

두 개의 하이드로폰을 이용한 수중 음원 방향 추정 및 위치 추정 알고리즘

Direction and Location Estimating Algorithm for Sound Sources with Two Hydrophones in Underwater Environment

신재욱, 송주만, 이석영, 최현택, 박부건*
(JaeWook Shin¹, Ju-man Song², SeokYoung Lee², Hyun-Taek Choi³, and PooGyeon Park^{1,2})

¹Electrical Engineering, POSTECH

²Division of IT Convergence Engineering, POSTECH

³Ocean Engineering Research Department, KIOST

Abstract: For underwater vehicles, the use of sensors such as cameras and laser scanners is limited by the difference in environment compared to robots designed to work on dry land. In underwater environments, if use is made of sound signals, valuable information can be obtained. The most important application is the localization of underwater sound sources. The estimated location of a sound source can be used to control underwater robots or submarines. Thus, the purpose of this research is to estimate the source's direction and location in a noisy underwater environment. The direction of the sound source is obtained using two hydrophones. Furthermore, if we assume that the robot or sound source is moving, the location of the sound source is estimated using more than two estimated directions. The feasibility of the developed algorithm is examined by experiments in a water tank and in the ocean.

Keywords: hydrophone, time-delay estimation, generalized cross correlation, localization, particle filter

I. 서론

주어진 임무수행을 위해 목표지점까지 정확하게 이동 할 수 있는 자율이동이 가능한 로봇의 개발을 위해 주변환경을 인식하고 로봇의 현재 위치를 추정하는 방법의 연구가 활발히 이루어 지고 있다. 이러한 방법들은 주로 초음파 센서, GPS, Laser Range Finder, 카메라, 마이크, RFID와 같은 센서를 사용하거나 여러 가지 센서 데이터들을 퓨전하여 사용한다 [1-5]. 지상과 공중에서 동작하는 로봇들은 위에서 나열한 센서들을 큰 제약조건 없이 사용이 가능하지만 수중에서 작동하는 로봇이나 잠수정의 경우에는 사용할 수 있는 센서들이 음향관련 센서들과 관성센서 정도로 굉장히 제한적이다.

수중환경에서 음향신호를 활용하여 사용자로 하여금 주변의 환경적 변화 또는 로봇이나 잠수정의 운행상태를 추정하는데 도움을 주거나 주어진 신호에 대한 방위각 추정을 통해 신호발생기의 위치를 추정 할 수 있다.

수중 음원의 방위각을 추정하기 위해 여러 가지 방법들은 제안되었다. 그 중 가장 널리 사용되고 있는 방법은 TDE (Time-Delay Estimation)와 SBF (Steered Beamforming) 이다. 두

방법은 측정되는 음향데이터를 음원 위치일 때 최고 값을 가지는 함수로 변환하여 음원의 방향을 추정한다. 하지만 이러한 직접적인 방법은 수중에서 발생하는 잡음신호와 반사파의 영향에 따라 성능저하가 발생하게 된다.

따라서 본 논문에서는 반사파와 잡음신호가 존재하는 환경에서도 성능저하를 줄이기 위해 음원 방향을 추정하기 위한 파티클 필터(Particle filter) 방법을 제안한다. 제안하는 파티클 필터는 likelihood function을 생성하기 위해 GCC (Generalized Cross Correlation) 함수를 사용하고 일반적인 TDE 방법과 달리 최고값 하나만을 사용하는 것이 아니라 여러 peak 값을 사용하여 반사파와 잡음신호의 영향을 줄인다. 또한 제안된 파티클 필터를 이용하여 얻어진 음원의 방위각과 음원 또는 로봇의 모션 정보를 이용하여 음원과 로봇의 상대 위치를 추정하는 방법을 제안한다.

II. 수중 음원의 방향 추정

1. GCC (Generalized Cross Correlation)

두 하이드로폰을 통해 얻어진 음향신호의 시간차를 추정하는 방법은 여러 가지가 있지만 그 중 가장 일반적으로 사용되는 알고리즘은 GCC이다. GCC는 두 입력신호의 Cross Correlation을 이용하여 신호의 시간차이를 추정하는 방법으로 계산이 간단하기 때문에 시스템의 복잡도가 낮아도 사용이 가능하다[6].

하지만 실제 수중 음원 신호의 방향을 추정함에 있어서 발생하는 여러 가지 문제점으로 GCC의 성능이 저하된다. 그 중 가장 대표적인 것이 반사파와 잡음신호이다. 수중 음원에서 발생된 신호가 물의 표면이나 바닥 면에 도달한 경우 반사되어 하이드로폰으로 입력될 수 있다. 이렇게 반사된 신호

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received May 15, 2013 / revised June 10, 2013 / accepted June 30, 2013

신재욱: 포항공과대학교 전자전기공학부(shinshingo@postech.ac.kr)

송주만, 이석영: 포항공과대학교 정보전자융합공학부

(sjm1924@postech.ac.kr/suk122@postech.ac.kr)

최현택: 한국해양과학기술원 해양시스템연구부(htchoiphd@gmail.com)

박부건: 포항공과대학교 전자전기공학부 & 정보전자융합공학부

(ppg@postech.ac.kr)

※ 본 연구는 한국해양과학기술원(KIOST)의 “고정밀 임무수행을 위한 인공 지능 기반의 수중 로봇 기술 개발”로부터 지원받아 수행되었음.

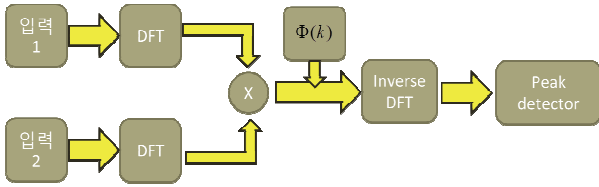


그림 1. GCC 블록 다이어그램.
Fig. 1. Block diagram of GCC.

