

비선형 특성을 시스템 입력으로 처리하는 추적 필터

Tracking Filter Dealing with Nonlinear Inherence as a System Input

신 상 진

Sang-Jin Shin

요 약

레이더에서 측정값은 직교 좌표계가 아니라 극 좌표계에서 얻어진다. 표적 동력학을 직교 좌표계에서 모델링하면 극 좌표계에서 획득된 측정값을 직교 좌표계로 변환한 의사 측정치를 사용하거나 확장형 칼만 필터를 사용하여 표적 추적 필터를 구현한다. 만일 표적 동력학을 극 좌표계에서 모델링하면 측정 방정식은 선형이나 동력학 방정식이 비선형이 된다. 본 논문에서는 극 좌표계에서 동력학 방정식을 모델링하고, 시스템 행렬을 시불변 형태로 모델링하여 발생한 비선형 성분을 시스템 입력으로 처리한 추적 필터를 제안한다. 이러한 추적 필터는 거리 측정값과 동시에 도플러 측정값이 가용할 경우, 측정방정식의 선형성을 그대로 유지하게 되므로 추적 필터의 알고리즘에 변동이 없고 추가된 도플러 정보를 사용하여 추적 성능을 높일 수 있다. 또한, 기존에 일반적으로 사용되고 있는 추적 필터와 제안한 모델링을 사용한 추적 필터의 추적 성능을 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

Abstract

The radar measurements are composed of range, Doppler and angles which are expressed as polar-coordinate components. An approach to match the measurements with the states of target dynamics which are modeled in cartesian coordinates is to use the pseudo-measurements or the extended Kalman filter in order to solve the mismatching problem. Another approach is that the states of dynamics are modeled in polar coordinates and measurement equation is linear. However, this approach bears that we have to deal with a time-varying dynamics. In this study, it is proposed that the states of dynamics are expressed as polar-coordinate component and the system matrix of the dynamic equation is modeled as a time-invariant. Nonlinear terms that appear due to the proposed modeling are regarded as a system input. The results of a series of simulation runs indicate that the tracking filter that uses the proposed modeling is viable from the fact that the Doppler measurement is easy to be augmented in the measurement equation.

Key words: Target Tracking, Dynamic Modeling, Radar Measurement

I. 서 론

표적 추적 필터에서 동력학 모델링의 상태변수를 직교 좌표계에서 표현하였을 경우에는 비선형 측정방정식을 다루어야 한다. 이러한 비선형 측정 방정식을 사용하여

표적 추적에 적용할 때에는 EKF(Extended Kalman filter)^[1]를 사용하거나, 의사 측정치로 변환시키는 방법을 고려할 수 있다. 의사측정치를 사용한 참고문헌 [2], [3]에서는 직교 좌표계에서 정의된 각 축의 필터 상태변수들이 서로 상관관계를 갖게 되고, 의사 측정치를 사용함으로써 바이

방위산업기술지원센터(국방과학연구소 부설) (Technical Support Center for National Defense Industry of Agency for Defense Development)

· Manuscript received March 4, 2014 ; Revised June 9, 2014 ; Accepted July 7, 2014. (ID No. 20140304-028)

· Corresponding Author: Sang-Jin Shin (e-mail: radarsjs@gmail.com)

