

적외선 영상에서 표적 추적을 위한 신호세기 기반 초기 유효게이트 설정 방법

양유경^{*,1)} · 김지은¹⁾ · 이부환¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제3기술연구본부

Setting an Initial Validation Gate based on Signal Intensity for Target Tracking in IR Image Sequences

Yu Kyung Yang^{*,1)} · Jieun Kim¹⁾ · Boohwan Lee¹⁾

¹⁾ The 3rd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 30 September 2013 / Revised 30 December 2013 / Accepted 17 January 2014)

ABSTRACT

This paper describes a method to set an intensity-based initial validation gate for tracking filter while preserves the ability of tracking a target with maximum speed. First, we collected real data set of signal versus distance of an airplane target. And at each data point, we computed maximum distance the target can move. And a function is modeled to expect the maximum moving pixels on the lateral direction based on the intensity of the detected target in IR image sequence. The initial prediction error covariance can be computed using this function to decide the size of the initial validation gate. The simulation results show the proposed method can set the appropriate initial validation gates to track the targets with the maximum speed.

Key Words : Initial Validation Gate, Tracking Filter, IR Image

1. 서론

칼만 필터를 기반으로 하는 일반적인 추적필터들은 유효게이트(Validation Gate)를 설정하고 그 안에서 추적중인 표적의 후보를 찾는다^{1,2)}. 추적 필터에 있어 초기 유효게이트 크기의 설정은 트랙 형성과 클러터 유입의 두 가지 상호배타적인 성능에 큰 영향을 미친다.

초기 유효게이트가 클수록 속도가 빠른 표적에 대한 트랙 형성이 가능하지만 다수의 클러터 유입에 따른 자료결합의 오류 가능성을 증가시킨다. 그러므로 유효게이트는 클러터 유입을 최소화 하면서 고기동 표적에 대한 효율적인 추적이 가능하도록 설정하는 것이 바람직하다.

적외선 영상 센서에서 배경과 표적의 신호세기 차는 검출기 출력전압의 차에 비례한다. 확장 표적(Extended Target)의 배경에 대한 표적의 검출기 출력 전압 차는 식 (1)과 같다³⁾.

* Corresponding author, E-mail: ykyang@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

$$\Delta V_E = G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_d(\lambda) \frac{\pi L(\lambda, \Delta T) A_d}{4F^2(1+M_o)^2} \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

여기서 G 는 시스템 이득, $R_d(\lambda)$ 는 검출기 응답도, $L(\lambda, \Delta T)$ 는 표적과 배경의 복사휘도 차이, A_d 는 검출기 면적, F 는 광학계 F-수, M_o 은 광학계 배율, $\tau_o(\lambda)$ 는 광학계 투과율, $\tau_a(\lambda)$ 는 대기 투과율을 의미한다. 식 (1)에 의해 확장 표적의 신호세기는 표적과 배경 간 복사 휘도의 차와 대기 투과에 의하여 결정되며, 대기투과는 거리에 지수적으로 반비례하는 성질을 가진다.

그리고 점 표적(Point Target)의 검출기 출력신호는 식 (2)와 같다^[3].

$$\Delta V_P = G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_d(\lambda) \frac{I(\lambda, \Delta T) A_o}{R_1^2} PVF \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

여기서 $I(\lambda, \Delta T)$ 는 배경에 대한 표적의 상대 복사세기, A_o 는 광학계 개구 면적, R_1 은 센서와 표적간 거리, PVF(Point Visibility Factor)는 결상된 점 표적의 에너지가 한 개의 검출소자에 포함되는 양을 의미한다. 식 (2)에 의해 점 표적의 신호세기는 표적의 상대복사 세기, 대기투과 및 표적과 센서 간의 거리에 의해 결정된다. 따라서 점표적의 신호세기는 거리제곱에 의한 감쇄와 거리에 대해 지수적으로 반비례하는 감쇄효과가 동시에 나타난다. 이와 같이 확장 표적이나 점 표적 모두 검출기의 출력신호는 거리의 함수로 표현할 수 있다. 그러므로 적외선 영상에서 획득된 대상 표적의 신호세기를 통계적으로 관찰하면 센서와 표적 간 대략적인 거리를 추정하는 것이 가능하다.

