 사용 시는 실제 항적과 잘 일치하지 않게 된다. 따라서 단일의 운동 모델을 기반으로 한 칼만필터를 사용 시는 항적의 변화에 따라가지 못하여 성능이 많이 떨어지게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위해 표적상태 추정기로서 2.2.2에 기술된 유한시간모델의 FIR 필터를 사용하였다.

#### (2) 속도측정 바이어스 발생 사유 및 영향

한편 추적기의 속도 측정값은 근거리 횡단시 각 가속도의 급격한 변화에 기인하여 동적인 바이어스 오차를 가지게 될 수가 있으며 이와 같은 경우에 위치 및 속도 측정값을 동시에 사용하는 FIR 필터의 추정 속도 값에 바이어스가 생겨 필터의 성능이 저하된다.

#### (3) 위치측정값을 사용한 필터의 문제점

대공표적의 경우 지상표적의 경우와 유사하게 위치 측정값만을 사용한 FIR 필터를 사용하여 추정을 하는 방안을 검토할 수가 있으나, 이때 다음과 같은

문제점이 생겨 사용이 곤란하다. 즉, 유한구간필터는 시간에 비례하여 측정잡음을 배제할 수 있는 능력이 증가되나, 운동모델의 기동에 대처하기 위해 유한시간 구간이 줄어들 경우 위치 측정값만을 이용하여 속도에 대한 추정 시는 위치와 속도 측정값을 동시에 이용하여 추정한 경우와 비교하여 미분 효과가 크게 나타나며 따라서 추정 오차가 상당히 잡음화 되게 되어 체계의 안정성을 해칠 우려가 크다<sup>(1)</sup>. 만일 유한시간 구간을 증가하면 추정 속도의 잡음크기를 줄여 위의 문제점은 해결 할 수가 있지만 이것은 칼만필터의 문제와 비슷하게 항적의 변화에 잘 적응하지 못하는 결과를 가져오게 되어 모델링 오차에 따른 추정 바이어스가 발생되어 역시 사용이 곤란하게 된다.

#### (4) 본 연구에서 제안한 기법

본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 위치 및 속도 측정값을 동시에 사용한 FIR 필터를 상태 추정기로서 기본으로 사용하고, 속도 측정값이 바이어스되는 경우에 바이어스 크기를 별도로 계산할 수 있는 방안을 고려하여 위의 상태 추정 값에 보정 함으로써 해결할 수 있도록 하였다. 이를 위한 기준 상태추정기로는 위치측정값만을 사용한 고정지연시간을 갖는 스무더를 구현하였는데, 필터는 운동모델의 불확실성이 크면 추정정확성이 결여되어 사용이 곤란한 반면 스무더는 추정하는 시점이 과거가 되므로 그 시점을 기준으로 이전의 측정값(과거정보)과 이후의 측정값(미래정보)을 사용할 수가 있어 모델의 불확실성의 영향을 제거할 수 있는 능력을 갖게 된다<sup>(11)(12)</sup>. 따라서 필터와 비교하여 스무더는 추정성능을 상당히 개선할 수 있으나 추정시점은 과거가 된다. 만일 센서가 제공한 속도측정값에 바이어스가 존재하고 천천히 변화할 경우에는 스무더의 추정값과 필터의 추정값을 비교하여 계산한 바이어스를 이

용하여 현재 필터의 상태값에 보정 함으로써, 필터의 바이어스를 제거할 수가 있다. 만일 바이어스가 시간에 대해 변화하게 되면 보상하는 바이어스 크기를 적절히 가중하여 보상함으로써 필터의 추정 성능을 효과적으로 개선할 수가 있다.

(4) 최적 구현 방안

(i) 스무더 지연시간 선정

스무더에서 사용하는 지연시간은 필터의 안정화 시간의 2내지 3배 이상 잡으면 충분한 것으로 알려져 있으며<sup>(11)</sup>, 본 연구에서는 위치 및 속도 측정값을 동시에 갖는 추적필터의 구간을 N이라 할 때 2배(2N)으로 선정하였다.

