

# 각도 정확도를 고려한 자율무인잠수정의 헤딩 바이어스 추정 알고리즘

## Heading Bias Estimation Algorithm for Autonomous Underwater Vehicles Considering Angular Accuracy

최기환<sup>1</sup>, 이권수<sup>2</sup>, 이필엽<sup>3</sup>, 김호성<sup>3</sup>, 강형주<sup>3</sup>, 이지홍<sup>1,\*</sup>

(Kihwan Choi<sup>1</sup>, Gwonsoo Lee<sup>2</sup>, Phil-Yeob Lee<sup>3</sup>, Ho Sung Kim<sup>3</sup>, Hyungjoo Kang<sup>4</sup>, and Jihong Lee<sup>1,\*</sup>)

<sup>1</sup>Department of Mechatronics Engineering of Chungnam National University

<sup>2</sup>Research Institute of Future Mobility System of Chungnam National University

<sup>3</sup>Hanwha System

<sup>4</sup>Korea Institute of Robot and Technology Convergence

**Abstract:** This paper describes a method for estimating the heading bias to improve the performance of the navigation algorithm for AUVs (Autonomous Underwater Vehicles). Various studies have been conducted to estimate heading bias, including approaches that use position data obtained from sensors providing absolute position information, such as the GPS (Global Positioning System), along with position data estimated through navigation algorithms. However, these studies have estimated bias without considering that the reliability of each GPS position varies depending on its relative location. Therefore, this paper proposes a method for heading bias estimation that involves estimating angular accuracy based on the distance between the initial position of bias estimation and GPS positions, GPS accuracy, and distance-to-angle conversion. Based on the estimated angular accuracy, GPS positions for bias estimation are selected, and the heading bias is estimated by applying optimization techniques to these selected GPS positions and their associated navigation-estimated positions. The effectiveness of the proposed algorithm is validated through experiments using sensor datasets acquired from real sea experiments.

**Keywords:** AUV, underwater-robot, navigation, localization, orientation, heading-bias, alignment

### I. 서론

항법 및 자율 제어기술을 탑재하고 넓은 수중환경에서 독립적으로 운용되는 자율무인잠수정(AUV, Autonomous Underwater Vehicle)은 일반적으로 스트랩다운 관성 항법 시스템(SDINS, Strapdown Inertial Navigation System)을 항법 시스템으로 채택한다[1-5]. 이 항법 시스템의 항법 알고리즘은 데드 레코닝(dead reckoning)을 기반으로 설계되며, 동체의 초기 위치 및 자세를 바탕으로 센서에서 측정된 운동 정보(선속도, 각속도, 선가속도 등)를 적분해 현재 위치와 자세를 추정한다[6]. 이러한 방식은 초기 위치 및 자세의 오차가 이후 추정되는 위치와 자세에 누적되어 나타나므로 항법 시스템 성능에 큰 영향을 미치며, 이에 따라 정확한 초기 위치와 자세를 추정하기 위한 다양한 연구가 이루어졌다. 특히, 초기 헤딩(heading)이 위치 추정 성능에 비교적 큰 영향을 미치는 점을 고려해 초기 헤딩 오차를 보상하는 연구들도 있었다[5-9].

현재 개발 중인 군집 수색 자율무인잠수정의 경우 수중 항법을 위해 IMU (Inertial Measurement Unit), DVL (Doppler Velocity Log), digital compass 그리고 심도 센서(depths sensor)를 동체에 부착 후 데이터를 취득해 위치 및 자세를 추정하고 있다. 탑재된 digital compass의 경우 헤딩 뿐만 아니라 센서를 기준으로 롤(roll)과 피치(pitch)각도도 측정이 가능해 초기 자세 추정에 사용하고 있다[10-11]. 헤딩의 경우 자북(magnetic north)을 기준으로 측정값을 제공하지만, 항법 알고리즘에서는 UTM (Universal Transverse Mercator)좌표계를 항법(관성) 좌표계로 사용하므로 도북(grid north)을 기준으로 한 헤딩 측정값이 필요하다. 또한, 동체가 운용되는 위치에 따라 지구 자기장 방향의 차이와 해당 지역의 자기적 간섭을 고려한 도자각(grid-magnetic angle)보상 과정이 필요하다. 이에 따라, digital compass로 초기 헤딩 측정 시 발생하는 센서 오차와 도자각이 복합되어 나타나는 헤딩 바이어스를 보정하기 위해 위치 기반의 운항 중 정렬 알고리즘이 연구되었다[5,7,12].

\* Corresponding Author

Manuscript received December 9, 2024; revised January 1, 2025; accepted January 8, 2025

최기환: 충남대학교 메카트로닉스공학과 대학원생(ghksdl218@o.cnu.ac.kr, ORCID<sup>®</sup> 0000-0003-2098-0192)

이권수: 충남대학교 미래모빌리티시스템연구소 연구기술원(kali55@cnu.ac.kr, ORCID<sup>®</sup> 0000-0002-0507-7758)

이필엽: 한화시스템 무인체계팀 수석연구원(powerman2@hanwha.com, ORCID<sup>®</sup> 0000-0001-9065-1154)

김호성: 한화시스템 무인체계팀 전문연구원(hosung0608.kim@hanwha.com, ORCID<sup>®</sup> 0000-00002-5706-3163)

강형주: 한국로봇융합연구원 자율시스템연구센터 선임연구원(hjkang@kro.re.kr, ORCID<sup>®</sup> 0000-0001-8838-3285)

이지홍: 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수(jihong@cnu.ac.kr, ORCID<sup>®</sup> 0000-0002-7889-4935)

\* This research was supported by AUV Fleet and its Operation System Development for Quick Response of Search on Marine Disasters of Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion(KIMST) funded by the Korea Coast Guard Agency(KIMST-20210547).