거리별 표적의 신호를 추정 할 수 있는 방법은 3가지로 구분할 수 있다. 먼저 사전에 표적에 대한 실제 데이터의 계측이 가능한 경우에는 다양한 환경 조건에서 실제 데이터를 획득하여 적용할 수 있다. 두 번째는 대체 표적을 이용하는 방법으로 목표 표적에 대한 실제 계측은 불가하지만 목표표적과 대체표적의 복사량을 측정 또는 추정할 수 있으면 식 (1), (2)에 의해 대체 표적의 신호를 목표 표적으로 환산할 수 있다. 마지막으로 목표 표적의 복사량은 알지만 대체

표적도 활용이 불가능한 경우에는 센서시스템 파라미터들 및 대기투과 추정을 통하여 식 (1) 및 식 (2)을 이용하여 출력 전압을 추정하고 이를 ADC(Analog to Digital Convert) 식을 적용하여 영상 신호를 추정할 수 있다^[4]. 센서시스템 파라미터들은 설계값 혹은 측정값을 적용할 수 있으며 거리별 대기투과는 MODTRAN과 같은 툴을 활용할 수 있다. 데이터에 대한 신뢰도는 첫 번째 방법이 가장 높으며 마지막 방법이 가장 낮다.

본 논문에서는 실제 획득된 항공 표적 영상의 거리별 신호세기 및 프레임간 최대 픽셀 이동량을 관찰하여 신호세기에 따른 최대 이동량을 예측하는 함수를 모델링하였다. 그리고 이를 이용하여 추적 필터의 초기 유효게이트의 크기를 설정하는 방안을 제시하였다. 이것을 위해 영상센서의 프레임 율 및 목표 표적의 최대 이동속도는 사전에 알고 있다고 가정한다. 본 논문에서 사용한 표적을 실제 표적으로 가정하고 적용하였지만 이를 대체 표적으로 가정하고 다른 복사량을 갖는 표적의 신호를 추정하여 적용하는 것도 가능하다.

2. 신호세기 기반 초기 유효게이트 설정

추적 필터를 설계할 경우 첫 프레임의 탐지 결과로부터 다음 프레임에서의 표적 예측 위치는 표적이 어느 방향으로 얼마나 이동할 지 알 수 없기 때문에, 일반적으로 첫 번째 탐지된 위치로 한다. 이 때 두 번째 프레임의 유효게이트 안에서 표적이 탐지되면 트랙이 형성되며 유효게이트 밖으로 벗어나면 트랙이 형성되지 못한다. 따라서 초기 유효게이트의 크기는 추적하고자 하는 최대 이동 표적의 속도를 고려하여 설정하여야 한다.

표적의 최대 이동속도를 추정하기 위하여 표적의 GPS 위치 정보와 함께 야외에서 획득된 실 IR 영상에서 표적의 신호를 관찰하였다. 표적은 훈련지원기로 평균 진입속도는 104m/s 이다. Fig. 1은 서로 다른 계열의 2일 동안 획득된 총 5회의 진입 표적에 대한 데이터로 센서와 표적간 거리에 따른 영상 신호세기의 그래프이다. 신호세기는 DL-DBRF 공간필터^[5]를 이용하여 표적신호에서 배경신호가 추정되어 제거된 값이다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 신호세기는 거리가 증가함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다.

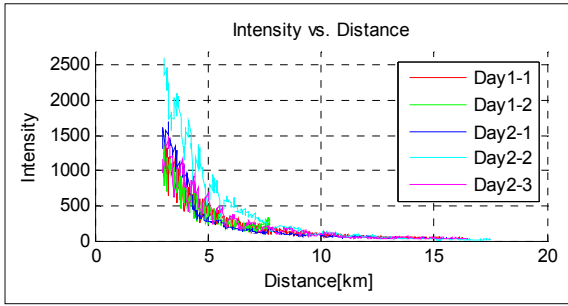


Fig. 1. 거리에 따른 신호세기

그리고, 영상 센서의 순간시계(IFOV)와 프레임 율, 추적하고자 하는 표적의 최대 속도가 결정되면, 한 프레임 동안 거리에 따른 최대 픽셀 이동량을 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$d = 340M_h / fr \tag{3}$$

