

다중 감지기 시스템 하에서의 입력 추정 필터 구현

*박 용환 **황 익호 *윤 장현 *서 진현
*서울대 공과대학원 전기공학과 **서울대 공과대학원 제어계측학과

Input Estimation in Multi-Sensor Environment

*Yong H. Park **Ik H. Hwang *Jang H. Yoon° *Jin H. Seo
°Dept. of Electrical Engineering, Seoul National University
**Dept. of Control & Instrumentation Engineering, Seoul National University

Abstract

An input estimation technique is derived in multi-sensor environment. The proposed approach distribute the computational burden of input estimation to each local sensor and fusion center without loss of its optimality. The performances of proposed method in 2-sensor system are compared with those in single sensor system. Simulation results show that a reliable maneuvering target tracking system can be constructed in multi-sensor environment via proposed approach.

1. 서 론

등속도로 순항하던 표적이 감시회피, 방향전환 등을 위하여 가속도를 가지는 운동을 하는 것을 기동이라 한다.

기동 표적 추적 문제는 Singer의 기동 모델이 제안된 이후로 많은 연구가 이루어져 왔으며, 대표적인 것으로 Singer의 기동가속도 모델링 방법^[1], Bogler의 입력 추정 필터^[3] 그리고 Bar-Shalom 등이 제안한 가변 차원 필터^[2], 상호 간섭 다중 모델 필터^[4] 등이 있다. 이 중 입력 추정 필터는 칼만 필터의 잔류 오차를 이용하여 표적의 기동을 검출하고, 동시에 기동 입력의 추정치와 기동 시점을 계산하여 기동의 영향을 보상하는 적응 필터이다. 최근에는 이러한 입력 추정 필터의 효율적인 수행을 위한 연구가 진행 중이며, 의사 잔류 오차를 이용하는 방법과 재귀적 입력추정기법 등이 제안되었다^[5,6].

이러한 기동 표적 추적 문제와 더불어 표적으로부터의 측정치를 얻어내는 감지기의 수가 두개 이상인 다중 감지기 환경에서의 표적 추적 문제도 활발히 연구되고 있다. 다중 감지기 시스템은 단일 감지기 시스템의 한계를 극복하기 위하여 제안되었으며, 기존의 단일 감지기 환경에서 구현된 표적 추적 필터를 다중 감지기 환경으로 확장하여 구현하는 방향으로 연구가 진행되고 있다^[7].

다중 감지기 환경에서 표적 추적 필터를 구현할 경우 좀 더 정확한 표적 상태 추정과 표적 상태 변화의 빠른 감지, 전체 시스템의 강인성이 증가하는 등의 장점이 있지만, 처리해야 하는 측정치의 증가로 인한 계산량의 부담을 줄이기 위하여 각 감지기가 계산량을 분담하는 필터 구조가 요구된다.

본 논문에서는 입력 추정 필터를 다중 감지기 환경 하에서 유도하고, 증가한 계산량을 감지기별로 분배하는 필터 구조를 제안하였다. 또한 모의 실험을 통하여 제안된 필터의 표적 추적 수행 능력을 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 단일 감지기 환경에서의 입력 추정 기법

먼저 1차원 시스템에 대하여 표적의 상태를 다음과 같이 정

의하면

$$x = [x \quad \dot{x} \quad \ddot{x}]^T \quad (1)$$

기동 표적의 운동은 다음과 같이 선형 방정식으로 표현할 수 있다.

$$x_{k+1} = Fx_k + Bu_k + Gw_k, \quad E(w_k w_k) = Q_k \delta_{k,j} \quad (2)$$

여기서 u_k 는 표적의 기동 입력을 나타낸다. 감지기에서의 표적의 측정은 다음과 같이 선형으로 표현된다고 가정한다.

$$z_k = Hx_k + v_k, \quad E(v_k v_k) = R_k \delta_{k,j} \quad (3)$$

가설 a_n 을 사건 {표적이 시간 $k=n$ 에서 입력 u 의 값으로 기동한다.}로 정의하면, 가설 a_n 의 사후 확률은 다음과 같이 표현된다.

