

다중레이다 분산형 추적의 항적연관 및 융합 성능평가

Performance Evaluation of Track-to-track Association and Fusion in Distributed Multiple Radar Tracking

최원용* **홍순목*** **이동관**** **정재경**** **조길석****
Choi, Won-Yong Hong, Sun-Mog Lee, Dong-Gwan Jung, Jae-Kyung Cho, Kil-Seok

ABSTRACT

A distributed system for tracking multiple targets with a pair of multifunction radars is proposed and implemented. The system performs track-to-track association and track-to-track fusion at the fusion center to form fused tracks. The association and fusion are performed using target state information linked via communication nodes from a radar at a remote location. Many factors can affect the track-to-track association and fusion performances. They include delays in data transmission buffer of the remote radar, the error in estimating time-stamp of the remote radar, and the gating in track-to-track association. The effects on association and fusion performances due to these factors are investigated through extensive numerical simulations.

주요기술용어(주제어) : Multiple Radars(다중 레이다), Distributed Tracking(분산형 추적), Track-to-Track Fusion(항적융합), Track-to-Track Association(항적연관)

1. 머리말

최근의 방공체계는 다중 레이다로 구성되는 망 중심 형태로 발전하고 있다. 이는 다중 레이다를 통해 획득된 표적정보의 처리와 융합을 통해, 표적 탐지 및 추적 등에서의 높은 신뢰성을 보장하고 통합 표적 정보를 활용하여 효율적인 광역 작전 수행 능력을 보장하기 위한 것이다.

다중 레이다의 표적정보를 처리하는 체계의 구조는 크게 중앙 집중형 추적 구조와 분산형 추적 구조로 나눌 수 있다. 모든 레이다의 표적정보를 융합센터에서 받아 처리하는 중앙 집중형 추적 구조에서 이론적으로 가장 정확한 추적이 이루어 질 수 있다^[1,2]. 그러나 체계의 제한된 조건 등의 이유로 일반적으로 각 레이다 체계에서 표적 정보를 분산처리하고 여기서 얻은 항적정보를 융합센터로 전송하게 된다. 융합센터는 분산처리된 항적정보를 바탕으로 항적융합을 수행하는데 이 방식을 분산형 추적 구조라고 한다^[1,2]. 중앙 집중형 추적 구조는 앞에서 언급한 바와 같이 정확한 다표적 추적이 가능하다는 장점이 있지만, 항적정보만 제공하는 체계와의 연동에 대한 문제점과 근접 비행 표적에 대한 데이터 연관에 취약하다는 단

† 2008년 9월 12일 접수~2008년 11월 14일 게재승인

* 경북대학교 전자전기컴퓨터학부(School of EECS, Kyungpook National University)

** 국방과학연구소(ADD)

교신저자 이메일 : smhong@ee.knu.ac.kr

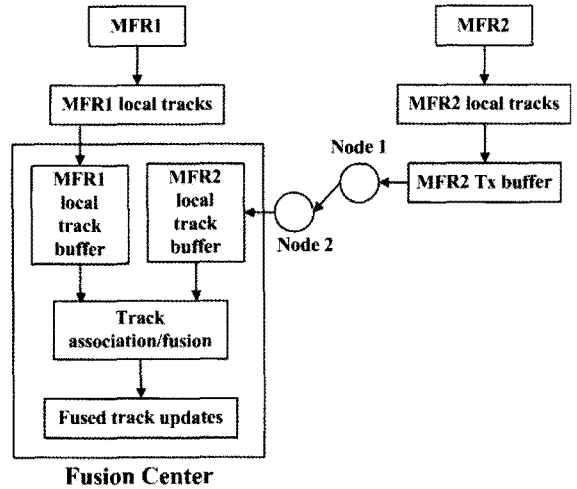
점을 갖고 있다. 반대로 분산형 추적 구조는 많은 경우 최적에 가까운 융합항적 정확도를 갖는다는 점과 현재 레이더 체계에서 일반적으로 채택하는 표준방식이라는 특징을 갖고 있다^[3].

분산형 추적에서는 정확한 표적추적을 위해 적절한 항적연관과 항적융합이 수행되어야 한다. 항적연관이란 항적들이 동일한 표적에서 비롯되었을 가능성을 추정하여 판단하는 작업이다. 항적연관을 통하여 동일한 표적에서 비롯된 것으로 판단되는 항적들에 대해 항적융합을 수행함으로써 표적에 대한 상태추정의 정확도를 향상시킨다. 이에 관한 연구가 최근 활발하게 진행되고 있다^[4].

이 논문에서는 2절에서 레이더 쌍의 분산형 추적을 실현하기 위한 추적체계의 구조를 제안하고, 3절에서는 분산형 추적을 위해 구현한 항적연관 및 융합 알고리즘을 간략히 설명한다. 그리고 4절에서 구현된 분산형 추적체계의 항적연관 및 융합 성능을 다양한 추적 시나리오에 대한 수치실험을 통해 분석한다. 특히, 이 수치실험에서는 항적정보 전송에서 발생하는 전송 버퍼 대기시간, 항적정보 시간(time stamp)의 추정에서 발생하는 오차, 그리고 항적연관 게이팅(gating) 문턱값의 영향을 검토하였다. 이러한 영향은 각 레이더의 항적오차를 독립적인 것으로 가정하거나 그 상관성을 추정하여 반영하는 경우에 대해서도 각각의 수치실험을 통해 검토하였다. 5절은 이 논문의 맺음 말이다.

