

2축 김발 호밍 탐색기를 위한 시선변화율 추정기법

A LOS Rate Estimator for Homing Seekers with 2 Axis Gimbal System

황 익 호, 황 태 원

(Ick Ho Whang and Tae Won Hwang)

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 for a 2-axis gimbal system and the homing geometry is derived. A new LOS rate estimator is proposed by applying the Kalman filter theory to the LOS rate dynamics model. The proposed filter estimates LOS rates by taking roll motions into account. Simulation results show that the proposed filter produces smaller estimation errors than a conventional method.

Keywords : LOS rate estimator, Kalman filter, seeker, homing guidance

I. 개요

유도탄의 호밍 유도 알고리즘을 구현하기 위해서는 보통 2축 김발(2-axis gimbal)을 장착한 탐색기(seeker)를 많이 이용하게 된다. 일반적으로 탐색기는 전파, 적외선, 레이저 등 표적 정보를 얻기 위한 매체의 송수신 및 자료처리 부분과 김발 운동을 적절히 제어하는 부분으로 구성된다. 이 중 탐색기의 김발 운동 제어부에서는 유도탄과 표적간의 시선각(LOS, line of sight angle)의 변화를 추종하도록 김발들을 적절히 구동시켜 탐색기 안테나가 항상 표적을 지향할 수 있도록 시선각추종루프(LOS angle tracking loop)를 구성한다. 따라서 시선각추종루프를 구성하기 위하여 측정되는 정보들은 표적과 유도탄 사이의 시선각 변화에 대한 정보를 포함하게 되며, 시선변화율(line of sight rate)은 이와 같은 시선각 변화에 관련된 정보를 적절히 처리함으로써 추정될 수 있다[1][2].

한편, sea skimming ASM(anti-ship missile)은 대부분의 비행 구간을 일정한 고도를 유지하며 기동하게 되므로, 일반적으로 수평면과 수직면에 대하여 각각 독립적으로 유도조종 알고리즘을 구성하여 수직면에서는 고도제어를 수행하고 수평면에 대해서만 호밍 루프(homing loop)를 구성하는 경우가 많다. 이 경우 수직면에서의 호밍이 수행되지 않으므로 수직면에서의 시선변화율 정보는 불필요하게 된다. 따라서 탐색기에서는, 수평면에서의 시선변화율만을 측정하여도 무방하므로, yaw 김발 운동에 대해서만 시선각 추종루프를 구성하여 수평 시선변화율 정보를 얻을 수 있도록 하고, 수직면에 대한 시선각 추종 루프는 구성하지 않고 단지 유도탄의 고도 및 표적함까지의 거리를 고려하여 해면에 있는 표적함정을 지향하도록 pitch 김발을 회전시킨다. 이와 같은 개념으로 수직면과 수평면에 대하여 각각 유도조종 알고리즘을 설계하기 위해서는 유도탄의 롤각(roll angle)이 0으로 유지되어 유도탄의 pitch, yaw 기동면이 수직면, 수평면에 거의 일치하도록 하여야 하며, 이를 위하여 롤 안정화 루프(roll stabilization loop)를 도입하게 된다.

이와 같이 구성된 유도 조종 시스템은 롤각을 0으로 유지하는 동안에는 양호한 성능을 유지할 수 있으나, gust 등의 외부요인이나 유도탄의 기동시 발생하는 induced roll 등의 유도탄 운동 모델의 불확실성으로 인하여 롤진동이 유발되는 경우에는 양호한 유도 성능을 보장할 수 없다. 왜냐하면 롤진동이 수평면 시선변화율 측정치에 영향을 주어 부정확한 시선변화율 측정치를 제공할 수 있기 때문이다.

본 논문에서는 2축 김발을 갖는 탐색기 시스템에서 유도탄의 롤운동이 수평면 시선변화율에 미치는 영향을 수식으로 유도하고 이를 바탕으로 롤진동이 있는 경우에도 양호한 시선변화율 측정치를 제공할 수 있는 수평면 시선변화율 추정 필터를 제안하였다. 제안된 필터는 시뮬레이션을 통하여 기존의 방식과 성능을 비교하였다.

II. 롤운동을 고려한 수평면 시선변화율 추정

본 장에서는 sea skimming ASM에 많이 적용되는 전형적인 2축 김발 탐색기에 적용할 수 있는 수평면 시선변화율 추정 필터를 제안하였다. 본 장에서는 우선 본 논문에서 대상으로 하는 2축 김발 탐색기 시스템에 대하여 설명하고, 수평면 시선변화율과 탐색기 안테나에서의 시선각 오차(LOS angle error)와의 관계 및 호밍기하(homing geometry)상에서의 시선변화율의 동력학을 고려하여 칼만필터(Kalman filter) 이론을 적용하였다.

1. 2축 김발 탐색기 시스템

그림 1은 pitch 김발과 yaw 김발을 각각 외부 및 내부 김발로 하는 2축 김발 탐색기를 도식적으로 나타낸 것이다. 탐색기의 pitch 김발 평면에는 각 위치 제어기(angle position controller)가 구성되어 있으며, yaw 김발 평면에는 시선각 추종 루프가 구성되어 있다고 가정한다. 탐색기의 수신신호 처리부에서는 안테나에 수신된 정보를 모노펄스(monopulse) 기법 등을 통하여 처리하여 시선각 오차(LOS angle error)를 검출하게 된다[1][3]. 시선각 오차는 탐색기 안테나 boresight 방향과 시선벡터(line of sight vector) 방향과의 오차로 정의되며, 본 논문에서는 pitch 방향의 시선각 오차는 측정하지 않고 yaw 방향의 오차만 측정하는 경우를 고려하였다.

