

GPS 기반 추적레이더 실시간 바이어스 추정 및 비동기 정보융합을 통한 발사체 추적 성능 개선

(Performance enhancement of launch vehicle tracking
using GPS-based multiple radar bias estimation and
sensor fusion)

송 하 룡^{1)*}
(Ha-Ryong Song)

요 약 다중센서 시스템에서 센서 바이어스를 제거하는 센서 등록 과정은 각각의 센서가 공통된 좌표를 갖게 하기 위해 반드시 필요하다. 만약 센서 등록 과정을 적절하게 처리하지 않는다면, 거대한 추적 에러 또는 같은 목표물을 향한 다수의 허수 트랙이 발생하게 되어 추적이 실패하게 된다. 특히, 발사체 추적에 있어서 각각의 추적 장비는 반드시 적절한 센서등록 과정을 거쳐야 하며, 이 후 다중센서 융합알고리즘을 활용하면 발사체 추적 성능을 높이고 다중 추적 시스템에 정확한 지향입력으로 활용 가능하게 된다. 본 논문에서는 실시간 바이어스 추정/제거 알고리즘과 비동기 다중 센서 융합 기법을 제안하였다. 제안된 바이어스 추정 알고리즘은 GPS와 다중 레이더 간의 의사 바이어스 측정치를 활용하였고, 비동기 센서 융합알고리즘 적용을 통해 추적 성능을 향상하였다.

핵심주제어 : 센서 등록, 바이어스 추정, 의사 바이어스 측정치, 비동기 센서 융합, 발사체 추적

Abstract In the multi-sensor system, sensor registration errors such as a sensor bias must be corrected so that the individual sensor data are expressed in a common reference frame. If registration process is not properly executed, large tracking errors or formation of multiple track on the same target can be occurred. Especially for launch vehicle tracking system, each multiple observation lies on the same reference frame and then fused trajectory can be the best track for slaving data. Hence, this paper describes an on-line bias estimation/correction and asynchronous sensor fusion for launch vehicle tracking. The bias estimation architecture is designed based on pseudo bias measurement which derived from error observation between GPS and radar measurements. Then, asynchronous sensor fusion is adapted to enhance tracking performance.

Key Words : Sensor Registration, Bias Estimation, Pseudo Bias Measurement, Asynchronous Fusion, Launch Vehicle Tracking

* Corresponding Author : hrsong@kari.re.kr

Manuscript received September 22, 2015 / revised November
27, 2015 / accepted December 4, 2015

1) 한국항공우주연구원, 제1저자

1. 서 론

우주발사체 발사를 위한 발사통제시스템의 주요 기능 중 하나는 발사체 추적을 위한 다중의 추적 시스템으로부터 발사체의 궤적 및 상태 정보를 처리하여 사용자가 발사 임무 정보를 파악할 수 있도록 할 뿐만 아니라 안테나 지향이 필요한 추적 시스템에 안테나 지향 입력을 전송함으로써 발사체의 원활한 추적이 이뤄지도록 돕는 역할을 한다[1]. 발사체 추적 시스템은 장거리를 비행하는 발사체의 궤적과 고 신뢰성을 요구하는 시스템 특성 때문에 다중 센서 시스템이 적용되는데 이러한 다중 추적 시스템의 추적 데이터를 효율적으로 처리하기 위한 추적 정보 융합 연구가 활발하게 진행되었다[2]. 본 연구에서는 다중 추적 시스템 중 두 대의 추적 레이더와 발사체의 온보드에 장착된 GPS 정보를 효율적으로 융합하기 위한 방법을 제시하였고, 시스템의 구성은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 발사체 추적을 위한 두 대의 추적 레이더는 각각 전남 고흥과 제주에 위치하여 시간에 따른 위치(TSPi: Time, Space, Position, Information) 정보를 발사통제 시스템을 통해 수신하며, 고흥과 제주 그리고 필리핀 해상에 위치한 원격 자료수신 시스템(TGS: Telemetry Ground System)[3]을 통해 QLM (Quick Look Message)을 수신 받아 GPS 데이터를 획득한다. 각각의 추적 시스템은 발사통제시스템에 의해 안테나 지향 입력(Slaving Data)을 수신 받아 발사체를 추적하는 시스템 구성을 갖는다[2].

다중 추적 시스템의 추적 정보 융합에 앞서, 센서의 측정치 획득 과정에서 실제 표적의 측정치에 더해지거나 곱해지는 행태로 생성되는 바이어스에 대해서 추정하고 제거해주는 센서 등록(Sensor registration)과정이 반드시 필요하다[4]. 만약 이러한 바이어스를 제거하지 않게 되면 추적필터의 정확도를 떨어뜨리고, 동일 표적에 대한 측정치를 서로 다른 표적으로 인식하여 항적 정보 융합 시 융합 성능을 저하시키는 원인이 된다[5-6]. 또한 우주센터 발사통제시스템의 경우 추적 시스템의 바이어스는 추적 연동 정보로 사용될 때 안테나의 지향점에 오차를 발생시켜, 결과적으로 발사체의 위치 추적에 오차를 유발할

