Journal of the KIMST, Vol. 22, No. 1, pp. 1-10, 2019
ISSN 1598-9127(print), 2636-0640(online)
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2019.22.1.001

Research Paper 센서 · 신호처리 부문

TWS 레이더 추적을 위한 가중 점수 기반 추적 초기화 알고리즘 연구

이규정[1] · 곽노준*[,1] · 권지훈[2] · 양은정[3] · 김관성[3]

[1] 서울대학교 융합과학기술대학원 지능형융합시스템전공
[2] 한화시스템㈜ 레이더연구소
[3] 국방과학연구소 제3기술연구본부

Track Initiation Algorithm Based on Weighted Score for TWS Radar Tracking

Gyuejeong Lee[1] · Nojun Kwak*[,1] · Jihoon Kwon[2] · Eunjeong Yang[3] · Kwansung Kim[3]

[1] *Graduate School of Convergence Science and Technology, Seoul National University, Korea*
[2] *Radar R&D Center, Hanwha Systems, Korea*
[3] *The 3rd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 26 July 2018 / Revised 2 October 2018 / Accepted 7 December 2018)

ABSTRACT

In this paper, we propose the track initiation algorithm based on the weighted score for TWS radar tracking. This algorithm utilizes radar velocity information to calculate the probabilistic track score and applies the Non-Maximum-Suppression(NMS) to confirm the targets to track. This approach is understood as a modification of a conventional track initiation algorithm in a probabilistic manner. Also, we additionally apply the weighted Hough transform to compensate a measurement error, and it helps to improve the track detection probability. We designed the simulator in order to demonstrate the performance of the proposed track initiation algorithm. The simulation result show that the proposed algorithm, which reduces about 40 % of a false track probability, is better than the conventional algorithm.

Key Words : Radar(레이더), Tracking(추적), Track Initiation(추적 초기화), Hough Transform(허프 변환), Track Score (트랙 점수)

1. 서 론

추적 초기화(Track Initiation) 알고리즘은 추적할 표적을 결정하는 단계로서 레이더 추적 문제에서 중요한 처리 과정 중에 하나이다[1,2]. 이는 레이더로부터 획득된 수신 정보를 기반으로 실제 표적의 움직임과 가

* Corresponding author, E-mail: nojunk@snu.ac.kr
Copyright ⓒ The Korea Institute of Military Science and Technology

장 근접한 측정치 궤적을 찾는 것을 목적으로 하며 일반적으로 측정치에 대한 상태추정과정(state Estimation Process) 없이 적용한다[3].

추적 초기화 알고리즘의 성능을 좌우하는 핵심 고려요소는 다음 두 가지로 요약할 수 있다[4]. 첫째, 추적 초기화 알고리즘은 탐지영역 내 표적으로 의심되는 측정치가 수신되었을 때, 가능한 빠른 시간 내 추적해야 할 대상인지 확정해야 한다. 이는 빠른 상황인식을 통한 효과적인 작전 판단을 가능하게 해야 한다는 점에 초점을 두고 있다. 둘째, 낮은 거짓트랙 생성확률(false track probability)을 고려해야 한다. 이는 추적 초기화 과정 시 생성된 거짓 트랙을 유지하기 위해 컴퓨터 자원이 불필요하게 낭비되는 것을 방지하는 데 목적이 있다. 거짓트랙 생성을 억제하기 위해 복잡한 알고리즘을 적용하거나 상대적으로 긴 스캔동안 측정치를 누적할 경우, 추적 초기화 알고리즘 처리속도가 늘어나는 문제가 있다. 반대로 처리시간을 줄이기 위해 단순한 형태의 추적 초기화 알고리즘을 사용하면 거짓트랙이 증가하는 문제를 갖기 때문에, 둘 사이 균형을 고려하여 최적화된 알고리즘을 설계해야 한다[5].

전통적인 추적 초기화 알고리즘은 크게 순차처리기법(sequential methods)과 일괄처리기법(batch methods)으로 분류할 수 있다[6]. 순차처리기법은 앞서 언급한 첫 번째 고려요소인 빠른 처리시간에 주안점을 둔 기법이다. 이 기법은 매 스캔마다의 측정치를 개별적으로 처리하는 방식이며 대표적인 알고리즘으로 M/N 논리기반 추적 초기화 알고리즘(M/N logic based track initiation algorithm) 등이 있다. 여기서 N은 스캔 수, M은 N 스캔 중 초기화 게이트(initiation gate)내에 측정치가 존재한 횟수를 의미한다. 순차처리기법은 클러터(clutter)가 적은 환경에서 효과적으로 동작하지만 클러터가 복잡한 환경에서는 개별 스캔의 임계값을 만족한 모든 측정치가 초기화 과정에 사용되므로 거짓트랙 생성 확률이 상대적으로 높은 것으로 알려져 있다[7]. 반면 일괄처리기법은 거짓트랙 억제에 보다 주안점을 둔 기법이라 할 수 있다. 이 기법은 일정 스캔의 측정치를 모아 가능한 측정치 조합을 만든 후에 한꺼번에 처리하는 방식으로 허프변환(Hough transform) 기반 초기화 알고리즘이 대표적이다. 이 알고리즘은 허프변환을 통해 직교 좌표계상의 모든 측정치(x, y)를 극 좌표계로 변환(ρ, θ)하며 측정치 조합의 ρ, θ 편차를 기준으로 트랙을 초기화 한다. 일괄처리기법은 이 측정치 조합이 임계값을 동시에 만족해야하기 때문에 클러터가 많은 환경에서 효과적인 기법으로 알려져 있다[6]. 하지만 여러 스캔을 요구하기 때문에 처리속도가 느리고, 측정치 조합을 저장하기 위해 상대적으로 많은 양의 메모리를 요구하는 단점이 있다[8].

