

DTW와 Kalman Filter를 결합한 비행표적의 광학추적 방법

The Optical Tracking Method of Flight Target using Kalman Filter with DTW

장석원

국방과학연구소

Sukwon Jang

The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Chungcheongnam-do, 32143, Korea,

[요 약]

EOTS(electro-optical tracking system)는 유도무기의 성능 평가를 위해 유도무기를 추적하여 영상을 획득하는데 활용되고 있다. 유도무기에 대한 추적을 잃어버렸을 경우 유도무기가 매우 빠르게 비행하기 때문에 운용자가 이를 다시 포착하는 것은 거의 불가능하다. 레이더나 텔레메트리 데이터를 활용하여 재 포착 하는 방법이 활용되고 있으나 데이터를 실시간으로 수신할 수 있는 통신망의 설치가 수반되어야하기 때문에 장소에 대한 제약이 따른다. 하지만 유도무기 비행시험 수행 시 계산되는 예상 궤적은 실시간으로 수신할 필요 없이 저장해두었다가 사용할 수 있기 때문에 통신망 설비와 관계없이 활용이 가능하다. 본 논문에서는 미리 알고 있는 비행체의 예상 궤적을 활용하여 비행체를 잃어버렸을 시 비행체의 위치를 예상하는 방법을 제안한다. DTW (dynamic time warping)를 통해 예상궤적과 추적궤적을 비교하여 비행체의 각속도를 추정하고 이를 Kalman Filter의 보정단계에서 관측값으로 활용하여 비행체의 다음 상태를 예측한다. 제안한 방법의 타당성을 실제 비행체 궤적에 적용하여 검증하였다.

[Abstract]

EOTS(Electro-Optical Tracking System) is utilized in acquiring visual information to assess a guided missile's performance. As the missile travels so fast, it is almost impossible for operator to re-capture the lost target. The RADAR or telemetry data are used to re-capture the lost target however facilities to receive real time data is required, which constrains selection of tracking site. Unlike aforementioned data, pre-calculated nominal trajectory can be used without communication facility. This paper proposes a method to predict lost target's state by employing nominal trajectory. Firstly, observed trajectory and nominal trajectory are compared using DTW and current target's state is predicted. The predicted state is used as observation in Kalman filter's correction phase to predict target's next state. The plausibility of the proposed method is verified by applying on actual missile trajectory.

Key word : Dynamic time warping, Electro-optical tracking system, Kalman Filter, Object tracking, Occlusion.

<https://doi.org/10.12673/jant.2021.25.3.217>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 21 May; Revised 25 May 2021

Accepted (Publication) 28 June (30 June 2021)

*Corresponding Author; Sukwon Jang

Tel: +82-041-671-2692

E-mail: sukwonjang@add.re.kr

I. 서론

유도무기 탐지 알고리즘은 유도무기의 시험평가에서 유도무기의 발사 영상을 획득하는데 중요한 역할을 수행한다. 영상 탐지 알고리즘은 영상에서 표적의 존재 여부와 표적의 위치를 추출하는 알고리즘으로 HOG, SIFT부터 YOLO, R-CNN 등의 최신 딥러닝 기반의 탐지 알고리즘이 개발되어 여러 분야에서 활용되고 있다 [1]-[4]. 하지만 표적이 구름 또는 강한 태양 빛에 의해 표적이 가려지게 되면 탐지를 할 수 없는 상황이 발생한다. 표적이 가려졌을 때는 영상에서 표적 자체가 사라지기 때문에 영상 탐지 알고리즘의 성능을 높이는 것으로 문제를 해결하는데 한계가 존재한다. 이를 해결하기 위해 표적이 가려졌을 때 Kalman Filter를 활용하여 표적의 위치를 예상하는 기법들이 연구되어 왔다 [5]. 하지만 이 방법들은 표적의 과거 위치와 속도를 이용하여 현 시점에서의 표적의 움직임을 예상하기 때문에 과거 운동 특성과 다른 특성을 보일 경우 예상한 값이 실제 값을 크게 벗어날 확률이 높다.

