

차량 충돌 방지 시스템을 위한 선형 순환 표적 추정기 설계

한슬기*, 나원상**, 황익호***, 박진배*

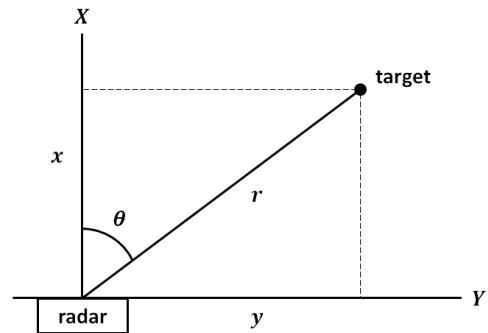
연세대학교 전기전자공학과*, 한동대학교 기계제어공학부**, 국방과학연구소***

Design of Linear Recursive Target State Estimator for Collision Avoidance System

Seul-Ki Han*, Won-Sang Ra**, Ick-Ho Whang***, Jin-Bae Park*

Yonsei University*, Handong Global University**, Agency for Defense Development***

Abstract - This paper proposes a new linear recursive target state estimator for automotive collision warning system. The target motion is modeled in Cartesian coordinate system while the radar measurements such as range, line-of-sight angle and range rate are obtained in polar coordinate system. To solve the problem by nonlinear relation between these two coordinate system, a practical linear filter design scheme employing the predicted line-of-sight Cartesian coordinate system (PLCCS) is proposed. Especially, PLCCS can effectively incorporate range rate measurements into target tracking system. It is known that the utilization of range rate measurements enables the improvement of target tracking performance. Moreover, PLCCS based target tracking system is implemented by linear recursive filter structure and hence is more suitable scheme for the development of reliable collision warning system. The performance of the proposed method is demonstrated by computer simulations.



<그림 1> 레이더 좌표계

1. 서 론

차량 충돌 방지 시스템은 운전자에게 충돌 위험을 경고해줌으로써, 사전에 자동차 사고를 방지하는 것을 목적으로 한다 [1]. 이를 위하여, 차량용 레이더 센서로부터 주변 장애물에 대한 정보를 취득한 후 이를 기반으로 표적 추적을 수행한다. 레이더 측정치를 이용하여 표적의 위치 및 속도 정보를 추정할 수 있으며 이는 주행 안전도를 평가하기 위하여 사용될 수 있다. 따라서 표적 위치 및 속도의 추정 성능은 충돌 방지 시스템의 성능에 직접적인 영향을 주는 요인이다. 건설한 충돌 방지 시스템의 개발을 위하여 신뢰할 수 있는 표적 위치 및 속도 추정이 수행되어야 한다.

일반적으로 표적 운동 모델은 관성좌표계에서 정의되는 반면에 거리, 각도, 거리 변화율과 같은 레이더 센서 측정치는 극좌표계에서 정의된다. 관성좌표계 기반의 표적 추적을 수행하기 위하여, 극좌표계에서 정의된 측정치를 사용하기 위한 방법이 제안되어야 한다. 이를 위하여 극좌표계 측정치를 관성좌표계로 변환하는 방법 [2]과 비선형 필터링 기법인 확장 칼만 필터(EKF: Extended Kalman Filter)를 사용하는 방법 [3]이 제안되었다. 하지만, 변환 측정치는 편향오차를 가지며, EKF의 사용은 전역 최적 상태추정 및 시스템 안정성을 보장하지 못한다는 문제점이 있다. 또한, 전술한 두 방법은 거리변화율 측정치를 사용하는데 적합하지 못하다. 거리변화율은 관성좌표계에서 큰 비선형성을 가진 측정치이지만 표적 추적 성능을 향상시키는데 큰 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다 [4]. 따라서 표적 추적 시스템에서 효과적으로 거리변화율 측정치를 사용할 수 있는 기법의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 이전 방법들의 한계점을 극복하기 위하여, 새로운 레이더 표적 추적 기법을 제안한다. 제안한 레이더 표적 추적 기법은 비선형성이 큰 거리변화율 측정치를 효과적으로 사용하기 위하여, 예측시선좌표계(PLCCS: Predicted Line-of-Sight Cartesian Coordinate System) [5]를 도입한다. PLCCS는 표적 추적 필터의 사전 추정치를 이용하여 예측한 시선 벡터를 x축으로 정의하는 관성좌표계이다. 예측한 시선 벡터와 실제 시선 벡터의 차이가 근소하다면, 거리변화율 측정치는 PLCCS의 x 속도로 근사화될 수 있다. 따라서, 거리변화율 측정치는 레이더 표적 시스템에서 안정적으로 사용될 수 있다. 더불어 PLCCS의 도입으로 인해 선형 순환 표적 추정기가 구현되므로, 제안한 기법은 실제 응용 분야에서 적극적으로 사용될 수 있는 방법이다. 모의실험을 통해 제안한 PLCCS 기반 표적 추정기법의 유용성을 확인한다.