한편, 최근 위협이 증가하고 있는 드론이나 미사일과 같은 소형항적은 레이더반사영역(RCS, Radar Cross Section)이 작은 표적이기 때문에 이를 탐지하기 위해서는 레이더 임계값을 낮게 설정해야한다[4,9-11]. 이로 인해 클러터가 다량 유입되는 환경이 만들어지며, 추적 초기화 과정에서 처리해야하는 측정치 조합의 수가 기하급수적으로 증가하는 문제가 있다. 이러한 환경에서 전통적인 알고리즘의 접근방식은 앞서 언급한 바와 같이, 효율적 추적 초기화 처리에 한계를 갖는다. 따라서 거짓 표적의 초기화를 효과적으로 억제하고 정확하고 빠른 탐지 및 추적을 가능케 하는 향상된 추적 초기화 처리 기법 연구가 요구되고 있다.

대부분의 전통적인 추적 초기화 알고리즘이 결정론적(deterministic) 기법을 따르는 것에 반해 Multiple Hypothesis Tracker(MHT)[1] 및 Integrated Probabilistic Data Association Filter(IPDAF)[12] 기반 알고리즘은 확률론적 기법으로 분류될 수 있다[13]. 이러한 확률론적 기법은 초기화, 데이터 연관, 필터링의 과정이 통합되어 있으며 복잡한 클러터 환경에서 추적 초기화 및 추적을 향상시킬 수 있다고 보고되었다[14]. 하지만 클러터가 많은 환경에서는 고려해야 할 가설의 수가 기하급수적으로 증가하기 때문에 실제 적용에 한계가 있을 수 있으며 따라서 일반적으로 초기화, 데이터 연관, 필터링 각 단계별로 개별적인 알고리즘을 적용한다[15,16].

본 논문에서는 탐색간 추적(TWS, Track While Scan) 레이더의 다량의 클러터가 유입되는 환경에서 성능이 저하되는 전통적인 추적 초기화 알고리즘의 제한점을 개선하기 위해 확률론적 기법을 결합한 가중 점수 기반 추적 초기화 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘은 트랙점수 개념을 활용하며 일반적인 트랙점수가 측정치의 공분산을 이용하는 것과 달리 다량의 클러터가 유입되어 측정치 조합의 수가 늘어난 상황에서도 빠르게 트랙점수를 계산하기 위해 전통적 추적 초기화 알고리즘에서 사용하는 측정치의 속도정보를 바탕으로 확률적으로 정의하였다. 이렇게 정의된 트랙점수를 바탕으로 측정치 조합 중 거짓 표적을 제거하고 추적할 표적을 결정하기 위해 비 최대치 억제(NMS, Non-Maximum Suppression)[17] 기법을 적용하였다. 또한

관측값의 측정오차가 증가 할 경우 속도정보를 기반으로 정의된 트랙점수의 신뢰도가 떨어져 추적 성능이 저하(degradation) 되는 제한점을 보완하기 위해 신호대잡음비(SNR, Signal to Noise Ratio)[18] 정보를 활용한 가중치 허프변환(weighted Hough transform)[19] 기법을 적용한다.

제안 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 추적 초기화 실험을 위한 시뮬레이터를 구성하였으며, 성능 분석을 위한 지표로 트랙 탐지 확률(P_D, track detection probability), 거짓 트랙 확률(P_F, false track probability) 그리고 처리시간을 비교 분석한다. 이러한 성능 비교 방식은 참조논문 [6]의 분석법을 따른다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 전통적인 추적 초기화 알고리즘에 대하여 설명한다. 3장은 제안하고자 하는 가중 점수 기반 추적 초기화 알고리즘을 설명하고, 4장에서 시뮬레이션을 통해 제안 알고리즘의 성능을 분석한다. 5장은 결론과 향후연구를 기술한다.

2. 추적 초기화 알고리즘

본 논문에서는 추적 초기화 처리과정에 있는 측정치의 조합을 '임시트랙(tentative track)'이라고 하며, 특정 조건을 만족하여 추적할 대상으로 결정된 임시트랙을 '확정트랙(confirmed track)', 조건을 만족하지 못한 임시트랙은 '삭제트랙(deleted track)'이라 정의한다.

전통적인 추적 초기화 기법인 순차처리 기법과 일괄처리 기법이 있으며, 순차처리 기법은 주로 거리, 속도, 가속도 정보를 이용하며 트랙을 확정하며, 규칙기반(rule based) 기법 및 논리 기반(logic based) 기법 등이 있다. 그리고 일괄처리 기법은 거리, 각도정보를 이용하며, 대표적으로 허프변환 기반 기법[20]과 수정된 허프변환 기반(modified Hough transform based) 기법[21] 등이 있다.

2.1 순차처리 기법

규칙기반 기법과 논리기반 기법은 주로 속도와 가속도 정보를 추적 초기화 정보로 활용한다. i번째 스캔에서 획득된 측정치의 위치정보를 $\mathbf{r}_i$, 스캔 주기를 t_s라 하면 측정치 조합의 속도 $\mathbf{v}^i$와 가속도 $\mathbf{a}^i$는 다음식과 같이 표현한다.

$$\mathbf{v}^i = (\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i)/t_s \tag{1}$$

$$\mathbf{a}^i = [(\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i)/t_s - (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{i-1})/t_s]/t_s \tag{2}$$

규칙기반 기법에서는 속도와 가속도 norm의 최대, 최솟값을 임계값으로 설정하고 이를 만족한 측정치 조합을 이용해 임시트랙을 생성하거나 확장한다. 이에 반해 논리기반 기법에서는 속도 norm의 최대, 최솟값을 임계값으로 설정하는 것은 동일하나 이전 스캔에서 계산된 속도와 가속도 정보를 바탕으로 임시트랙의 다음 위치를 예측하여 초기화 게이트를 설정한 후 이 게이트 영역 내의 측정치만 초기화 과정에 활용한다는 점에서 차이가 있다. 즉, 초기화 게이트의 임계값을 r_0라 하면 $\| \mathbf{r}_k^i - \mathbf{r}_i \| < r_0$ 조건을 만족하는 측정치만을 이용해 임시트랙을 생성하거나 확장하는 것이다. 이때 임시트랙의 예측 위치 $\mathbf{r}_k^i$는 다음식과 같이 표현된다.

