

# 방향 모호성을 고려한 수중 음향 기반의 2차원 위치 추정 기술 개발

## Acoustic based Two Dimensional Underwater Localization Considering Directional Ambiguity

최진우<sup>†</sup> · 이영준<sup>1</sup> · 정종대<sup>1</sup> · 박정홍<sup>1</sup> · 최현택<sup>1</sup>

Jinwoo Choi<sup>†</sup>, Yeongjun Lee<sup>1</sup>, Jongdae Jung<sup>1</sup>, Jeonghong Park<sup>1</sup>, Hyun-Taek Choi<sup>1</sup>

**Abstract:** Acoustic based localization is essential to operate autonomous robotic systems in underwater environment where the use of sensorial data is limited. This paper proposes a localization method using artificial underwater acoustic sources. The proposed method acquires directional angles of acoustic sources using time difference of arrivals of two hydrophones. For this purpose, a probabilistic approach is used for accurate estimation of the time delay. Then, Gaussian sum filter based SLAM technique is used to localize both acoustic sources and underwater vehicle. It is performed by using bearing of acoustic sources as measurement and inertial sensors as prediction model. The proposed method can handle directional ambiguity of time difference based source localization by generating Gaussian models corresponding to possible locations of both front and back sides. Through these processes, the proposed method can provide reliable localization method for underwater vehicles without any prior information of source locations. The performance of the proposed method is verified by experimental results conducted in a real sea environment.

**Keywords:** Underwater Vehicle, Acoustic Source, SLAM, Localization, Gaussian Sum Filter

### 1. 서 론

최근 과학연구 및 탐험, 해양자원 조사, 해난구조 활동, 해양정찰 및 감시 등을 목적으로 수중 로봇에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 따라, 세계 각국의 정부 및 연구 기관들에서 앞다퉈 국방, 해저 과학 탐험, 자원 탐사 등의 다양한 목적을 위해 수중 로봇 분야에 대한 지원 및 연구 개발을 수행하고 있다<sup>1)</sup>. 하지만, 수중 로봇 분야는 지상 로봇이나 비행 로봇 분야

에 비해 상대적으로 기술 개발의 속도가 느릴 뿐 아니라, 기술의 완성도가 떨어진다. 이에 대한 가장 큰 원인은 활용 가능한 센서의 제약이 크다는 것이다<sup>2,3)</sup>. 수중 환경은 전자기 신호의 감쇠율이 높아 GPS 등의 신호가 매우 제한적으로 사용 가능하며, 탁도 등의 영향으로 카메라 기반의 기술 적용 또한 매우 제한적이다<sup>4)</sup>.

수중 환경에서의 로봇 시스템 개발을 위해서는 수중 음향 신호의 활용이 필수적이다. 음향 신호는 수중 환경에서 빠른 전달 속도를 가지며, 전자기 신호에 비해 상대적으로 낮은 감쇠율을 가진다. 이로 인해 수중 음향 신호는 수중 물체 추적, 수중 통신 등의 분야에서 다양하게 적용되어 왔다<sup>5,6)</sup>.

본 논문은 수중 로봇의 자율 항법 기술 개발을 위해 인공 수중 음향 기반의 위치 인식 기술을 제안한다. 수중 음향 신호를 이용한 위치 인식 기술은 장기선(Long Baseline), 단기선(Short Baseline), 초단기선(Ultra Short Baseline) 등의 형태로 이미 다양한 수중 로봇 시스템에서 활용되고 있다. 하지만, 이러한 상용 시스템의 경우 비용이 매우 비싸고, 시스템의 활용

Received : Aug. 16. 2017; Revised : Sep. 14. 2017; Accepted : Oct. 11. 2017

※ This research was supported by a grand from Endowment Project of "Development of fundamental technologies on underwater environmental recognition for long-range navigation and intelligent autonomous underwater navigation" funded by Korea Research Institute of Ships and Ocean engineering (PES9000)

1. Ocean System Engineering Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (leeyongjun@kriso.re.kr, jdjung@kriso.re.kr, jeonghong@kriso.re.kr, htchoi@kriso.re.kr)

† Corresponding author: Ocean System Engineering Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon, Korea (jwchoi@kriso.re.kr)

을 위한 장비의 설치 및 회수에 상당한 시간이 소요된다. 예를 들어, 장기선의 활용을 위해서는 수중 로봇의 작업 반경에 수 개의 트랜스폰더(transponder)를 정해진 해저 지면에 설치하고 그 위치를 진수 시 획득된 GPS 정보를 기반으로 보정 등의 추가 작업이 수행되어야 한다<sup>5)</sup>.

이러한 전통적인 방식의 수중 음향 신호 기반 위치 추적의 번거로움 및 한계성을 극복하기 위해, 다양한 형태의 위치 인식 기법들이 제안되어 활용되기도 하였다. Alcocer는 트랜스폰더의 해저면 설치 및 회수를 대체할 수 있도록 부표(Buoy)에 트랜스폰더를 설치하고 GPS로 위치를 실시간 측정하는 GIB (GPS Intelligent Buoy) 시스템을 제안하였다<sup>7)</sup>. Newman은 장기선의 거리 정보를 EKF (extended Kalman filter) SLAM 기술에 적용하여 트랜스폰더의 초기 위치 정보 없이 수중 로봇 위치 추정을 수행하였다<sup>8)</sup>. Olson 역시 이와 유사한 형태의 기술을 적용하기도 하였다<sup>9)</sup>. Corato는 초단기선 시스템을 역방향으로 활용하여 거리 및 방향각 정보를 활용한 SLAM 기술을 구현하였다<sup>10)</sup>.