어스가 발생하게 된다^[4]. 이렇게 상태변수를 직교 좌표계에서 정의할 때에는 표적 도플러에 의한 거리 변화율의 정보가 레이더로부터 추가적으로 들어왔을 때, 이 측정치를 측정방정식에 인가시키기가 용이하지 않다. 참고문헌 [5], [6]에서는 동력학의 상태변수를 직교 좌표계에서 모델링하고, 극 좌표계에서 획득된 측정값을 그대로 사용하면서 자코비안으로 두 좌표계의 공분산을 변환시켰다. 측정값을 얻은 극 좌표계와 동일하게 동력학의 상태변수를 극 좌표계에서 표현할 경우에는 상태변수들간에 곱셈 형태가 존재하여 비선형 방정식이 된다. 이러한 비선형 방정식을 참고문헌 [7]에서는 시변 선형방정식으로 모델링하여 표적 추적 필터에 적용시켰다. 그러나 이렇게 시변 선형방정식으로 모델링할 경우에는 상태 천이 행렬이 해석적으로 구해지기 어렵기 때문에 추적 필터의 예측 단계에서 예측된 상태변수를 정확히 구하기 위해서는 논리적으로 수치적 적분이 필요하다. 본 논문에서는 참고문헌 [7]과 유사하게 필터의 상태변수를 극 좌표계에서 표현하고 동력학 방정식에서 나타난 비선형 성분을 동력학 방정식의 입력 값으로 처리하는 추적 필터를 제시한다. 제시한 추적 필터는 표적의 도플러 효과에 의한 거리 변화를 측정값이 유효할 경우에도 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다. 본 논문의 2장에서는 직교 좌표계에서 상태변수가 정의된 전형적인 추적 알고리즘과 참고문헌 [7]의 필터 알고리즘을 설명한다. 3장에서는 본 논문에서 제시하는 동력학 모델링을 설명하고, 추적 필터 알고리즘을 도출한다. 4장에서는 의사 측정치를 사용한 2-1절의 추적 필터와 본 논문에서 제시하는 추적 필터의 추정 성능을 비교하고, 제시한 추적 필터의 유용성을 입증한다.

II. 동력학 모델링과 추적필터

2.1 직교 좌표계 모델링을 사용한 추적필터

필터 동력학 모델에서 상태 변수 벡터는 표적의 위치, 속도와 Singer 모델^[8]에서 제시된 표적 가속도 등으로 구성되어 있고, 직교 좌표계에서 표현된 것들이다.

상태변수를 직교 좌표계에 나타낸 동력학 방정식은 다음과 같고, 그림 1에 나타내었다.

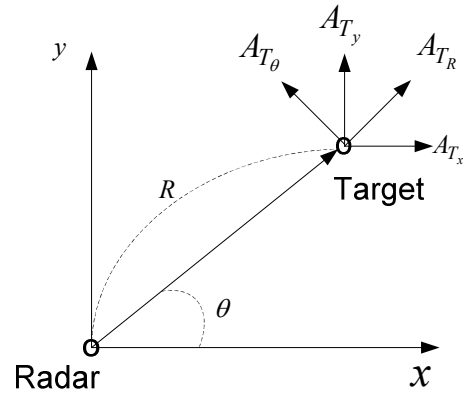


그림 1. 표적과 레이더의 기하관계
Fig. 1. Geometry between target and radar.

$$\dot{x} = Ax + Dw \tag{1}$$

$$x = (x, y, \dot{x}, \dot{y}, A_{T_x}, A_{T_y})^T \tag{2}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0_2 & I_2 & 0_2 \\ 0_2 & 0_2 & I_2 \\ 0_2 & 0_2 & -\frac{1}{\tau}I_2 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0_2 \\ 0_2 \\ \frac{1}{\tau}I_2 \end{bmatrix} \tag{3}$$

여기서 $w = (w_x, w_y)^T$ 는 백색 가우시안 노이즈 벡터로서 평균값이 0이고, $2\tau\sigma_{A_T}^2$ 의 power spectral density를 가지고 있다. 식 (3)에서 0_2 는 2×2 의 영 행렬이고, I_2 는 2×2 의 단위행렬이다. $t = t_k$ 상태에서 표적추적 필터의 측정치는 표적까지의 거리와 각도로써 구성되어 있다.

$$\begin{pmatrix} z_R \\ z_\theta \end{pmatrix}_k = \begin{pmatrix} \sqrt{x^2 + y^2} + v_R \\ \tan^{-1} \frac{y}{x} + v_\theta \end{pmatrix}_k \tag{4}$$

여기서 v_R 과 v_θ 은 평균이 '0'이고, 분산이 각각 σ_R^2 과 σ_θ^2 을 가진 백색 가우시안 노이즈이다. 표적까지 거리와 각도를 추적필터의 상태변수로 나타내면 측정방정식은 비선형 형태가 되며, 이를 해결하기 위해서 다음과 같은 의사 측정치를 사용하는 방법이 참고문헌 [2], [3]에 있다.

$$z_x = z_R \cos z_\theta$$

$$z_y = z_R \sin z_\theta \quad (5)$$

식 (1)~(5)를 사용한 표적 추적 필터는 다음과 같이 예측 단계와 갱신 단계로 요약될 수 있다.

