

적외선 레티클 탐색기의 동적 시뮬레이션 및 효율적인 반대응 알고리즘

正會員 韓成鉉*, 洪顯基*, 崔宗秀*

Dynamic Simulation of Infrared Reticle Seekers and an Efficient Counter-countermeasure Algorithm

Sung Hyun Han*, Hyun Ki Hong*, Jong Soo Choi* *Regular Members*

※본 연구는 서울대학교 자동제어특화연구센터의 지원으로 수행된 것입니다.

요 약

기존의 적외선 레티클 탐색기에 대한 모델링은 주로 정적인 상황에서 이루어졌다. 본 논문에서는 레티클 탐색기의 동적 시뮬레이션 툴을 개발하고 다중 표적, 특히 섬광탄이 존재하는 상황에서 효율적인 신호처리 기법을 제안한다.

개발된 시뮬레이션 툴은 다양한 상황에서 적외선 레티클 탐색기의 성능을 분석하고 효율적인 신호처리 기법을 연구하는데 필수적인 툴이다. 섬광탄이 존재하는 환경에서 제안한 반대응 알고리즘은 간단하면서도 효율적인 기법임을 실험 결과로부터 알 수 있었다.

ABSTRACT

The existing modeling of infrared reticle seekers is performed in a static situation. In this paper, we develop the dynamic simulator of the reticle seekers and propose an efficient signal processing algorithm in multiple targets, especially flares. The developed simulator is essential to analyze the performance of the infrared reticle seekers in various conditions and study effective signal processing techniques. Simulations show that the proposed counter-countermeasure algorithm is simple and efficient.

I. 서 론

적외선 탐색기는 표적의 적외선 특성을 이용하여 대상 표적을 찾고, 확인, 포착, 추적할 수 있도록 하는 미사일의 중요한 부분이다. 탐색기의 출력 신호는 대상 표적의 위치나 방향 정보이며, 이 정보는 미사일의

*중앙대학교 전자공학과
論文番號:96254-0820
接受日字:1996年 8月 20日

유도 장치에 전달되어 표적 추적이 이루어진다. 적외선 탐색기 중 레티클(reticle)을 장착한 레티클 탐색기는 간단하고 소형인 장점으로 미사일에 많이 사용되어 왔다[1, 2]. 그러나 레티클 탐색기는 표적이 다수일 경우 원하는 표적을 효율적으로 추적할 수 없다. 또한 섬광탄(flare) 같은 대응능력(countermeasure)에 매우 민감한 단점을 가지고 있다[1]. 이러한 레티클 탐색기의 단점을 해결하기 위한 연구는 다양한 상황에서 대상 탐색기의 추적 결과 예측과 실제의 실험을 필요로 한다. 그러나 유도 무기의 특성상 실험에 많은 제약이 존재하며, 따라서 실제 상황을 소프트웨어 상에서 구현하고 탐색기의 성능을 분석하는 시뮬레이션 툴 개발이 요구되고 있다.

기존의 적외선 레티클 탐색기에 대한 연구는 대부분 정적인 특성을 분석하는 것이었다[3-16]. 추적루프(tracking loop)를 포함한 동적인 시뮬레이션은 이루어지지 않았고, 또한 그 특성도 정적인 상황과 매우 다르므로 실제의 다양한 상황에서 효율적인 반대응능력(counter-countermeasure)을 갖는 적외선 탐색기를 개발하기 위해서는 필수적인 연구이다.

본 논문에서는 고정 레티클 탐색기의 동적 시뮬레이션 툴을 개발하고 탐색기의 특성을 분석한다. 개발된 툴 상에서 대상 탐색기의 잡음에 의한 추적 성능의 영향, 시계(Field Of View: FOV)내의 위치에 따른 추적 오차 특성, 대응능력이 존재하는 상황에서 추적 성능 등을 분석하였다. 또한 분석한 결과로부터 다중 표적, 특히 섬광탄이 존재하는 상황에서 효율적인 신호처리 기법을 제안한다.

