

칼만 필터를 이용한 2축 회전형 관성항법장치의 초기위치 보정 정박 중 정렬 알고리즘 설계

Design of an Initial-position Update Mooring Alignment Algorithm for Dual-axis Rotational INS Using a Kalman Filter

류경돈*

국방과학연구소

Kyung-don Ryu*

Missile Research Institute, Agency for Defense Development, Daejeon, 34060, Korea

[요 약]

관성항법장치는 정지 상태에서 가속도계 및 자이로 센서가 측정한 중력과 지구 자전 각속도 정보를 이용하여 정렬을 수행하며, 일반적으로 선형 항법 오차 모델 기반의 영속도 보정 칼만필터를 사용하여 수행된다. 하지만 이는 정지 상태를 가정하여 설계된 알고리즘으로 해상 정박 중 정렬을 수행하는 경우, 파도로 인해 발생하는 움직임으로 정렬 오차가 커지거나 필터가 발산하게 된다. 본 논문에서는 큰 방위각 오차 모델과 초기위치 보정 기법을 사용하여 해상 플랫폼을 위한 정박 중 정렬 알고리즘을 설계하고 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 또한 이를 회전형 관성항법장치에 적용하였을 경우 바이어스가 상쇄되는 원리를 통해 비약적으로 성능이 개선됨을 확인하였다.

[Abstract]

INS(inertial navigation system) aligns itself using gravity and Earth's rotational rate from accelerometers and gyro sensors when stationary. Typically, ZUPT(zero velocity update), which is based on a linear error model Kalman filter, is used when it is stationary. However, such algorithms assume stationary conditions, leading to increased alignment errors or filter divergence during maritime mooring due to wave-induced motion. This paper designs a mooring alignment algorithm for maritime platforms using a Kalman filter, which uses large heading angle error model and an initial position correction technique. And it is validated by simulation. Furthermore, it is confirmed that applying this to a rotational INS dramatically improves performance through the principle of bias cancellation.

Key word : Alignment, Inertial navigation system, Large heading error, Rotational INS.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2024.28.4.379>



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 23 July 2024; Revised 28 August 2024

Accepted (Publication) 29 August 2024 (30 August 2024)

*Corresponding Author, Kyung-don Ryu

Tel: *** - **** - ****

E-mail: goast3309@gmail.com

I. 서론

항법을 시작하기 전 관성항법장치의 몸체 좌표계와 항법 좌표계 사이의 초기 자세를 찾는 과정을 정렬이라고 한다. 정렬 정확도에 따라 이후 항법 성능이 결정되며, 특히 장시간 정밀한 항법을 위해서는 정렬 정확도가 매우 중요하다. 정렬 알고리즘은 정지 상태 정렬과 운항 중 정렬로 나눌 수 있다. 정지 상태 정렬 알고리즘은 정적인 환경에서 측정된 중력과 지구 자전 각속도를 기반으로 자세를 추정하며, GCA (gyro compassing alignment) 방식과 선형 항법 오차 모델 기반의 칼만 필터를 이용한 방식이 주로 사용된다. 반면, 선박이나 항공기와 같이 움직이는 플랫폼에서는, 중력과 지구 자전 각속도를 정확히 측정할 수 없다. 따라서 선박의 해상 정박 중 정렬을 위해서는 운항 중 정렬 알고리즘이 필요하며, 관련된 연구로는 관성 좌표계 기반 정렬(IBA; inertial frame based alignment) 알고리즘[1]-[3]과 큰 방위각 오차 모델 기반의 정렬 알고리즘이 있다[4]. 여기서 큰 방위각 오차 모델 기반 정렬 알고리즘의 경우 일반적으로 실시간 GNSS(global navigation satellite system) 정보를 측정치로 사용하여 선박의 출항 이후 기동하는 과정에서 GNSS와 관성항법장치 사이의 위치오차를 측정치로 사용하여 운항 중 정렬을 수행한다[5]. 하지만, 본 논문에서는 이를 선박의 정박 중 정렬 알고리즘으로 사용하는 방안을 제안한다. 선박은 출항 전 정박 중 정렬을 수행하며, 특수한 경우 바다 한가운데에서 닻을 내린 채 정박 중 정렬을 수행해야 한다. 본 논문에서는 이러한 상황에 적합한 정박 중 정렬 알고리즘을 설계하고 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하였다. 또한 2축 회전형 관성항법장치에 적용하여 추가적인 성능 개선 정도를 확인하였다. 2장에서는 제안한 정박 중 정렬 알고리즘을 설명하고, 3장에서는 회전형 관성항법장치의 원리와 정렬 정확도를 높이기 위해 사용한 회전 시퀀스에 대해 설명하였다. 4장에서 시뮬레이션 분석 결과를 보이고, 5장의 결론으로 마무리하였다.

