

# 3차원 상대 관측 정보를 통한 다중자율무인잠수정의 위치추정 알고리즘

## Localization Algorithm of Multiple-AUVs Utilizing Relative 3D Observations

최기환<sup>1</sup>·이권수<sup>1</sup>·이필엽<sup>2</sup>·김호성<sup>2</sup>·이한솔<sup>2</sup>·강형주<sup>3</sup>·이지홍<sup>†</sup>  
Kihwan Choi<sup>1</sup>, Gwonsoo Lee<sup>1</sup>, Phil-Yeob Lee<sup>2</sup>, Ho Sung Kim<sup>2</sup>, Hansol Lee<sup>2</sup>,  
Hyungjoo Kang<sup>3</sup>, Jihong Lee<sup>†</sup>

**Abstract:** This paper describes a localization algorithm utilizing relative observations for multiple autonomous underwater vehicles (Multiple-AUVs). In order to maximize the efficiency of operation and mission accomplishment and to prevent problems such as collision and interference, the locations and directions of Multiple-AUVs must be precisely estimated. To estimate the locations and directions, we designed a localization algorithm utilizing relative observations and verified it with simulations based on sensor data sets acquired through real sea experiments. Also, an optimal combination of relative observation information for efficient localization is figured out through combining various relative observations. The proposed method shows improved localization results compared to those only using the navigation algorithm. The performance of localization is improved up to 58% depending on the combination of relative observations.

**Keywords:** Localization, Relative-Observation, Multiple-AUVs, Kalman-Filter, Navigation

### 1. 서 론

수중로봇은 수중 작업, 해양탐사 및 연구, 군사적 목적의 정보감시와 정찰 등의 다양한 목적을 가지고 활용되며, 이와 관련된 연구가 국내외 활발히 진행되고 있다<sup>[1]</sup>. 대표적 수중로봇인 AUV (Autonomous Underwater Vehicle, 자율무인잠수정)는 항법 및 자율제어 기술과 목적에 따른 자동화된 임무수행 능력을 가지고 있어 독립적으로 운용되기 때문에 상대적으로 다른 수중 로봇(UUV, ROV)에 비해 넓은 수중 환경에서 운용

이 가능하다. 자율적으로 운용되는 만큼 목표한 위치로 이동할 때 경로 계획을 위해 정확한 현재 위치를 추정해야 하는데, 외부와의 통신이 어렵기 때문에 관성 항법 센서들을 기반으로 한 추측 항법을 이용한다<sup>[2]</sup>. 하지만, 수중에서는 GPS와 같이 절대 위치를 제공하는 센서의 활용이 어려워 측정 오차 발생 시 위치오차에 대한 보정이 어렵다. 따라서 AUV의 장점을 살리고 단점을 최소화하기 위해서는 높은 정확성을 가지는 위치추정 항법(Navigation) 알고리즘이 필수적이다.

초기에는 수중이라는 특수한 환경으로 인해 AUV의 독립적인 운용을 위한 기술 구현이 어려웠으나 최근에는 수중 센서와 컴퓨터의 성능향상으로 AUV에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 이로 인해 높은 정확성을 가지는 항법 및 자율제어에 대한 다양한 알고리즘들이 개발되었고 기술의 발전에 따라 기뢰 탐색 및 제거, 이동형 통신 노드 제공, 특수작전용 이송 등 다양한 목적의 임무를 수행하는 AUV가 개발되었다<sup>[3]</sup>. 그러나 AUV를 단독으로 운용함에 있어서 수중 수색 및 탐사 등의 임무수행 역량의 한계는 뚜렷하게 나타났다. 이러한 한계를 극복하고자 다중의 AUVs(이하 Multiple-AUVs)를 동시

Received : Jan. 28. 2022; Revised : Feb. 23. 2022; Accepted : Mar. 14. 2022

※ This research was a part of the project titled 'Development of AUV fleet and its operation system for maritime search', funded by Korea Coast Guard

1. Principal Researcher, Mechatronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea (hwann218, kali55@o.cnu.ac.kr)

2. Researcher, Hanwha Systems, Gumi, Korea (powerman2, hosung0608.kim, hansol.lee@hanwha.com)

3. Researcher, Korea Institute of Robotics & Technology Convergence, Pohang, Korea (hjkang@kro.re.kr)

† Professor, Corresponding author: Mechatronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea (jihong@cnu.ac.kr)

에 운용하여 임무를 수행하는 연구가 시작되었다.