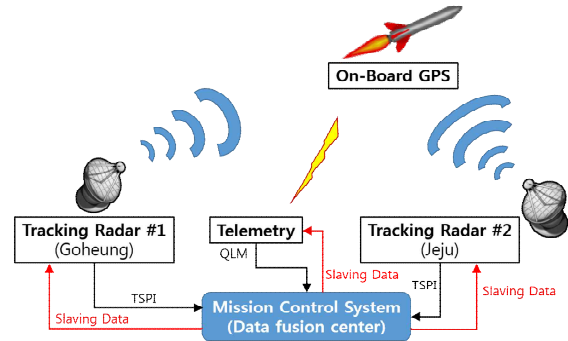


Fig. 1 System Architecture

수 있는 요소이기 때문에 매우 중요하다. 다중 표적 다중 센서 시스템의 경우에는 센서의 바이어스 계산을 위해 각각의 센서로부터 다중 표적에 대한 측정 정보를 종합하여 바이어스를 계산하는 방법들이 제시되었다[6-8]. 하지만 발사체와 같이 다중 표적이 아닌 단일 표적의 경우에는 이와 같은 방법을 사용하기 어려운 점이 있다. 본 연구에서는 단일 발사체 추적 환경에서 레이더의 바이어스 오차를 센서 등록 바이어스가 없다고 가정된 GPS 데이터에 기반하여 실시간으로 추정/제거 하는 방법을 제안하였다. GPS 역시 바이어스가 완전히 없지는 않지만 레이더에 비해 상대적으로 매우 적은 바이어스를 가지기 때문에 본 연구에서는 바이어스가 없다고 가정하였으며, 이와 같은 방법은 이동 로봇의 실외 위치 추정을 위한 방법에서도 적용된 바 있다[9]. 측정 시작 시간과 측정 시간 간격이 서로 다른 추적 레이더와 GPS 간의 의사 바이어스 관측 모델 생성[8]을 위해 발사체의 동적 모델을 이용한 칼만 예측을 사용하여 각 추적 레이더의 시점에 동기화하도록 하여 GPS와 레이더간의 바이어스 추정치를 계산하였다. 각 추적 레이더에서 계산된 바이어스를 보정한 후 다중 추적 레이더 데이터를 비동기 정보 융합 알고리즘[10]을 적용하여 융합하여 추적 성능을 높였다.

본 연구에서는 우주센터의 발사통제시스템 적용 가능 여부 검토를 위하여 제안된 방법을 KSLV-I 3차 발사 임무 시에 측정된 발사체의 GPS 및 다중 추적 레이더 측정치를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션을 통해 제안된 방

법을 사용하여 다중 추적 레이더를 융합할 경우 바이어스를 제거하지 않은 경우보다 높은 신뢰도를 갖는 추적 데이터를 얻을 수 있었다.

2. 문제 설정

2.1 시스템 모델

본 연구에서는 발사체의 운동 모델을 다음과 같이 3차원 등속도 운동 모델로 가정하였다.

$$X_{k+1} = \Phi_k X_k + w_k \quad (1)$$

위 식에서 k 는 시간의 인덱스이며, 상태 벡터는 $X_k = [x \dot{x} y \dot{y} z \dot{z}]^T$ 와 같고 Φ_k 는 발사체의 운동 상태 천이 행렬을 나타낸다. w_k 는 공정 잡음을 나타내며 백색 가우시안 잡음이라 가정하였다. 각각은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Phi_k = \begin{bmatrix} f_x & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 2} & f_y & \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & f_z \end{bmatrix}, f_{L=x,y,z} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$E[w_k w_l^T] = Q \delta_{k-l} \quad (3)$$

$$q_{L=x,y,z} = \begin{bmatrix} 1/3 T^3 & 1/2 T^2 \\ 1/2 T^2 & T \end{bmatrix}, Q = \tilde{q} \begin{bmatrix} q_x & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 2} & q_y & \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & q_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

수식 (2)에서 T 는 샘플 시간을 나타내며, 수식 (4)에서 q 는 x, y, z 축에서의 잡음의 크기를 의미한다.

2.2 비동기 다중 레이더 관측 모델

레이더의 좌표계는 Fig. 2와 같이 SEZ좌표계를 기준으로 거리(Range), 방위각(Azimuth), 고각(Elevation)으로 정의되는 REA 좌표계를 갖고 측정치는 SEZ 좌표값(x, y, z)을 통해 다음과 같

이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_{k,p}^i &= h[X_k] + v_{k,p}^i, \\ Z_{k,p}^i &= [\rho_{k,p}^i \ \phi_{k,p}^i \ \theta_{k,p}^i]^T \end{aligned} \quad (5)$$

위 수식에서 i 는 센서 인덱스이며, $h[X_k]$ 는 REA좌표계에서 레이더의 측정값을 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$h[X_k] = \begin{bmatrix} \rho_k = \sqrt{x_k^2 + y_k^2 + z_k^2} \\ \phi_k = \tan^{-1}(y_k/x_k) \\ \theta_k = \tan^{-1}(z_k/\sqrt{x_k^2 + y_k^2}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

또한 $v_{k,p}^i$ 는 레이더의 관측 잡음을 나타내며 백색 가우시안이라고 가정하였다.

$$E[v_{k,p}^i v_{k,p}^{iT}] = R_p \delta_{k-l}, R_p = \begin{bmatrix} \sigma_{i,\rho}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{i,\phi}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{i,\theta}^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