위와 같은 단기선 혹은 초단기선 등의 전통적인 장비를 활용한 위치 인식 방식 외에도, 고정형 혹은 이동형 음원을 이용한 수동형 위치 인식 방법도 활용되었다. Kahn은 GPS가 부착된 무인 수상 로봇에 음원을 설치하고 수중 로봇에서 해당 신호를 취득하여 위치 인식을 수행하였다<sup>11)</sup>. Rypkema는 고정형 수중 음원을 이용한 위치 인식을 수행하였으며, 발신 음원과 수신부 간의 시간 동기화를 이용한 단방향 거리 측정 방식 (One Way Travel Time Ranging)을 이용하여 거리 및 방향각 기반의 위치 인식을 수행하였다<sup>12)</sup>. 이러한 수동형 위치 인식 기술들은 로봇이 능동적인 신호를 발신하지 않기 때문에 로봇에 장착되는 장비가 간단하며, 이에 따라 저가의 비용으로 시스템 구성이 가능하다. 뿐만 아니라, 능동적인 신호 발신이 없기 때문에 군사용 목적 등으로 활용이 용이하다는 장점이 있다.

본 논문에서는 수중 음향 신호의 방향각 정보를 이용한 수동형 위치 인식 기법을 제안한다. 제안된 방법은 두 개의 하이드로폰을 이용하여 얻어지는 수중 음원의 방향각 정보로부터, 앞뒤 방향 모호성(Front-back ambiguity)을 고려한 위치 인식을 수행한다. 두 개의 하이드로폰을 이용한다는 한계로 인해, 로봇의 위치 추정은 2차원 상에서 수행된다. 제안된 방법은 아래의 세 단계를 통해 수행된다. 먼저, 수중 음원에서 반복적으로 발신되는 수중 음향 신호를 취득하여 도달시간차이(Time Difference of Arrivals) 기반의 방향각 추정을 수행한다. 다음으로, 추정된 방향각 정보와 추측 항법 센서 정보를 이용하여, 가우시안 합 필터(Gaussian sum filter) 기반의 SLAM 기술을 적용하여 로봇 및 음원의 위치 추정을 수행한다. 마지막 단계로, 개별적인 가중치 값으로부터 상대적으로 낮은 가중치를 갖는 가우시안 모델들을 제거한다.

위의 과정을 통해 수행되는 제안된 방법은 다음의 장점이 있다. 먼저, SLAM 기술의 적용을 통해 전통적인 방식의 수중 음향 신호 기반 위치 인식 기술들과 달리, 트랜스폰더 혹은 음원에 대한 사전 위치 정보를 필요로 하지 않는다. 또한, 저가의 비용으로 시스템 구성이 가능하며 설치 및 회수가 용이하다. 다음으로, 수동형 방향각 정보만으로 위치 추정이 가능하며 이로 인해 발신 음원과 수신부 간의 동기화 등의 작업이 필요하지 않는다. 마지막으로, 앞뒤 방향 모호성을 고려한 방식으로 인해 음원 설치 위치의 제약이 없다. 이를 통해 제안된 방법은 추측 항법 센서 정보와 수중 음향 신호의 조합을 통한 수중 로봇의 안정적인 위치 추정 기술로 활용이 가능하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 음향 신호 처리에 대한 기본적인 내용과 함께 수중 음원 기반의 위치 추정을 위한 문제 정의를 하고, 3장에서 도달시간차이 기반의 방향각 추정 기술을 언급한다. 4장에서는 방향각 정보와 추측 항법 센서 정보를 활용한 가우시안 합 필터 기반 SLAM 기술을 설명한다. 5장은 부두 환경에서의 실험 결과를 보여주며, 6장에서 결론을 맺는다.

## 2. 문제 정의

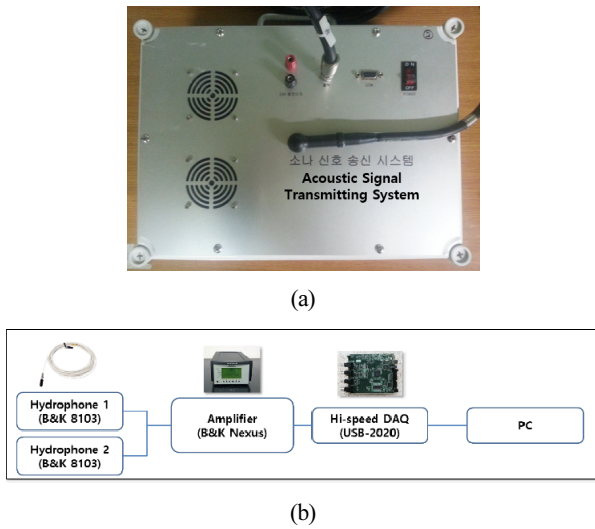
### 2.1 수중 음향 시스템 구성

수중 환경은 다양한 종류의 음향 신호가 존재한다. 해양 생물, 선박 혹은 플랜트 등의 해양 장비 등에서 다양한 주파수 대역의 음향 신호가 발생하는 것이다. 본 연구에서는 이러한 자연 발생되는 음향 신호들은 대상으로 하지 않고, 인공 수중 음원에서 발생된 음향 신호를 활용한 수중 로봇 위치 인식 기술을 개발한다. 각 음원은 고유의 주파수 대역폭을 갖고 있으며, 정해진 신호를 반복적으로 발신한다.

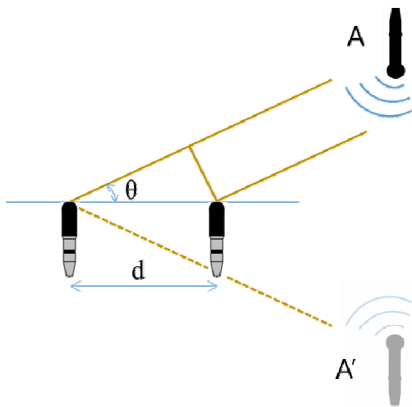
수중 음원으로부터 발신된 음향 신호는 로봇에 장착된 두 개의 하이드로폰을 통해 취득되어, 앰프를 통한 신호 증폭, 고속 신호 처리 보드를 통한 위치 인식에 사용된다. [Fig. 1 (a)]는 음향 신호 발생 장치와 수중 음원으로 사용된 B&K사의 8015 하이드로폰을 보여준다. [Fig. 1 (b)]는 수신용 하이드로폰으로 사용된 B&K사의 8103 하이드로폰, 앰프, 그리고 신호 취득용 보드가 포함된 수중 음향 신호 취득 시스템을 보여준다.