Multiple-AUVs 운용시에 AUV간의 충돌, 간섭문제가 발생할 수 있으며 군집 수색 및 수중 작업 등 다양한 수중임무를 효과적이고 정밀하게 수행하기 위해서는 정확한 위치추정을 요한다. 유사한 이유로, 다중 지상로봇의 위치추정 연구(이하 선행연구)<sup>[3]</sup>에서는 relative distance, relative bearing, relative heading (relative orientation)과 같은 상대 관측 정보를 활용하여 다중 지상로봇의 위치를 개별로 운용할 때 보다 정확하게 추정한다. 이와 달리, Multiple-AUVs와 같은 다중 수중로봇은 다중 지상로봇과 다르게 수중공간에서 운용되어 3차원 공간에서의 상대 관측 정보들을 고려해야 하며, 다양한 위치, 자세 정보를 가지기에 이러한 정보들을 통합한 위치, 자세 추정 알고리즘이 필요하다. 이러한 이유로, AUV가 수중에서 운용되는 점을 고려해 기존의 상대 관측 정보를 3차원 공간에 대해서 정의하고 나아가 relative elevation, relative pitch와 같은 3차원 상대 관측 정보를 추가로 활용하여 Multiple-AUVs의 위치를 추정하는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 선행연구 이외에도 다중 로봇시스템을 운용함에 있어 연구된 상대 관측 정보를 이용한 위치 추정 알고리즘들<sup>[4,7]</sup>과 다르게 relative distance (range)뿐만 아니라 다양한(5가지) 3차원 상대 관측 정보를 통해 위치를 추정하며, beacon이나 무인 수상정과 같은 별도 장치와의 상대 관측 정보가 아닌 AUV간의 상대 관측 정보를 활용한다. 제안한 5가지 상대 관측 정보는 최근 국내에서 개발된 iUSBL (inverted or intelligent Ultra-Short Baseline)을 응용하여 각 AUV에 transducers와 transponder를 탑재하고, 탑재 위치와 자세를 조정(관측자의 선체 하단과 피관측에의 선체 상단에 센서를 탑재하는 등의) 하면 취득 가능한 정보이다<sup>[2,8]</sup>.

본 논문에서는 다음과 같은 가정 하에 제안한 알고리즘의 유효성 검증을 검증하였다.

- i) 각 AUV는 iUSBL와 같은 초음파센서를 통해 제안한 5가지 3차원 상대 관측 정보를 취득할 수 있다.
- ii) 각 AUV는 자신의 상태정보를 다른 AUV에게 실시간으로 전송할 수 있다.
- iii) 각 AUV는 동일한 시스템 성능을 가진다.

본 논문이 기여하는 바는 다음과 같다. 3차원 상대 관측 정보들을 통한 Multiple-AUVs의 개선된 위치추정 알고리즘과 상대 관측정보의 구성과 수를 조합하여 얻은 결과를 통해 확인한 최적의 상대 관측 정보 조합에 대한 내용을 담고 있다. 논문의 구성은 2장에서 선행연구에 사용된 상대 관측 정보와 제안하는 Multiple-AUVs의 3차원 상대 관측 정보, 그리고 이러한 상대 관측 정보를 통한 위치추정 알고리즘에 대해서 소개한다. 3장에서는 알고리즘 검증을 위한 시뮬레이션 구성과 실험을 진행할 상대 관측 정보의 조합을 설명하며, 이에 따른 2장에서

설명한 위치추정 알고리즘과 기존 항법 알고리즘(이하 복합 항법 알고리즘)<sup>[9]</sup>의 성능을 비교 분석한다. 마지막으로 4장에서는 실험결과를 정리하고 추후 연구에 대한 내용으로 마친다.

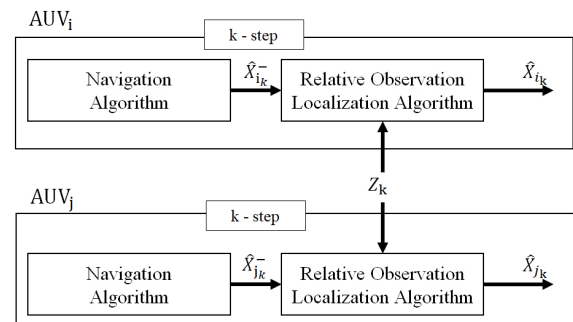
## 2. 본 론

### 2.1 상대 관측 정보를 통한 위치추정 알고리즘 개요

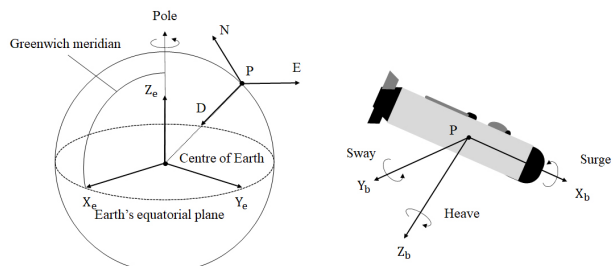
본 논문에서 제안하는 3차원 상대 관측 정보를 통한 Multiple-AUVs의 위치추정 알고리즘 구조는 [Fig. 1]과 같다. 상대 관측 정보를 활용하기 위해 두 대의 AUV를 운용한다 가정하고 관측체(이하 AUV<sub>i</sub>), 피관측체(이하 AUV<sub>j</sub>)로 구분한다. 각 AUV에 대해 복합 항법 알고리즘으로 취득한 현재(k-step) 위치와 자세 추정값(이하 상태벡터,  $\hat{X}_{i_k}^-, \hat{X}_{j_k}^-$ )과 현재 상대 관측 정보(이하 측정벡터,  $z_k$ )을 통해 최종 위치와 자세( $\hat{X}_{i_k}, \hat{X}_{j_k}$ )를 추정한다. 각 AUV의 현재 위치와 자세를 추정하는 복합 항법 알고리즘은 동체에 부착된 다중 항법 센서를 이용하여 이전 자세 및 위치로부터 센서에 측정되는 값을 통해 현재 자세와 위치를 추정한다<sup>[9]</sup>.