연구된 위치 기반 운항 중 정렬 알고리즘(이하, 위치 기반 헤딩 바이어스 추정 알고리즘)은 자율무인잠수정의 GPS (Global Positioning System) 수신 위치와 항법 알고리즘으로 추정된 위치를 이용해 헤딩 바이어스를 추정한다. 해당 알고리즘은 GPS 신호 수신에 가능하도록 자율무인잠수정이 진수 후 임무 수행을 위해 잠항하기 전 일정 시간 동안 수상에서 운용되는 것을 전제로 하며, GPS 신호가 수신될 때마다 GPS 수신 위치와 항법 추정 위치 간 차이를 이용해 헤딩 오프셋(offset)을 계산하고 계산된 헤딩 오프셋 값들로 바이어스를 추정해 보상했다(그림 1). 바이어스 추정 알고리즘의 초기 위치로부터 멀어질수록 헤딩 오프셋을 산출할 때, GPS 수신 위치 오차가 미치는 영향이 감소하는 점을 고려해, 자율무인잠수정이 GPS 수신을 위해 수상 기동하는 동안 초기 위치에서 점진적으로 멀어지도록 운용하였다. 또한, FIR (Finite Impulse Response) filter의 한 종류인 Wiener filter를 통해 산출된 오프셋 값을 로부터 헤딩 바이어스를 추정함으로써 GPS 수신 위치 오차의 영향을 가장 덜 받는, 마지막 GPS 수신 위치로 산출된 헤딩 오프셋과 유사한 값이 추정되도록 하였다. 하지만, 이러한 방법은 GPS가 가우시안(Gaussian) 노이즈를 가지는 점을 고려했을 때, 특정 GPS 수신 위치에 큰 기여 비중을 가지고 바이어스를 추정하는 것은 안정적인 성능을 기대하기 어려우며, 마지막 GPS 수신 위치가 아닌 다른 시점에 취득된 위치가 초기점에서 더 먼 경우 사용하기에 적합하지 않다. 따라서, 본 논문에서는 바이어스 추정 알고리즘의 초기점으로부터 각 GPS 수신 위치 간 거리와 GPS의 위치 정확도를 기반으로, 각 위치에서 계산된 헤딩 오프셋이 기대할 수 있는 평균적인 각도 오차 범위(이하, 각도 정확도)를 거리-각도 변환을 통해 추정하고, 이를 활용하여 헤딩 바이어스를 추정하는 방법을 제안한다. 각도 정확도를 통해 바이어스 추정 측면에서 일정 수준 이상의 신뢰도를 가지는 GPS 수신 위치들을 선별하며, 선별된 위치들과 각 수신 시점에 대응되는 항법 알고리즘 추정 위치들을 바탕으로 최적화 기법을 통해 바이어스를 추정한다. 이 과정에서 각도 정확도는 최적화 기법 내에서 사용된 각 GPS 수신 위치와, 이에 대응되는 항법 추정 위치가 바이어스 산출에 기여하는 비중을 산정하는 요소로 활용된다. 제안한 방법은 실험실 실험으로부터 취득된 항법 센서데이터를 통해 위치 기반 헤딩 바이어스 추정 알고리즘과 추정 성능을 비교해 검증하였다.

본 논문이 기여하는 바는 다음과 같다. 각도 정확도라는 척도를 통해 GPS 수신 위치들을 선별함으로써 안정적인 바이어스 추정이 가능하다. 또한, 선별된 다수의 GPS 수신 위치를 각도 정확도에 따라 바이어스 추정에 기여하는 비중을 산정해 최적의 헤딩 바이어스를 추정할 수 있다.

본 논문의 구성은 II장에서 기존에 연구된 위치 기반 헤딩 바이어스 추정 알고리즘에 대한 설명과 해당 방법에서 나타난 문제점을 설명한다. III장에서는 제안한 각도 정확도를 고려한 헤딩 바이어스 추정 알고리즘에 대해서 설명한다. IV장에서는 제안한 방법의 유효성을 확인하기 위한 데이터셋과 실험 구성을 설명하고 기존 알고리즘과 제안한 알고리즘의 바이어스 추정 성능을 비교한다. 마지막으로 V장에서는 실험 결과를 정리하고 추후 연구에 대한 내용으로 마무리한다.

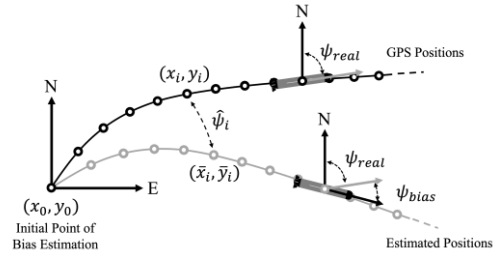


그림 1. 헤딩 바이어스로 인한 자율무인잠수정의 GPS 수신 위치와 항법 추정 위치의 차이.

Fig. 1. Difference between GPS positions and navigation estimated positions of an AUV (Autonomous Underwater Vehicle) due to heading bias.

