

연합형 칼만필터 이용한 다중감지기 환경에서의 기동표적 추적 Maneuvering-Target Tracking Using the Federated Kalman Filter with Multiple Sensors

황보승욱 (부산대 대학원), 홍금식, 최재원 (부산대 기계공학부), 최성린 (국방과학연구소)

S. W. Hwang Bo (Graduate College, Pusan National. U.), K. S. Hong, J. W. Choi (Pusan National. U.), S. L. Choi (ADD)

ABSTRACT

This paper proposes a federated Kalman filter approach which utilizes information from multiple sensors and variable estimation model. Compared with the decentralized Kalman filter, the algorithm proposed in this paper demonstrates much better tracking performance in both maneuvering and constant velocity movement of the target.

Key Words: Kalman filter(칼만필터), estimation(추정), maneuvering(기동), centralized (중앙집중형), federated(연합형), decentralized(분산형), covariance(공분산), target tracking(표적추적)

1. 서론

기동(maneuver)하는 표적추적에 대한 단일감지기(single sensor)를 사용하는 연구는 다양하게 발표되고 있다. 여기서 기동이라 함은 표적이 등속도 직선운동을 하다가 기동입력에 의해 가속도를 가지는 운동모델로 전환되는 것을 말한다. 기동표적(maneuvering target)의 상태추정(state estimation)은 감지기에서 수리되는 측정치에 의존하므로, 단일감지기보다는 다중감지기(multi-sensor) 환경에서 좀더 정확한 상태추정이 이루어진다고 볼 수 있다. 다수의 감지센서에서 수리된 측정치를 결합하고 최종적인 추정치를 얻는 방법에는 시스템의 구현에 따라서 중앙집중처리방식과 분산처리방식이 있고 이 두 가지의 복합된 형태가 있을 수 있다.

중앙집중처리방식에는 모든 측정치를 중앙처리장치로 전송하여 동시에 처리하여 최적의 표적상태를 추정하는 방법으로 중앙집중형 칼만필터(centralized Kalman filter)가 이에 속하는데 모든 측정치를 하나의 중앙필터에서 처리하는 방식이다. 분산처리방식에는 여러 개의 감지기에서 측정치를 처리하고 중앙처리장치로 각 감지기에서 추정된 데이터를 이송하는 방식으로 Hashemipour [3]가 제시한 분산계층형 칼만필터가 이에 속한다. 분산계층형 칼만필터는 각 감지기에 속한 부필터에서 표적의 상태를 일차추정하고 중앙의 주필터에서 융합(fusion)하여 최적으로 표적상태를 추정하는 시스템이다. 본 논문에서 입력추정기법과 가변차원필터를 결합하는 기법으로서 되어있다[5]. 그리고 여러 개의 지역감지기 부필터와 중앙의 주필터 사이의 필터링단계에서 연합형 칼만필터를 구성

함으로써 추적성능 향상을 도모하였다.

2. 연합형 칼만필터

다중감지기 구조로는 직렬구조 다중감지기 환경과 병렬구조 다중감지기 환경으로 분류될 수 있다. 병렬구조는 직렬구조보다 처리속도에서 빠르고 다양한 측정치를 수리할 수 있다는 장점이 있다. 그러므로 본 논문에서는 두 개의 지역감지기로 구성된 병렬형 다중감지기 환경에 대해서 측정치들로부터 연합형 칼만필터를 이용하여 필터링을 수행했다. 그리고 가변차원 입력추정기법에 적용하여 기동표적을 추적하는 구조로 되어 있다. 병렬형 다중감지기로 구성되는 필터 구현방법에는 집중형 및 분산형이 있으며 분산형 칼만필터의 특수한 형태로서 연합형 칼만필터가 있다. 연합형 칼만필터의 구조를 보면 그림 2.1, 2.2 와 같다. 표적이 등속도운동을 할 경우 시스템의 상태방정식 및 측정방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= F(k)x(k) + G(k)w(k) \\ z_i(k) &= H_i(k)x(k) + v_i(k), \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $x \in R^N$, $F \in R^{N \times N}$, $G \in R^{N \times M}$, $H \in R^{M \times N}$ 이며 $z_i(k)$ 는 i 번째 감지기에 수리되는 표적측정치를 나타내며 $v_i(k)$ 는 i 번째 감지기에서의 측정잡음을 말한다. 모든 지역감지기는 각각 독립적으로 작동하며 표적측정치의 검출확률은 1로 가정한다. 상태벡터의 초기값과 공정잡음은 서로 연관성이 없다고 보면 다음 식을 만족한다.

