

2축 김발 호밍 탐색기에서의 롤운동 보상

황익호
국방과학연구소, 선임연구원

Roll Compensation for Homing Seekers with 2-Axis Gimbal

Ick Ho Whang
Senior Researcher, Agency for Defense Development

Abstract - In this paper, a horizontal LOS(line of sight) rate estimator for conventional sea skimming ASM(anti-ship missile) is proposed. A LOS rate dynamics model in 2 axis gimbal system and in homing geometry is derived. And a new LOS rate estimator is proposed by applying a Kalman filter theory to the LOS rate dynamics model. The proposed filter can estimate LOS rates with taking roll motions into account. Simulation results show the proposed filter produces smaller estimation errors than a conventional method.

1. 개 요

일반적으로 sea-skimming 유도탄에서는 유도탄의 롤 각을 0으로 만들어 주는 물제어기를 구성하여 수평면과 수직면에 대한 독립성을 유지할 수 있도록 만들어, 수직면에 대하여서는 일정한 고도를 유지하며 비행하도록 하고 수평면에 대해서는 호밍루프를 구성하게 된다. 따라서 이 경우 이용되는 2축 김발 탐색기에서는 yaw 김발 평면에만 시선각추종루프(LOS angle tracking loop)를 구성하여 시선변화율(LOS rate)을 측정하며, pitch 김발 평면에 대해서는 각도지향루프만을 구성하여 유도탄의 고도 및 표적과의 거리를 고려한 pitch 각을 유지하여 표적을 지향할 수 있도록 구성한다[1]. 그림 1은 이와 같은 경우 많이 이용되는 전형적인 2축 김발 탐색기를 간략하게 도시한 것이고, 그림 2는 yaw 김발 평면에 구성 가능한 전형적인 시선각추종루프의 예이다 [1].

그림 1에서 알 수 있듯이 탐색기 김발은 pitch 및 yaw 운동만을 발생시킬 수 있으므로, 유도탄의 롤운동이 있는 경우에는 이로 인한 yaw 김발 평면의 회전을 김발의 운동을 이용하여 효과적으로 보상하기 어려우며, 따라서 롤에 의한 부적절한 시선변화율 측정치가 발생하게 된다. 이러한 시선변화율 측정치를 이용하여 호밍루프를 구성하는 경우에는 부적절한 유도명령으로 인한 불필요한 에너지의 소비를 초래할 수 있으며 나아가 호밍 오차를 증대시키는 요인으로 작용할 수 있다. 본 논문에서는 이와 같은 경우에 적용할 수 있는 롤운동을 고려한 시선변화율 추정필터를 제안하였다.

2. 롤 운동을 고려한 수평 시선변화율 추정

2.1 2축 김발 탐색기에서의 수평 시선 변화율

본 장에서는 그림 1의 구성을 가지는 2축 김발의 yaw 평면에 그림2와 같은 시선각추종루프가 구성된 경우에 대하여 수평시선변화율(horizontal LOS rate)의 운동을 모델링하였다.

우선 그림 2의 시선각추종루프의 동작을 간단히 설명하면 다음과 같다[1]. 그림 2에서 λ_{yaw} , ψ_{yaw} 는 각각 탐색기 yaw 김발 평면에서 본 표적과의 시선각 및 유도

탄의 회전각속도이며, ϕ_h , r_h , e_z 는 각각 pitch 김발에 대한 yaw 김발의 회전각, 관성좌표계에 대한 yaw 김발의 회전 각속도, yaw 김발 평면에서의 시선각 오차이다. 그림 3은 이해를 돕기 위하여 탐색기 yaw 김발 평면에서 표현되는 각도들을 다시 도시한 것이다. 그림 2에서 알 수 있듯이 yaw 시선각 추종루프는 각도 추적 루우프(track loop)와 안정화 루우프(stabilization loop)로 이루어진다. 안정화 루우프에서는 유도탄의 동체 회전을 인한 안테나의 회전량을 보상해 주며 각도 추적 루우프는 유도탄과 표적간의 상대위치의 변화로 인한 시선각의 변화량 e_z 를 보정해 주는 역할을 한다. 즉, 유도탄의 동체 회전량을 상쇄시키도록 김발을 회전시켜 yaw 김발이 관성좌표계에서 거의 정지한 상태가 되도록 만들고, 여기서 측정된 yaw 시선각 오차 e_z 를 0으로 만드는 방향으로 안테나를 회전시켜 결국 안테나의 boresight가 시선벡터를 추종하도록 만드는 것이다.

