다중 UAV에서 측정된 거리차 정보를 이용한 선형 강인 표적추적 필터 설계

논 문

61-2-15

Linear Robust Target Tracking Filter Using the Range Differences Measured By Formation Flying Multiple UAVs

이 혜 경* · 한 슬 기** · 나 원 상†
(Hye-Kyung Lee · Seul-Ki Han · Won-Sang Ra)

Abstract - This paper addresses a new passive target tracking problem using the range differences measured by cooperative UAVs. In order to solve the range difference based passive target tracking problem within the framework of linear robust state estimation, the uncertain linear measurement model which contains the stochastic parameter uncertainty is derived by using the noisy range difference measurements. To cope with the performance degradation due to the stochastic parameter uncertainty, the recently developed non-conservative robust Kalman filtering technique [1] is applied. For the cruciform formation flying UAVs, the relationship between the target tracking performance and the measurement errors is quantitatively analyzed. The proposed filter has practical advantages over the classical nonlinear filters because, for its recursive linear structure, it can provide satisfactory convergence properties and is suitable for real-time multiple UAVs applications. Through the simulations, the usefulness of the proposed method is demonstrated.

Key Words : Multiple UAVs, Passive target tracking, Range difference, Non-conservative robust Kalman filter

1. 서 론

다중 UAV 체계는 한정된 자원의 효율적 활용, 생존성 증대, 광범위한 영역에 대한 향상된 감시·정찰 능력 등 단일 UAV 체계와 대비되는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점들로 인해 최근 다중 UAV 체계의 군사과학 응용을 목적으로 하는 제어계측 기술 개발이 활발히 이루어지고 있다. 실제로 많은 공개문헌에서 다중 UAV 체계 편대제어, 경로계획 등 다중 UAV 제어문제와 관련된 다양한 연구결과들을 확인할 수 있다. 이러한 연구결과들은 대부분 다중 UAV 간 혹은 표적-UAV 간 상대기하 정보가 주어지는 상황을 전제로 한 것이나, 아직까지 이를 뒷받침하기 위한 정밀 항법 및 표적추적 기술에 대한 관심과 문제인식은 충분치 않은 상황이다. 정확한 상대기하 정보의 획득이 궁극적으로 다중 UAV를 활용한 군사과학 임무수행의 성패를 좌우하는 중요 요소임을 감안할 때, 관련 상태추정 기법 개발은 다중 UAV 체계 응용을 위한 선결과제 중 하나라 할 수 있다 [1-4].

일반적으로 다중 UAV 체계는 피동센서로부터 획득된 거리차, 시선각 등의 정보를 이용하여 표적 정보를 산출하게 된다. 따라서, 다중 UAV 체계를 활용한 표적추적 문제는 일종의 피동 표적추적(passive target tracking) 문제로 분류

할 수 있다. 다만, 가관측성 문제가 추정성능에 직접적인 영향을 미치는 기존 피동 표적추적 문제와 달리, 다중 UAV 기반 피동 표적추적 문제는 복수의 피동센서 정보를 어떻게 하면 효과적으로 융합할 수 있느냐에 연구의 초점이 맞추어져 있는 새로운 성격의 피동 표적추적 문제라 할 수 있다. 다중 UAV 기반 피동 표적추적문제는 획득된 표적 측정치가 추정해야 할 표적 상대기하 정보에 관한 비선형 관계식으로 기술되므로, 추정이론 관점에서 볼 때, 비선형 시변 시스템에 대한 상태추정 문제로 귀결된다 [6-9]. 따라서, 이동 표적 추적필터 설계를 위해 최대우도 추정기(MLE: maximum likelihood estimator), 확장 칼만필터(EKF: extended Kalman filter), 무향 칼만필터(UKF: unscented Kalman filter) 등과 같은 다양한 비선형 상태추정 기술이 적용될 수 있다. 하지만 이러한 비선형 상태추정 기법들은 장거리에서의 느린 수렴속도, 낮은 SNR 환경에서의 추적성능 저하, 상태 추정치의 일관성(consistency) 결여 등 실제 응용 시 간과할 수 없는 다양한 문제들을 안고 있다 [10,11].

