

근접영역에서의 IR 탐색기 정보를 이용한 표적적응유도

Target Adaptive Guidance Using Near-Zone Information from IR Seeker

엄 태 윤*
Um, Tae Yoon

김 필 성*
Kim, Phil-Sung

ABSTRACT

A target adaptive guidance(TAG) algorithm is proposed employing the near-zone signal that can be measured from an infrared seeker. The guidance order is composed of a conventional PNG command and an additional command to be calculable from an additional LOS rate between a hot point of target and a required intercept point. The characteristic of the near-zone signal is similar to that of LOS rate that is inversely proportional to the square of time-to-go. Hence the proposed scheme can be applied to real systems with no estimator for time-to-go. From analysis results on the miss distance with perfect missile and perfect seeker, it follows that the proposed TAG algorithm guarantees missile to be ideally guided to the required intercept point. And it is less affected by the TAG start time and a proportional navigation ratio than other TAG schemes using a LOS rate such as a step bias or a ramp bias.

주요기술용어 : Target Adaptive Guidance(표적적응유도), Infrared Seeker(적외선 탐색기), Near-Zone Signal (근접영역 신호), PNG(비례항법유도)

1. 서 론

2점 유도방식인 비례항법유도법칙은 유도탄에 장착된 탐색기 정보를 이용하여 유도탄과 표적을 잇는 시선벡터의 각속도를 영으로 유지시키는 유도방식이다.

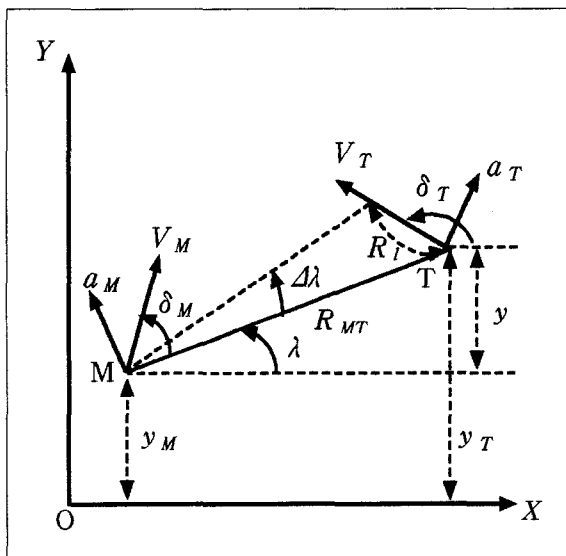
명중률이 높고 구현이 용이하여 단거리 및 중거리 지대공 유도탄에 널리 사용된다^[1].

능동형 RF탐색기는 표적방향으로 빔을 주사한 후에 표적에서 반사된 신호로부터 표적을 추적하므로 표적 동체에 대한 정보를 제공한다. 반면에 수동형 탐색기의 일종인 적외선 탐색기는 표적의 열원을 감지하고 추적함으로써 유도탄과 열원사이의 시선각속도

* 국방과학연구소

정보를 제공하게 된다. 전투기의 열원은 엔진노즐 뒷 부분에 형성되는 플룸(plume)에 해당하므로 탐색기는 표적동체와 떨어진 열 에너지 중심점을 추적하게 된다. 이 정보만을 사용하여 비례항법유도를 수행되면 명중점은 동체를 벗어나게 된다. 특히 소형 유도탄과 같이 탄두효과가 적은 경우에는 표적에 치명적인 손상을 줄 수 없는 문제점이 있다. 표적적응유도(Target Adaptive Guidance)는 명중점을 표적 동체방향으로 이동시키는 유도기법으로서 적외선 탐색기의 추적점으로 인한 단점을 해소할 수 있는 방법이다.

다음과 같은 표적적응유도기법과 관련된 연구가 발표되었다. 참고문헌^[2]에서는 표적과 유도탄사이의 동역학(kinematic)을 근간으로 구성된 필터의 추정치로부터 이상적인 명중위치에 대한 정보를 계산하여 추가의 유도명령을 인가하는 방법이 제시되었다. 참고문헌^[3]에서는 탐색기에 전달되는 열 에너지와 유도탄 및 표적사이의 거리관계식으로부터 개략적인 Time-to-Go를 계산하여 추가의 유도명령을 계산하는 방법



[그림 1] 표적과 유도탄의 교전 기하

도 제시되었다. 또한 참고문헌^[4]에서는 시선각가속도 정보를 사용하는 표적적응유도법칙을 제안하였다.