(ii) 스무더 구조

본 연구에서는 유한구간 모델에 적용될 수 있도록 위치 측정값만을 사용한 FIR 방식의 스무더를 구현하였는데 (i - 2N) 시점에 대한 스무더를 구현하기 위하여 (i-2N)을 기준으로 대칭인 표적자료 구간을 선정하였다. 즉 (i-4N, i) 구간의 표적자료를 이용한 유한구간 모델의 스무더를 구현하였다.

(iii) 구현방안

(i - 4N, i)구간의 자료를 활용한 (i-2N) 시점의 추정문제는 (i-4N, i-2N)구간의 자료를 활용한 (i-2N)시점을 추정하는 순방향 필터링(Forward filtering)과 (i-2N, i)구간의 자료를 이용하여 (i-2N) 시점을 추정하는 역방향 필터링(Backward filtering)을 결합하면 풀 수가 있다. 즉 (i-4N, i-2N)자료를 사용한 (i-2N) 시점의 추정값을  $X_f(i-2N)$ , 공분산을  $P_f(i-2N)$ 이라하고 (i-2N, i) 자료를 사용하여 (i-2N) 시점에 대한 Backward 필터의 추정값을  $X_b(i-2N)$ , 공분산을  $P_b(i-2N)$ 라 하면, 최적 smoothing estimate  $X^*(i-2N)$ 는 다음과 같

은 정보 결합식으로부터 계산될 수가 있다<sup>(8)-(9)</sup>.

$$X^*(i-2N) = P(i-2N) \times [P_f^{-1}(i-2N) \cdot X_f(i-2N) + P_b^{-1}(i-2N)] \cdot X_b(i-2N) \quad (23)$$

$$P^{-1}(i-2N) = P_f^{-1}(i-2N) + P_b^{-1}(i-2N) \quad (24)$$

(i-4N, i-2N) 구간 자료를 이용한 (i-2N) 시점에 대한 순방향 추정은 식 (16)-(22)식을 사용하여 구할 수가 있으며, (i-2N, i)구간 자료를 이용한 (i-2N) 시점에 대한 역방향 추정은 역방향 FIR 스무더를 사용하여 계산할 수가 있으며, 다음 식으로부터 구할 수가 있다<sup>(7)</sup>. 여기서 n은 0부터 NN-1까지대입하여 순환적으로  $\Omega(NN)$ ,  $S(NN)^{-1}$ ,  $V(i;NN)$ ,을 구한 후 식 (28)에 대입하면  $G(i;NN)$ 을 구할 수가 있으며, i가 0부터 NN 까지 각각 구하면 식(27)로부터 모든 필터 계수  $G(i)$ 를 구할 수가 있다.

$$\hat{x}_b(k-2N) = \sum_{i=0}^{2N} G(i) \cdot y(k-i) \quad (25)$$

$$NN = 2N \quad (26)$$

$$G(i) = G(i;NN) \quad (27)$$

$$G(i;NN) = \Omega(NN)S^{-1}(NN)V(i;NN), \quad 0 \leq i \leq NN, \quad p \leq NN < \infty \quad (28)$$

$$V(i;n+1) = \{I + C^T R^{-1} [C S(n+1) - C^T R^{-1} C]^{-1} \times A^T V(i;n) - C^T R^{-1} C\} \quad (29)$$

$$V(i;N-i) = C^T R^{-1} \quad (30)$$

$$\Omega(n+1) = \Omega(n)[I - \bar{S}(n)S(n)]A^{-1}, \quad 0 \leq n \leq NN-1 \quad (31)$$