일각에서는 전술한 비선형 피동 표적추적 필터의 단점들이 다중 UAV 기반 피동 표적추적 문제 자체의 비선형에 기인한다는 사실에 착안하여 측정잡음의 영향을 의도적으로 무시한 채 유도된 선형 측정방정식에 공칭(nominal) 최소자승 추정기법을 적용한 의사선형 추정기(PLLSE: pseudo-linear least squares estimator)를 제안하기도 하였다 [12,13]. PLLSE 기법은 필터 구조가 단순할 뿐만 아니라, 상태 추정치의 일관성을 담보할 수 있고 수렴특성이 좋다는 장점을 갖고 있지만, 측정잡음의 영향을 무시할 수 없는 경우, 추정성능이 급격히 저하되는 단점이 있다. 이러한 PLLSE의 한

* 준 회 원 : 한동대학교 기계제어공학부 석사과정

** 정 회 원 : 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

† 교신저자, 정회원 : 한동대학교 기계제어공학부 조교수

E-mail : wonsang@handong.edu

접수일자 : 2011년 12월 6일

최종완료 : 2012년 1월 20일

그림 1 다중 UAV - 이동표적 간 조우 기하

Fig. 1 Engagement geometry between multiple UAVs and target

제를 극복하기 위해 제약 의사 선형 최소자승 추정기 (CPLLSE: constrained PLLSE)가 고안되었다 [14]. 이 방법은 상태변수 간의 제약조건과 PLLSE 목적함수를 결합하여 제약 최적화 문제를 구성하는 방식을 취함으로써 추정성능 향상을 꾀하였다. CPLLSE의 경우, 표적이 이동하지 않는 정적 상황에서는 매우 우수한 추정성능을 제공하지만, 필터 구조상 표적 운동방정식을 고려할 수 없어 이동 표적추적 문제를 효과적으로 다룰 수 없다는 한계가 있다. 또한, 추정치를 얻기 위해 수치해석적 방법을 동원하여 제약최적화 문제의 해를 산출하게 되므로 탑재 컴퓨터 상에서 알고리즘을 실시간 구현하는 것이 용이하지 않다.

본 논문에서는 기존의 비선형 표적추적 필터링 기법 및 PLLSE 기법이 가지고 있는 한계를 극복하기 위해 다중 UAV 기반 이동 표적추적 문제를 선형 강인 필터링 이론 관점에서 재해석한다. 이를 위해 선형필터 구조의 장점을 승계하여, 표적과 기준 UAV 간의 상대운동을 통계적 파라미터 불확실성이 측정행렬에 포함된 불확실성 선형시스템으로 모델링함으로써, 다중 UAV에서 측정된 거리차 정보를 이용한 표적추적 문제가 의사최적 강인 칼만필터(NCRKF: non-conservative robust Kalman filtering) 문제의 특수한 형태임을 보인다. NCRKF 기반 선형 강인 표적추적 필터는 통계적 파라미터 불확실성이 존재하는 상황에서도 오차 평균관점에서 실제 상황에서는 구현 불가능한 최적 선형 칼만 필터와 대등한 성능을 제공할 수 있다 [1]. NCRKF 기반 선형 강인 피동 표적추적 필터는 공칭 칼만필터(혹은 PLLSE)의 추정오차를 제거하기 위해 다중 UAV 간 거리와 거리차 측정잡음 분산의 함수로 기술되는 오차 보상항을 설계변수로 포함한다. 따라서, NCRKF의 설계변수를 분석함으로써, 기존에는 불가능했던 UAV 대형과 추정오차 간의 상관관계를 추론할 수 있다. 제안된 NCRKF 기반 피동 표적추적 필터는 순환 선형필터 구조를 가지므로, 장거리에서 빠른 수렴속도를 보장할 수 있으며, 실시간 구현에 매우 적합하다. 다중 UAV와 대함 표적 조우 시나리오에 대한 시뮬레이션을 통해 제안된 NCRKF 기반 피동 표적추적 필터의 유용성을 확인한다.

2. 다중 UAV에서 측정된 거리차를 이용한 피동 표적추적 필터 설계 문제

2.1 불확정 선형 측정방정식 모델

문제 기술을 단순화하기 위해, 그림 1과 같이 2차원 평면에서의 다중 UAV-표적 간 조우기하를 생각하자. 각각의 UAV에는 1번 UAV를 기준으로 거리 차를 측정하기 위한 센서가 장착되어 있으며, 항법 장치로부터 UAV의 위치, 속도, 가속도 정보가 제공된다. UAV는 사전에 지정된 편대를 유지하며 비행하는 것으로 가정한다.

거리 차 정보 r_j 는 다음과 같이 정의된다.

$$r_j = d_{t,j} - d_{t,1} \quad (1)$$

위의 식에서 j 번째 UAV로부터 표적까지의 거리 $d_{t,j}$ 는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$d_{t,j} = \sqrt{(x_t - x_j)^2 + (y_t - y_j)^2} \quad (2)$$

여기서 (x_t, y_t) 와 (x_j, y_j) 는 각각 표적과 j 번째 UAV의 위치를 의미한다. 식 (2)와 마찬가지로, j 번째에서 i 번째 UAV까지의 거리 $d_{i,j}$ 를 정의할 수 있다.