II. 정박 중 정렬 알고리즘

일반적인 정렬 알고리즘은 개략정렬 단계와 정밀정렬 단계로 구분된다[6]. 하지만, 정밀정렬 단계에서 칼만 필터를 사용한 기존의 방식과 달리 본 논문에서는 개략정렬 단계에서 큰 방위각 오차 모델 기반 칼만 필터를 사용하여 정렬을 수행하고, 이후 정밀정렬 단계에서 기존과 같은 작은 방위각 오차 기반 선형 칼만 필터로 전환하여 정렬을 수행하였다.

2-1 작은 방위각 오차 모델

항법 오차 모델로 일반적으로 사용되는 선형 오차 모델이며, ϕ -모델로 알려져 있다. 여기서는 큰 방위각 오차 모델과 구분하기 위해 작은 방위각 오차 모델로 명명하였다. 두 모델 모

두 기준에 많은 연구로부터 검증되었으므로 여기에서는 모델의 상세 유도과정은 생략한다[4]-[6].

1) 자세 오차 모델

자세 오차 모델을 C_b^n 의 관점에서 NED 축을 기준으로 표현하면 식(1)과 같이 정의된다. 마찬가지로 수평축 자세 오차와 방위각 오차가 모두 충분히 작다는 가정하에 최종적으로 식(3)과 같이 표현할 수 있다. 여기에서 $\delta\psi$ 는 자세 오차를 의미한다.

$$\delta C_b^n = \hat{C}_b^n - C_b^n \tag{1}$$

$$\hat{C}_b^n = (I - \langle \delta\psi^n \times \rangle) C_b^n$$

$$\langle \delta\psi^n \times \rangle = \begin{bmatrix} 0 & -\delta\psi_D & \delta\psi_E \\ \delta\psi_D & 0 & -\delta\psi_N \\ -\delta\psi_E & \delta\psi_N & 0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\delta C_b^n = -\langle \delta\psi^n \times \rangle C_b^n \tag{3}$$

2) 속도 오차 모델

일반적으로 속도 오차 모델은 식(4)와 같이 표현되며, 수평축 자세 오차와 수직축, 즉 방위각 자세 오차가 모두 충분히 작다는 가정하에 Ψ 는 식(5)와 같이 정의된다.

$$\delta \dot{V}^N = -\Psi C_b^n f^b + C_b^n \delta f^b - (2\delta\omega_{ie}^N + \delta\omega_{en}^N) \times V^N - (2\omega_{ie}^N + \omega_{en}^N) \times \delta V^N + \delta g^N \tag{4}$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} 0 & -\delta\psi_z & \delta\psi_y \\ \delta\psi_z & 0 & -\delta\psi_x \\ -\delta\psi_y & \delta\psi_x & 0 \end{bmatrix} \tag{5}$$

2-2 큰 방위각 오차 모델

1) 자세 오차 모델

수평축 자세 오차가 작고 방위각 오차가 큰 경우에는 C_b^h 를 이용하여 식(6)~(7)과 같이 수평축 자세와 방위각을 분리하여 생각할 수 있다.

$$\hat{C}_b^h = (I - \langle \delta\psi^h \times \rangle) C_b^h$$

$$\langle \delta\psi^h \times \rangle = \begin{bmatrix} 0 & -\delta\psi_z & \delta\varphi_y \\ \delta\psi_z & 0 & -\delta\psi_x \\ -\delta\psi_y & \delta\psi_x & 0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\hat{C}_h^n = C_h^n + \delta C_h^n$$

$$\delta C_h^n = \begin{bmatrix} \delta\cos\psi & -\delta\sin\psi & 0 \\ \delta\sin\psi & \delta\cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