$$p(a_n | z_k, z_{k-1}, \dots, z_0) = \frac{1}{c} p(a_n) \prod_{i=0}^k p(z_{k-i} | z_{k-i-1}, \dots, z_0, a_n) \quad (4)$$

\hat{x}_k, P 를 칼만 필터에서의 표적 상태 추정치와 공분산으로 정의하면, 식(4)에서의 우측 각항은 다음과 같이 표현된다.

$$p(z_{k-i} | z_{k-i-1}, \dots, z_0, a_n) = \frac{\exp \left[-\frac{(z_{k-i} - H\hat{x}_{k-i} - \mathbb{1}_{k-i, n})^2}{2(HP_{k-i} + R_{k-i})} \right]}{(2\pi)^{1/2} (HP_{k-i} + R_{k-i})^{1/2}} \quad (5)$$

표적의 기동과 기동 시점을 추정하기 위해 다음과 같이 순차확률비 s_k^* 와 이의 합 S_k^* 을 정의하면

$$s_k^* = \log \frac{p(z_k | z_{k-1}, \dots, z_0, a_n)}{p(z_k | z_{k-1}, \dots, z_0, a_0)} \quad (6)$$

$$S_k^* = \sum_{j=n+1}^k s_j^* \quad (7)$$

가설 a_n 에서의 표적 기동 입력의 추정치는 다음과 같다^[8].

$$\hat{u}_k^* = \arg u \{ \sup S_k^* \} = \frac{\sum_{j=n+1}^k h_j^* v_j}{\sum_{j=n+1}^k g_j^*} \quad (8)$$

이거시

$$h_k^* = \frac{HFM_{k-1}^* B}{HP_{k-1} H^T + R_k}, \quad g_k^* = \frac{(HFM_{k-1}^* B)^2}{HP_{k-1} H^T + R_k} \quad (9)$$

$$v_i = z_i - H\hat{x}_{i-1}, \quad (10)$$

$$M_k^* = \begin{cases} I & k=n \\ M_k M_{k-1}^* & k>n \\ 0 & k<n \end{cases}, \quad M_k = [I - K_k H] F \quad (11)$$

이고, K_k 는 칼만 이득 행렬이다. 이 때, 기동 추정치 \hat{u}_k^* 의 공분산은 다음과 같이 계산된다^[9].

$$L_k^n = \frac{1}{\sum_{j=n+1}^k g_j^n} \quad (12)$$

매 시간 각각의 가설 α_n 에 대하여 기동 입력 추정치 \hat{u}_k^n 가 계산되면, 표적 기동의 편별과 기동 시점의 추정은 다음과 같은 과정으로 얻어진다.

$$\hat{n} = \arg \min_{1 \leq n \leq k} \{ \max \sup_u S_k^n > h \} \quad (13)$$

이 때, h 는 기동 검출을 위한 임계치(threshold)이다.

이와 같은 과정에 의해 시간 k 에서 기동이 검출되면, 시간 $k+1$ 에서 표적의 상태와 공분산을 다음과 같이 갱신한다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k+1|k}^* &= \hat{x}_{k|k}^* + FM_k^* B \hat{u}_k^* \\ P_{k+1|k}^* &= P_{k|k}^* + FM_k^* B L_k^{*T} B^T M_k^{*T} F^T \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 n^* 는 추정된 기동 시점이다.

2.2 다중 감지기 환경에서의 입력 추정 기법

2.1 절에서 기술한 입력 추정 기법을 다중 감지기 환경으로 확장하기 위해서 먼저 다중 감지기 환경의 구조를 설정해야 한다. 다중 감지기 시스템의 구조는 감지기의 설치 환경에 따라 결정되며, 이에 대한 연구도 진행되고 있다. 본 논문에서는 가장 일반적인 형태인 [그림 1]과 같은 병렬 구조에 대하여 입력 추정 기법을 유도하고자 한다.