식 (1) 및 식 (2)에서 확인할 수 있듯이 거리 차 정보는 표적 위치와 비선형 관계식을 갖는다. 따라서 거리차 측정치를 직접 사용하는 경우, 다중 UAV 기반 피동 표적추적 문제는 비선형 필터링 문제로 정의될 수 있다. 선형 상태추정 이론 관점에서 다중 UAV 기반 피동 표적추적 문제를 해결하기 위해서는 거리 차 정보를 표적 상태변수에 관한 선형 함수로 기술할 수 있어야 한다. 이를 위해, 식 (1)을 제곱한 후 식 (2)를 대입하면 다음 선형 관계식을 얻을 수 있다.

$$r_j^2 - d_{j,1}^2 = -2[(x_j - x_1)(y_j - y_1)r_j] \begin{bmatrix} x_t - x_1 \\ y_t - y_1 \\ d_{t,1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

일반적으로 j 번째 UAV의 거리 차 측정치 $\tilde{r}_j$ 에는 측정잡음 δr_j 가 포함되어 있다. 즉,

$$\tilde{r}_j = r_j + \delta r_j \quad (4)$$

위의 식에서 δr_j 는 다음과 같은 통계적 특성을 만족하는 것으로 가정한다.

$$E\{\delta r_j\} = 0, \quad cov\{\delta r_j, \delta r_j\} = \sigma_{r,j}^2 \quad (5)$$

이제, 거리 차 측정치 (4)를 선형 관계식 (3)에 대입하여 정리하면, 다음과 같은 선형 불확정 회귀방정식을 얻을 수 있다.

$$\tilde{r}_j^2 - d_{j,1}^2 - d_{t,j}^2 = -2[(x_j - x_1)(y_j - y_1)(\tilde{r}_j - \delta r_j)] \begin{bmatrix} x_t - x_1 \\ y_t - y_1 \\ d_{t,1} \end{bmatrix} + v_j \quad (6)$$

여기서 회귀오차 v_j 는 다음과 같이 정의된다.

$$v_j \equiv 2\tilde{r}_j \delta r_j - \delta r_j^2 - \sigma_{r,j}^2 \quad (7)$$

$j=2 \sim N$ 번째 UAV에 대해 불확정 선형 회귀방정식 (6)이 모두 만족되므로, 회귀방정식들을 종합하면 k 시점에서 다음과 같은 불확정 선형 측정방정식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{y}_k = H_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k = [\tilde{H}_k - \Delta H_k] \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (8)$$

위의 식에서 상태벡터 $\mathbf{x}$, 측정치 벡터 $\mathbf{y}$, 측정잡음 벡터 $\mathbf{v}$ 및 관련 행렬들은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &\equiv \begin{bmatrix} (x_t - x_1) & (y_t - y_1) & d_{t,1} & (\dot{x}_t - \dot{x}_1) & (\dot{y}_t - \dot{y}_1) & \dot{d}_{t,1} & \ddot{x}_t & \ddot{y}_t & \ddot{d}_{t,1} \end{bmatrix}^T, \\ \mathbf{y} &\equiv \begin{bmatrix} \vdots \\ \tilde{r}_j - d_{j,0}^2 - d_{j,0}^2 - \sigma_j^2 \\ \vdots \end{bmatrix}, \mathbf{v} \equiv \begin{bmatrix} \vdots \\ v_j \\ \vdots \end{bmatrix}, \\ \Delta H &\equiv -2 \begin{bmatrix} \vdots \\ 0 & 0 & \delta r_j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ H &\equiv -2 \begin{bmatrix} \vdots \\ 0 & 0 & r_j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \tilde{H} &\equiv -2 \begin{bmatrix} \vdots \\ 0 & 0 & \tilde{r}_j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