### 2.2 문제 정의

수동형 음원 위치 추정 기술은 기본적으로 도달시간차이 기반의 방향각 정보를 이용한 방법이 활용된다. 도달시간차이 기법은 동일한 음원에서 발신된 음향 신호를 서로 다른 하이



[Fig. 1] (a) Underwater acoustic source and (b) Acoustic signal acquisition system



[Fig. 2] Front-back ambiguity of time difference arrivals based direction estimation

드로폰에서 획득함으로써 수신 음향 신호 간의 시간차를 측정하는 방법이다.

본 논문에서는 두 개의 하이드로폰으로부터 획득된 수중 음향 신호를 이용하여 방향각 정보를 추정한다. 다수의 하이드로폰 배열을 사용하면 거리와 방향각 정보를 한번에 획득할 수 있는 장점이 있으나, 수신 센서의 크기가 커지고 신호 처리가 복잡해진다. 따라서, 본 연구에서는 음향 신호 정보로부터 수중 음원의 방향각 정보만을 추정하고, 로봇의 이동 및 추측 항법용 센서 정보와의 융합을 통한 위치 인식을 수행하도록 한다.

[Fig. 2]는 두 개의 하이드로폰을 이용한 도달시간차이 기반의 방향각 추정 기술에 대한 기본 원리를 보여준다. 수신 하이드로폰과 수중 음원의 거리가 두 수신 하이드로폰 사이의 거리( $d$ )에 비해 비교적 멀다고 가정하였을 때, 수중 음향 신호의

진과 모델을 평면파로 가정할 수 있다. 이로부터, 수중 음원 A의 방향각은 두 수신 음향 신호 간의 도달시간차이( $\delta_t$ )로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$\theta = \arccos(\delta_t \cdot C/d) \tag{1}$$

여기에서  $C$ 는 수중 음속(약 1,500 m/s)이다.

위와 같은 도달시간차이 기반의 방향각 추정은 두 가지 해결되어야 할 문제점이 있다. 먼저, 식 (1)에서 보이는 바와 같이 정확한 방향각 정보를 추정하기 위해서는 두 수신 신호 간의 정확한 도달시간차이 값( $\delta_t$ )을 얻을 수 있어야 한다. 도달시간차이 값이 부정확하게 얻어지면 이는 부정확한 방향각으로 이어지기 때문이다. 다음으로, [Fig. 2]에서 보이는 바와 같이 하나의 도달시간차이 값으로부터 얻어지는 수중 음원의 위치는 두 방향으로 표현될 수 있다. 음원 위치 A와 A'은 동일한 도달시간차이를 갖기 때문이다. 이를 앞뒤 모호성이라고 한다. 본 논문의 이어지는 3장과 4장의 내용에서 위의 두 가지 문제에 대한 부분을 고려한 수중 음원 기반 위치 인식 기술을 제안한다.

### 3. 수중 음원 방향각 추정

앞 장에서 보인 바와 같이, 수중 음원의 방향각 추정을 위해서는 두 음향 신호의 도달시간차이 값을 정확히 얻을 수 있어야 한다. 본 연구에서는 도달시간차이 추정에 보편적으로 사용되는 일반화된 상호상관분석<sup>[13]</sup>을 기반으로 하여, 반복적으로 발신되는 수중 음원의 특성을 이용한 확률적 방향각 추정 기법을 이용한다.

먼저 두 수신 신호  $x_1(t)$ 와  $x_2(t)$ 의 상호상관분석은 두 신호 간의 상호상관계수(cross-correlation) 값이 최대가 되는 시간차 값을 얻는 방식으로 수행된다.

$$R_{x_1x_2}(\tau) = E[x_1(t)x_2(t-\tau)] \tag{2}$$

$$\delta_{t,CC} = \operatorname{argmax}_{\tau} R_{x_1x_2}(\tau) \tag{3}$$

여기에서  $R_{x_1x_2}(\tau)$ 는 두 수신 신호 간의 상호상관계수 값,  $\delta_{t,CC}$ 는 상호상관분석에서 얻어지는 도달시간차이 값이다.

이러한 상호상관분석으로부터 얻어지는 도달시간차이는 현재 시점에서 얻어진 음향 신호 정보만을 이용하여 결정된다. 하지만 현재 시점에서 얻어진 음향 신호가 수중 반사파 등에 의해 일시적으로 왜곡되거나 혹은 수중 소음원(noise source)으로부터 잘못된 음향 신호가 획득된 경우 도달시간차이는 정

확히 언어질 수 없게 되어 방향각 추정 및 위치 추정 성능을 저하시킨다. 따라서, 본 연구에서는 수중 음원에서 음향 신호가 반복적으로 발신되는 특성을 이용하여, 베이지안 프로세스를 적용한 확률적 방향각 추정을 수행한다.