$$E[w(k)] = 0, \quad E[w(k)w^T(k)] = Q(k)\delta_{kj} \quad (2)$$

$$E[v_i(k)] = 0, \quad E[v_i(k)v_i^T(k)] = R_i(k)\delta_{kj}$$

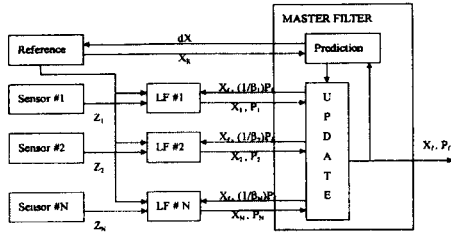


그림 2.1 연합형 칼만필터의 구조(Fusion Reset mode)

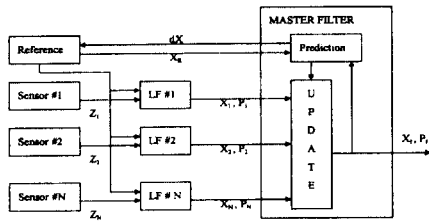


그림 2.2 연합형 칼만필터의 구조(Not Reset mode)

연합형 칼만필터는 분산계층형 칼만필터의 특수한 형태이며 정보량 분배의 법칙에 따라 이전 시간의 주필터에서 구한 표적상태 추정치를 각각의 부필터에 적용한 후 현재시간에서 수리된 측정치를 이용하여 각각의 부필터의 추정치를 구한다. 이를 주필터에서 다시 융합하여 최적의 표적상태 추정치를 얻는 구조로 되어 있다. 기존의 분산계층형 칼만필터와 다른점은 정보량 분배계수와 상태변수의 융합-재분배(fusion-reset)에 있다. 각 부필터의 필터링된 추정치와 공분산만을 이용하여 필터에서 융합하므로 계산량이 줄어든 것이 장점이다.

연합형 칼만필터의 수학적 표현은 다음과 같다. 식(1) 및 (2)로 표현되는 시스템 모델에 대하여 식(3)은 중앙집중형 칼만필터의 주필터 모델식이 되며, 식(4)는 각 감지기의 부필터 모델식이 된다[4,6].

$$\hat{x}(k+1|k) = F(k)\hat{x}(k|k)$$

$$P(k+1|k) = F(k)P(k|k)F^T(k) + G(k)Q(k)G^T(k)$$

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + P(k|k) \sum_{i=1}^N H_i^T(k)R_i^{-1}(k) [z_i(k) - H_i(k)\hat{x}(k|k-1)] \quad (3)$$

$$P^{-1}(k|k) = P^{-1}(k|k-1) + \sum_{i=1}^N H_i^T(k)R_i^{-1}(k)H_i(k)$$

$$\hat{x}_i(k+1|k) = F(k)\hat{x}_i(k|k)$$

$$P_i(k+1|k) = F(k)P_i(k|k)F^T(k) + G(k)Q(k)G^T(k)$$

$$\hat{x}_i(k|k) = \hat{x}_i(k|k-1) + P_i(k|k)H_i^T(k)R_i^{-1}(k) [z_i(k) - H_i(k)\hat{x}_i(k|k-1)] \quad (4)$$

$$P_i^{-1}(k|k) = P_i^{-1}(k|k-1) + H_i^T(k)R_i^{-1}(k)H_i(k)$$

식(3)-(4)와 같은 구조에서는 주필터 모델에 측정치가 포함되어 있다. 주필터의 모델에 측정치가 포함되지 않고 부필터의 추정치만으로 주필터를 구성하는 것이 목적이므로 식(5)에 의해 최적의 추정치와 공분산을 계산할 필요가 있다.

$$P_f = \left[P_1^{-1} + P_2^{-1} + \dots + P_N^{-1} \right]^{-1} \quad (5)$$

$$\hat{x}_f = P_f \left[P_1^{-1}\hat{x}_1 + P_2^{-1}\hat{x}_2 + \dots + P_N^{-1}\hat{x}_N \right]$$

식(5)의 결과는 다음과 같은 조건을 만족할 경우 중앙집중형 칼만필터의 식(3)과 동일해진다[4,6].

$$\hat{x}_i(0) = \hat{x}(0) \quad P_i(0) = \beta_i P(0)$$

$$\hat{x}_i = \hat{x}_f \quad P_i = \beta_i P_f \quad (6)$$

$$Q_i = \beta_i Q$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{\beta_i} = 1, \quad 0 \leq \frac{1}{\beta_i} \leq 1 \quad i=1,2,\dots,N$$