○ 예측 단계

$$\bar{x}_k = \Psi \hat{x}_{k-1} \quad (6)$$

$$\bar{P}_k = \Psi \hat{P}_{k-1} \Psi^T + Q \quad (7)$$

○ 갱신 단계

$$K_{R_k} = \bar{P}_k H^T (H \bar{P}_k H^T + R_k)^{-1} \quad (8)$$

$$\hat{x}_k = \bar{x}_k + K_{R_k} (y - H \bar{x}_k) \quad (9)$$

$$\hat{P}_k = (I - K_{R_k} H) \bar{P}_k (I - K_{R_k} H)^T + K_{R_k} R_k K_{R_k}^T \quad (10)$$

여기서 Ψ 는 식 (1)의 상태 천이 행렬이고, 측정 행렬 $H = (I_2, 0_2, 0_2)$ 이고, 측정벡터 $y \Delta (z_x, z_y)^T$ 이다. K_{R_k} 는 칼만 이득이고, 식 (8)에서 R_k 는 다음과 같이 표현된다^[2].

$$R_k = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy}^2 \\ \sigma_{xy}^2 & \sigma_y^2 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\sigma_x^2 = \sigma_R^2 \cos^2 \bar{\theta} + \sigma_\theta^2 \bar{R}^2 \sin^2 \bar{\theta} \quad (12)$$

$$\sigma_y^2 = \sigma_R^2 \sin^2 \bar{\theta} + \sigma_\theta^2 \bar{R}^2 \cos^2 \bar{\theta} \quad (13)$$

$$\sigma_{xy}^2 = \frac{1}{2} \sin 2\bar{\theta} (\sigma_R^2 - \sigma_\theta^2 \bar{R}^2) \quad (14)$$

여기서 \bar{R} 와 $\bar{\theta}$ 는 예측된 거리와 각도를 나타내며, 식 (6)의 예측된 상태변수로 나타내면 $\bar{R} = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$ 이고, $\bar{\theta} = \tan^{-1}(\bar{y}/\bar{x})$ 이다. 식 (11)의 R_k 를 사용하게 되면 직교 좌표계로 나타난 각 축의 상태변수는 서로 상관관계를 갖게 되어 공분산 행렬의 모든 성분이 0이 아닌 값으로 변하게 되며, 6×6 행렬계산을 하게 된다.

2-2 극 좌표계 모델링을 사용한 추적필터

참고문헌 [7]에서 제시한 추적필터 구조는 동력학 방정식과 측정방정식이 모두 선형구조이지만, 동력학 방정식이 시변 구조를 갖는 것이 특징이다. 참고문헌 [7]에서 표적의 동력학 방정식은 거리와 관련된 상태변수, 각도와 관련된 상태변수로 분리하여 동력학 방정식을 나타내었으며, 거리에 관한 동력학 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{x}_R = A_R x_R + D w_R \quad (15)$$

$$x_R = \begin{pmatrix} R \\ \dot{R} \\ A_{T_R} \end{pmatrix}, A_R = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \hat{\theta}^2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서 거리와 관련된 상태변수 x_R 은 거리, 거리의 변화율, 거리방향에 나타난 표적의 가속도성분으로 구성되어 있으며, 그림 1에 도시되어 있다. w_R 은 백색 가우시안 노이즈로써 평균값이 0이고, $2\tau\sigma_{A_{T_R}}^2$ 의 power spectral density를 가지고 있다. 식 (16)에서 $\hat{\theta}$ 은 각속도 추정값이다. 각도에 관한 동력학 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{x}_\theta = A_\theta x_\theta + D w_\theta \quad (17)$$

$$x_\theta = \begin{pmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ A_{T_\theta} \end{pmatrix}, A_\theta = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -2\frac{\hat{R}}{\hat{R}} & \frac{1}{\hat{R}} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \quad (18)$$