2. 다중 레이더 분산형 추적 시스템 구성

이 논문에서 다루는 분산형 추적 시스템은 2개의 MFR(Multi-Function Radar)로 구성되는 다중 레이더 체계를 지원하는 항적연관과 융합을 수행하게 된다. 그림 1은 이 분산형 추적 시스템의 구조를 보여준다. 이 시스템은 독자적으로 표적을 추적하는 두 개의 MFR과 각 MFR로부터 받은 항적정보를 처리하는 융합센터로 구성된다. MFR1은 융합센터와 동일한 플랫폼에 위치하며 MFR2는 공간적으로 멀리 떨어진 곳에 위치하여 두 개의 노드(Node 1, 2)로 구성되는 통신망을 통해 융합센터로 연결되어 있다. MFR1의 항



[그림 1] 다중 레이더 분산형 추적 시스템 구조

적정보는 갱신되는 즉시 융합센터로 전송된다. 그에 비해 MFR2의 항적정보는 전송버퍼(MFR2 Tx buffer)에서 전송주기마다 통신망을 통해 융합센터로 전송된다. 이 때 통신망의 노드는 단지 항적정보를 전달해주는 역할만 수행한다. MFR이 융합센터로 전송하는 항적정보는 항적식별번호, 항적정보시간, 표적에 대한 상태추정벡터, 그리고 상태추정벡터의 상태오차 공분산 행렬 등이다. 융합센터로 전송된 MFR1, 2의 항적 정보들은 해당 MFR에 대한 로컬항적버퍼(local track buffer)에 저장되며, 동일한 식별번호를 가지는 항적 정보 중 가장 최근의 항적정보만 유지한다. 융합센터의 항적연관 및 융합은 로컬항적버퍼의 항적정보를 사용하여 주기적으로 수행된다. 이 때 로컬항적버퍼의 상태추정벡터와 공분산 행렬은 항적연관 및 융합 수행시점으로 전방예측(forward prediction)하여 사용된다. 로컬항적버퍼의 항적정보가 이전 연관 및 융합 이후로 갱신이 되지 않은 경우에는 버퍼에 존재하는 항적정보를 재사용한다. 융합센터는 항적연관 및 융합 과정을 통하여 최종적으로 융합항적을 얻게 된다.

3. 항적연관 및 융합 알고리즘 구현

융합센터는 로컬항적버퍼의 항적정보들을 바탕으로 동일한 표적에서 비롯되었을 가능성이 큰 항적정보끼

리 묶어주는 항적연관을 수행한다. 그런데, 일반적으로 레이더가 표적을 추적하는데 있어 오경보(false alarm)에 의한 항적이 생성되는 경우가 있다. 그리고 공간적으로 멀리 떨어져 있는 표적의 항적은 항적연관시 고려하지 않는 것이 바람직하다. 따라서, 항적연관을 수행하기에 앞서 항적연관 게이팅을 수행해줄 필요가 있다. MFR1의 항적 $\hat{\mathbf{x}}_1^i (i=1, \dots, N_1)$ 와 MFR2의 항적 $\hat{\mathbf{x}}_2^j (i=1, \dots, N_2)$ 가 동일한 표적에서 비롯된 것이라고 가정하는 연관가설을 H_1 , 각기 다른 표적에서 비롯된 것이라고 가정하는 연관가설을 H_0 라고 하면, 항적연관 게이팅식은 두 가설 H_0, H_1 에 대한 우도비 L_{ij} 에 대해 정의할 수 있다. L_{ij} 는 다음과 같다.

$$L_{ij} = \frac{N[\mathbf{x}_{1,2}^{ij}; 0, \mathbf{R}_{1,2}^{ij}]}{\mu_{ex}} \quad (1)$$

여기서,

$$\mathbf{x}_{1,2}^{ij} = \hat{\mathbf{x}}_2^j - \hat{\mathbf{x}}_1^i \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_{1,2}^{ij} = \mathbf{R}_{11}^i + \mathbf{R}_{22}^j - \mathbf{R}_{12}^{ij} - (\mathbf{R}_{12}^{ij})^T \quad (3)$$

이고, μ_{ex} 는 연관에 관련되지 않는 항적의 밀도 (spatial density of extraneous tracks)를 표시한다. $\mathbf{R}_{11}^i, \mathbf{R}_{22}^j$ 는 각각 $\hat{\mathbf{x}}_1^i, \hat{\mathbf{x}}_2^j$ 의 공분산행렬이며, \mathbf{R}_{12}^{ij} 는 동일한 표적에서 비롯된 항적간의 항적오차의 상관성^[5]을 나타내는 교차공분산행렬이다. 우도비 L_{ij} 에 대해 다음과 같은 c_{ij} 를 정의할 수 있다.

$$c_{ij} = -\ln L_{ij} = -\ln N[\mathbf{x}_{1,2}^{ij}; 0, \mathbf{R}_{1,2}^{ij}] + \ln \mu_{ex} \quad (4)$$

여기서,

$$N[\mathbf{x}_{1,2}^{ij}; 0, \mathbf{R}_{1,2}^{ij}] = \frac{1}{(2\pi)^3 |\mathbf{R}_{1,2}^{ij}|^{1/2}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} (\mathbf{x}_{1,2}^{ij})^T (\mathbf{R}_{1,2}^{ij})^{-1} \mathbf{x}_{1,2}^{ij}\right) \quad (5)$$