3. 표적의 최적상태 및 기동입력추정

표적이 등속도운동을 할 경우 운동방정식은 식(1)로 표현되며 표적이 등가속도운동을 할 경우 식(1)과 비교할때 각 감지기의 측정방정식은 변으나 표적의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$x(k+1) = F(k)x(k) + Bu(k) + G(k)w(k) \quad (7)$$

$$z_i(k) = H_i(k)x(k) + v_i(k), \quad i=1,2,\dots,N$$

이제 감지기가 2개일 경우에 대해 최적의 표적상태를 추정하는 기법과 기동가설의 사후확률을 계산하여 표적의 기동을 판별해보자. 그리고 기동여부에 따라 표적상태 추정치의 식을 분리해서 기동가설에 따른 기동입력 값을 추정하는 과정을 기술해 보자.

3.1 표적의 최적상태추정

$x_i(k|k)$, $P_i(k|k)$ ($i=1,2$)를 각 지역감지기 부필터에 해당하는 표적의 상태추정치와 오차공분산이라 하면 $x_f(k|k)$, $P_f(k|k)$ 는 주필터의 상태추정치와 오차공분산이 된다. 앞에서 언급했듯이 표적의 상태추정은 다음과 같다. 현재시간을 k 라 할 때 이전시간에 표적의 최적의 추정치를 얻었다고 가정하면 연합형 칼만필터의 조건에 의해서 다음이 만족된다[6].

$$\hat{x}_i(k|k-1) = F\hat{x}_f(k-1|k-1)$$

$$P_i(k|k-1) = \beta_i P_f(k|k-1)$$

$$P_f(k|k-1) = F^T P_f(k-1|k-1) F + G^T Q G$$

$$P(k|k-1) = \sum_{i=1}^N \beta_i P_f(k|k-1) \quad (8)$$

이다. 다음으로 중앙처리기 주필터의 추정치를 유도해 보면

$$P_f(k|k) = [P_1^{-1}(k|k) + P_2^{-1}(k|k)]^{-1}$$

$$\hat{x}_f(k|k) = P_f(k|k) [P_1^{-1}(k|k) \hat{x}_1(k|k) + P_2^{-1}(k|k) \hat{x}_2(k|k)] \quad (9)$$

이 된다. 여기서 연합형 칼만필터의 분배법칙에 의거한 조건을 대입하면 중앙집중형 칼만필터의 식과 동일하게 된다.

3.2 기동가설의 사후확률

현재시간 k 까지 각 감지기에 수리된 측정치들의 집합을 $Z_i(k)$, 현재시간 k 에서만 수리된 측정치들을 $z_i(k)$ 라고 하면 감지기의 수를 2 개라고 가정할 경우 수리된 측정치 집합은 $[Z_1(k), Z_2(k)]$ 이 된다. 표적의 시간 $k = n$ 에서 입력 u 의 크기로 기동을 개시하는 경우의 가설을 $\Omega(n)$ 이라 표시하고 기동이 없을 경우를 $\Omega(0)$ 라고 표시하자. 그러면 기동가설 $\Omega(n)$ 의 사후확률을 순환적으로 다음과 같이 표현된다.

$$P[\Omega(n)|Z_1(k), Z_2(k)] = \frac{P[\Omega(n)|z_1(k), z_2(k), Z_1(k-1), Z_2(k-1)]}{P[Z_1(k), Z_2(k)]}$$

$$= \frac{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{P[\Omega(n), x(k), z_1(k), z_2(k), Z_1(k-1), Z_2(k-1)]}{P[Z_1(k), Z_2(k)]} \Delta x(k)}{P[Z_1(k), Z_2(k)]}$$

$$= \frac{1}{\alpha} \sum_{k=1}^{\infty} P[z_1(k)|\Omega(n), Z_1(k-1), Z_2(k-1)] \bullet P[z_2(k)|\Omega(n), Z_1(k-1), Z_2(k-1)] \bullet \Phi[k, \Omega(n)] [P[\Omega(n)|Z_1(k-1), Z_2(k-1)] \Delta x(k)] \quad (10)$$

