

論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2011.39.11.1013>

이동 목표물 협력추적을 위한 다수 무인항공기의 분산형 확장정보필터 설계

윤승호*, 배종희*, 김유단**

Cooperative Standoff Tracking of a Moving Target
using Decentralized Extended Information Filter

Seungho Yoon*, Jonghee Bae* and Youdan Kim**

ABSTRACT

This paper deals with the tracking problem of a moving target using multiple unmanned aerial vehicles. A decentralized extended information filter is designed to cooperatively estimate the position and the velocity of the moving target. The extended information filter is adopted to consider the range and the line-of-sight angle as measurement data. The decentralized scheme is applied to enhance the estimation performance using the information provided by other vehicles. Numerical simulation is performed to verify the tracking performance of the proposed decentralized filters.

초 록

본 논문에서는 이동 목표물을 추적하기 위하여, 다수 무인항공기의 측정치를 이용한 목표물의 위치와 속도 추정기법을 제안하였다. 항공기와 목표물 사이의 상대거리와 시선각 정보를 이용하여 목표물의 위치, 속도 성분을 추정하는 확장필터를 구성하였다. 다수의 항공기 간 정보교환과 계산이 용이하도록 공분산 역행렬 형태의 정보필터를 설계하였다. 개별 확장필터, 부분 분산형 확장필터, 분산형 확장필터를 이용한 수치 시뮬레이션을 수행하여, 제안된 분산형 확장필터의 이동 목표물 추정 및 추적 성능을 검증하였다.

Key Words : Decentralized Filter(분산형 필터), Information Filter(정보필터), Extended Filter (확장필터), Standoff Tracking(목표물 추적), Cooperative Control(협력 제어)

1. 서 론

고정의 무인항공기는 이동하는 지상 목표물을 지속적으로 추적하기 위해 목표물을 중심으로 선회하며 비행한다. 추적하고자 하는 목표물이나

다른 관측자가 목표물의 위치와 속도를 실시간으로 제공할 경우, 항공기는 목표물과의 상대위치와 상대속도를 고려한 선회기동을 수행하여 목표물을 지속적으로 추적한다. 반면, 목표물이나 외부 관측자가 정보를 제공하지 않는 경우에는 항공기 센서를 이용하여 목표물의 위치와 속도를 측정해야 한다. 소형 무인항공기의 경우, 탑재공간과 비용의 제약 때문에 상대적으로 저렴하고 성능이 우수하지 못한 최소한의 센서를 탑재하여 결국 목표물에 대한 추적성능이 저하된다. 한편, 2대 이상의 무인항공기가 협력하여 목표물의 상

† 2011년 3월 29일 접수 ~ 2011년 10월 25일 심사완료

* 정희원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 정희원, 서울대학교 기계항공공학부
교신저자, E-mail: ydkim@snu.ac.kr,
서울시 관악구 신림동 산 56-1

태를 측정하면, 이러한 약점을 극복할 수 있다. 이 과정에서 목표물 측정값을 평균하여 사용하는 단순한 방식보다 다양한 필터를 이용하면 목표물의 위치와 속도 추정성능을 개선할 수 있다 [1]. 이를 위해 여러 센서정보를 효율적으로 교환하고 융합하기 위한 추정기법들이 연구되어 왔다 [2,3].

최근에는 다수의 무인항공기를 협력 운용하여 공격, 정찰, 추적 성능을 향상시키는 다양한 추정기법이 연구되어 왔다[4]. Sinclair 등은 센서의 공분산 형태에 따른 항공기 2대의 최적기동을 계산하였고[5], Frew는 목표물 측정성능을 최대화하기 위하여 거리를 유지하는 방법과 위상각을 유지하는 방법을 비교하였다[6]. Whitacre 등은 정보량 관점에서 목표물 고도와 잡음 크기에 따른 추정성능을 검증하였다[7].

한편, 추정성능을 극대화하기 위하여 다수의 무인항공기가 이동하는 목표물을 추적할 경우에 대하여 다양한 유도제어 기법이 연구되었는데 [8], 그 중에서 백터필터를 이용한 제어기법은 수렴성과 확장성 측면에서 유리하다고 알려져 있다 [9]. 참고문헌 [10]에서는 항공기 간 충돌방지 성능을 개선하기 위해 속도 대신 기수각을 제어하는 기법이 제안되었다. 그렇지만 참고문헌 [9], [10]에서는 모든 항공기가 목표물의 위치와 속도를 매 순간 정확하게 측정한다는 가정 하에 이동 목표물을 추적하는 제어기법을 제안하였다. 이와 같은 가정은 불특정 목표물, 특히 추적 항공기를 회피하려는 목표물에 대하여 적용할 수 없다는 문제가 있다.