## II. 위치 기반 헤딩 바이어스 추정 알고리즘

GPS와 같이 절대 위치 정보를 제공하는 센서로부터 취득한 위치 데이터를 활용하여 헤딩 바이어스를 추정하는 연구들 중 대표적인 사례로, 위치 기반 헤딩 바이어스 추정 알고리즘이 있다. 이 알고리즘은 1Hz 주기로 동작하는 수신기의 GPS 신호 수신에 가능하도록 자율무인잠수정을 일정 시간 수상 운용하며, 바이어스를 추정한다[5,7,12]. 취득된 첫 GPS 수신 위치  $(x_0, y_0)$ 를 바이어스 추정 알고리즘의 초기점으로 정하고 일정 시간 수상 기동을 유지해 20 ~ 40회 GPS 신호를 추가적으로 수신함과 동시에 항법 알고리즘으로 위치를 추정한다. 이때, GPS 수신 횟수는 자율무인잠수정의 운용 목적과 운용 환경에 따라 달라진다. GPS 신호가 수신될 때 마다 초기점을 기준으로 식 (1)과 같이 GPS 수신 위치  $(x_i, y_i)$ 와 수신 시점에 대응되는 항법 알고리즘 추정 위치  $(\bar{x}_i, \bar{y}_i)$  간 헤딩 오프셋 ( $\hat{\psi}_i$ )을 계산한다.

$$\hat{\psi}_i = \tan^{-1} \left( \frac{(y_i - y_0) - (\bar{y}_i - y_0)}{(x_i - x_0) - (\bar{x}_i - x_0)} \right) \quad (1)$$

목표한 수의 GPS 신호를 수신하면, 계산된 헤딩 오프셋 값들 ( $\hat{\psi}$ )과 Wiener filter를 이용해 초기 헤딩 바이어스 ( $\hat{\psi}_{bias}$ )을 추정한다(2)-(3). 식 (3)에서  $\mu_{\hat{\psi}}, \sigma_{\hat{\psi}}$ 는 각각 헤딩 오프셋 값들의 평균과 표준편차이며  $\sigma_{GPS}$ 는 GPS의 위치 정확도를 나타낸다[12].

$$\hat{\psi} = \{\hat{\psi}_1, \hat{\psi}_2, \dots, \hat{\psi}_N\} \quad (2)$$

$$\hat{\psi}_{bias} = \mu_{\hat{\psi}} + (\hat{\psi}_N - \mu_{\hat{\psi}}) \frac{\sigma_{\hat{\psi}}^2}{\sigma_{\hat{\psi}}^2 + \sigma_{GPS}^2} \quad (3)$$

마지막 GPS 수신 위치가 초기점으로부터 가장 멀리 수신되었다는 가정하에 해당 위치와 대응되는 항법 알고리즘 추정 위치로 산출된 헤딩 오프셋( $\hat{\psi}_N$ )의 각도 정확도가 가장 높기 때문에, Wiener filter를 이용해 해당 헤딩 오프셋을 목표 응답으로 바이어스를 추정한다. 마지막 헤딩 오프셋을 제외한 나머지 헤딩 오프셋 값들이 바이어스 추정에 기여하는 비중은 동일하며, 헤딩 오프셋 값들의 분산에 따라 마지막 헤딩 오프셋의 기여 비중과 나머지 값들의 기여 비중이 달라지게 된다. 하지만, 마지막 산출된 헤딩 오프셋에 높은 비중을 두고 바이어스를 추정하는 경우 GPS가 가우시안 노이즈를 가지는 점을 고려했을 때, 일정한 추정 성능을

기대하기 어렵다. 또한, 나머지 오프셋 값들에 동일한 비중을 두고 추정하는 것은 초기점으로부터 수신된 거리에 따라 GPS 수신 위치의 각도 정확도가 다르다는 점을 고려했을 때, 최적의 결과라고 판단하기 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 III장에서 제안할 헤딩 바이어스 추정 알고리즘을 통해 이러한 문제를 해결해 추정 성능을 개선하고자 한다.

III. 각도 정확도를 고려한 헤딩 바이어스 추정 알고리즘

앞서 II장에서 설명한 바와 같이, GPS 수신 위치 오차가 가우시안 노이즈를 가지고, 초기점으로부터의 수신된 거리에 따라 산출된 헤딩 오프셋의 각도 정확도가 다르다는 점을 고려할 때, 특정 GPS 수신 위치로부터 산출된 오프셋 값에 큰 비중을 두거나 모든 위치들에 동일한 비중을 부여하고 헤딩 바이어스를 추정하는 것은 추정 성능이 일정하지 않으며, 최적의 결과로 판단하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 일정한 추정 성능을 확보하고 최적의 헤딩 바이어스를 추정하기 위해 GPS 수신 위치에 따른 각도 정확도를 추정한다. 추정된 지표를 바탕으로 바이어스 추정에 활용할 GPS 수신 위치들과 항법 알고리즘 추정위치들을 선별하고, 선별된 각 위치의 기여 비중을 산출하며, 이를 바탕으로 최적의 헤딩 바이어스를 추정한다.

그림 2와 같이 바이어스 추정 알고리즘의 초기점과 GPS가 수신된 위치 간 거리( $l_i$ )와 RMSE (Root Mean Square Error)로 평가된 GPS의 위치 정확도( $\sigma_{GPS}$ )를 통해 각 GPS 수신 위치에서 산출가능한 헤딩 오프셋의 각도 정확도( $\alpha_i$ )를 추정한다(4).