### 2.2 좌표계 정의 및 변수 정의

Multiple-AUVs의 위치추정 방법은 지구 좌표계(Earth fixed reference frame), 항법 좌표계(Navigation frame or North East



[Fig. 1] Structure of Multiple-AUVs localization algorithm using relative 3D observations



[Fig. 2] Earth fixed reference frame, Navigation frame and Body fixed frame

Down) 그리고 동체 중심 좌표계(Body fixed frame)를 따르며 [Fig. 2], 항법 좌표계를 기준으로 동체의 위치와 자세에 대한 표기(notation)는 Fossen과 Titterton, Weston의 표기 방식을 따른다<sup>[2, 9, 10, 11]</sup>.

본 논문에서는 기준 좌표계들을 기반으로 관측체와 피관측체의 상태벡터  $X_l$ 를 식 (1)와 같이 정의하였다.

$$X_l = [N_l \ E_l \ D_l \ \psi_l \ \theta_l]^T \quad (l = i, j) \quad (1)$$

### 2.3 상대 관측 정보를 통한 위치추정 알고리즘

#### 2.3.1 선행연구의 상대 관측 정보

선행연구에 사용된 상대 관측 정보<sup>[3]</sup>는 3가지로 각각 relative distance( $z_{d_0}$ , 이하 relative 2D-distance), relative bearing( $z_b$ ), relative heading( $z_h$ )이며, 본 논문에서 정의한 좌표계를 기준으로 식 (2)-(4)와 같다.

$$z_{d_0} = h_{d_0}(X_i, X_j) = \sqrt{\Delta N^2 + \Delta E^2} \quad (2)$$

$$z_b = h_b(X_i, X_j) = \tan^{-1} \left( \frac{\Delta N \cos \psi_i - \Delta E \sin \psi_i}{\Delta N \sin \psi_i + \Delta E \cos \psi_i} \right) \quad (3)$$

$$z_h = h_h(X_i, X_j) = \psi_j - \psi_i \quad (4)$$

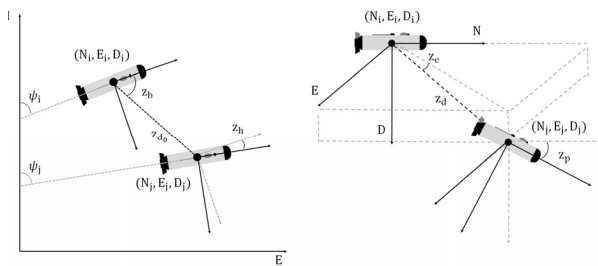
$$\Delta N = N_j - N_i, \Delta E = E_j - E_i \quad (5)$$

#### 2.3.2 Multiple-AUVs 상대 관측 정보

Multiple-AUVs 경우 [Fig. 3]처럼 수중공간에서 운용되는 것을 고려하면 relative distance( $z_d$ , 이하 relative 3D-distance)는 식 (6)와 같다. 추가적으로 relative elevation( $z_e$ )와 relative pitch( $z_p$ )를 활용할 수 있으며, 식 (7), (8)와 같이 정의한다.

$$z_d = h_d(X_i, X_j) = \sqrt{\Delta N^2 + \Delta E^2 + \Delta D^2} \quad (6)$$

$$z_e = h_e(X_i, X_j) = \tan^{-1} \left( \frac{\Delta D \cos \theta_i + \Delta N \sin \theta_i}{\Delta D \sin \theta_i + \Delta N \cos \theta_i} \right) \quad (7)$$