본 논문에서는 유도탄과 표적이 근접했을 경우에 적외선 탐색기에서 제공하는 신호를 사용하여 구현이 가능한 표적적응유도법칙을 제안하였으며 유도루우프를 adjoint 모델로 변환하여 명중점의 변화를 분석하고 기존의 바이어스 비례항법유도 방식과의 특성을 비교한다. 또한, 실제 적외선 탐색기와 유사한 모델과 6 자유도를 가진 유도탄 동력학을 모사하는 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 제시된 표적적응유도 방식의 성능을 분석하였다.

2. 표적적응유도의 구성 방법 및 특성 분석

표적과 유도탄의 상대적인 기하를 그림 1에 도시하였다.

좌표계 XY는 고정좌표계(I)로서 X축은 비례항법유도를 시작할 때의 유도탄과 표적의 열원을 잇는 방향이고, Y축은 X축에 수직방향으로 정의한다. 좌표계 xy는 고정좌표계에서 볼 때 움직이는 좌표계로서 MTLOS 좌표계(MT)로 정의한다. x축은 현재의 유도탄과 표적의 열원을 잇는 방향으로, y축은 x축과 수직인 방향으로 정의한다. 이상적인 초기 유도탄 속도 방향이 설정되고 비례항법유도가 정상적으로 수행되면 X축과 x축은 평행으로 유지된다. MTLOS 좌표계로 유도탄과 표적의 동역학을 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{d^2 R_{mt}}{dt^2} \Big|_I^{MT} = \frac{d^2 R_{mt}}{dt^2} \Big|_I^{MT} + 2\omega_{IMT}^{MT} \times \frac{dR_{mt}}{dt} \Big|_I^{MT} + \dot{\omega}_{IMT}^{MT} \times R_{MT} + \omega_{IMT}^{MT} \times (\omega_{IMT}^{MT} \times R_{mt}^{MT}) \tag{1}$$

표적의 기동가속도가 없다는 가정하에서 식(1)의 y 축 성분을 표시하면 다음과 같다.

$$R_{mt} \ddot{\lambda} = -2 \dot{\lambda} \dot{R}_{mt} - a_M \quad (2)$$

여기서 R_{mb} , \dot{R}_{mt} 는 유도탄과 표적 열원사이의 거리 및 거리변화율을, $\dot{\lambda}$ 는 시선각의 변화율을, a_M 는 유도탄의 가속도를 나타낸다. 유도탄 및 표적의 속도가 일정하면 R_{mt} 는 시간의 함수로 표시되며, 시선각과 초기 시선각의 차가 작다고 가정하면 Y 축방향의 상대거리는 다음과 같이 표시된다.

$$R_{mt} = V_c(t_f - t), V_c > 0 \quad (3)$$

$$y = y_t - y_m \cong \lambda V_c(t_f - t)$$

명중시점 t_f 에서 $y(t_f)$ 값이 0인 경우는 표적 열원에 유도탄이 명중한 경우로서 적외선 탐색기를 사용한 비례항법유도의 예상 결과에 해당된다. 그림 1의 교전 상황에서 $y(t_f)$ 가 음수값을 가지도록 표적적응유도 기법을 설계하면 유도탄을 표적동체에 명중시킬 수 있다.

표적적응유도를 포함한 유도명령은 비례항법유도 명령과 추가 명령의 합으로 표시할 수 있다.

$$a_M = NV_c(\dot{\lambda} + \Delta \dot{\lambda}) \quad (4)$$

여기서 N 은 비례항법계수이며, $\Delta \dot{\lambda}$ 는 표적 열원으로부터 이상적인 명중점 사이에 해당하는 추가된 시선각이다.

$$\Delta \dot{\lambda} \cong \frac{k}{(t_f - t)^2}, k = \frac{l}{V_c}, l = R_l \sin \delta_T \quad (5)$$

l 이 일정하다고 가정한 후에 얻어진 근사적인 식(5)

와 식(2)~(4)를 사용하면 표적 열원에 대한 시선각 및 시선각속도를 계산할 수 있다.