유도무기 비행시험의 경우, 레이더의 추적 데이터 또는 유도무기에 탑재된 텔레메트리로부터 수신한 데이터를 활용하여 잃어버린 유도무기를 다시 재 포착 할 수 있다. 하지만 이를 위해선 레이더, 텔레메트리 데이터를 실시간으로 수신할 수 있는 통신 설비가 필요하기 때문에 공간적인 제약이 따른다. 이와 다르게 비행시험 이전에 계산하는 유도무기의 예상 궤적은 장소에 구애받지 않고 활용이 가능하다. 이를 이용하면 유도무기의 운동 특성을 반영하여 유도무기에 대한 추적 성능을 향상시킬 수 있다. 이를 위해선 유도무기를 추적하면서 얻는 궤적과 예상궤적을 정렬해야 하는데 DTW 알고리즘은 주기가 일정하지 않은 두 시계열 데이터를 정렬하는 방법으로 유사한 형태의 여러 궤적을 정렬하는 방법으로 사용되어 왔다 [6].

본 논문에서는 DTW와 Kalman Filter를 결합하여 표적의 궤적정보를 미리 알고 있을 경우 DTW를 통해 현재 표적의 속도를 추정하고 Kalman Filter를 활용해 표적의 다음 위치를 예측하는 방법을 제안한다. 제안한 방법은 예상궤적으로부터 추정된 속도정보를 Kalman Filter의 보정과정에서 상태변수를 보정하는데 활용하여 표적의 다음 상태를 예측한다. 2장에서 제안하는 알고리즘을 소개하고 3장에서 제안한 방법을 활용하여 실제 비행체를 추적한 결과를 제시한다. 그리고 4장에서 본 논문의 결론을 제시한다.

II. 알고리즘

광학추적장비는 카메라로부터 받아들인 영상에서 표적을 탐지하고 고각과 방위각을 조절하여 탐지한 표적을 추적하는 장비이다. 영상 탐지알고리즘을 통해 영상에서 표적의 위치를 구하고 제어 알고리즘이 표적의 위치와 중앙 점과의 차이를 활용해 표적을 지향하도록 광학추적장비를 제어한다.

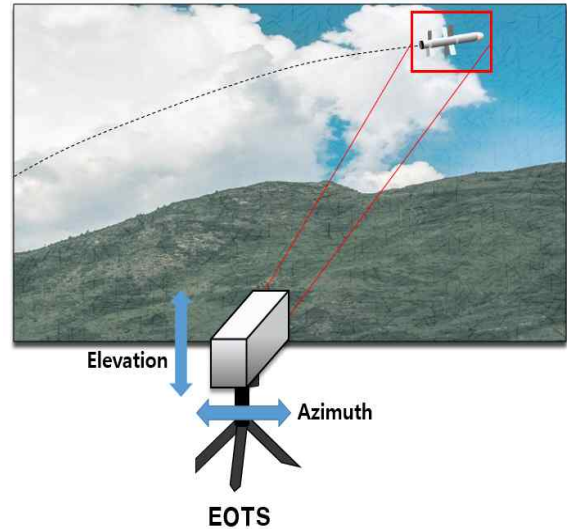


그림 1. 유도무기 광학 추적 개념도
Fig. 1. Concept of missile optical tracking

따라서 영상 탐지 알고리즘은 화면 내 표적의 존재 여부와 화면상에서의 위치를 추출할 수 있어야 한다. 또한 표적이 구름에 가려지거나 태양빛에 의해 탐지가 될 수 없을 때, 이러한 상황을 감지하고 표적의 위치를 예측할 수 있어야 한다.