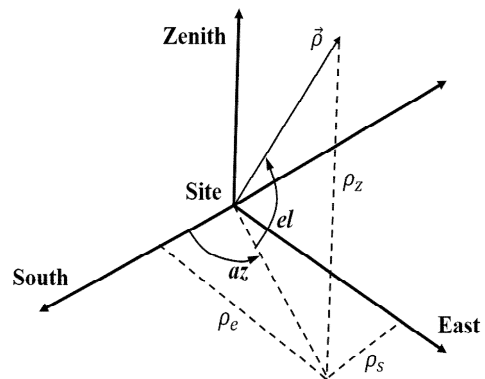


Fig. 2 Radar Coordinates

본 연구에서 제안된 알고리즘은 선형 칼만 필터 적용을 위하여 구 좌표계(거리, 방위각, 고각)에서 직교 좌표계(x, y, z)로의 변환 측정치를 사용하였다. 수식 (6)~(7)에 대하여 debiased 변환 [11]을 적용하면 다음과 같다.

$$Z_{k,c}^i = [x_c^i \ y_c^i \ z_c^i]^T \quad (8)$$

$$= \begin{bmatrix} \rho_{k,p}^i \cos \phi_{k,p}^i \cos \theta_{k,p}^i (e^{-\sigma_{i,\phi}^2/2 - \sigma_{i,\theta}^2/2} - 1) \\ \rho_{k,p}^i \sin \phi_{k,p}^i \cos \theta_{k,p}^i (e^{-\sigma_{i,\phi}^2/2 - \sigma_{i,\theta}^2/2} - 1) \\ \rho_{k,p}^i \sin \theta_{k,p}^i (e^{-\sigma_{i,\theta}^2/2} - 1) \end{bmatrix}$$

수식 (8)에 대응하는 직교좌표로의 변환 잡음 공분산 행렬 $R_{k,c} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 는 다음 수식과 같이 나타낼 수 있다[11].

$$R_{k,c}^{i,xx} = [\rho_{k,p}^{i^2} (\alpha_x^i \alpha_{xy}^i - \cos^2 \phi_{k,p}^i \cos^2 \theta_{k,p}^i) + \sigma_{i,\rho}^2 \alpha_x^i \alpha_{xy}^i] e^{-\sigma_{i,\phi}^2 - \sigma_{i,\theta}^2} \quad (9-1)$$

$$R_{k,c}^{i,xy} = [\rho_{k,p}^{i^2} (\alpha_{xy}^i - \cos^2 \theta_{k,p}^i \cdot e^{\sigma_{i,\phi}^2}) + \sigma_{i,\rho}^2 \alpha_{xy}^i] \times \sin \phi_{k,p}^i \cos \phi_{k,p}^i \cdot e^{-2\sigma_{i,\phi}^2 - 2\sigma_{i,\theta}^2} \quad (9-2)$$

$$R_{k,c}^{i,xz} = [\rho_{k,p}^{i^2} (1 - e^{\sigma_{i,\theta}^2}) + \sigma_{i,\rho}^2] \cos \phi_{k,p}^i \times \sin e^{-\sigma_{i,\phi}^2/2 - 2\sigma_{i,\theta}^2} \quad (9-3)$$

$$R_{k,c}^{i,yy} = [\rho_{k,p}^{i^2} (\alpha_x^i \alpha_{xy}^i - \sin^2 \phi_{k,p}^i \cos^2 \theta_{k,p}^i) + \sigma_{i,\rho}^2 \alpha_x^i \alpha_{xy}^i] e^{-\sigma_{i,\phi}^2 - \sigma_{i,\theta}^2} \quad (9-4)$$

$$R_{k,c}^{i,yz} = [\rho_{k,p}^{i^2} (1 - e^{\sigma_{i,\theta}^2}) + \sigma_{i,\rho}^2] \sin \phi_{k,p}^i \sin \theta_{k,p}^i \times \cos \phi_{k,p}^i e^{-\sigma_{i,\phi}^2/2 - 2\sigma_{i,\theta}^2} \quad (9-5)$$

$$R_{k,c}^{i,zz} = [\rho_{k,p}^{i^2} (\alpha_z^i - \sin^2 \theta_{k,p}^i) + \sigma_{i,\rho}^2 \alpha_z^i] e^{-\sigma_{i,\theta}^2} \quad (9-6)$$

위 수식 (9)에서 α_x^i , α_y^i , α_z^i , α_{xy}^i 는 각각 다음과 같이 정의 된다.

$$\alpha_x^i = \sin^2 \phi_{k,p}^i \sinh \sigma_{i,\phi}^2 + \cos^2 \phi_{k,p}^i \cosh \sigma_{i,\phi}^2 \quad (10-1)$$

$$\alpha_y^i = \sin^2 \phi_{k,p}^i \cosh \sigma_{i,\phi}^2 + \cos^2 \phi_{k,p}^i \sinh \sigma_{i,\phi}^2 \quad (10-2)$$

$$\alpha_z^i = \sin^2 \theta_{k,p}^i \cosh \sigma_{i,\theta}^2 + \cos^2 \theta_{k,p}^i \sinh \sigma_{i,\theta}^2 \quad (10-3)$$

$$\alpha_{xy}^i = \sin^2 \theta_{k,p}^i \sinh \sigma_{i,\theta}^2 + \cos^2 \theta_{k,p}^i \cosh \sigma_{i,\theta}^2 \quad (10-4)$$

최종적으로 직교좌표로 변환된 다중 레이더 관측치는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Z_{k,c}^i = HX_k + v_{k,c}^i, \quad H = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0}_{1 \times 2} & \mathbf{0}_{1 \times 3} \\ \mathbf{0}_{1 \times 2} & 1 & \mathbf{0}_{1 \times 3} \\ \mathbf{0}_{1 \times 4} & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$v_{k,c}^i$ 는 좌표 변환 후 관측 잡음이며 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$E[v_{k,c}^i v_{k,c}^{iT}] = R_{k,c}^i \delta_{k-l} \quad (12)$$