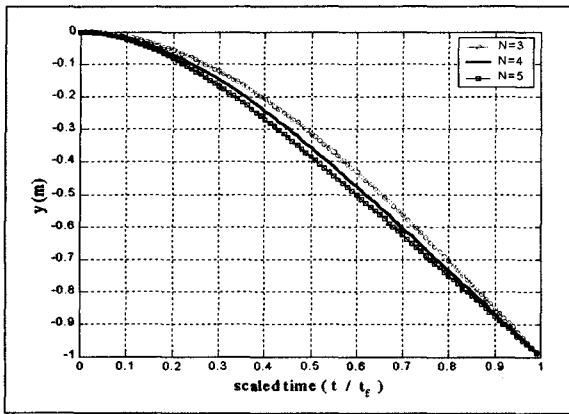
$$\lambda(t) = \lambda(0) + \frac{t_f}{N-1} \left(1 - \left(1 - \frac{t}{t_f} \right)^{N-1} \right) \dot{\lambda}(0) - \frac{k}{t_f - t} + \frac{Nk}{(N-1)t_f} \left(1 - \frac{1}{N} \left(1 - \frac{t}{t_f} \right)^{N-1} \right) \quad (6)$$

$$\dot{\lambda}(t) = \left(1 - \frac{t}{t_f} \right)^{N-2} \dot{\lambda}(0) - \frac{k}{(t_f - t)^2} \left(1 - \left(1 - \frac{t}{t_f} \right)^N \right) \quad (7)$$

식(7)으로부터 $N > 3$ 이고, 비행시각이 명중시각에 접근하면 $\dot{\lambda}(t_f) \rightarrow -\infty$ 로 접근하는 것을 알 수 있다. 이것은 유도탄 궤적이 표적 열원 전방으로 이동하는 것을 뜻한다. 식(3)과 식(6)으로부터 표적열원과 유도탄사이의 상대거리 $y(t)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$y(t) = V_c(t_f - t)\lambda(0) - kV_c + \frac{t(t_f - t)}{N-1} \left[1 - \left(1 - \frac{t}{t_f} \right)^{N-1} \right] V_c \dot{\lambda}(0) + \frac{NkV_c(t_f - t)}{(N-1)t_f} \left[1 - \frac{1}{N} \left(1 - \frac{t}{t_f} \right)^{N-1} \right] \quad (8)$$

명중시각에서 상대거리는 $y(t_f) \rightarrow -kV_c$ 로 접근한다. 양의 수 k 를 선정하면 $y(t_f)$ 가 음의 값을 갖게 되므로 표적적응유도의 목적이 만족됨을 알 수 있다. 특히 식(5)를 만족하는 k 를 선정하면 거리가 l 인 표적열원 앞으로 유도탄이 명중할 수 있음을 알 수 있다. $l = 1m$ 일 때 시각에 따른 상대 위치를 그림 2에 도시하였다. 적외선 탐색기는 상대속도 V_c 를 측정할 수 없으므로 임의의 표적속도를 가정하는 방법을 사용할 수 있다. 또는 유도탄의 속도만을 고려하여 k 값을 선정할 수 있다.



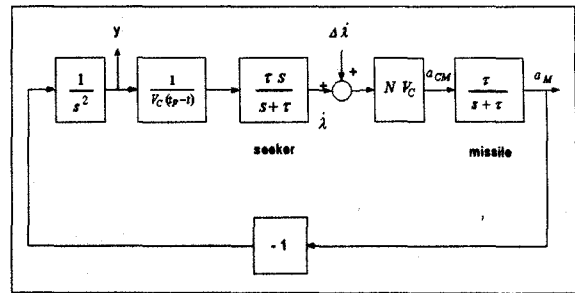
[그림 2] N에 따른 상대위치(Y축)

적외선 탐색기에서 근접영역에서의 표적 추적물을 향상시키기 위해서는 2종류의 탐색기 신호의 합으로 추적 루우프를 구성하는 것이 필요하다.