병렬 구조의 다중 감지기 시스템은 [그림 1]과 같이 다수의 지역 감지기가 존재하고, 각 지역 감지기로부터 계산되는 표적 상태 정보를 병합하는 중앙 처리기로 구성되어 있다. 즉, 각 지역 감지기는 중앙 처리기로부터 전달되는 정보와 지역 감지기에 수리되는 측정치 정보를 이용하여 표적의 상태를 추정하고, 중앙 처리기는 각 지역 감지기로부터 전달되는 표적 상태 정보를 병합하여 최종적인 표적 상태 정보를 결정하게 된다.

본 논문에서는 식 유도의 편의를 위하여 지역 감지기의 수가 두 개라고 가정했다. 지역 감지기의 수가 N 인 경우는 기술한 절차에 따라 쉽게 유도할 수 있다.

병렬 구조의 다중 감지기 환경에서 $\hat{x}_{nk,i}$, $P_{nk,i}$ ($i=1,2$)를 지역 감지기 i 에서의 상태 추정치와 이의 공분산이라고 하면, 중앙 처리기에서의 최종 상태 추정치와 공분산은 다음과 같은 정보 필터 형태로 유도된다^[7].

$$\begin{aligned} \hat{x}_{nk} &= P_{nk} [P_{nk,1}^{-1} \hat{x}_{nk,1} + P_{nk,2}^{-1} \hat{x}_{nk,2} - P_{nk-1}^{-1} \hat{x}_{nk-1}] \\ P_{nk}^{-1} &= P_{nk,1}^{-1} + P_{nk,2}^{-1} - P_{nk-1}^{-1} \end{aligned} \quad (15)$$

상기한 구조의 다중 감지기 환경에서의 입력 추정 기법을 유도하기 위하여, 단일 감지기 환경에서와 마찬가지로 가설 α_n 을 정의하고, 모든 감지기로부터 수리되는 측정치 집합에 대하여 가설 α_n 의 사후 확률을 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p(\alpha_n | Z_1^n, Z_2^n) &= \frac{1}{c_1} p(z_{k,1}, z_{k,2} | \alpha_n, Z_1^{k-1}, Z_2^{k-1}) p(\alpha_n | Z_1^{k-1}, Z_2^{k-1}) \\ &= \frac{1}{c} p(z_{k,1} | \alpha_n, Z_1^{k-1}, Z_2^{k-1}) p(z_{k,2} | \alpha_n, Z_1^{k-1}, Z_2^{k-1}) \Gamma_k(\alpha_n) \\ &\quad \times p(\alpha_n | Z_1^{k-1}, Z_2^{k-1}) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서

$$\begin{aligned} \Gamma_k(\alpha_n) &= \frac{|P_{nk-1}|^{1/2} |P_{nk}|^{1/2}}{|P_{nk,1}|^{1/2} |P_{nk,2}|^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} [\hat{x}_{nk}^{*T} P_{nk}^{-1} \hat{x}_{nk}^* \right. \\ &\quad \left. + \hat{x}_{nk,2}^{*T} P_{nk,2}^{-1} \hat{x}_{nk,2}^* - \hat{x}_{nk-1}^{*T} P_{nk-1}^{-1} \hat{x}_{nk-1}^* - \hat{x}_{nk}^{*T} P_{nk}^{-1} \hat{x}_{nk}^*] \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

즉, 각각의 지역 감지기는 동일한 표적에 대하여 표적 추적을 수행하므로, 지역 감지기에서 수리되는 측정치들은 서로 독립이 아니며, 상관 관계 함수 $\Gamma_k(\alpha_n)$ 에 의하여 서로 영향을 준다. 그러므로, 다중 감지기 환경에서 표적 기동 입력의 최적해를 유도하기 위해서는 각 지역 감지기에서의 측정치의 확률 분포 함수뿐만 아니라, 상관 관계 함수 $\Gamma_k(\alpha_n)$ 도 동시에 고려해

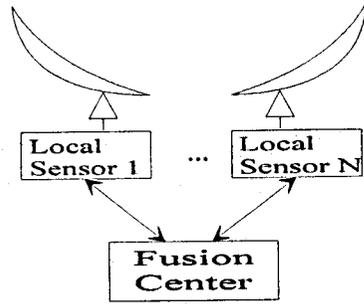


그림 1. 다중 감지기 시스템

야 한다. 이와 함께 처리해야 하는 측정치의 증가로 인한 계산량의 부담을 중앙 처리기와 각 지역 감지기로 분배하기 위한 계산 구조의 유도도 필요하다.