이 후로는 수식 표현의 편의를 위해 직교좌표에서 관측 값 $Z_{k,c}^i$ 와 관측 잡음 $v_{k,c}^i$ 를 각각 Z_k^i 와 v_k^i 로 쓰기로 한다.

$$Z_k^i \equiv Z_{k,c}^i = [x_k^i \ y_k^i \ z_k^i]^T, \quad v_k^i \equiv v_{k,c}^i, \quad R_k^i \equiv R_{k,c}^i \quad (13)$$

3. GPS 기반 바이어스 추정

3.1 의사 바이어스 측정치 모델

다중 레이더의 바이어스 추정을 위해 제안된 바이어스 측정치 모델은 수식 (11)를 사용하여 다음과 같이 표현된다.

$$Z_k^i = HX_k + C_k^i X_{k,b} + v_k^i, \quad (14)$$

$$X_{k,b} = [b_{k,x} \ b_{k,y} \ b_{k,z} \ \epsilon_{k,x} \ \epsilon_{k,y} \ \epsilon_{k,z}]^T$$

위 수식에서 $X_{k,b}$ 는 바이어스 벡터이고 b_k 와 ϵ_k 는 각각 x , y , z 축에 대한 offset과 scale 바이어스를 나타낸다. $X_{k,b}$ 추정을 위한 의사 바이어스 측정값 Z_k^i 는 GPS 측정치와 다중 레이더 측정치의 차이 즉,

$$Z_{k,b}^i = Z_k^i - Z_k^{GPS}, \quad Z_{k,b}^i = C_k^i X_{k,b} + v_{k,b}^i \quad (15)$$

로 표현되고, 의사 바이어스 측정 잡음 $v_{k,b}^i$ 도 같은 방법으로 구해진다[8].

$$v_{k,b}^i = v_k^i - v_k^{GPS}, \quad R_{k,b}^i = R^{GPS} + R_k^i \quad (16)$$

위 식에서 R_k^i 는 i 인덱스를 갖는 레이더의 바이어스 공분산을 나타낸다. 일반적으로 GPS는 추적 레이더에 비해 상대적으로 큰 측정 시간 간

격을 갖고 또한 측정 시작 시간이 다른 비동기 시스템이다. 실시간 바이어스 계산을 위하여 GPS 측정치에 대하여 칼만 필터를 적용하고, 레이더의 측정 간격을 정확히 안다는 가정하에 레이더의 측정 시간에 맞추어 지도록 칼만 예측 (KP: Kalman Prediction)값을 적용하였다.

$$\hat{X}_{k+s|k}^{GPS} = \Phi_{k+s,k} \hat{X}_{k|k}^{GPS} \quad (17)$$

위 수식에서 s는 시간 인자로서 레이더 데이터와 시간 동기를 맞추기 위한 시간 간격 값이다. 상대적으로 큰 GPS의 샘플 간격으로 인해 데이터가 없는 경우는 수식 (17)의 칼만 예측값을 사용하고 데이터가 있는 경우에는 칼만 필터를 사용하여 업데이트 하는 방법으로 레이더와 GPS간의 시간 동기를 맞추어 바이어스를 제거 하였다. 또한 상태 벡터 변환을 위한 행렬은 다음과 같다.

$$C_k^i = [I_{3 \times 3} \quad -diag(x_k^i, y_k^i, z_k^i)] \quad (18)$$

3.2 바이어스 추정 필터

수식 (14)을 통해 다중 레이더의 바이어스를 추정하기 위해 바이어스를 미지의 상수 값을 갖는다고 가정하여 추정 필터의 동역학 모델을 다음과 같이 설정하였다.

$$X_{k+1,b} = X_{k,b} + w_{k,b} \quad (19)$$

바이어스 시스템 잡음은 N개의 샘플 윈도우에서 데이터를 획득하여 샘플 평균과 분산을 구하는 방법으로 설정해 준다.

$$\tilde{w}_{k,b} = \frac{1}{N} \sum_{n=k-N+1}^k \hat{X}_{n,b} \quad (20)$$

$$Q_{k+1,b} = \frac{1}{N} \sum_{n=k-N+1}^k [\hat{X}_{n,b} - \tilde{w}_{k,b}][\hat{X}_{n,b} - \tilde{w}_{k,b}]^T$$

i인덱스 레이더의 바이어스 추정을 위한 칼만 필터는 다음과 같이 전개할 수 있다.

Kalman prediction (Time Update) :

$$\hat{X}_{k|k,b}^j = \hat{X}_{k|k-1,b}^j \quad (21-1)$$

$$P_{k|k,b}^i = P_{k|k-1,b}^i + Q_{k,b} \quad (21-2)$$

Kalman gain :

$$K_k^i = P_{k|k-1,b}^i C_k^{iT} [C_k^i P_{k|k-1,b}^i C_k^{iT} + R_{k,b}^i] \quad (22)$$

Kalman filter (Measurement Update) :

$$\hat{X}_{k|k,b}^j = \hat{X}_{k|k-1,b}^j + K_k^i [Z_{k,b}^j - C_k^i \hat{X}_{k|k-1,b}^j] \quad (23-1)$$

$$P_{k|k,b}^i = [I - K_k^i C_k^i] P_{k|k-1,b}^i \quad (23-2)$$

계산된 바이어스 추정치 $\hat{X}_{k|k,b}^j$ 를 수식 (14)에 대입하여 바이어스를 제거한 레이더 관측값을 얻을 수 있다.