본 논문에서는 다수 무인항공기가 이동하는 목표물을 추적하기 위한 제어명령을 생성하기 위하여, 목표물의 위치와 속도를 협력하여 추정하는 기법을 연구하였다. 목표물에 대한 상대거리, 시선각 측정치를 이용하여 목표물의 위치와 속도를 추정하는 동시에 목표물 정보를 다른 항공기와 공유하여 추정성능을 향상시키는 필터를 설계하였다. 분산형 필터로 추정한 목표물의 위치와 속도 정보를 이용하여 수치 시뮬레이션을 수행하였고, 필터 구성에 따른 추정성능을 비교하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 목표물에 대한 측정식과 공분산을 정의하고, 개별 확장필터와 분산형 확장필터를 설계한다. 3장에서는 수치 시뮬레이션을 수행하여 개별 확장필터와 분산형 확장필터의 목표물 추정 및 추적 성능을 비교한다. 그리고 4장에서는 결론을 맺도록 한다.

II. 분산형 필터를 이용한 목표물 상태 추정

2.1 이동 목표물 측정식

본 연구에서는 고정익 항공기를 고려하였으며, 항공기 속도와 고도는 일정하다고 가정하였다. 룰각 크기에 따라 기수각이 변하는 2차원 평면상의 질점모델 운동방정식은 다음과 같다[11].

$$\dot{x}_i = V_i \cos Y_i \quad (1)$$

$$\dot{y}_i = V_i \sin Y_i \quad (2)$$

$$\dot{f}_i = (g/V_i) \tan f_i \quad (3)$$

$$\dot{f}_{c,i} = -(1/t_f) f_i + (1/t_f) f_{c,i} \quad (4)$$

여기서 (x_i, y_i) 는 항공기 위치, V_i 는 속도, Y_i 는 기수각, f_i 는 룰각, $f_{c,i}$ 는 룰각명령, t_f 는 룰각 시정수, 그리고 g 는 중력가속도이다. 아래 첨자 i 는 i 번째 항공기를 의미한다. 항공기가 추적하고자 하는 목표물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\dot{x}_i = V_i \cos Y_i \quad (5)$$

$$\dot{y}_i = V_i \sin Y_i \quad (6)$$

여기서 (x_i, y_i) 는 목표물 위치, V_i 는 속도, Y_i 는 기수각이며, 시간에 따라 변하는 임의의 속도와 방향으로 이동한다고 가정하였다.

관성좌표계에서의 항공기와 목표물 간의 관계를 그림 1에 나타내었다. 항공기의 고도와 지상 목표물 고도는 일정하다는 가정 하에 항공기와 목표물을 동일 평면상에 표시하였다. 이동 목표물에 대하여 항공기에서는 다음과 같이 상대거리와 시선각을 측정한다고 가정하였다.

$$\begin{aligned} z_i &= \begin{bmatrix} r_{m,i} \\ \lambda_{m,i} \end{bmatrix} = h(x_i, y_i, x_i, y_i) + v_i \\ &= \begin{bmatrix} r_i \\ \lambda_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{r,i} \\ v_{\lambda,i} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \sqrt{(x_i - x_i)^2 + (y_i - y_i)^2} \\ \tan^{-1}((y_i - y_i)/(x_i - x_i)) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{r,i} \\ v_{\lambda,i} \end{bmatrix} \quad (7) \end{aligned}$$

여기서 r_i 는 i 번째 항공기와 목표물의 실제 거리, $r_{m,i}$ 는 i 번째 항공기에서 측정한 목표물까지의 거리, λ_i 는 그림 1과 같이 정의된 실제 시선각, $\lambda_{m,i}$ 는 시선각의 측정치, v_i 는 평균이 0이고

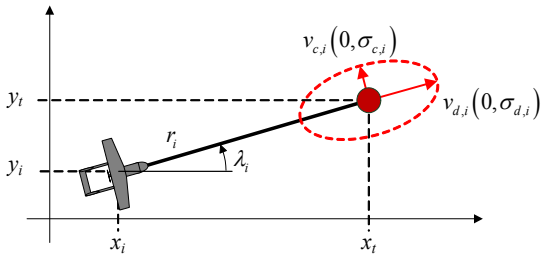


그림 1. 항공기, 목표물의 위치와 시선각 정의

공분산이 $R(k)$ 旣 2×2 인 백색잡음이다. 본 연구에서 $v_{r,i}$ 와 $v_{\lambda,i}$ 는 상대거리와 시선각에 대한 측정잡음으로 다음과 같이 정의한다 [5].

$$v_{r,i} \sim (0, \sigma_{r,i}), \sigma_{r,i} = 0.05r_i \quad (8)$$

$$v_{\lambda,i} \sim (0, \sigma_{\lambda,i}), \sigma_{\lambda,i} = 0.005 \quad (9)$$