본 논문의 구성은 서론에 이어, II장에서 적외선 레티클 탐색기에 대한 간단한 고찰을, III장에서 고정 레티클 탐색기의 동적 시뮬레이션 방법을 보이며, IV장에서는 그 결과를, 제안한 반대응 신호처리 기법과 그 결과를 V장에서 보이며, VI장에서 결론 및 앞으로의 연구 방향을 제시한다.

II. 적외선 레티클 탐색기

적외선 탐색기는 미사일의 유도 방식중 하나인 호밍(homing) 유도를 위해 표적의 적외선 특성을 이용하여 대상 표적을 추적할 수 있도록 하는 미사일의 일부분이다. 탐색기는 수광부, 검출부, 표적 신호처리

부, 표적 추적부, 표적 추적장치, 표적 신호송신부 등으로 구성되어 있고, 수광부는 단소자에서 다소자 열상(thermal imaging)으로 대체되고 있다.

단소자를 사용할 경우 검출기 앞에 장착된 레티클을 이용하여 표적의 적외선 신호를 변조하므로써 표적의 상대적인 위치 정보를 얻을 수 있다. 표적의 형태와 크기, 표적 신호처리부의 대역폭 등에 따라 레티클의 종류와 형태가 결정된다. 레티클 탐색기는 레티클이 회전하는 방식과 레티클이 고정된 상태에서 광학계가 회전하는 방식이 있다. 회전 레티클 방식은 상대적인 오차가 없을 때 표적 신호를 얻지 못하므로 거의 사용되지 않고 주로 광학계가 원추형(conical)으로 회전하는 고정 레티클 방식이 사용되고 있다. 본 논문에서도 고정레티클 적외선 탐색기를 대상으로 하였다.

그림 1은 본 논문에서 대상으로 하는 웨곤휠(wagon wheel) 레티클 패턴과 광학계의 회전 경로 반경이다. 16개의 스포크 중 투명한 8개는 입력되는 방사량을 모두 통과시키는 부분이며, 검은 8개는 입력 신호를 차단시키는 불투명한 부분이다. 가운데의 4개의 원은 오차가 많을 경우 레티클 중심 부근에서 신호를 얻기 위해 추가된 패턴이다. 회전 경로 반경은 레티클 반경의 60%로 하였으며, 표적은 점원(point source)으로 가정하였다.

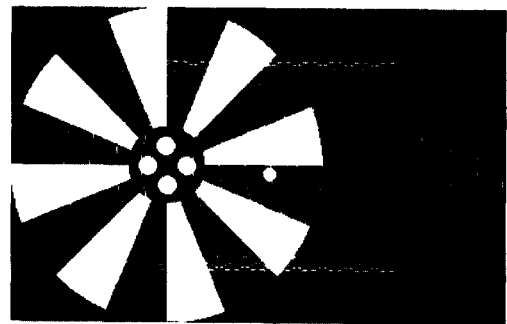


그림 1. 웨곤휠 레티클 패턴과 회전경로
Fig. 1 Wagon wheel reticle and the circular path

표적이 레티클의 중심과 같은 축상에 있을 때 반송파 주파수를 갖는 비변조 신호를 얻게 되며, 그렇지 않을 경우 오차의 크기에 따라 오차 정보를 갖고 있는 주파수변조나 진폭 변조된 신호를 얻게 된다.

Ⅲ. 고정레티클 탐색기의 동적 시뮬레이션

레티클 탐색기를 시뮬레이션하기 위해서는 표적 신호의 형태와 수, 광학적 영향, 대기 특성, 레티클과 광학 시스템의 운동 방식, 레티클 패턴, 레티클의 수 등과 같은 매개변수가 고려되어야 한다. 본 논문에서는 상대적인 분석을 위하여 적외선 원(source)의 복사 강도(radiant intensity)가 아닌, 검출기에서 나오는 표적과 섬광탄 신호의 상대적인 크기로 시뮬레이션 하였다. 구성된 탐색기에 사용된 신호처리부 및 추적루프를 그림 2에 보였다.