자세 오차 모델링을 위해 δC^{nh} 의 고차 항을 생략하여 식

(8)~(11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta C_b^n = \tilde{C}_h^n \tilde{C}_b^h - C_b^n \approx (\delta C_h^n - C_h^n \langle \delta \psi \times \rangle) C_b^h \quad (8)$$

$$\delta C_b^n = E C_b^d \quad (9)$$

$$E \equiv \delta C_h^n - C_h^n \langle \delta \psi^h \times \rangle = \begin{bmatrix} \alpha_2 & -\alpha_1 & -\delta \psi_E \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \delta \psi_N \\ \delta \psi_y & -\delta \psi_x & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \alpha_1 = \delta \sin \psi - \delta \varphi_z \cos \psi \\ \alpha_2 = \delta \cos \psi + \delta \varphi_z \sin \psi \end{cases} \quad (11)$$

최종적으로 선형 칼만필터의 자세 오차 모델은 식(9)의 양변을 미분하여 식 (12)~(15)와 같이 얻을 수 있다.

$$\dot{\alpha}_1 = \dot{\psi} \alpha_2 + \delta \omega_D \cos \psi \quad (12)$$

$$\dot{\alpha}_2 = -\dot{\psi} \alpha_1 - \delta \omega_D \sin \psi \quad (13)$$

$$\dot{\delta \varphi}_x = \dot{\psi} \delta \varphi_y - \delta \omega_E \sin \psi - \delta \omega_N \cos \psi \quad (14)$$

$$\dot{\delta \varphi}_y = -\dot{\psi} \delta \varphi_x - \delta \omega_E \cos \psi + \delta \omega_N \sin \psi \quad (15)$$

2) 속도 오차 모델

위의 자세 오차 모델과 식(4)로부터 식(16)과 같은 속도 오차 모델을 얻을 수 있다.

$$\delta \dot{V}^N = E C_b^h f^b + C_b^n \delta f^b - (2\delta \omega_{ie}^N + \delta \omega_{en}^N) \times V^N - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta V^N \quad (16)$$

2-3 초기위치 보정 알고리즘

지상 정지 상태에서가 아닌 해상 환경에서 영속도 보정 알고리즘을 사용할 경우, 과도와 해풍으로 발생하는 병진운동이 속도 오차를 유발하여 정상적인 정렬이 불가능하다.

본 논문에서는 측정치로 사전에 측정된 초기위치를 사용하는 방안을 제안한다. 사전에 GNSS 수신기와 같은 위치 측정 센서를 통해 초기위치를 측정하고 이를 사용하여 칼만 필터의 위치 추정값을 보정 한다. 초기위치 측정오차가 10m 정도일 경우에도 방위각 오차에 미치는 영향은 10⁻⁴deg 이내로 항법 관점에서 무시할만한 오차로 볼 수 있고, 이는 영속도 보정과 비교할 때 상대적으로 보정 정보의 정확도가 높음을 의미한다. 칼만 필터의 상태변수는 식 (17)과 같고, 초기위치 보정을 위한 측정값은 식 (18)과 같다.

$$\hat{x} = [\delta l \ \delta L \ \delta h \ \delta V_E \ \delta V_N \ \delta V_U \ \delta \psi_x \ \delta \psi_y \ \alpha_1 \ \alpha_2] \quad (17)$$

$$Z = \begin{bmatrix} \lambda(t) - \lambda_{init} \\ l(t) - l_{init} \\ h(t) - h_{init} \end{bmatrix} \quad (18)$$

III. 회전형 관성항법장치

3-1 회전형 관성항법장치의 원리

회전형 관성항법장치는 일정한 회전 순서로 관성센서 조립체를 회전시켜 관성센서 오차를 서로 상쇄시켜 항법 성능을 개선하는 원리를 사용한다[7]. 앞의 식(1)의 속도 및 자세 오차 방정식을 각각 속도 오차 벡터와 오일러 각 벡터 관점에서 표현하면 식(19),(20)과 같다. 해당 식에서 의도적인 회전을 통해 C_bⁿ을 변화시킬 수 있으며, 적절한 회전 시퀀스를 선정하여 시간에 대한 속도 및 자세 오차의 적분 값을 0으로 만들 수 있다.