확률적 방향각 추정은 도달시간차이를 확률밀도분포  $P(\tau = \delta_t)$ 로 표현하고, 해당 확률 값을 베이지안 확률 모델을 이용하여 매 시점마다 업데이트 한다(식 4).

$$P(\tau = \delta_t | z_{1:t}, u_{1:t}) = \eta \cdot P(z_t | \tau = \delta_t) P(\tau = \delta_t | z_{1:t-1}, u_{1:t}) \quad (4)$$

여기에서  $u_{1:t}$ 는 t 시간까지의 확률 모델 업데이트를 위한 모션 모델,  $z_{1:t}$ 는 측정 모델이며, 측정 모델은 상호상관분석 결과를 이용하였다. 위 식에 대한 자세한 변수 및 전개는 참고 문헌에 언급되어 있다<sup>14)</sup>. 위의 과정을 통해 얻어지는 확률 분포로부터 도달시간차이는 확률 값이 최대가 되는 시간차 값으로 추정된다.

$$\delta_{i, Prob} = \operatorname{argmax}_{\tau} P(\tau) \quad (5)$$

이러한 과정을 통해 수행되는 확률적 방향각 추정 방법은 상호상관분석에 의한 도달시간차이 획득 방법의 단점을 보완해 줄 수 있다. 즉, 연속적으로 얻어지는 음향 신호 정보를 활용하여 도달시간차이를 추정함에 따라, 현재 신호가 일시적으로 잡음 혹은 반사파의 영향이 있더라도 누적된 확률분포 정보로부터 그 영향을 완화시킬 수 있는 것이다. 이로써 안정적인 방향각 정보 추정이 가능하다.

#### 4. 가우시안 합 필터 기반 SLAM

추정된 수중 음원의 방향각 정보는 수중 로봇의 위치 추정 기술에 적용된다. 이를 위해, 가우시안 합 필터 기반의 SLAM 기술에 수중 음원의 방향각 정보를 측정 모델(measurement model)로 활용하여 수중 음원의 위치와 수중 로봇의 위치를 동시에 추정할 수 있도록 하였다. SLAM 기술을 활용함으로써, 수중 음원의 위치에 대한 초기 정보 없이도 로봇의 위치 추정이 가능하도록 한 것이다.

일반적인 거리-방향각 정보가 동시에 제공되는 센서의 경우, 단일 EKF SLAM 혹은 FastSLAM 등의 필터링 기법이 전통적으로 적용되어 왔으며, 최근에는 위치 관계의 구속 조건을 이용한 iSAM 등의 그래프 기반 SLAM 기술들이 사용되기도 하였다. 하지만 본 연구에서 사용되는 측정 모델인 수중 음원의 방향각 정보만을 이용한 방법에는 거리 정보가 제공되지 않는 점, 그리고 앞뒤 모호성을 동시에 고려해야 하는 점을 감

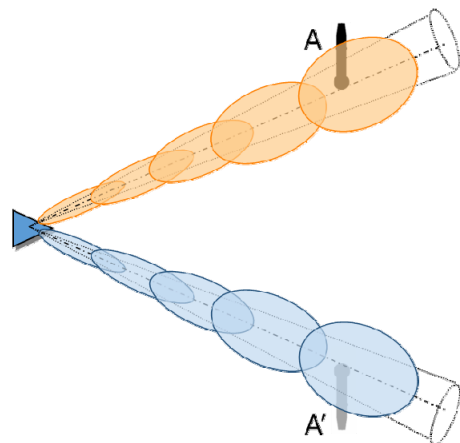
안하여 가우시안 합 필터 기반의 SLAM 기술을 적용하였다. 다중 모델을 이용하는 점에서 가우시안 합 필터는 입자 필터와 유사한 측면이 있다. 하지만, 가우시안 합 필터는 정규 분포 가정을 통해 확률 분포를 정규 분포 모델의 조합으로 표현하는 반면, 입자 필터는 입자들의 분포를 통해 확률 분포를 표현하게 된다. 본 연구에서 입자 필터를 적용하는 것 또한 가능하나, 일반적인 센서 정보들이 정규 분포 및 백색 잡음 가정에서 크게 벗어나지 않는 점과 계산의 용이성 등을 고려하여 가우시안 합 필터가 적용되었다.

수중 음원 방향각 정보를 이용한 가우시안 합 필터는 수중 음원 위치의 초기화를 위해, 수중 음원의 탐지 거리를 고려한 수 개의 가우시안 모델을 생성함으로써 거리 정보의 부재를 감안한 방향각 기반 SLAM 기술을 구현하였다. 또한, 앞뒤 모호성을 고려하기 위해 하이드로폰 축에서의 거울 형상 음원 위치에 추가적으로 가우시안 모델을 생성하였다(Fig. 3).

[Fig. 3]에서 보이는 바와 같이, 다수의 초기 거리에 대한 가우시안 모델을 생성함으로써 인해 거리축으로의 전체 확률 분포가 균등 분포(uniform distribution)와 유사한 모델을 가질 수 있도록 하였다. 뿐만 아니라, 실제 수중 음원이 A에 있다고 가정하였을 때, 수중 로봇은 현재의 방향각 정보만으로 앞뒤 모호성을 판단할 수 없으므로 A 방향과 이에 대한 거울 형상 위치인 A' 방향 모두에 가우시안 모델을 생성함으로써 앞뒤 모호성을 고려한 알고리즘이 수행가능하도록 하였다.

각각의 가우시안 모델들은 상태 행렬  $X_i(t)$ , 공분산 행렬  $P_i(t)$ , 그리고 개별적인 가중치 값  $a_i(t)$ 를 갖게 된다. 이 중, 가중치 값은 전체 합이 1이 되도록 초기화 과정에서는 동일한 값으로 배분된다(식 6).

$$a_i(0) = 1/N \quad (6)$$



[Fig. 3] Landmark initialization for Gaussian sum filter based SLAM using directional angle of underwater acoustic source

여기에서  $a_i$ 는  $i$ 번째 가우시안 모델의 가중치 값이며  $N$ 은 전체 가우시안 모델의 수이다.