대상 탐색기는 MATLAB-Simulink상에서 구현 되었으며 레티클에 의한 입력 신호의 변조, 오차 정보를 얻기 위한 복조(신호처리) 및 추적 루프로 구성되어 있다.

임의 위치의 표적의 초기 오차에 의해서 *FM Wagon wheel* 블럭을 통과하면 오차의 위치에 따라서 주파수 변조나, 진폭 변조된 신호를 얻는다. 표적의 강도에 따른 신호의 영향을 배제하기 위하여 *AGC*(Automatic Gain Control) 블럭을 통과하며 *FM/AM* 복조 기법에 의하여 오차 신호를 얻는다. 주파수 변조 신호는 주파수 판별기(*frequency discriminator*)로 쓰이는 고역통과여파기(*HPF*)를 통과하여 진폭 변조 신호가 되며 포락선 검파기(*envelope detector*)를 통과한 뒤 광학계의 회전주파수에 중심주파수를 갖는 대역통과여파기(*BPF*)를 통하여 오차 신호가 발생된다. 광학계의 회전

주파수는 100Hz로 하였다. 첫번째 대역통과여파기는 배경 및 기타 잡음의 영향을 최소화하기 위한 것이며, 2차 *Butterworth* 형태로 중심주파수는 레티클의 스포크쌍(*spoke pair*)수와 광학계의 회전주파수의 곱인 반송파주파수 800Hz, 대역폭은 637Hz로 하였다. 대역폭은 실험에 의해서 결정된 값이다. 주파수 판별기로 쓰이는 *HPF*는 차단주파수가 1600Hz, 마지막 *BPF*는 중심주파수 100Hz 대역폭은 30Hz로 하였다.

마지막 *BPF*의 출력인 오차 신호의 위상을 검출하기 위한 위상검출기(*phase detector*) 블럭을 통과하면 초기 오차에 상응하는 오차값을 얻을 수 있다. 이 오차값은 추적루프(*Tracking X/Y*)를 통하여 광학계나 레티클의 위치를 수정하게 된다. 추적루프는 *DC* 모터로 근사하였다. 그림 3은 *DC* 모터로 근사한 추적루프와 단위계단응답(*unit step response*)을 나타낸다.

FM wagon wheel 블럭에는 잡음의 영향을 추가할 수 있는 블럭이 있으며, 임의의 형태의 변형된 레티클로 교체할 수 있고, 다중 표적 및 대응능력의 영향을 분석하기 위하여 임의의 위치에 여러 개의 표적을 구성할 수 있게 하였다. 그림 4는 추적루프를 배제한 실험에서 입력 기하학적 오차 대 신호처리 뒤에 얻은 오차값의 특성인 정적이득특성을 나타낸다.

회전 경로가 순시(*instantaneous*) 시계 안에 들어가는 구간에서는 비교적 선형적인 특성을 보이지만 그 밖의 영역에서는 표적의 크기와 형태에 따라 불규칙적인 오차 특성을 나타낼 수 있었다.

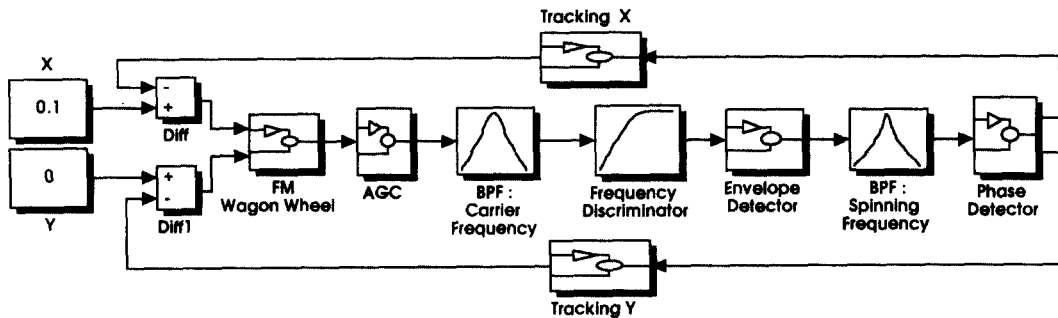


그림 2. 사용된 신호처리 및 추적루프
Fig. 2 Signal processing part and a tracking loop.