$$\delta \dot{v}^n = -\epsilon \times f^n + C_b^n \delta f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta v^n + \delta g^n \quad (19)$$

$$\dot{\psi} = -\omega_{in}^n \times \epsilon + \delta \omega_{in}^n + C_b^n \delta \omega_{ib}^b \quad (20)$$

3-2 정렬 회전 시퀀스

회전형 관성항법장치는 상황에 따라 적절한 회전 시퀀스를 선정하여 관성항법장치의 오차를 상쇄시킬 수 있다. 이론적으로는 16번의 회전을 통해 정지 상태에서 센서의 바이어스 및 환산계수 오차를 0으로 만들 수 있다[8]. 한편, 정렬 성능은 방위각 오차에 의해 결정되며 방위각 오차는 E축 자이로 바이어스에 영향을 받는다. 회전형 관성항법장치의 원리를 이용하여 그림 1과 같은 요 축 방향 회전을 통해 E축 바이어스를 상쇄시킴으로써 방위각 추정 정확도를 높일 수 있다.

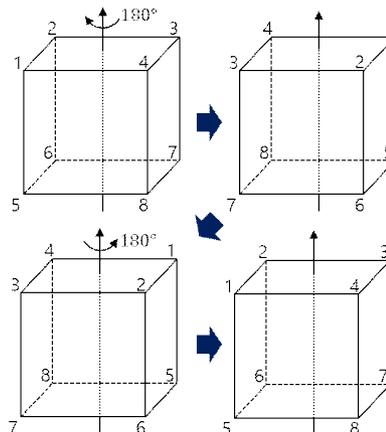


그림 1. 요 축 방향으로의 2-회전 시퀀스.
Fig. 1. 2-rotation sequence in yaw axis.

IV. 시뮬레이션 결과분석

4-1 시뮬레이션 개요

알고리즘 검증을 위해 실제 정박 중 환경과 유사한 크기와 주파수를 갖는 모의 파도를 그림 2와 같이 구현하였다. 파도는 3축에 대한 각운동과 병진운동 총 6개를 생성하였으며, 각각은 식 (21)과 같이 서로 다른 주파수와 크기를 갖는 정현파 6개의 합으로 구성된다. Yaw 축 파도의 경우 30도의 바이어스를 갖는다. 위상 ϕ 는 구간 $[0, 2\pi]$ 사이의 랜덤한 값을 갖는다. 이로부터 각속도, 가속도를 산출한다. 여기에 센서의 바이어스, 환산 계수, 랜덤워크, 비 정렬 오차를 추가하여 센서 데이터를 모의하였다. 모의 센서 데이터를 사용하여 몬테카를로 100회 시뮬레이션을 수행하였다.

$$X^{motion}(t) = \sum_{i=1}^6 (A_i^{motion} \sin(2\pi f_i^{motion} t + \phi)) \quad (21)$$

$motion = \{roll, pitch, surge, sway, heave\}$

$$X^{yaw}(t) = 30^\circ + \sum_{i=1}^6 (A_i^{yaw} \sin(2\pi f_i^{yaw} t + \phi)) \quad (22)$$

표 1. 식(21),(22)에 해당하는 진폭과 주파수
Table 1. Amplitude and Frequency in expression (21),(22).

i		1	2	3	4	5	6
roll	Amp	0.2	0.5	0.8	0.9	0.6	0.3
	Freq	0.62	0.78	0.86	1.21	1.45	1.58
pitch	Amp	0.5	0.8	0.9	0.7	0.4	0.2
	Freq	0.67	0.85	1.06	1.13	1.29	1.40
yaw	Amp	0.2	0.4	0.5	0.3	0.1	0.6
	Freq	0.33	0.80	0.96	1.11	1.22	1.30
surge	Amp	0.12	0.23	0.38	0.41	0.20	0.41
	Freq	0.32	0.58	0.66	0.81	1.16	1.28
sway	Amp	0.21	0.42	0.43	0.37	0.16	0.10
	Freq	0.44	0.65	0.90	1.03	1.19	1.20
heave	Amp	0.4	0.7	0.8	0.6	0.3	0.1
	Freq	0.62	0.81	1.00	1.01	1.09	1.20