위 식에서 각도와 관련된 상태변수 x_θ 는 각도, 각속도, 거리방향의 수직 축에 나타난 표적의 가속도 성분으로 구성되어 있다. w_θ 은 백색 가우시안 노이즈로써 평균값이 0이고, $2\tau\sigma_{A_{T_\theta}}^2$ 의 power spectral density를 가지고 있다. 식 (18)에서 \hat{R} , $\hat{\dot{R}}$ 은 거리와 거리 변화율의 추정값이다. 참고문헌 [7]에서 추적 필터의 측정방정식은 다음과 같이 거리와 각도로 구성되어 있다.

$$z_R = (1 \ 0 \ 0)x_R + v_R \quad (19)$$

$$z_\theta = (1 \ 0 \ 0)x_\theta + v_\theta \quad (20)$$

식 (15)~(18)에서 시스템 행렬인 A_R 과 A_θ 의 내부에 는 상태변수의 추정 값이 존재하여 시변 시스템으로 볼 수 있으며, 이러한 동력학 방정식을 사용한 추적 필터는 다음과 같이 요약된다.

○ 예측 단계

$$\dot{\hat{x}}_R = A_R \hat{x}_R \quad (21)$$

$$\dot{\hat{x}}_\theta = A_\theta \hat{x}_\theta \quad (22)$$

$$\dot{\hat{P}}_R = A_R \hat{P}_R + \hat{P}_R A_R^T + Q_R \quad (23)$$

$$\dot{\hat{P}}_\theta = A_\theta \hat{P}_\theta + \hat{P}_\theta A_\theta^T + Q_\theta \quad (24)$$

○ 갱신 단계

$$\hat{x}_R = \bar{x}_R + K_R(z_R - H\bar{x}_R) \quad (25)$$

$$\hat{x}_\theta = \bar{x}_\theta + K_\theta(z_\theta - H\bar{x}_\theta) \quad (26)$$

$$K_R = \bar{P}_R H^T (H\bar{P}_R H^T + R_R)^{-1} \quad (27)$$

$$K_\theta = \bar{P}_\theta H^T (H\bar{P}_\theta H^T + R_\theta)^{-1} \quad (28)$$

$$\hat{P}_R = (I - K_R H)\bar{P}_R(I - K_R H)^T + K_R R_R K_R^T \quad (29)$$

$$\hat{P}_\theta = (I - K_\theta H)\bar{P}_\theta(I - K_\theta H)^T + K_\theta R_\theta K_\theta^T \quad (30)$$

여기서 K_R, K_θ 는 칼만 이득을 나타내며, 측정 행렬 $H = (1, 0, 0)$ 이고, $R_R = \sigma_R^2$, $R_\theta = \sigma_\theta^2$ 이다. 식 (15) ~ (18)과 같이 시변 시스템 행렬을 갖는 추적필터는 추적 필터의 예측 단계에서 수치적분을 수행해야 한다. 이러한 수치적분 방법은 계산량이 증가되므로 참고문헌 [2]에서 는 sampling interval 동안에 시불변 시스템으로 가정함과 동시에 상태 천이 행렬을 구하는 과정에서 Taylor series를

사용하여 근사화한 상태 천이 행렬을 구하였다.

III. 제안한 추적필터

본 논문에서는 식 (19)~(20)과 같은 측정방정식을 사 용하고, 동력학 방정식도 극 좌표계로 모델링하여 추적필 터 알고리즘을 도출한다. 이러한 경우에 동력학 방정식에 는 거리와 각도의 상태변수들이 곱셈 형태로 결합된 비 선형 성분이 발생하는데, 이러한 성분들을 시스템 입력으 로 처리하는 방법으로 모델링한다. 이러한 방법은 상태 천이 행렬이 시불변 형태로 되어 2-2절의 결과와 다른 형 태의 선형 동력학 방정식을 사용하게 된다.