여기서 $S_{r,i}$ 와 $S_{\lambda,i}$ 는 각각 $v_{r,i}$ 와 $v_{\lambda,i}$ 의 표준편차이다. 센서 특성에 의해 거리에 대한 측정잡음은 상대거리에 비례하여 증가하는 반면, 시선각에 대한 측정잡음은 거리에 관계없이 일정하다. 목표물 위치는 식 (7)의 측정치를 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\hat{x}_i = x_i + r_{m,i} \cos \lambda_{m,i} \quad (10)$$

$$\hat{y}_i = y_i + r_{m,i} \sin \lambda_{m,i} \quad (11)$$

여기서 (\hat{x}_i, \hat{y}_i) 의 측정잡음 $v_{x,i}$ 와 $v_{y,i}$ 는 그림 1에 표시된 항공기 직선방향에 대한 측정잡음 $v_{d,i}$ 와 직선방향에 수직인 측정잡음 $v_{c,i}$ 을 고려하여 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} v_{x,i} \\ v_{y,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \lambda_i & \sin \lambda_i \\ -\sin \lambda_i & \cos \lambda_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{d,i} \\ v_{c,i} \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서 $v_{d,i}$ 와 $v_{c,i}$ 의 표준편차는 각각 $S_{d,i}$ 와 $S_{c,i}$ 이고, 식 (8), (9)의 표준편차와 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{d,i} \\ \sigma_{c,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{r,i} \\ \sigma_{\lambda,i} r_i \end{bmatrix} \quad (13)$$

결과적으로 항공기에서 추정된 (\hat{x}_i, \hat{y}_i) 는 실제 목표물의 위치 (x_i, y_i) 에 대하여 그림 1에 표시된 것과 같이 타원 분포를 갖게 되고, 사용되는 센서의 종류에 따라 분포형태가 달라진다. 본 연구

에서는 식 (8), (9)에 정의된 것과 같이 측정방향의 오차가 측정방향에 수직인 방향의 오차보다 크다고 가정하였다.

2.2 개별 확장필터를 이용한 목표물 상태 추정

본 연구에서는 이동하는 목표물의 위치와 속도를 추정하기 위하여, 비선형 형태의 측정식 (7)에 대한 확장필터(extended filter)를 고려하였다. 분산형 필터의 구성과 항공기 간 정보교환 및 계산에 용이하도록 칼만 필터의 공분산 역행렬 형태(information filter)를 사용한다. 필터에서는 다음과 같이 표현되는 목표물 상태변수를 추정한다.

$$X(k+1) = f(X(k), k) + w(k)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & Dt & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \\ v_x(k) \\ v_y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_x(k) \\ w_y(k) \\ w_{v_x}(k) \\ w_{v_y}(k) \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서 Dt 는 단위시간, $v_{i,x}(k)$ 와 $v_{i,y}(k)$ 는 각각 x -방향, y -방향의 목표물 속도성분, $w(k)$ 는 평균이 0이고 공분산이 $Q(k)$ 旣 4×4 인 백색잡음이다.

여러 대의 무인항공기 중에서 i 번 항공기의 정보행렬(information matrix) $Y_i(k)$ 와 정보 상태변수(information state) $\hat{y}_i(k)$ 는 다음과 같이 정의된다[1].

$$Y_i(k) = P_i^{-1}(k) \quad (15)$$

$$\hat{y}_i(k) = Y_i(k) \hat{X}_i(k) \quad (16)$$

여기서 $P_i(k)$ 는 공분산 행렬이고, $\hat{X}_i(k)$ 는 i 번째 항공기에서 추정한 목표물 상태변수이다. 또한, $(k+1)$ 번째 예측(prediction) 단계의 정보행렬과 정보 상태변수는 다음과 같이 계산된다.

$$Y_i(k+1|k) = \tilde{f}_x^T(k+1) Y_i^{-1}(k|k) \tilde{f}_x(k+1) + Q(k+1)^{-1} \quad (17)$$

$$\hat{y}_i(k+1|k) = Y_i(k+1|k) f(\hat{X}_i(k|k)) \quad (18)$$

여기서 \tilde{f}_x 는 f 의 자코비안(Jacobian) 행렬이다 한편, $(k+1)$ 번째 측정(measurement) 단계의 정

보행렬과 정보 상태변수는 다음과 같이 계산된다 [1].

$$Y_i(k+1|k+1) = Y_i(k+1|k) + I_i(k+1) \quad (19)$$

$$\hat{y}_i(k+1|k+1) = \hat{y}_i(k+1|k) + i_i(k+1) \quad (20)$$

여기서 $i_i(k+1)$ 는 측정치 $z_i(k+1)$ 로 인한 정보 상태변수 변화량이고, $I_i(k+1)$ 는 $i_i(k+1)$ 에 해당하는 정보행렬로, 각각 다음과 같이 정의된다.

$$i_i(k+1) = h_x^T(k+1)R^{-1}(k+1) \left(z_i(k+1) - h_x(k+1)\hat{X}_i(k+1|k) \right) \quad (21)$$

$$n_i(k+1) = z_i(k+1) - h(\hat{X}_i(k+1|k)) \quad (22)$$

$$I_i(k+1) = h_x^T(k+1)R^{-1}(k+1)h_x(k+1) \quad (23)$$

여기서 $\tilde{N}h_x$ 는 h 의 자코비안 행렬이다. 최종적으로 $(k+1)$ 번째 목표물의 상태변수 추정치와 공분산은 다음과 같이 계산된다.