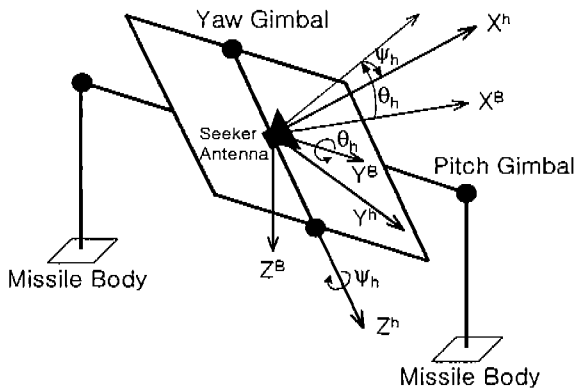


그림 1. 2축 김발 탐색기 시스템.
Fig. 1. 2-axis gimbal seeker system.

그림 2는 yaw 김발 평면에 대하여 구성된 전형적인 시선각 추종루프의 예이다[1]. 그림에서 λ_{yaw} , ψ_{yaw} 는 각각 탐색기 yaw 김발 평면에서 본 표적과의 시선각 및 유도탄의 회전각속도이며, ψ_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 상기한 각도들을 다시 도시한 것이다. 그림 2에서 알 수 있듯이 yaw 시선각 추종루프는 각도추적루프(track loop)와 안정화 루프(stabilization loop)로 이루어진다.

안정화 루프에서는 유도탄의 동체 회전으로 인한 안테나의 회전량을 보상해 주며 각도 추적 루프는 유도탄과 표적 간의 상대위치의 변화로 인한 시선각의 변화량을 보정해주는 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 방식으로서, 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 불 운동 등이 있어서 yaw 김

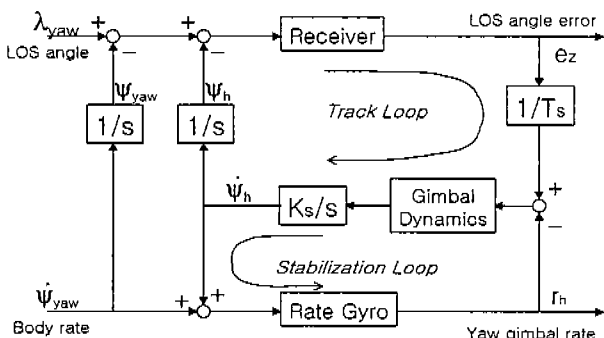


그림 2. Yaw 김발 평면의 시선각 추종 루프.
Fig. 2. LOS angle tracking loop in yaw gimbal plane.

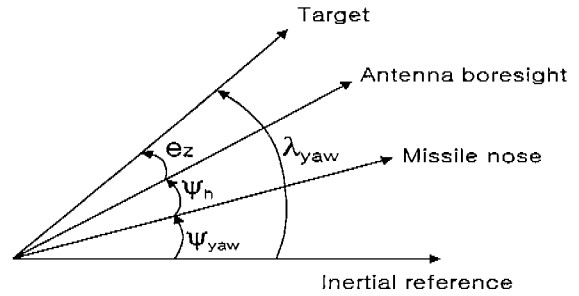


그림 3. Yaw 김발 평면에서의 안테나와 표적방향.
Fig. 3. Antenna and target directions in yaw gimbal plane.

발 평면이 수평면에 대한 회전운동을 포함하게 되는 경우에는 오차가 발생할 수 있다.

2. 2축 김발 시스템에서 표현된 수평면 시선변화율

본 절에서는 II.1절에 설명한 2축 김발 탐색기 시스템에서 표현되는 수평 시선변화율 모델을 유도하였다. 이를 위하여 표 1과 같이 다섯 개의 좌표계를 정의한다. 표에서 윗첨자는 해당 좌표계를 표시한다. 표에 제시된 각도 중에서 θ_h , ψ_h 는 김발이 실제로 회전한 각도로서 김발 축에 각도측정 센서를 장착하면 쉽게 측정이 가능한 변수이며, e_z 와 e_y 는 안테나에서 바라본 표적의 시선각 오차의 yaw 김발 평면 및 pitch 김발 평면에서의 성분이다. 이제 표 1의 좌표계의 정의에 따라 좌표계들 간의 변환행렬을 구하면 다음과 같다[4].

$$C_{BI} = R_x(\phi) R_y(\theta) R_z(\psi) \tag{1.a}$$

$$C_{hB} = R_z(\psi_h) R_y(\theta_h) \tag{1.b}$$

$$C_{ph} = R_y(e_y) R_x(e_z) \tag{1.c}$$

$$C_{LOS_p} = R_x(\phi_L) \tag{1.d}$$

표 1. 좌표계의 정의.

Table 1. Coordinate definitions.