이렇게 생성된 개별적인 가우시안 모델들은 단일 모델 EKF SLAM에서의 예측 과정, 보정 과정과 동일하게 매 단계마다 수행된다. 예측 과정에서는 로봇의 모션 모델이 이용된다(식 7).

$$\hat{X}_i(t) = f(X_i(t-1), u_i) \quad (7)$$

여기에서  $u_i$ 는  $t-1$ 에서  $t$ 시간 사이의 모션 모델 입력 값으로, 실제적으로는 IMU (Inertial Measurement Unit)와 DVL (Doppler Velocity Log)의 센서 값으로부터 얻어진다.

보정 과정에서는 수중 음원의 방향각 정보가 이용되며, 이에 대한 측정 모델은 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{z}_i(t) &= h(\hat{X}_i(t)) \\ &= \tan^{-1} \left( \frac{y_{i,s_j}(t) - y_i(t)}{x_{i,s_j}(t) - x_i(t)} \right) - \psi_i(t) \end{aligned} \quad (8)$$

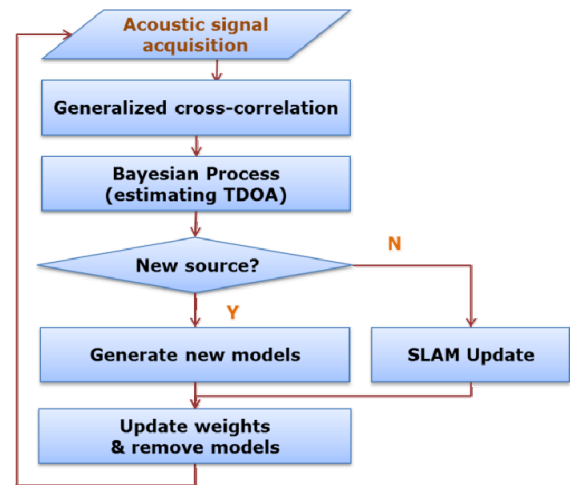
여기에서  $(x_i, y_i, \psi_i)$ 는  $i$ 번째 가우시안 모델에서 추정된 수중 로봇의 위치 및 선수각(heading) 정보이며,  $(x_{i,s_j}, y_{i,s_j})$ 는  $i$ 번째 가우시안 모델에서 추정된  $j$ 번째 수중 음원의 위치 정보이다.

이 과정에서 각각의 가우시안 모델들에 대한 가중치 값은 다음과 같이 계산되어진다.

$$a_i(t) = \eta \cdot a_i(t-1) \cdot \nu_i(t) \quad (9)$$

여기에서  $\eta$ 는 정규화(normalization) 계수이며,  $\nu$ 는 잉여값(innovation)의 표준 정규분포 확률 값이다. 위의 과정을 통해 보정 과정이 반복될수록 실제 수중 음원의 위치와 가까운 가우시안 모델들은 더욱 큰 가중치 값을 갖게 되며, 다른 가우시안 모델들은 작은 가중치 값을 갖게 된다.

마지막 단계로써, 낮은 가중치 값을 갖는 가우시안 모델들은 계산의 효율성을 위해 제거된다. 이를 위해서는 다양한 확률적 방법들을 적용할 수 있으나, 알고리즘 상의 효율성을 위해 간단한 휴리스틱(heuristic) 방법을 이용하였다. 전체 가우시안 모델의 수를  $N$ 이라고 할 때, 전체 가중치 값의 평균은  $1/N$ 이 된다. 이 값은 모든 가우시안 모델들이 균등 분포의 동일한 가중치를 가질 때의 값과 동일하다. 이러한 균등 분포 조건(가중치 평균값)을 기준으로 하여, 식 (10)의 조건을 만족하는 가우시안 모델들은 유의미한 모델로 간주하여, 이어지는 단계에서 유지하며 나머지 모델들은 제거되도록 하였다.



[Fig. 4] Flowchart for Gaussian sum filter based SLAM using directional angle of underwater acoustic source

$$a_i(t) > \gamma \cdot N^{-1} \quad (10)$$

여기에서  $\gamma$ 는 모델의 유의미성을 판단하기 위한 계수로, 균등 분포 대비 유의미성을 갖기 위한 가중치 값의 비율이다. 본 연구에서는 0.1의 값이 이용되었다. 즉, 전체 가중치 평균값의 10%보다 작은 가중치를 갖는 가우시안 모델들은 무의미한 모델로 간주되어 제거되도록 한 것이다.

[Fig. 4]는 전체 과정에 대한 알고리즘 흐름도를 간략하게 표현하고 있다. 음향 신호를 이용한 방향각 추정, 가우시안 합 필터 기반의 SLAM, 그리고 가중치를 이용한 모델의 제거 과정의 수행이 순차적으로 나타나있다. 위의 과정을 통해 수행되는 가우시안 합 기반의 SLAM 기술은 수중 음원의 초기 위치 정보 없이, 음원과 수중 로봇의 위치를 동시에 추정할 수 있도록 한다. 또한, 이 과정에서 앞 뒤 모호성을 고려함으로써 수중 음원이 임의의 위치에 설치될 수 있어 효과적인 수중 위치 추정 기술을 제공해 줄 수 있다.

## 5. 실험 결과

제안된 수중 위치 추정 기술의 검증은 위해 한국해양과학기술원 남해연구소 부두 환경에서 실험을 수행하였다. 서론에서 언급하였듯이, 본 연구에서 제안된 방법은 두 개의 하이드로폰이 장착된 로봇 시스템의 2차원 위치 추정을 수행하는 점을 고려하고, 위치 추정의 정확도 검증을 위한 기준값으로 DGPS 정보를 획득하기 위해 무인 수상 로봇을 이용한 실험을 수행하였다.