불확정 선형 측정방정식 (8)에서 $\tilde{H}_k$ 는 거리 차 측정치를 이용하여 구성된 측정행렬의 관측치이며, 실제 상황에서는 알 수 없는 측정행렬의 참값 H_k 및 통계적 파라미터 불확실성 ΔH_k 와 $\tilde{H}_k = H_k + \Delta H_k$ 의 관계를 갖는다. 식 (5) 및 (6)을 이용하여 $\mathbf{v}_k$ 와 ΔH_k 에 관한 통계적 특성을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} E\{\mathbf{v}_k\} &= \begin{bmatrix} \vdots \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix}, E\{\Delta H_k\} = \begin{bmatrix} \vdots \\ 0^{1 \times 9} \\ \vdots \end{bmatrix}, \\ R_k &\equiv \text{var}\{\mathbf{v}_k\} = \text{diag}([\dots 2\sigma_{r,j}^2(2r_j^2 + \sigma_{r,j}^2) \dots]), \\ W_k &\equiv E\{\Delta H_k^T R_k^{-1} \Delta H_k\} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0^{1 \times 6} \\ 0 & 0 & 0 & 0^{1 \times 6} \\ 0 & 0 & \sum_{j=2}^N \frac{2}{(2r_j^2 + \sigma_{r,j}^2)} & 0^{1 \times 6} \\ 0^{6 \times 1} & 0^{6 \times 1} & 0^{6 \times 1} & 0^{6 \times 6} \end{bmatrix}, \\ V_k &\equiv E\{\Delta H_k^T R_k^{-1} \mathbf{v}_k\} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\sum_{j=2}^N \frac{2r_j}{2r_j^2 + \sigma_{r,j}^2} \\ 0^{6 \times 1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

2.2 상대운동 모델

다중 UAV에서 측정된 거리 차 정보를 이용한 피동 표적 추적필터를 설계하기 위해, 표적과 기준 UAV 간 상대운동을 모델링한다. 만일, 표적이 등가속도 운동하는 것으로 가

정할 수 있다면, 표적과 기준 UAV 간의 상대 운동방정식은 다음과 같이 1차 마코프 프로세스로 기술할 수 있다.

$$\mathbf{x}_{k+1} = F_k \mathbf{x}_k + G_k^c \mathbf{u}_k^c + G_k \mathbf{u}_k \quad (10)$$

샘플링 주기를 T 라 하면, 상대운동 모델 (10)을 기술하기 위한 행렬 및 벡터를 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} F_k &\equiv \begin{bmatrix} I^{3 \times 3} & T \cdot I^{3 \times 3} & \frac{1}{2} T \cdot I^{3 \times 3} \\ 0^{3 \times 3} & I^{3 \times 3} & T \cdot I^{3 \times 3} \\ 0^{3 \times 3} & 0^{3 \times 3} & I^{3 \times 3} \end{bmatrix}, \\ G_k &= G_k^c \equiv \begin{bmatrix} \frac{1}{2} T^2 \cdot I^{3 \times 3} \\ T \cdot I^{3 \times 3} \\ I^{3 \times 3} \end{bmatrix}, \mathbf{u}_k^c \equiv - \begin{bmatrix} \ddot{x}_{1,k} - \ddot{x}_{1,k-1} \\ \ddot{y}_{1,k} - \ddot{y}_{1,k-1} \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{u}_k \equiv \begin{bmatrix} u_x^t \\ u_y^t \\ u_d^t \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

위의 식에서 $(\ddot{x}_1, \ddot{y}_1)$ 은 항법 시스템에서 제공된 기준 UAV의 가속도, (u_x^t, u_y^t) 와 u_d^t 는 표적 가속도 및 거리변화율의 증분(jerk)을 모델링하기 위해 도입된 영평균 백색잡음을 의미한다. 이때, 표적 가속도 및 거리변화율 증분 $\mathbf{u}_k$ 는 샘플링 구간 T 에서 상수로 간주한다. $\mathbf{u}_k$ 의 분산은 Q_k 로 설정한다.

3. 다중 UAV 기반 피동 표적추적 필터

3.1 NCRKF 기반 피동 표적추적 필터 설계

식 (6)~(8)로부터 다중 UAV에서 획득된 거리 차 측정치를 이용한 이동표적 추적은 앞 장에서 유도된 불확정 선형 시스템에 대한 강인 상태추정 문제로 모델링 할 수 있다.

$$\Sigma_\Delta : \begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = F_k \mathbf{x}_k + G_k^c \mathbf{u}_k^c + G_k \mathbf{u}_k \\ \mathbf{y}_k = [\tilde{H}_k - \Delta H_k] \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (11)$$

여기서

$$\begin{aligned} E\{\mathbf{u}_k\} &= 0, E\{\mathbf{v}_k\} = 0, E\{\Delta H_k\} = 0, \\ Q_k &= \text{var}\{\mathbf{u}_k\}, R_k = \text{var}\{\mathbf{v}_k\}, \\ W_k &= E\{\Delta H_k^T R_k^{-1} \Delta H_k\}, V_k = E\{\Delta H_k^T R_k^{-1} \mathbf{v}_k\} \end{aligned}$$