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left( \frac{\sigma_{GPS}}{l_i} \right) \quad (4)$$

각도 정확도는 위치 정확도와 마찬가지로 기대할 수 있는 평균적인 오차를 나타내는 지표이기 때문에 작을수록 좋다. 바이어스 추정에 활용할 GPS 수신 위치는 이러한 각도 정확도를 통해 선별되며, 일정 임계값( $\rho_\alpha$ ) 이하의 각도 정확도를 가지는 위치들을 선택한다(5).

$$I = \{i \mid \alpha_i < \rho_\alpha, i \in \{1, 2, \dots, N\}\} \quad (5)$$

선별된 GPS 수신 위치들과 수신 시점에 대응되는 항법 추정 위치들을 이용해 헤딩 바이어스를 추정한다. 이를 위해 최적화 기법을 적용하였으며, 다음과 같은 과정을 통해 수행

$$\omega_i = \frac{\alpha_i}{\alpha_i}, \text{ where } i \in I \quad (6)$$

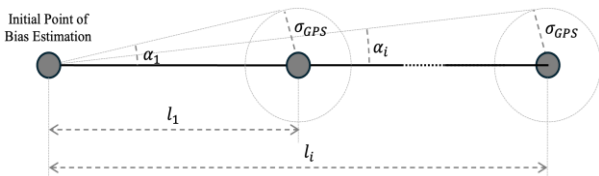


그림 2. GPS 수신 위치 정확도와 바이어스 추정의 초기점으로부터 GPS 수신 위치 간 거리에 따른 각도 정확도.

Fig. 2. Angular accuracy based on GPS position accuracy and the distance from the initial point of bias estimation to each GPS position.

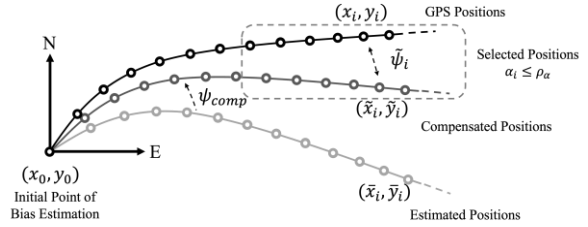


그림 3. 각도 정확도를 고려한 헤딩 바이어스 추정 알고리즘 개요.

Fig. 3. Overview of heading bias estimation algorithm considering angular accuracy.

했다. 먼저 식 (6)과 같이 초기점을 제외하고 최초로 수신된 GPS 수신 위치에서 추정된 각도 정확도( $\alpha_i$ )를 기준으로 선별된 GPS 수신 위치들의 상대 각도 정확도( $\omega_i$ )를 계산한다.

이후, 보상각( $\psi_{comp}$ )을 적용해 보정된 항법 추정 위치( $\tilde{x}_i, \tilde{y}_i$ )들을 식 (7)과 같이 계산하며, 그림 3과 같이 보정된 항법 추정 위치들과 GPS 수신 위치들 간 각도 오차( $\tilde{\psi}_i$ )를 계산한다(8).

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_i \\ \tilde{y}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi_{comp}) & -\sin(\psi_{comp}) \\ \sin(\psi_{comp}) & \cos(\psi_{comp}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\tilde{\psi}_i = \tan^{-1} \left( \frac{y_i - y_0 - (\tilde{y}_i - y_0)}{x_i - x_0 - (\tilde{x}_i - x_0)} \right) \quad (8)$$

마지막으로, 식 (9)와 같이 산출된 상대 각도 정확도를 가중치로 부여한 가중 각도 오차의 총합을 최소화하는 값을 목표함수로 정의해 최적 헤딩 바이어스( $\psi_{bias}^*$ )을 추정하고 초기 헤딩 오차를 보정한다.

$$\psi_{bias}^* = arg \min_{\psi_{comp}} \sum_{i \in I} \omega_i \tilde{\psi}_i \quad (9)$$

IV. 실험 및 실험 결과

제안한 각도 정확도를 고려한 헤딩 바이어스 추정 알고리즘의 성능을 검증하기 위해, 한 대의 자율무인잠수정으로 수행된 실험역 실험에서 취득한 서로 다른 센서 데이터셋 3개를 활용하여 실험을 수행하였다. 데이터셋은 한국해양과 학기술원 남해연구소 앞 바다에서 취득되었다(그림4). 그림 5-7은 각 데이터 셋을 취득하기 위해 자율무인잠수정을 운용한 경로를 GPS 수신 위치로 시각화한 결과를 나타내며, 표 1은 운용된 총 이동거리와 시간을 요약한 것이다.

각 데이터셋에 대해 3가지 실험을 수행하였으며, 바이어스 추정 방법을 제외한 실험 환경과 항법 알고리즘은 동일한 조건에서 실험을 수행하였다.

- 실험(A): 위치 기반 헤딩 바이어스 추정 알고리즘 사용.
- 실험(B): GPS 수신 위치를 선별하지 않고 상대 각도 정확도와 최적화 기법으로 헤딩 바이어스 추정.
- 실험(C): GPS 수신 위치를 선별한 후, 선별된 위치와 상대 각도 정확도를 바탕으로 최적화 기법을 적용해 헤딩 바이어스 추정.

각 실험에서 사용한 바이어스 추정 방법으로 헤딩오차를 보정한 후 항법 알고리즘으로 위치를 추정하였으며, 추정 결과를 통해 바이어스 추정 성능을 비교하였다. 모든 실험

에서 바이어스 추정을 위해 사용한 GPS 수신 위치의 수는 초기점을 제외하고 40개이며, GPS 위치 정확도는 1.6m이고 GPS 수신 위치 선별을 위한 각도 정확도 임계값은 5°로 설정하였다.

표 1. 각 데이터셋 취득을 위한 자율무인잠수정 운용 정보.  
Table 1. Operating information of AUV for dataset acquisition.

데이터셋	운용거리(m)	운용시간(s)
(I)	1331.76	1024.7
(II)	628.38	517.3
(III)	671.97	619.7



그림 4. 센서 데이터 취득 지역  
Fig. 4. Sensor data acquisition region.