FZ(Far-Zone)신호는 추적오차에 비례하는 신호로서 원거리에서 탐색기에 맺힌 작은 크기의 표적을 추적할 때 많은 영향을 준다. 표적거리와 무관한 신호를 제공한다. NZ(Near-Zone)신호는 근접영역에서 탐색기에 크게 맺힌 열원의 열 에너지 중심에 대한 정보를 제공하는 신호로서 열 세기와 열에너지 중심의 변화에 비례하는 정보를 제공한다. 열에너지 중심의 변화가 일정한 경우에 NZ신호는 유도탄과 표적사이의 거리의 함수로서 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$S = \frac{c}{R^2_m} \cong \frac{c}{V^2_c(t_f - t)^2} \quad (9)$$

탐색기에 전달되는 열 세기 S는 식(5)의 추가 시선각 속도와 유사하다. 일정한 상수를 S에 곱하면 식(5)를 구성할 수 있으므로 표적적응유도 설계가 가능하다. 실제 탐색기 신호처리부를 거친 NZ신호는 근거리에서만 획득 가능한 신호이므로 표적 종류에 따라 신호 획득시간은 가변이다.



[그림 3] 시간지연을 고려한 유도루우프

3. Adjoint방법을 이용한 표적적응유도의 명중점 특성분석

유도탄 및 탐색기의 시간지연이 있는 경우에 대한 표적적응유도의 유도 성능을 알아보기 위하여 adjoint 방법을 사용하였다^[5].

그림 3은 표적 기동 및 초기 헤딩오차를 무시한 유도루우프를 나타내며 유도탄 및 탐색기는 동일한 시간지연 ($\tau = 20$)을 가진 1차시스템으로 모델링하였다. 입력은 식(4)의 후반부에 해당하는 값으로 표적적응유도 명령에 해당하며, 출력은 유도오차로서 식(3)에 해당한다. 이 유도루우프에 대하여 adjoint모델을 구성한 후에 명중점 특성을 분석한다.

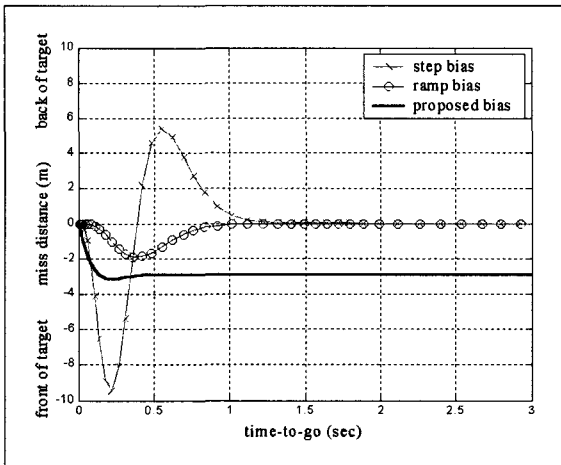
기존의 바이어스 비례항법유도방식과의 명중특성을 비교하기 위하여 참고문헌^[4]에서 사용한 2종류의 $\Delta \lambda$ 형태와 식(5)에서 제안된 형태를 사용하였다.

Case 1 : $\Delta \lambda = 1$

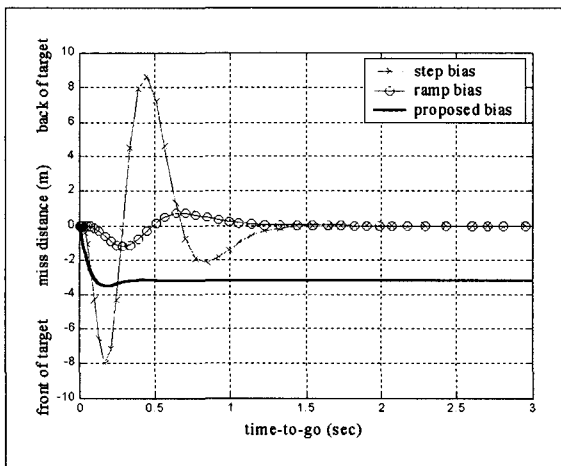
Case 2 : $\Delta \lambda = t$

Case 3 : $\Delta \lambda = \frac{1}{V_c(t_f - t)^2}$

그림 4 및 그림 5는 N=4 및 5일 경우에 adjoint



[그림 4] 유도명령 형태에 따른 명중점 위치 ($N=4$)