이다.

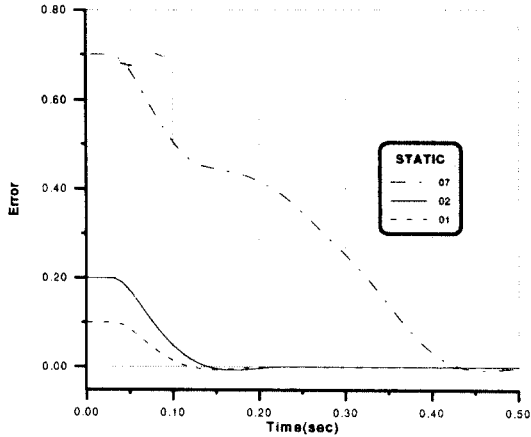


그림 5. 정지 표적의 위치에 따른 추적 성능
Fig. 5 Tracking performance of a stationary target at different positions.

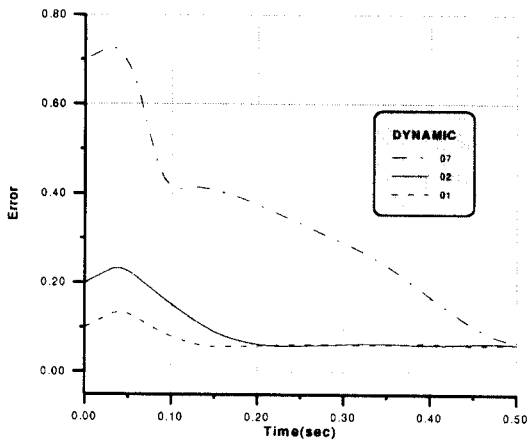


그림 6. 이동 표적의 위치에 따른 추적 성능
Fig. 6 Tracking performance of a moving target at different positions.

2. 잡음에 대한 영향

사용된 탐색기의 잡음의 영향을 분석하기 위하여 다양한 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio:SNR)에서 시뮬레이션 하였다. 그림 7은 표적이 (0.0, 0.0)의 오차를 갖을 때 추적루프를 배제하고 SNR에 따른 해당 오차값의 분산을 나타내는 그림이다. SNR이 5dB

이하로 떨어지면 추적 성능이 현저히 저하되는 것을 알 수 있다.

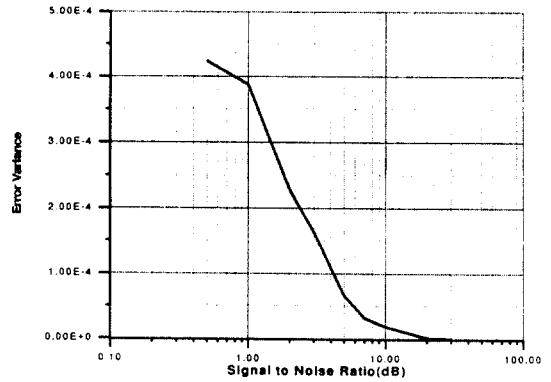


그림 7. SNR 대 오차 분산
Fig. 7 Error variance versus SNR.

그림 8은 추적루프를 포함한 실험으로 초기 오차가 (0.2, 0.0)이고 SNR이 10, 1dB일 때의 결과이다. 정지하고 있는 표적에 대해서도 1dB에서는 잡음의 영향으로 인해 탐색기의 오차 신호가 어느 정도 발진하는 것을 볼 수 있다.