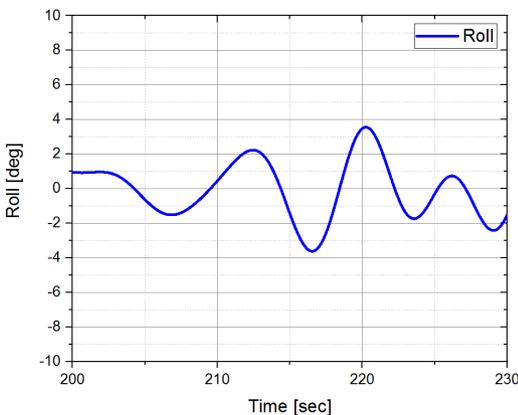


그림 2. 모의파도 생성 예시 (롤 방향, 일부 구간 확대)
Fig. 2. Example of generated wave (roll, zoom in).

해상 환경에서의 최적 정렬 알고리즘을 선정하기 위해 먼저,

개략정렬 성능을 분석하였다. 먼저, 기존의 개략정렬 알고리즘으로는 GCA, IBA 방식이 있다. 하지만, GCA 방식은 움직임이 거의 없는 지상 환경에서 사용하기 적합한 알고리즘으로, 본 논문에서 사용된 해상 시뮬레이션 환경에서는 적합하지 않고 실제로 다른 알고리즘들과 비교할 수 없을 정도로 성능 차이가 커서 비교 대상에서 제외하였다. 따라서 본 논문에서는 기존 연구에서 해상정렬 알고리즘으로 제안하였던, IBA 알고리즘과의 성능을 비교하였다.

본 논문에서는 큰 방위각 오차 모델 기반 정렬 알고리즘을 제안하였고, 간단하게 LHA(large heading error model based alignment)라고 명명하기로 한다. 이와 대비되는 개념으로 기존에 정밀정렬을 위한 칼만필터 시스템 모델로, 작은 방위각 오차를 가정한 모델을 SHA(small heading error model based alignment)라고 구분하였다. LHA는 측정치로 영속도 또는 초기위치를 사용하거나 둘 다 사용할 수도 있다. 편의를 위해 측정치가 영속도인지, 초기위치인지 혹은 영속도와 초기위치를 모두 사용하는지에 따라 각각 ZUPT, PUPT(position update), PZUPT(position & zero velocity update) 로 구분하였다.

4-2 개략정렬 결과

그림 3~5는 몬테카를로 100회 시뮬레이션을 통해 롤, 피치, 방위각 오차를 산출하여 IBA와 LHA의 성능을 비교한 결과이다. 본 논문에서는 방위각 오차를 기준으로 정렬 성능을 비교하였다. 그림 5는 시간에 따른 방위각 오차 변화를 나타내며 보라색 선은 개략정렬 완료 여부를 판단하는 기준선이다. 일반적으로 약 1°를 기준으로 하여 개략정렬 완료 여부를 판단하며, 이후 정밀정렬 단계에서 선형 칼만 필터 동작 가능 범위를 고려하여 설정된다. IBA의 경우, 방위각 오차는 시간이 충분히 지나면 안정적으로 감소되지만, 수평축이 분리되지 않아 파도가 커짐에 따라 수평축 오차도 같이 증가하는 단점이 존재하였다.

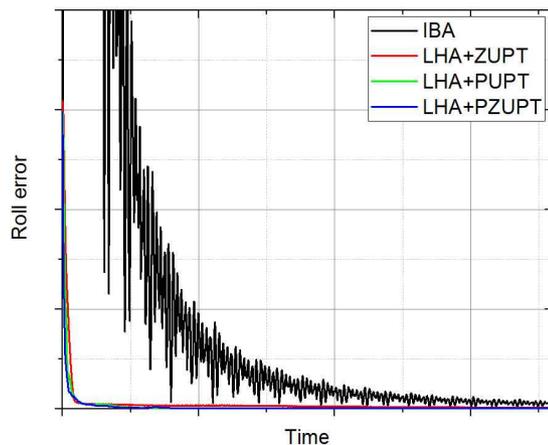


그림 3. 시간에 따른 개략정렬 오차 변화 (롤)
Fig. 3. Time variation of coarse alignment error (roll).