$$\Omega(0) = I \quad (32)$$

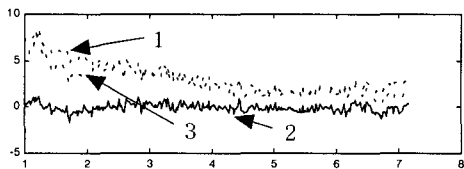
$S(n), \bar{S}(n)$  은 식(20) ~ (22)와 동일

2.4 시뮬레이션 결과

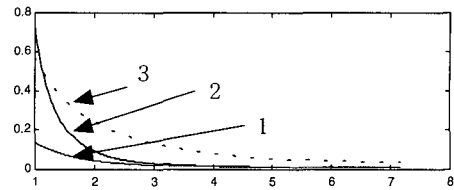
2.4.1 지상표적에 대한 시뮬레이션

지상 표적의 운동조건은 초기위치에 대해(X,Y,Z) = (2000,1500,10) [M], 속도에 대해 (VX,VY,VZ) = (-30,-5,1) [M/S]을 가정하였고 가속도는 없다고 가정하였다. 측정 센서는 거리, 방위각, 고각 성분에 대한 위치 및 속도에 대해 측정이 이루어지는 것으로 가정하였고, 센서의 측정 위치 값은 바이어스 오차는 없으나 속도 측정값은 방위각으로만 2 [mil/s]의 바이어스 오차를 갖는다고 가정하였으며 분산은 센서의 능력을 고려 적절히 선정하였다. 표적상태 추정기로는 등속 운동 및 등가속 모델의 칼만필터를 사용하였는데 이를 이용하여 탄자의 비행시간후의 표적에 대한 예측오차를 나타내면 그림2와 같으며 상태추정기의 공분산크기를 나타내면 그림3과 같다. 그림2에서 보는 바와 같이 위치와 속도 측정값을 동시에 사용한 추정기는 운동모델에 관계없이 추정 바이어스 오차가 발생하며, 이로 인해 예측된 조준 위치에 대한 바이어스 오차가 발생함을 알 수가 있다. 한편 그림3에서 보는 바와 같이 추정기의 안정시간은 위치만을 사용 시는 위치와 속도를 동시에 사용할 경우 보다 길어짐을 알 수가 있는데 등속운동 모델을 사용한 경우에는 1 초 정도 차이가 나서 그 영향이 그다지 크지 않음을 알 수가 있다. 반면에 표적이 등속 운동하는 경우에 등가속 운동 모델을 적용하면 등속 운동 모델보다 안정시간이 오래 걸리고 성능이 떨어지므로 불리함을 알 수가 있다.

그림2, 그림 3 설명:  
1:위치+속도(등속),  
2:위치 (등속), 3:위치+속도(등가속)



(그림 2) 상태추정기별 조준오차(방위각)



(그림 3) 상태추정기별 공분산(속도)

#### 2.4.2 대공표적에 대한 시뮬레이션

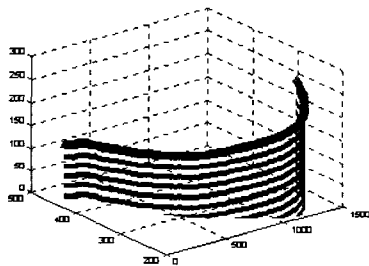
대공 표적에 대한 시뮬레이션은 소형 무선 비행기에 이용하여 측정된 3차원 항적 자료를 이용하여 수행하였으며. 여러 상태추정기에 대한 성능의 비교는 탄의 비행시간 후의 예측위치와 예측 시점에서 실측된 항적 위치와의 비교를 통해 오차를 계산하여 판단하였다. 그림4는 표적의 항적을 나타내었으며, 그림5는 각 시점에서 포가 사격 할 경우 탄자비행시간 (time of flight)을 표시하였고, 그림6 및 그림7은 탄자비행시간 후의 표적 위치를 3차원 직각 좌표계에서 예측하여 각좌표계인 방위각 및 고각에대한 조준 위치로 변환하였을 때 예측오차를 나타낸 것이다. 그림6에서 보는바와 같이 초기 표적의 기동에 대해 속도모델을 사용한 칼만필터(4번 그래프)는 따라가지 못하여 매우 큰 조준오차를 유발하며, 근거리에서는 추정기의 속도 측정값의 바이어스영향으로 바이어스된 조준오차가 생김을 알 수가 있다. 한편 위치 및 속도 측정값을 동시에 사용한 가속도 모델을 사용한 FIR 필터(그림6, 그림7에서 2번 그래프)는 등속(4번 그래프) 및 등가속 모델의 칼만필터(5번 그래프)와 비교하여 성능이 전반적으로 양호함을 알 수가 있으며, 속도 측정 바이어스의 영향을 칼만필터보다 적게 받는 것으로 나타났지만 측정 속도 값이 바이어스 되는 경우 이 필터 역시 추정값에 바이어스가 생겨 조준 바이어스 오차가 커지는 것을 알 수가 있다.