이와 같은 탐색기 시스템에서 수평 시선변화율을 구하는 전형적인 방법은 e_z 의 변화율을 추정하여 여기에 r_h 를 더해주는 방식으로, 개념적으로 볼 때는 안테나에서 바라본 시선변화율에 yaw 김발 평면에서의 안테나 회전변화율을 보정한 형태라 할 수 있다[1]. 그러나 이와 같이 구한 시선변화율은 yaw 김발 평면의 수평면에 대한 어긋남을 고려하지 않고 구한 것이므로, 유도탄의 롤 운동 등이 있어서 yaw 김발 평면이 수평면에 대한 회전운동을 포함하게 되는 경우에는 오차가 발생할 수 있다.

롤운동을 포함한 수평면 시선변화율에 대한 모델을 얻기 위하여 다음과 같은 좌표계를 설정한다.

- (1) I-frame : 초기시선방향을 x축으로 하는 관성좌표계
- (2) B-frame : I-frame을 yaw, pitch, roll 순서로 각각 ψ , θ , ϕ 만큼 회전시켜 아래와 같이 유도탄의 동체에 일치하도록 한 좌표계
- (3) h-frame : B-frame을 pitch 및 yaw 김발축을 따라 각각 θ_h , ϕ_h 만큼 회전시켜 안테나의 bore sight가 지향하는 방향이 X^h 축이 되도록 한 좌표계
- (4) p-frame : h-frame을 Z^h 축을 따라 e_z 만큼 회전시킨 후, 회전 후 생기는 Y축을 따라 e_y 만큼 회전시켜 X^p 축이 시선방향(Line Of Sight, LOS)이 되도록 구성한 좌표계
- (5) LOS-frame : p-frame을 X^p 축을 따라 ϕ_L 만큼 회전시켜 Y^{LOS} 가 I-frame의 수평면에 존재하도록 구성한 좌표계

이제 좌표계들 간의 상대적인 회전량을 표현하는 식 (1)-(3)을 이용하여 수평시선변화율에 대한 정보를 추출하면 식(4)와 같다.

$$\vec{w}_{hl}^p - C_{ph} \vec{w}_{hl}^h = C_{ph} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ e_z \end{bmatrix} + R_y(e_y) \begin{bmatrix} 0 \\ e_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\vec{w}_{LOSI}^{LOS} = C_{LOSI} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \lambda_h \end{bmatrix} + R_y(-\lambda_v) \begin{bmatrix} 0 \\ -\lambda_v \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\vec{w}_{LOSI}^{LOS} - C_{LOSp} \vec{w}_{pl}^p = \begin{bmatrix} \phi_L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\lambda_h = \frac{S\phi_L}{C\lambda_v C\phi_L} \times \left(\lambda_v + \frac{Se_y Ce_z p_h + Se_y Se_z q_h + Ce_y r_h + Ce_y \dot{e}_z}{S\phi_L} \right) \quad (4)$$

여기서, S 및 C는 각각 해당 각도의 sine 및 cosine을 표시하고 C_{AB} 는 B-frame에서 A-frame으로의 변환행렬을 의미한다. 또 \vec{w}_{AB}^A 는 B-frame에 대한 A-frame의 회전각속도를 A-frame에서 표시한 것이다. λ_h 와 λ_v 는 각각 수평면 및 수직면에서의 시선각이다. 식(4)에서 p_h, q_h, r_h 는 각각 \vec{w}_{hi}^h 의 X^h, Y^h, Z^h 축 방향 성분으로서 $\vec{w}_{hi}^h - C_{hB} \vec{w}_{Bi}^B = C_{hB} \begin{bmatrix} 0 \\ \theta_h \\ 0 \\ \phi_h \end{bmatrix} + R_x(\psi_h) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \phi_h \end{bmatrix}$ 로부터 계산할 수 있다. 식(4)를 미소각근사(small angle approximation)를 이용하여 근사시키고, 각도의 1차항까지만 고려하여 정리하면 다음과 같이 yaw 방향 시선각 오차(LOS angle error) e_z 와 시선변화율 간의 관계를 구할 수 있다.