$$\hat{X}_i(k+1) = Y_i^{-1}(k+1|k+1)\hat{y}_i(k+1|k+1) \quad (24)$$

$$P_i(k+1) = Y_i^{-1}(k+1|k+1) \quad (25)$$

2.3 분산형 확장필터를 이용한 목표물 상태 추정

본 절에서는 다수 무인항공기가 추적하는 목표물의 위치와 속도에 대한 추정 성능을 향상시키기 위하여 분산형 확장필터를 구성한다. 앞 절에서 설계한 정보행렬과 정보 상태변수를 이용할 경우, 항공기 간에 주고받은 정보를 더하는 것으로 여러 항공기의 정보교환 및 융합을 계산할 수 있다. 이때, n 대의 무인항공기에 대하여 i 번 항공기는 식 (21)-(23)에서 계산된 $i_i(k)$ 와 $I_i(k)$ 를 전송하고, j 번 항공기는 같은 방식으로 $i_j(k)$ 와 $I_j(k)$ 를, n 번 항공기는 $i_n(k)$ 와 $I_n(k)$ 을 전송한다. $(k+1)$ 번째 추정단계에서 i 번 항공기는 식 (19)와 (20) 대신 다음과 같은 식을 이용하여 정보행렬과 정보 상태변수를 계산한다[1].

$$Y_i(k+1|k+1) = Y_i(k+1|k) + I_i(k+1) + \sum_{m=1, m \neq i}^n I_m(k) \quad (26)$$

$$\hat{y}_i(k+1|k+1) = \hat{y}_i(k+1|k) + i_i(k+1) + \sum_{m=1, m \neq i}^n i_m(k) \quad (27)$$

이와 같이 다른 항공기에서 계산된 정보를 융합하여 목표물의 상태변수 추정치와 공분산을 계산하면, 개별 확장필터를 이용하여 독립적으로 계산한 경우보다 목표물의 위치와 속도에 대한 추정오차를 감소시킬 수 있다. 또한, i 번 항공기의 측정치 오차가 증가하거나 일시적으로 측정이 불가능하게 되더라도, 다른 항공기의 측정 정보를 수신하여 계산하기 때문에 개별 필터만을 사용할 때보다 신뢰성이 향상된다.

III. 수치 시뮬레이션

3.1 벡터필드를 이용한 목표물 추적

본 연구에서 제안된 목표물 상태 추정기법의 성능을 검증하기 위하여 본 연구에서 설계한 필터와 기존에 연구된 유도제어 기법을 이용하여 이동하는 목표물의 추적 시뮬레이션을 수행하였다. 기존 연구에서는 모든 항공기가 목표물의 위치와 속도 정보가 매 순간 정확하게 제공된다는 가정 하에 시뮬레이션을 수행하였다 [9,10]. 이와 같은 가정은 목표물이 자신의 위치와 속도를 제공하는 경우에만 가능하고, 불특정 목표물, 특히 추적 항공기를 회피하려는 목표물에 대해서는 적용할 수 없는 가정이다. 따라서 본 시뮬레이션에서는 목표물에 대한 상대거리, 시선각 측정치를 이용하여 목표물의 위치와 속도를 추정하고, 이를 이용하여 다수 무인항공기의 이동 목표물 추적 시뮬레이션을 수행한다.

식 (24)에서 계산된 목표물의 상태변수는 다음과 같이 위치에 대한 추정치와 속도 성분에 대한 추정치로 구성된다.

$$\hat{X}_i(k) = \begin{bmatrix} \hat{x}_i(k) \\ \hat{y}_i(k) \\ \hat{v}_{i,x}(k) \\ \hat{v}_{i,y}(k) \end{bmatrix}^T \quad (28)$$

여기서 $\hat{x}_i(k)$ 와 $\hat{y}_i(k)$ 는 각각 x -방향, y -방향의 목표물 위치 추정치이고, $\hat{v}_{i,x}(k)$ 과 $\hat{v}_{i,y}(k)$ 는 각각 x -방향, y -방향의 목표물 속도성분 추정치이다. 본 연구에서는 이 추정치를 이용하여 다음과 같이 기수각 명령을 계산한다.

$$Y_{d,i}(k) = \tan^{-1} \frac{\sum_{j=1}^n \frac{y_j(k) - \hat{y}_i(k)}{x_j(k) - \hat{x}_i(k)} - \frac{\hat{y}_i(k) - v_{i,y}(k)}{\hat{x}_i(k) - v_{i,x}(k)}}{\sum_{j=1}^n \frac{y_j(k) - \hat{y}_i(k)}{x_j(k) - \hat{x}_i(k)} - \frac{\hat{y}_i(k) - v_{i,y}(k)}{\hat{x}_i(k) - v_{i,x}(k)}} \quad (29)$$

여기서 $\hat{x}_{d,i}(k)$ 와 $\hat{y}_{d,i}(k)$ 는 x -방향, y -방향의 기준 상대속도이다[10].

