

논문 2012-49-9-39

비동기 이종 센서를 이용한 데이터 융합기반 근거리 표적 추적기법

(Short Range Target Tracking Based on Data Fusion Method Using
Asynchronous Dissimilar Sensors)

이 의 혁*

(Eui-Hyuk Lee)

요 약

본 논문은 근거리에서 접근하는 표적에 대한 레이더와 열영상의 관측데이터를 기반으로 정보융합을 수행하여 표적을 추적하는 알고리즘을 기술하고 있다. 일반적으로 칼만필터를 이용한 추적 융합 방법은 동기화된 레이더 및 열영상의 데이터를 기반으로 하고 있으며, 비동기적으로 동작하는 실제 시스템에 적용하기에는 많은 제한사항을 가지고 있다. 제안된 알고리즘에서의 중점사항은 동기화되어 있지 않은 서로 다른 두 센서인 레이더와 열영상의 관측데이터가 입력되었을 때 레이더의 거리정보와 추적상태벡터를 이용하여 관측값의 시간차이를 보상하여 관측치 융합 후 추적을 수행하는 것이다. 제안된 알고리즘의 성능평가를 위해 기존의 궤적기반 정보융합방법 및 측정치 융합기법과 성능을 비교하여 제시한다.

Abstract

This paper presents an target tracking algorithm for fusion of radar and infrared(IR) sensor measurement data. Generally, fusion methods with Kalman filter assume that processing data obtained by radar and IR sensor are synchronized. It has much limitation to apply the fusion methods to real systems. A key point which is taken into account in the proposed algorithm is the fact that two asynchronous dissimilar data are fused by compensating the time difference of the measurements using radar's ranges and track state vectors. The proposed fusion algorithm in the paper is evaluated via a computer simulation with the existing track fusion and measurement fusion methods.

Keywords : measurement fusion, track fusion, target tracking, radar and IR, Kalman filter

I. 서 론

다중센서를 이용하여 이동하는 물체를 추적하는 방법에 대해서는 다양한 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 특히 군사 분야에서는 레이더, 적외선 센서, 소나, 근접 센서 등의 관측데이터를 기반으로 접근하는 표적의 궤적정보를 추적하기 위한 기법들이 제시되었다.^[1~3] 기존에는 단일 센서에 대한 정보를 이용하여 궤

적정보를 추출하는 연구가 진행되어 왔으나, 최근에는 다중센서를 기반으로 기존의 추적기법들은 확장하여 적용하기 위한 논문들이 제시되고 있다.

다중센서의 융합기법에는 측정치 기반 융합과 궤적기반 융합방법인 Track-to-Track Fusion이 있다. 기존에 활발히 연구된 분야는 주로 궤적기반 융합 방법^[4~8]에 대한 것이었다. 궤적 융합기법의 경우에 공통적인 가정은 측정 센서들이 시간적으로 동기화되어 있고, 센서들도 동일 좌표계로 구성되어 있다는 것이었다. 센서들의 측정치가 시간동기화 되어있으므로 다중센서들 각각에 대해 센서별로 추적필터를 수행하고, 상태벡터

* 정회원, 국방과학연구소

(Agency for Defense Development (ADD))

접수일자: 2012년2월6일, 수정완료일: 2012년8월29일

추정치에 대해서 Track Fusion을 수행하여 중앙집중형 및 지역 분산형 구조에 대해서 필터성능을 제시하였다. 비동기 센서들을 이용한 최적 궤적융합기법^[9]에서는 센서들의 샘플시점, 도착시간 및 내부 지연시간을 고려하였으나, 로컬 센서들의 추적궤적들에 대해 Fusion 센터에서 Global 추정궤적을 생성하도록 하였으나 로컬 센서들의 샘플링 시점들이 Fusion 센터의 샘플링 시점 사이에 존재한다는 조건으로 궤적융합이 수행되므로 실시간으로 정보를 처리하는 상황에서는 제한점이 존재한다.

추정치 융합기법^[11~12, 16]은 센서들간의 측정치 정보를 각 센서의 분산도에 따라 가중치 합을 통해 융합하는 방법으로 칼만필터의 입력값을 융합하는 것이다. 따라서 센서들 간에 측정치가 동기화되어있지 않으면 개개의 센서들의 측정치들 간의 융합이 어렵다. 동기화되어있다는 가정하에 측정치 융합기법을 제시하였으나, 실제 시스템에서는 센서들이 동기화되어있지 않으므로 적용하기가 어려운 방법이었다. 최근에 비동기 측정치 기반 융합기법^[14~15]들이 제시되었는데, 서로 다른 두 센서에 대해서 적용하였다. 선형 최소자승법을 이용하여 한 센서의 측정정보의 변화량을 예측하여 다른 센서의 측정시점에서의 값을 예측하여 측정치 예측값과 측정치를 융합하는 방법을 적용하였다. 주로 영상센서의 각도 예측시 선형 최소자승법을 사용하므로 각도의 변화의 비선형성으로인해 근거리 표적추적시 오차가 누적되는 현상이 있다.

본 논문에서 제시하는 비동기 측정치 기반 융합 추적기법은 비동기화 되어있는 서로 다른 두 센서, 레이더와 열영상센서의 측정치에 대해서 칼만필터를 이용하여 열영상센서의 측정치를 예측하여 레이더 측정 시점에서의 값을 추출 후에 레이더 실제 측정치와 열영상센서의 측정치 예측값을 융합하는 방법을 제안하였다. 근거리에서 접근하는 표적에 대해서 매 레이더의 측정시점을 기준으로 정보융합결과를 출력하도록 하였으며 열영상의 측정치 예측은 열영상센서의 측정정보가 들어올때마다 수행하였다. 두 센서인 레이더와 열영상센서가 동일 좌표공간에 있다고 가정하였고 열영상센서의 측정값 예측시에 레이더의 거리정보를 사용하여 직교좌표공간에서 측정치를 예측하므로 비선형적인 오차가 발생하지 않도록 하였다.