[Fig. 3] Relative observations of Multiple-AUVs

$$z_p = h_p(X_i, X_j) = \theta_j - \theta_i \quad (8)$$

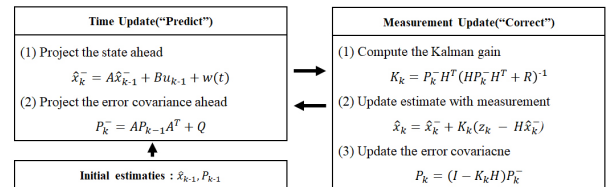
$$\Delta D = D_j - D_i \quad (9)$$

#### 2.3.3 상대 관측 정보를 통한 위치추정 알고리즘 설계

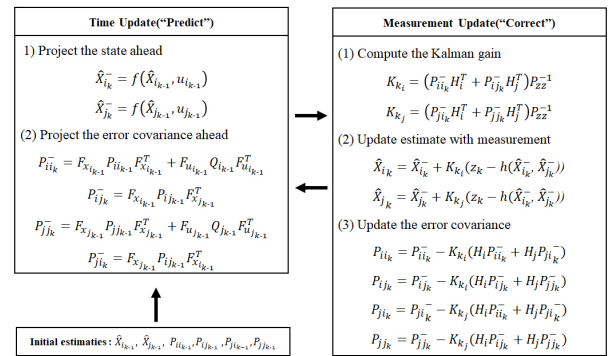
상대 관측 정보를 활용해 Multiple-AUVs의 위치를 정밀하게 추정하기 위해 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter, EKF)를 이용하여 알고리즘을 구성하였다. 칼만 필터(Kalman Filter, KF)는 선형 역학계에서 모델 예측값과 센서 측정값의 비중을 각각의 잡음의 공분산을 기반으로 선정하여 최적의 값을 도출하는 재귀 필터로 [Fig. 4]와 같다. 확장 칼만 필터는 이러한 칼만 필터를 비선형 역학계에서 사용하기 위해 모델을 선형화 한 필터이다<sup>[2, 9, 12]</sup>. 확장 칼만 필터를 활용하여 관측체와 피관측체에 대해 현재 위치, 자세 예측값과 상대 관측 정보의 잡음에 대한 비중을 선정하여 현재 위치와 자세를 추정하는 재귀 필터는 [Fig. 5]와 같다<sup>[3]</sup>.

상태벡터의 초기값은 복합 항법 알고리즘으로부터 취득된 첫 상태벡터 추정값과 같고 오차 공분산  $P_{ll}(l = i, j)$ 도 동일하게 취득된 첫 오차 공분산 추정값과 같다. 오차공분산  $P_{lm}(l, m = i, j, (l \neq m))$ 의 경우 초기값은 영행렬( $O_{5 \times 5}$ )이다.

비선형 시스템 예측모델은 경우 복합 항법 알고리즘으로부터 현재 상태벡터 추정값을 입력 받으므로, 입력된 추정값을 예측모델의 추정값으로 식 (10)와 같이 사용한다. Q는 비선형 시



[Fig. 4] Process of the Kalman Filter



[Fig. 5] Process of the Extended Kalman Filter through relative observation<sup>[3]</sup> (All of the symbols in this figure follow the notation of [3])

스택 모델의 오차 공분산이고  $R$ 은 상대 관측 정보 측정 모델의 오차 공분산 행렬이다.  $Q$ 와  $R$ 행렬은 식 (11), (12)와 같다<sup>3,12)</sup>.

$$f(\hat{X}_l, u_l) = \hat{X}_l \quad (l = i, j) \quad (10)$$

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_N^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_E^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_D^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_\psi^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_\theta^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_{z_d}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{z_b}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{z_h}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{z_e}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{z_p}^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$AUV_i, AUV_j$ 의 측정 상태 전이 행렬  $H_i, H_j$ 은 식 (2)-(9)으로부터 식 (13)-(22)와 같이 얻을 수 있으며, 식 (23)과 같다<sup>3)</sup>.

$$H_i^d = \begin{bmatrix} \frac{\Delta N}{z_d}, \frac{\Delta E}{z_d}, \frac{\Delta D}{z_d}, 0, 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$H_j^d = \begin{bmatrix} -\frac{\Delta N}{z_d}, -\frac{\Delta E}{z_d}, -\frac{\Delta D}{z_d}, 0, 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$H_i^b = \begin{bmatrix} \frac{\Delta E}{z_d^2}, -\frac{\Delta N}{z_d^2}, 0, -1, 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$H_j^b = \begin{bmatrix} -\frac{\Delta E}{z_d^2}, \frac{\Delta N}{z_d^2}, 0, 0, 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$H_i^h = [0, 0, 0, -1, 0] \quad (17)$$

$$H_j^h = [0, 0, 0, 1, 0] \quad (18)$$

$$H_i^e = \begin{bmatrix} \frac{\Delta N * \Delta D}{z_{d_0} * z_d^2}, \frac{\Delta E * \Delta D}{z_{d_0} * z_d^2}, -\frac{z_{d_0}}{z_d^2}, 0, 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$H_j^e = \begin{bmatrix} -\frac{\Delta N * \Delta D}{z_{d_0} * z_d^2}, -\frac{\Delta E * \Delta D}{z_{d_0} * z_d^2}, \frac{z_{d_0}}{z_d^2}, 0, 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$H_i^p = [0, 0, 0, 0, -1] \quad (21)$$

$$H_j^p = [0, 0, 0, 0, 1] \quad (22)$$

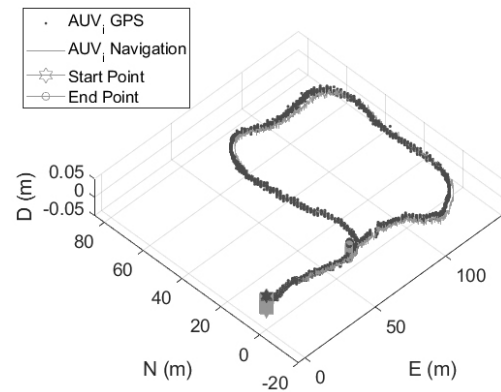
$$H_l = \begin{bmatrix} H_l^d \\ H_l^b \\ H_l^h \\ H_l^e \\ H_l^p \end{bmatrix} \quad (l = i, j) \quad (23)$$