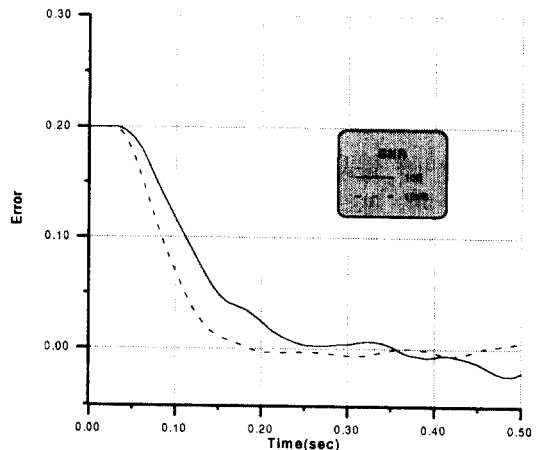


그림 8. SNR에 따른 정지 표적의 추적 성능
Fig. 8 Tracking performance of a stationary target with different SNRs.

3. 대응능력에 대한 영향

본 절에서는 대표적인 대응능력인 섬광탄이 있는 환

경에서 추적 성능을 분석한다. 표적은 초기오차 (0.2, 0.0)에서 +x방향으로 일정한 속도로 움직이는 것으로 가정하였고, 0.3초 후 초기오차 (0.1, 0.0)에서 -x 방향으로 일정한 속도로 움직이는 섬광탄이 작용한 것으로 하였다. 그림 9는 AGC로 사용된 리미터(limiter)의 클리핑(clipping)레벨에 따른 특성으로 표적에 크기에 잘 맞추어진 경우에는 영향을 더 적게 받지만 모든 경우 섬광탄의 영향에 의해 섬광탄이 터진 0.3초 이후에는 표적을 잘 추적할 수 없는 것을 알 수 있다.

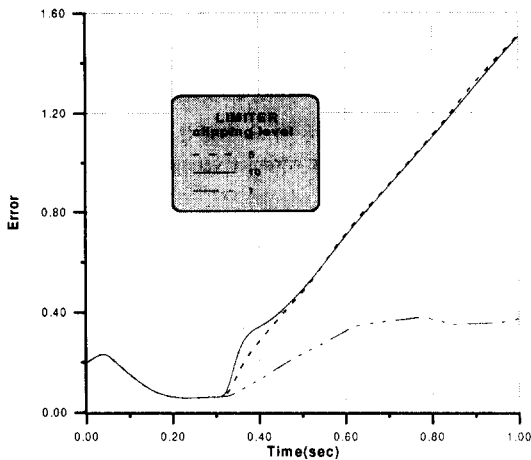


그림 9. 리미터의 클리핑 레벨에 따른 추적 성능
Fig. 9 Tracking performance with different clipping levels of a limiter in countermeasures.

표적에 비해 섬광탄의 강도는 10배로 하였다. 즉 진폭이나 주파수 변조된 신호에 큰 간섭 신호가 추가되므로써 원래 표적이 가지는 변조 특성을 잃어 버리게 되고, 섬광탄의 위치에 치우치는 오차값을 생성하게 된다. 이러한 분석 결과로부터 기존의 단순한 신호처리 기법으로는 다수 표적 혹은, 섬광탄 같은 대응능력 존재 시에 기존의 레티클 탐색기는 대상으로 하는 표적을 추적하기 어렵다는 것을 확인할 수 있었다.

V. 효과적인 반대응 신호처리 기법

본 장에서는 앞에서 확인된 섬광탄의 영향 등에 효과적으로 대처할 수 있는 반대응 기법을 제안한다. 섬광탄 존재 시 고려사항은 다음과 같이 크게 네가지

로 나누어 볼 수 있다.

첫째, 시간적 신호변화로 이는 탐색기 신호 진폭의 급격한 증가가 일어나는지를 감지하는 것이다. 이 경우 섬광탄이 아닌 표적의(고의적인) 방사량 변화일 수도 있음을 역시 고려하여야 한다.

둘째, 대역 차이(spectral differences)로 이는 섬광탄에 비해 표적의 온도가 낮음에 착안하여 탐색기에 하나 이상의 스펙트럼 대역을 사용하는 것을 말한다.