2-1 알고리즘 구성

제안된 알고리즘은 3과 같다. 크게 두 단계로 DTW를 통해 예상궤적 상에서 현재의 시점을 구하는 단계와 방위각, 고각, 방위각 각속도, 고각 각속도 4개의 상태변수를 갖는 Kalman Filter를 통해 표적의 다음 상태를 예측하는 단계로 나뉜다. 먼저 영상 추적 알고리즘이 영상 내에서 표적의 위치를 구한다. 이 표적의 위치 $\theta_{az}^L, \theta_{el}^L$ 와 PAN/TILT의 지향정보 $\theta_{az}^P, \theta_{el}^P$ 를 합하여 실제 공간상에서의 방위각, 고각 $\theta_{az}^G, \theta_{el}^G$ 를 얻는다. 이 방위각, 고각을 연속된 영상으로부터 계산하여 구성하면 탐지한 표적의 궤적을 얻을 수 있다. 표적의 궤적과 미리 계산된 궤적을 DTW를 통해 정렬하여, 예상 궤적 상에서 현재 표적의 위치가 어느 지점에 있는지 추정한다. 표적이 탐지 되지 않은 구간에서는 Kalman Filter의 예상 값들을 활용한다. 그림5와 같이 추적 궤적과 Kalman Filter의 방위각 고각 예상 값들을 결합하여 생성한 궤적을 DTW를 활용하여 예상 궤적과 정렬한다. DTW를 통해 추정된 예상궤적 상에서의 현재시점에서 방위각, 고각 데이터의 시간에 대한 기울기를 구한다. 이 기울기를 예상 궤적으로부터 추정한 방위각, 고각 각속도로 정하고 추정 각속도를 Kalman Filter의 보정 값으로 활용한다. Kalman Filter의 보정 단계에서 상태변수 중 방위각, 고각의 각속도 성분들을 위에서 구한 추정 각속도를 활용해 보정한다. 그 후 Kalman Filter의 예측 단계를 통해 표적의 다음 상태를 예측한다.