$$\mathbf{r}_k^i = \mathbf{r}_k^{i-1} + \mathbf{v}^{i-1} t_s + \frac{1}{2} t_s^2 \cdot \mathbf{a}^{i-1} \tag{3}$$

위의 과정을 통해 생성된 임시트랙이 N스캔 이상 유지될 경우 확정트랙이 된다. 순차처리기법은 매 스캔마다 조건을 적용하는 방식으로, 빠른 처리가 가능하나 클러터가 많아 질 경우 조건을 만족하는 측정치의 수도 늘어나 거짓트랙을 생성할 확률이 높아지는 단점이 있다.

2.2 일괄처리 기법

일괄처리 기법은 주로 데이터 분포에서 직선을 찾는데 효과적인 허프변환 기법을 기반으로 한다. 이 알고리즘에서는 이미지 공간에서 추출된 특징점을 모수공간으로 변환한 후 투표방식을 통해 가장 적절한 직선이나 곡선을 찾는 방법이다[22]. 추적 초기화 기법에서는 N스캔 동안의 획득된 모든 가능한 측정치 조합을 임시트랙으로 저장하고 수식 (4)를 통해 θ-ρ 공간으로 매핑(mapping) 한다[6].

$$\rho = x\cos(\theta) + y\sin(\theta) \tag{4}$$

이때 ρ는 (x,y)를 지나는 직선에서 원점까지의 수직 거리이며 θ는 이 직선의 법선벡터와 x축간 각도

를 의미한다[6]. 각 임시트랙을 구성하는 측정치들의 ρ, θ 편차가 사전에 정의한 임계값 g_0, ϕ_0 보다 작은 임시트랙만이 확정트랙으로 결정되며, ρ를 기준으로 결정하는 방식을 허프변환 기반 기법이라 하며, θ를 기준으로 결정하는 방식을 수정된 허프변환 기반 기법이라 한다. 일괄처리기법은 일정 스캔동안 획득된 측정치들의 통계 값을 이용하므로 클러터가 많이 유입된 환경에 적합하나 충분한 스캔 동안의 측정치가 획득되지 않으면 거짓트랙 생성확률이 늘어난다는 제한점이 있다.

3. 가중 점수 기반 추적 초기화 알고리즘

본 논문에서는 빠른 처리를 유지하면서, 정확도를 향상시키는 방법을 고려한다. 앞서 언급한 일괄처리 방식의 경우, 클러터가 많은 환경에서 거짓 트랙을 줄일 수 있는 대안이 될 수 있으나, 속도를 빠르게 하기 위해 스캔 수를 줄일 경우 성능이 떨어지는 현상이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 순차처리의 빠른 처리를 유지하면서, 정확도를 개선할 수 있는 가중 점수 기반 추적 초기화 알고리즘을 제안한다. 이 방식은 전통적인 추적 초기화 알고리즘에 확률론적 기법을 적용한 방식으로써, 제안 알고리즘의 처리과정은 다음과 같다.

먼저, 수식 (1)로 계산되는 측정치의 속도정보를 바탕으로 트랙점수가 산출하며 여기에 측정오차로 인한 추적성능의 저하를 방지하기 위해 가중치 허프변환 기반 기법을 적용하여 트랙점수를 보완한다. 보완된 트랙점수를 '가중 트랙점수'라 하며 이를 바탕으로 비최대치 억제기법을 적용하여 추적할 표적을 결정한다.

3.1 속도 기반 트랙점수

본 논문에서는 추적 초기화 과정이 진행되는 N스캔 동안 표적이 CV(Constant Velocity) 모델을 따른다고 가정한다[23]. 여기서 N은 추적 초기화 알고리즘에서 확정트랙을 판단하는 기준 스캔수이다. CV 모델은 레이더 스캔 주기동안 표적의 속도편차가 크지 않음을 전제하며 제안 알고리즘의 기반이 되는 전통적인 추적 초기화 알고리즘에서 일반적으로 N = 4가 적용된다[6]. 따라서 스캔 주기가 충분히 짧다면 표적이 등속도를 유지해야 하는 시간도 짧아지므로 위의 가정은 실제 환경에서도 유효하다고 볼 수 있다.

앞의 전제처럼 표적 속도 편차가 일정 수준으로 제한된다면, 임시트랙의 속도 변화 정도를 초기화의 기준으로 활용할 수 있으며, 범주 내의 다수의 관측값이 존재할 경우, 속도 변화가 적은 임시트랙에 보다 가중치를 높게 부여함으로써 트랙을 확정시키는 방법은 매우 효과적이다. 따라서 본 논문에서는 임시트랙의 속도 변화를 확률적인 트랙점수로 변환하고 이를 기반으로 추적할 표적을 결정하는 방식을 제안한다.

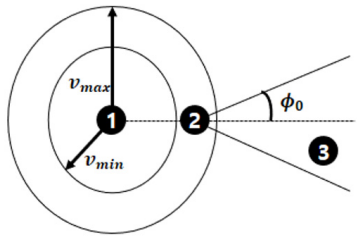


Fig. 1. Velocity and angle gate conditions

제안하는 방식은 우선 Fig. 1과 같이 모든 측정치 조합 중에 속도와 각도 조건을 모두 만족한 조합을 임시트랙으로 등록하며, 이는 전통적인 추적 초기화 기법과 동일하다. 이때 계산되는 속도는 트랙점수 산출의 근거가 되는 속도 편차를 계산할 때 활용한다.