목표물 추적 성능을 비교하기 위하여 4대의 무인항공기가 1개의 지상 목표물을 추적하는 상황을 고려하였다. 목표물은 (0,0)인 점에서 출발하여 5m/s의 속도로 선회한다. 1번 항공기의 비행 시작점은 (800,800), 2번 항공기의 시작점은 (900,900), 3번 항공기의 시작점은 (1000,1000), 4번 항공기의 시작점은 (1100,1100)이다. 목표물을 사방에서 감시하기 위하여 각 항공기는 전방 항공기에 대하여 90°의 위상각 차를 유지하고, 임무 및 안전상의 이유로 목표물로부터 300m의 거리를 유지한다. 위상각을 유지하기 위하여 기수 제어 모드를 적용하였고 [10], 롤각 명령을 추종하기 위한 자동조종장치의 반응은 시정수 0.1인 1차 전달지연으로 고려하였다. 항공기 물각은 -35 ~ 35°의 범위에서 제어되고, 속도는 25m/s로 일정하다.

3.2 개별 확장필터를 이용한 목표물 추적 결과

본 절에서는 4대의 항공기가 목표물에 대한 정보를 교환하지 않고, 각각 독립적으로 목표물 위치와 속도를 추정하였다. 식 (15)-(25)의 개별 확장필터를 이용한 목표물의 위치와 속도추정 결과를 그림 2-6에 나타내었다. 목표물의 이동궤적과 항공기의 비행궤적을 그림 2에 나타내었다.

4대의 항공기 중 대표적으로 2번 항공기의 목표물 위치추정 결과를 그림 3에 나타내었고, 목표물 속도추정 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 5는 2번 항공기 필터의 공분산 행렬 대각선 항의 크기변화를 나타낸 것이다. 공분산 행렬에서 목표물의 위치에 해당하는 (1,1), (2,2)항이 속도에 해당하는 (3,3), (4,4)항보다 큰 값으로 수렴하였다. 그리고 그림 1에서 보이는 추정치 타원 분포 때문에 x -방향, y -방향의 크기가 변갈아가며 변하였다. 그림 6은 4대 항공기의 정보행렬 행렬식(determinant) 크기 변화를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 각 항공기가 목표물에 대하여 갖고 있는 정보량을 $Y_i(k)$ 의 행렬식에 대한 제곱근으로 정의하여 비교하였는데, 단일 확장필터에서는 4대의 항공기가 유사한 정보량을 갖는 것으로 확인되었다.

표 1에 각 항공기의 위치 추정치와 위치, 속도 추정치의 표준편차를 정리하였다. 항공기로부터 목표물까지의 거리와 시선각을 측정하여 식 (10)과 (11)로 계산한 결과의 표준편차는 14.0 이상으

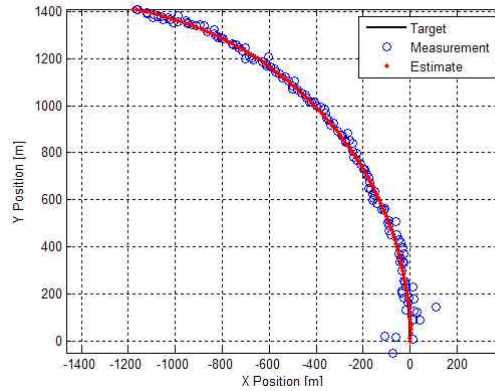


그림 2. 분산형 필터: 2번 항공기의 목표물 위치 추정치

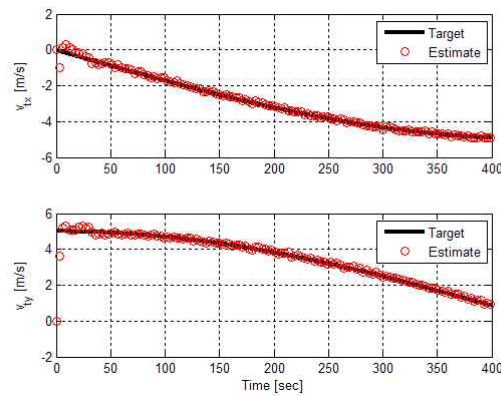


그림 3. 분산형 필터: 2번 항공기의 목표물 속도 추정치

로 매우 큰 편이며, 항공기 시작점과 목표물 사이의 거리가 멀어질수록 증가하였다. 반면, 확장필터를 사용하여 목표물 위치를 추정한 결과의 표준편차는 2.55 이하로 감소하였다. 또한, 센서에서 측정되지 않는 목표물 속도를 표준편차 0.4 이하의 정확도로 추정하였으며, 이를 식 (29)의 계산에 사용하여 이동하는 목표물을 성공적으로 추적하였다.