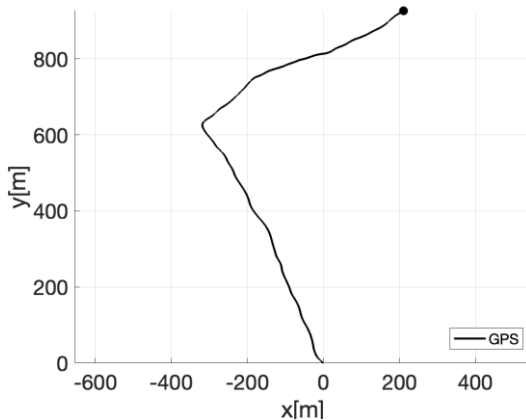


그림 5. GPS 수신 위치로 나타낸 데이터셋 (I) 취득 경로.  
Fig. 5. Acquisition path of dataset (I) represented by GPS positions.

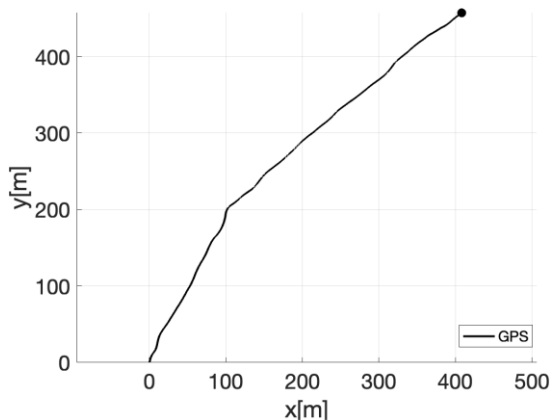


그림 6. GPS 수신 위치로 나타낸 데이터셋 (II) 취득 경로.  
Fig. 6. Acquisition path of dataset (II) represented by GPS positions.

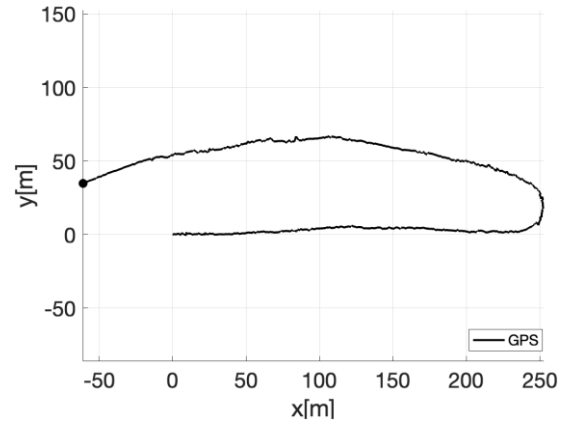


그림 7. GPS 수신 위치로 나타낸 데이터셋 (III) 취득 경로.  
Fig. 7. Acquisition path of dataset (III) represented by GPS positions.

그림 8-10은 각 센서 데이터셋에서 GPS 수신 경로와 3가지 실험에서 추정된 바이어스로 초기 heading 오차를 보정한 후, 항법 알고리즘으로 추정된 경로를 나타낸다. 그림 11-13은 각각 그림 8-10의 결과 중 중점 부근을 확대하여 도시한 것으로, 모든 데이터셋에서 실험(C), (B), (A) 순으로 위치 추정 결과가 GPS 수신 경로에 더 근접한 것을 확인할 수 있다. 이를 통해, 제안한 각도 정확도를 고려한 바이어스 추정 방법이 기존 방법에 비해 개선된 것을 확인할 수 있으며, 특히 각도 정확도를 기반으로 GPS 수신 위치를 선별한 경우 성능이 더욱 향상됨을 확인했다. 바이어스 추정 방법에 따른 항법 추정 성능의 개선도를 수치적으로 평가하기 위해 GPS 수신 위치를 자율무인잠수정의 실제 운용 경로로 참조하고, GPS 수신 위치와 항법 알고리즘으로 추정된 위치 간 유클리드 거리(Euclidean distance) 오차를 계산했다. 표 2는 각 데이터셋으로 수행된 실험에서 산출된 거리 오차의 평균값을, 표 3은 중점의 거리오차를 나타낸 것이다. 데이터셋 (I)를 이용한 실험에서 평균 거리오차는 실험(A)를 기준으로 실험(B)는 16.90% 실험(C)는 24.62% 향상되었고 중점 거리오차는 실험(A)를 기준으로 실험(B)는 17.34% 실험(C)는 25.30% 향상되었다. 데이터셋 (II)를 이용한 실험에서 평균 거리오차는 실험(A)를 기준으로 실험(B)는 4.64% 실험(C)는 45.49% 향상되었고 중점 거리오차는 실험(A)를 기준으로 실험(B)는 5.21% 실험(C)는 51.75% 향상되었다. 마지막으로, 데이터셋 (III)를 이용한 실험에서 평균 거리오차는 실험(A)를 기준으로 실험(B)는 62.65% 실험(C)는 63.73% 향상되었고 중점 거리오차는 실험(A)를 기준으로 실험(B)는 46.81% 실험(C)는 52.93% 향상되었다. 각 실험 방법으로 추정된 heading 바이어스를 통해 heading 오차를 보정한 후 항법 알고리즘을 사용하여 자율무인잠수정의 위치를 추정해 GPS 수신 경로와 비교한 결과, GPS 수신 위치를 선별하고 선별된 위치와 상대 각도 정확도를 바탕으로 heading 바이어스를 추정한 실험(C)의 결과가 평균 거리오차와 중점 거리오차 측면에서 비교했을 때, 3개의 데이터셋 모두에서 가장 우수한 성능을 보였다. 이러한 결과는 제안한 각도 정확도를 고려한 heading 바이어스 추정 알고리즘의 유효성을 수치적으로 보여준다.