셋째, 궤적 차이 즉, 상대운동학적인 측면으로 표적과 섬광탄의 서로 다른 운동방식을 구분하는 것이다. 표적의 경우 직선운동(straight-line course)이나 선회(turning maneuver), 정지(stationary mode, hovering helicopter) 등의 운동방식이 있을 수 있고, 반면 섬광탄은 탄도궤적(ballistic trajectory), 중력과 항력(gravitational & drag force)등이 고려된다.

넷째, 공간적 크기와 분포로 이는 영상(열상)을 얻을 수 있는 주사(scanning)나 초점면배열(focal plane array) 탐색기에서 고려할 수 있는 사항이다.

이 중, 본 논문에서는 가장 간단한 방법인 시간적 신호변화를 검출하는 방법을 사용한다. 즉, 탐색기 신호 진폭이 급격히 증가하는 경우 섬광탄이 터진 것으로 보고 적절한 신호처리 기법을 도입한다. 섬광탄이 아닌 표적의 고의적인 방사량 변화일 경우에는, 탐색기 신호 진폭이 점진적으로 증가하므로 구분이 가능하다.

임의의 시간에 검출기로부터의 출력 신호는 식(1)과 같다.

$$v(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} r(x, t) s(x, t) dx, \quad (1)$$

여기서 좌표축에 따라 $x = (x, y)$ 나 (ρ, Φ) 이며, $r(x, t)$ 는 레티클 투과특성, $s(x, t)$ 는 표적의 방사분포(radiation distribution)이다. 레티클의 매 회전 시 신호의 적분값은

$$v_n = \int_{nT}^{(n+1)T} v(t) dt, \quad 0 \leq n < \infty \quad (2)$$

로 주어지며, 일련의 신호 적분값의 평균치는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\langle v_n \rangle_{ave} = \frac{1}{k} \sum_{i=n-k+1}^n v_i \quad (3)$$

이제 추적 루프에 사용되는 최종적인 오차값은 다음 조건에 의해서 얻는다.

$$e_{n+1}(x) = \begin{cases} e_n(x)_{ave} - W e_{n+1}(x), & v_{n+1} > (v_n)_{ave} + offset \\ e_{n+1}(x) & otherwise \end{cases} \quad (4)$$

여기서 $(v_n)_{ave}$, $e_n(x)_{ave}$ 는 각각 검출기 신호가 크게 증가하기 전 몇 구간에 걸친 검출기 신호와 오차값의 평균치이다. $offset$ 값은 검출기와 표적 및 대응능력의 특성에 따라 조정될 수 있는 값으로 보통 양수이며, W 는 임의의 가중치이다.

섬광탄이 터졌는지를 판단하는 기준으로, 인접 신호간 상관계수(correlation coefficient)를 구하여 일련의 상관계수를 비교하고 크게 다른 경우를 선택할 수도 있다. 이 방법은 단순히 검출기 신호의 크기만을 비교하는 방법에 비해서 더 정확한 판단 기준이 될 수 있으며 섬광탄이 시계에 존재하지 않는 시간도 비교적 정확히 알 수 있지만 하드웨어적인 복잡도 때문에 여기서는 고려하지 않았다. 위 방법은 검출기 신호의 크기가 다시 어느 정도로 낮아지는 시간까지 적용한다. 또한, 섬광탄의 작용 특성을 알고 있다면 적용 시간을 임의로 설정할 수 있다.

(4)식은 섬광탄에 의해 검출기 신호가 크게 증가한 경우 추적 시 사용되는 오차값으로, 복조 후 얻은 오차값을 쓰지 않고 그 전 몇 구간에 걸친 오차값의 평균치에서 현재의 오차값에 적절한 가중치를 곱하여 뺀 값을 사용한다는 것이다. 이는 표적과 섬광탄이 동시에 존재할 경우 기존의 신호처리 기법이 상대적으로 강도가 큰 섬광탄에 치우친 오차값을 나타내므로 이를 보상하기 위함이다. 즉, 현재의 오차값으로부터 섬광탄의 위치정보를 알 수 있고, 이것을 원래 추적하고 있던 표적의 오차값에서 빼줌으로써 짧은 시간에 섬광탄의 영향을 배제할 수 있는 기법이다. 가중치와 $offset$ 값은 실제 하드웨어 구현 시 표적의 특성을 예측하여 조정될 수 있다.