3.3 분산형 확장필터를 이용한 목표물 추적 결과

본 절에서는 각 항공기가 전방 항공기로부터 식 (21), (23)의 정보를 수신하여 식 (19), (20) 대신 식 (26), (27)을 사용하여 목표물 위치와 속도를 추정하였다. 분산 확장필터를 이용한 목표물 추정 결과를 그림 7-10에 나타내었다. 그림 7은 2번 항공기의 목표물 위치추정 결과이고, 그림 8

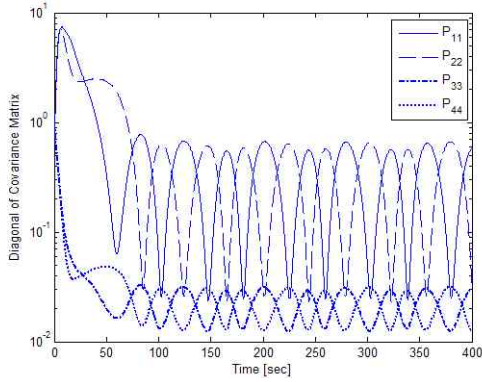


그림 4. 개별 필터: 2번 항공기 공분산 행렬 대각항

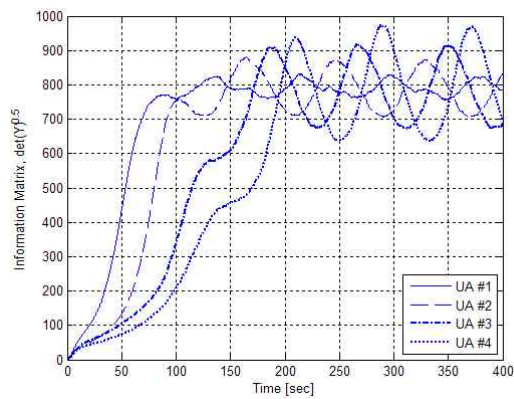


그림 5. 개별 필터: 4대 항공기의 정보행렬 행렬식

표 1. 개별 확장필터의 시뮬레이션 결과

항공기 번호		1번	2번	3번	4번
초기 상대거리 (m)		1131	1273	1414	1556
위치 측정 표준편차 (m)	x_t	14.18	17.41	17.78	19.93
	y_t	14.02	18.25	20.10	23.12
위치 추정 표준편차 (m)	\hat{x}_t	1.87	2.05	2.04	2.12
	\hat{y}_t	1.73	2.02	2.38	2.55
속도 추정 표준편차 (m)	$\hat{v}_{t,x}$	0.21	0.19	0.19	0.20
	$\hat{v}_{t,y}$	0.36	0.36	0.38	0.35

은 2번 항공기의 목표물 속도추정 결과이다. 그림 9는 2번 항공기 필터의 공분산 행렬 대각항의 크기 변화를 나타낸 것이고, 그림 10은 4대 항공기에 대한 정보행렬의 행렬식 크기 변화를

나타낸 것이다.