위의 불확정 선형 시스템에 대한 상태추정 문제는 기존의 강인 필터링 이론으로는 해결 불가능한 새로운 형태의 문제이다. 기존 강인 필터링 이론은 필터 설계를 위해 가용한 측정행렬이 비통계적 특성을 갖는다는 가정을 필요로 하는 반면 불확정 시스템 (11)에서 필터 설계를 위해 활용할 수 있는 측정행렬의 관측치 $\tilde{H}_k = H_k + \Delta H_k$ 은 통계적 특성을 갖고 있기 때문이다 [15,16]. $\tilde{H}_k$ 와 불확실성 행렬 ΔH_k 및 $\mathbf{v}_k$ 간의 상관관계는 기존 강인 필터링 기법의 상태 추정오차를 유발하는 요인이 된다 [1]. 이러한 문제점은 ΔH_k 를 인위적으로 무시한 채 설계된 PLLSE, 즉 공칭 칼만필터의 경우 더욱 더 두드러진다. 본 논문에서는 앞서 언급한 기존 추정 기법의 단점을 극복하기 위하여 표 1에 요약되어 있는, NCRKF 이론을 적용하여 피동 표적추적 필터를 설계한다.

표 1 의사최적 강인 칼만 필터

Table 1 Non-conservative Robust Kalman Filter [1]

• state-space equation
$\begin{cases} x_{k+1} = F_k x_k + G_k u_k \\ y_k = [\tilde{H}_k - \Delta H_k] x_k + v_k \end{cases}$
• known statistics
$\begin{aligned} E\begin{bmatrix} u_k \\ v_k \end{bmatrix} &= 0, \text{var}\begin{bmatrix} u_k \\ v_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_k & 0 \\ 0 & R_k \end{bmatrix}, \\ E\{\Delta H_k\} &= 0, E\{\Delta H_k G_k u_k\} = 0, \\ E\{\Delta H_k^T R_k^{-1} H_k\} &= W_k, E\{\Delta H_k^T R_k^{-1} v_k\} = V_k \end{aligned}$
• cost function [†]
$J = \left\ \begin{bmatrix} x_k - \hat{x}_{k k} \\ u_k \end{bmatrix} \right\ _{P_{k k}^{-1} \oplus Q_k^{-1}}^2 + \left\ \begin{bmatrix} y_{k+1} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \tilde{H}_{k+1} \\ I \end{bmatrix} x_{k+1} \right\ _{R_{k+1}^{-1} \oplus -W_{k+1}}^2 + x_{k+1}^T V_{k+1} + V_{k+1}^T x_{k+1}$
• filter recursion
(measurement update)
$\begin{aligned} \hat{x}_{k k} &= (I + P_{k k} W_k) \hat{x}_{k k-1} + P_{k k} H_k^T R_k^{-1} (y_k - \tilde{H}_k \hat{x}_{k k-1}) - P_{k k} V_k \\ P_{k k}^{-1} &= P_{k k-1}^{-1} + \tilde{H}_k^T R_k^{-1} \tilde{H}_k - W_k \end{aligned}$
(time update)
$\begin{aligned} \hat{x}_{k+1 k} &= F_k \hat{x}_{k k} \\ P_{k+1 k} &= F_k P_{k k} F_k^T + F_k Q_k G_k^T \end{aligned}$
• stochastic behavior [§]
$\hat{x}_{k k} \xrightarrow{a.s.} x_k$

† : $\oplus$ 는 행렬 직교합, $\|p\|_W^2 = p^T W p$ 을 의미함

§ : a.s.는 almost surely convergence을 의미함

NCRKF기반 피동 표적추적 필터는 ΔH_k 의 통계적 속성 W_k 와 V_k 를 이용하여 ΔH_k 의 자기상관성(auto-correlation) 및 ΔH_k 와 v_k 의 상호상관성(cross-correlation)에 의해 야기되는 추정오차를 효과적으로 제거할 수 있는 것으로 알려져 있다. NCRKF 추정치는 대수(large number) 관점에서 볼 때, 실제 상태변수에 거의 확실히(almost surely) 수렴하는 특성이 있다. 즉, NCRKF에서도 표적추적 필터는 통계적 파라미터 불확실성의 존재에도 불구하고, 오차 평균 관점에서 의사최적 추정 성능을 보장할 수 있다.

필터 설계 시, 기준 UAV의 가속도 u_k^c 를 비통계적 특성을 갖는 외부입력으로 간주할 수 있으므로, 다중 UAV 기반 순환 선형 피동 표적추적 필터식은 표준 NCRKF의 시간 갱신 식을 수정함으로써 손쉽게 유도된다.