여기서 α 는 정규화 상수이며 측정치상관함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi[k, \Omega(n)] = \sum_{k=1}^{\infty} P[x(k)|\Omega(n), z_1(k), Z_1(k-1), Z_2(k-1)] \bullet P[x(k)|\Omega(n), z_2(k), Z_1(k-1), Z_2(k-1)] \Delta x(k)$$

$$= \frac{1}{\alpha^n} \sum_{k=1}^{\infty} P[x(k)|\Omega(n), Z_1(k), Z_2(k)]$$

$$= \frac{1}{\alpha^n} \sum_{i=1}^{\infty} N[m(x_k - \hat{x}^{\Omega}(k|k)), P(k|k)] \quad (11)$$

$$= \frac{1}{\alpha^n}$$

정규분포 확률밀도 함수를 이용하여 $1/\alpha^n$ 으로 일반식을 표현하면,

$$\frac{1}{\alpha^n} = \left[\frac{\|P(k|k)\|}{\|P_1(k|k)\| \|P_2(k|k)\|} \right]^{1/2} \bullet \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\hat{x}_1^{\Omega T}(k|k) P_1^{-1}(k|k) \hat{x}_1^{\Omega}(k|k) + \hat{x}_2^{\Omega T}(k|k) P_2^{-1}(k|k) \hat{x}_2^{\Omega}(k|k) - \hat{x}^{\Omega T}(k|k) P^{-1}(k|k) \hat{x}^{\Omega}(k|k) \right] \right\} \quad (12)$$

여기서 윗첨자 Ω 는 기동가설 $\Omega(n)$ 하에서의 상태추정치 임을 나타낸다. 위의 식들을 정리하여 기동가설 $\Omega(n)$ 의 사후확률식을 순환적으로 다음과 같이 표현된다.

$$P[\Omega(n)|Z_1(K), Z_2(K)] = \frac{1}{\alpha} P[z_1(k), z_2(k)|\Omega(n), Z_1(k-1), Z_2(k-1)] \bullet P[\Omega(n)|Z_1(k-1), Z_2(k-1)]$$

$$= \frac{1}{\alpha} P[z_1(k)|\Omega(n), Z_1(k-1), Z_2(k-1)] P[z_2(k)|\Omega(n), Z_1(k-1), Z_2(k-1)] \bullet \Phi[k, \Omega(n)] P[\Omega(n)|Z_1(k-1), Z_2(k-1)] \quad (13)$$

기동가설 $\Omega(n)$ 의 사후확률식을 살펴보면 측정치상관함수에 의하여 서로 연관되어 있기 때문에 $\Phi[\Omega(n)]$ 의 항들을 각 지역감지기의 부필터와 중앙처리기의 주필터의 표적상태 추정치와 기동입력 항으로 표현을 해야 된다. 그러므로 기동여부에 따라 표적의 상태방정식이 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{x}_i^{\Omega}(k|k) = \hat{x}_i(k|k) + T_i(k) T^{\Omega}(k-1) B u$$

$$\hat{x}^{\Omega}(k|k) = \hat{x}(k|k) + T^{\Omega}(k) B u \quad (14)$$

식(14)는 각 감지기의 부필터와 중앙처리기의 주필터의 기동여부에 따라 상태방정식을 표현한 것이다. 여기서 기동에 상관없이 일반적인 형태의 상태방정식을 유도하기 위해 전이행렬(transfer matrix)들을 정의하면 다음과 같다.

$$T(k-1) = P(k|k) P^{-1}(k|k-1) F$$

$$T_i(k) = P_i(k|k) P(k|k-1) F \quad (i=1,2) \quad (15)$$

$$T^{\Omega}(k) = \begin{cases} I & k = n \\ T(k) T^{\Omega}(k-1) & k > n \\ 0 & k < n \end{cases}$$

전이행렬을 이용한 표적의 상태방정식을 적용하여 측정치상관함수를 다시 표현하면 부필터와 주필터의 표적상태 추정치와 상태오차 공분산행렬 그리고 기동입력 항으로 표현할 수 있다.

3.3 기동입력추정

측정치상관함수는 기동입력 항으로 표현이 되므로 기동입력 값을 추정하기 위해서는 기동이 있을 경우 확률과 기동이 없을 경우 확률의 비례식으로 표현되는 확률공산비(probability likelihood ratio)의 정의가 필요하다. 확률공산비를 최대화 하는 입력 값이 표적이 기동 할 때의 입력 값이 되므로 아래와 같이 표현된다.

$$L^{\Omega}(k) = \log_e \left[\frac{P[z_1(k)|\Omega(n), Z_1(k-1), Z_2(k-1)]}{P[z_1(k)|\Omega(0), Z_1(k-1), Z_2(k-1)]} \cdot \frac{P[z_2(k)|\Omega(n), Z_1(k-1), Z_2(k-1)]\Phi[k, \Omega(n)]}{P[z_2(k)|\Omega(0), Z_1(k-1), Z_2(k-1)]\Phi[k, \Omega(0)]} \right] \quad (16)$$

$$M^{\Omega}(k) = \sum_{i=n+1}^k L^{\Omega}(i)$$

확률공산비의 합을 정규분포 밀도함수로 표현해서 정리하고 최소자승추정법을 사용하여 확률공산비의 합을 최대화 하는 입력 값을 구하면 다음과 같다.