$$\Delta x = \text{atan}(d/R) / IFOV \tag{4}$$

여기서 M_h 는 마하 수로 표적의 최대 이동속도, fr 는 센서의 프레임율, d 는 표적이 한프레임 동안 이동할 수 있는 최대 이동 거리로 단위는 [m]이다. R 은 센서로부터 표적까지의 거리로 단위는 [m]이며, $IFOV$ 는 센서의 순간시계로 단위는 [rad]이다. Δx 는 영상에서의 이동량으로 환산된 값으로 단위는 [pixel]이다. Fig. 2는 순간시계가 0.3mrad이고 프레임율이 4Hz인 센서에 대해 표적이 센서광축과 수직인 방향으로 Mach-2의 속도로 이동한다고 가정하였을 때, 거리에 따른 표적의 이동 픽셀 수를 보여주는 그래프이다.

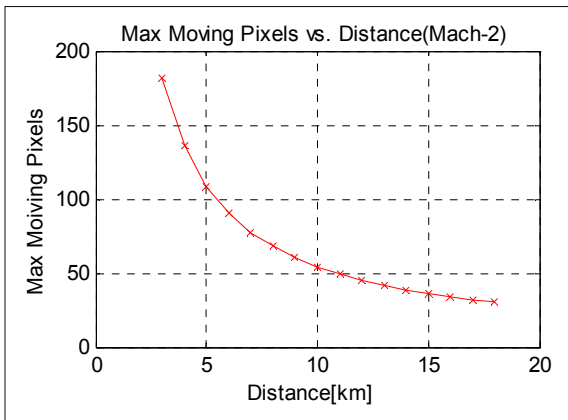


Fig. 2. 거리에 따른 최대 픽셀 이동량

동일한 방법으로 Fig. 1에서 각 데이터의 거리값에 해당하는 최대 픽셀 이동량을 계산할 수 있다. 이를 이용하여 Fig. 3에 나타난 바와 같이 신호세기에 대한 최대 픽셀 이동량의 그래프를 얻을 수 있다. 탐지된 표적의 신호세기로부터 표적의 최대 이동량을 예측하기 위해 Fig. 4와 같이 동일 신호세기에서 큰 이동량을 갖는 데이터 샘플들을 선정한 후 이것을 2개의 2차 방정식으로 모델링 하였다. 또한 마진을 고려하여 1차 항과 상수항의 계수값을 조정하여 식 (5), (6)의 2차 방정식 $f_1(I)$ 와 $f_2(I)$ 를 구하였다. 최종적으로 신호세기에 기반한 표적의 최대 이동량 예측 함수를 식 (7)과 같이 정의하였다. 따라서 표적의 신호가 탐지되면 $f(I)$ 를 이용하여 최대 이동량을 예측할 수 있다.

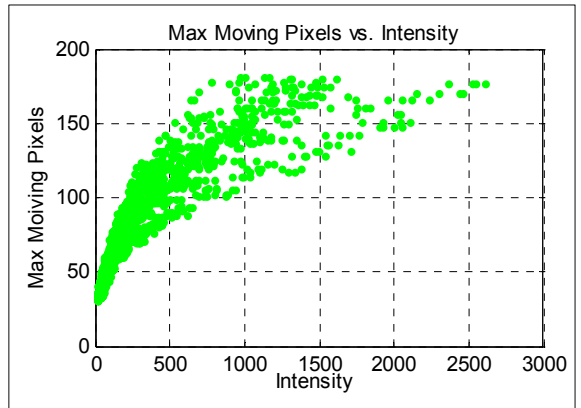


Fig. 3. 신호세기에 대한 최대 픽셀 이동량

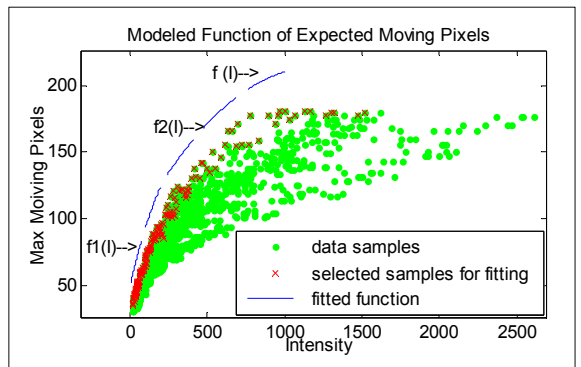


Fig. 4. 신호세기에 대한 최대 이동량 예측 함수

$$f_1(I) = -0.0007I^2 + 0.5072I + 39.70 \tag{5}$$

$$f_2(I) = -0.0001I^2 + 0.2097I + 57.25 \tag{6}$$

$$f(I) = \begin{cases} f_1(I) & I \leq 150 \\ f_2(I) & I > 250 \\ w_1(I)f_1(I) + w_2(I)f_2(I) & 150 < I \leq 250 \end{cases} \quad (7)$$