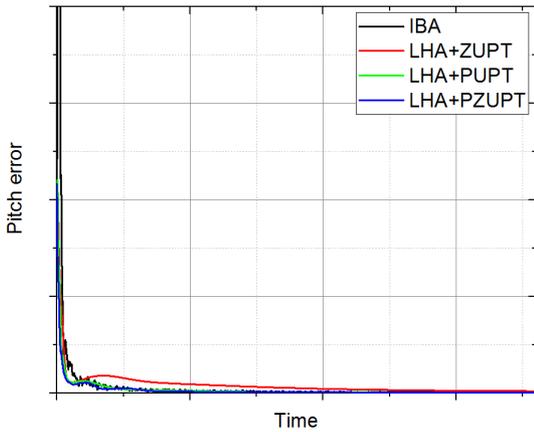


그림 4. 시간에 따른 개략정렬 오차 변화 (피치)
 Fig. 4. Time variation of coarse alignment error (pitch).

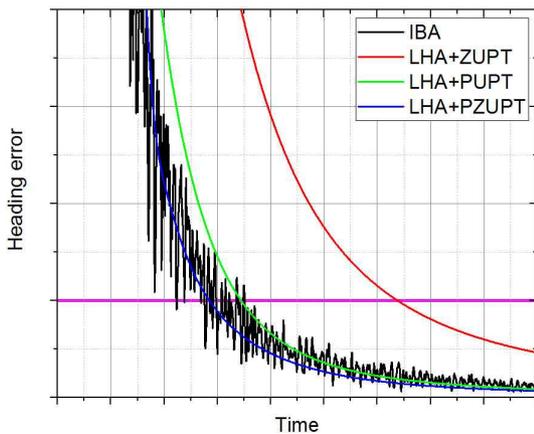


그림 5. 시간에 따른 개략정렬 오차 변화 (요)
 Fig. 5. Time variation of coarse alignment error (yaw).

반면, LHA의 경우 수평축과 수직축이 분리되어있어 수평축, 수직축 모두 안정적으로 정렬 오차가 감소하는 것을 확인하였다. 다만, LHA에 영속도 보정을 사용하는 경우 파도 병진운동으로 인해 측정치 오차가 커지는 영향으로 정렬 시간이 길어지고 정확도가 감소하여 측정치로 적합하지 않음을 확인하였다.

결과적으로, 초기위치를 측정치로 사용하였을 때 해상 환경에서 안정적으로 정렬이 수행됨을 확인하였다. 또한, 초기위치와 영속도 보정을 동시에 사용하였을 경우, 그렇지 않았을 때 비해 정렬 시간이 감소함을 확인하였다.

4-3 정밀정렬 결과

그림 6~7은 마찬가지로 몬테카를로 100회 시뮬레이션을 통해 롤, 피치, 방위각에 대한 정밀정렬 오차를 산출한 결과이다. 앞선 개략정렬 분석 결과로부터 LHA 기반 PZUPT 알고리즘 사용 시 시간에 대한 정렬 정확도와 안정도가 가장 높음을 확인하여 이를 개략정렬 알고리즘으로 채택하였다. 이후, 정밀정렬 알고리즘 선택을 위해 개략정렬과 동일하게 LHA 기반 PZUPT 알

고리즘으로 정밀정렬을 하는 경우와 개략정렬이 끝난 이후, SHA 기반 PZUPT 알고리즘으로 변환하는 경우로 나누어 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 모델을 변환하지 않았을 경우 시간이 지날수록 모델 오차가 누적되어 오차가 커지는 현상이 발생하였다. 또한, 그림 8의 방위각 오차 변화를 통해 모델을 변환하였을 때 수렴 속도와 정확도가 모두 향상되는 것을 확인하였다.

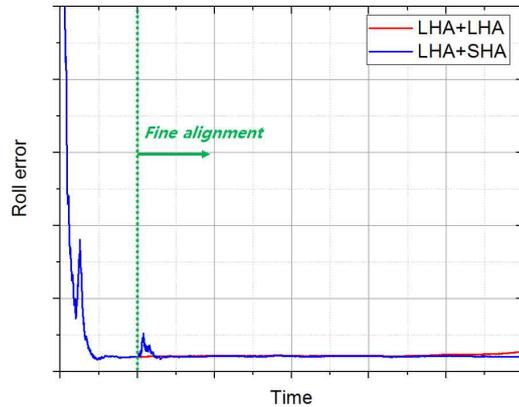


그림 6. 시간에 따른 정밀정렬 오차 변화 (롤)
 Fig. 6. Time variation of fine alignment error (roll)