좌표계 이름	좌표계 정의
I-frame (inertial frame)	<ul style="list-style-type: none"> 계산시 관성좌표계로 상정한 좌표계 X^I축: 초기시선방향 Y^I축: 수평면에서 X^I에 오른쪽 수직 방향 Z^I축: 오른손 법칙에 따름
B-frame (missile body frame)	<ul style="list-style-type: none"> I-frame을 yaw, pitch, roll 순서로 각각 ψ, θ, ϕ 만큼 회전시켜 유도탄의 동체에 일치하도록 한 좌표계 X^B축: 유도탄의 코(nose) 방향 Y^B축: 탄 Yaw 평면의 X^B에 우향 수직 방향 Z^B축: 오른손 법칙에 따름
h-frame (antenna heading frame)	<ul style="list-style-type: none"> B-frame을 pitch 및 yaw 김발축을 따라 각각 θ_h, ψ_h 회전시켜 안테나의 bore sight의 지향 방향을 표시한 좌표계 X^h축: antenna bore sight 방향 Z^h축: seeker yaw 김발축 방향 Y^h축: 오른손 법칙에 따름
p-frame (target pointing frame)	<ul style="list-style-type: none"> h-frame을 Z^h축을 따라 e_z만큼 회전시킨 후, 회전 후 생기는 Y축을 따라 e_y만큼 회전시켜 X^p축이 시선방향(Line Of Sight, LOS)이 되도록 구성한 좌표계
LOS-frame	<ul style="list-style-type: none"> p-frame을 X^p축을 따라 ϕ_L만큼 회전시켜 Y^{LOS}가 I-frame의 수평면에 존재하도록 구성한 좌표계

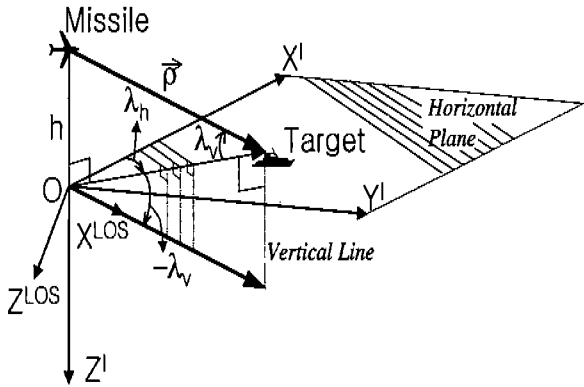


그림 4. I-frame과 LOS-frame의 관계.
Fig. 4. I-frame and LOS-frame.

식에서 C_{AB} 는 B-frame에서 A-frame으로의 변환행렬을 의미하고, $R_x(\alpha)$, $R_y(\alpha)$, $R_z(\alpha)$ 는 해당 좌표계를 각각 좌표계의 X, Y, Z 축을 따라 α 만큼 회전시켰을 경우의 변환 행렬을 의미한다. 예를 들면, $R_x(\phi)$ 는 X축을 따라 ϕ 만큼 회전시켰을 경우에 해당하는 좌표변환 행렬, 즉

$$R_x(\phi) \equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\phi & S\phi \\ 0 & -S\phi & C\phi \end{bmatrix} \text{을 의미한다.}$$

그림 4는 I-frame과 LOS-frame을 동시에 도시한 것이다. 그림에서 유도탄과 표적간의 상대거리 벡터 \vec{p} 는 시선벡터 방향과 일치하며 시선벡터 방향은 수평면 및 수직면에서의 시선각 성분 λ_h 와 λ_v 를 이용하여 표현된다. 따라서 그림으로부터 LOS-frame과 I-frame 간의 관계는 다음과 같음을 알 수 있다.

$$C_{LOSI} = R_y(-\lambda_v)R_x(\lambda_h) \tag{1.e}$$

$$\lambda_v = \sin^{-1} \frac{h}{\rho} \tag{2}$$

여기서, h와 ρ 는 각각 유도탄의 비행고도 및 유도탄과 표적간의 상대거리를 의미한다.

이제 I-frame에 대한 B-frame의 각변화율(angular rate)을 B-frame에서 표시한 벡터를 $\vec{w}_{BI}^B = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$ 라 하자. 그런데 I-frame에 대한 h-frame의 각변화율은 I-frame에 대한 B-frame의 각변화율에 B-frame에 대한 h-frame의 각변화율 성분만을 추가로 고려하면 되므로 $\vec{w}_{hI}^h - C_{hB} \vec{w}_{BI}^B = C_{hB} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta}_h \\ 0 \end{bmatrix} + R_z(\psi_h) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi}_h \end{bmatrix}$ 라 놓을 수 있으며 이를 정리하면 (3)과 같다[5].

$$\vec{w}_{hI}^h = \begin{bmatrix} \dot{p}_h \\ \dot{q}_h \\ \dot{r}_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\psi_h C\theta_h \dot{p} + S\psi_h \dot{q} - C\psi_h S\theta_h \dot{r} + S\psi_h \dot{\theta}_h \\ -S\psi_h C\theta_h \dot{p} + C\psi_h \dot{q} + S\psi_h S\theta_h \dot{r} + C\psi_h \dot{\theta}_h \\ S\theta_h \dot{p} + C\theta_h \dot{r} + \dot{\psi}_h \end{bmatrix} \tag{3}$$

식에서 $\dot{p}_h, \dot{q}_h, \dot{r}_h$ 는 \vec{w}_{hI}^h 의 성분을 의미하며, $C\alpha, S\alpha$ 는 각각 $\cos\alpha, \sin\alpha$ 를 의미한다.