그림 5와 그림 9를 비교하면, 분산형 확장필터를 사용하여 목표물 위치와 속도에 대한 추정이 정확해졌음을 알 수 있다. 그리고 그림 10에서 보

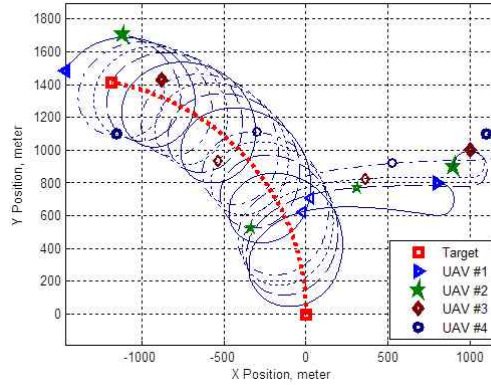


그림 6. 무인기 비행 궤적

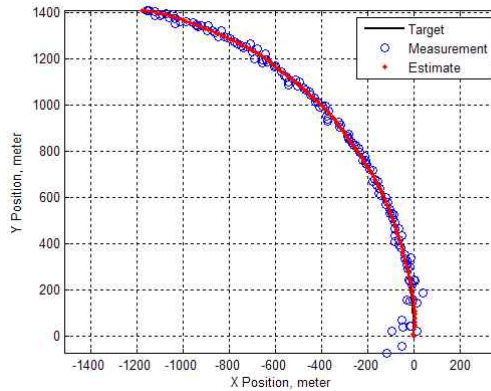


그림 7. 개별 필터: 2번 항공기의 목표물 위치 추정치

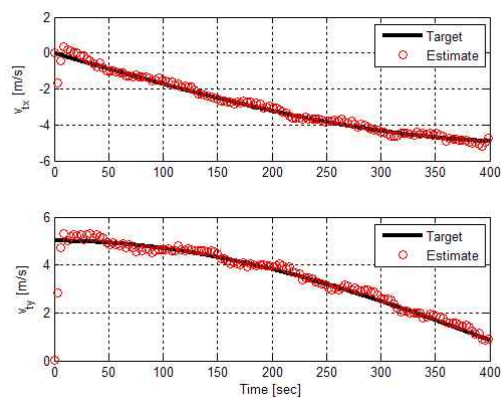


그림 8. 개별 필터: 2번 항공기의 목표물 속. 추정치

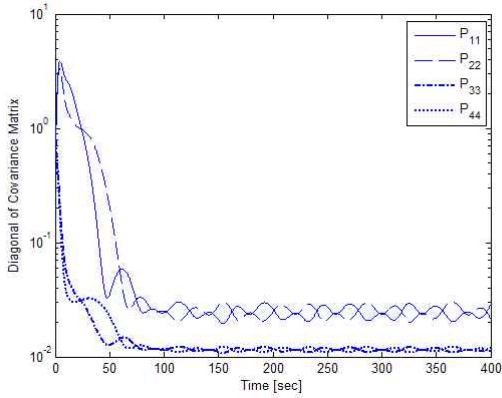


그림 9. 분산형 필터: 2번 항공기 공분산 행렬 대각항

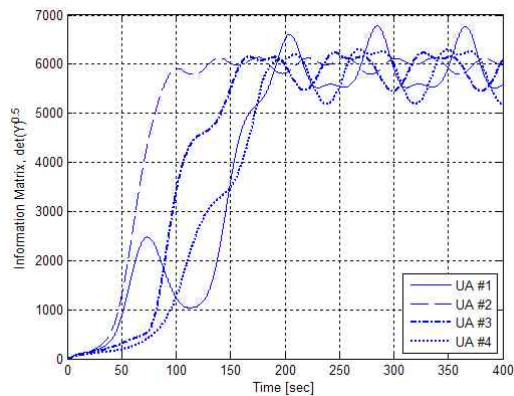


그림 10. 분산형 필터: 4대 항공기의 정보행렬 행렬식

듯이 모든 항공기의 정보량이 크게 증가하였다. 표 2에 각 항공기의 위치 측정치와 위치, 속도 추정치의 표준편차를 정리하였다. 분산형 확장필터를 사용하여 목표물 위치를 추정한 결과, 위치 표준편차가 개별 확장필터를 사용한 경우의 표준편차보다 감소하였다. 뿐만 아니라 표 1에서 보듯이 개별 확장필터를 사용하는 경우 항공기 시작점이 멀수록 위치추정 표준편차가 증가하는 경향이 있으나, 분산형 확장필터를 사용한 경우는 항공기 간 정보교환을 통하여 거리에 따른 위치추정 표준편차 차이가 뚜렷하게 감소하였다.

3.4 목표물 추적 시뮬레이션 결과 비교

개별 확장필터를 이용한 목표물 추적 결과와 분산형 확장필터를 이용한 목표물 추적 결과를 표 3에 정리하였다. 분산형 확장필터의 성능 변화를 단계적으로 비교하기 위하여 1, 3, 4번 항공

표 2. 분산형 확장필터의 시뮬레이션 결과

항공기 번호		1번	2번	3번	4번
초기 상대거리 (m)		1131	1273	1414	1556
위치 측정 표준편차 (m)	x_t	14.10	17.02	17.83	19.67
	y_t	13.97	17.86	20.05	23.33
위치 추정 표준편차 (m)	\hat{x}_t	1.28	1.13	1.16	1.42
	\hat{y}_t	1.20	0.97	1.26	1.93
속도 추정 표준편차 (m)	$\hat{v}_{t,x}$	0.14	0.13	0.13	0.14
	$\hat{v}_{t,y}$	0.32	0.33	0.33	0.33

표 3. 개별 확장필터와 분산형 확장필터 성능 비교

비교항목	항공기 번호	개별 필터	부분 분산형 필터	분산형 필터
정보행렬 $\sqrt{\det(Y)}$	1	790.6	790.4	5949.1
	2	781.2	5935.9	6001.4
	3	793.9	792.6	5908.0
	4	795.9	794.5	5924.0
\hat{x}_t 추정치 표준편차 (m)	1	1.87	1.81	1.28
	2	2.05	1.15	1.13
	3	2.04	1.73	1.16
	4	2.12	2.17	1.42
\hat{y}_t 추정치 표준편차 (m)	1	1.73	1.77	1.20
	2	2.02	1.01	0.97
	3	2.38	2.41	1.26
	4	2.55	2.77	1.93
목표물 상대거리 오차평균 (m)	1	4.83	4.95	4.70
	2	8.56	7.96	7.92
	3	13.78	13.39	12.80
	4	18.16	18.44	17.68

기는 개별 확장필터를 이용하고, 2번 항공기는 1번 항공기의 목표물 정보를 수신하여 분산형 확장필터를 이용한 시뮬레이션(부분 분산형 확장필터) 결과를 비교하였다. 개별 확장필터, 부분 분산형 확장필터, 분산형 확장필터를 비교한 결과, 다른 항공기로부터 수신된 목표물 정보를 필터 계산에 사용하여 정보량이 크게 증가하였다. 부분 분산형 확장필터의 정보량에서 보듯이 1번 항공기의 정보를 수신한 2번 항공기의 정보량은 1, 3, 4번 항공기의 정보량보다 크게 증가하였고,

분산형 확장필터에서는 모든 항공기의 정보량이 증가하였다.