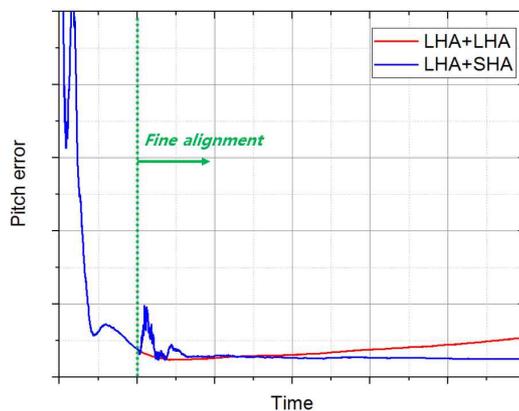


그림 7. 시간에 따른 정밀정렬 오차 변화 (피치)
 Fig. 7. Time variation of fine alignment error (pitch)

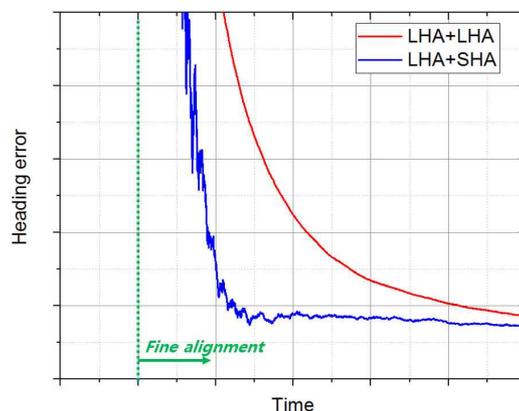


그림 8. 시간에 따른 정밀정렬 오차 변화 (헤딩)
 Fig. 8. Time variation of fine alignment error (Heading)

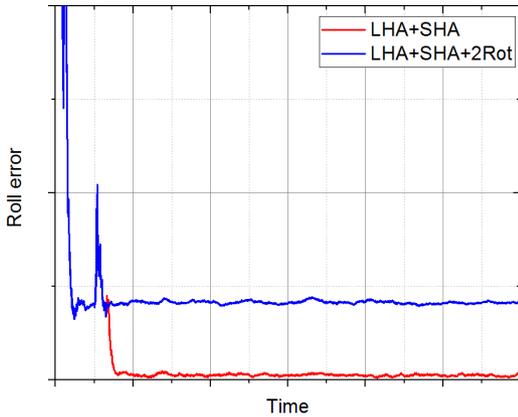


그림 9. 스트랩다운형과 회전형 항법장치 정렬 결과 비교(롤)
Fig. 9. Comparison of alignment error between strapdown INS and Rotational INS (roll).

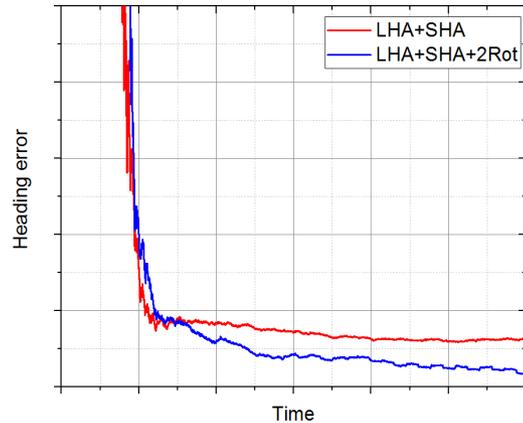


그림 11 스트랩다운형과 회전형 항법장치 정렬 결과 비교(헤딩)
Fig. 11 Comparison of alignment error between strapdown INS and Rotational INS (Heading).

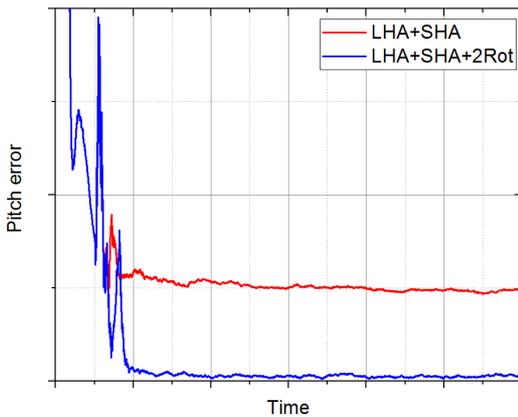


그림 10. 스트랩다운형과 회전형 항법장치 정렬 결과 비교(피치)
Fig. 10. Comparison of alignment error between strapdown INS and Rotational INS (pitch).