여기서 I 는 탐지된 표적의 신호세기에서 배경신호를 추정하여 제거한 값이며, $w_1(I)$ 와 $w_2(I)$ 는 중첩구간에서 두 함수를 부드럽게 연결하기 위한 가중치 함수로서 양선형 보간(Bi-Linear Interpolation) 기법으로 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$w_1(I) = -0.01I + 2.5 \quad (8)$$

$$w_2(I) = 1 - w_1(I) \quad (9)$$

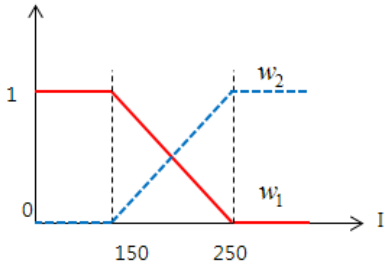


Fig. 5. 양선형 보간법에 의한 가중치 계산

표적이 구름에 가리거나 기상조건이 좋지 않은 경우를 고려한다면 목표로 하는 최소 대기투과율 조건과 실제 데이터가 획득된 상황의 대기투과율의 비를 계산하고 이 비만큼 신호세기를 감소시켜 모델링할 수 있다.

칼만 필터에서 유효게이트를 정의하는 과정은 다음과 같다. 먼저 예측오차 공분산인 \bar{P} 와 측정 오차 공분산 R 의 합으로 잔류 공분산 S 를 식 (10)와 같이 정의한다. 여기서 H 는 표적 상태 벡터 \bar{x}_k 를 측정치 벡터 z_k 와 동일한 차원으로 변환하여 연산이 가능하도록 해주는 변환 행렬이다. 다음으로 예측위치 \bar{x}_k 와 측정치 z_k 와의 거리 $[z_k - H\bar{x}_k]$ 를 S 로 정규화 한 거리 $D(z_k)$ 를 식 (11)와 같이 정의한 후 식 (12)과 같이 문턱값 γ 로 규제한 영역으로 유효게이트를 정의할 수 있다^[2].

$$S = H\bar{P}H^T + R \quad (10)$$

$$D(z_k) = [z_k - H\bar{x}_k]^T S^{-1} [z_k - H\bar{x}_k] \quad (11)$$

$$R_k^\gamma = \{z_k : D(z_k) \leq \gamma\} \quad (12)$$

즉, 유효게이트의 크기는 예측한 값이 얼마나 신뢰할만한가를 의미하는 예측오차공분산 \bar{P} 과 측정치가 얼마나 신뢰할만한가를 의미하는 측정오차 공분산 R , 그리고 유효게이트의 크기 문턱값인 γ 에 의하여 결정된다.

칼만 필터에서 예측 위치와 측정치간 거리 $[z_k - H\bar{x}_k]$ 는 가우시안 분포로 가정되므로 $D(z_k)$ 은 카이제곱 분포를 따른다. γ 는 이러한 확률 분포를 고려하여 상수값으로 설정할 수 있다. 만약 칼만 필터의 유효게이트를 3-sigma(99.7% 표적 포함 확률)의 크기로 설정하고자 한다면 유효게이트 크기는 $\gamma = 3^2$ 이 된다.

적외선 영상 센서의 경우 측정 오차 공분산은 순간시계, 시선 안정화 오차, 탐지 알고리즘의 성능을 고려하여 설정할 수 있으며 일반적인 고해상도 센서 및 정밀 안정화 장치를 적용하는 경우 예측 오차 공분산보다 상대적으로 매우 작다.