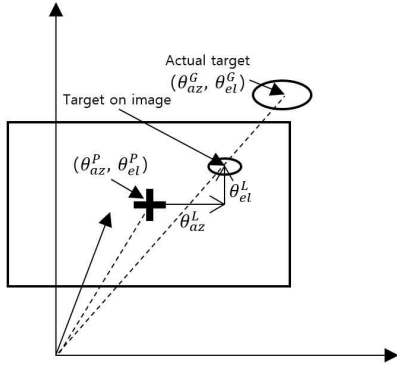


그림 2. 고각 방위각 개념
Fig. 2. Concept of azimuth, elevation

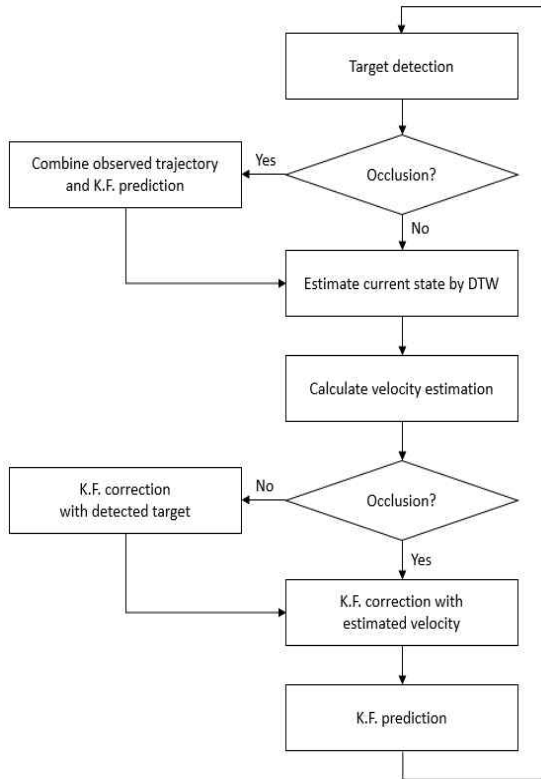


그림 3. 비행체 광학 추적 개념도
Fig. 3. Schematic of missile optical tracking

2-2 DTW를 활용한 현재 위치 및 각속도 추정

이 과정은 비행체를 추적하여 획득한 표적의 궤적과 미리 계산된 예측 궤적을 DTW를 사용하여 매칭 시키고 현재 비행체의 상태를 예측 궤적 상에서 어느 지점인지 추정하는 과정이다. DTW를 사용하면 주기가 다른 두 배열 데이터의 매칭도 가능하다. 예를 들면 표적의 궤적 데이터는 30ms의 주기를 갖고 측정 데이터는 50ms의 주기를 가져도 매칭이 가능하다. 그림 4와 같이 하나의 데이터에 대상 배열의 여러 데이터를 매칭 시키는 것이 가능하기 때문이다.

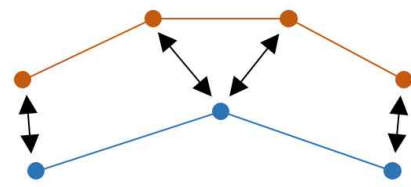


그림 4. 다중 매칭
Fig. 4. Multiple matching in DTW

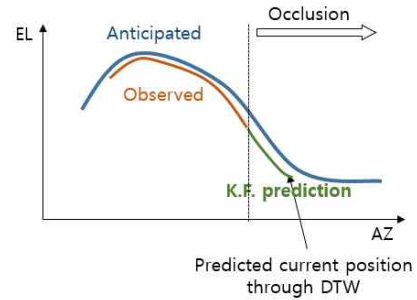


그림 5. 예상궤적과 추적궤적의 매칭
Fig. 5. Matching nominal trajectory and track

두 궤적을 매칭 시키게 되면 그림 5와 같이 현재 표적의 상태가 궤적 데이터 상에서 어느 시점에 해당되는지를 파악할 수 있고, 이 시점에서의 시간에 대한 방위각과 고각의 변화량을 계산하여 추정 각속도를 구할 수 있다. 본 논문에서 사용한 DTW의 cost function은 식 (1)과 같다. 방위각, 고각의 유클리디언 거리 값과 시간 차이의 절대 값의 합을 cost function으로 갖는다. 시간의 흐름이 고려되지 않았을 때 하나의 데이터에 여러 데이터가 연속적으로 매칭되는 문제점을 해결하기 위해 시간에 관련된 항을 추가하였다. α 는 경험적으로 구한 0.001의 값을 사용하였다. 표적이 탐지되지 않을 때는 그림 5와 같이 표적을 잃어버리기 전 획득한 표적의 궤적과 표적을 잃어버린 후에 예상한 Kalman Filter의 예상 값들을 결합한 궤적과 예상궤적을 DTW를 통해 매칭 시킨다.

$$c(i, j) = \sqrt{(\theta_{az} - \hat{\theta}_{az})^2 + (\theta_{el} - \hat{\theta}_{el})^2} + \alpha \times abs(|t - \hat{t}|) \quad (1)$$

2-3 Kalman Filter를 활용한 다음 표적 위치 예측

Kalman Filter의 모델의 그림 6과 같다.

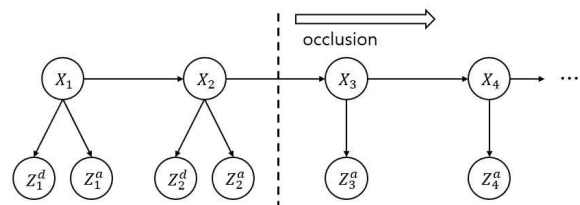


그림 6. 칼만필터 모델
Fig. 6. Kalman filter model

그림 6의 모델에서 X_i, Z_i^l, Z_i^a 는 각각 표적의 상태변수, 표적을 탐지해서 얻은 고각 및 방위각 정보, 예상궤적으로부터 추정된 방위각, 고각 각속도를 의미한다. 표적이 방위각, 고각, 방위각 각속도, 고각 각속도의 4개의 상태변수를 갖는다고 가정한다. 상태방정식은 식(2)과 같은 형태를 갖는다. $\theta_i^{az}, \theta_i^{el}, \dot{\theta}_i^{az}, \dot{\theta}_i^{el}$ 은 표적의 상태변수로 각각 방위각, 고각, 방위각 각속도, 고각 각속도를 나타내고 W_k 은 시스템 노이즈로 가우시안 노이즈로 가정한다.