이때 k를 임시트랙의 순번이라 하면 k번째 임시트랙의 i번째 측정치의 속도 v_k^i는 수식 (1)과 같이 계산되고 인접 스캔 간 속도편차 $v_k^{d_i}$는 다음식과 같이 표현된다.

$$v_k^{d_i} = \left| v_k^{i-1} - v_k^i \right| \tag{5}$$

여기서 상대속도편차 Δv_k^i는 i번째 스캔에서 임시트랙 k의 속도편차 $v_k^{d_i}$가 갖는 상대적인 값을 의미하며 다음식과 같이 표현된다.

$$\Delta v_k^i = \left| \max_k (v_k^{d_i}) - v_k^{d_i} \right| \tag{6}$$

수식 (6)을 통해 계산된 임시트랙의 상대속도편차 Δv_i는 i번째 스캔에서 전체 임시트랙의 최대 속도편차에서 개별 임시트랙의 속도편차를 뺀 값으로 이를 통해 속도편차가 작은 임시트랙일수록 큰 상대속도편차 값을 갖게 된다. 상대속도편차를 확률 값인 우도함

수(likelihood function)로 표현하기 위해 수식 (7)과 같이 정규화 한다.

$$P(T_k^i|H_1) = \frac{1}{Z}\exp(\Delta v_k^i) \tag{7}$$

이때 H_1은 k번째 임시트랙의 i번째 측정치인 T_k^i가 실제 표적일 가설이며 Z는 분배함수(partition function)로 모든 k에 대한 $\exp(\Delta v_k^i)$의 합을 의미한다.

최종적인 속도기반 트랙점수 $E_v(T_k)$는 임시트랙의 각 스캔별 우도함수들의 곱인 결합확률로 표현되는데 이를 연산이 용이한 합 연산으로 변환하기 위해 로그함수를 사용하며 다음식과 같이 표현된다.

$$E_v(T_k) = \sum_{i=2}^{N-1} \log P(T_k^i|H_1) \tag{8}$$

수식 (8)을 통해 속도편차가 작은 임시트랙일수록 높은 트랙점수를 갖도록 유도되며 앞서의 가정과 같이 실제표적이 스캔주기가 충분히 짧은 상황에서 속도의 편차가 일정하게 유지되는 경우, 추적할 표적으로 초기화될 가능성이 높아지게 된다.

이렇듯 전통적인 기법의 속도정보를 이용하여 스캔별 트랙점수를 확률적으로 정의한 후 스캔별 점수를 누적하여 최종 트랙점수를 계산하므로 전통적 기법의 장점인 낮은 복잡도와 확률적 기법의 장점인 정확도를 모두 취할 수 있다.

3.2 가중치 허프변환 기법

3.1절에서 서술한 속도 기반 트랙점수는 속도정보만을 이용하여 계산된다. 측정치의 위치정보를 기반으로 한 속도정보는 간단한 수식으로 통해 계산되나 잡음 등의 영향으로 위치정보에 측정오차가 발생한 경우 신뢰도를 보장할 수 없다. 이는 매 스캔마다 계산되는 속도 정보의 편차가 상대적으로 커, 속도정보의 신뢰도가 낮아짐을 의미한다. 결국 속도를 기반으로 한 트랙점수의 신뢰도도 보장할 수 없음을 의미하므로 결과적으로 추적 초기화의 정확도가 저하됨을 의미한다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 가중치 허프변환 기법[19]을 바탕으로 측정오차에 따른 트랙점수 신뢰도 저하를 보완하는 기법을 추가 제안한다.

가중치 허프변환, $F(\rho,\theta,x,y)$은 측정치가 가지는 정보를 가중치의 형태로 허프변환에 반영하여 정확도를 높이는 기법으로 식 (9)와 같이 표현된다.

$$F(\rho,\theta,x,y) = \begin{cases} kK(x,y) & \rho = x\cos\theta + y\sin\theta \\ 0 & otherwise \end{cases} \tag{9}$$

$$F'(\rho,\theta,x,y) = \begin{cases} 1 & \rho = x\cos\theta + y\sin\theta \\ 0 & otherwise \end{cases} \tag{10}$$

이때 $K(x,y)$는 측정치의 가중치를 계산하기 위한 함수를 의미하며 k는 정규화 상수이다. 즉, (x,y)에 해당하는 측정치를 θ-ρ공간으로 매핑 할 때 각 측정치별 가중치를 부여하여 측정치들 간에 차이를 갖게 한다는 의미이다. 이는 기존 허프변환, $F'(\rho,\theta,x,y)$이 식 (10)과 같이 (x,y)에 해당하는 모든 측정치를 동일한 가중치인 1로 매핑하는 것과 차이가 있다. 우리는 이러한 가중치를 통해 측정치가 갖는 고유한 특성을 반영하여 위치정보만을 사용했을 때 발생할 수 있는 불완전성을 보완할 수 있는 기법을 제안한다.

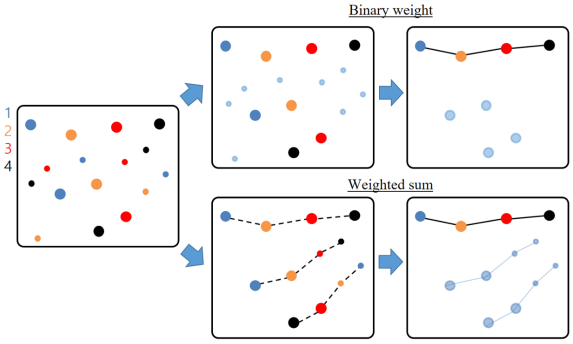


Fig. 2. Weighted hough transform based methods

Fig. 2는 본 논문에서 제안하고자 하는 측정치의 SNR값을 가중치로 활용하여 속도기반 트랙점수를 보완하는 기법인 이진 가중치 기법(binary weight)과 가중치 합(weighted sum) 기법의 단계별 처리과정을 각각 나타낸다. 여기서 각 점의 색은 측정치가 수신된 스캔순서, 점의 크기는 SNR 값을 의미하며 점과 점 사이를 잇는 검은색 선은 각각 추적 초기화 과정을 통해 등록된 임시트랙(점선) 또는 확정트랙(실선)을 의미한다. 또한 투명한 점 또는 선은 처리과정에서 삭제된 측정치 또는 임시트랙을 의미한다.