$$\hat{u}^{\Omega}(k) = \left[\sum_{i=n+1}^k D^{\Omega}(i) \right]^{-1} \left[\sum_{i=n+1}^k A^{\Omega}(i) \right]$$

$$D^{\Omega}(k) = B^T T^{\Omega}(k-1) F^T P^{-1}(k|k-1) \bullet [P(k|k-1) - P(k|k)] P^{-1}(k|k-1) F T^{\Omega}(k-1) B u \quad (17)$$

$$A^{\Omega}(k) = B^T T^{\Omega}(k-1) F^T P^{-1}(k|k-1) \bullet [\hat{x}(k|k-1) - \hat{x}(k|k)]$$

기동입력 오차공분산은 다음의 정의에 의해서 구할 수 있다.

$$R^{\Omega}(k) = E[\hat{u}(k) - u] [\hat{u}(k) - u]^T \quad (18)$$

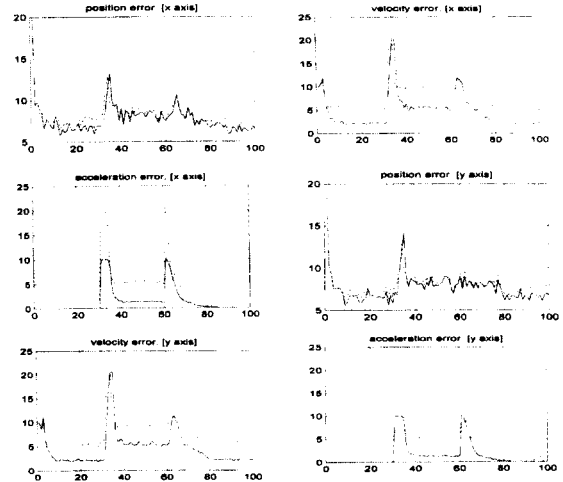
$$R^{\Omega}(k) = \left[\sum_{i=n+1}^k D^{\Omega}(i) \right]^{-1}$$

지금까지 연합형 칼만필터를 이용하여 표적의 상태추정치와 오차공분산을 구했고 기동가설 사후확률과 기동입력 추정치를 상태추정치와 오차공분산의 항으로 표현했다. 다음장에서는 시뮬레이션을 통하여 제안된 기법의 추적성능이 다중감지기 환경에서 효과적임을 보였다.

4. 시뮬레이션 및 결론

본 시뮬레이션은 표적이 2 차원 평면에서 등속도 운동하다가 30~60 초 사이에 x 축, y 축 방향으로 각각 15[m/sec²]의 가속도로 기동하도록 하였다. 표적 공정 잡음 공분산을 각 축방향으로 동일하게 5²[m²/sec²]으로 설정하였다. 기동검출 임계값은 3σ로 설정하였고

기동검출 구간의 길이는 6으로 하였다. 아래의 그림에서 보면 실선부분이 연합형 칼만필터를 이용한 추적성능을 나타낸 것으로 등속운동 구간에서는 추적성능이 개선된 점을 볼 수 있는데 기동이 시작하는 시점에서 상당히 큰 오차가 발생하지만 시간이 지나면서 추적성능이 나아지고 있는 것을 볼 수 있다.



참고 문헌

1. Bar-Shalom, Y. and Birmiwal, K., "Variable Dimension Filter for Maneuvering Target Tracking", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. AES-18, pp. 621-629, Sep. 1982.
2. Bar-Shalom, Y., Multitarget-Multisensor Tracking: Advanced Applications, Artech House, 1990.
3. Hashemipour, H. R., Roy, S. and Laub, A. J., "Decentralized Structure for Kalman Filtering," IEEE trans. On Automatic Control, Vol. 33, No. 1, Jan. 1988.
4. Gao, Y., Krakiwsky, E. J. and Abousalem, M. A., "Comparison and Analysis of Centralized, Decentralized and Federated Kalman Filters," NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation, Vol. 40, pp. 69, 1993.
5. 박용환, 기동표적 추적필터에 관한 연구, 공학박사 학위논문, 서울대학교 전기공학부, 1997.
6. 김진원, 박규철, 지규인, 이장규, "연합형 칼만필터를 이용한 다중센서 통합기법", 96 GPS Workshop 논문집, pp. 407, 1996.