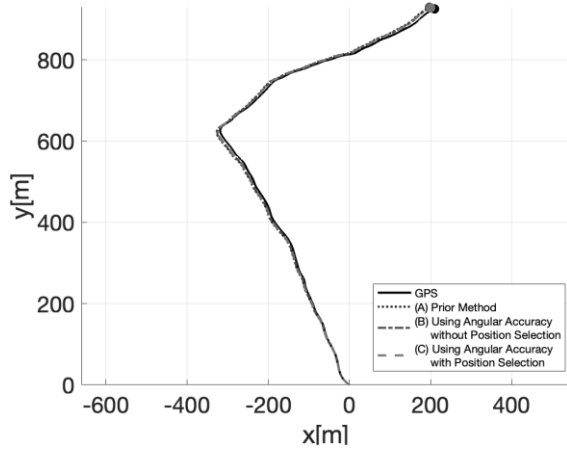


그림 8. 데이터셋 (I)를 이용한 실험 결과: GPS 수신 위치와 헤딩 바이어스 추정 방법에 따른 위치 추정 결과.  
 Fig. 8. Experimental results using dataset (I): GPS and estimated positions based on heading bias estimation methods.

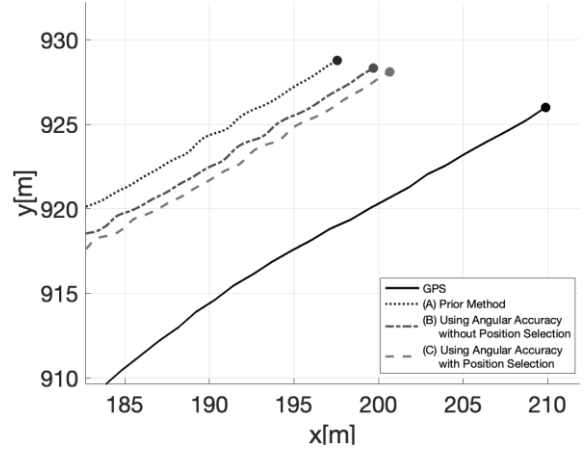


그림 11. 데이터셋 (I)를 이용한 실험 결과: 종점 부근 확대 결과.  
 Fig. 11. Experimental results using dataset (I): enlarged view near the endpoint.

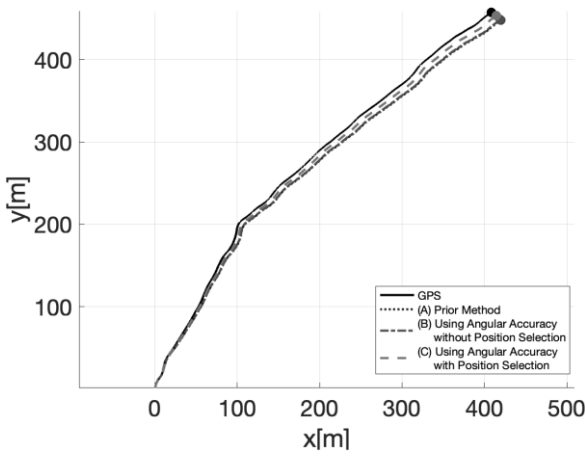


그림 9. 데이터셋 (II)를 이용한 실험 결과: GPS 수신 위치와 헤딩 바이어스 추정 방법에 따른 위치 추정 결과.  
 Fig. 9. Experimental results using dataset (II): GPS and estimated positions based on heading bias estimation methods.

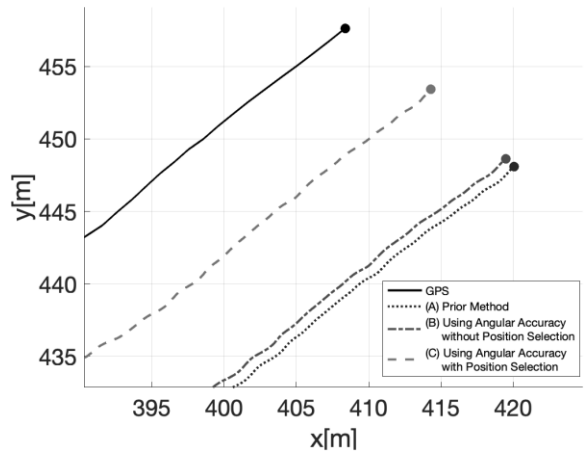


그림 12. 데이터셋 (II)를 이용한 실험 결과: 종점 부근 확대 결과.  
 Fig. 12. Experimental results using dataset (II): enlarged view near the endpoint.

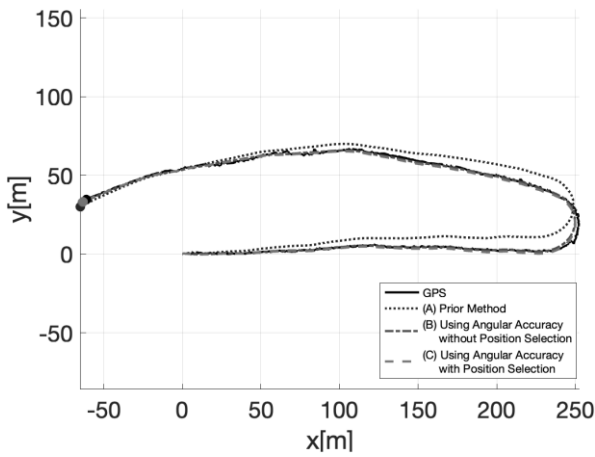


그림 10. 데이터셋 (III)를 이용한 실험 결과: GPS 수신 위치와 헤딩 바이어스 추정 방법에 따른 위치 추정 결과.  
 Fig. 10. Experimental results using dataset (III): GPS and estimated positions based on heading bias estimation methods.