4. 비동기 다중 레이더 정보 융합

4.1 비동기 다중 레이더 데이터 정의

비동기 다중 레이더 데이터 생성을 위하여, L개의 레이더가 서로 다른 초기 측정 시간을 가지고 레이더의 관측 가능 범위 내에서 발사체를 관측하는 시나리오를 설정하였다. 비동기 센서 융합 설정을 위해 가장 최근에 융합이 이루어진 시간을 t_{k-1} , 다음 센서 융합이 이루어질 시간을 t_k 라 하면, 시간 간격 $(t_{k-1}, t_k]$ 동안 수집된 다중 레이더 관측 데이터 개수를 N_k 라 하면 N_k 는 다음 수식과 같이 표현 할 수 있다.

$$N_k = \sum_{j=1}^L n_k^j, \quad (24)$$

위 수식 (24)에서 n_k^j 는 j인덱스를 갖는 센서의 시간 간격 $(t_{k-1}, t_k]$ 동안 수집된 센서의 개수를 나타낸다. 그러므로 시간 t_k^* 에서 관측 벡터는 Z_k^* 와 같이 표현 할 수 있다. L개의 센서에 대하여 Fig. 3와 같이 나타낼 수 있다.

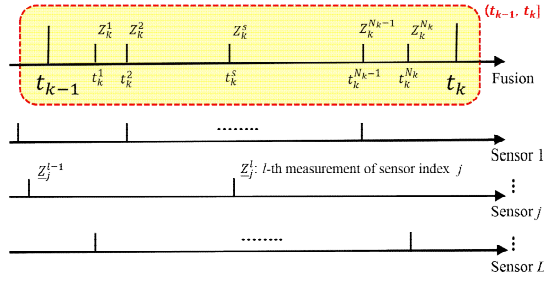


Fig. 3 Raw data collected within time interval $(t_{k-1}, t_k]$

Fig. 3를 통하여 비동기 관측 벡터 Z_k^s 는 다음 수식과 같이 쓸 수 있다.

$$Z_k^s = HX_{t_k}^s + v_k^s, \quad (25)$$

위 수식에서 s 는 시간 간격 $(t_{k-1}, t_k]$ 내에서의 레이더 관측 값의 인덱스를 나타낸다. v_k^s 는 t_k^s 에서 관측 잡음을 나타낸다. 융합 공식 유도를 위하여 시간 간격 $(t_{k-1}, t_k]$ 내에서의 관측 벡터 및 전체 관측 벡터는 각각 수식 (26)와 (27)과 같이 정의한다.

$$Y_k \equiv \{Z_k^s\}_{s=1}^{N_k} \quad (26)$$

$$Y^k \equiv \{Y_m\}_{m=1}^k \quad (27)$$

발사체 궤도 추정을 위한 비동기 다중 센서 융

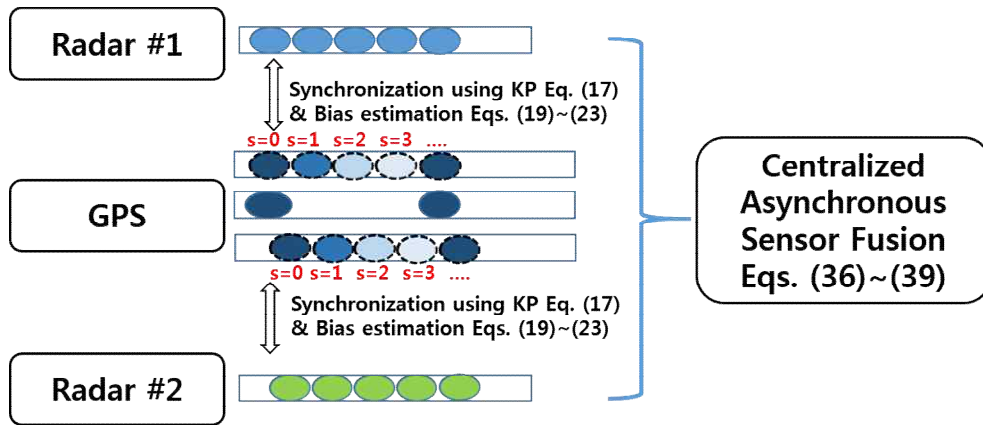


Fig. 4 Block diagram of the proposed approach

합 알고리즘은 주어진 비동기 센서 데이터 Y^k 에 대하여 최적 상태 추정치와 에러 공분산 행렬을 구하는 것이며, 다음 수식과 같다[10].

$$\hat{X}_k^f \equiv E[X_{t_k} | Y^k], \quad P_k^f \equiv cov[X_{t_k} | Y^k] \quad (28)$$

4.2 비동기 융합을 위한 설정

시간 t_k^s 에서 t_k 로의 상태 천이 행렬을 Φ_{t_k, t_k^s} 라 하고 관측 벡터를 적체하여 다음과 같은 값을 정의한다.

$$\bar{H}_k^s \equiv H\Phi_{t_k, t_k^s}^{-1}, \quad \bar{\eta}_k^s \equiv v_k^s - \bar{H}_k^s w_{t_k, t_k^s} \quad (29)$$

위 수식(29)에서 각각은 다음과 같이 정의 된다.