제안하는 필터 동력학 방정식에서 상태변수는 다음과 같다.

$$x = (R, \theta, \dot{R}, \dot{\theta}, A_{T_R}, \frac{1}{R} A_{T_\theta})^T \quad (31)$$

표적에 대한 기동모델은 Singer^[8] 모델을 사용하여 동 력학 방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Dw + C_1 u_1 + C_2 u_2 \quad (32)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0_2 & I_2 & 0_2 \\ 0_2 & 0_2 & I_2 \\ 0_2 & 0_2 & -\frac{1}{\tau} I_2 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0_2 \\ 0_2 \\ \frac{1}{\tau} I_2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 0_2 \\ -I_2 \\ 0_2 \end{bmatrix}, \quad C_2 = (0,0,0,0,0,-1)^T \quad (34)$$

$$u_1 = \begin{pmatrix} -\hat{\theta}^2 \hat{R} \\ 2\hat{R}\hat{\theta} \\ \hat{R} \end{pmatrix}, \quad u_2 = \frac{\hat{R}\hat{A}_{T_\theta}}{\hat{R}^2} \quad (35)$$

$$w = \left(w_R, \frac{1}{R} w_\theta \right)^T \quad (36)$$

2장에서 설명한 추적필터의 동력학 방정식인 식 (1)과 식 (15)~(17)과 비교하면 식 (32)의 제안한 추적필터의

동력학 방정식은 두 개의 시스템 입력 u_1 과 u_2 를 사용하고 있다. 시스템 입력 u_1 과 u_2 는 거리와 각도에 대한 상태변수를 동력학 방정식에 정의하면서 발생하는 비선형 항들을 분류한 것이다. 이렇게 비선형 특성을 선형시스템으로 변환하기 위해 두 개의 시스템 입력을 사용하게 되면 식 (33)과 같이 시스템 행렬이 시불변 선형 형태가 되며, 특별한 가정 없이 추적필터 알고리즘을 구할 수 있다. 제시하는 필터 모델에 대한 측정방정식은 다음과 같다.

$$z = (I_2 \quad 0_2 \quad 0_2)x + v, \quad v = (v_R, v_\theta)^T \quad (37)$$

식 (32)~(37)으로부터 제안한 추적필터를 요약하면 다음과 같다.

○ 예측 단계

$$\bar{x}_k = \Psi \hat{x}_{k-1} + \Gamma_1 u_{1,k-1} + \Gamma_2 u_{2,k-1} \quad (38)$$

$$\bar{P}_k = \Psi \hat{P}_{k-1} \Psi^T + Q \quad (39)$$

○ 갱신 단계

$$K_{R_k} = \bar{P}_k H^T (H \bar{P}_k H^T + R_k)^{-1} \quad (40)$$

$$\hat{x}_k = \bar{x}_k + K_{R_k} (z_k - H \bar{x}_k) \quad (41)$$

$$\hat{P}_k = (I - K_{R_k} H) \bar{P}_k (I - K_{R_k} H)^T + K_{R_k} R_k K_{R_k}^T \quad (42)$$

위 식에서 R_k 는 $R_k = \text{diag}(\sigma_R^2, \sigma_\theta^2)$ 이고, $H = (I_2 \quad 0_2 \quad 0_2)$ 으로 표현되고, Γ_1 과 Γ_2 는 다음과 같다.

$$\Gamma_1 = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} \Delta t^2 I_2 \\ -\Delta t I_2 \\ 0_2 \end{pmatrix}, \Gamma_2 = - \begin{pmatrix} 0 \\ \tau^3 - \tau^2 \Delta t + \frac{\tau}{2} \Delta t^2 - \tau^3 e^{-\Delta t/\tau} \\ 0 \\ -\tau^2 + \tau \Delta t + \tau^2 e^{-\Delta t/\tau} \\ 0 \\ \tau - \tau e^{-\Delta t/\tau} \end{pmatrix} \quad (43)$$