기존의 신호처리 기법과 제안한 방법에 의한 추적 성능을 그림 10에서 볼 수 있다. 기존의 방법은 (0.2, 0)의 초기 오차를 갖고 일정 속도로 움직이는 표적에 대해 제대로 추적을 하다가, 0.3초 후 표적보다 상대적으로 강도가 큰 섬광탄이 작용한 직후부터는 섬광탄쪽으로 추적이 되며 시간의 경과에 따라 전체 시계에서

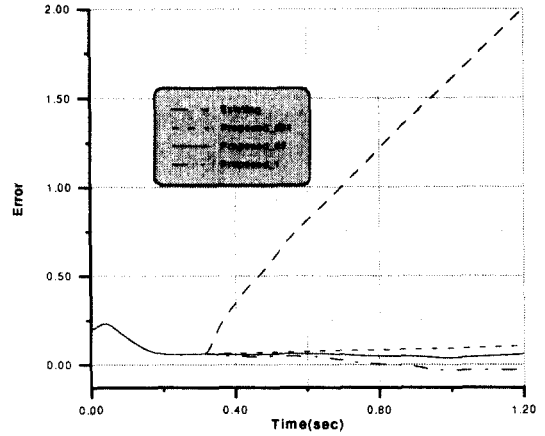


그림 10. 대응능력 존재 시 추적 성능

Fig. 10 Tracking performance of the proposed algorithm in countermeasures.

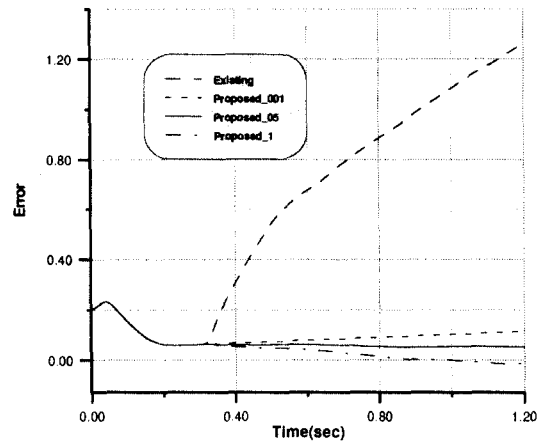


그림 11. 대응능력 존재 시 추적 성능

Fig. 11 Tracking performance of the proposed algorithm in countermeasures.

표적이 완전히 사라짐을 볼 수 있다. 그러나 제안한 방법에 의한 결과는 가중치 W 에 따라 약간 다르지만 모두 표적을 잘 추적함을 알 수 있다. 제안한 방법은 가중치 W 를 각각 0.001, 0.05, 0.1로 했을 경우의 결과이다.

그림 11은 표적은 위와 같은 조건이며, 섬광탄이 (0, -0.1)의 초기 오차를 갖고 수직 하강운동할 경우 기존의 방법과 제안한 방법의 비교 결과이다. 역시

제안한 방법은 모두 우수한 추적 특성을 갖는다. 제안한 방법은 매우 간단하지만 시뮬레이션 결과 우수한 추적 성능을 보임을 알 수 있었다. 표적과 섬광탄의 속도가 시간에 따라 변하는 경우에도 적절한 추적 루프와 함께 사용하면 좋은 성능을 얻을 수 있다. 여기에 일련의 오차신호 해석에 의해 표적과 섬광탄의 궤적 추정이 이루어지고 이를 사용하면 보다 효율적인 추적이 이루어질 수 있을 것이다.