$$\dot{e}_z \approx \lambda_h - r_h + \phi \lambda_v - e_y p \quad (5)$$

식(5)의 의미를 살펴보면, 안테나에서 바라본 표적의 수평 운동을 나타내는 \dot{e}_z 는 기본적으로 관성좌표계에서의 시선(missile to target line of sight)벡터의 절대운동을 나타내는 수평시선변화율 λ_h 에서 탐색기가 장착된 yaw 감발의 운동을 의미하는 r_h 의 차로 표현될 수 있음을 알 수 있으며, 여기에 물운동에 의한 수직면 시선운동 coupling 항인 $\phi \lambda_v - e_y p$ 가 추가된 형태임을 알 수 있다. 즉, 물운동이 없는 경우에는 ϕ 및 p 가 모두 0이므로 식(5)는 $\dot{e}_z \approx \lambda_h - r_h$ 로 축약되어 r_h 로 회전하는 좌표계에서 λ_h 로 회전하는 시선벡터를 바라보았을 때의 결과와 일치한다.

2.2 유도기하에서 표현된 수평 시선 변화율

유도탄과 표적간의 상대거리 벡터를 $\vec{\rho}$ 라 하면, Coriolis Equation에 의하여 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다[2].

$$\begin{bmatrix} \ddot{\rho} \\ \dot{\rho} \end{bmatrix}_I = \begin{bmatrix} \ddot{\rho} \\ \dot{\rho} \end{bmatrix}_{LOS} + \begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \rho \end{bmatrix}_I \times \vec{\omega}_{LOSI} + 2 \vec{\omega}_{LOSI} \times \begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \rho \end{bmatrix}_{LOS} + \vec{\omega}_{LOSI} \times (\vec{\omega}_{LOSI} \times \vec{\rho}) \quad (6)$$

식(12)를 Y^{LOS} -방향 성분만 고려하여 미소각 근사를 수행하여 수평시선변화율을 구하면 다음과 같다.

$$\dot{\lambda}_h \approx -2 \frac{\dot{\rho}}{\rho} \lambda_h + \frac{a_y}{\rho} \quad (7)$$

여기서 a_y 는 Y^{LOS} 방향의 가속도로서 Y^{LOS} 방향에서 바라본 표적과의 유도탄간의 기동 가속도의 차이 ($a_y^{rel} - a_y^{msl}$)이다.

2.3 칼만필터를 이용한 수평 시선 변화율 추정기

본 절에서는 칼만필터를 이용하여 물운동을 고려한 수평 시선변화율 추정필터를 제안하였다. 필터의 상태변수로는 yaw 시선각 오차 e_z 와 수평면 시선변화율 λ_h 를 고려하였으며 시스템 모델은 식(5)와 (7)을 이용하여 다음과 같이 가정하였다.

$$\frac{d}{dt} \vec{x} = A \vec{x} + \vec{u} + \vec{\xi} \quad (8)$$

$$\text{여기서 } \vec{x} = \begin{bmatrix} e_z \\ \lambda_h \end{bmatrix}, \vec{u} = \begin{bmatrix} -r_h + \phi \lambda_v - e_y p \\ \frac{a_y}{\rho} \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a \end{bmatrix},$$

$a = 2 \frac{\dot{\rho}}{\rho}$ 이고, process noise vector는 공분산이 Q 인 영평균 정규잡음, 즉 $\vec{\xi} \sim \mathcal{N}(0, Q)$ 로 가정하였다. 측정치 모델로는 식(9)와 같이 탐색기 수신 신호 처리부에서 측정가능한 yaw 시선각 오차 e_z 를 고려하였다.

$$\vec{z} = H \vec{x} + \vec{v} \quad (9)$$

여기서 $H = [1 \ 0]$ 이고, 측정잡음은 $\vec{v} \sim \mathcal{N}(0, R)$ 라 가정하였다.