$$\begin{bmatrix} \theta_{i+1}^{az} \\ \theta_{i+1}^{el} \\ \dot{\theta}_{i+1}^{az} \\ \dot{\theta}_{i+1}^{el} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & dt & 0 \\ 0 & 1 & 0 & dt \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_i^{az} \\ \theta_i^{el} \\ \dot{\theta}_i^{az} \\ \dot{\theta}_i^{el} \end{bmatrix} + W_k \quad (2)$$

그림6 모델에서 두 종류의 관측 값을 통해 상태를 보정하는데 그 중에서 Z_i^a 는 탐지한 표적의 방위각(z_i^{az}), 고각(z_i^{el}) 정보이며 표적이 탐지되었을 때만 상태변수의 고각, 방위각을 보정한다. 식(3)과 같은 식을 통해 Z_i^a 는 상태변수를 보정한다. V_k 는 방위각, 고각에 대한 측정 노이즈를 나타내며 가우시안 노이즈로 가정한다. 이 과정을 통해서 궤적데이터의 정보를 반영하여 표적의 위치를 예측할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} z_i^{az} \\ z_i^{el} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_i^{az} \\ \theta_i^{el} \\ \dot{\theta}_i^{az} \\ \dot{\theta}_i^{el} \end{bmatrix} + V_k \quad (3)$$

Z_i^p 는 궤적정보로부터 추정된 방위각 고각의 각속도($\dot{z}_i^{az}, \dot{z}_i^{el}$) 정보로 표적이 탐지되었을 때뿐만 아니라 표적이 탐지되지 않았을 때에도 상태변수의 방위각, 고각 각속도를 보정한다. 이 과정을 통해서 식(4)와 같은 식을 통해 Z_i^p 는 상태변수를 보정한다. \dot{V}_k 는 방위각, 고각에 대한 측정 노이즈를 나타내며 가우시안 노이즈로 가정한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_i^{az} \\ \dot{z}_i^{el} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_i^{az} \\ \theta_i^{el} \\ \dot{\theta}_i^{az} \\ \dot{\theta}_i^{el} \end{bmatrix} + \dot{V}_k \quad (4)$$

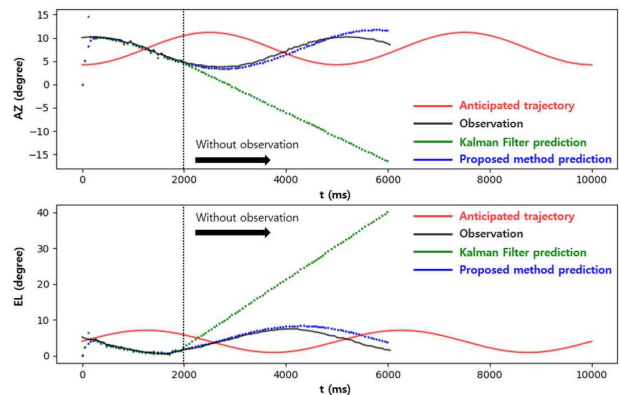


그림 7. 시뮬레이션 결과
Fig. 7. Simulation result

본 논문에서 제안한 방식은 DTW에 의해 예측된 각속도 정보와 현재 상태변수의 각속도 정보를 함께 이용하여 다음 상태를 예측하기 때문에 표적의 움직임에 조금 더 가깝게 표적의 다음 상태를 예측할 수 있다. 뿐만 아니라 DTW를 통해 추정된 각도정보가 경향을 벗어나는 아웃라이어를 포함하거나 실제 궤적에 비해 큰 차이를 보이는 상황에 강인한 결과를 보여 줄 수 있다.