이진 가중치 기법은 매 스캔별로 수신된 측정치 중 임계값을 넘는 SNR값을 갖는 측정치만을 활용해 트랙점수를 계산하는 방식으로 추적 초기화 과정에서 고려해야하는 측정치의 숫자를 줄이는데 초점을 둔 기법이다. Fig. 2에서 위쪽에 해당하며 4번의 스캔동안 수신된 측정치 중 SNR값이 임계값을 넘지못한 측정치가 삭제된 후 추적 초기화 과정이 진행되었음을 알 수 있다. 그에 반해 가중치 합 기법은 속도 기반 트랙점수를 SNR값을 기반으로 한 트랙점수를 이용해 보완하는 방식으로 트랙점수의 정확도를 높이는데 초점을 둔 기법이며 SNR값 기반 트랙점수, E_s는 다음 식과 같이 계산한다.

$$E_s(T_k)=\sum_{i=1}^{N}\log\frac{S_k^i}{\sum_k S_k^i} \tag{10}$$

이때 S_k^i는 k번째 임시트랙의 i번째 측정치가 가지는 SNR 값을 의미하며 가중 트랙점수, E는 수식 (11)과 같이 계산된다.

$$E(T_k)=E_v(T_k)+E_s(T_k) \tag{11}$$

이 기법은 Fig. 2에서 아래쪽에 해당하며 4번의 스캔동안 수신된 측정치를 바탕으로 임시트랙을 먼저 등록 한 후에 SNR기반 트랙점수를 기반으로 최종 확정트랙이 결정되었음을 알 수 있다.

표적과 클러터의 SNR 값은 Rayleigh 모델[24]을 따르며 다음식과 같이 표현된다.

$$P_0(s)=s\exp(\frac{-s^2}{2}),\qquad s\geq 0 \tag{12}$$

$$P_1(s)=\frac{s}{1+d}\exp(\frac{-s^2}{2(1+d)}),\qquad a\geq 0 \tag{13}$$

이때 d는 표적의 기대 SNR 값을 의미하며 표적은 RCS 모델은 Swerling 1으로 가정한다.

3.3 추적 초기화를 위한 비 최대치 억제기법

앞 절에서 설명한 트랙점수를 기반으로 임시트랙 중 추적할 대상이 되는 확정트랙을 결정하기 위해 본 논문에서는 비 최대치 억제기법을 통한 접근방안을 제안한다. 비 최대치 억제기법은 컴퓨터 비전분야의 객체검출문제에서 주로 활용되는 기법으로 레이다 추적 초기화를 위한 트랙 삭제 기법으로 활용할 수 있다. 이 기법은 복수의 검출영역 후보군을 점수 순으로 정렬하고 중복되는 검출영역 중 최대 점수를 갖는 것만 남기고 나머지를 삭제하는 방식으로 진행되며 이를 반복적으로 수행해 남은 검출영역만을 결과로 활용한다.

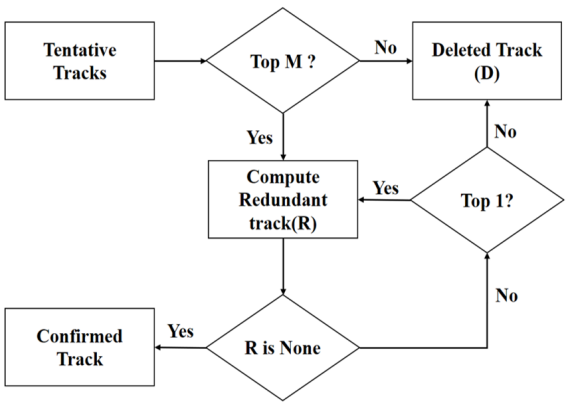


Fig. 3. Block diagram of non-maximum suppression process

Fig. 3은 제안 알고리즘에서 비 최대치 억제기법을 이용해 확정트랙을 결정하는 과정을 나타내며 과정별 처리내용은 다음과 같다. 먼저, 처리시간을 줄이기 위해 전체 임시트랙 중 상위 M개의 임시트랙만을 선택한다. 이때 M은 추적 초기화 과정에서 한 스캔 당 평균 클러터 수를 의미한다. 이후 각 M개의 임시트랙별 불필요트랙(R_k, redundant track)를 수식 (14)의 조건을 적용하여 각각 등록한다.

$$\| T_k^N - T_m^N \| < \delta_0, \qquad m=1,2,\cdots,K \tag{14}$$

여기서 δ_0는 NMS 임계값, K는 전체 임시트랙의 수를 나타내며 N은 추적 초기화 과정의 마지막 스캔 번호를 의미한다. 수식 (14)에 의해 등록된 불필요트랙은 인접한 거리에 있는 임시트랙의 집합을 의미한다. 불필요트랙이 존재 할 경우 수식 (15)에 따라 트랙점수가 가장 높은 하나의 트랙이 임시트랙으로 유지되고 나머지 트랙은 삭제트랙(D_k, deleted track)으로 등록된다.

$$T_k = \begin{cases} T_k & \text{if } T_k = \max_{T_k \in R_k} E(T_k) \\ D_k & otherwise \end{cases} \quad (15)$$

여기서 D_k는 삭제트랙을 의미하며, 삭제트랙은 분류됨과 동시에 메모리에서 삭제된다. 수식 (14)와 (15)의 과정을 불필요트랙이 더 이상 등록되지 않을 때까지 반복하고 최종적으로 남은 임시트랙을 확정트랙으로 결정한다.