이 경우 위치 측정값만을 사용한 최적 스무더의 추정값(1번 그래프)을 이용하여 추정바이어스를 보

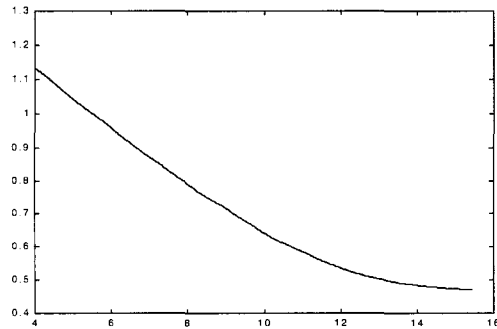
정하면(3번 그래프) 그림에서 보는 바와 같이 양호한 추정값을 얻을 수가 있어 조준오차를 크게 개선할 수 있음을 알 수가 있다. 한편 위에서 고정지연시간 스무더에서 계산한 FIR필터의 추정바이어스 오차는 스무더의 지연시간 만큼의 과거에 대한 오차로서 이 값을 이용하여 현재 계산된 FIR필터의 추정값을 보정 시는 바이어스의 시간 변화율을 고려하여 적당히 가중하여야 하는 데 본 논문의 경우에는 0.5 크기만큼 보정하였다. 일반적으로 가중되는 값은 측정센서의 바이어스의 시간 변화율을 고려하여 0과 1사이의 값으로 선정하면 최적으로 보상할 수가 있다. 한편, 속도 측정 센서의 바이어스가 시간에 대해 천천히 변화하지 않고 급격히 줄 경우에는 스무더의 지연

시간 동안 과거의 추정바이어스 오차를 이용하여 현재의 추정 값을 보상하게되므로 현재의 추정치에 나쁜 영향을 미치게되는 경우가 발생할 수가 있으며, 그림6의 마지막 부근에서 이를 볼 수가 있다.

본 논문의 효과를 정리하면, 소형 비행 표적과 같이 수시로 기동이 발생하는 경우에 주 상태추정기로서 위치 및 속도 측정값을 사용한 FIR필터를 사용함으로써 모델의 변화에 최단시간으로 적응하여 추정 성능이 최적이 되도록 하였으며, 측정센서의 속도 측정값이 바이어스 될 경우에는 위치 측정값만을 사용한 고정지연시간 스무더를 병행하여 속도 바이어스를 계산하여 보정함으로써 이 경우에도 추정 성능이 최적으로 유지가 될 수 있게 할 수 있다.