(measurement update)

$$P_{k|k}^{-1} = P_{k|k-1}^{-1} + \tilde{H}_k^T R_k^{-1} \tilde{H}_k - W_k \quad (12)$$

$$\hat{x}_{k|k} = (I + P_{k|k} W_k) \hat{x}_{k|k-1} + P_{k|k} \tilde{H}_k^T R_k^{-1} (y_k - \tilde{H}_k \hat{x}_{k|k-1}) - P_{k|k} V_k$$

(time update)

$$P_{k+1|k} = F_k P_{k|k} F_k^T + G_k Q_k G_k^T \quad (13)$$

$$\hat{x}_{k+1|k} = F_k \hat{x}_{k|k} + G_k^c u_k^c$$

3.2 다중 UAV의 대형을 고려한 필터 설계변수 설정

통계적 불확실성 ΔH_k 의 통계적 속성 W_k , V_k 는 NCRKF 기반 피동 표적추적 필터의 주요 설계 파라미터이다. 따라서 만족할만한 표적추적 성능을 담보하기 위해서는 이들 설계변수를 적절히 설정하여야 한다. 불행하게도 NCRKF 기반 피동 표적추적 필터의 설계변수 W_k , V_k 는 식 (9)와 같이 실제 상황에서는 측정 불가능한 거리 차 참값 r_j 의 함수로 기술된다. 따라서, 실제 상황에서 이들 변수를 별도의 방법을 이용하여 근사하기 위한 방안이 마련되어야 한다.

본 논문에서는 일반적으로 다중 UAV가 편대 비행한다는 사실에 주목하여, 다중 UAV의 대형 정보를 활용한 설계변수 설정 방법을 제안한다. 필터 설계변수 설정을 위해, 그림 2와 같이 다중 UAV가 십자대형을 유지한다고 가정해보자. UAV 간 거리 d 에 비해 표적이 기준 UAV로부터 멀리 떨어져 있다면 $\epsilon \equiv \frac{d}{L} \ll 1$ 이 만족되므로, 거리 차 참값은 다음과 같이 근사된다.

그림 2 십자대형 편대비행 다중 UAVs

Fig. 2 Cruciform Formation Flying Multiple UAVs

$$\begin{aligned} r_2 &= L\sqrt{1+\epsilon^2-2\epsilon\cos\lambda}-1 \approx -d\cos\lambda \\ r_3 &= L\sqrt{1+\epsilon^2-2\epsilon\sin\lambda}-1 \approx -d\sin\lambda \\ r_4 &= L\sqrt{1+\epsilon^2+2\epsilon\cos\lambda}-1 \approx d\cos\lambda \\ r_5 &= L\sqrt{1+\epsilon^2+2\epsilon\sin\lambda}-1 \approx d\sin\lambda \end{aligned} \quad (14)$$

다중 UAV에 탑재된 거리 차 측정센서의 오차 특성이 서로 같다면($\sigma_{r,j} = \sigma_r, \forall j$), 근사식 (14)를 식 (9)에 대입하여 다음 결과를 얻을 수 있다.

$$W_k(3,3) \approx \frac{8}{d^2} \cdot \frac{1+(\sigma_r/d)^2}{2\sin(2\lambda)+2(\sigma_r/d)^2+(\sigma_r/d)^4}, \quad (15)$$

$$V_k(3,1) \approx 0 \quad (16)$$

만일, 기준 UAV에 탐색기와 같이 표적 시선각 λ 를 측정할 수 있는 부가 센서가 장착되어 있다면 식 (15)를 이용하여 설계변수 W_k 를 산출할 수 있다.

NCRKF 이론에 따르면, 설계변수 W_k 와 V_k 는 각각 공칭 칼만필터 추정치에 포함되어 있는 환산계수 오차 및 편향오

차를 제거하기 위한 보상항이다. 따라서, 식 (15) 및 식 (16)으로부터 다중 UAV가 십자대형을 유지하는 경우, 환산계수 오차가 피동 표적추적 필터 설계 시 주요 오차 성분으로 작용하는 반면, 편향오차 항은 무시할만 하다. 이는 다중 UAV를 이용한 피동 표적추적 시, 공칭 칼만필터의 추적오차가 장거리에서 더욱 증가하는 양상을 보일 것임을 암시하는 것이다. 장거리에서 표적추적 성능을 향상시키기 위해서는 UAV 간 거리 d 를 증가시키는 것이 유리하므로, 표적과의 거리에 따라 대형의 크기를 변화시키는 방안을 다중 UAV 운용개념에 포함시키는 것이 바람직 할 것으로 예상된다.