$$Y_k \equiv [(Z_k^1)^T (Z_k^2)^T, \dots, (Z_k^{N_k})^T]^T \quad (30-1)$$

$$A_k \equiv [(\bar{H}_k^1)^T (\bar{H}_k^2)^T, \dots, (\bar{H}_k^{N_k})^T]^T \quad (30-2)$$

$$\eta_k \equiv [(\bar{\eta}_k^1)^T (\bar{\eta}_k^2)^T, \dots, (\bar{\eta}_k^{N_k})^T]^T \quad (30-3)$$

수식 (29)에 의해 시간 간격 $(t_{k-1}, t_k]$ 동안의 비동기 다중 레이더로부터의 관측 벡터 집합 $\{Z_k^s\}_{s=1}^{N_k}$ 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Y_k = A_k X(t_k) + \eta_k \quad (31)$$

위 수식에서 적체된 관측 잡음 η_k 또한 백색 가우시안 잡음 특성을 갖고 다음과 같은 공분산 행렬을 갖는다.

$$R_{k,\eta} = \begin{bmatrix} R_k^1 + \bar{H}_k^1 Q(t_k, t_k^1) (\bar{H}_k^1)^T & \cdots & \bar{H}_k^1 Q(t_k, t_k^{N_k}) (\bar{H}_k^{N_k})^T \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{H}_k^{N_k} Q(t_k, t_k^{N_k}) (\bar{H}_k^{N_k})^T & \cdots & R_k^{N_k} + \bar{H}_k^{N_k} Q(t_k, t_k^{N_k}) (\bar{H}_k^{N_k})^T \end{bmatrix} \quad (32)$$

시스템 (1)의 시스템 잡음 $w_{t_k, t_{k-1}}$ 은 백색 가우시안 잡음 특성을 나타내고, 다음과 같은 수식을 만족한다.

$$E[w_{t_k, t_{k-1}} w_{t_l, t_{l-1}}^T] = Q_{t_k, t_{k-1}} \delta_{kl} \quad (33)$$

또한 시스템 잡음 $w_{t_k, t_{k-1}}$ 과 적체된 관측 잡음 η_k 는 서로 연관되어 있으므로 둘 간의 상호 공분산은 다음과 같이 계산된다.

$$E[w_{t_k, t_{k-1}} (\bar{\eta}_k^s)^T] = -E[w_{t_k, t_{k-1}} w_{t_k, t_k^s}^T] (\bar{H}_k^s)^T \quad (34)$$

$$= -Q_{t_k, t_k^s} (\bar{H}_k^s)^T, \text{cov}[w_{t_k, t_{k-1}}, n_l] = S_k \delta_{kl}$$

$$S_k = [-Q_{t_k, t_k^1} (\bar{H}_k^1)^T, \dots, -Q_{t_k, t_k^{N_k}} (\bar{H}_k^{N_k})^T]. \quad (35)$$

4.2 최적 비동기 융합 알고리즘

수식 (29)~(35)를 통해 시스템 모델 (1)에 대한 시간 t_{k-1} 에서의 융합 상태 추정치 \hat{X}_{k-1}^f 와 공분산 P_{k-1}^f 을 구하기 위한 최적 비동기 융합 알고리즘은 다음과 같다[10]. 본 연구에서는 바이어스를 제거한 다중 추적 레이더에 대하여 비동기 융합 알고리즘을 적용하기 위한 전체적인 알고리즘의 블록 다이어그램을 Fig. 4와 같이 표현할 수 있으며, 각각의 파트에서 사용된 수식을 통해 전체적인 알고리즘을 이해할 수 있다.

$$\hat{X}_{k|k-1}^f = \Phi_{t_k, t_{k-1}} \hat{X}_{k-1}^f \quad (36)$$

$$P_{k|k-1}^f = \Phi_{t_k, t_{k-1}} P_{k-1}^f \Phi_{t_k, t_{k-1}}^T + Q_{t_k, t_{k-1}} \quad (37)$$

$$\hat{X}_k^f = \hat{X}_{k|k-1}^f + P_k^f [A_k + S_k^T (P_{k|k-1}^f)^{-1}]^T \quad (38)$$

$$\times [R_k - S_k^T (P_{k|k-1}^f)^{-1} S_k]^{-1} (Y_k - H_k \hat{X}_{k|k-1}^f)$$

$$(P_k^f)^{-1} = (P_{k-1}^f)^{-1} + [A_k + S_k^T (P_{k|k-1}^f)^{-1}]^T \quad (39)$$

$$\times [R_k - S_k^T (P_{k|k-1}^f)^{-1} S_k]^{-1}$$

$$\times [H_k + S_k^T (P_{k|k-1}^f)^{-1}].$$

5. 시뮬레이션

제안된 알고리즘의 테스트를 위하여 KSLV-I 3차 발사 추적 데이터를 사용하였다. GPS와 다중 레이더간 측정 시간 동기화를 위하여 GPS 데이터의 칼만 예측 값을 사용하였다. 고흥과 제주에 위치한 추적레이더의 잡음은 각각 거리 편차 25m 방위각 및 고각 편차 0.01deg로 설정하였고 수식 (9), (10)을 통하여 변환하였다. 비동기 융합 필터 수행 시간은 두 대의 레이더가 동시에 발사체를 추적하는 구간에 맞춰 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

본 논문에서 바이어스가 제거된 측정치의 성능을 조사하기 위하여 Fig. 5~6과 같이 바이어스를 제거한 레이더 측정치와 제거하지 않은 레이더 측정치를 사용한 융합 필터의 residual(잔차) 값을 95% 신뢰도를 갖는 2-6 영역과 비교하여 성능을 평가하였다. Fig. 5는 카운트다운 시간(CT: count-down time) 125~160초에서의 결과를 나타내며 바이어스를 제거하지 않은 측정치를 사용한 융합의 경우 안정적이지 못하고, residual에러가 커지는 현상이 발생하는 반면 제안된 방법을 사용할 경우 2-6 신뢰 영역안에 residual이 존재함을 확인할 수 있다. 하지만 특정 시간 간격을 가지고 residual이 요동치는 것을 확인할 수 있다. 이는 레이더의 바이어스를 구하는 과정 중 GPS와 레이더의 시간 동기가 맞지 않는 것을 해결하기 위해 칼만 예측을 사용하였기 때문으로 풀이된다.