[그림 5] 유도명령 형태에 따른 명중점 위치 ($N=5$)

방법을 사용하여 얻어진 명중점의 위치를 나타낸다. X축은 명중전에 추가의 명령이 인가된 시간을 나타낸다.

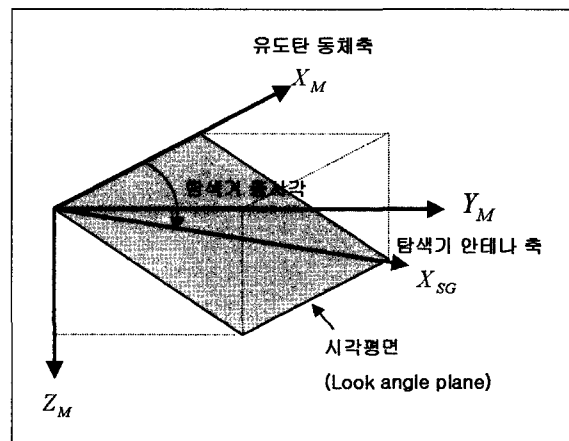
$\Delta\lambda$ 의 크기를 증가시키면 명중점 위치의 크기도 함께 증가되므로 크기보다는 인가 시간과 명중점 위치의 변화가 의미가 있다. 그림 4로부터 일정량의 바이어스 항을 사용하면 인가 시간에 따라 표적 열원 뒷부분으로 명중할 수 있음을 알 수 있다. 또한,

$N=5$ 인 경우에 일차로 증가하는 바이어스 항을 사용하면 위와 동일한 결과가 얻어지므로 동작시점 선정에 많은 영향을 받음을 알 수 있다. 반면에 식(5)에 정의된 추가의 시선각속도를 적용하면 비례항법계수에 둔감하게 표적적응유도의 목적을 만족시킬 수 있다. 일정시간 동안만 표적적응유도를 수행하면 표적열원의 앞부분인 표적동체를 맞출 가능성이 많음을 알 수 있다.

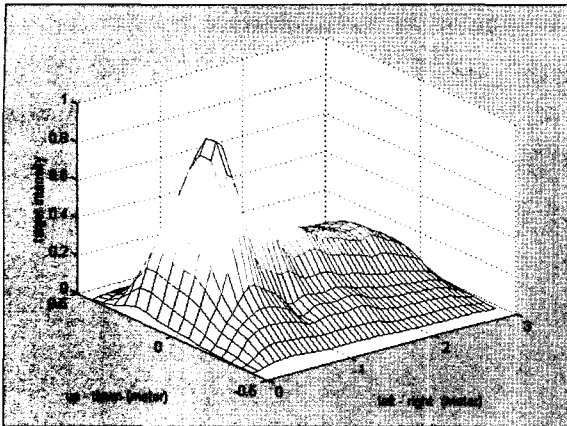
4. 시뮬레이션 및 결과

표적적응유도 기법을 구현하기 위해서는 표적 열원 및 명중요구점 사이의 시선각속도 정보와 유도명령 방향이 필요하다. 추가의 시선각속도 정보는 식(5)의 형태와 유사한 탐색기 정보를 직접 사용하며, 유도명령 방향은 그림 6과 같이 시각 평면을 정의한 후에 시선각을 증가시키는 방향으로 설정한다.