식 (33)에서 시스템 행렬과 입력행렬의 성분들이 거리와 각도 간에 상관관계가 없어서 식 (38)~(42)의 알고리

즘은 거리와 각도로 분리하여 계산할 수 있으며, 이러한 경우 계산량을 감소시킬 수 있다. 또한, 펄스 도플러 레이더의 경우에는 도플러 주파수를 신호처리기에서 계산하여 거리 변화율을 구할 수 있으며, 이러한 경우에 식 (37)은 다음과 같이 모델링된다.

$$z = (I_3 \quad 0_3 \quad 0_3)x + v, \quad v = (v_R, v_\theta, v_{\dot{R}})^T \quad (44)$$

식 (44)에서 0_3 는 3×3 의 영 행렬이고, I_3 는 3×3 의 단위행렬이다. 그러므로 식 (40)~(42)의 측정행렬인 H 행렬은 다음과 같이 변경하여 준다면 추적필터 알고리즘을 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다.

$$H = (I_3 \quad 0_3 \quad 0_3) \quad (45)$$

IV. 시뮬레이션

직교 좌표계를 사용한 식 (6)~(10)의 추적필터와 본 논문에서 제안한 추적필터인 식 (38)~(42)의 필터에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션은 회피기동을 하는 표적을 대상으로 하였으며, 표적의 초기 위치는 그림 1의 직교 좌표계에서 (3 km, 5 km)에 위치한다. 580 m/sec 의 이동속도로 비행하며, 비행 경로 각은 60° 하였다. 표적의 가속도는 10초 후에 측 방향으로 10 m/sec^2 크기로 기동한다고 가정하였다. 식 (1)~(3)에 사용된 파라미터에서 $\tau=30$, $\sigma_{A_r} = 10$ 으로 하였고, 식 (32)~(33)에 사용된 파라미터에서 $\sigma_{A_{rR}} = 10$, $\sigma_{A_{r\theta}} = 5$, $\tau=30$ 으로 하였다. 측정 잡음에 관하여는 $\sigma_R = 60(m)$, $\sigma_\theta = 1(mrad)$ 로 두 가지 추적필터에 동일하게 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 샘플링 주파수는 5 Hz로 하였으며, 상태변수의 추정 결과를 그림 2에서 5까지 도시하였다. 그림 2는 표적의 궤적을 나타낸 그림으로써 10초 이후에 표적이 기동하여 궤적의 진행방향을 바뀌게 된다. 그림 2에서 표적의 실제 궤적은 적색선으로 나타내었고, 식 (6)~(10)의 추적필터 결과는 흑색선으로 나타내었으며, 본 논문에서 제안한 추적필터는 청색선으로 나타내었다. 그림 2에서 두 추적필터의 위치 추정 결과는 표적의 궤적을 잘 추정하고 있음을 볼 수 있다. 그림 3은 직교 좌표계 x 축에 나타난 표적의 가속도를 추정한 그림으로 두 가지

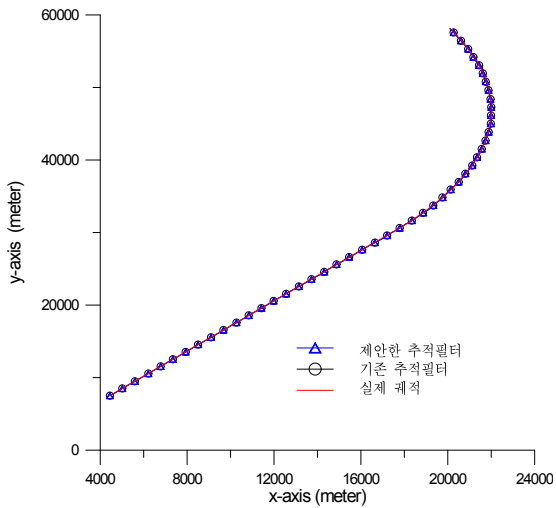


그림 2. 표적의 궤적
Fig. 2. Target trajectory.