이므로, c_{ij} 는 다음과 같이 정리된다.

$$c_{ij} = 3\ln(2\pi) + \frac{1}{2} \ln |\mathbf{R}_{1,2}^{ij}| + \frac{1}{2} (\mathbf{x}_{1,2}^{ij})^T (\mathbf{R}_{1,2}^{ij})^{-1} \mathbf{x}_{1,2}^{ij} + \ln \mu_{ex} \quad (6)$$

μ_{ex} 를 다음과 같이 정의하면,

$$\mu_{ex} = \frac{1}{(2\pi)^3 |\mathbf{R}_{1,2}^{ij}|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} z_{th}\right) \quad (7)$$

c_{ij} 는 다음과 같다.

$$c_{ij} = \frac{1}{2} \left((\mathbf{x}_{1,2}^{ij})^T (\mathbf{R}_{1,2}^{ij})^{-1} \mathbf{x}_{1,2}^{ij} - z_{th} \right) \quad (8)$$

$\mathbf{z}_{1,2}^{ij} = (\mathbf{x}_{1,2}^{ij})^T (\mathbf{R}_{1,2}^{ij})^{-1} \mathbf{x}_{1,2}^{ij}$ 라고 두면, 항적연관 게이팅식은 다음과 같다.

$$c_{ij} = \frac{1}{2} (\mathbf{z}_{1,2}^{ij} - z_{th}) \leq 0 \quad (9)$$

$\mathbf{z}_{1,2}^{ij}$ 는 χ^2 (chi-square) 분포를 가지는 확률변수로서 자유도(degrees of freedom)가 6일 경우, z_{th} 가 18.5이면 이론적 연관실패확률은 5×10^{-3} 이고 24.1이면 5×10^{-4} 가 된다. 항적연관은 식 (9)를 만족하는 항적쌍들에 대해 이루어진다. 2개의 MFR로 구성되는 분산형 추적 시스템에서 항적연관은 2차원 할당(2-D assignment)문제로서 제약조건을 가지는 최적화 (constrained optimization)문제로 정의할 수 있다^[4]. 항적연관시 두 항적 $\hat{\mathbf{x}}_1^i, \hat{\mathbf{x}}_2^j$ 을 연관시키는 비용 C_{ij} 는 다음과 같이 계산한다.

$$C_{ij} = \ln |\mathbf{R}_{1,2}^{ij}| + \mathbf{z}_{1,2}^{ij} \quad (10)$$

항적연관을 통해 동일한 표적에서 비롯된 것으로 판단되는 항적들에 대해 항적융합을 수행한다. 최적의 추정을 얻기 위한 항적융합은 ML(Maximum Likelihood) 추정을 통해 이루어진다^[6]. ML추정식은 다음과 같다.

$$\mathbf{x}_f = \mathbf{R}_f^T \mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{x}_2 \quad (11)$$

여기서, $\mathbf{x}_2 = [(\hat{\mathbf{x}}_1^i)^T (\hat{\mathbf{x}}_2^j)^T]^T$ 이고 상태추정벡터의 크기가 $M \times 1$ 일 경우 $\mathbf{I}_2 = [I_M \ I_M]^T$ 이다. I_M 은 크기가 $M \times M$ 인 단위행렬이다. R_f 는 융합항적의 공분산행렬이고 R_2 는 다음과 같다.

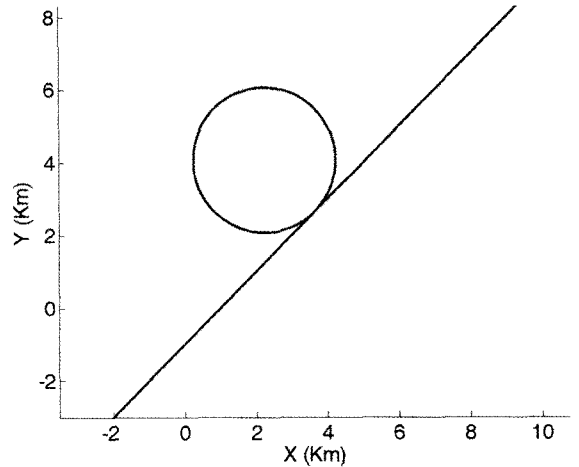
$$R_2 = \begin{bmatrix} R_{11}^i & R_{12}^{ij} \\ (R_{12}^{ij})^T & R_{22}^j \end{bmatrix} \quad (12)$$

한편, 분산형 추적에서 동일한 표적에 대한 항적들이 가지는 항적오차의 상관성을 고려하기 위해서는 교차 공분산행렬을 계산해야 한다. 참고문헌 [7]에서 상태추정벡터의 각 성분이 결합되어 있는 경우에 사용할 수 있는 교차공분산행렬 근사화 방법을 몇 가지 제시하고 있다. 본 논문에서는 참고문헌 [7]의 실험에서 가장 나은 결과를 보여준 행렬제곱근을 사용한 2PACT (2-Parameter Approximate Correlated Track) 방법을 사용한다.