이와 같은 현상은 2번 항공기의 위치추정 표준편차에서도 확인된다. 개별 확장필터에서는 목표물로부터 초기위치가 멀수록 위치추정 오차가 증가하였다. 그러나 부분 분산형 확장필터에서는 2번 항공기의 위치추정 오차가 1번 항공기의 위치추정 오차보다 감소하였다. 분산형 확장필터에서는 모든 항공기가 전방 항공기의 목표물 정보를 수신하여 목표물 위치를 추정한 결과, 모든 항공기의 위치추정 오차가 동등한 수준으로 감소하였다.

이동하는 목표물에 대하여 300m를 일정하게 유지하는 성능은 목표물의 위치와 속도에 대한 추정오차가 작을수록 향상되기 때문에 상대거리 오차는 분산형 확장필터의 경우가 가장 작았다. 필터를 사용하지 않고 식 (10), (11)을 사용하여 계산한 결과를 이용하여 목표물 추적을 수행한 경우, 표 1, 2에 보이는 것과 같이 위치추정 표준편차가 커서 지속적인 목표물 추적이 불가능하였다. 즉, 식 (29)를 계산하기 위한 위치, 속도가 정확하지 않고 고주파수의 측정잡음이 제어명령에 여과 없이 적용되어 정상적인 비행이 불가능하였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 다수의 무인항공기가 이동하는 목표물을 추적하기 위한 제어명령을 생성하기 위하여, 목표물의 위치와 속도를 협력하여 추정하는 필터를 설계하였다. 항공기에서 일반적으로 측정되는 목표물까지의 상대거리와 시선각 정보를 이용하여 확장필터의 형태로 위치와 속도 성분을 추정하였다. 또한, 항공기 간 정보교환 및 계산을 용이하게 하기 위하여 공분산 역행렬 형태의 정보필터를 사용하였다. 전방 항공기의 위치정보와 함께 목표물 정보를 수신하여 항공기 간 위상차를 유지하는 동시에 목표물의 위치와 속도 추정오차를 감소시켰다. 개별 확장필터, 부분 분산형 확장필터, 분산형 확장필터를 이용한 수치 시뮬레이션을 수행하여 이동 목표물 추정 및 추적 성능을 비교하였다. 분산형 확장필터를 이용한 결과, 목표물 위치추정 오차가 감소하였고, 보다 정확하게 목표물과의 거리를 유지하였다.

후 기

본 논문은 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구입니다(계약번호: UD090081JD).

참고문헌

- 1) Mutambara, A. G., *Decentralized Estimation and Control for Multisensor Systems*, CRC Press LLC, Boca Raton, FL, 1998.
- 2) 배중희, 김유단, "Decentralized Information Filter를 이용한 스마트 무인기의 고장진단 및 분리 기법 연구," 한국항공우주학회 추계학술발표회, 제주, 제주도, 2010년 11월.
- 3) Lee, D. J., "Unscented Information Filtering for Distributed Estimation and Multiple Sensor Fusion," *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Honolulu, HI, Aug. 2008.
- 4) Grocholsky, B., Keller, J., Kumar, V., and Pappas, G., "Cooperative air and ground surveillance," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 13, No. 3, 2006, pp. 16-25.
- 5) Sinclair, A. J., Prazenica, R. J., and Jeffcoat, D. E., "Optimal and Feedback Path Planning for Cooperative Attack," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 31, No. 6, 2008, pp. 1708-1715.
- 6) Frew, E. W., "Sensitivity of Cooperative Target Geolocalization to Orbit Coordination," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 31, No. 4, 2008, pp. 1028-1040.
- 7) Whitacre, W. W., Tillinghast, G., and Campbell, M. E., "Information-Theoretic Optimization of Periodic Orbits for Persistent Cooperative Geolocation," *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Honolulu, HI, Aug. 2008.
- 8) Wise, R. A., and Rysdyk, R. T., "UAV Coordination for Autonomous Target Tracking," *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Keystone, CO, Aug. 2006.
- 9) Frew, E. W., Lawrence, D. A., and Morris, S., "Coordinated Standoff Tracking of Moving Targets Using Lyapunov Guidance Vector Fields," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 31, No. 2, 2008, pp. 290-306.
- 10) 윤승호, 김유단, "지상 목표물 추적을 위한 다수 무인항공기의 협력제어," 한국항공우주학회지, 제 39권, 제 20호, 2011년, pp. 114-120.
- 11) 김병수, 김유단, 방효충, 탁민제, 홍성경, 비행동역학 및 제어, 경문사, 서울, 2004.