III. 결 과

3-1 시뮬레이션

제안된 알고리즘을 실제 비행체에 적용해보기 앞서 대형 화면에 원 운동하는 물체를 시현하여 이를 추적하여 얻은 궤적을 활용해 시뮬레이션을 수행하였다. 추적하여 얻은 궤적을 삼각함수로 근사하여 예상궤적 데이터를 획득하였다. 그 후 새롭게 표적을 추적하여 얻은 궤적과 예상 궤적을 활용하여 알고리즘을 테스트 하였다. 예상궤적과 추적궤적은 추적하기 시작한 시점이 다르기 때문에 위상차가 발생하는데 이는 실제 비행체 추적 시 언제 추적을 시작할지 모르기 때문에 실제 상황과 유사하다. 일반적으로 유도무기의 비행시험을 계획할 때 비행체가 60% 이상의 각속도를 갖는 경우가 거의 없기 때문에 60%의 각속도로 원 운동하는 물체로 시뮬레이션을 수행하였다. 2초 이후에 표적을 잃어버렸다고 가정하여 궤적정보를 활용한 예측만 수행하였다. 그림7같이 예상궤적과 추적궤적의 위상이 차이가 남에도 불구하고 DTW를 통해 정렬한 결과로부터 예측을 수행하였기 때문에 예상궤적과 비슷한 형태로 추적이 되었으며 AZ와 EL 각각 1.87°와 0.94°의 평균 오차를 보였다.

3-2 실험 구성

실제 비행체 추적을 위한 실험 구성은 그림8과 같다. 고각과

방위각 회전이 가능한 PAN/TILT에 비행체 추적을 위한 IR camera를 장착하여 실제 비행체를 추적하였다. 700 m의 거리에서 180 m/s의 속도로 운동하는 비행체를 추적하였고 해당 조건에서 예상궤적의 최대 각속도는 11.5 %/s 이다. 추적 카메라가 컨트롤러에 영상을 전송하면 컨트롤러는 영상 내에서 표적을 탐지한다. PAN/TILT의 지향 데이터와 탐지 결과를 결합하여 표적의 고각, 방위각 궤적을 생성하고 본 논문에서 제안한 알고리즘을 통해 다음상태를 예측하여 PAN/TILT가 움직여야할 방위각/고각 정보를 PAN/TILT로 전송한다. 20ms 주기로 계산된 예상궤적을 사용하였고 실제 비행체의 탐지 궤적은 20~30ms의 다양한 간격으로 측정 되었다.

3-3 표적 추적 데이터에 대한 적용 결과

그림9는 예상 궤적 데이터와 실제로 획득한 비행체 궤적 데이터 전체에 대하여 DTW를 적용하여 매칭한 결과이다. 방위각에 대해서 고각 매칭결과에 오차가 보이지만 전체적으로 잘 매칭된 것을 볼 수 있다.