시각 평면은 유도탄 동체축과 탐색기 안테나 축을 포함하는 평면으로서 비례항법유도가 정상적으로 수



[그림 6] 시각 평면



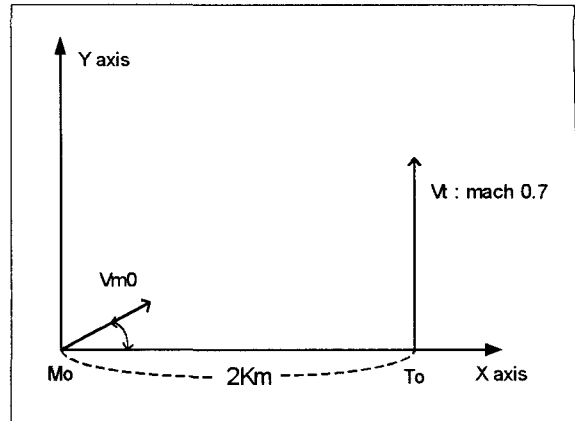
[그림 7] 표적의 열 형상

행되면 탐색기 총 시간이 일정하게 유지된다. 탐색기 총 시간이 증가하는 방향과 MTLOS에 수직인 표적 속도 방향이 일치하므로 표적적응유도의 명령방향으로 활용이 가능하다.

표적적응유도 기법의 성능 및 특성을 분석하기 위하여 6 자유도를 가진 유도탄 동력학과 적외선 탐색기 모델을 포함하는 시뮬레이션 프로그램을 이용하였다.

그림 7에 도시된 표적의 열 형상은 엔진 노즐의 뒷 부분에 형성되는 상대적인 열 세기를 나타낸다. 뒷 부분으로 3m, 상하방향으로 0.9m의 형상을 가진 플룸의 hot point는(0.5m, 0m) 지점이다. 그림 8은 유도탄 발사 시의 유도탄과 표적사이의 기하를 나타낸다. 유도탄의 초기 자세는 22도를 사용하였다. 표적까지 거리는 2Km 이며 표적 속력은 Mach 0.7로서 초기 MTLOS와 수직인 방향으로 비행하는 표적에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

제안된 표적적응유도 기법을 적용한 시뮬레이션 결과, 유도탄은 엔진 노즐 앞방향으로 1.16m, 상방향으로 0.65m지점에 명중하였다. 반면에 기존의 비례항법 유도 기법만을 적용하면 앞방향 0.14m, 하방향 0.25m 지점에 명중점이 형성된다. 위 표적 시나리오에 대하



[그림 8] 초기의 유도탄과 표적 기하

여 제안된 표적적응유도 기법을 사용하면 표적 동체 방향으로 약 1m 만큼 명중점을 이동시킬 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 비례항법유도 명령과 표적 열원 및 명중요구점 사이의 시선각속도 정보로부터 얻어지는 추가의 유도명령으로 구성되는 표적적응유도 설계방법을 제안하였다. 먼저, 유도탄과 표적 열원사이의 기하학적 관계식으로부터 추가 시선각속도를 계산한 후에 시선각 및 시선각속도의 거동을 확인하고 MTLOS에 수직방향의 상대거리 해석을 통하여 표적적응유도의 목적을 만족함을 확인하였다. 또한, adjoint방법을 이용한 유도성능 분석을 통하여 기존의 바이어스 형태에 비하여 비례항법계수 및 표적적응유도 수행기간에 둔감함을 알 수 있었다. 유도탄과 표적이 근접한 경우에 적외선 탐색기에 전달되는 열 에너지의 증가형태와 추가의 시선각속도 형태가 유사하므로 근접영역에서의 탐색기 신호를 활용하면 구현이

가능한 방법으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] P. Garnell, *Guided Weapon Control Systems*, Pergamon Press, 1980.
- [2] T. L. Song, "Target Adaptive Guidance for Passive Homing Missiles," IEEE Trans. On AES Vol.33, No1, Jan. 1997, pp.312~316.
- [3] 조항주, 김필성, "Time-to-go 추정치를 이용한 근사적인 표적적응유도," '97유도무기 학술회의 논문집, pp.249~253.
- [4] 김필성, 전병을, 송찬호, "근사적 표적적응 유도를 위한 BPNG," '01 한국자동제어학 술회의 논문집.
- [5] P. Zarchan, *Tactical and Strategic Missile Guidance*, AIAA Inc., 1990.