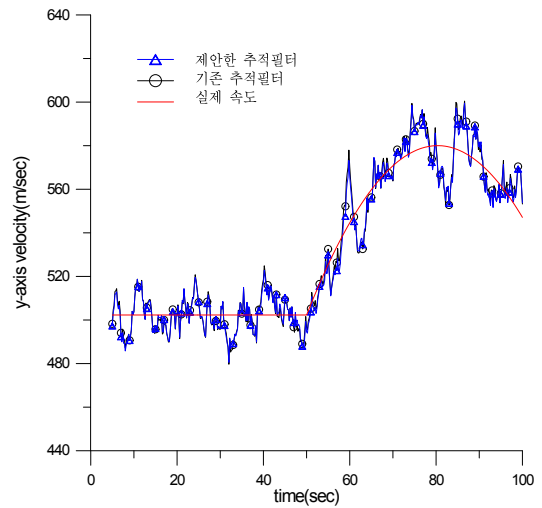


그림 4. y 축 속도 추정 성능
Fig. 4. Estimation performance of y -axis velocity.

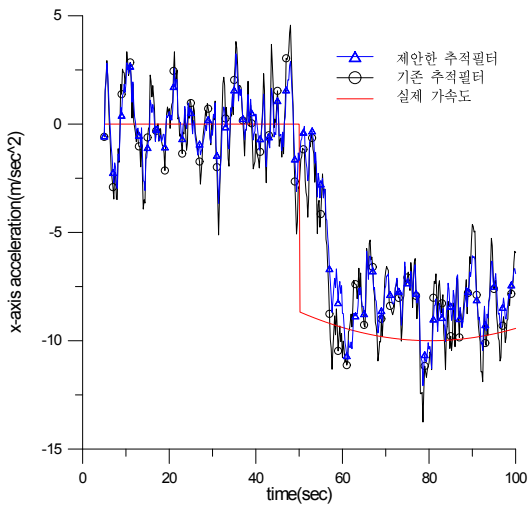


그림 3. x 축 가속도 추정 성능
Fig. 3. Estimation performance of x -axis acceleration.

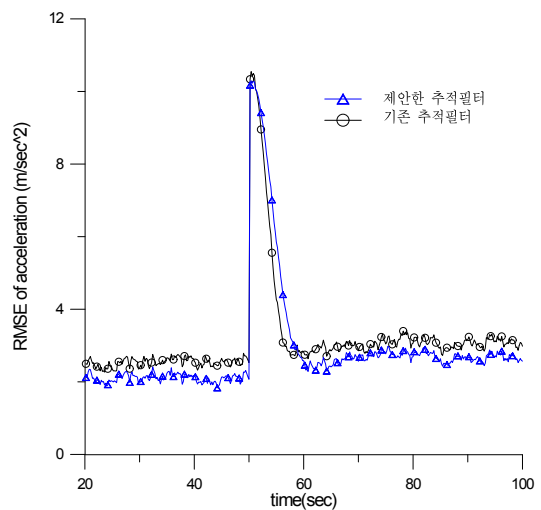


그림 5. 추정가속도의 RMSE
Fig. 5. RMSE of acceleration.

추적필터의 성능이 유사함을 알 수가 있다. 그림 4는 직교 좌표계 y 축에 나타난 표적의 속도를 추정한 그림으로 그림 3과 동일하게 두 가지 추적필터의 성능이 유사함을 알 수가 있다. 그림 3~4의 경우도 표적의 실제 가속도 및 속도는 적색선으로 나타내었고, 식 (6)~(10)의 추적필터 결과는 흑색선으로 나타내었으며, 본 논문에서 제안한 추적필터는 청색선으로 나타내었다.