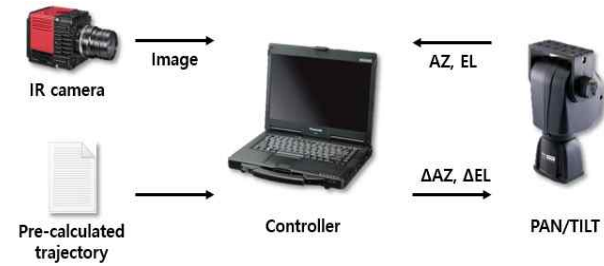


그림 8. 실험 구성
Fig. 8. Experiment setup

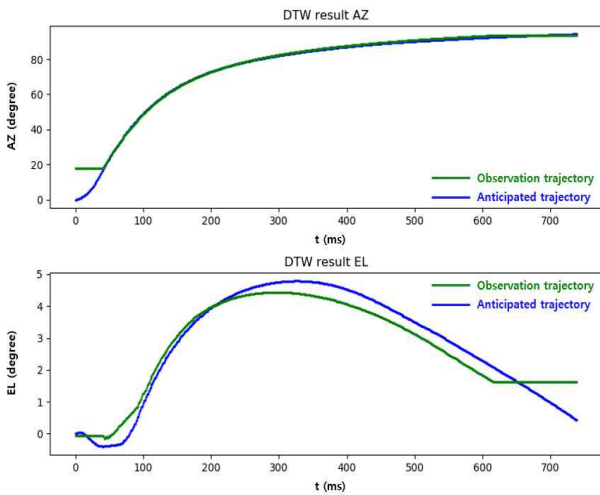


그림 9. DTW 매칭 결과
Fig. 9. DTW matching result

그림 10는 본 논문에서 제시한 방식과 Kalman Filter 활용한 예측 결과를 비교하여 나타낸다. 검은색은 29초 동안 측정된 비

행체의 궤적, 붉은색은 예상 궤적, 파란색은 본 논문에서 제안한 방법을 통해 예상한 궤적, 초록색은 DTW 없이 Kalman Filter만으로 예상한 궤적을 나타낸다. 0~10초 구간에서는 표적을 추적하였고 10초 이후부터는 표적을 잃어 버렸다고 가정하였다. Kalman Filter만 사용한 경우 표적을 잃어버리기 직전의 각속도로 계속 표적의 다음 위치를 예측하였기 때문에 오차가 크고 계속 누적되었다. 본 논문에서 제안한 방식의 경우 예상 궤적 데이터의 각속도 정보를 이용하였기 때문에 실제 궤적과 유사한 형태로 예측을 하였다. 추적궤적과 예상궤적의 시작지점이 비행체의 동일한 상태를 나타내지 않지만 DTW를 통해 매칭되어 활용되었기 때문에 실제 궤적과 더 가깝게 예측할 수 있었다.

3-4 오차 분석을 통한 재포착 가능성 분석

본 논문에서 제시한 방법에 의한 예측 값과 실제 추적 궤적 사이의 오차가 카메라의 시야(FOV: field-of-view) 내에 들어오는지 확인하여 재 포착 가능성을 분석 하였다. 카메라의 해상도를 각도로 변환하고 이를 방위각, 고각 최대 오차와 비교 하였다.

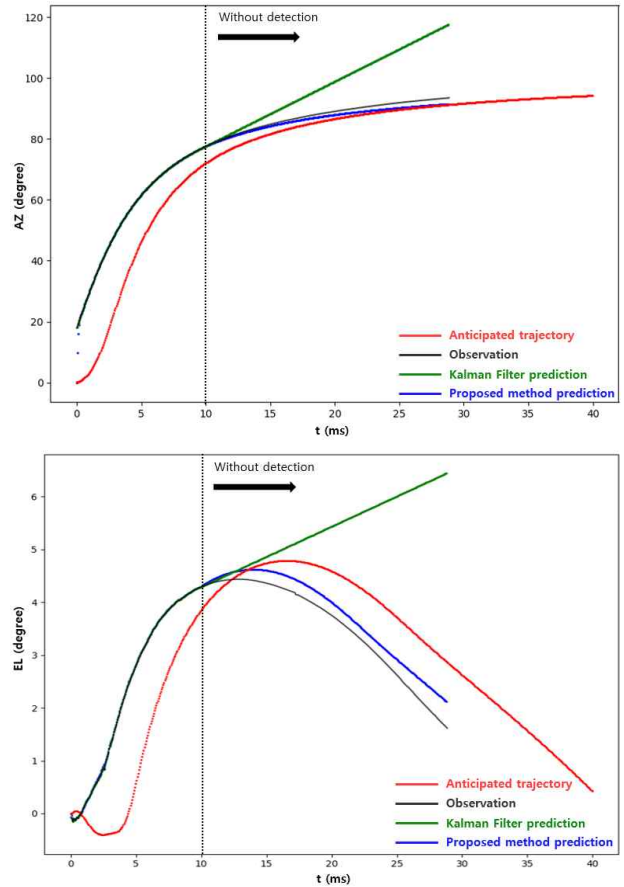


그림 10. Kalman Filter 예측 결과
Fig. 10. Prediction result by Kalman Filter

표 1. 각도 최대 오차값

Table 1. Maximum degree error comparison

Presumed target lost time (s)	Max AZ error (°)	Max EL error (°)
5	1.58	1.32
10	1.22	0.51
15	1.59	0.20
20	0.86	0.30
25	0.25	0.13