2. 본 론

2.1 시스템 모델 및 측정 모델

표적 운동 모델식과 레이더 측정 모델식을 소개하고자 한다. 표적 추적을 위한 레이더 좌표계는 그림 1과 같다. 표적은 등속도 운동을 하는

것으로 가정하며, 표적 운동 모델은 식 (1)과 같이 관성좌표계에서 정의된다.

$$\mathbf{x}_{k+1} = F_k \mathbf{x}_k + G_k \mathbf{w}_k \quad (1)$$

여기서

$$\mathbf{x}_k = [x_k \ y_k \ \dot{x}_k \ \dot{y}_k]^T, \\ F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T_s & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T_s \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad G_k = \begin{bmatrix} T_s^2/2 & 0 & T_s & 0 \\ 0 & T_s^2/2 & 0 & T_s \end{bmatrix}^T$$

표적 상태 변수 \mathbf{x}_k 는 표적의 x 및 y 위치와 속도로 이루어진다. 공정 잡음은 공분산이 Q_k 인 영평균 가우시안 분포로 가정하며, T_s 는 샘플링 시간이다.

레이더 센서는 거리 r, 시선 각도 θ 그리고 거리 변화율 \dot{r} 을 제공하므로, 측정 모델식은 식 (2)와 같이 비선형 방정식이 된다.

$$\mathbf{z}_k = h(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \quad (2)$$

여기서

$$\mathbf{z}_k = \begin{bmatrix} r_k^m \\ \theta_k^m \\ \dot{r}_k^m \end{bmatrix}, \quad h(\mathbf{x}_k) = \begin{bmatrix} r_k \\ \theta_k \\ \dot{r}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{x_k^2 + y_k^2} \\ \tan^{-1}(y_k/x_k) \\ \frac{x_k \dot{x}_k + y_k \dot{y}_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v}_k = \begin{bmatrix} v_r \\ v_\theta \\ v_{\dot{r}} \end{bmatrix}$$

측정 잡음을 이루는 v_r , v_θ 그리고 $v_{\dot{r}}$ 은 영평균 가우시안 분포를 만족하는 것으로 가정하며 각각의 공분산은 σ_r^2 , σ_θ^2 그리고 $\sigma_{\dot{r}}^2$ 이다. 따라서 측정잡음 \mathbf{v}_k 의 공분산은 $R_k = \text{diag}(\sigma_r^2, \sigma_\theta^2, \sigma_{\dot{r}}^2)$ 이며 사전에 아는 값으로 간주한다.

레이더 표적 추적 문제에서는 표적의 운동 모델은 관성좌표계에서 정의되는 반면 레이더 측정치는 극좌표계에서 얻어지므로, 취득한 레이더 측정치를 바로 사용하기 어렵다는 문제점이 있다. 특히, 거리변화율 측정치는 표적 추적 성능에 큰 영향을 끼치나 관성좌표계에서 비선형성이 크므로 사용하기가 용이하지 않았다. 따라서, 이를 효과적으로 사용하기 위한 기법이 제시될 필요가 있으며 이는 다음 절에서 확인할 수 있다.

2.2 PLCCS 기반의 표적 추적 기법

거리변화율 측정치의 효과적인 사용을 위한 PLCCS 기반의 표적 추적 기법을 소개한다. PLCCS는 표적 추적 필터의 사전 추정치를 이용하여 예측한 시선 벡터를 x축으로 정의하는 관성좌표계이다. 예측한 시선 벡터와 실제 시선 벡터의 차이가 근소하다면, 거리변화율 측정치는 PLCCS의 x 속도로 근사화될 수 있다. 따라서, 거리변화율 측정치는 레이더 표적 시스템에서 효과적으로 사용될 수 있다.