### 3. 실험

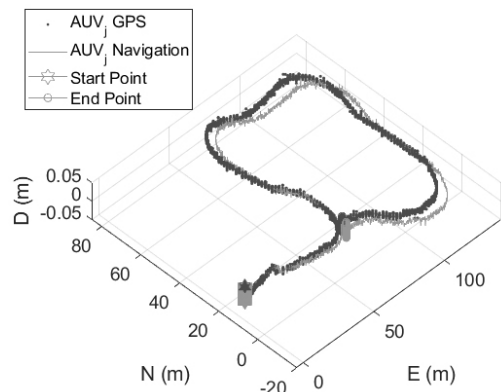
#### 3.1 실험 개요

제안하는 위치추정 알고리즘의 성능을 검증하기 위해  $AUV$ 의 실험역 실험으로 취득한 서로 다른 두 센서 데이터셋을 통해 3차원 시뮬레이션을 수행했다. 실험역 실험은 거제시에 위치한 한국해양과학기술원 남해연구소에서 수행되었으며, 데이터 취득에 사용된  $AUV$ 와 센서들은 [9]에서와 같다<sup>9)</sup>. [Fig. 6]과 [Fig. 7]은 각각  $AUV_i$ 와  $AUV_j$ 역할을 수행하는 센서 데이터셋을 복합 항법 알고리즘만으로 시뮬레이션 했을 때의 결과를 나타낸 것으로 GT (Ground Truth)와 항법 추정위치의 경로를 나타냈다. 이때, GT는 GPS로부터 취득한 위치 데이터를 사용했다.

상대 관측 정보의 조합에 따른 위치추정 성능과 제안하는 위치추정 알고리즘을 검증하기 위해 4가지 비교 실험을 구성했다. 모든 실험은 복합 항법 알고리즘이 반영되어 있으며, 사용



[Fig. 6] Experimental result of navigation algorithm: GT and estimated route of  $AUV_i$



[Fig. 7] Experimental result of navigation algorithm: GT and estimated route of  $AUV_j$

하는 센서 데이터셋은 동일하다. 실험1(Expt1)은 상대 관측 정보를 사용하지 않고 시뮬레이션을 수행했으며, 실험2(Expt2)는 선행연구에 사용된 상대 관측 정보인 relative 2D-distance, relative bearing, relative heading를 활용해 수행했다. 실험3(Expt3)은 relative 3D-distance, relative bearing, relative heading 실험4(Expt4)는 실험3의 상대 관측 정보 조합에 relative elevation, relative pitch를 추가했다. 4가지 실험에 대해 위치추정 성능을 검증하고자 시뮬레이션을 통해 GT와 추정위치간 평균 유클리드 거리(Euclidean distance)오차를 산출하고 비교를 통해 검증했다.

### 3.2 상대 관측 정보 취득 센서 구성

단일 AUV의 실험역 실험을 통해 취득한 센서 데이터로 시뮬레이션을 수행하기 때문에 상대 관측 정보 데이터를 얻을 수 없으므로, 센서 데이터를 참조해 상대 관측 정보를 구축하였고 실제 센서를 통해 상대 관측 정보를 취득할 때 발생하는 노이즈를 고려하여 정규분포를 따르는 오차를 적용한 후 사용했다[Table 1].

[Table 1] Relative observations' set accuracy and referred sensors to use them

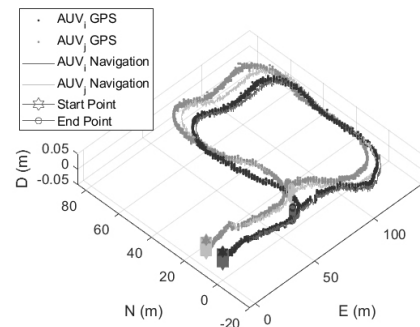
Relative observation	Accuracy	Reference sensor (data)
3D-distance	$\pm 0.1\text{ m}$	GPS, Depth-sensor
Bearing	$\pm 1.0^\circ$	GPS, Digital Compass
Heading	$\pm 1.0^\circ$	Digital Compass
Elevation	$\pm 1.0^\circ$	GPS, Depth-sensor
Pitch	$\pm 1.0^\circ$	Digital Compass