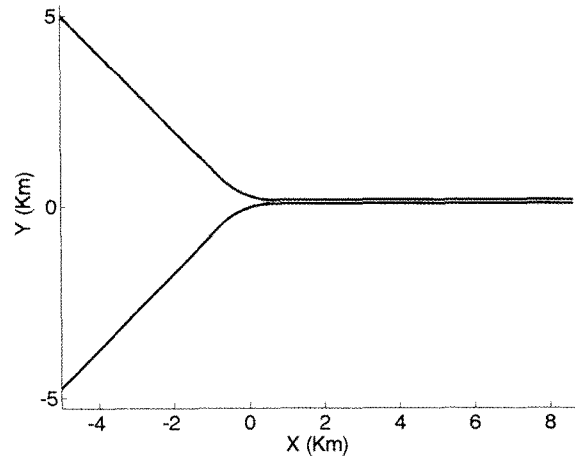
4. 수치실험

가. 수치실험 환경

분산형 추적 시스템의 성능평가를 위한 수치실험은 한 개 또는 두 개의 표적을 추적하는 네 가지의 표적 추적시나리오에 대해 수행하였다. 모든 시나리오에서 표적은 200m/s의 일정한 속력으로 x-y 평면상에서 1km 고도를 유지하며 비행한다. 시나리오 1에서는 한 개의 표적이 그림 2의 궤적을 따라 비행한다. (-2km, -3km)에서 (141.42m/s, 141.42m/s)의 속도로 출발하여 40초간 직선비행한 후 2g의 가속으로 360도 선회한 다음 다시 40초간 직선비행한다. 시나리오 2에서는 두 개의 표적이 100m 떨어져서 각각 (-2km, -3km), (-1.929km, -3.071km)에서 출발하여 그림 2의 궤적 형태로 비행하는데, 1g의 가속으로 선회하기 때문에 시나리오 1의 경우보다 회전반경이 커진다. 시나리오 3에서는 두 개의 표적이 100m 떨어져서 각각 (-2km, -3km), (-1.929km, -3.071km)에서 출발하여 시나리오 1과 동일한 형태의 궤적으로 비행한다. 시나리오 4의 표적비행궤적은 그림 3과 같다. 두 표적의 초기 위치는 각각 (-5km, 5km), (-5km, -4.757km)이고, 초



[그림 2] 시나리오 1의 표적비행궤적



[그림 3] 시나리오 4의 표적비행궤적

기속도는 각각 (141.42m/s, -141.42m/s), (141.42m/s, 141.42m/s)이다. 각 표적은 30초간 직선비행 후 2g 가속으로 45도 선회한 다음 100의 거리를 유지하며 40초간 직선비행한다.

MFR의 측정-항적연관은 완벽하고, 탐지확률이 1이라고 가정하였다. 그리고 표적의 운동모델로는 DCWNA(discretized continuous white noise acceleration) 모델^[8]을 사용하고, 2g 정도의 표적 기동을 감안하기 위하여 운동잡음 공분산 행렬의 운동잡음강도 \tilde{q} 를 200으로 설정하였다. 표적추적은 3차원 직각 좌표계상의 표적에 대해 거리, 방위각, 고도각

등을 측정하여 6-상태 1차 확장칼만필터를 통하여 수행된다. 그 밖의 MFR 추적기에 대한 설정은 다음과 같다.

- MFR1의 좌표 : (50km, -10km)
- MFR2의 좌표 : (-50km, -10km)
- MFR의 측정주기 : 1.5초
- MFR의 측정잡음특성(표준편차)
 - σ_r : 10m
 - σ_θ : 1.0×10^{-3} radian
 - σ_ϕ : 1.0×10^{-3} radian
 - 측정잡음 공분산행렬

$$R = \begin{bmatrix} 10^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.001^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.001^2 \end{bmatrix}$$

MFR2의 항적데이터가 통신망의 노드를 거쳐 융합 센터로 전송되는데 걸리는 시간은 0.8초라고 가정하였고 융합센터의 항적연관 및 융합 수행주기는 1초로 설정하였다. 통신망을 통한 전송시간 0.8초는 비교적 최악의 상황을 가정한 것이다. 2PACT 방법으로 교차공분산행렬을 근사화할 때 필요한 교차상관 계수는 참고문헌 [7]에서 사용한 값($\rho_{11}=0.23$, $\rho_{22}=0.68$)을 사용하였다.

수치실험을 통하여 MFR2의 전송버퍼 대기시간(t_W), MFR2가 항적정보전송시 항적정보시간을 전송하지 않는 경우 수신단에서 이를 추정하여 사용할 때 발생하는 오차(t_{EE}), 항적연관 게이팅 문턱값(z_{th}) 등의 파라미터에 대해 항적오차가 독립적이라고 가정하는 경우(IT : Independent Track)와 항적오차에 상관성이 존재한다고 가정하는 경우(2PACT) 각각의 결

[표 1] 수치실험에서 사용한 파라미터 값

파라미터	파라미터 값
t_W	0.5초, 1초
t_{EE}	0초, 0.1초, 0.3초
z_{th}	18.5, 24.1, 100

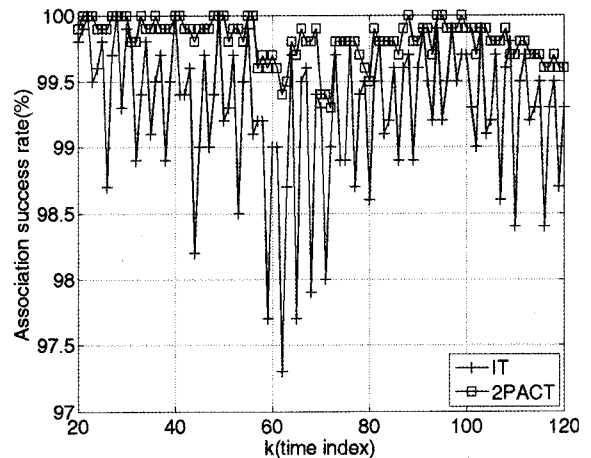
과를 얻었다. 수치실험에서 사용한 파라미터들의 값은 표 1에 정리되어 있다.