예측 오차 공분산은 다음 프레임에서 표적 위치를 예측한 값의 확률적 불확도(Uncertainty)를 의미하는 값이다. 두 번째 프레임에서의 예측 위치를 첫 번째 프레임의 탐지 위치로 하면 예측오차는 두 프레임 간 탐지 위치의 차가 된다. 이것은 한 프레임동안 표적의 이동거리와 같다. 즉, 예측 오차의 공분산값을 최대 이동거리를 기반으로 설정하여야 하며 이를 위하여 식 (14)과 같이 $f(I)$ 로 추정된 최대 이동량을 $\sqrt{\gamma}$ 으로 나눈값의 제곱을 \bar{P}_0 의 x, y 공분산 값으로 설정한다.

$$\bar{P}_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{Px}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{Py}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{Pxx}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{Pyy}^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\sigma_{Px}^2 = (f(I)/\sqrt{\gamma})^2, \sigma_{Py}^2 = (f(I)/\sqrt{\gamma})^2 \quad (14)$$

예를 들어 $\sqrt{\gamma} = 3$ (3-sigma 크기의 유효게이트)이고 탐지된 신호세기로부터 추정된 최대 이동량이 150 픽셀이라면 초기 예측오차 공분산의 크기를 $\sigma_{Px}^2 =$

$\sigma_{F_y}^2 = 50^2$ 로 설정할 수 있다. 이것은 실제 50픽셀의 3배인 +/-150 픽셀 범위 안에 표적이 99.7%로 탐지될 것을 가정하고 유효게이트를 설계한 것과 같다. 속도 성분의 공분산 값은 다양한 진입 표적의 영상으로부터 표적 운동 모델의 속도 예측 오차량 분석을 통하여 설정하였다.

3. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 합성 표적 영상과 실패적 영상에 대해 수행하였다. 입력 영상에 대한 표적 탐지 알고리즘은 DL-DBRF필터^[5]를 적용하였고 추적 알고리즘은 표준 칼만 필터^[2]를 적용하였다. 칼만 필터에서 표적의 상태변수와 측정치는 식 (15)과 같이 정의하였다.

$$\mathbf{x}_k = [x, y, v_x, v_y]^T, \quad \mathbf{z}_k = [x, y]^T \quad (15)$$

여기서 x 와 y 는 영상에서 표적의 위치 좌표로 단위는 [pixel]이며, v_x 와 v_y 는 각각 표적의 x 축 속도와 y 축 속도로 단위는 [pixel/frame]이다. 표적의 운동 모델은 등속도 운동을 적용하였으며, 표적의 속도는 첫 프레임과 2번째 프레임의 좌표 차이로 설정하도록 하였다.

3.1 합성 표적 영상 시뮬레이션

3km~17km 거리 범위에서 2km 간격으로 표적과 센서간 거리를 8개 선정한 후 선정된 거리에 해당하는 신호세기를 획득된 데이터 세트에서 무작위로 선택하였다. 이 때 이동량 예측 함수의 모델링에 사용한 데이터와 중복되지 않은 데이터를 사용하였다. 선택한 각 표적의 신호세기를 배경영상에 3x3 픽셀 크기의 표적으로 Fig. 6와 같이 합성하고, 이를 각 거리에서 Mach-2의 속도에 대응하는 픽셀 이동량으로 오른쪽 방향으로 움직였을 때 연속한 프레임에서 트랙이 유지되었는지 확인하였다. Fig. 6는 첫 프레임의 영상으로 신호세기에 비례하는 초기 유효게이트가 설정된 것을 알 수 있다. Fig. 7~8에 나타난 바와 같이 연속된 프레임의 영상에서 트랙이 손실되거나 뒤바뀐 없이 유지되는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 초기 추적이 성공하여 칼만필터의 예측오차가 수렴상태에로 진입하면서 유효게이트의 크기가 안정적인 상태로 진입한

것을 보여준다^[11]. Fig. 7~8에서 유효게이트의 위치가 표적 중심이 아닌 이유는 다음 프레임으로의 예측 위치를 중심으로 유효게이트가 설정되기 때문이다.