[참고 문헌]

[1] P.E. An and C.J. Harris, "An Intelligent driver warning system for vehicle collision avoidance", *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, vol. 26, no. 2, pp. 1083-4427, 1996

[2] Zhanlue Zhao, X.R. Li, V.P. Jilkov and Yunmin Zhu, "Optimal linear unbiased filtering with polar measurements for target tracking", *In International Conference on Information Fusion*, vol. 2, pp. 1527-1534, 2002

[3] L. Zollo, and B. Ristic, "On polar and versus Cartesian coordinates for target tracking", *Proceedings of the Fifth International Symposium on Signal Processing and Its Applications*, vol. 2, pp. 499-502, 1999

[4] J. Ru, H. Chen, X.R. Li, and G. Chen, "A range rate based detection technique for tracking a maneuvering target", *Proceedings of the SPIE*, vol. 5913, pp.564-576, 2005

[5] S.T. Park, and G.L. Jang, "A decoupled adaptive tracking filter for real applications", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 33, no. 3, pp. 1025-1030, 1997

표적 추적 필터의 시간 갱신은 관성좌표계에서 수행되며, 측정치 갱신만이 PLCCS에서 수행된다. 따라서 필터의 시간 갱신 이후에 PLCCS로의 좌표변환이 수행되어야 하며, 측정치 갱신 이후에 좌표계를 재변환하는 과정이 반드시 수행되어야 한다. 사전 표적 추정치 및 오차 공분산과 극좌표계 측정치의 PLCCS로의 좌표변환은 식 (3)과 같으며, 좌표계의 재변환은 식 (4)와 같다.

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^P = C_{4,k} \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^C \quad (3)$$

$$P_{k|k-1}^P = C_{4,k} P_{k|k-1}^C C_{4,k}^T$$

$$\mathbf{z}_k^P = C_{3,k} \mathbf{z}_k^C = H \mathbf{x}_k^P + \mathbf{v}_k^P$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k}^C = C_{4,k}^T \hat{\mathbf{x}}_{k|k}^E \quad (4)$$

$$P_{k|k}^C = C_{4,k}^T P_{k|k}^E C_{4,k}$$

여기서

$$C_{4,k} = \begin{bmatrix} C_{2,k} & O_{(2 \times 2)} \\ O_{(2 \times 2)} & C_{2,k} \end{bmatrix}, C_{3,k} = \begin{bmatrix} C_{2,k} & O_{(2 \times 1)} \\ O_{(1 \times 2)} & C_{2,k} \end{bmatrix},$$

$$C_{2,k} = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\theta}_{k|k-1}) & \sin(\hat{\theta}_{k|k-1}) \\ -\sin(\hat{\theta}_{k|k-1}) & \cos(\hat{\theta}_{k|k-1}) \end{bmatrix},$$

$$\hat{\theta}_{k|k-1} = \tan^{-1}(\hat{y}_{k|k-1} / \hat{x}_{k|k-1}),$$

$$\mathbf{z}_k^C = [r_k^m \cos(\theta_k^m) \quad r_k^m \sin(\theta_k^m) \quad \dot{r}_k^m]^T,$$

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

윗첨자 P와 C는 각각 관성좌표계 및 PLCCS에서 정의되었음을 의미한다. 사전 표적 추정치 및 오차 공분산의 좌표변환은 변환행렬 C_{4,k}에 의해 수행된다. 극좌표계 측정치는 먼저 관성좌표계로 변환된 후에, 변환행렬 C_{3,k}를 이용하여 PLCCS로 변환된다. 변환행렬은 사전 추정치에 의해 계산된 시선 각도 θ_{k|k-1}를 기반으로 계산된다. PLCCS를 사용하는 경우에 측정잡음 v_k^P은 영평균 가우시안 분포로 가정하며 측정잡음의 공분산은 P_k^P ≅ diag(σ_r², r_k^mσ_θ², σ_v²)으로 근사할 수 있으므로, 취득한 측정치와 사전에 아는 값으로부터 계산될 수 있다. 극좌표계에서 정의된 레이더 측정치를 사용함에도 불구하고 PLCCS의 도입으로 인해 선형 필터 추정기를 구현할 수 있다.