이 접근법은 추가정보 없이 트랙이 갖는 값을 기준으로 중복트랙을 제거할 수 있다는 점에서 기존 추적 초기화 알고리즘이나 데이터 연관기법에 적용이 가능하다.

4. 시뮬레이션 결과

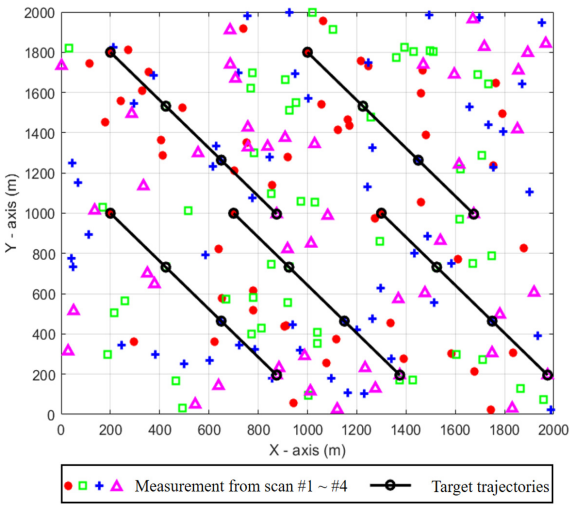


Fig. 4. Simulation environment

본 논문에서는 제안기법의 성능을 검증하기 위해 추적 초기화 시뮬레이터를 구성하고 1,000번의 몬테카를로 시뮬레이션을 진행하였다. Fig. 4는 시뮬레이션 환경의 예시로 4번의 스캔동안의 실제표적과 클러터를 중첩하여 표현한 것으로 검은색 선은 실제표적의 궤적을 그 외의 기호는 클러터 신호를 의미한다. 실제표적은 시작위치만 다르고 속도와 방향이 같은 5개 표적이 무작위의 측정오차를 갖도록 모사하였으며, 클러터 신호는 기대 클러터 신호개수(expected number of clutter signal)를 기준으로 포아송 분포(Poisson distribution)로부터 무작위로 매 스캔별 클러터 신호의 개수를 결정한 후 관측영역에서 균일분포(uniform distribution)를 갖도록 위치를 정하였다. 측정오차는 거리오차와 방위각오차를 각각 사용하였으며 실험에 적용된 클러터 수와 오차크기는 각 실험의 목적에 부합하도록 설정하였다. 표적과 클러터의 SNR값은 수식 (12), (13)를 이용하여 각각 설정하였다. 성능분석을 위해 사용한 트랙 탐지 확률 P_D는 실제 표적의 수와 초기화 된 실제 표적의 비율로 계산되고 거짓트랙 확률 P_F는 스캔 별 평균 클러터 수와 거짓트랙의 비율로 계산되며 처리시간은 첫 번째 스캔의 측정치가 수신되어 추적 초기화 과정이 완료되는데 까지 소요되는 시간이다. 제안 알고리즘의 성능을 비교하기 위해 M/N 논리기반 추적 초기화 알고리즘과 수정된 허프변환 기반 추적 초기화 알고리즘을 각각 사용하였으며, 가중치 허프변환 기법의 효과를 확인하기 위해 속도정보 기반의 트랙점수만 이용한 경우, 이진 가중치가 적용된 경우 그리고 가중치 합이 적용된 경우를 구분하여 각각 실험하였으며 상세 실험환경은 Table 1과 같다.

Table 1. Simulation environment

Parameter	Value
Sampling time (t_s)	1s
Observation area	4 km^2
Target velocity (v)	350 m/s
Target angle (θ)	-50 °
Total scan of track initiation process(N)	4
Minimum velocity threshold (v_{min})	40 m/s
Maximum velocity threshold (v_{max})	700 m/s
Acceptance gate threshold (r_0)	80 m
Angular threshold (ϕ_0)	25 °
NMS threshold(δ_0)	20 m
Expected SNR(d)	10 dB

Fig. 5는 클러터 수에 따른 각 초기화 알고리즘의 P_F 변화를 나타낸다. 검정색은 M/N 논리기반 알고리즘, 초록색은 수정된 허프변환 기반 알고리즘, 파란색은 제안 알고리즘에서 속도 기반 트랙점수만을 이용

한 결과이며 빨간색이 이진 가중치 기법 그리고 심홍색이 가중치 기법이 추가로 적용한 결과를 각각 의미한다. 각 알고리즘이 일정한 수준의 P_D를 유지한 상태에서 실험을 진행하기 위해 거리오차 σ_r = 10 m를 적용하였고 클러터 밀도는 최대 1.25 × 10^{-5} m^{-2}까지 설정하였다.