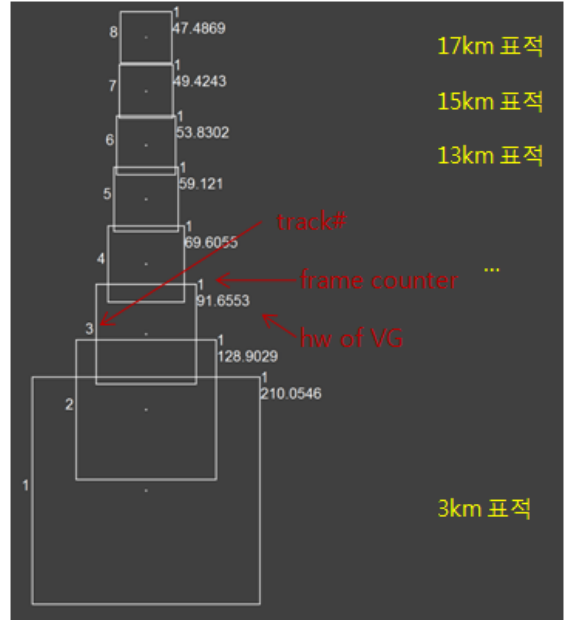


Fig. 6. 신호세기별 유효게이트 설정 (1st 프레임)

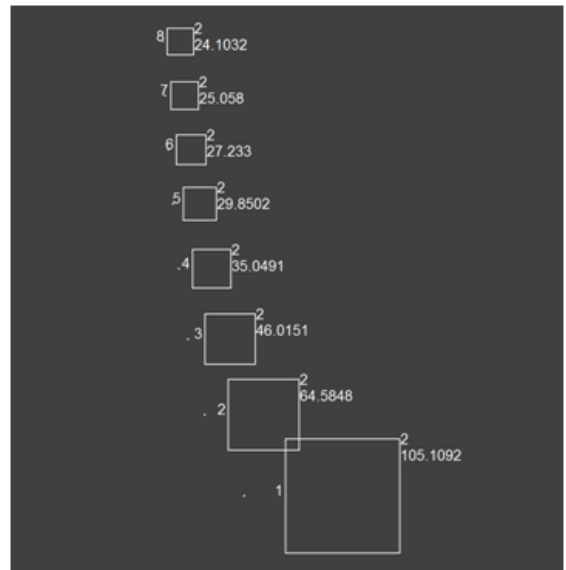


Fig. 7. 신호세기별 유효게이트 설정 (2nd 프레임)

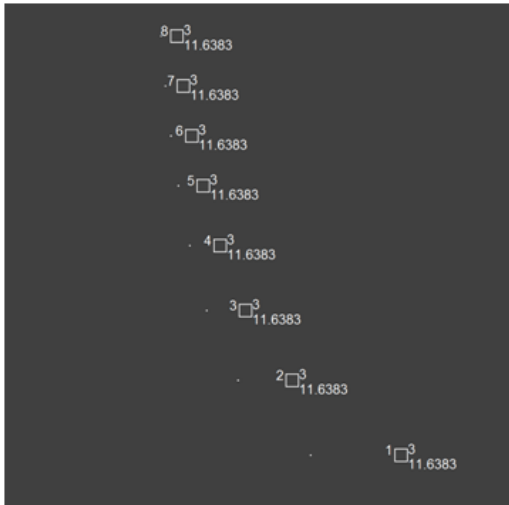


Fig. 8. 신호세기별 유효게이트 설정 (3rd 프레임)

3.2 실패적 영상 시뮬레이션

Fig. 9에 나타난 바와 같이 수평 이동하는 실제 표적의 영상에 대하여 목표 속도인 Mach-2를 모의하기 위하여 250~530프레임 구간동안 10프레임 단위로 샘플링하여 알고리즘을 적용하였다. 이 때 매 순간 표적이 처음 등장하도록 하기 위하여 매 3프레임 카운트마다 강제로 트랙을 종료시키고 다음 프레임에서 새로운 트랙이 생성되도록 하였다. Fig. 10은 4번 트랙의 첫 번째와 두 번째 프레임카운트의 상황을 보여준다. 첫 번째 프레임카운트에서 신호세기에 비례하는 유효게이트가 설정되고 다음 프레임에서 여전히 트랙이 유지된 것을 알 수 있다. Fig. 11은 250~530프레임 동안 생성된 모든 트랙의 번호를 표시한 것으로 모든 트랙이 2프레임 카운트 동안 유지되었으므로 트랙이 형성되는 매 순간마다 초기 유효게이트가 적절히 설정되었다는 것을 알 수 있다.