제안한 방법의 성능비교를 위해 다음과 같은 세 가지

기법을 기술하였다. 첫 번째 기존의 제안된 동기화 Track Fusion^[7, 13]기법을 비동기화된 조건에서 레이더와 열영상센서의 정보를 처리할 수 있도록 본 논문에서 제시하는 시간동기화를 적용하였으며 이 방법을 Asynchronous Track Fusion (ATF)로 명명하였다. 둘째 기존에 제시된 비동기 측정치기반 융합기법^[14~15]을 기술하였으며, 이 방법은 Asynchronous Measurement Fusion with Least-square (AMFL)로 명명하였다. 셋째, 본 논문에서 제시하는 방법으로 Asynchronous Measurement Fusion with Kalman filter (AMFK)를 기술하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. Section II에서는 추적필터 모델을 기술하고, Section III에서는 시간동기화, Section IV에서는 ATF, Section V에서는 AMFL, Section VI에서는 제안된 AMFK, Section VII에서는 시뮬레이션 결과, 그리고 Section VIII에서 결론을 기술한다.

II. 수학적 모델

표적의 동적모델 및 측정치 모델은 다음과 같이 기술할 수 있다. 레이더를 'R'로 명명하고, 열영상센서는 'IR'로 명명하며, 비동기화 되어있으므로 시간에 대한 변수도 분리하여 다음과 같이 기술한다.

$$x^i(t_{j+1}) = F^i x^i(t_j) + \Gamma^i w(t_j) \quad (1)$$

$$z^i(t_j) = H^i x^i(t_j) + \nu^i(t_j), \quad j = k (i = 'R') \text{ or } l (i = 'IR')$$

상태벡터 $x^i(t_j) = [x, \dot{x}, y, \dot{y}, z, \dot{z}]^T$ 이며, $w(t_j)$ 는 백색 가우시안 노이즈로서 시스템 노이즈에 해당한다.

$\nu^i(t_j)$ 는 측정치 노이즈이다.

측정치 벡터 $z^i(t_j) = [x_m^i(t_j), y_m^i(t_j), z_m^i(t_j)]$ 이며, 레이더의 측정치는 거리, 방위각, 고각 $[r_m^R(t_k), \theta_m^R(t_k), \phi_m^R(t_k)]$ 이며, 열영상 센서의 측정치는 방위각, 고각 $[\theta_m^{IR}(t_l), \phi_m^{IR}(t_l)]$ 이고, 이 측정치를 직각좌표계로 변환하여 측정치 벡터로 사용하도록 하였다.

여기에서 기술한 모델은 이중의 비동기 두 센서에 대한 모델이며 필터별로 모델을 선별해서 사용하도록 한다.

공통적인 상태천이행렬과 시스템노이즈 행렬은 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$F^i = \begin{bmatrix} 1 & T^i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T^i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T^i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T^i \text{는 각 센서의 샘플시간}$$

(2)

$$Q^i = \begin{bmatrix} \frac{(T^i)^3}{3} & \frac{(T^i)^2}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{(T^i)^2}{2} & T^i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(T^i)^3}{3} & \frac{(T^i)^2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(T^i)^2}{2} & T^i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(T^i)^3}{3} & \frac{(T^i)^2}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(T^i)^2}{2} & T^i \end{bmatrix} \sigma_w^2$$

(3)

위에서 프로세스 노이즈는 $\sigma_w^2 = E[w(k)w'(\tau)]$

열영상 센서의 경우에는 직각좌표계로 변환하기 위해 표적의 거리정보가 필요하다. 이를 위해서 그림 1과 같이 매 레이더의 샘플시간 t_k 마다 레이더 거리정보를 좌표변환하여 영상센서 기준의 표적 거리 Set, $[\dots, r_m^R(t_{k-1}), r_m^R(t_k)]$ 를 저장하고, 시간동기화를 통해 레이더 기준 시간에서의 영상센서 측정치의 시점을 산출한 후 거리정보를 내삽하여 영상센서 기준의 표적 거리

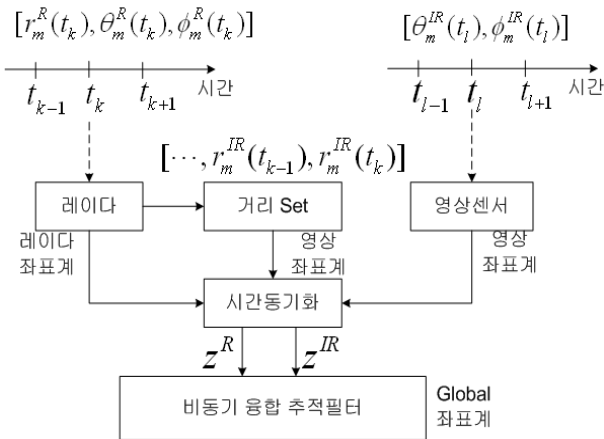


그림 1. 비동기 융합 추적필터 구성도
Fig. 1. Asynchronous data fusion track filter structure.

를 복원한 후 직교좌표계상의 측정치로 변환되도록 하였다.