그림 5와 그림 6은 100번의 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행하여 가속도 및 속도에 대한 RMSE(Root-Mean Squared Error)를 보여주고 있으며, 두 추적 필터의 추정 성능이 유사함을 알 수 있다. 그림 3~6의 결과로부터 본 논문에서 제안한 추적필터는 기존에 사용된 추적필터와 유사한 추적 성능을 갖고 있으며, 레이더의 도플러 측정값이 유효할 때 식 (44)와 같이 측정행렬만 변경함으로써 도플

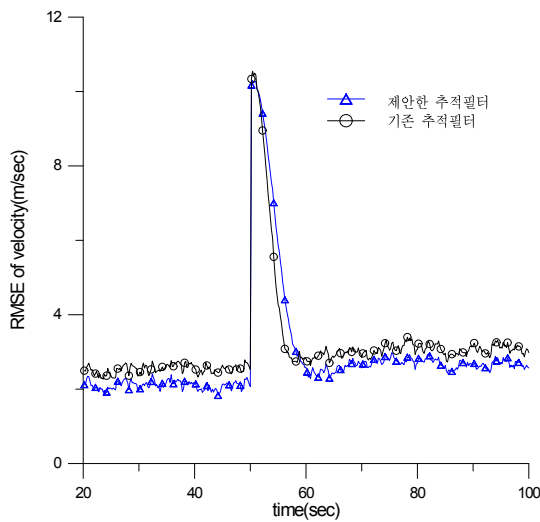


그림 6. 추정속도의 RMSE
Fig. 6. RMSE of velocity.

러 측정값을 추적필터에 사용되어 추적 성능을 높힐 수 있으므로 유용함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 극 좌표계에서 동력학 방정식을 모델링 하고, 시스템 행렬을 시불변 형태로 모델링하여 발생한 비선형 성분을 시스템 입력으로 처리한 추적필터를 제안 하였다. 제안한 추적필터는 거리와 각도 간의 상태변수들 이 상관관계가 없어서 계산량을 감소시킬 수 있으며, 또 한 거리 측정값과 동시에 도플러 측정값이 가용할 경우, 측정방정식의 선형성을 그대로 유지하게 되고, 추적필터 알고리즘에 변동이 없어서 시스템에 적용시키기에 용이 하다. 본 논문에서 제안한 추적필터의 성능을 평가하기 위해 기존에 일반적으로 사용되고 있는 추적필터와 동일 한 환경 하에서 시뮬레이션을 수행하였으며, 필터 성능에

차이가 없는 것으로 보아 제시하는 추적필터가 도플러를 측정할 수 있는 레이더에 유용함을 알 수 있다.

References

- [1] A. Jazwinski, *Stochastic Processes and Filtering Theory*, Academic Press, 1970.
- [2] S. Blackman, R. Popoli, *Design and Analysis of Modern Tracking Systems*, Artech House, 1999.
- [3] T. L. Song, J. Y. Ahn, and C. Park, "A suboptimal filter design with pseudo measurements for target tracking", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 28-39, 1988.
- [4] D. Lerro, Y. Bar-Shalom, "Tracking with debiased consistent measurements versus EKF", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 29, no. 3, pp 1015-1022, 1993.
- [5] Raman K. Mehra, "A comparison of several nonlinear filters for reentry vehicle tracking", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 16, pp. 307-319, Aug. 1971.
- [6] Peter J. Costa, "Adaptive model architecture and extended Kalman-Bucy filters", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 30, pp. 525-533, Apr. 1994.
- [7] J. Pearson, E. Stear, "Kalman filter applications in airborne radar tracking", *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 319-329, 1974.
- [8] R. A. Singer, "Estimating optimal tracking filter performance for manned maneuvering target", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 473-483, 1970.

신 상 진



1989년~1995년: 한양대학교 제어계측공학과 (공학사)

1996년~1998년: 한양대학교 제어계측공학과 유도제어연구실 (공학석사)

1998년~2002년: 한양대학교 제어계측공학과 유도제어연구실 (공학박사)

2003년~2004년: K1 기술연구소 선임연구

원

2005년~2013년: 국방과학연구소 선임연구원

2014년~현재: 방위산업기술지원센터(국방과학연구소 부설) 선임연구원

[주 관심분야] 표적 추적필터, 레이더 신호처리 알고리즘, 레이더 파형 및 시스템 설계