(3)과 마찬가지로 방법으로 I-frame에 대한 p-frame 및 LOS-frame의 변화율을 계산하면,

$$\vec{w}_{pI}^p - C_{pI} \vec{w}_{hI}^h = C_{pI} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{e}_z \end{bmatrix} + R_y(e_y) \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{e}_y \\ 0 \end{bmatrix} \text{ 및}$$

$\vec{w}_{LOSI}^{LOS} = C_{LOSI} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\lambda}_h \end{bmatrix} + R_y(-\lambda_v) \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\lambda}_v \\ 0 \end{bmatrix}$ 로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\vec{w}_{pI}^p = \begin{bmatrix} \dot{p}_p \\ \dot{q}_p \\ \dot{r}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{e_y} C_{e_z} \dot{p}_h + C_{e_y} S_{e_z} \dot{q}_h - S_{e_y} \dot{r}_h - S_{e_y} \dot{e}_z \\ -S_{e_z} \dot{p}_h + C_{e_z} \dot{q}_h + \dot{e}_y \\ S_{e_y} C_{e_z} \dot{p}_h + S_{e_y} S_{e_z} \dot{q}_h + C_{e_y} \dot{r}_h + C_{e_y} \dot{e}_z \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\vec{w}_{LOSI}^{LOS} = \begin{bmatrix} S\lambda_v \dot{\lambda}_h \\ -\dot{\lambda}_v \\ C\lambda_v \dot{\lambda}_h \end{bmatrix} \tag{5}$$

식에서 $\dot{p}_p, \dot{q}_p, \dot{r}_p$ 는 I-frame에 대한 p-frame의 각변화율을 p-frame에서 도시한 벡터인 \vec{w}_{pI}^p 의 성분을 의미한다.

(3)에서와 같이 생각하면

$$\vec{w}_{LOSI}^{LOS} - C_{LOSp} \vec{w}_{pI}^p = \begin{bmatrix} \dot{\phi}_L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{라 놓을 수 있으므로 (4),}$$

(5), (1.d)를 이용하여 정리하면 수평면 및 수직면에서의 시선변화율에 대한 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\lambda}_v = -C\phi_L \dot{q}_p - S\phi_L \dot{r}_p \tag{6}$$

$$\dot{\lambda}_h = -\frac{S\phi_L}{C\lambda_v} \dot{q}_p + \frac{C\phi_L}{C\lambda_v} \dot{r}_p \tag{7}$$

여기서, $S\phi_L$ 및 $C\phi_L$ 은 다음 식으로부터 계산된다.

$$C_{LOSp} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ S\phi_L \\ C\phi_L \end{bmatrix} = C_{LOSI} C_{IB} C_{Bh} C_{hp} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

(7)에 (6),(4)를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\lambda}_h = \frac{S\phi_L}{C\lambda_v C\phi_L} (\dot{\lambda}_v + \frac{S_{e_y} C_{e_z} \dot{p}_h + S_{e_y} S_{e_z} \dot{q}_h + C_{e_y} \dot{r}_h + C_{e_y} \dot{e}_z}{S\phi_L}) \tag{9}$$

여기서, $S\phi_L, C\phi_L, \dot{p}_h, \dot{q}_h$ 는 (8), (3)로 주어진다. 이 결과를 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.

$$\dot{e}_z \approx \dot{\lambda}_h - r_h + \phi \dot{\lambda}_v - e_y p \quad (10)$$

(10)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 $\dot{\lambda}_h$ 에서 탐색기가 장착된 yaw 김발의 운동을 의미하는 r_h 의 차로 표현될 수 있음을 알 수 있으며, 여기에 롤운동에 의한 수직면 시선 운동 연성(coupling) 항인 $\phi \dot{\lambda}_v - e_y p$ 가 추가된 형태임을 알 수 있다. 즉, 롤운동이 없는 경우에는 ϕ 및 p 가 모두 0이므로 (10)은 $\dot{e}_z \approx \dot{\lambda}_h - r_h$ 로 축약되어 r_h 로 회전하는 좌표계에서 $\dot{\lambda}_h$ 로 회전하는 시선벡터를 바라보았을 때의 결과와 일치한다.

3. 유도기하 상에서 표현된 수평면 시선변화율

유도탄과 표적간의 상대거리 벡터를 $\vec{\rho}$ 라 하면, Coriolis Equation에 의하여 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다[4][5].

$$\begin{bmatrix} \ddot{\lambda} \\ \ddot{\rho} \end{bmatrix}_I = \begin{bmatrix} \ddot{\lambda} \\ \ddot{\rho} \end{bmatrix}_{LOS} + \begin{bmatrix} \dot{\omega}_{LOS} \\ \dot{\rho} \end{bmatrix} \times \vec{\rho} + 2 \vec{\omega}_{LOS} \times \begin{bmatrix} \dot{\lambda} \\ \dot{\rho} \end{bmatrix}_{LOS} + \vec{\omega}_{LOS} \times (\vec{\omega}_{LOS} \times \vec{\rho}) \quad (11)$$

(11)을 LOS-frame에서의 값으로 계산하여 Y^{LOS} 성분만 쓰고, 미소각근사를 적용하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{\lambda}_h \approx -2 \frac{\dot{\rho}}{\rho} \dot{\lambda}_h + \frac{a_y}{\rho} \quad (12)$$

여기서 a_y 는 Y^{LOS} 방향에서 바라본 표적함파 유도탄의 가속도의 차이($a_y^{tgt} - a_y^{msl}$)이다.