III. 시간 동기화

일반적으로 이중의 다른 센서를 운영함에 있어서 센서들의 샘플링 시간은 동기화되어 있지 않다. 따라서, 센서들간의 시간동기화 과정은 필수과정이 아닐 수 없다. 여기에서는 레이더가 열영상센서보다 샘플링 시간이 좀 더 빠르다고 가정을 한다. 통상 열영상센서의 경우 디스플레이 장치와 연동이 되므로, 샘플링 시간이 60Hz 수준으로 고정되는 경우가 많다. 본 논문에서는 120Hz 수준으로 설정하였으며, 레이더의 경우는 응용분야에 따라서 신호처리 속도기준으로 샘플링 시간이 좀 더 가변적일 수 있으며, 250Hz 수준으로 샘플링 시간을 설정하였다. 레이더의 샘플링 시간은 T1, 열영상센서의 샘플링 시간은 T2로 나타내었다. 시간동기화 과정은 2가지 기능을 수행하도록 하였다. 첫 번째는 시간정렬과정이며, 두 번째는 거리정보 복원이다. 시간정렬을 위해서는 각 센서의 내부 지연요소에 대한 정보가 필요하며, 실제 시스템에서는 측정이 필요한 부분이기도 한데, 이러한 정보는 사전에 알려져 있다고 가정하며, 시간정렬 수식은 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$t_{IR} = t_l - t_L^{IR} + t_L^R = t_{k-1} + \Delta_k - t_L^{IR} + t_L^R \quad (4)$$

위 식에서 t_L^{IR} 은 열영상센서의 고유 내부 지연시간, t_L^R 은 레이더의 고유 내부 지연시간, Δ_k 은 열영상센서와 레이더간의 실시간적으로 발생하는 측정시간상의 차이이며, t_{IR} 은 열영상센서의 측정시간이 시간 정렬되었을

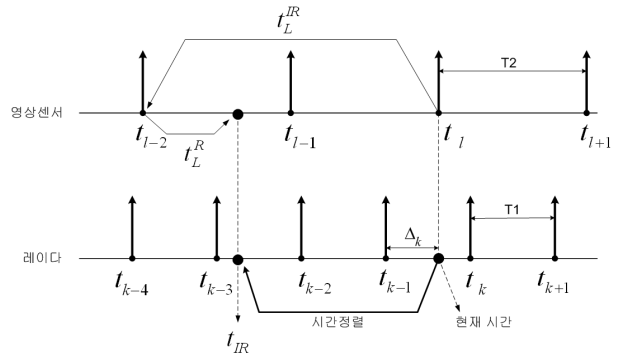


그림 2. 영상센서 및 레이더 시간동기화
Fig. 2. Time alignment of image sensor and radar.

때의 레이더 기준 시간 축에서의 시간을 의미한다.

위의 그림 2와 같이 t_l 의 시점에서 열영상센서의 측정치가 획득이 되었을 때, 레이더 기준 시점에서는 $t_{k-1} + \Delta_k$ 에 해당하였고, 이 시점에서 열영상센서의 고유 내부 지연시간만큼을 제하고, 레이더 자체의 고유 시간만큼을 더하면, 레이더 기준 시간축에서의 열영상센서가 표적을 획득한 시간으로 시간정렬이 이루어지게 된다. 일반적으로 열영상센서의 경우 내부 영상신호 획득 및 내부 신호처리로 인해서 고유지연시간이 두 프레임 즉, 두 샘플시간 정도가 된다.

시간동기화 과정에는 열영상센서 기준 표적 거리정보를 복원하는 기능을 포함하여 기술하고자 한다.

전 Section에서 설명했던 것과 같이 레이더의 t_k 시간마다 획득된 거리를 열영상센서 기준으로 변환된 표적 거리 Set, R_m 을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_m = \{\dots, r_m^{IR}(t_{k-3}), r_m^{IR}(t_{k-2}), r_m^{IR}(t_{k-1})\} \quad (5)$$

따라서, t_l 에서 획득된 열영상센서 측정치의 거리정보는 시간동기화를 거쳐서 t_{IR} 에 해당하므로, 이 시점에서의 거리는 다음과 같은 1차 내삽식을 이용하여 복원해 낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r_m^{IR}(t_{IR}) &= r_m^{IR}(t_{k-3}) + \frac{r_m^{IR}(t_{k-2}) - r_m^{IR}(t_{k-3})}{T1} (t_{IR} - t_{k-3}) \\ &= r_m^{IR}(t_{k-3}) (1 - \alpha) + r_m^{IR}(t_{k-2}) \alpha, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \end{aligned} \quad (6)$$

위의 식에서 $\alpha = \frac{t_{IR} - t_{k-3}}{T1}$ 이다.

이러한 과정을 통해 열영상센서의 측정치인 방위각, 고각 정보, $[\theta_m^{IR}(t_l), \phi_m^{IR}(t_l)]$ 와 시간동기화 및 거리복원으로 얻어진 거리 정보, $r_m^{IR}(t_{IR})$ 은 좌표변환을 거쳐 직각 좌표계 내에서 열영상센서 기준에서는 t_l 시점이며, 시간동기화가 되었을 때 레이더 기준으로는 t_{IR} 시점에서의 측정치인 $z^{IR}(t_l) = [x_m^{IR}(t_l), y_m^{IR}(t_l), z_m^{IR}(t_l)]$ 으로 변환된다.

IV. Asynchronous Track Fusion Filter(ATF)

기존에 제시된 Track-to-Track 융합방법에는 여러 가지 있으나, 본 논문에서 비교를 위해 사용한 Track Fusion 필터^[7]는 다음과 같이 구성하였다.

상태방정식과 측정방정식의 형태는 Section II와 같

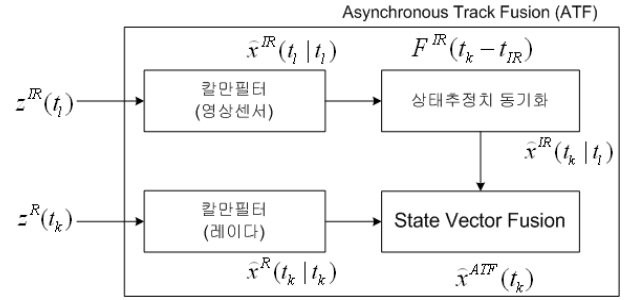


그림 3. 비동기 궤적 융합필터

Fig. 3. Asynchronous track fusion filter.