2.3 모의실험

제한한 PLCCS 기반 표적 추적 기법의 우수성을 입증하기 위하여 모의실험을 수행한다. 표적의 궤적 및 레이더 센서로부터 취득한 표적 추정치는 그림 2에 도시하였다. 레이더 센서는 차량의 전면부에 장착된 것으로 가정한다. 추적하고자 하는 표적은 등속도 운동을 하는 것으로 가정한다. 표적 추적은 9.5[sec] 동안 수행되었으며 모의실험 조건은 다음과 같다.

$$T_s = 0.3[sec], \quad \sigma_r = 0.25[m], \quad \sigma_\theta = 1[^\circ], \quad \sigma_v = 0.14[m/sec],$$

$$\mathbf{x}_0 = [180[m] \quad 20[m] \quad 60[km/h] \quad 7[km/h]^T$$

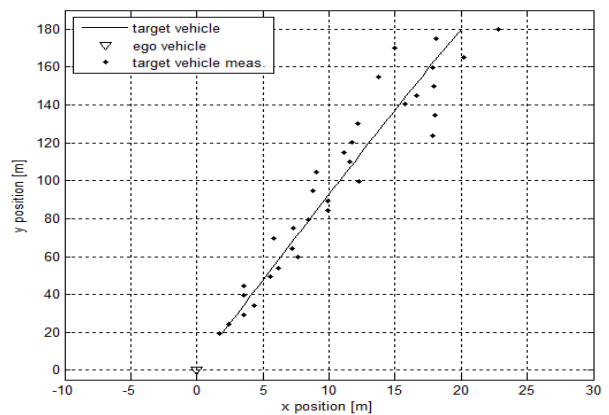
표적의 초기 위치 및 속도는 x₀와 같다. 성능 비교를 위하여, 극좌표계 추정치 사용을 위해 가장 널리 사용되는 EKF 추정기가 사용되었다. x, y의 위치 및 속도 RMSE는 각각 그림 3과 4와 같다. 제안한 추정기법은 비선형성이 큰 거리변화를 측정치를 사용함에도 불구하고 신뢰할만한 추정치를 제공해줄 수 있다. 따라서 제안한 PLCCS 기반의 표적 추적 필터는 실제 응용분야에서 적극적으로 사용될 수 있는 새로운 대안이라 할 수 있다.

3. 결 론

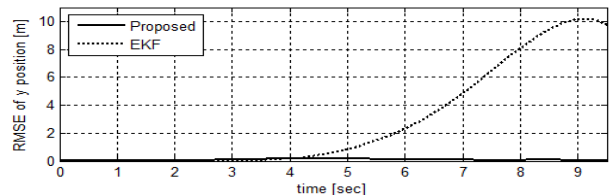
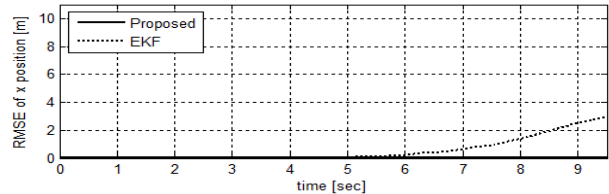
본 논문에서는 차량 충돌 방지 시스템을 구현하기 위하여, PLCCS 기반의 표적 추적 기법을 제안하였다. 제안한 PLCCS 기반의 표적 추적 기법은 차량용 레이더 센서로부터 취득한 극좌표계 측정치들을 효과적으로 사용할 수 있음을 확인하였다. 특히, PLCCS의 도입은 거리변화율 측정치를 표적 추적 시스템에서 효과적으로 사용할 수 있도록 하였다. 거리변화율 측정치는 표적 추적 성능을 향상시킬 수 있으나 관성좌표계에서 큰 비선형성을 가지기 때문에 기존의 방법으로는 사용이 용이하지 않았다. 제안한 PLCCS 기반의 표적 추적 기법은 극좌표계 측정치의 안정적인 사용을 가능케 할 뿐만 아니라 선형 순환필터구조를 사용하므로 실제 응용 분야에 적합할 것으로 기대된다.

감사의 글

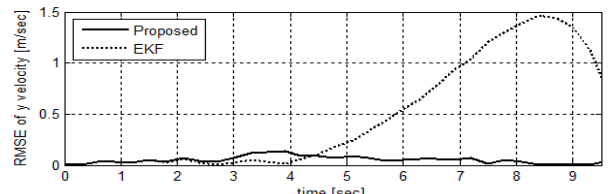
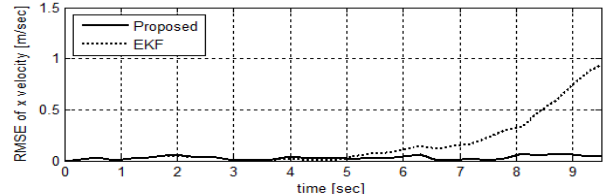
이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0005441)



<그림 2> 표적 궤적 및 표적 추정치



<그림 3> 표적 위치 추정치의 RMSE



<그림 4> 표적 속도 추정치의 RMSE