[Fig. 5]는 두 개의 B&K 8103 하이드로폰과, IMU, DVL, 그리고 위치 추정의 성능 검증을 위한 DGPS가 장착된 무인 수상



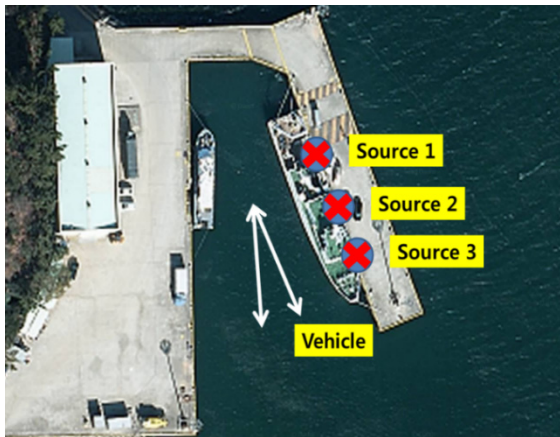
로봇의 모습을 보여준다. 두 개의 하이드로폰은 0.6 m의 간격으로 배치되었다.

수중 음향 시스템을 위해서는 [Fig. 1 (a)]에서 보였던 신호 발생 장치와 B&K 8105 하이드로폰을 이용한 수중 음원 세 개가 이용되었다. 수중 음원은 정해진 주파수 대역의 음향 신호를 100 ms 주기로 반복적으로 발신하였다. 이렇게 발생된 수중 음향 신호는 100 kHz의 속도로 취득되어 방향각 추정 및 로봇의 위치 추정에 이용되었다.

[Fig. 6]은 실험에서 사용된 세 개의 수중 음원의 위치와 함께, 로봇이 이동한 경로를 보여준다. 보이는 바와 같이, 로봇은 정해진 상하 경로를 2회 반복 이동 하였으며, 약 120 m 길이의 전체 이동 경로를 5분 30초 정도의 시간 동안 이동하였다. 세 개의 수중 음원은 서로 다른 주파수 대역의 신호를 발신하여, 로봇이 음향 신호를 식별할 수 있도록 하였다.



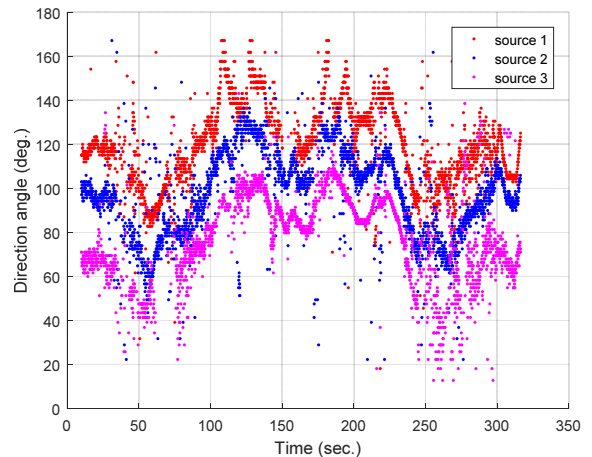
[Fig. 5] Unmanned surface vehicle equipped with acoustic positioning system



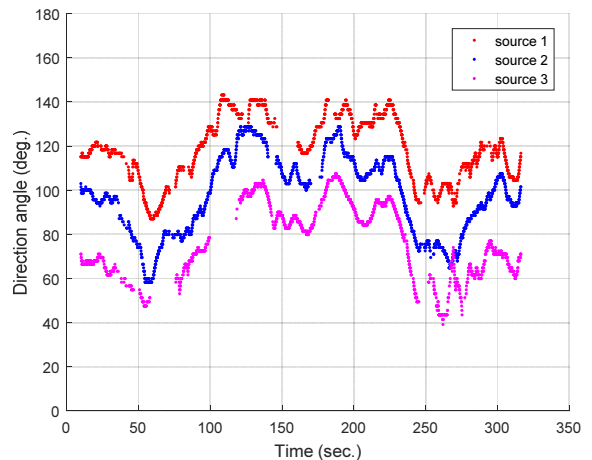
[Fig. 6] Experimental setup: locations of underwater acoustic sources and vehicle path

[Fig. 7]은 세 개의 수중 음원에 대한 방향각 추정 결과이다. 서로 다른 색은 개별적인 음원들의 방향각 추정 결과를 나타낸다. [Fig. 7 (a)]에서 보이는 바와 같이 일반화된 상호상관분석 방법은 잡음 및 반사파 등의 영향으로 다수의 부정확한 결과(outlier)가 얻어진 것을 확인할 수 있다. 반면, 베이지안 기반의 확률적 방향각 추정은 상호상관분석에서 얻어진 대부분의 부정확한 결과들을 효과적으로 제거하였으며([Fig. 7 (b)]), 이를 통해 위치 추정에 성공적으로 활용될 수 있는 정보를 제공하고 있다.

[Fig. 8]은 가장 먼저 인식된 수중 음원 3의 초기화 과정을 보여준다. 거리 정보의 부재를 극복하기 위해 방향각 정보를 이용하여 매 15 m 마다 6개의 가우시안 모델을 생성하였다. 이는 생성된 가우시안 모델들이 거리 축으로 서로간의 공통 영역을 갖도록 하여, 균등 분포를 모사할 수 있도록 선정되었다. 이를 통해 최대 약 100 m 이내에 존재하는 수중 음원에 대해



(a)



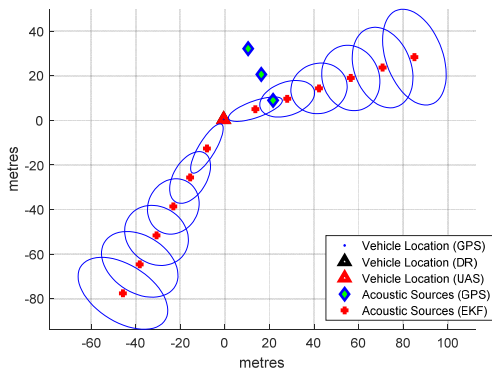
(b)