으며, 측정치 행렬은 다음과 같다.

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

레이더의 측정치는 $z^R(t_k) = [x_m^R(t_k), y_m^R(t_k), z_m^R(t_k)]$ 이며, Section III에서 시간동기화를 통해서 변환된 열영상센서의 측정치 $z^{IR}(t_l) = [x_m^{IR}(t_l), y_m^{IR}(t_l), z_m^{IR}(t_l)]$ 을 사용한다. 측정치 공분산도 변환된 성분에 맞추어 변환식을 사용한다.

$$\text{Track } i = \text{'R'} : \hat{x}^R(t_k|t_k), \hat{P}^R(t_k|t_k) \quad (8)$$

$$\text{Track } i = \text{'IR'} : \hat{x}^{IR}(t_l|t_l), \hat{P}^{IR}(t_l|t_l) \quad (9)$$

레이더와 열영상센서는 비동기화 되어있으므로, $\hat{x}^{IR}(t_l|t_l)$ 을 레이더의 t_k 시점까지 동기화 예측과정이 필요하다.

$$\hat{x}^{IR}(t_k|t_k) = F^{IR}(t_k - t_{IR}) \hat{x}^{IR}(t_l|t_l) \quad (10)$$

$$F^{IR}(t_k - t_{IR}) = \begin{bmatrix} 1 & t_k - t_{IR} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & t_k - t_{IR} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & t_k - t_{IR} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

궤적의 융합 상태벡터 추정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{x}^{ATF}(t_k) &= \hat{x}^R(t_k|t_k) + \\ &\hat{P}^R(t_k|t_k) \hat{P}^S(t_k)^{-1} [\hat{x}^{IR}(t_k|t_k) - \hat{x}^R(t_k|t_k)] \end{aligned} \quad (12)$$

융합된 공분산행렬은 다음과 같다.

$$\hat{P}^C(t_k) = \hat{P}^R(t_k|t_k) - \hat{P}^R(t_k|t_k) \hat{P}^S(t_k)^{-1} \hat{P}^R(t_k|t_k) \quad (13)$$

$$\hat{P}^S(t_k) = \hat{P}_R(t_k|t_k) + \hat{P}_{IR}(t_k|t_l) \quad (14)$$

열영상센서의 공분산의 경우에도 레이더의 t_k 시점까지 동기화하는 예측하는 과정이 필요하다.

$$\hat{P}^{IR}(t_k|t_l) = F^{IR}(t_k - t_{IR}) \hat{P}^{IR}(t_l|t_l) + Q^{IR} \quad (15)$$

그림 3과 같이 기존의 Track-to-Track 융합방법에서 상태벡터와 공분산을 융합시에 열영상센서의 비동기 시점을 레이더 시점으로 상태천이벡터를 이용하여 일치시킨 후 궤적간의 융합을 하도록 하였다.

V. Asynchronous Measurement Fusion with Least square (AMFL)

기존에 제시되어 있는 비동기 측정치기반 정보융합 필터^[14~15]에서는 레이더의 한 샘플시간 간격내에 n개의 열영상센서의 측정치가 존재하는 상황을 가정하여 수식을 유도하였다. 그러나, 실제 시스템에 적용시에는 열영상센서의 내부 지연요소 및 디스플레이 장치의 갱신률로 제한되어 레이더의 샘플시간이 열영상센서의 샘플시간보다 짧은 경우가 더 많다. 따라서, 열영상센서의 각도정보를 시간예측하여 레이더의 t_k 시점에서의 측정치를 산출하기 위해서 레이더의 샘플간격사이의 열영상센서의 데이터를 포함하여 과거의 n개의 열영상센서의 각도정보를 이용하도록 하였다.

열영상센서의 n개의 데이터 set은 다음과 같다.

$$\text{방위각} : \{ \theta_m^{IR}(t_{l-n+1}), \dots, \theta_m^{IR}(t_l) \} \quad (16)$$

$$\text{고각} : \{ \phi_m^{IR}(t_{l-n+1}), \dots, \phi_m^{IR}(t_l) \} \quad (17)$$

일반적인 Least square를 통해 얻어진 1차 변화율과 상수를 각각 $(\dot{\theta}_m, \theta_m)$ 이라하면 방위각과 고각에 대한 예측식은 다음과 같다

$$\hat{\theta}_m^{IR}(t) = \theta_m + \dot{\theta}_m t, \quad t = [t_{l-n+1}, \dots, t_l] \quad (18)$$

$$\hat{\phi}_m^{IR}(t) = \phi_m + \dot{\phi}_m t, \quad t = [t_{l-n+1}, \dots, t_l] \quad (19)$$

이 n개의 데이터로부터 레이더의 t_k 시점에서의 방위각과 고각 예측치는 아래와 같다.

$$\hat{\theta}_m^{IR}(t_k) = \theta_m + \dot{\theta}_m (t_k - t_{IR} + t_l) \quad (20)$$

$$\hat{\phi}_m^{IR}(t_k) = \phi_m + \dot{\phi}_m (t_k - t_{IR} + t_l) \quad (21)$$

이와 같이 얻어진 예측치 방위각과 고각은 레이더에서 획득된 방위각 $\theta_m^R(t_k)$ 과 고각 $\phi_m^R(t_k)$ 함께 다음과 같이 측정치 융합을 수행한다.

$$\hat{\theta}_m^f(t_k) = \frac{R^{IR}(\theta)\theta_m^R(t_k) + R^R(\theta)\hat{\theta}_m^{IR}(t_k)}{R^R(\theta) + R^{IR}(\theta)} \quad (22)$$

$$\hat{\phi}_m^f(t_k) = \frac{R^{IR}(\phi)\phi_m^R(t_k) + R^R(\phi)\hat{\phi}_m^{IR}(t_k)}{R^R(\phi) + R^{IR}(\phi)} \quad (23)$$

위의 식에서 $R^R(\theta)$, $R^R(\phi)$, $R^{IR}(\theta)$, $R^{IR}(\phi)$ 은 각각 레이더와 열영상센서의 고각, 방위각 측정치의 분산도를 나타낸다.