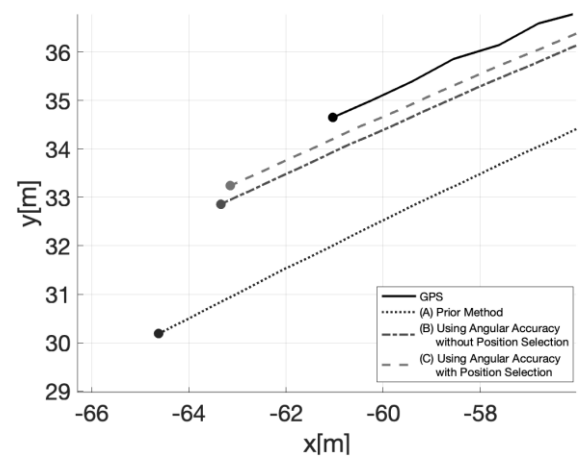


그림 13. 데이터셋 (III)를 이용한 실험 결과: 종점 부근 확대 결과.  
 Fig. 13. Experimental results using dataset (III): enlarged view near the endpoint.

표 2. 데이터셋과 바이어스 추정 방법에 따른 항법 위치 추정 결과의 평균 거리오차 비교.

Table 2. Comparison of the average distance error in navigation position estimation results across datasets and heading bias estimation methods.

데이터셋	실험	평균 거리오차[m]	실험(A) 대비 성능 향상도(%)
(I)	(A)	7.417224	-
	(B)	6.163817	16.90
	(C)	5.590799	24.62
(II)	(A)	7.781042	-
	(B)	7.419865	4.64
	(C)	4.241304	45.49
(III)	(A)	6.643621	-
	(B)	2.481722	62.65
	(C)	2.409739	63.73

실험(A): 기존 위치 기반 헤딩 바이어스 추정  
 실험(B): 각도 정확도 기반 헤딩 바이어스 추정  
 실험(C): 위치 선별 및 각도 정확도 기반 헤딩 바이어스 추정

표 3. 데이터셋과 바이어스 추정 방법에 따른 항법 위치 추정 결과의 종점거리오차 비교.

Table 3. Comparison of the endpoint distance error in navigation position estimation results across datasets and heading bias estimation methods.

데이터셋	실험	종점 거리오차[m]	실험(A) 대비 성능 향상도(%)
(I)	(A)	12.630905	-
	(B)	10.440725	17.34
	(C)	9.435696	25.30
(II)	(A)	15.068647	-
	(B)	14.283257	5.21
	(C)	7.271304	51.75
(III)	(A)	5.405520	-
	(B)	2.875150	46.81
	(C)	2.544259	52.93

실험(A): 기존 위치 기반 헤딩 바이어스 추정  
 실험(B): 각도 정확도 기반 헤딩 바이어스 추정  
 실험(C): 위치 선별 및 각도 정확도 기반 헤딩 바이어스 추정

V. 결론

논문은 자율무인잠수정의 초기 헤딩 오차를 보정하기 위한 새로운 방법을 제안한다. 기존 위치 기반 헤딩 바이어스 추정 알고리즘은 GPS 수신 위치와 이에 대응되는 항법 추정 위치를 이용하여 바이어스를 추정하지만, 항법 초기 점과 GPS 수신 위치 간 거리 차이에 따른 각 GPS 수신 위치의 신뢰도를 충분히 반영하지 못했다. 특정 GPS 수신 위치가 과도한 기여 비중을 갖게 되고, 나머지 위치들은 동일한 비중으로 처리되어 최적의 바이어스를 산출하기 어렵다는 한계가 있었다. 이에 본 논문에서는 GPS의 위치 정확도와 초기점으로부터 GPS 수신 위치 간 거리를 바탕으로 거리-각도 변환을 통해 각도 정확도를 추정하였으며,

이를 기반으로 일정 수준 이상의 신뢰도를 가지는 GPS 수신 위치를 선별하였다. 이후 선별된 GPS 수신 위치에 대해 최적화 기법을 적용하여 보다 신뢰성 높은 바이어스를 추정하는 방안을 제시하였다. 제안한 바이어스 추정 방법의 유효성을 검증하기 위해 자율 무인 잠수정의 실험역 실험에서 취득한 센서 데이터를 사용하여 실험을 수행하였다. 3개의 바이어스 추정 방법을 비교 실험하였으며, 실험 환경과 항법 알고리즘, 바이어스 추정을 위해 취득한 GPS 수신 위치의 수는 동일하게 설정하였다. 실험 결과, 기존 추정 방법 대비 제안한 방법이 더 나은 성능을 보였으며, 특히 각도 정확도를 활용해 GPS 수신 위치를 선별한 경우 더욱 향상된 결과를 확인할 수 있었다.

추후 연구에서는 자율 무인 잠수정을 수상에서 운용하여 GPS 신호를 수신할 때, 초기점으로부터 점진적으로 멀어지는 경로나 직선적인 경로에 국한되지 않고 헤딩의 변화가 큰 경로나, 초기점으로부터의 거리 변화가 크지 않은 경로 등 다양한 경로에서 바이어스를 추정하는 실험이 이루어져야 한다. 또한, 현재 GPS 선별을 위한 파라미터의 경우 사용자가 임의로 설정하여 실험을 진행하였는데, GPS의 위치 정확도는 실제 운용 환경에 따라 GPS 사양서에서 제공하는 값과 다르게 나타날 수 있으며, 자율무인잠수정의 운용 목적에 따라 GPS 신호를 수신하기 위한 수상 운용 시간과 이동 거리가 달라질 수 있다. 따라서, 이러한 점들을 고려해 최적의 파라미터값을 산출하는 알고리즘에 대한 연구도 필요하다. 더 나아가, 데드레코닝을 바탕으로 설계된 항법 알고리즘 특성상 초기 위치 오차는 이후 추정된 모든 위치에 포함된다. 따라서 GPS 수신 위치와 대응되는 항법 추정 위치를 이용해 헤딩 바이어스를 추정하는 알고리즘에서는 초기 위치가 바이어스 추정에 영향을 주므로, 정확한 초기 위치를 추정하는 추가적인 연구도 필요하다고 판단된다.