표 2. 픽셀 최대 오차값

Table 2. Maximum pixel error comparison

f (focal length)	λ (pixel/step) [7]	FOV AZ (°)	FOV EL (°)
10 mm	0.1050	45.43	36.29
12 mm	0.1288	37.03	29.58
25 mm	0.2664	17.90	14.30
50 mm	0.5228	9.12	7.29
100 mm	1.0592	4.50	3.60
250 mm	2.5586	1.86	1.49

추적을 시작하지 5초부터 5초 간격으로 25초까지 5가지 경우의 시간에서 추적을 잃어버렸다고 가정하였을 때 방위각 고각의 최대 오차는 표1과 같다. 본 실험의 실험 구성 환경에서 렌즈의 초점거리에 따른 렌즈 변환 계수(λ) 즉 PAN/TILT의 한 step 당 이동하는 픽셀 수는 표2와 같다[7]. PAN/TILT의 최소 분해능은 0.0075 %/step이고 카메라 해상도는 1272 x 1016이므로 렌즈의 초점거리별 카메라의 해상도를 각도로 환산(field-of-view)하면 표4와 같다. 각도의 최대 오차값이 해상도의 각도 환산 값보다 작으면 표적이 화면에 잡힌다고 가정을 하면 250mm 이하의 초점거리를 갖는 렌즈를 사용하는 경우에는 표적이 field-of-view내에 들어오도록 표적의 위치를 예측할 수 있음을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 비행체 추적 시 DTW와 Kalman Filter를 이

용하여 비행체를 잃어버린 상황에서 궤적정보를 활용해 표적의 위치를 추정하는 방안을 제시하였다. DTW의 cost function에 시간 항을 추가함으로써 예측의 정확도를 향상시켰고 예상 궤적으로부터 추정된 비행체의 예상 각속도를 Kalman Filter의 관측 값으로 활용하여 비행체의 상태를 예측하였다. 제안된 알고리즘의 적용가능성을 실제 비행체 궤적에 적용해봄으로써 확인하였다.

References

- [1] N. Dalal and B. Triggs, "Histograms of oriented gradients for human detection," in *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, San Diego: CA, pp. 886-893, 2005
- [2] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *International Journal of Computer Vision*, Vol. 60, No. 2, pp. 91-110, Nov. 2004.
- [3] R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, and J. Malik, "Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation," in *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Columbus: OH, pp. 580-587, 2014
- [4] J. Redmon and A. Farhadi, YOLOv3: An incremental improvement. Technical Report, arXiv preprint arXiv: 1804.02767, 2018
- [5] G. Zhai, C. Wu and Y. Wang, "Millimeter wave radar target tracking based on adaptive Kalman Filter," *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Changshu:China, pp. 483-458, 2018
- [6] J. Tang, A. Singh, N. Goehausen and P. Abbeel, "Parameterized maneuver learning for autonomous helicopter flight," in *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Anchorage: AK, pp. 1142-1148, 2010
- [7] S. Park, "Design of small optical tracker for use in the proving ground," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 24, No. 3, pp. 224-231. Jun. 2020.



장 석 원 (Sukwon Jang)

2013년 2월 : 경북대학교 전기전자공학부 (공학사)
 2016년 2월 : 서울대학교 전기정보공학부 (공학석사)
 현재 : 국방과학연구소 제5기술연구본부

※ 관심분야 : 영상탐지, 영상추적, 딥러닝