4. Kalman Filter를 이용한 수평면 시선변화율 추정기

본 절에서는 전형적인 sea skimming ASM에 대하여 적용할 수 있는 수평면 시선변화율 추정기를 제안하였다. 칼만 필터이론을 적용하기 위하여 yaw 시선각 오차 e_z 와 수평면 시선변화율 $\dot{\lambda}_h$ 를 상태변수로 고려하고, (10)과 (12)에 제시된 운동모델을 이용하였다. 이와 같이 결정된 필터설계를 위한 시스템 모델은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \vec{x} = A \vec{x} + \vec{u} + \vec{\xi} \quad (13)$$

$$\text{여기서 } \vec{x} = \begin{bmatrix} e_z \\ \dot{\lambda}_h \end{bmatrix}, \quad \vec{u} = \begin{bmatrix} -r_h + \phi \dot{\lambda}_v - e_y p \\ \frac{a_y}{\rho} \end{bmatrix},$$

$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a \end{bmatrix}$, $a = 2 \frac{\dot{\rho}}{\rho}$ 이고, 공정잡음벡터는 공분산이 Q 인 영평균 정규잡음, 즉 $\vec{\xi} \sim \mathcal{N}(0, Q)$ 로 가정하였다. 한편, II.1절에서 설명하였듯이, yaw 시선각 오차 e_z 는 탐색기 수신 신호 처리부에서 측정되므로 측정치 모델은 다음과 같이 가정하였다.

$$\vec{z} = H \vec{x} + \vec{v} \quad (14)$$

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

수평면 시선변화율 추정필터는 (13)과 (14)를 이용하여 칼만 필터를 구성함으로써 구성할 수 있다. 본 논문에서는 필터 구현시 요구되는 계산량 및 필터 삽입 후 수행하여야 할 호밍유도 루프의 해석의 용이성을 위하여, (13)의 a 를 적절한 상수로 고정하여 시불변시스템으로 근사시켜 Steady State Kalman Filter를 구성하는 방식을 고려하였다. 그림 5는 이와 같이 구성된 수평면 시선 변화율 추정필터이다. 그림에서 K는 대수 리카티 방정식(Algebraic Riccati Equation)로부터 구해지는 정상상태 칼만 이득이다[6]. 그림 5에서 볼 수 있듯이 제안된 필터는 유도탄의 운동을 표현하는 여러 가지 입력변수들을 이용하여 칼만필터를 구동시킴으로써 e_z 와 $\dot{\lambda}_h$ 의 추정치를 구하는 구조로 되어 있으며, 최종 출력은 상태변수 추정치 중에서 $\dot{\lambda}_h$ 의 추정치를 추출하여 수평면 시선변화율 추정치 $\hat{\lambda}_h$ 로 제공하도록 되어있다. 그림에 도시한 입력 변수중에서 점선으로 둘러싸인 부분은 유도탄의 롤운동이 수평면 시선변화율에 주는 영향을 제거하기 위하여 입력된 물리량으로서, 만약 유도탄의 롤운동이 매우 작다면 무시할 수 있는 입력이다.

제안된 필터를 구동시키기 위해서는 필터의 입력변수를 모두 얻을 수 있어야 하므로 이들 변수들의 획득 가능성을 검토해보자. 전술하였듯이 e_z 는 탐색기 수신 신호 처리부에서 얻을 수 있고, r_h 는 탐색기 yaw 김발에 장착된 rate gyro에서 측정 가능하다(그림 2 참조). 또한 a_y 는 Y^{LOS} 방향의 가속도로서 sea skimming ASM의 경우 표적함정의 기동능력은 유도탄에 비하여 무시할 만큼 작다고 할 수 있으므로 유도탄의 기동가속도의 Y^{LOS} 방향 성분의 반수로써(즉, $a_y = -a_y^{msl}$) 대치할 수 있다. p 와 ϕ 는 유도탄의 롤 변화율 및 롤각이므로 탄내에 장착된 IMU(inertial measurement unit)에서 측정할 수 있다.

$\dot{\lambda}_v$ 는 (2)에서 양변을 미분하여 미소각 근사를 수행하면 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\dot{\lambda}_v = \frac{\dot{h}\rho - h\dot{\rho}}{\rho^2 \cos \lambda_v} \approx \frac{\dot{h}}{\rho} - \frac{h\dot{\rho}}{\rho^2} \quad (15)$$

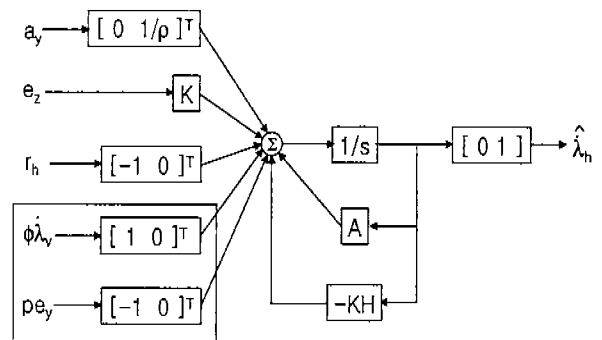


그림 5. 수평면 시선변화율 추정기.
Fig. 5. Horizontal LOS rate estimator.