이렇게 각도의 측정치 융합을 수행한 후 레이더의 거리정보인 $r_m^R(t_k)$ 와 방위각 $\hat{\theta}_m^f(t_k)$ 및 고각 $\hat{\phi}_m^f(t_k)$ 은 직교좌표로의 변환을 통해서 $z^f(t_k)$ 로 변환되어 칼만필터에 입력으로 들어간다.

상태천이행렬과 측정치 행렬은 다음과 같다

$$F^R = \begin{bmatrix} 1 & T^R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T^R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T^R \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T^R: \text{레이더의 샘플시간} \quad (24)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

측정치를 융합하는 기법에서 동작하는 칼만필터는 단일모델로 되며, 레이더 모델을 근간으로하여 열영상

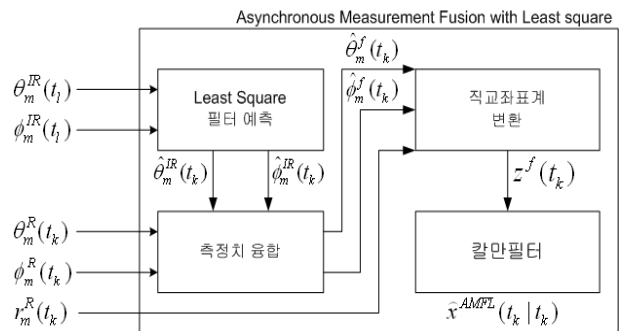


그림 4. Least square기반 비동기 측정치 융합 필터
Fig. 4. Asynchronous measurement fusion filter with Least square.

센서의 측정치에 LS필터로 시간예측을 하여 레이더의 측정치와 동기화한 후에 측정치융합하고 필터를 수행하도록 한 것이다.

VI. Asynchronous Measurement Fusion with Kalman Filter (AMFK)

기존의 측정치 융합기법에서는 열영상센서의 각도 공간에서 Least square필터를 근간으로 예측을 수행하여 레이더 센서와의 시간동기를 맞추도록 하였다. 그러나, 각도 공간에서 선형적으로 각도를 예측하므로 표적이 근거리로 접근할수록 각도의 비선형성으로 인하여 예측오차가 발생하게 되며 추적성능의 저하를 초래하게 된다. 따라서 본 논문에서는 레이더와 열영상센서의 측정치를 시간동기화한 후에 직교좌표계로 변환한 후 직교좌표 공간에서 칼만필터의 속도벡터를 피드백하여 열영상센서의 측정치 예측을 한다. 이후에 레이더와 열영상센서를 측정치융합을 수행한 후 칼만필터의 입력으로 사용함으로써 표적이 근거리 접근 시에도 추적성능이 유지될 수 있도록 하였다.

상대천이행렬과 측정치 행렬은 Section V와 같다.

먼저 시간동기화를 통해 얻어진 열영상센서의 측정치 거리, 고각, 방위각 $[r_m^{IR}(t_{IR}), \theta_m^{IR}(t_{IR}), \phi_m^{IR}(t_{IR})]$ 을 좌표변환을 통해서 변환된 측정치 $z^{IR}(t_i)$ 를 획득하고 레이더의 t_k 시점에서 측정치 융합이 될 수 있도록 측정치 예측을 수행한다. 이를위해 칼만필터로부터 속도추정치를 이용하여 다음과 같이 평균 속도벡터를 산출하고, 이 속도 벡터를 이용하여 동기화된 시간 t_{IR} 에서 t_k 까지 측정치 예측을 한다.

평균 속도 벡터는 다음과 같다.

$$\bar{\hat{x}}(t_{IR}^*) = E[\hat{x}^R(t_j|t_j)], \quad t_j \leq t_{IR}, \quad (26)$$

$$j = [k-m-n+1, \dots, k-m]$$

열영상센서의 동기화된 시간 t_{IR} 보다 작은 n개의 시점들에서의 속도추정벡터의 평균을 산출한다.

이 평균속도벡터를 이용한 열영상센서의 측정치 예측식은 아래와 같다.

$$\hat{z}^{IR}(t_k) = \hat{z}^{IR}(t_i) + (t_k - t_{IR}) \bar{\hat{x}}(t_{IR}^*) \quad (27)$$

열영상센서의 측정치 예측값 $\hat{z}^{IR}(t_k)$ 과 레이더 측정

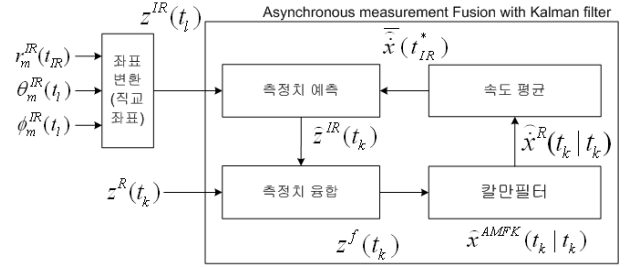


그림 5. Kalman필터기반 비동기측정치융합필터

Fig. 5. Asynchronous measurement fusion filter with Kalman filter.