이를 위해 단일 감지기 환경에서와 같이 순차화률비 s_k^n 와 이의 합 S_k^n 을 다음과 같이 정의한다.

$$s_k^n = \log \frac{p(z_{k,1} | \alpha_n, Z_1^{k-1}, Z_2^{k-1}) p(z_{k,2} | \alpha_n, Z_1^{k-1}, Z_2^{k-1}) \Gamma_k(\alpha_n)}{p(z_{k,1} | \alpha_0, Z_1^{k-1}, Z_2^{k-1}) p(z_{k,2} | \alpha_0, Z_1^{k-1}, Z_2^{k-1}) \Gamma_k(\alpha_0)} \quad (18)$$

$$S_k^n = \sum_{j=n+1}^k s_j^n \quad (19)$$

상기식에서 순차화률비 s_k^n 를 정리하여 표현하면 다음과 같다.

$$s_k^n = [h_{k,1}^n + h_{k,2}^n - h_{k-1}^n] u - \frac{1}{2} [g_{k,1}^n + g_{k,2}^n + g_{k,c}^n] u^2 \quad (20)$$

여기서

$$\begin{aligned} h_{k,i}^n &= \frac{HFM_{k-1}^n B v_{k,i}}{HP_{k-1}^n H^T + R_{k,i}} \\ h_{k,c}^n &= B^T M_{k-1}^n F^T P_{k-1}^{-1} [\hat{x}_{nk,1} + \hat{x}_{nk,2} - \hat{x}_{nk-1} - \hat{x}_{nk}] \\ g_{k,i}^n &= \frac{(HFM_{k-1}^n B)^2}{HP_{k-1}^n H^T + R_{k,i}} \end{aligned} \quad (21)$$

$$g_{k,c}^n = B^T M_{k-1}^n F^T P_{k-1}^{-1} [P_{nk,1} + P_{nk,2} - P_{nk-1} - P_{nk}] P_{k-1}^{-1} F M_{k-1}^n B$$

이제 단일 감지기에서와 동일한 방법으로 기동 입력 추정치와 이의 공분산을 유도하면 다음과 같다.

$$\hat{u}_k^n = \frac{\sum_{j=n+1}^k [h_{j,1}^n + h_{j,2}^n - h_{j-1}^n] c_j}{\sum_{j=n+1}^k [g_{j,1}^n + g_{j,2}^n + g_{j,c}^n]} \quad (22)$$

$$L_k^n = \frac{1}{\sum_{j=n+1}^k [g_{j,1}^n + g_{j,2}^n + g_{j,c}^n]} \quad (23)$$

최종적인 기동 입력 추정치 \hat{u}_k^n 와 L_k^n 을 살펴보면, $h_{k,i}^n$, $g_{k,i}^n$ 는 i 번째 지역 감지기에서 그 지역 감지기에 수리되는 측정치만을 이용하여 계산되는 값이고, $h_{k,c}^n$, $g_{k,c}^n$ 는 중앙 처리기에서 상관 관계 함수 $\Gamma_k(\alpha_n)$ 을 이용하여 계산되는 값이다. 즉, 각 지역 감지기는 측정치가 수리되면 그 측정치에 근거하여 표적의 상태 추정치와 상태 오차공분산 그리고 $h_{k,i}^n$, $g_{k,i}^n$ 를 계산하여 중앙처리기로 전송한다. 중앙 처리기는 각 지역 감지기로부터 전송된 정보를 이용하여 식(15), (21), (22), (23)에 의하여 각 지역 감지기의 상태 추정치들을 병합하고, 각 가설에 따른 기동 입력을 추정한다. 그리고, 식(13), (18), (19)에 의하여 표적 기동을 감지하여, 기동이 감지되면 식(14)과 같이 상태 추정치를 보상한다. 중앙 처리기에서의 최종적인 상태추정치와 오차공분산은 각 지역 감지기로 다시 전송되어 다음번 측정치 수리에 대응하게 한다. 따라서, 다중 감지기 환경에서 적절한 계산량의 분배를 통해 기동 입력의 최적 추정치를 계산할 수 있는 구조를 이루고 있다.