수평면 시선변화율 추정필터는 식(8)과 식(9)에 대하여 칼만 필터를 구성함으로써 구성할 수 있다. 본 논문에서는 필터 구현시 요구되는 계산량 및 필터 삽입 후 수행하여야 할 호밍유도 루우프의 해석의 용이성을 위하여, 식(8)의 a 를 적절한 상수로 고정하여 시불변시스템(time invariant system)으로 근사시켜 Steady State Kalman Filter를 구성하는 방식을 고려하였다. 이와같은 칼만필터를 통하여 e_z 와 λ_h 의 추정치를 구할 수 있으므로, 수평면 시선변화율 추정치 $\hat{\lambda}_h$ 는 상태변수 추정치중에서 λ_h 의 추정치를 선정하면 된다. 필터를 구동시키기 위한 필터입력 \vec{u} 의 획득 가능성을 생각해 보면 다음과 같다. 물각 ϕ 및 물변화율 p , 유도탄의 가속도 $-a_y$ 는 유도탄의 관성센서에서 측정가능하고, yaw 감발 각변화율 r_h 는 감발에 장착된 gyro에서 측정할 수 있다. 표적과의 거리 ρ 는 탐색기 신호처리부에서 제공되며, 수직시선변화율 λ_v 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\lambda_v = \frac{h\rho - h\dot{\rho}}{\rho^2 \cos \lambda_v} = \frac{h\rho - h\dot{\rho}}{\rho \sqrt{\rho^2 - h^2}} \approx \frac{h}{\rho} - \frac{h\dot{\rho}}{\rho^2} \quad (10)$$

여기서 h 는 유도탄의 고도이다. 마지막으로 탐색기 pitch 감발에서의 시선각 오차 e_y 는 pitch 감발 평면에 대해서도 시선각 추종 루우프를 구성한다면 쉽게 얻을 수 있지만, 본 논문에서는 pitch 감발에 대해서는 각 위치 제어기만을 구성하였다고 가정하고 다음과 같이 간접적으로 획득하는 방법을 이용하였다. 즉, $R_1(e_y)R_2(e_z)C_{hB}C_{BI} = C_{pLOS}C_{LOS}$ 인 관계를 추출하고 미소각 근사 시켜 얻어지는 식(11)을 이용할 수 있다.

$$e_y \approx -\lambda_v - \theta - \theta_h \quad (11)$$

식(11)에 의하면, 탐색기 pitch 감발각 명령을 $\theta_h = -\theta - \lambda_v$ 으로 인가하고 pitch 감발의 각위치 제어기가 시간 지연 없이 동작한다면 e_y 는 0으로 놓아도 무방할 것이다. 그러나 실제의 각 위치 제어기는 자체의 동특성을 지니므로 명령을 추종하는 과정에서 각도 오차를 포함하게 되며, e_y 는 이러한 각위치 제어기의 pitch

김발각 오차(pitch gimbal error angle)로 대체하여 사용할 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 결론

본 장에서는 시뮬레이션을 통하여 2장에서 제안한 필터의 성능을 검토하였다. 시뮬레이션시 탐색기의 구조 및 시선각 추종 루우프는 그림 1과 그림 2에 도시한 것을 이용하였으며, $K_s = 100$, $T_s = \frac{1}{2\pi}$ 로 가정하였다. 시선변화를 추정필터의 설계시 사용된 시스템 모델은 식 (8)에서 $a = 2 - \frac{250}{1000}$ 로 고정한 시물변 시스템이며, 필터의 이득은 공정잡음 및 측정잡음 공분산이 각각 $Q = \text{diag}(0.001^2, 0.5^2)$, $R = 0.01^2$ 인 경우의 대수 리카티 방정식의 해를 적용하여 설계하였다.

시뮬레이션은 초기 heading오차는 15도이고, 초기거리 5 km를 가지는 정지표적에 대하여 일정한 고도를 유지하며 유효항법상수(effective navigation ratio) 3인 비례항법을 수행하는 전형적인 sea skimming ASM의 호밍제어를 고려하였다. 이때 유도탄의 속도, 가속도 자동조종장치의 time constant 및 유도탄의 turning rate time constant는 250 m/sec, 0.5초, 2초인 경우를 가정하였다[1,3]. 또한 호밍시 그림 4와 같은 롤진동이 있다고 가정하였다.