치 $z^R(t_k)$ 에 대한 측정치 융합식은 다음과 같다.

$$z^f(t_k) = z^R(t_k) + \frac{R^R(x,y,z)}{R^R(x,y,z) + R^{IR}(x,y,z)} [\hat{z}^{IR}(t_k) - z^R(t_k)] \quad (28)$$

위의 식에서 $R^R(x,y,z)$, $R^{IR}(x,y,z)$ 은 각각 레이더와 열영상센서의 직각좌표계로 변환되었을 때의 측정치에 대한 변환된 분산도를 나타낸다.

매 레이더의 측정치 샘플마다 측정치 융합이 이루어지며, 레이더의 샘플 사이에 열영상센서의 측정치가 존재하는 경우 시간동기화 후 측정치 예측하여 측정치 융합시에 열영상센서의 측정치가 반영이 되며, 레이더 샘플 사이에 열영상센서의 측정치가 없을 때에는 레이더 측정치만이 측정치 융합시에 사용되어지도록 하였다. 따라서 이때의 측정치 융합식은 $z^f(t_k) = z^R(t_k)$ 이 된다.

여기서도 동작하는 칼만필터는 단일모델로 되며, 레이더 모델을 근간으로하여 열영상센서의 측정치에 칼만필터로 시간예측을 하여 레이더의 측정치와 동기화한 후에 측정치융합하고 필터를 수행하도록 한 것이다.

VII. 시뮬레이션

본 연구는 근거리에서 접근하는 고속의 표적에 대해서 비동기 센서의 측정데이터로부터 추적융합하는 기법을 제안하는 것이다. 이러한 기법의 적용이 필요한 상황은 지상에서 발사되는 RPG (Rocket Propelled Grenade)와 같은 로켓을 근거리에서 방어하는 하드킬(hard-kill) 시스템에서 찾아볼 수 있다. 하드킬은 전차와 같은 기동차량의 방호성능향상을 위한 것으로 근거리(수백미터 이하)에서 발사되어 접근하는 RPG와 같은 로켓을 추적하고 교전위치를 예측하여 대응탄을 교전위

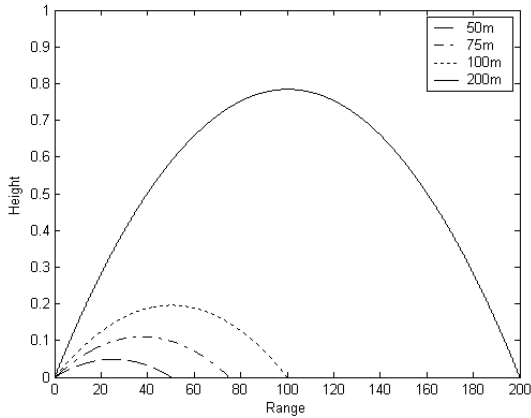


그림 6. 근거리 표적의 탄도곡선
Fig. 6. Trajectories of the short range targets.

치로 발사하여 접근하는 로켓을 파괴하는 시스템이다. 수 초 이내에 기동차량이 로켓에 의해 파괴되므로 짧은 시간에 표적을 탐지 및 추적해야 하는 체계인 것이다. 이러한 조건에 대한 시뮬레이션을 위해 200m, 100m, 75m, 50m의 거리에서 약 250m/s로 발사되어 아래 그림 6과 같이 탄도를 그리며 접근하는 4가지의 표적을 생성하였다. 레이더의 샘플링시간은 4ms, 고유지연시간은 5.6ms이며, 열영상센서의 경우는 각각 8.3ms, 16.6ms로 약 120Hz의 프레임 갱신을 갖는 것으로 가정하였다. 아래의 궤적에 대해서 두 센서가 비동기적으로 각각의 샘플링시간에 따라서 표적의 정보를 획득하도록 하였다. 레이더의 거리 오차 $\sigma_r^R = 0.7m$, 방위각과 고각오차는 $\sigma_\theta^R = \sigma_\phi^R = 0.7^\circ$, 열영상센서는 일반적으로 레이더보다 각도 정확도가 높으므로 방위각, 고각 오차는 $\sigma_\theta^{IR} = \sigma_\phi^{IR} = 0.2^\circ$ 설정하였다. AMFL의 열영상센서의 Least square 예측시에 사용하는 데이터 개수는 10개, AMFK에서도 칼만필터의 속도추정벡터의 평균 설정시 개수도 10개로 설정하였다.

각각의 거리에서 발사하는 표적에 대해서 200회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행 후 X, Y, Z축별로 Root Mean Square Error(RMSE) 오차를 산출하여 아래와 같이 나타내었다.

그림 7과 그림 8에서 나타나 있는 것과 같이 200m와 100m에서 발사한 표적에 대해서 ATF와 AMFK의 성능은 유사한 결과를 보여주고 있다. ATF의 경우 센서별 각각의 필터가 적절히 수렴하는 경우에는 AMFK와 유사한 성능을 나타내었다. AMFL은 표적의 탄도의 변화와 근거리에서의 열영상 센서의 각도예측의 비선형성

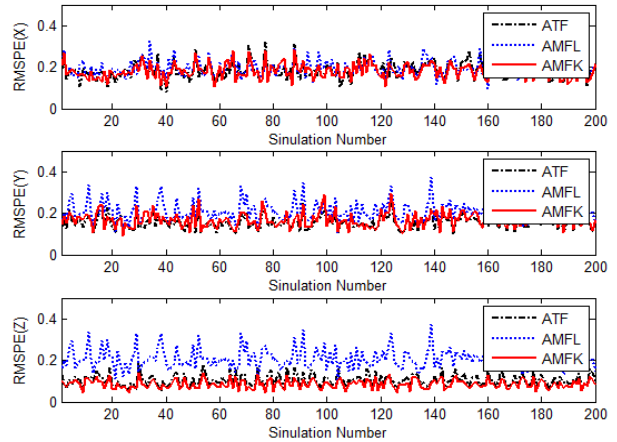


그림 7. 200m 표적발사시 X,Y,Z축 RMSE
Fig. 7. X,Y,Z RMSE of target projected at 200m.