3. 모의 실험 및 검토

제안된 시스템의 성능을 분석하기 위하여 다음과 같이 모의 실험을 수행하였다. 감지기의 수는 두개로 하였고, 표적은 정속도로 비행중 시간 50-60초 사이에 가속도 $30[m/sec^2]$ 로 기동하게 하였다. 시스템 공정잡음 공분산 $Q = 0.1$, 감지기의 측정잡음 공분산 R 은 두 감지기 모두 100으로 설정하였다. 그리고 기동 감지를 위한 threshold 값은 3σ 로 하였다. 다음은 실제 표적과 추적 시스템의 상태 초기치이다.

$$x_0 = [-2000 \quad 200 \quad 0]^T, \\ \hat{x}_{00} = [-2020 \quad 210 \quad 0]^T$$

[그림 2]는 각각 단일 감지기에서 입력 추정 필터를 이용하여 표적 추적을 수행하였을 때와 두 개의 감지기를 사용하는 다중 감지기 환경에서 제안된 입력 추정 기법을 이용하여 표적을 추적하였을 경우의 위치 오차, 속도 오차 그리고 가속도 오차를 나타낸 것이다. 그림은 50번의 몬테 카를로 모의 실험을 통하여 RMS 오차를 표시한 것이다. 전체적으로 제안된 기법을 적용한 다중 감지기 환경에서의 제안된 필터의 추적 성능이 훨씬 양호함을 알 수 있다. [표 1]은 각각의 환경에 대하여 추적 필터가 정상상태에 있는 1-50초, 75-100초에서의 기동 감지률 오감지 그리고 표적이 기동하고 다시 정속도로 운동하는 50-75초에서의 기동 감지를 정감지로 정의하여, 표적 기동의 평균 감지 시간, 오감지 횟수 그리고 정감지 횟수를 나타낸 것이다. 결과에서 볼 수 있듯이 제안된 표적 추적 시스템에서 더 빠른 표적 기동의 감지가 이루어지고, 잡음으로 인한 기동의 오감지 횟수가 줄어들음을 알 수 있다.

단일 감지기 시스템은 표적의 정보를 획득하는 데 있어 한계가 있으며, 더 많은 표적 정보의 획득을 위해서는 다중 감지기 시스템의 구축이 필요하다. 제안된 기법은 다중 감지기 환경에서 표적 추적에 소요되는 계산량을 각 시스템에 분산시킴과 동시에 기동 입력의 최적해를 구함으로써, 표적 기동의 신속한 감지와 신뢰성 있는 기동 입력 추정이 가능함을 보이고 있다. 또한 더 많은 표적 정보의 제공으로 인한 표적 추적 성능의 향상과 추적 시스템의 신뢰성이 증가함을 모의 실험의 결과로부터 알 수 있다.