성능평가는 주어진 시나리오와 파라미터에 대해 시뮬레이션을 1000번씩 수행하여 항적연관 및 융합 수행주기마다 연관성공률 및 정확하게 연관된 융합항적의 RMS 위치/속도 오차를 얻어 수행하였다.

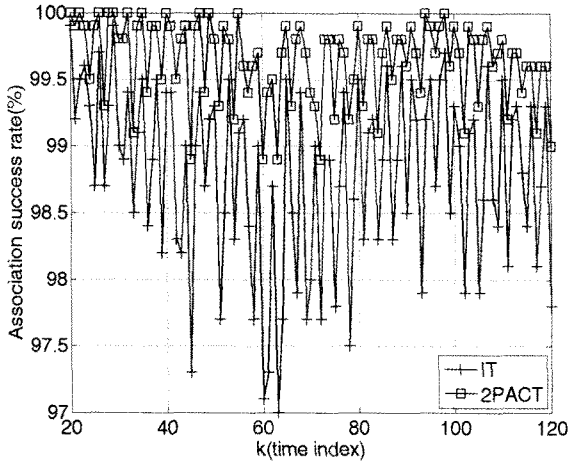
나. 항적연관 성능평가 실험

먼저 MFR2 전송버퍼 대기시간 t_W , 항적정보시간 추정오차 t_{EE} , 항적오차 상관성 고려여부 등이 항적연관에 미치는 영향을 알아보기 위해 시나리오 1-4에 대해 실험을 수행하였다. 각 실험에서 z_{th} 를 100으로 설정하여 항적연관 게이팅 수행시 모든 연관가설이 식 (9)를 만족하게 하였다.

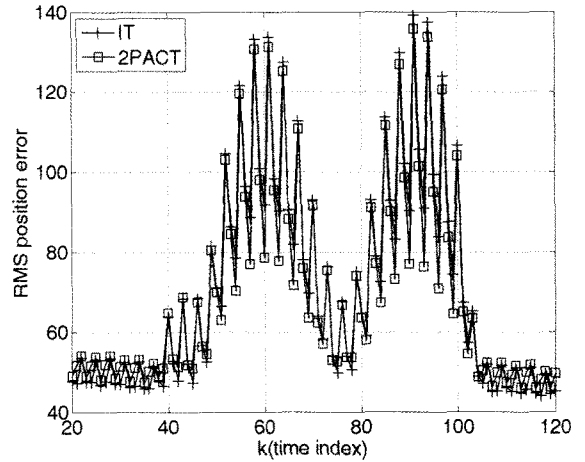
그림 4, 5는 시나리오 3의 실험에서 얻은 연관 성공률이다. 표적이 이동하는 구간의 결과를 보다 명확하게 표시하기 위하여, 그림 4, 5는 시간 색인의 범위를 20과 120사이로 하였다. 실험은 시나리오 1-4에 대해 수행하였지만, 시나리오 1의 실험에서는 모든 t_W , t_{EE} 에 대해 항적오차 상관성의 고려여부에 상관없이 연관 성공률이 100%였고, 시나리오 2, 4의 실험 결과는 t_W , t_{EE} 에 의한 연관성능 변화 양상이 시나리오 3과 비슷하여 시나리오 2, 4의 결과는 포함시키지 않았다. 또한, 시나리오 2, 3, 4의 결과에서 t_{EE} 에 의



[그림 4] 시나리오 3의 연관 성공률(%)
(t_W : 0.5초, t_{EE} : 0.3초)



[그림 5] 시나리오 3의 연관 성공률(%)
(t_W : 1.0초, t_{EE} : 0.3초)



[그림 6] 시나리오 3의 RMS 위치오차
(t_W : 1.0초, t_{EE} : 0초)

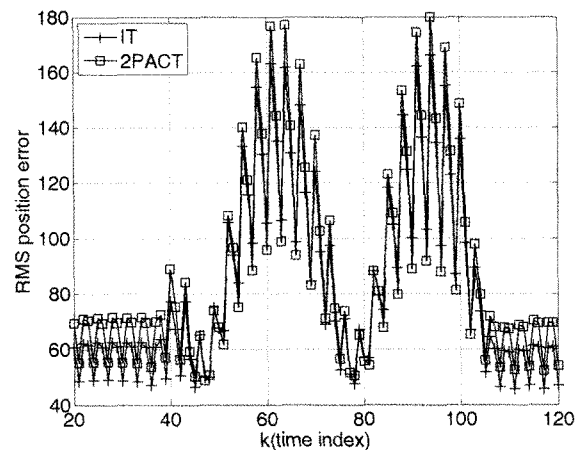
해 연관성공률이 뚜렷한 차이를 보이지 않아 t_{EE} 가 0.3초인 경우의 결과만 제시하였다. 그림 4, 5에서 확인할 수 있듯이 시나리오 3에 대한 실험결과는 IT와 2PACT 모두 95% 이상의 연관성공률을 보여주었다. 2PACT의 경우 IT 보다 약간 높은 연관성공률을 보여주었다. t_W 가 1초인 경우 0.5초인 경우보다 연관성공률이 다소 감소하였지만 1%이내였다. t_{EE} 의 변화에 따른 연관 성공률의 변화는 거의 없었다.