여기서 h 는 유도탄의 고도, ρ 는 표적함까지의 상대거리를 의미하는데 각각 유도탄의 IMU 및 탐색기에서 측정할 수 있다.

탐색기 pitch 김발에서의 시선각 오차 e_y 는 pitch 김발 평면에 대해서도 시선각 추종 루프를 구성한다면 쉽게 얻을 수 있지만, 본 논문에서는 pitch 김발에 대해서는 각 위치 제어기만을 구성하였다고 가정하였으므로 유도탄에서 이용 가능한 변수로써 추정하여야 한다.

$$R_y(e_y) = \begin{bmatrix} C_{e_y} & 0 & -S_{e_y} \\ 0 & 1 & 0 \\ S_{e_y} & 0 & C_{e_y} \end{bmatrix} \text{이므로,}$$

$$R_y(e_y)R_z(e_z)C_{IB}C_{BI} = C_{\rho LOS}C_{LOSI} \text{를 이용하면,}$$

$$S_{e_y} = [0 \ 0 \ 1] R_y(e_y) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= [0 \ 0 \ 1] C_{\rho LOS}C_{LOSI}C_{IB}C_{BI}R_z(-e_z) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

임을 알 수 있으며, (16)을 미소각 근사하여 정리하면 (17)을 얻을 수 있다.

$$e_y \approx -\lambda_v - \theta - \theta_h \quad (17)$$

따라서, 탐색기 pitch 김발각 명령을 (18)로 인가하고 pitch 김발의 각위치제어기가 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 오차로 대치하여 사용할 수 있다.

$$\theta_h = -\theta - \lambda_v \quad (18)$$

마지막으로 (18)의 김발 pitch각 명령을 생각해 보면, θ 는 수평면에 대한 유도탄의 pitch각이며 λ_v 는 유도탄의 비행고도에서 바라본 표적함정을 내려다보는 각이므로, 결과적으로 (18)의 θ_h 는 시선벡터와 B-frame의 X^B 축이 이루는 pitch각이라 생각할 수 있다. 즉, 유도탄에 장착된 탐색기는 유도탄의 자세와 고도를 고려하여 탐색기 안테나가 표적함정을 내려다 볼 수 있도록 탐색기 pitch 김발을 회전시켜야 함을 의미한다. (18)에서 θ 는 유도탄의 IMU에서 측정가능하며, λ_v 는 (2)를 이용하여 계산할 수 있는 값이다.

III. 시뮬레이션

본 장에서는 시뮬레이션을 통하여 II장에서 제안한 필터의 성능을 검토하였다. 시뮬레이션시 탐색기의 구조 및 시선각 추종 루프는 그림 1과 그림 2에 도시한 것을 이용하였다. 이때 Receiver dynamics, Gimbal dynamics, Rate gyro dynamics는 시선각추종루프에 비하여 모두 대단히 빠른 동특성을 가진다는 가정하에 1로 근사하였으며, $K_s = 100$, $T_s = \frac{1}{2\pi}$ 인 경우를 고려하였다.

시뮬레이션은 일정한 고도를 유지하며 수평면에서 비례항법을 수행하는 전형적인 sea skimming ASM의 호밍궤적을 고려하였다. 수평면에서의 호밍유도 알고리즘은 유효항법상수 3을 적용한 비례항법 유도(PNG)를 적용하였으며, 수평면에서의 초기 heading오차는 15도이고, 초기거리 5km를 가지는 정지표적에 대한 호밍을 상정하였다. 유도탄의 yaw 자동조종장치는 (19)와 같은 전달함수를 가지며, pitch 운동의 전달함수는 yaw 운동의 전달함수와 같다고 가정하였다.

$$G_a(s) = \frac{A(s)}{A_c(s)} = \frac{1}{T_{ap}s + 1} \quad (19.a)$$

$$G_r(s) = \frac{R(s)}{A_c(s)} = \frac{T_a s + 1}{V_m} \frac{1}{T_{ap}s + 1} \quad (19.b)$$

식에서 $A_c(s)$, $A(s)$, $R(s)$ 는 각각 기동가속도 명령, 성취된 기동가속도, 유도탄의 yaw 회전각속도이며, V_m , T_{ap} , T_a 는 각각 유도탄의 속도, 가속도 자동조종장치의 time constant 및 turning rate time constant로써 250m/sec, 0.5초, 2초인 경우를 가정하였다[1][2].