REFERENCES

- [1] L. Paull, S. Saeedi, M. Seto, and H. Li, "AUV navigation and localization: A review," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 39, no. 1, pp. 131-149, Jan. 2014.
- [2] A. Karmozdi, M. Hashemi, H. Salarieh, and A. Alasty, "INS-DVL navigation improvement using rotational motion dynamics model of AUV," *IEEE Sensor Journal*, vol. 20, no. 23, pp. 14329-14336, Dec. 2020.
- [3] G.-H. Kim, J. Lee, P.-Y. Lee, H. S. Kim, and H. Lee, "A study on docking guidance navigation algorithm of AUV by combining inertial navigation sensor and docking guidance sensor," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 25, no. 7, pp. 647-656, Jul. 2019.
- [4] C.-M. Lee, P. M. Lee, and W.-J. Seong, "Underwater hybrid navigation algorithm based on an inertial sensor and a doppler velocity log using and indirect feedback Kalman filter," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, vol. 17, no. 6, pp. 183-189, Feb. 2011.
- [5] J. Choo, G. Lee, P.-Y. Lee, H. S. Kim, H. Lee, D. Park, and J. Lee, "Position based in-motion alignment method for an AUV," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 26, no. 8, pp. 649-659, Aug. 2020.
- [6] G.-H. Kim, J. Lee, P.-Y. Lee, H. S. Kim, and H. Lee, "GPS and

inertial sensor-based navigation alignment algorithm for initial state alignment of AUV in real sea," *Journal of Korea Robot Society*, vol. 15, no. 1, pp. 16-23, Mar. 2020.

- [7] G. Lee, K. Choi, P.-Y. Lee, H. S. Kim, H. Lee, H. Kang, and J. Lee, "Performance enhancement technique for position-based alignment algorithm in AUV's navigation," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 29, no. 9, pp. 740-747, Sep. 2023.
- [8] S. G. Park, D. H. Hwang, and S. J. Lee, "Psi angle error model based alignment algorithm for strapdown inertial navigation system," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 2, pp. 183-189, Feb. 2011.
- [9] J. H. Kim, S. W. Moon, S. H. Lee, S. H. Kim, D. H. Hwang, S. J. Lee, and S. W. Ra, "Implementation of an initial alignment algorithm for a strapdown inertial navigation system," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 6, no. 2, pp. 138-145, Feb. 2000.
- [10] G. Lee, K. Choi, P.-Y. Lee, H. S. Kim, H. Lee, H. Kang, and J. Lee, "Precise localization of multiple-AUVs through reliability assessment of relative observation," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 28, no. 6, pp. 558-565, Jun. 2022.
- [11] K. Choi, G. Lee, P.-Y. Lee, H. S. Kim, H. Lee, H. Kang, and J. Lee, "Localization algorithm of multiple-AUVs utilizing relative 3D observations," *Journal of Korea Robot Society*, vol. 17, no. 2, pp. 110-117, Jun. 2022.
- [12] K. Choi, G. Lee, S. Kim, P.-Y. Lee, H. S. Kim, and J. Lee, "Improving position-based alignment for AUV's localization through optimal data selection," *The 9th International Conference on Consumer Electronics (ICCE) Asia*, pp. 887-889, 2024.



#### 최 기 환

2022년 충남대학교 메카트로닉스공학과 (공학사). 2022년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 석·박사 통합과정. 관심 분야는 위치추정, 항법, 수중로봇, 수중 소나.



#### 이 권 수

2020년 충남대학교 메카트로닉스공학과 (공학사). 2023년 8월 충남대학교 메카트로닉스공학과 석·박사 통합과정 수료. 2023년 9월~현재 충남대학교 미래모빌리티시스템연구소. 관심분야는 위치추정, 항법, 자율무인잠수정, 수중로봇, 주행로봇, 수중소나.



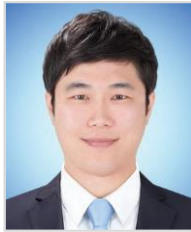
#### 이 필 업

2004년 충남대학교 메카트로닉스공학과 (공학사). 2006년 충남대학교 메카트로닉스공학과(공학석사). 2016년~2011년 한국해양연구원. 2011년~2016년 (주)한화중합연구소. 2016년~현재 한화시스템. 관심분야는 수중로봇, 자율무인잠수정, 항법, 제어, 모니터링 시스템.



#### 김 호 성

2009년 한국해양대학교 기계시스템 공학사. 2011년 한국해양대학교 기계공학 공학석사. 2011년 2월~현재 한화시스템. 관심분야는 수중로봇, 자율무인잠수정, 항법, 제어.



#### 강 형 주

2012 동명대학교 로봇시스템공학과 공학사. 2014 동명대학교 기계시스템공학과 공학석사. 2014~현재 한국로봇융합연구원. 관심분야는 인공지능, 제어이론, 해양로봇.



#### 이 지 흥

1983년 서울대학교 전자공학과(공학사). 1985년 KAIST 전기 및 전자공학과(공학석사). 1991년 KAIST 전기 및 전자공학과(공학박사). 1994년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 위치 추정, 수중 로봇, 양팔 로봇, 야지주행 로봇.