그림 4, 5에서도 확인할 수 있듯이 이 실험에서는 연관성공률이 t_W , t_{EE} 에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그리고, 항적오차의 상관성을 고려하는 경우가 그렇지 않은 경우보다 연관성공률이 약간 높았지만 차이가 크지는 않았다.

다. 항적융합 성능평가 실험

분산형 추적의 항적융합 성능을 평가하기 위한 실험도 4.나절에서와 같이 MFR2 전송버퍼 대기시간 t_W , 항적정보 시간 추정오차 t_{EE} , 항적오차 상관성 고려 여부 등을 고려하여 수행하였다. 이 실험도 시나리오 1-4에 대해 수행하였으며, z_{th} 를 100으로 설정하여 항적연관 게이팅 수행시 모든 연관가설이 식 (9)를 만족하게 하였다.

그림 6, 7은 시나리오 3에 대한 실험에서 얻은 융합항적의 RMS 위치오차이다. 이 결과는 항적연관이



[그림 7] 시나리오 3의 RMS 위치오차
(t_W : 1.0초, t_{EE} : 0.3초)

성공적인 경우에 대해서만 얻은 것으로 시나리오 1의 경우도 이 결과와 동일하다. 융합항적의 RMS 속도 오차는 t_W , t_{EE} 에 의한 변화에 대해 RMS 위치오차와 비슷한 양상을 보여서 여기서는 제시하지 않았다. 각 시나리오에 대해 t_W , t_{EE} 에 의한 영향은 모두 비슷하였고 RMS 위치오차는 t_W 에 거의 영향을 받지 않아서 시나리오 3에 대한 실험결과중 t_W 가 1초일 때의 결과만을 그림 6, 7에 제시하였다. 이 그림에서 선회구간의 RMS 위치오차가 표적의 기동으로 인하

여 크게 증가하는 것을 볼 수 있었다. 그리고 t_{EE} 가 0.3초일 경우(그림 7) 0초일 때(그림 6)보다 궤적의 모든 구간에서 RMS 위치오차가 증가하였다. 증가폭은 직선구간에서는 그리 크지 않았지만 선회구간에서는 약간 컸다. t_{EE} 가 0초인 경우 직선구간에서는 2PACT 보다 IT, 선회구간에서는 IT 보다 2PACT의 RMS 위치오차가 작았다. 직선구간에서 IT의 RMS 위치오차가 2PACT 보다 작은 것은 표적의 기동이 없으므로 IT가 더 정확한 모델이 되기 때문이다. 하지만 직선 및 선회구간에서 IT와 2PACT 간의 융합성능 차이는 거의 없었다. t_{EE} 가 0.3초인 경우에도 IT와 2PACT의 융합성능은 비슷하였다.

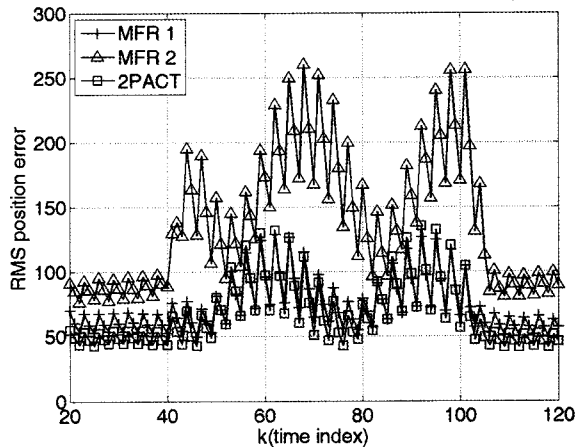
이 실험을 통하여 융합성능은 t_w 와 항적오차 상관성 고려여부에는 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있었다. 그러나 그림 6, 7에서 확인할 수 있듯이 t_{EE} 는 값이 클 경우 융합항적의 RMS 위치 및 속도 오차에 어느 정도 영향을 미치는 것을 볼 수 있었다.

융합성능에서 IT와 2PACT 적용 차이는 별로 없었다.

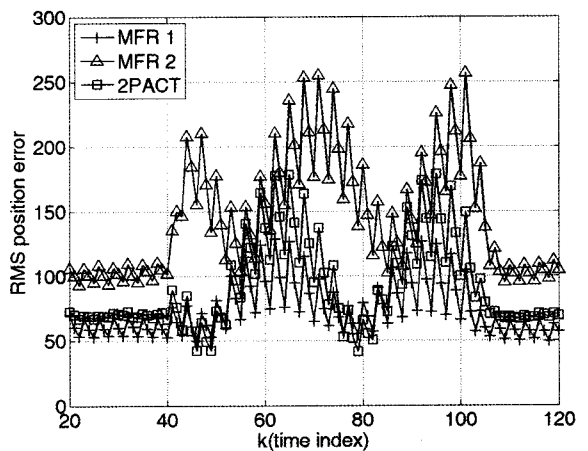
라. MFR 항적과 융합항적의 추정성능 비교

항적융합을 통하여 얻어진 융합항적의 정확도를 MFR1과 MFR2 항적의 정확도와 비교하는 실험도 수행하였다. 실험은 시나리오 1에 대해 수행하여 2PACT인 경우의 결과를 얻었다. 그리고 z_{th} 를 100으로 설정하여 모든 연관관측이 항적연관 게이팅식(식 (9))을 만족하도록 했다. 4.다절에서와 같이 이 실험에서도 융합항적의 RMS 위치오차는 t_w 에는 크게 영향을 받지 않았다.