II장에서 제시한 시선변화를 추정필터의 설계시 사용된 시스템 모델은 (5)에서 $a = 2 - \frac{250}{1000}$ 로 고정된 시분변 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[6]. 제안된 시선변화를 추정필터의 성능을 비교검토하기 위하여 널리 이용되는 전형적인 시선각추정알고리즘을 선정하였는데 (20)과 같이 표현된다([1]의 fig.2-14참조).

$$\hat{\lambda}_c(t) = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{s}{1+T_c s} E_\lambda(s)\right\} + \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{1+T_c s} R_h(s)\right\} \quad (20)$$

여기서 $\mathcal{L}^{-1}\{\cdot\}$ 는 라플라스 역변환이며, $E_\lambda(s)$, $R_h(s)$ 는 각각 $e_\lambda(t)$, $r_h(t)$ 의 라플라스 변환이다. 즉, e_λ 를 $\frac{s}{1+T_c s}$ 의 필터에 통과시켜 \hat{e}_λ 를 추정하고 여기에 r_h 를 더하여 줌으로써 관성좌표계에서의 시선변화율을 추정하는 방식이다. 이때 r_h 에도 저역통과필터를 적용한 이유는 \hat{e}_λ 의 추정시 $\frac{s}{1+T_c s}$ 에 의하여 발생하는 시간지연을 보상하여 동일한 시간대의 r_h 와 \hat{e}_λ 를 이용하기 위해서이다. 시뮬레이션시 T_c 는 그림 2의 T_s 와 같은 값을 이용하였다.

서론에서 설명하였듯이 유도탄이 순항하는 경우에는 일반적으로 물운동이 거의 없으나, gust 등의 외란이 존재하는 경우, 유도탄의 기동으로 인한 induced roll이 크게 작용하는 경우 등에는 유도탄의 롤 진동이 발생할 수 있으며, 본 논문에선 이러한 경우를 가정하여 그림 6과 같은 롤진동이 있을 때의 호밍상황을 시뮬레이션하였다.

제안된 필터와 기존의 필터간의 성능비교를 위하여, 식 (20)의 시선변화율 추정치를 이용한 비례항법유도, 제안된 필터로 구한 추정치를 이용한 비례항법유도, 시선변화율의 참값을 이용한 비례항법 유도의 세가지 방식으로 호밍유도

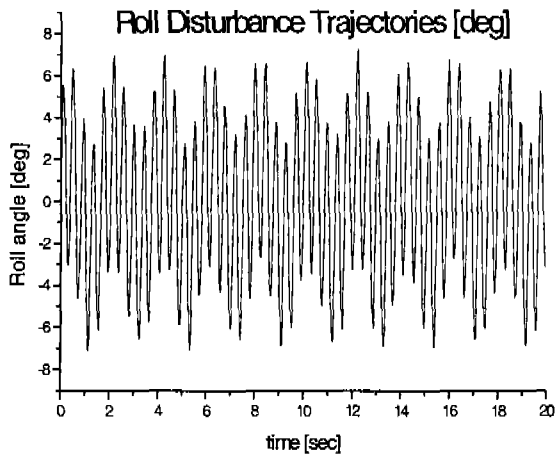


그림 6. 시뮬레이션시 인가된 롤진동.
Fig. 6. Roll motions considered in simulations.

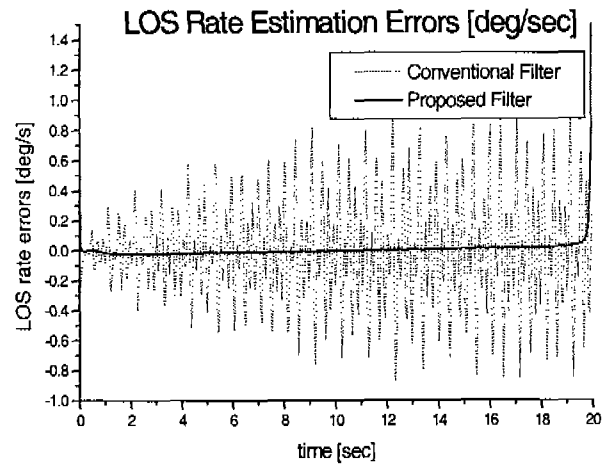


그림 9. 수평면 시선변화를 추정 오차.
Fig. 9. Horizontal LOS rate estimation errors.

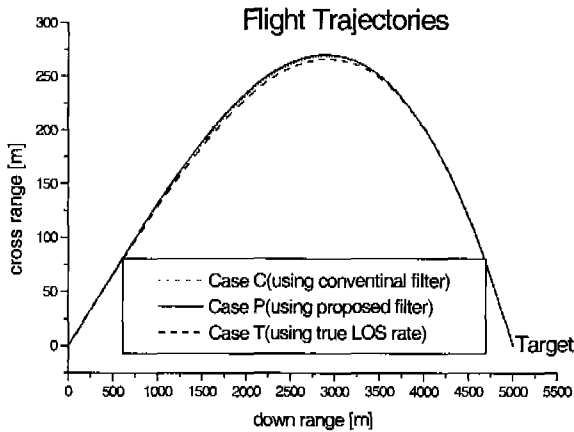


그림 7. 유도탄의 비행궤적.
Fig. 7. Flight trajectories.