4. 모의실험 결과

거리 차 기반 이동표적 추적 필터의 성능을 검증하기 위해, 전형적인 다중 UAV - 함(ship) 표적 간 조우 시나리오에 대한 모의실험을 수행한다. 모의실험에 사용된 다중 UAV와 표적의 궤적은 그림 3에 도시한 바와 같다. 다중 UAV는 십자대형을 유지($d=150[m]$)하며, 비례항법 유도법칙에 의해 표적 방향으로 접근한다. 기준 UAV의 초기 위치 및 속력은 각각 $(-5,0)[km]$, $250[m/s]$ 이다. 함 표적의 초기 위치 및 속력은 $(0,0)[km]$ 및 $20[m/s]$ 으로 가정하였다. 거리 차 측정잡음의 표준편차는 $\sigma_r=0.3[m]$, 샘플링 주기는 $T=10[ms]$ 로 설정하였다.

그림 3 다중 UAV 및 함 표적 조우 시나리오

Fig. 3 Engagement scenario

확장 칼만필터 및 통계적 파라미터 불확실성 ΔH_k 의 영향을 무시한 채 측정행렬의 관측치 $\tilde{H}_k$ 만을 이용해 구현되는 공칭 칼만필터가 성능비교 대상으로 고려된다. 측정행렬의 참값 H_k 를 이용하여 설계되는 최적 칼만필터는 실제 상황에서는 구현 불가능하지만, 다중 UAV의 거리 차 측정치를 이용한 피동 표적추적 성능 한계를 가늠하기 위해 비교대상에 포함되었다. 200회 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 획득된 x 축 상대위치 및 상대속도 추정오차는 그림 4~5, RMSE는 그림 6~7과 같다. 성능분석에 사용된 시나리오의 특성 상 x 축 위치 및 속도가 주요 성분이 되므로, y 축 상대위치 및 상대속도 추정오차에 관한 분석 결과는 생략하였다. 공칭 칼만 표적추적 필터의 경우, 통계적 파라미터 불확실성의 영향으로 인해 환산계수 형태의 추정오차가 발생함을 확인할 수 있다. 이는 3.2절의 추정오차 분석과 일치하는 결과이다. 이와 달리, 제안된 NCRKF 표적추적 필터는 설계변수 W_k 및

그림 4 추정오차 평균: x 축 상대위치

Fig. 4 Estimation error mean: x axis relative position

그림 5 추정오차 평균: x 축 상대속도

Fig. 5 Estimation error mean: x axis relative velocity

그림 6 추정오차 RMSE: x 축 상대위치

Fig. 6 RMSE: x axis relative position

참 고 문 헌

그림 7 추정오차 RMSE: x 축 상대속도
Fig. 7 RMSE: x axis relative velocity

V_k 를 이용하여 공칭 칼만필터의 추정오차를 효과적으로 제거하고 있음을 확인할 수 있다. 더욱이, 제안된 표적추적 필터는 평균 추정오차 관점에서 최적 칼만필터에 준하는 성능을 제공한다. 비선형 측정방정식에 기반한 확장 칼만필터가 장거리에서 느린 수렴 특성을 보이는 반면, 제안된 선형 강인 표적추적 필터는 장거리에서도 매우 우수한 수렴특성을 갖는다.

4. 결 론

다중 UAV에서 측정된 거리 차 정보를 이용한 피동 표적 추적 필터 설계기법을 제안하였다. 비선형 표적추적 필터의 추정성능 저하 원인이 거리 차 측정치와 표적 상태변수 간의 비선형성에 기인한다는 사실에 착안하여, 다중 UAV 기반 이동 표적추적 문제를 선형 강인 상태추정 관점에서 재해석 하였다. 이를 위해 통계적 파라미터 불확실성을 포함한 선형 측정 방정식을 새롭게 유도하고, NCRKF 이론을 적용하여 표적추적 필터를 설계하는 방안이 제시되었다. 제안된 선형 강인 표적추적 필터는 거리 차 측정잡음이 존재하는 상황에서도 오차 평균관점에서 의사최적 성능을 보장할 수 있다. 제안된 표적추적 필터는 선형 필터 구조를 가지므로 장거리에서도 매우 빠른 수렴특성을 제공할 수 있다. 또한, NCRKF 이론을 피동 표적추적 문제에 적용하는 경우, 추정오차와 다중 UAV 편대 사이의 상관관계를 해석적으로 분석할 수 있다는 장점이 있다. 대함 다중 UAV 시나리오에 대한 시뮬레이션을 통해, 제안된 기법의 유용성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 국방과학연구소 기초연구과제의 지원으로 수행되었습니다. 국방과학연구소의 연구 지원에 감사드립니다.