[Fig. 7] Estimated direction angles for three acoustic sources: (a) Generalized cross-correlation, and (b) Probabilistic method

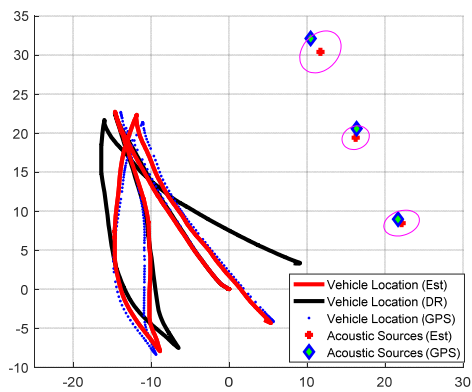
위치 추정이 가능하도록 하였다. 또한, 추가적으로 앞뒤 모호성을 극복하기 위해 양방향으로 가우시안 모델이 생성된 것을 확인할 수 있다. 결과적으로, 하나의 수중 음원 방향각 정보로부터 12개의 가우시안 모델이 생성되었다. 여기에서, 가우시안 모델의 간격 및 개수는 최대 거리, 거리 및 방향각 분산값등을 고려하여 실험 환경에 맞게 변경될 수 있다.

[Fig. 9]는 수중 음원의 방향각 정보를 이용한 가우시안 합 필터 SLAM의 결과를 보여준다. [Fig. 9]에서 보이는 추정 위치 및 공분산은 개별 가우시안 모델의 가중치 값으로부터 얻어진 가중 평균 정보이다. 로봇의 위치 추정 성능을 검증하기 위해, DGPS 정보를 기준 위치로 획득하여 파란색 점으로 표현하였다. SLAM에서 추정된 로봇의 위치는 빨간색 선으로 표현되었고, 추측 항법(dead-reckoning)에 의해 얻어진 결과는 검정색 선으로 표현되었다. 그림에서 보이는 바와 같이, 로봇이 출발한 초기에는 추측 항법과 SLAM 모두 DGPS와 유사한 위치 추정을 보이나, 시간이 지남에 따라 추측 항법의 결과는 위치가 발산하고 SLAM 결과는 위치 오차가 한정(bound)되는 결과를 확인할 수 있다.

[Fig. 9]에서 보이는 바와 같이 수중 음원의 위치 정보 역시



[Fig. 8] Landmark initialization of Gaussian sum filter



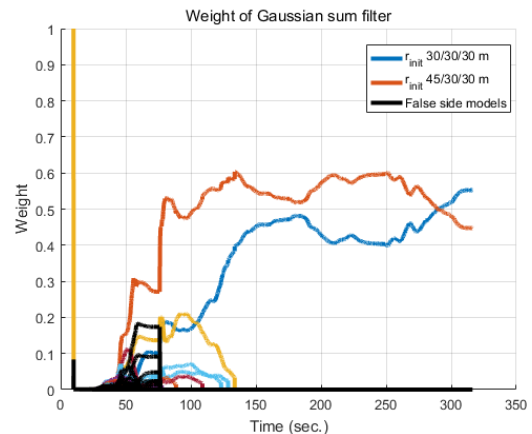
[Fig. 9] Experimental results of Gaussian sum filter SLAM using underwater acoustic sources

DGPS로부터 얻어진 실제 위치와 유사하게 추정된 것을 확인할 수 있다. 추정된 수중 음원의 위치 및 오차는 [Table 1]에 나타나 있다. 최대 약 2m 오차가 음원 1에서 발생하였으며, 로봇이 이동한 경로에서 가까운 위치에 놓인 수중 음원의 위치 추정 정확도가 상대적으로 높게 얻어졌다. 로봇이 더욱 다양한 경로로 이동하며 정보를 획득할 시, 전체 음원의 위치 추정 정확도가 더욱 높아질 것을 기대할 수 있다.

[Fig. 10]은 전체 시간에 대한 개별적인 가우시안 모델들의 가중치 변화를 보여준다. 앞에서 언급한 바와 같이, 개별적인 가우시안 모델들은 서로 다른 초기 거리 값을 이용하여 EKF-SLAM 과정을 수행하며, 로봇 및 세 개의 음원에 대한 위치를 추정한다. 또한 예측 및 보정 과정을 통해 계산되는 개별적인 가중치 값을 통해 유효한 모델만을 남길 수 있도록 한다. 그림에서 보이는 바와 같이, 대부분의 가우시안 모델들은 보정 과정 및 제거 과정을 통해 제거된 것을 확인할 수 있다. 특히, 앞뒤 모호성 고려를 통해 생성된 거짓 가우시안 모델들은 실험 진행 시간 약 80초 이전에 모두 제거된 것을 확인할 수 있다. 최종적으로 2 개의 가우시안 모델이 마지막 단계까지 유지되었다. 파란색으로 표현된 마지막 시점에서 가장 큰 가중치 값을 갖는 가우시안 모델은 수중 음원 1~3에 대해 초기 거리 값 30 m/30 m/30 m로 생성된 모델이며, 주황색으로 표현된 모델은 수중 음원 1~3에 대해 초기 거리 값 45 m/30 m/30 m로 생성된 모델이다. 실제 음원 1의 초기 거리가 약 35 m 임을 고려할 때, 타당한 결과임을 확인할 수 있다.

[Table 1] Estimated locations of acoustic sources (meter)

	Source 1	Source 2	Source 3
True (DGPS)	(10.5, 32.1)	(16.3, 20.5)	(21.7, 8.9)
Estimated	(11.7, 30.4)	(16.2, 19.4)	(22.1, 8.5)
Error	2.1	1.2	0.6



[Fig. 10] Weight of Gaussian sum filter SLAM

위의 실험 결과들은 본 연구에서 제안된 방법이 수중 음원의 방향각 정보만을 이용하여 수중 위치 추정을 효과적으로 수행할 수 있음을 검증하였다. 수중 로봇 및 음원의 위치를 동시에 추정하였고, 위치 오차가 발산하지 않도록 제공하였다.