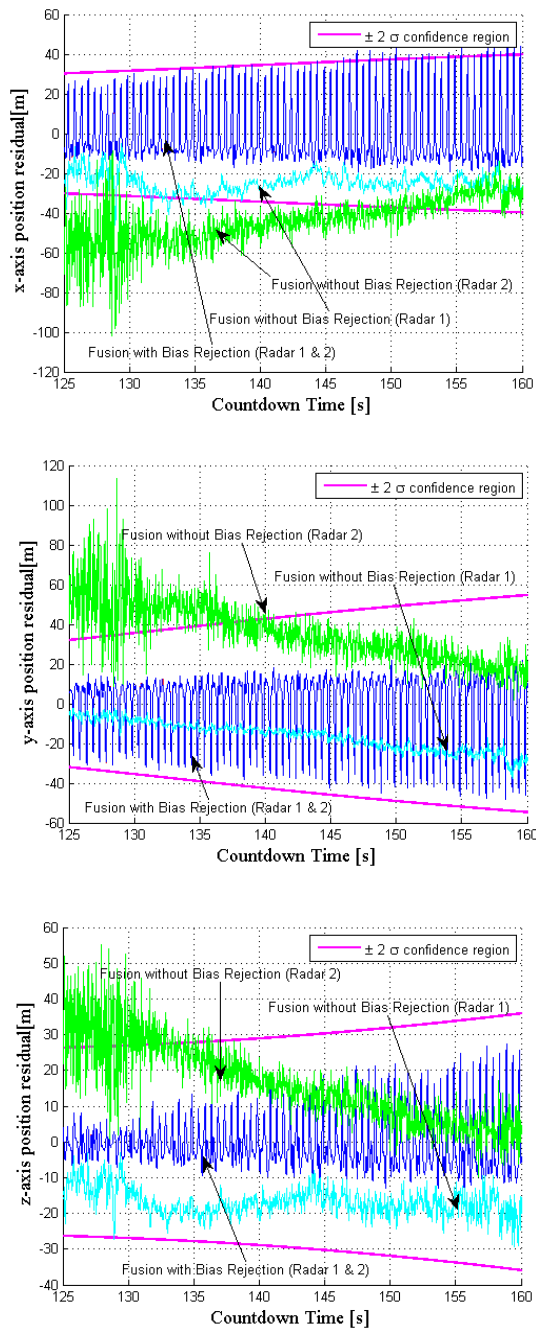


Fig. 5 Comparison of Residual(CT 125~160)

향후 이 문제는 대체 방안을 찾아 해결해야 할 것이다. 또한 Fig. 6에서는 시간(CT 370~470)이 지남에 따라 레이더와 발사체의 거리가 멀어지고, 레이더 안테나의 지향 각도가 작아지면서 바이어스의 영향이 더욱 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과를 통해 바이어스를

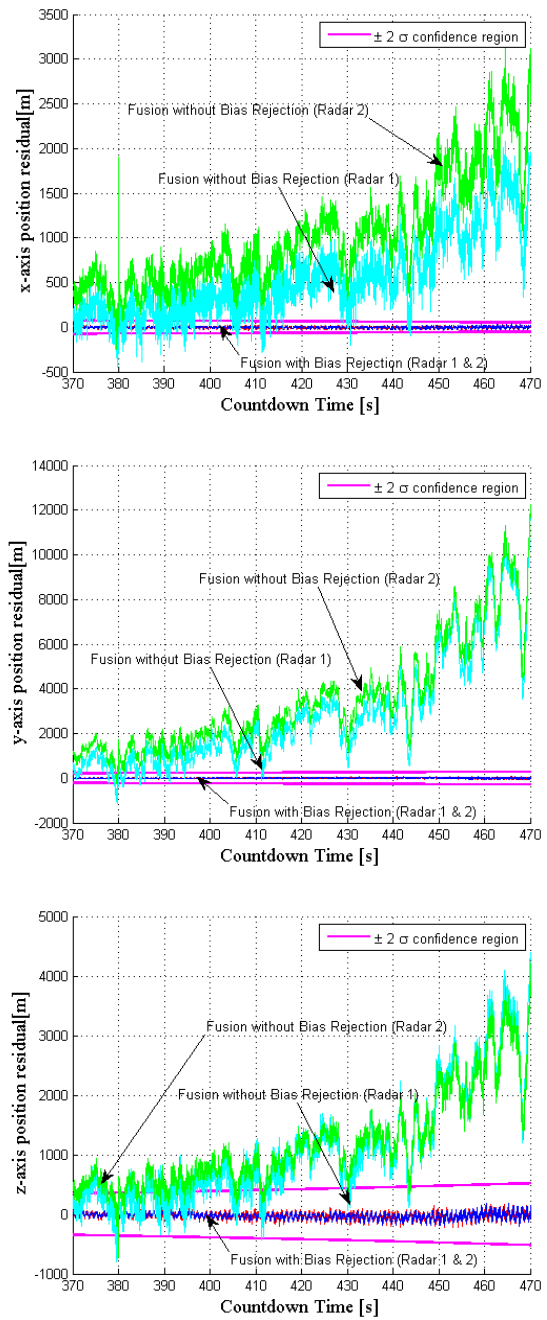


Fig. 6 Comparison of Residual(CT 370~470)