### 3.3 실험 결과

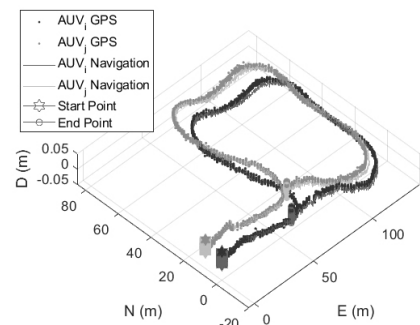
[Fig. 8]~[Fig. 11]은 각 실험의 위치추정 결과이며,  $AUV_i$ 와  $AUV_j$ 의 GT경로와 추정위치 경로를 나타낸 것이다. [Table 2]는 모든 실험을 10회 수행하고 얻은 결과를 나타낸 것이다. 4가지 실험의  $AUV_i$ 와  $AUV_j$ 의 추정위치 평균 거리 오차의 평균은 각각 3.1652 m, 1.5483 m, 1.3816 m, 1.3274 m이다. 실험2~4의 위치추정의 성능은 상대 관측 정보를 활용하지 않은 실험1을 기준으로 각각 51.08%, 56.35%, 58.06% 향상되었다.

[Fig. 8]~[Fig. 11]을 통해서 위치추정의 성능 변화를 확인하기 어려워 각 실험에 대한 결과를 [Fig. 12]~[Fig. 15]와 같이 N-E 평면에 대해 도시하여 위치추정 성능의 변화를 확인하였다.

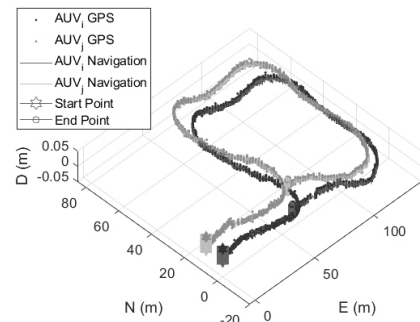
[Fig. 12]와 [Fig. 13]를 통해 기존 연구된 상대관측 정보를 사용했을 때 위치 추정의 성능이 개선된 것을 알 수 있으며, [Fig. 14]과 [Fig. 15]를 통해 3차원 상대관측 정보를 사용하고 더 많은 수의 상대 관측 정보를 활용할 때 위치추정의 결과가 더 개선된 것을 확인할 수 있다.



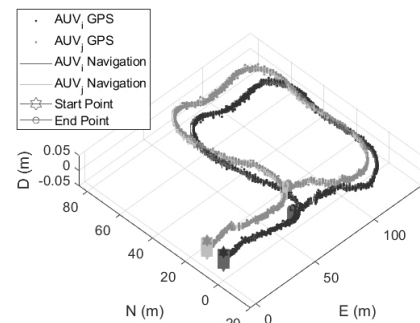
[Fig. 8] Experimental result without relative observations: GT and estimated route of  $AUV_i$  and  $AUV_j$



[Fig. 9] Experimental result of using relative 2D-distance, relative bearing, relative heading: GT and estimated route of  $AUV_i$  and  $AUV_j$



[Fig. 10] Experimental result of using relative 3D-distance, relative bearing, relative heading: GT and estimated route of  $AUV_i$  and  $AUV_j$



[Fig. 11] Experimental result of using relative 3D-distance, relative bearing, relative heading, relative elevation, relative pitch: GT and estimated route of  $AUV_i$  and  $AUV_j$

[Table 2] Experimental results of 4 cases

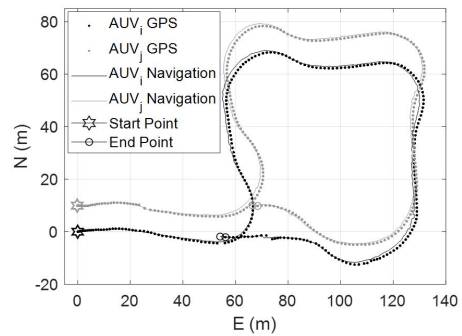
Average of mean distance error of localization [m]				
	$AUV_i$	$AUV_j$	Average	Improvement rate (%)
Expt 1	2.0079	4.3225	3.1652	-
Expt 2	1.5383	1.5582	1.5483	51.08
Expt 3	1.3983	1.3648	1.3816	56.35
Expt 4	1.3408	1.3139	1.3274	58.06

Expt 1: Without relative observations. (Only navigation)

Expt 2: Using relative 2D-distance, bearing, heading.

Expt 3: Using relative 3D-distance, bearing, heading.

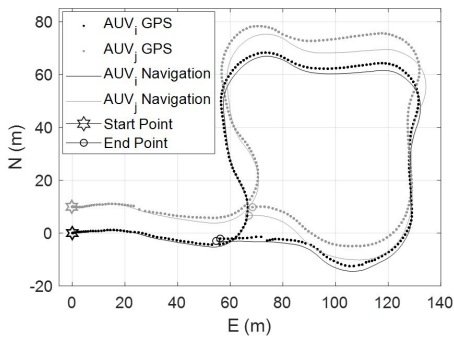
Expt 4: Using relative 3D-distance, bearing, heading, elevation, pitch.