- [1] W.S. Ra, I.H. Whang, and J.B. Park, "Non-conservative robust Kalman filtering using a noisy measurement matrix," *IET Control Theory and Appl.*, pp. 1226-1236, 2009.
- [2] G. Gu, P.R. Chandler, C.J. Sparks, and M. Pachter, "Optimal cooperative sensing using a team of UAVs," *IEEE Trans. Aero. Electr. Sys.*, pp. 1446-1458, 2006.
- [3] K.B. Puvis K.J., Astrom and M. Khammash, "Estimating radar positions using cooperative unmanned air vehicle teams," *American Control Conf.*, pp. 3512-3517, 2006.
- [4] V.N. Dobrokhodov, I.I. Kaminer, K.D. Jones, and R. Ghabcheloo, "Vision-based tracking and motion estimation for moving targets using small UAVs," *American Control Conf.*, 2006.
- [5] L. Wang, Y. Li, and L. Shen, "Target state estimation and prediction based standoff tracking of ground moving target using a fixed-wing UAV," *IEEE Int. Conf. Contr. Automat.*, pp. 273-278, 2010.
- [6] R. Schmidt, "A new approach to geometry of range difference location," *IEEE Trans. Aero. Electron. Sys.*, pp. 821-835, 1972.
- [7] Y.T. Chan, and K.C. Ho, "A simple and efficient estimator for hyperbolic location," *IEEE Trans. Sig. Proc.*, pp. 1905-1915, 1994.
- [8] F. Fletcher, B. Ristic, and R. Musicki, "Recursive estimation of emitter location using TDOA measurements for two UAVs," *Int. Conf. Information Fusion*, 2007.
- [9] C.O. Savage, R.L. Cramer, and H.A. Schmidt, "TDOA geolocation with the unscented Kalman filter," *IEEE Int. Conf. Networking, Sensing and Control*, pp. 602-606, 2006.
- [10] M.J. Moorman, and T.E. Bullock, "A stochastic perturbation analysis of bias in the extended Kalman filter as applied to bearing-only estimation," *IEEE Conf. Decision and Contr.*, pp. 3778-3783, 1992.
- [11] K. Dogancay, and D.A. Gray, "Bias compensation for least-squares multi-pulse TDOA localization algorithms," *Int. Conf. Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*, pp.51-56, 2005.
- [12] J.O. Smith, and J.S. Abel, "Closed-form least squares source location estimation from range-difference measurements," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, pp. 1661-1669, 1987.
- [13] K.C. Ho, and Y.T. Chan, "Solution and performance analysis of geolocation by TDOA," *IEEE Trans. Aero. Electron. Sys.*, pp. 1311-1322, 1993.

- [14] K.W. Cheung, H.C. So, W.K. Ma, and Y.T. Chan, "A constrained least squares approach to mobile positioning: algorithms and optimally," *EURASIP J. Applied Sig. Proc.*, pp. 1-23, 2006.
- [15] L. Xie, C. Soh, and C.E. Souza, "Robust Kalman filtering for uncertain discrete-time systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, pp. 1310-1314, 1994.
- [16] A.V. Savkin, and I.R. Petersen, "Robust state estimation and model validation for discrete-time uncertain systems with a deterministic description of noise and uncertainty," *Automatica*, pp. 271-274, 1998.

저 자 소 개

이 혜 경 (李 慧 鏡)

2011년 한동대학교 기계제어공학부(공학사). 현재 동 대학원 기계제어공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 상태추정 이론, 다중 자율이동시스템 기반 이동표적 추적 등.

한 슬 기 (韓 슬 기)

2009년 연세대학교 전기전자공학과(공학사). 현재 동 대학원 전기전자공학과 석·박사통합과정 재학 중. 관심분야는 상태추정 이론, 다중표적추적 및 융합필터, FMCW 레이더 응용 등.

나 원 상 (羅 元 祥)

1998년 연세대학교 전기공학과(공학사). 2000년 동 대학원 전기컴퓨터공학과(공학석사). 2009년 동 대학원 전기전자공학과(공학박사). 2000년 3월~2009년 2월 국방과학연구소 유도조종부 선임연구원. 2009년~현재 한동대학교 기계제어공학부 조교수. 관심분야는 강인 상태추정이론, 표적추적 필터, 유도조종기법 등.