제거하지 않은 융합의 경우 2-σ 신뢰 영역을 크게 벗어나는 것을 확인할 수 있다. 반면, 제안된 방법을 사용한 추적은 바이어스가 제거되어 융합 필터의 공분산을 통해 얻은 2-σ 신뢰 영역 내에서 residual이 존재함을 확인할 수 있다. 이는 실제 에러가 융합 필터의 공분산 경계 내에 존재

함을 의미하며 수학적으로 계산된 융합 필터의 공분산은 신뢰할 만하면, 안정적으로 추적 필터가 동작하고 있음을 의미 한다. 반면에 바이어스를 제거하지 않은 경우에 수행한 융합 필터를 통해 얻은 공분산은 전혀 신뢰할 만한 정보가 되지 못함을 의미할 수 있다. 이로써 본 연구에서는 발사체 추적에 있어서 다중 레이더의 바이어스 제거와 정보 융합을 통해 융합 필터의 신뢰성을 높이고, 추적 오차를 줄일 수 있음을 입증하였다.

6. 결 론

발사체 추적을 위한 다중 센서 시스템에서 GPS를 사용하여 추적 레이더의 바이어스를 제거하는 센서 등록과 바이어스가 제거된 추적 레이더에 대하여 비동기 융합 알고리즘을 적용, 추적 성능 개선에 관한 연구를 제시하였다. 제안된 바이어스 추정 알고리즘은 GPS와 다중 레이더 간의 의사 바이어스 추정치를 활용하였고, GPS와 추적 레이더 간 시간 동기를 위하여 추적 레이더의 시간에 맞추어 지도록 GPS 정보에 대하여 칼만 예측값을 활용하였다. 제안된 알고리즘은 우주센터의 발사통제시스템 적용 가능 여부 검토를 위하여 KSLV-I 3차 발사 임무 시에 측정된 발사체의 GPS 및 다중 추적 레이더 추정치를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션을 통해 제안된 방법을 사용하여 다중 추적 레이더를 융합할 경우 바이어스를 제거하지 않은 경우보다 높은 신뢰도를 갖는 추적 데이터를 얻을 수 있었다. 본 연구의 내용은 발사체 추적 성능을 높일 수 있을 뿐만 아니라 발사 임무 후처리 분석을 위한 기준 궤적 도출 및 다중 추적 시스템에 정확한 안테나의 지향 입력(slaving data)등으로 다방면에 활용이 가능할 것으로 예상된다.

References

- [1] Y. T. Choi, S. W. Ra, "Implementation of Slaving Data Processing Function for Mission Control System in Space Center," Journal of the Korea Industrial Information System Society, Vol. 19, No. 3, pp. 31-39, 2014.
- [2] S. Y. Yun, J. Lyou, "Flight trajectory generation through post-processing of launch vehicle tracking data," Journal of the Korea Industrial Information System Society, Vol. 19, No. 6, pp. 53-61, 2014.
- [3] S. H. Lee, D. G. Kim, K. H. Kim "Application of trajectory data mining to improve the estimation accuracy of launcher trajectory by telemetry ground system," Journal of the Korea Industrial Information System Society, Vol. 20, No. 5, pp. 1-11, 2015.
- [4] Y. Bar-Shalom, "Multitarget-multisensor tracking: advanced applications", Artech House, 1990.
- [5] M. P. Topland, O. Hallingstad, A. Shinha and T. Kirubarajan, "Bias estimation for distributed radars in 3D," IEEE Aerospace Conference 2007, Mar. 3-10, 2007, Big Sky, MT, USA, pp. 1-9.
- [6] Friedland, B., "Treatment of Bias in Recursive Filtering", IEEE Transactions on Automatic Control, AC-140, 1969. 8.
- [7] A. T. Alouani, P. Xia, T. R. Rice, and W. D. Blair, "On the Optimality of Two-Stage State Estimation in the Presence of Random Bias", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 38, No. 8, pp. 1279~1282.
- [8] X. Lin, Y. Bar-Shalom and T. Kirubarajan, "Exact multisensor dynamic bias estimation with local tracks", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 40, No. 2, pp. 576-590, 2004.
- [9] Y. Kim, J. Lee, B. Kim, K. Ohba, A. Ohya, "Localization error recovery based on bias estimation", Journal of Korea Robotics Society, Vol. 4, No. 2, June, 2009.
- [10] Y. Hu, Z. Duan, D. Zhou, "Estimation

Fusion with General Asynchronous Multi-Rate Sensors”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 46, No. 4, Oct. 2010.

- [11] P. Suchomski, “Explicit expressions for debiased statistics of 3-D converted measurements”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 35, No. 1, pp. 368-370, 1999.



송 하 룡 (Ha-Ryong Song)

- 정회원
- 조선대학교 제어계측공학과
학사
- 광주과학기술원 정보기전공학과
석사
- 광주과학기술원 정보기전공학과 박사
- 한국항공우주연구원 선임연구원
- 관심분야 : 센서 및 영상 신호처리, 다중 센서
융합, 다중 표적 추적, 추정 이론.