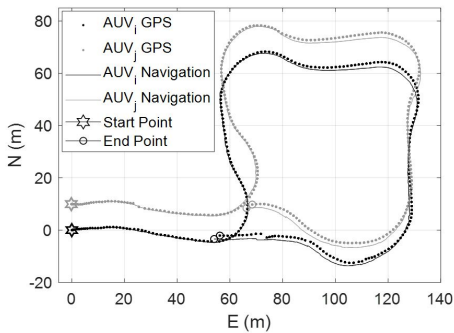
[Fig. 15] Experimental result of using relative 3D-distance, relative bearing, relative heading, relative elevation, relative pitch: GT and estimated route of  $AUV_i$  and  $AUV_j$  on N-E plane

### 4. 결론

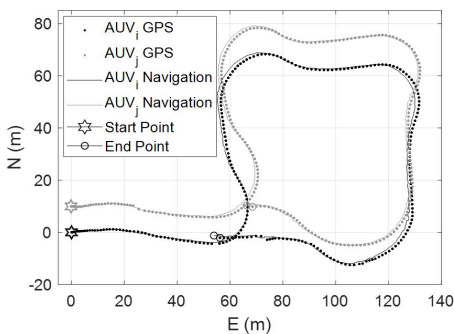
본 논문에서는 AUV의 단독운용에서 나타난 한계를 극복하기 위해 연구되고 있는 Multiple-AUVs에 대해 상대 관측 정보를 통한 위치추정 알고리즘을 제안하고, 알고리즘의 성능을 AUV의 실험실 실험으로 취득한 데이터를 통해 시뮬레이션을 수행하여 검증하였다. 복합 항법 알고리즘만을 거쳐 취득한 위치추정 결과와 비교하여 제안한 알고리즘을 사용하였을 때 향상된 성능을 보였으며, 선행 연구에서 활용한 상대 관측 정보 이외에도 수중공간을 고려한 3차원 상대 관측 정보들을 제안했다. 더 나아가, 상대 관측 정보의 조합에 따른 실험을 진행하여 최적화된 상대 관측 정보 조합을 도출하고 조합 간 성능을 비교했다. 이를 통해 5가지 상대 관측 정보를 사용하는 것이 성능면에서 가장 우수했으며, 상대적으로 낮지만 3가지 관측 정보로도 충분한 성능 향상을 보였다. 5가지 상대 관측 정보를 취득하기 위해 실제 시스템의 복잡도가 증가하는 점과 각 AUV의 연산량 그리고 AUV간의 통신량 증가로 인해 시간 지연이 발생하는 점을 고려하면, relative 3D-distance를 포함한 3가지 상대 관측 정보를 사용하는 것이 효율적이다. GPS와 같은 센서로부터 취득가능한 절대적인 위치 정보가 아닌 상대적인 정보를 사용했음에도 불구하고 각 AUV의 위치추정 성능이 모두 개선되었다. 하지만, 근본적으로 상대적인 정보를 통해 위치를 보정하므로 누적오차가 발생하는 한계는 분명히 존재한다. 제안한 알고리즘을 통해 Multiple-AUVs의 위치추정 성능을 향상할 수 있으며, 이러한 성능향상은 운용 및 임무 수행 능력의 효율을 증대하고 충돌이나 간섭 등의 문제 예방을 기대한다. 제안한 알고리즘은 AUV 뿐만 아니라 드론과 같은 항공 로봇을 다중으로 운용하여 상대 관측 정보를 사용할 수 있는 상황에서도 활용할 수 있다. 추후에는 제안한 알고리즘을 실제 플랫폼에 적용하여 성능을 검증하는 과정과 깊이 방향(D)으로의 움직임이 큰 경로에 대한 실험이 필요하다. 여기에 더해, 3대 이상의 AUV로 구성된 Multiple-AUVs에 적용



[Fig. 12] Experimental result without relative observations: GT and estimated route of  $AUV_i$  and  $AUV_j$  on N-E plane



[Fig. 13] Experimental result of using relative 2D-distance, relative bearing, relative heading: GT and estimated route of  $AUV_i$  and  $AUV_j$  on N-E plane



[Fig. 14] Experimental result of using relative 3D-distance, relative bearing, relative heading: GT and estimated route of  $AUV_i$  and  $AUV_j$  on N-E plane

하는 연구가 이루어져야 한다. 또한, 실제 시스템에서 상대관측 정보를 취득할 때 iUSBL과 같은 초음파 센서를 사용하게 되는데, AUV간의 상대 거리, 자세에 따라 센서가 제공하는 정보의 신뢰도는 상이하므로<sup>[13]</sup> 이러한 신뢰도를 고려하여 상대 정보를 사용하는 연구가 필요하다.