<표 1> 단일 감지기와 다중 감지기 환경에서의 성능 비교

	1 Sensor	2 Sensors
평균 기동감지시간	52.88	52.1
평균 오감지 수	0.26	0.08
평균 정감지 수	3.24	2.8

4. 결론

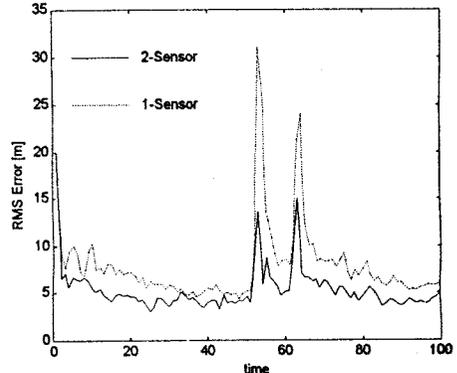
다중 감지기 환경 하에서 입력 추정 기법을 유도하고, 그 성능을 분석해 보았다. 제안된 기법은 입력 추정 과정에서 요구되는 계산량을 각 지역 감지기와 중앙 처리기로 분산시킴으로써 계산 부담을 해결하고 있다. 또한 단일 감지기 환경의 제한을 극복하고 보다 많은 정보를 가지고 표적 추적을 수행함으로써 추적 오차의 감소와 신속한 표적 기동의 감지가 가능함을 모의 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 또한 표적 기동의 오감지 확률이 줄어들어 인하여 보다 신뢰성 높은 기동표적추적 시스템을 구현할 수 있음을 보였다.

5. 참고 문헌

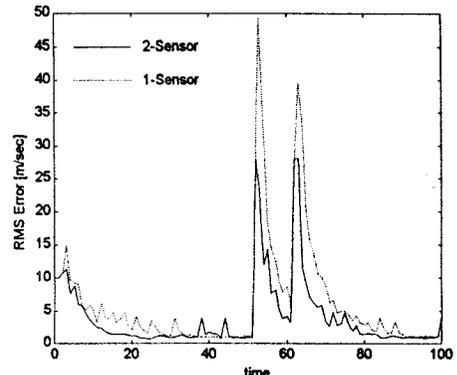
[1] R.A. Singer, "Estimating Optimal Tracking Filter Performance for Manned Maneuvering Targets", *IEEE Trans. Aerospace & Electronic Systems*, Vol. AES-6, July 1970, pp. 473-483.
 [2] Y. Bar-Shalom and K. Birmiwal, "Variable Dimensional Filter for Maneuvering Target Tracking", *IEEE Trans. Aerospace & Electronic Systems*, Vol. AES-18, September 1982, pp. 621-629.
 [3] P.L. Bogler, "Tracking a Maneuvering Target Using Input Estimation", *IEEE Trans. Aerospace & Electronic*

Systems, Vol. AES-23, May 1987, pp. 298-310.

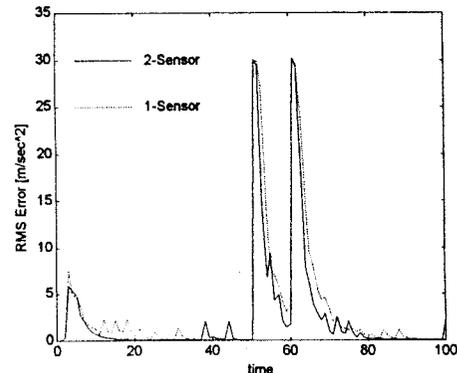
[4] Y. Bar-Shalom, K.C. Chang & H.A.P. Blom, "Tracking a Maneuvering Target using Input Estimation versus the Interacting Multiple Model Algorithm", *IEEE Trans. Aerospace & Electronic Systems*, Vol. AES-25, Mar. 1989, pp. 296-300.
 [5] I.H. Whang, T.K. Sung & J.G. Lee, "A Modified Input Estimation Technique using Pseudo-residuals", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol. AES-30, Jan., 1994, pp. 220-228.
 [6] Y.H. Park, J.H. Seo & J.G. Lee, "Tracking using the Variable-Dimension Filter with Input Estimation", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol. AES-31, Jan., 1995, pp. 399-408.
 [7] K.C. Chang, C.Y. Chong and Y. Bar-Shalom, "Joint Probabilistic Data Association in Distributed Sensor Networks", *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. AC-31, October 1986, pp. 889-897.



(a) RMS 위치 오차



(b) RMS 속도 오차



(c) RMS 가속도 오차

그림 2. 단일 감지기와 다중 감지기 환경에서의 추적성능 비교