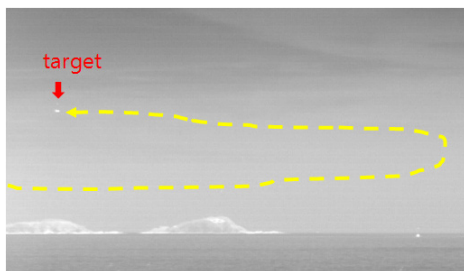


Fig. 9. 수평 이동 표적 이동 경로

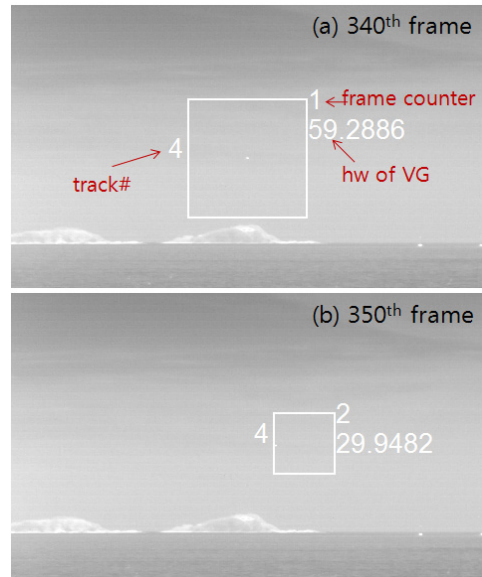


Fig. 10. 수평이동표적의 초기유효게이트 설정

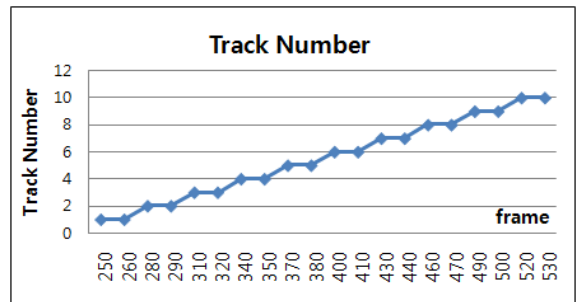


Fig. 11. 프레임별 트랙 번호

4. 결론

본 논문은 수집된 거리별 항공 표적 신호 데이터로부터 신호세기에 비례하는 초기 유효게이트의 크기를 설정함으로써 목표로 하는 최대 이동속도의 표적에 대한 추적은 가능하면서 동시에 유효게이트의 크기를 최소화 하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 거리에 따른 신호세기의 분포로부터 신호세기별 최대 이동량을 예측하는 함수를 모델링하였다. 그리고 모델링된 함수를 이용하여 초기 예측오차 공분산의 값을 계산하여 유효게이트의 크기를 설정하였다. 합성 표적 시뮬레이션 결과로부터 각 거리별 유효게이트의 크기가 적절히 설정되는 것을 확인하였으며 실제 수평 이

동하는 표적을 최고 속도로 이동하도록 모의 하였을 때 매 순간 초기 유효게이트로 트랙 형성이 가능함을 확인하였다. 향후 다양한 환경조건에서 획득된 데이터를 이용하여 최대 이동량 예측함수를 모델링하면 함수의 신뢰성을 향상 시킬 수 있을 것으로 판단된다. 본 논문은 항공 표적을 대상으로 하였지만, 신호 및 속도의 분포가 한정적인 표적을 대상으로 하는 경우에는 해상 및 지상배경의 표적에도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] Bar-Shalom, Y. and Fortmann, T. E., Tracking and Data Association, Academic Press, pp. 56-122, 1998.
- [2] LI, X. R. and Bar-Shalom, Y., "Tracking in Clutter with Nearest Neighbor Filters : Analysis and Performance," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 32, No. 3, 1996.
- [3] Gerald C. Holst, Electro-Optical Imaging System Performance, SPIE, 2008.
- [4] Sungho K, Yukyung. Y, Byungin C, "Realistic Infrared Sequence Generation by Physics-based Infrared Target Modeling for Infrared Search and Track," Optical Engineering, Vol. 49(11), No. 11, 2010.
- [5] Sungho K, Yukyung. Y, Joohyoung L, "Horizontal Small Target Detection with Cooperative Background Estimation and Removal Filters," ICASSP 2011, IEEE International Conference on. pp. 1761-1764, 2011.