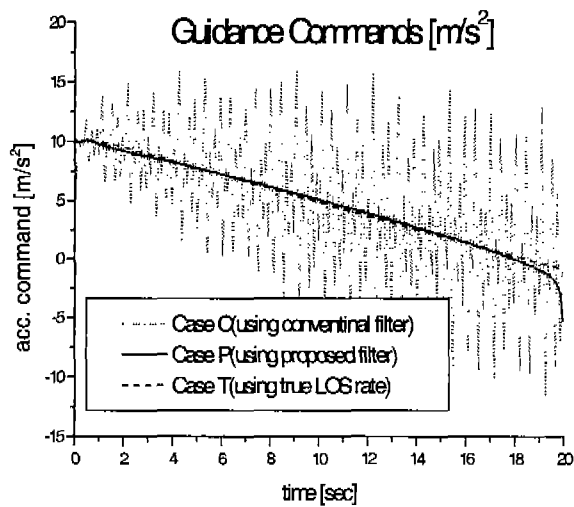


그림 8. 유도명령.
Fig. 8. Guidance commands.

루프를 구성하고 각각에 대하여 시뮬레이션하였다. 이제 편의를 위하여 이 세 가지 경우를 각각 Case C, Case P, Case T 라 칭하기로 하자.

그림 7은 세 가지 경우에 대한 호밍궤적을 도시한 것으로서 세 가지 경우 모두 유사한 비행궤적을 형성함을 알 수 있다. 그러나 그림 8에서 볼 수 있듯이 세 가지 경우에 대한 유도명령은 큰 차이를 보이는데, Case P는 Case T와 거의 일치하는 유도명령을 보이는데 반하여 Case C는 롤진동의 영향으로 크게 진동하는 유도명령을 발생함을 알 수 있다. 이러한 유도명령의 진동은 불필요한 조종면(control fin)의 운동을 만들어 낼 수 있으며, 그 결과로 증가되는 항력(drag force)은 유도탄의 호밍 속도를 저하시켜 유도탄의 탄두효과 및 생존성의 저하로 연결될 수 있다.

그림 9는 제안된 필터와 기존의 필터로 시선변화율을 추정 한 추정오차를 함께 도시한 것으로서 기존의 필터는 롤진동의 영향을 많이 받아 크게 진동하는 추정오차를 보이는 반면에 제안된 필터는 인가된 롤진동의 영향을 효과적으로 제거하여 우수한 성능으로 시선변화율을 추정하고 있음을 볼 수 있다. 한편, 제안된 필터의 추정오차가 호밍 종료점 부근에서 크게 발산하는 이유는 상대거리가 매우 작은 경우에 발생할 수 있는 필터 모델과 실제 모델간의 차이 때문인 것으로 생각된다. 즉, (14)에서 볼 수 있듯이 시선변화율의 밴드폭은 표적과 유도탄 간의 상대거리 감소에 따라 급격히 증가하지만 설계시 이용한 시스템 모델은 이러한 밴드폭의 증가를 고려하지 않은 시불변 시스템((13)의 a 를 상수로 고정함)이므로 상대거리가 작은 경우에는 모델링 오차가 급격히 증가하기 때문이다. 그러나 실제 호밍 유도 알고리즘에서는 대체로 guidance cutoff range를 설정하는 점을 고려한다면 제안된 필터의 이러한 특성이 실제의 호밍 루프에서는 크게 영향을 주지 않을 것으로 생각되며, 이러한 성질이 호밍 성능에 문제가 되는 경우에는 필터의 모델을 결정할 때 guidance cutoff range를 고려하여 필터 모델 파라미터 a ((15)참조)를 적절히 조정하면 될 것으로 생각된다.

IV. 결론

본 논문에서는 yaw 김발에만 시선각 추종 루프가 구성되어 있는 전형적인 sea skimming ASM 호밍 시스템에 적용할 수 있는 수평면 시선 변화를 추정 필터를 제안하였다. 필터

는 2축 김발 탐색기 시스템에서 표현되는 수평면 시선변화율의 운동방정식과 호밍기하에서 표현되는 수평면 시선변화율의 운동방정식을 동시에 고려하여 칼만필터를 구성하는 방법으로 제안되었으며 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 검토하였다. 제안된 필터는 기존의 방식으로는 고려할 수 없었던 유도탄의 롤운동에 의한 영향도 동시에 고려하여 필터링 할 수 있는 장점이 있으며, 시뮬레이션을 통하여 성능을 비교한 결과 기존의 방식에 비하여 매우 우수한 추정성능을 보여주었다.

참고문헌

- [1] Lin, Ching-Fang, *Modern Navigation Guidance and Control Processing*, Prentice-Hall, 1991.
- [2] 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.
- [3] Hovanessian, S. A., *Radar System Design and Analysis*, Artech House, Inc., 1984.
- [4] Greenwood, D. T., *Principles of Dynamics*, Prentice-Hall, Inc., 1980.
- [5] Blakelock, J. H., *Automatic Control of Aircraft and Missiles*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- [6] Lewis, F. L., *Optimal Estimation*, John Wiley & Sons, 1986.
- [7] 황익호, "2축 김발 호밍 탐색기에서의 롤운동 보상" 2001 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, pp. 1932, 7. 2001.



황 익 호

1988년 서울대 공대 제어계측공학과 졸업. 동대학원 석사(1990). 동대학 박사(1995). 1995년~현재 국방과학연구소 유도조종기법팀 선임연구원.



황 태 원

1994년 KAIST 항공우주공학과 졸업. 동대학원 석사(1996). 1996년~현재 국방과학연구소 유도조종기법팀 연구원.