제안된 필터의 성능 검토를 위하여, 참고문헌[1]의 그림 2-14 (B)에 제시된 필터를 적용한 호밍루프와의 성능을 비교하였다. 즉, 참고문헌[1] 방식을 이용한 시선변화를 추정값을 이용한 비례항법유도(Conventional Filter), 제안된 필터로 구한 추정값을 이용한 비례항법유도(Proposed Filter)에 대하여 시뮬레이션하고 성능을 비교하였다.

그림 5는 세 가지 경우에 대한 시선변화를 추정오차를 도시한 것으로서 기존의 필터는 롤진동의 영향을 많이 받아 크게 진동하는 추정오차를 보이는 반면에 제안된 필터는 롤진동에도 불구하고 우수한 성능으로 시선변화를 추정하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 제안된 필터를 이용하여 호밍루프를 구성하면 유도탄의 롤진동이 있는 경우에도 효율적인 호밍유도를 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Lin, Ching-Fang, *Modern Navigation Guidance and Control Processing*, Prentice-Hall, 1991.
- [2] Greenwood, D. T., *Principles of Dynamics*, Prentice-Hall, Inc., 1980.
- [3] P. Zarchan, *Tactical and Strategic Missile Guidance*, 2nd ed., Progress in Astronautics and Aeronautics Vol. 157, A Volume in the AIAA Tactical Missile Series, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1994.

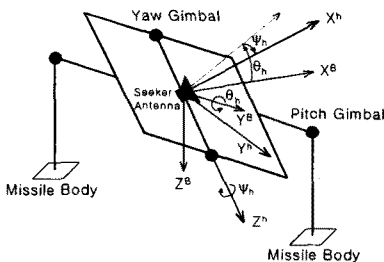


그림 1 2축 김발 탐색기 시스템

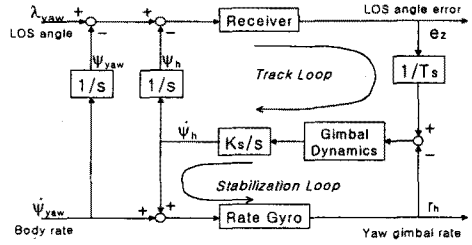


그림 2 Yaw 김발 평면의 시선각 추종 루우프

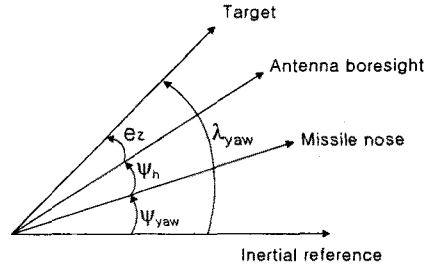


그림 3 안테나와 표적방향

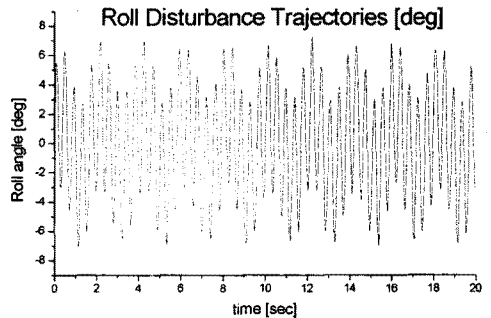


그림 4 시뮬레이션시 인가된 롤진동

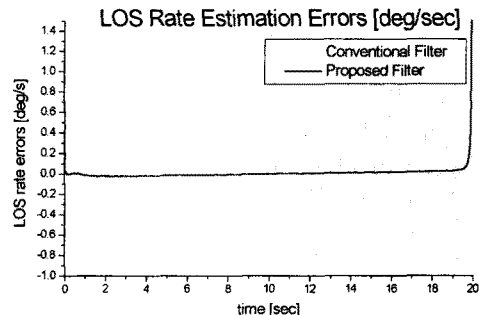


그림 5 수평면 시선변화를 추정 오차