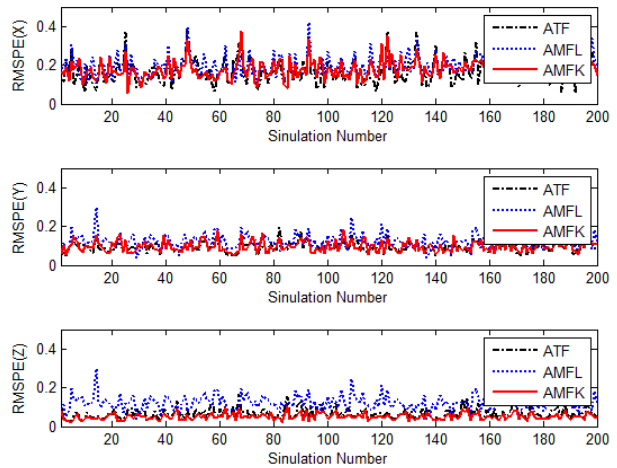


그림 8. 100m 표적발사시 X,Y,Z축별 RMSE
Fig. 8. X,Y,Z RMSE of target projected at 100m.

표 1. 추적모델별 RMSE 평균
Table 1. Averages of RMSE of the Models.

Secnario		ATF	AMFL	AMFK
200m 발사	RMSE x	0.2007	0.2025	0.1859
	RMSE y	0.1814	0.2173	0.1831
	RMSE z	0.1272	0.2136	0.1132
100m 발사	RMSE x	0.1641	0.1947	0.1736
	RMSE y	0.1042	0.1494	0.1006
	RMSE z	0.0985	0.1523	0.0863

으로 인한 오차가 누적되어 방위각과 고각에 해당하는 Y 및 Z 축 RMSE오차가 증가됨을 알 수 있으며, 거리 방향의 오차는 레이더 정보를 사용함으로 AMFK의 RMSE오차와 유사한 결과를 나타내었다.

그림 9과 그림 10을 보면, 75m와 50m에서 발사한 표적에 대해서 ATF의 RMSE오차가 현저히 증가하고 있

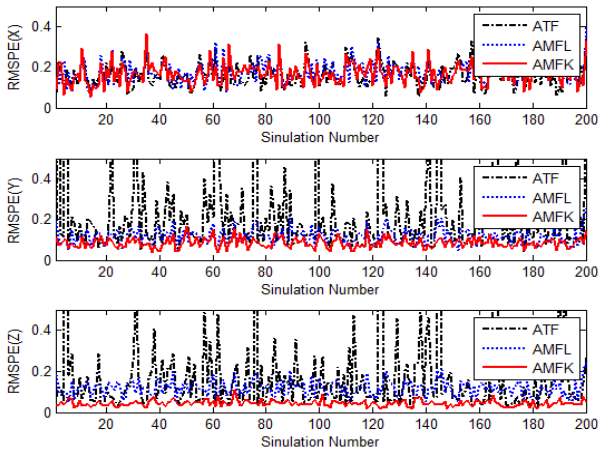


그림 9. 75m 표적발사시 X,Y,Z 축별 RMSE
 Fig. 9. X,Y,Z RMSE of target projected at 75m.

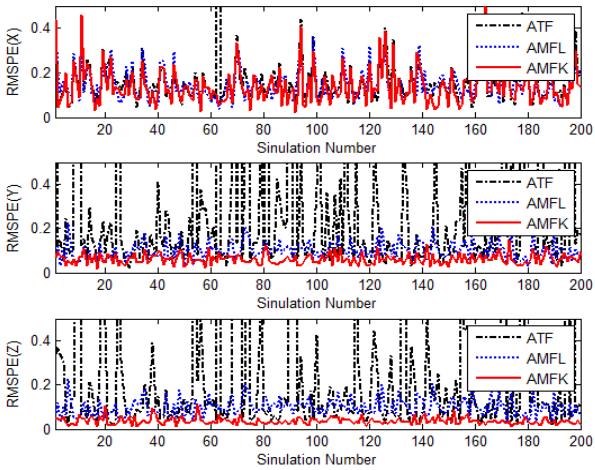


그림 10. 50m 표적발사시 X,Y,Z 축별 RMSE
 Fig. 10. X,Y,Z RMSE of target projected at 50m.

표 2. 추적모델별 RMSE 평균
 Table 2. Averages of RMSE of the Models.

Scenario		ATF	AMFL	AMFK
75m 발사	RMSE x	0.1566	0.1725	0.1584
	RMSE y	0.2406	0.1389	0.0944
	RMSE z	0.2140	0.1433	0.0853
50m 발사	RMSE x	0.1582	0.1556	0.1446
	RMSE y	0.3774	0.1259	0.0848
	RMSE z	0.4059	0.1226	0.0776

는데, 이러한 요인은 매우 가까운 거리에서 표적이 접근하므로 열영상 데이터의 획득량이 적어서 열영상 궤적에 대한 칼만필터의 수렴성이 떨어지므로 Track-to-Track 궤적융합시에 추적성능의 저하를 가져오고 있으며, AMFL과 AMFK는 근거리에서 추적오차에 대한 RMSE가 현저히 낮게 나타나는데, 이는 레이더 모델을

근간으로 동작하므로 상대적으로 획득 데이터 내에서 표적 궤적으로 수렴성이 증가한 요인과 레이더와 열영상센서의 관측값의 측정치 융합이 먼저 이루어지므로 측정오차가 상쇄되는 효과에 의해 칼만필터의 수렴성에 영향을 준 결과로서 기본적으로 측정치 융합이 Track 융합에 비해 좋은 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. AMFL에 비해 AMFK가 여기에서도 열영상센서의 각도예측시 비선형오차를 해결하였으므로 전반적으로 RMSE오차가 적은 것을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 비동기 센서인 레이더와 열영상센서를 장착한 시스템이 근거리에서 접근하는 표적을 추적하기 위해 시간동기화하고 레이더의 거리정보와 칼만필터의 속도벡터를 이용하여 열영상센서의 측정치를 예측하여 레이더와 측정치 융합을 통해 표적을 추적하는 AMFK 필터를 제안하였다.