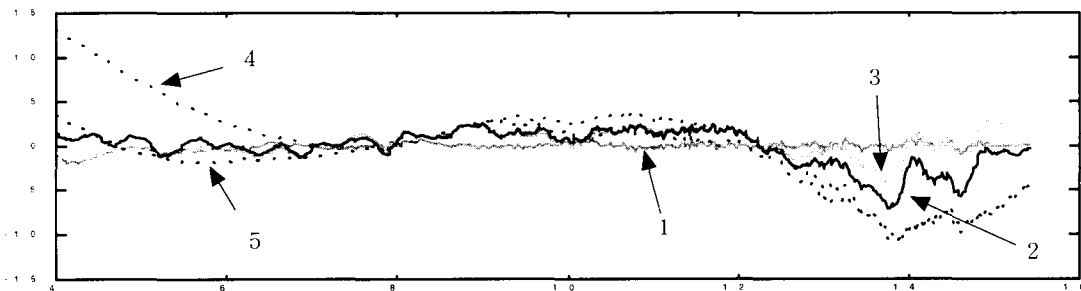


(그림 4) 표적항적



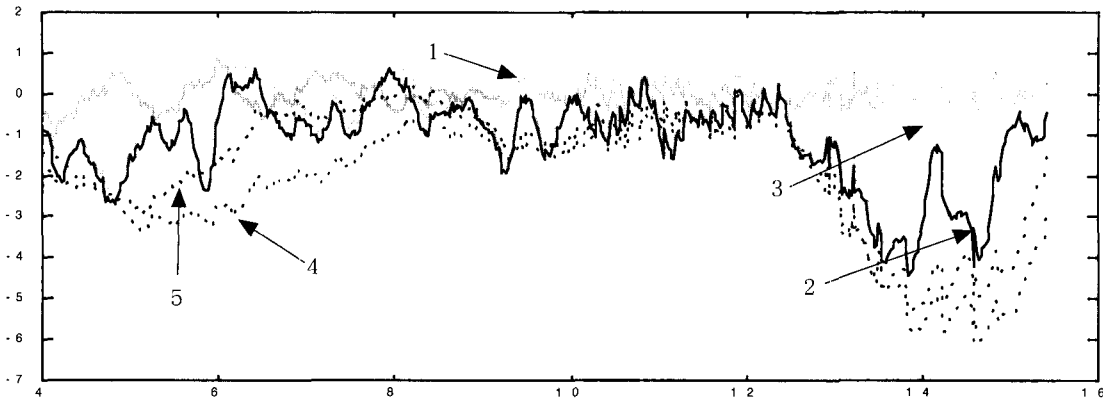
(그림 5) 탄자비행시간

그림6, 그림7 설명:  
 1: optimal smoother(FIR FW + BW)      4: 칼만필터(위치+속도, 등속모델)  
 2: FIR TSE (위치+속도, 등가속모델)      5: 칼만필터(위치+속도, 등가속모델)  
 3: 보상된 FIR TSE( " , " )



(그림 6) 방위각 조준오차





(그림 7) 고각 조준오차

### 3. 결 론

본 연구를 통하여 위치 및 속도 계통을 기본으로 하는 디지털 사격통제장치에 적용될 수 있는 표적상태추정기에서 추적 센서의 측정값이 바이어스될 경우 추정기의 바이어스를 보상할 수 있는 방안에 대해 제시를 하였다. 추적기는 영상추적기 또는 자동영상추적기를 사용하여 표적의 위치에 대한 측정값을 정확히 측정할 수 있다. 하지만 추적기는 속도 측정 센서인 자이로의 편류나 동적 특성의 영향으로 속도 바이어스가 존재 할 수가 있으므로, 이와 같은 경우 위치측정값을 이용하여 표적의 상태추정을 함으로써 추정값이 바이어스 오차를 가지는 것을 방지하도록 하였으며, 지상 및 대공 표적에 대하여 적용될 수 있는 기법을 각각 제시하였다. 모델을 비교적 정확히 알 수가 있고 변화가 거의 없는 지상표적인 경우에는 상태추정기로서 위치만을 사용한 칼만필터를 사용하여 해결할 수가 있으며, 모델의 변화가 심한 대공표적인 경우에는 고정지연시간을 갖는 유한구간의 최적 스무더를 사용하여 추정 바이어스 크기를 계산하고 이를 상태추정기에 보정함으로써 추정성능을 개선할 수가 있으며 이를 시뮬레이션을 통하여 보였다.

### 참 고 문 헌

1. 김재훈, 비호초도품 체계 연동 성능 개선, GEDC-519-000217, 국방과학연구소, 2000.2
2. Y.Bar-Shalom and K-Birmiwal, Variable Dimension Filter for maneuvering target tracking, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems AES-18, No. 5, September 1982, 621-628
3. Chan Y.T., J.B.Plant, J.R.T. Bottomley, A Kalman Filter with a Simple Input Estimator, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, March 1982, 232-240
4. Moose R.L., Vanlandingham, H.F., and McCabe, D.M., Modeling and estimation for tracking maneuvering targets, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, May 1979, AES-15, 448-455
5. Bar-Shalom, Y., Chang, K.C. and Blom, H.A.P, Tracking a maneuvering target using input estimation versus interactive multiple model algorithm, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems, Mar. 1989, 296-300
6. 김영일 선임논문, 칼만모델을 이용한 FIR 필터 설

- 계 기법 및 추적필터에의 응용, 국방과학연구소, 1986
7. O.K. Kwon, W.H. Kwon, and K.S. Lee, FIR Filters and Recursive Forms for Discrete time State-Space Models, Automatica Vol25,715-728, 1989
  8. F.J Biermann, Factorization Methods for Discrete Sequential Estimation, Academic Press,1977
  9. F. L. Lewis, Optimal Estimation, John Wiley & Sons, 1986
  10. Rolf Johansson, System Modeling and Identification, Prentice-Hall,1993
  11. B. D.O. Anderson, J. B.Moore, Optimal filtering, Prentice Hall, 1979
  12. A.E.Bryson, Jr Y.C. Ho, Applied Optimal Control, John Wiley & Sons, 1975, 391-407