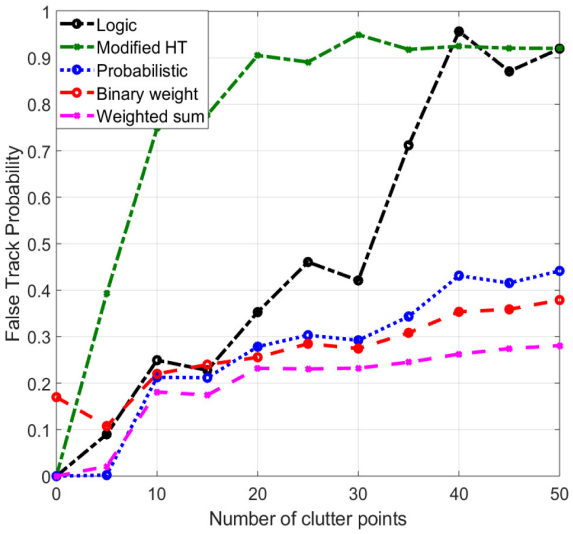


Fig. 5. Comparison of false track probability(P_F) in clutter environment

Fig. 5와 같이 제안 트랙점수를 사용한 알고리즘이 기존 알고리즘 대비 최대 40 % 낮은 P_F를 보여 클러터 많은 상황에서 거짓트랙의 생성을 억제할 수 있음을 확인 할 수 있었다. 이는 트랙점수가 임시트랙 간 상대적인 속도편차의 차이를 기반으로 계산되며 비최대치 억제기법을 통해 중복 가능성이 높은 트랙을 제거하기 때문이다. 이를 통해 트랙 간 상대적인 관계를 고려하는 방식이 거짓트랙 생성 억제에 효과적임을 확인 할 수 있다. 또한 속도정보 기반 트랙점수를 사용했을 때와 비교하여 가중 트랙점수를 사용했을 때 더 낮은 P_F를 보였는데 이를 통해 가중치 허프변환 기법을 기반으로 한 추가 정보의 활용이 효과가 있음을 확인하였다.

Table 2는 알고리즘별 평균 처리시간을 나타낸다. 제안 알고리즘은 순차 처리기법인 M/N 논리기반 추적 초기화 알고리즘에 대비해 처리시간이 많이 소요되었으나 허프변환 기반 추적 초기화 알고리즘과 유사한 소요시간을 나타냄을 확인하였다. 또한 이진 가중치 기법을 통해 측정치의 수를 줄이는 방법이 처리시간을 줄이는데 효과가 있음을 확인하였다.

Table 2. Average processing time

Number of clutter	30	40	50
M/N logic based	0.16s	0.22s	0.26s
Modified Hough transform	0.25s	0.64s	0.90s
Probabilistic	0.29s	0.72s	0.99s
Probabilistic + Binary weight	0.13s	0.27s	0.38s
Probabilistic + Weighted sum	0.29s	0.71s	0.99s

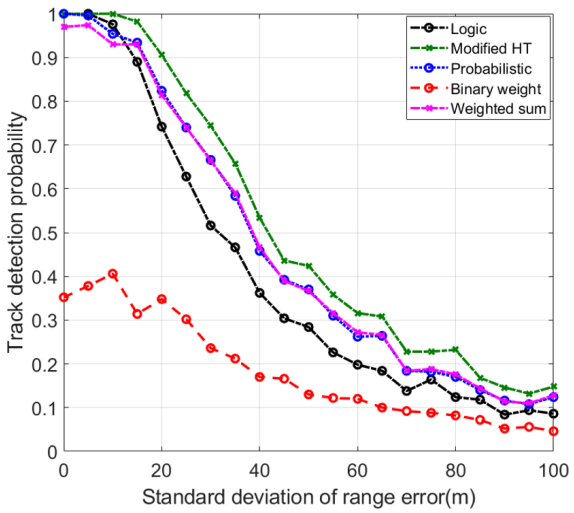


Fig. 6. Comparison of track detection probability(P_D) with range error

Fig. 6, 7은 거리와 방위각 오차에 따른 P_D의 변화를 각각 나타낸다. 각 알고리즘이 적정 수준의 P_F를 유지한 상태에서 실험을 진행하기 위해 평균 클러터 개수는 N_c = 30을 적용하였다. Fig. 5, 6에서 보는바와 측정오차가 커짐에 따라 제안 알고리즘을 포함한 모든 알고리즘의 P_D가 감소하는 경향을 보였다. 특히, 속도정보 기반 트랙점수만 이용한 경우(Fig. 6, 7의 파란색 선) 기존 알고리즘과 비슷하거나 낮은 P_D를 보여 속도, 각도와 같은 위치정보에 기반 한 추적 초기화 알고리즘이 측정오차에 취약함을 확인하였다.

이에 반해 가중 트랙점수를 사용한 경우(Fig. 6, 7의 보라색 선) 기존 알고리즘은 물론 속도정보 기반 트랙점수만 사용했을 경우에 대비해서도 유사하거나 더 높은 P_D를 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 가중치 허프변환 기법을 통해 트랙점수에 반영된 측정치의 추가 정보가 기존 트랙점수의 취약점을 보완한 결과로 볼 수 있다. 이를 통해 측정오차가 유입된 환경에서도 제안 알고리즘을 통해 비교적 정확한 추적 초기화가 가능함을 확인하였다.

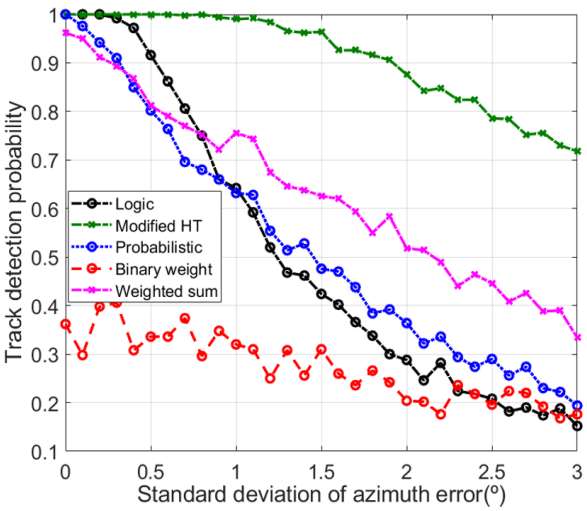


Fig. 7. Comparison of track detection probability(P_D) with azimuth error

5. 결론 및 향후 연구

다량의 클러터가 유입되는 환경에서 전통적인 추적 초기화 알고리즘을 적용했을 경우에 거짓트랙 초기화 확률이 증가하는 문제점이 있었다. 본 논문에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 전통적인 초기화 알고리즘에 확률적 기법을 적용한 가중 점수 기반 추적 초기화 알고리즘을 제안하였다. 레이더 측정치의 속도정보만을 활용하여 트랙점수를 확률적으로 산출하는 방법을 기술하였으며 속도정보 사용 시 측정오차에 취약해지는 점을 보완하기 위해 SNR 값을 활용한 가중치 기반 허프변환 기법을 통해 가중 트랙점수를 산출하는 방법을 기술하였다.