AMFK필터는 기존의 제시된 Track-to-Track Fusion 필터에 대해서 비동기 센서데이터를 처리하도록 변경한 ATF필터에 비해 표적의 접근거리가 가까울수록 추적성능이 향상되는 결과를 보였으며, Least Square필터를 사용하여 열영상센서 측정치 예측을 통해 비동기조건에서 측정치 Fusion을 하는 AMFL필터와 비교하여도 전반적으로 각도의 비선형성에 대한 문제를 해결함으로써 추적성능이 우수함을 보였다. 뿐만 아니라 측정치융합을 수행함에 있어서 별도의 Least square필터를 도입하기보다는 칼만필터의 추정속도벡터를 피드백하여 사용함으로써 간략한 필터구조이며, 열영상센서의 측정치 예측시에 각도변화의 비선형성을 해결하기위해 열영상센서 기준의 거리정보를 복원하여 직교좌표계에서 측정치예측을 수행함으로써 비동기 다중센서 시스템에서 동기화를 통한 근거리 접근 표적의 추적 성능향상을 도모할 수 있었다.

일반적으로 측정치 융합이 궤적융합에 비해 동기화 조건에서 이론적으로도 우수하다고 알려져 있으며, 본 연구를 통해서 비동기 다중센서 정보융합 추적시에도 궤적융합기법보다 적절한 측정치 예측을 수행하여 측정치 융합기법을 적용하는 것이 보다 나은 결과를 가져올 수 있음을 실험적으로 확인하는 계기가 되었다.

향후 비동기 다중센서 측정치 융합 추적시에 측정치

예측하는 기법에 대한 다양한 연구와 추적성능과 예측 시간과의 상관성에 대한 연구도 아울러 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] Bar-Shalom, Y and Xiao-Rong Li, *Estimation and Tracking Principles, Techniques and Software*, Artech House, 1993.
- [2] Bar-Shalom, Y., and Fortmann, T.E. "Tracking and Data Association", *New York: Academic Press*, 1988.
- [3] Subhash Challa, Mark R. Morelade, Darko Musicki and Robin J. Evans, *Fundamentals of Object Tracking*, Cambridge, 2011.
- [4] J.B.Romine, Edward W. Kamen, and Chellury R. Sastry, "Fusion of radar and imaging sensor data for target tracking", *Proc.SPIE* 2235, 558(1994).
- [5] Chang, K. C., Saha R. K., and Bar-shalom. Y. "On optimal track-to-track fusion," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 33, no. 4, pp.1271-1277, October 1997.
- [6] Saha R. K., "Track-to-Track Fusion With Dissimilar Sensors," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, Vol 32, no. 3 July 1996.
- [7] VPS Naidu, Girija G., "Target Tracking and Fusion Imaging Sensor and Ground based Radar Data," *AIAA Guidance, Navigation, and Control conference and Exhibit*, 15-18, Aug 2005, Sanfrancisco, California.
- [8] A. Zhu, Z. Jing, W. Chen, L. Wnag, "Data Fusion of Infrared and Radar for Target Tracking", *Systems and Control in Aerospace and Astronautics*, ISSCAA 2008, 10-12 Dec, 2008.
- [9] A.T.Alouani and T.R.Rice, "On Optimal Asynchronous Track Fusion", *IEEE First Australian Symposium on Data Fusion*, pp 147-152, Nov, 1996.
- [10] L.Hui, Z. A, C Cheng, Z. Wei, "Asynchronous Track-to-Track Fusion Algorithms for Distributed Multi-sensor System", *IMACS Multiconference on "Computational Engineering in Systems Applications"(CESA)*, Oct 4-6, 2006, Beijing, China
- [11] Qiang Gan, Chris J. Harris, "Comparison of Two Measurement Fusion Methods for Kalman-Filter Based Multisensor Data Fusion", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 37, No. 1 Jan 2001.
- [12] J. A. Roecker and C.D. McGillem, "Comparison of two-sensor tracking methods based on state vector fusion and measurement fusion," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 24, no. 4, pp. 447-449, July 1988.
- [13] Bar-Shalom. Y. and Campo, L., "The effect of the common process noise on the two-sensor fused-track covariance," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, Vol 22, pp. 803-805, Nov 1986.
- [14] F.Xiaorong, J. Changsheng, "Asynchronous Fusion Algorithm of Highly Maneuvering Targets", *IEEE 2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics, ISSCAA 2008*, 10-12, Dec 2008.
- [15] H. Hong, H.C.Chong-zhao, Z.Hong-yan and W.Rong, "Tracking Maneuvering Target Based on Neural Fuzzy Inference Network", *Proceedings of the 6th International Conference of Information Fusion 2003*, V.2. pp.1411-1414, 2003.
- [16] 류창수, "측정치 융합에 기반을 둔 다중표적 방위각 추적 알고리즘", 전자공학회 논문지, 제 43권 IE편 제 3호, 13-21쪽, 2006년 9월

저 자 소 개



이 의 혁(정희원)

1996년 포항공대 전자공학과 학사 졸업.

1998년 포항공대 전자공학과 석사 졸업.

1998년~현재 국방과학연구소 연구원

<주관심분야 : 신호처리, 다중 센서 Fusion, 표적 탐지 및 추적필터>