그림 8, 9에서 MFR2 항적의 RMS 위치오차가 MFR1 항적의 RMS 위치오차보다 전체 time index에 대해서 훨씬 큰 것을 볼 수 있다. 이는 MFR2 항적의 경우 통신망에 의한 전송시간과 전송버퍼 대기시간으로 인하여 융합시점으로 전방예측 해주는 시간이 MFR1 항적보다 크기 때문이다. t_w 가 0.5초이고 t_{EE} 가 0초인 경우(그림 8) 융합항적의 RMS 위치 오차는 전방예측된 MFR1 항적의 RMS 위치오차보다 크게 개선되지 않았다. t_{EE} 가 0.3초인 경우(그림 9)에는 융합항적의 RMS 위치오차가 MFR1 항적의 RMS



[그림 8] 시나리오 1에서 전방예측된 MFR1, 2의 항적과 융합항적의 RMS 위치오차($t_w : 0.5$ 초, $t_{EE} : 0$ 초)



[그림 9] 시나리오 1에서 전방예측된 MFR1, 2의 항적과 융합항적의 RMS 위치오차($t_w : 0.5$ 초, $t_{EE} : 0.3$ 초)

위치오차보다 컸다. 항적융합으로 표적에 대한 상태추정의 정확도가 개선되지 않는 이유는 MFR2 항적의 전방예측시간이 커서 추정의 정확도가 많이 떨어졌기 때문이다.

마. 항적연관 게이팅 문턱값(z_{th})이 연관성능에 미치는 영향

항적연관시 항적연관 게이팅을 수행하게 되면 연관

에서 제외되는 연관가설이 발생하게 되므로 연관성공률에 영향을 미치게 된다. 이에 따라 z_{th} 가 항적연관 성능에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험을 시나리오 1-4에 대해 수행하였다. 항적연관 게이팅 문턱값(z_{th})으로는 18.5와 24.1을 사용하였다. 각 시나리오별로 다음의 세 가지 결과를 얻었다.

- ① 연관성공률
- ② 모든 연관가설이 식 (9)를 만족하지 않는 비율
- ③ 한 개의 연관가설만이 식 (9)를 만족하는 비율

[표 2] 각 시나리오별 연관 성공률(%)($t_w : 0.5$ 초)

시나리오	t_{EE}	$z_{th}=18.5$		$z_{th}=24.1$	
		IT	2PACT	IT	2PACT
1	0	99.96	99.74	100.00	99.98
	0.3	99.14	96.49	99.89	99.40
2	0	98.79	99.68	98.80	99.70
	0.3	98.29	97.08	99.03	99.38
3	0	98.94	99.49	99.00	99.73
	0.3	98.17	95.21	99.18	99.06
4	0	95.18	96.80	95.18	96.83
	0.3	92.28	89.58	94.75	95.29

[표 3] 한 개의 연관가설만 항적연관 게이팅식을 만족하는 비율(%)($t_w : 0.5$ 초)

시나리오	t_{EE}	$z_{th}=18.5$		$z_{th}=24.1$	
		IT	2PACT	IT	2PACT
2	0	0.00	0.01	0.00	0.00
	0.3	0.59	1.83	0.07	0.26
3	0	0.04	0.22	0.00	0.02
	0.3	0.82	3.31	0.08	0.57
4	0	0.00	0.02	0.00	0.00
	0.3	2.63	5.81	0.51	1.23

②, ③은 항적연관시 z_{th} 에 의해 항적연관시 연관에서 제외되는 연관가설이 발생하는 비율을 보기 위한 것으로 항적연관의 정확성 여부에는 관계없이 얻은 것이다. ②에 대한 실험결과는 값들이 무시할만한 수준이어서 제외시켰다. 또한, t_w 의 변화에 의한 연관성능의 차이는 거의 없었고, 마찬가지로 t_{EE} 가 0.1초 이내일 때 t_{EE} 에 의한 성능차이도 거의 없었다. t_w 가 0.5초일 때, 그리고 t_{EE} 가 0초, 0.3초인 경우의 결과만 표 2, 3에 제시하였다.

표 2는 각 시나리오에 대해 얻은 연관성공률이다. z_{th} 가 24.1인 때에는 시나리오 1, 2, 3의 실험에서 99%이상의 연관성공률을 보여주었고, 시나리오 4의 경우에는 95%이상이었다. z_{th} 가 18.5일 때, t_{EE} 가 0초, 0.1초인 경우에도 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 이 때 IT와 2PACT간의 연관성능의 차이는 볼 수 없었다. 그런데, z_{th} 가 18.5이고, t_{EE} 가 0.3초 일 때 IT를 적용하는 상황에서 시나리오 1, 2, 3의 실험에서는 99% 내외, 시나리오 4의 실험에서는 92%정도로 t_{EE} 가 0.1초 이내인 경우와 거의 비슷하였지만, 2PACT를 적용하는 경우에는 연관성공률이 약간 감소하였다.