제안 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 추적 초기화 시뮬레이터를 구성하여 실험을 수행하였으며 실험결과 제안 알고리즘은 기존 추적 초기화 알고리즘과 비슷한 처리시간 내에서 최대 40 % 낮은 P_F를 보여 클러터가 많이 유입되는 환경에서도 정확한 추적 초기화가 가능함을 확인하였다. 특히 가중치 허프변환 기법을 기반으로 측정치의 SNR을 동시에 활용함으로써 측정오차 유입 시에도 기존 알고리즘에 대비해 트랙 탐지확률이 향상됨을 확인하였다.

단, 이진 가중치 기법의 경우 처리시간 단축에는 효과가 있었으나 임계값의 설정에 따라 P_D의 편차가 크게 나타났다. 따라서 적정 P_D를 유지한 상태에서 처리시간을 단축할 수 있도록 임계값 최적화에 대한 연구가 요구된다.

후 기

본 논문은 국방과학연구소의 지원(UD170008FD)을 받아 수행된 연구결과임.

References

[1] Y. Bar-Shalom and T. E. Fortmann, “Tracking and Data Association,” New York Academic Press, USA, 1988.

[2] Y. Bar-Shalom, P. K. Willett, and X. Tian, “Tracking and Data Fusion : A Handbook of Algorithms,” YBS Publishing, USA, 2011.

[3] J. Kubica, A. Moore, A. Connolly, and R. Jedicke, “Fast and Robust Track Initiation Using Multiple Trees,” In CMU Tech. Report 04-62, 2004.

[4] J. Liu and Y. Liu, “Divide and Hough Transform Method for Fast Track Initiation in Dense Clutters,” 18th International Conference on Information Fusion, Jul. 2015.

[5] H. You, X. Jianjuan, and G. Xin, “Radar Data Processing with Applications,” Wiley, USA, 2016.

[6] Z. Hu, H. Leung, and M. Blanchette, “Statistical Performance Analysis of Track Initiation Techniques,” IEEE Transactions Signal Processing, Vol. 45, pp. 445-456, 1997.

[7] S. Matteo, L. Pierfrancesco, F. Alfonso, “A Modified

M/N Logic for Track Initiation of Low Observable Targets Using Amplitude Information," International Radar Symposium, pp. 1-4, 2006.

[8] X. Dong, C. Hao, X. Chunsheng, L. Jiwei, "A New Hough Transform Applied in Track Initiation," in: Proceedings of the International Conference on Consumer Electronics Communications and Networks, CECNet, pp. 30-33, April, 2011.

[9] I. Baek, T. Lee, "Study on the Optimal Deployment of the Passive Radar System for Detecting Small Unmanned Aerial Vehicles," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 19, No. 4, pp. 443-452, 2016.

[10] J. Kwon, S. Kang, N. Kwak, "Radar Tracking Using Particle Filter for Track-Before-Detect(TBD)," KIEES, Vol. 27, No. 3, pp. 317-325, Mar, 2016.

[11] K. Baek, Y. Lee, H. Jang, "Study on the Optimal Location of Low Altitude Air Defense Radar," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 17, No. 2, pp. 248-257, 2014.

[12] D. Musiki, R. Evans, S. Stankovié, Integrated Probabilistic Data Association(IPDA), IEEE Trans. Autom. Control AC-39(6), pp. 1237-1241, 1994.

[13] H. Benoudnine, A. Meche, M. Keche, A. Ouamri, and M. S. Woolfson, "Real Time Hough Transform based Track Initiators in Clutter," Information Sciences, Vol. 337-338, pp. 82-92, 2016.

[14] F. Pektas and M. Sabuncu, "A Score-Based Track Initiation Procedure to Eliminate False Tracks in the Presence of Sea Clutter," IEEE Radar Conf., May 2012.

[15] H. Roufarshbaf and J. K. Nelson, "Feature-Aided Initiation and Tracking Via Tree Search," Proceedings of the 2013 Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2013.

[16] H. Roufarshbaf and J. K. Nelson, "A Bayesian Tree-Search Track Initiation Algorithm for Dim Targets," in Proceedings of the IEEE 47th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), Mar. 2013.

[17] A. Rosenfeld and M. Thurston, "Edge and Curve Detection for Visual Scene Analysis," IEEE Transactions on Computers, Vol. 100(5), pp. 562-569, 1971.

[18] S. Kim, Y. Jung, S. Kim, "Multiple Target Tracking using Normalized Rayleigh Likelihood of Amplitude Information of Target," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 20, No. 4, pp. 474-481, 2017.

[19] M. K. Ibrahim, E. Ngau and M. F. Daemi, "Weighted Hough Transform," Intelligent Robots and Computer Vision X: Algorithms and Techniques, International Society for Optics and Photonics pp. 237-241, 1992.

[20] B. D. Carlson, E. D. Evans and S. L. Wilson, "Search Radar Detection and Track with the Hough Transform, Part I: System Concept," IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst., Vol. 30, pp. 102-108, 1994.

[21] T. Lo, H. Leung, A. W. Bridgewater and J. Litva, "Multitarget Track Initiation Using a Modified Hough Transform," in AGARD Conf. Proc. 539, Pointing Tracking Syst., pp. 25.1-25.8, May 1994.

[22] R. Duda and P. Hart, "Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures," Communications of the ACM, Vol. 135, pp. 11-15, 1972.

[23] X. R. Li and V. Jilkov, "Survey of Maneuvering Target Tracking," IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst., Vol. 39, No. 4, pp. 1333-1364, 2003.

[24] M. I. Skolnik, "Introduction to Radar System," 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2002.