## 6. 결론 및 향후 계획

본 논문은 수중 음향 신호 기반의 수중 로봇 위치 추정 기법을 제안하였다. 제안된 수중 위치 추정 방법은 확률적 도달시간차이 추정에 의한 음원의 방향각 추정, 앞뒤 모호성을 고려한 가우시안 합 필터 SLAM, 가중치 값에 따른 가우시안 모델의 제거를 통해 수행되었다. 제안된 방법은 수중 음향 시스템의 사전 위치 정보 없이도 정확한 위치 추정이 가능하도록 하였으며, 또한, 방향각 모호성을 고려한 방법으로 인해 음향 시스템의 설치에 제약이 없도록 하였다. 실험실에서 수행된 실험은 제안된 방법의 성능을 검증하였다.

본 연구의 향후 계획으로는 수신 하이드로폰 시스템의 확장을 통한 3차원 방향각 추정과, 3차원 위치 추정 시스템으로 적용될 예정이다.

## References

[1] C. Huet, and F. Mastroddi, "Autonomy for underwater robots-a European perspective," *Autonomous Robots*, vol. 40, no. 7, pp. 1113-1118, 2016.

[2] L. Whitcomb, D. Yoerger, H. Singh, and J. Howland, "Advances in underwater robot vehicles for deep ocean exploration: Navigation, control and survey operations," *Proceedings of The Ninth International Symposium on Robotics Research*, pp. 346-353, 1999.

[3] J. C. Kinsey, R. M. Eustice, and L. L. Whitcomb, "A survey of underwater vehicle navigation: Recent advances and new challenges," *Proceedings of 7<sup>th</sup> IFAC Conference Manoeuvring and Control of Marine Craft*, 2006.

[4] 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, 2014.

[5] K. Vickery, "Acoustic positioning systems. A practical overview of current systems," *Proceedings of the 1998 Workshop on Autonomous Underwater Vehicles*, pp. 5-17, 1998.

[6] T. G. Kim, and N. Y. Ko, "Localization of an underwater robot using acoustic signal," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 7, no. 4, pp. 231-242, 2012.

[7] A. Alcocer, P. Oliveira, and A. Pascoal, "Underwater acoustic positioning systems based on buoys with GPS," *Proceedings of the Eighth European Conference on Underwater Acoustics*, 2006.

[8] P. Newman, and J. Leonard, "Pure range-only sub-sea SLAM"

*Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1921-1926, 2003.

[9] E. Olson, J. J. Leonard, and S. Teller, "Robust range-only beacon localization," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 31, no. 4, pp. 949-958, 2006.

[10] F. D. Corato, D. Fenucci, A. Caiti, R. Costanzi, N. Monni, L. Pugi, A. Ridolfi, and B. Allotta, "Toward underwater acoustic-based simultaneous localization and mapping. Experimental results with the Typhoon AUV at CommsNet13 sea trial," *Proceedings of IEEE/MTS OCEANS*, 2014.

[11] R. Khan, M. F. Ercan, L. Metarsit, A. N. S. Le, K. V. Lim, W. T. Tan, and J. L. Ang, "Underwater navigation using maneuverable beacons for localization," *Proceedings of IEEE/MTS OCEANS*, 2016.

[12] N. R. Rypkema, E. M. Fischell, and H. Schmidt, "One-way travel-time inverted ultra-short baseline localization for low-cost autonomous underwater vehicles," *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, 2017.

[13] C. H. Knapp, and G. C. Carter, "The generalized correlation method for estimation of time delay," *IEEE Transaction on Acoustics, Speech, and Signal processing*, vol. 24, no. 4, pp. 320-327, 1976.

[14] J. Choi, and H. T. Choi, "Underwater acoustic source localization based on the probabilistic estimation of direction angle," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 9, no. 4, pp. 206-215, 2014.



### 최진우

2003 포항공과대학교 기계공학과(학사)  
 2005 포항공과대학교 기계공학과(석사)  
 2011 포항공과대학교 기계공학과(박사)  
 2013~현재 선박해양플랜트연구소 선임연구원

관심분야: 수중 로봇, 위치인식, SLAM



### 이영준

2009 충남대학교 메카트로닉스공학과(학사)  
 2014 충남대학교 메카트로닉스공학과(석사)  
 2011~현재 선박해양플랜트연구소 연구원

관심분야: 수중 로봇, 영상처리, 영상소나





### 정 종 대

- 2008 한양대학교 토목공학과(학사)
- 2010 KAIST 건설및환경공학과(석사)
- 2015 KAIST 건설및환경공학과(박사)
- 2016~현재 선박해양플랜트연구소 선임연구원

관심분야: 수중 지도작성, 영상처리, SLAM



### 박 정 흥

- 2005 충남대학교 메카트로닉스공학과(학사)
- 2007 충남대학교 메카트로닉스공학과(석사)
- 2016 한국과학기술원 기계공학과(박사)
- 2016~현재 선박해양플랜트연구소 선임연구원

관심분야: 해양 로봇, 자율 운항 및 항법



### 최 현 택

- 1991 한양대학교 전자공학(학사)
- 1993 한양대학교 전자공학(석사)
- 2000 한양대학교 전자공학(박사)
- 1993~1995 KT 연구개발원 소프트웨어연구소 전임연구원
- 1996~2000 한양대학교 컴퓨터 교육위원회 강사
- 2000~2003 하와이 주립대학교 Autonomous System Lab. 후기 박사
- 2003~현재 선박해양플랜트연구소 책임연구원

관심분야: 수중 로봇, 해양 시스템, 강인 제어