VI. 결 론

본 논문에서는 적외선 레티클 탐색기에 대한 동적인 모델링을 통하여 다양한 상황에서 그 특성을 비교 평가하였다. 대상 탐색기의 잡음에 의한 추적 성능, 시계 내의 위치에 따른 추적 오차 특성, 다중 표적 및 대응능력이 존재하는 상황에서 추적 성능 등을 분석하였다. 개발된 시뮬레이션 툴은 대응능력에 취약한 적외선 레티클 탐색기의 성능을 분석하고 개선된 신호처리 기법을 연구하는데 필수적이다.

분석한 시뮬레이션 결과로부터, 섬광탄이 존재하는 환경에서 효율적이며 간단한 반대응 신호처리 알고리즘을 제안하였으며 우수한 추적 성능을 보임을 실험 결과로부터 알 수 있었다.

앞으로 능동적인 재밍이나 기타 다양한 대응능력을 분석하여 해당 반대응 알고리즘을 개발하고, 디지털 신호처리 기법을 이용하여 보다 개선된 탐색기의 신호처리부를 구현하는 연구가 계속될 예정이다.

<감사의 글>

본 연구를 위해 지도와 도움을 아끼지 않으신 국방과학 연구소 유인억 선임연구원께 진심으로 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J. J. May and M. E. Van Zee, "Electro-Optic and Infrared Sensors," *Microwave Journal*, pp. 121-131, Sept. 1983.
2. D. W. Fisher, R. F. Leftwich, and H. W. Yates, "Survey of Infrared Trackers," *Appl. Opt.*, vol. 5, no. 4, pp. 507-515, Apr. 1966.
3. T. B. Buttweiler, "Optimum Modulation Characteristics for Amplitude-modulated and Frequency-modulated Infrared Systems," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 51, no. 9, pp. 1011-1015, Sept. 1961.
4. R. Carpenter, "Comparison of AM and FM Reticle Systems," *Appl. Opt.*, vol. 2, no. 3, pp. 229-236, Mar. 1963.
5. K. Suzuki, "Analysis of Rising-sun Reticle," *Opt. Eng.*, vol. 18, no. 3, pp. 350-351, Mar. 1979.
6. S. Craubner, "Digital Simulation of Reticle Systems," *Opt. Eng.*, vol. 20, no. 4, pp. 608-615, Apr. 1981.
7. R. C. Anderson and P. R. Callary, "Computer Modeling of Optical Trackers," *Opt. Eng.*, vol. 20, no. 6, pp. 861-865, June 1981.
8. M. A. Porras, J. Alda, and E. Bernabeu, "Amplitude Modulated and Frequency-Modulated Reticle Responses of Gaussian Beams," *Opt. Eng.*, vol. 30, no. 12, pp. 1986-1992, Dec. 1991.
9. G. Olsson, "Simulation of Reticle Seekers by Means of an Image Processing System," *Opt. Eng.*, vol. 33, no. 3, pp. 730-736, Mar. 1994.
10. Z. W. Chao and J. L. Chu, "Parameter Analysis for Frequency-modulation Reticle Design," *Opt. Eng.*, vol. 27, no. 6, pp. 443-451, June 1988.
11. R. G. Driggers, C. E. Halford, and G. D. Boreman, "Parameters of Spinning AM Reticles," *Appl. Opt.*, vol. 30, no. 19, pp. 2675-2684, July 1991.
12. R. G. Driggers, C. E. Halford, G. D. Boreman, D. Lattman, and K. F. Williams, "Parameters of Spinning FM Reticles," *Appl. Opt.*, vol. 30, no. 7, pp. 887-895, Mar. 1991.
13. J. S. Tayler and R. G. Driggers, "Tracking with Two Frequency-modulated Reticles," *Opt. Eng.*, vol. 32, no. 5, pp. 1101-1104, May 1993.
14. J. S. Accetta Eds., *The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook*, SPIE press, Michigan, 1993.
15. K. Seyrafi and S. A. Hovanessian, *Introduction to Electro-Optical Imaging and Tracking Systems*, Artech House, MA., 1993.