## References

- [1] J. E. Lee, "Technology Development Trends Analysis and Development Plan of Unmanned Underwater Vehicle," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, vol. 20, no. 9, pp. 233-239, 2019, DOI: 10.5762/KAIS.2019.20.9.233.
- [2] 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*, vol. 15, no. 7, pp. 647-656, 2019, DOI: 10.7746/jkros.2020.15.1.016.
- [3] A. Martinelli, F. Pont, and R. Siegwart, "Multi-Robot Localization Using Relative Observations," *2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2797-2802, 2005, DOI: 10.1109/ROBOT.2005.1570537.
- [4] Y. T. Tan, R. Gao, and M. Chitre, "Cooperative Path Planning for Range-Only Localization Using a Single Moving Beacon," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 39, no. 2, pp. 371-385, April, 2014, DOI: 10.1109/JOE.2013.2296361.
- [5] N. R. Rypkema, H. Schmidt, and E. M. Fischell, "Synchronous-Clock Range-Angle Relative Acoustic Navigation: A Unified Approach to Multi-AUV Localization, Command, Control and Coordination," *arXiv:2110.13825 [cs.RO]*, 2021, DOI: 10.48550/arXiv.2110.13825.
- [6] A. Bahr, J. J. Leonard, and M. F. Fallon, "Cooperative Localization for Autonomous Underwater Vehicles," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 28, no. 6, pp.714-728, 2009, DOI: 10.1177/0278364908100561.
- [7] T. Matsuda, K. Fujita, Y. Hamamatsu, T. Sakamaki, and T. Maki, "Parent-child-based navigation method of multiple autonomous underwater vehicles for an underwater self-completed survey," *Journal of Field Robotics*, vol. 39, no. 2, pp. 89-106, 2022, DOI: 10.1002/rob.22038.
- [8] A. S. Muntadas, E. F. Brekke, O. Hegrehaes, and K. Y. Pettersen, "Navigation and Probability Assessment for Successful AUV Docking Using USBL," *IFAC-PapersOnline*, vol. 48, no.16, pp. 204-209, 2015, DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.10.281.
- [9] 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*, vol. 26, no. 8, pp. 649-659, 2020, DOI: 10.5302/J.ICROS.2020.20.0071.
- [10] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, Wiley & Sons Inc, 1994, [Online], <https://www.wiley.com/en-us/Guidance+and+Control+of+Ocean+Vehicles-p-9780471941132>.
- [11] D. H. Titterton and J. Weston, *Strapdown Inertial Navigation Technology*, 2nd ed. Institution of Electrical Engineers, 2004, <https://shop.theiet.org/strapdn-inertial-navig-t-2ed>.
- [12] I. Yun, J. Shim, and J. Kim, "Pose estimation method using sensor fusion based on extended Kalman Filter," *Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 54, no. 2, 2017, DOI: 10.5573/ieie.2017.54.2.106.
- [13] S. Shoval and J. Borenstein, "Measuring The Relative Position And Orientation Between Two Mobile Robots With Binaural Sonar," *ANS 9th International Topical Meeting on Robotics and Remote Systems*, 2001, [Online], <http://www-personal.umich.edu/~johannb/Papers/paper83.pdf>.



**최 기 환**

2022 충남대학교 메카트로닉스공학과(학사)  
2022~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 석·박사 통합과정

관심분야: 위치 추정, 수중 로봇, 항법, 제어



**이 한 슬**

2016 충남대학교 메카트로닉스공학과(학사)  
2018 충남대학교 메카트로닉스공학과(석사)  
2018~현재 한화시스템

관심분야: 수중 로봇, 자율무인잠수정, 항법, 제어



**이 권 수**

2020 충남대학교 메카트로닉스공학과(학사)  
2020~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 석·박사 통합과정

관심분야: 위치 추정, 항법, 자율무인잠수정, 수중로봇, 주행 로봇, 제어



**강 형 주**

2012 동명대학교 로봇시스템공학과(학사)  
2014 동명대학교 기계시스템공학과(석사)  
2014~현재 한국로봇융합연구원

관심분야: 인공지능, 제어이론, 해양로봇



**이 필 엽**

2004 충남대학교 메카트로닉스공학과(학사)  
2006 충남대학교 메카트로닉스공학과(석사)  
2006~2011 한국 해양연구원  
2011~2016 (주)한화중합연구소  
2016~현재 한화시스템

관심분야: 수중 로봇, 자율무인잠수정, 항법, 제어, 모니터링 시스템



**이 지 흥**

1983 서울대학교 전자공학과(학사)  
1985 KAIST 전기 및 전자공학과(석사)  
1991 KAIST 전기 및 전자공학과(박사)  
1994~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수

관심분야: 위치 추정, 수중 로봇, 양팔 로봇, 야지 주행 로봇



**김 호 성**

2009 한국해양대학교 기계시스템(학사)  
2011 한국해양대학교 기계공학(석사)  
2011~현재 한화시스템

관심분야: 수중 로봇, 자율무인잠수정, 항법, 제어