표 3은 시나리오 2, 3, 4의 실험에서 항적연관시 한 개의 연관가설만 항적연관 게이팅식을 만족하는 비율을 얻은 것이다. z_{th} 가 24.1일 때는 항적연관 게이팅에 의한 연관실패가 거의 없음을 볼 수 있었다. 이는 z_{th} 가 18.5일 때 t_{EE} 가 0.1초 이내인 경우에도 마찬가지였다. 그러나, t_{EE} 가 0.3초인 경우에는 약간 발생하는 경향을 보였고 2PACT인 경우에 그러한 경향이 조금 더 컸다. t_w 에 의한 영향도 거의 나타나지 않았다. 그리고, IT와 2PACT는 비슷한 연관성능을 보여주었다. 이 결과는 t_{EE} 가 0.1초 이내의 경우는 $z_{th}=18.5$ 로 잡는데 무리가 없음을 보여준다.

5. 맺음말

본 논문에서는 분산형 추적 시스템의 항적연관 및 융합 알고리즘을 구현하고 수치실험을 통하여 성능을

평가하였다. 성능평가를 위하여 MFR2의 전송비퍼 대기시간(t_W), 항적오차의 상관성 고려여부, 항적연관 게이팅 문턱값(z_{th})의 영향을 분석하였다. 또한 MFR이 항적정보 전송시 항적정보시간을 전송하지 않는 경우, 수신단에서 이를 추정할 때 발생하는 오차(t_{EE})의 영향도 분석하였다.

이 수치실험의 결과를 종합해 보면 다음과 같다. 우선 항적연관성능은 t_W , t_{EE} , 그리고 IT/2PACT에 크게 영향을 받지 않았다. 항적융합성능 역시 t_W 와 IT/2PACT에 영향을 크게 받지 않았다. 하지만, t_{EE} 가 커짐에 따라 융합항적의 RMS 오차는 크게 증가하였다. 융합항적의 RMS 위치오차는 항적정보시간 추정오차가 없는 경우 MFR1의 항적과 비슷하여 항적융합으로 인한 정확도의 개선은 크지 않았다. 특히, t_{EE} 가 클 때는 융합항적의 RMS 위치오차가 MFR1의 항적보다 커졌다. 이는 MFR 한 쪽의 항적추정의 정확도가 많이 떨어질 때 융합항적의 정확도가 개선되지 않음을 의미한다. 전술적인 시각에서 볼 때 분산형 추적에서 항적연관이 더 중요하다는 점을 고려해 볼 때 이는 크게 문제를 야기하는 요소는 아닌 것으로 판단된다.

결론적으로 이 다중레이다의 분산형 추적에서 항적오차의 상관성 반영여부는 항적연관 및 융합성능에 크게 영향을 주지 않았다. MFR이 융합센터로 항적정보를 전송하는데 걸리는 시간이 다소 크더라도 항적정보시간의 추정오차가 비교적 작다면 분산형 추적의 성능저하가 거의 없음을 알 수 있었다. 그러나, 항적정보시간의 추정오차가 클 경우 분산형 추적의 항적융합 정확도가 떨어질 수 있음을 알 수 있었다. 마지막으로 이 논문에서는 최적 항적연관 알고리즘을 사용하였지만, 항적연관 알고리즘은 연관성능에 크게 영향을 줄 수 있다. 따라서 가능한 최적에 가까운 성능을 갖는 항적연관 알고리즘을 사용해야 함을 밝힌다.

후 기

이 연구는 국방과학연구소의 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] Y. Bar-Shalom and W. D. Blair (Ed.), Multitarget- Multisensor Tracking : Applications and Advances, Vol. III, MA : Artech House, Norwood, 2000.
- [2] S. S. Blackman and R. F. Popoli, Design and Analysis of Modern Tracking Systems, MA : Artech House, Norwood, 1999.
- [3] W. D. Blair and Y. Bar-Shalom, "Historical Perspectives of Multisensor Tracking", Distributed Sensor Networks Workshop, Quebec City, July 2007.
- [4] 최원용, 홍순목, 이동관, 정재경, "레이다 항적융합 연구의 최근동향", 한국군사과학기술학회지, 제 11권, 제1호, pp. 85~92, 2008. 2.
- [5] Y. Bar-Shalom, "On the Track-to-track Correlation Problem", IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. 26, No. 2, pp. 571~572, 1981.
- [6] H. Chen, T. Kirubarajan and Y. Bar-Shalom, "Performance Limits of Track-to-track Fusion Versus Centralized Estimation : Theory and Application", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 39, No. 2, pp. 386~400, April 2003.
- [7] L. M. Kaplan, W. D. Blair and Y. Bar-Shalom, "Simulation Studies of Multisensor Track Association and Fusion Methods", in Proceedings of 2006 IEEE/AIAA Aerospace Conference, Big Sky, MT, Mar. 2006.
- [8] Y. Bar-Shalom, X. R. Li and T. Kirubarajan, Estimation with Application to Tracking and Navigation, John Wiley & Sons, New York, 2001.