4-4 회전형 항법장치 사용 2-회전 시퀀스 적용 결과

그림 9~11은 앞서 결정된 정렬 알고리즘(LHA+SHA)을 2축 회전형 관성항법장치에 적용하였을 경우 성능 개선 정도를 보여준다. 스트랩다운형과 비교하여 롤, 피치는 약 95% 감소, 방위각은 약 84%의 오차 감소를 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 해상 정박 중 정렬을 위해, 파도와 같은 외란에도 안정적인 정렬이 가능한 알고리즘을 제안하였다. 파도에 의한 외란으로 방위각 오차가 커지는 상황을 감안하여, 큰 방위각 오차 모델 기반의 칼만필터를 활용하여 개략정렬을 수행하였다. 개략정렬 이후에는 칼만필터의 시스템 모델을 기존의 작은 방위각 오차 모델로 변경하여 정밀정렬을 수행하였을 때 정렬 성능이 향상됨을 확인하였다. 또한, 기존의 영속도 보정만 사용하던 방식에서 초기위치 보정방식을 추가하여 보정 정확

도 및 정렬 성능을 향상시켰다.

최종적으로 이를 2축 회전형 관성항법장치에 적용하여 요축 방향 2회전 시퀀스를 통해 최종 정렬 정확도 롤, 피치는 약 95%, 방위각은 약 84%의 오차를 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

Acknowledgments

본 연구는 국방과학연구소 회전형 관성항법장치 개발사업의 일환으로 수행됨.

References

- [1] W. Gao, Y. Che, F. Yu, and Y. Liu, "A fast inertial frame alignment algorithm based on horizontal alignment Information for marine SINS," in *Proceeding of the 2014 IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium*, Monterey: CA, pp. 1415-1419, 2014. DOI: 10.1109/PLANS.2014.6851517.
- [2] D. Gu, N. El-Sheimy, T. Hassan, and Z. Syed, "Coarse alignment for marine SINS using gravity in the inertial frame as a reference," in *Proceeding of the 2018 IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium*, Monterey: CA, pp. 961-965, 2018. DOI: 10.1109/PLANS.2008.4570038.
- [3] H. Rahimi, and A. A. Nikkhah, "Coarse alignment of marine strapdown inertial navigation system using the location of fitted parametric circle of gravity movement," *The Journal of Navigation*, Vol. 74, No. 3, pp. 574-593, Mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0373463321000151>.

- [4] B. M. Scherzinger, "Inertial navigator error models for large heading uncertainty," in *Proceeding of the 1996 IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium*, Georgia: GA, pp. 477-484, 1996. DOI: 10.1109/PLANS.1996.509118.
- [5] H. Hong, J. Lee and C. Park, "Performance improvement of in-flight alignment for autonomous vehicle under large initial heading error," *IEE Proceeding Radar Sonar Navigation*, Vol. 151, No. 1, pp. 57-62, Feb 2004. DOI: 10.1049/ip-rsn:20030698.
- [6] D. H. Titterton, and J. L. Weston, *Strapdown Inertial Navigation Technology*, 2nd ed. Herts, UK and Virginia, VA: IET, 2004.
- [7] B. Yuan, D. Liao, and S. Han, "Error compensation of an optical gyro INS by multi-axis rotation," *Measurement Science and Technology*, Vol. 23, pp. 1-9, Jan. 2012. DOI: 10.1088/0957-0233/23/2/025102.
- [8] F. Zha, L. Chang, and H. He, "Comprehensive error compensation for dual-axis rotational inertial navigation system," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 20, No. 7, pp. 3788-3802, Apr. 2020. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2960532.



류 경 돈 (Kyung-Don Ryu)

2016.09 ~ 2019.02 : 과학기술연합대학원 무기체계공학과 (공학석사)

2019.03 ~ 현재 : 국방과학연구소 연구원

※관심분야 : Inertial Navigation, GPS, Artificial Intelligence