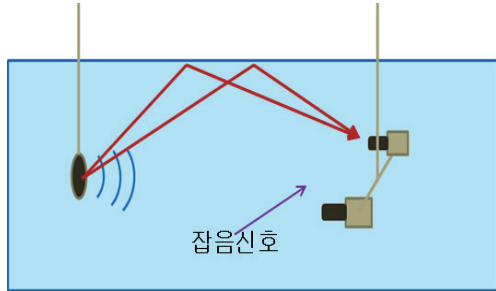


그림 2. 반사파와 잡음신호가 존재하는 환경.
Fig. 2. Multipath and noisy environment.

가 직선방향으로 도달한 음원 신호와 시간차이를 두고 입력되기 때문에 정확한 신호의 시간차이를 알아내기가 힘들어진다. 또한 수중 음원 본래의 신호만이 하이드로폰을 통하여 들어오는 것이 아니라 주변 환경에 따라 배의 이동이나 수중의 구조물 또는 구성물로 인한 잡음과 측정센서의 잡음이 존재하여 원하는 지연시간을 정확히 추정하기가 힘들어진다.

GCC에서 반사파와 잡음신호로 인하여 발생하는 성능저하의 이유는 현재의 data만을 입력으로 받아 사용하는 GCC 함수의 최고 peak만을 이용하여 지연시간을 추정함에 있다. 따라서 잡음신호와 반사파가 존재하는 환경에서 지연시간을 강인하게 추정하기 위해 파티클 필터 기법을 사용하여 시간지연을 추정하고자 한다.

2. 파티클 필터를 이용한 지연시간 추정방법

파티클 필터는 Trial and Error, 즉 많은 수의 랜덤 입력들의 출력을 통해 시스템의 특성을 알아내는 시뮬레이션 기반의 예측 기술이다[7-10]. 파티클 필터는 기존에 예측기술로 많이 사용되고 있는 칼만 필터와 달리 선형시스템이 아니어도 동작하며 가우시안 노이즈와 비가우시안 노이즈가 존재하는 환경에서도 동작이 가능하여 최근에 널리 사용되고 있다. 제안된 파티클 필터 방법은 GCC만을 사용한 지연시간 추정방법의 문제점을 보완하였다. 아래에서 그 과정을 수조에서 실험한 실측 데이터를 이용하여 설명하도록 한다.

Step 1: 제안된 파티클 필터의 첫 번째 과정은 파티클들을 생성하는 것이다. 음원 위치에 대한 초기값을 알고 있는 경우 초기 위치에 파티클을 생성하여야 하지만 초기 위치를 모르는 경우 아래 그림과 같이 고르게 배치한다. 푸른색 '*'는 파티클을 나타낸다. 그리고 두 개의 하이드로폰은 0.6m 간격을 가지고 있기 때문에 각각 (-0.3m,0m), (0.3m, 0m)에 있다고 설정하였다.

그림 4에서 검은 두 선은 파티클과 두 개의 하이드로폰과

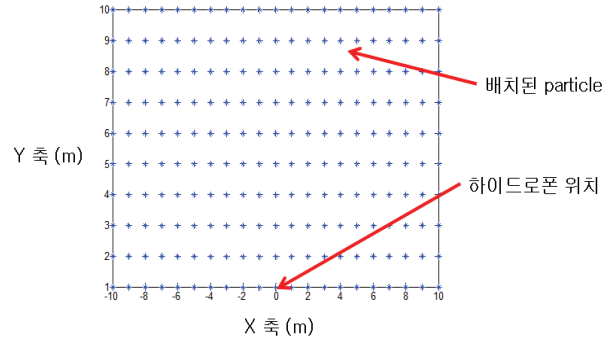


그림 3. 파티클 초기화.
Fig. 3. Initializing the particles.

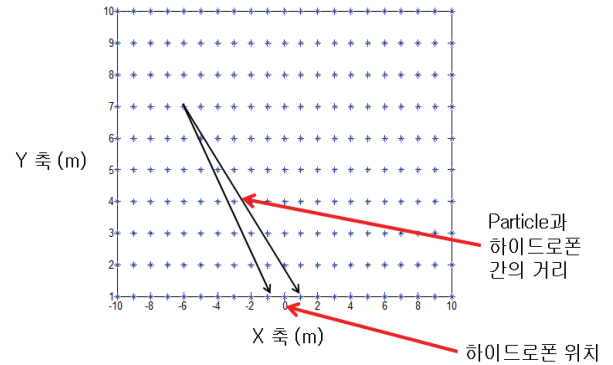


그림 4. 파티클과 하이드로폰간의 관계.
Fig. 4. Relation between particles and hydrophones.

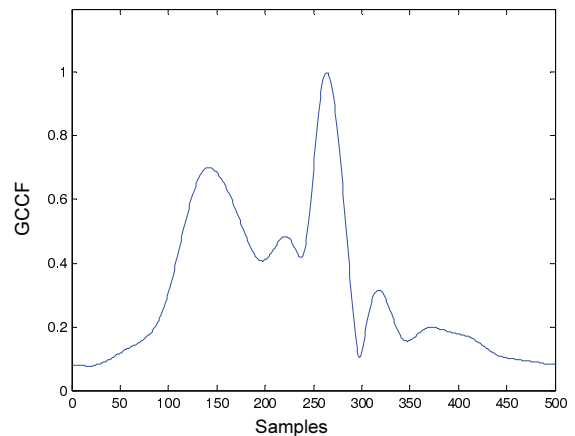


그림 5. GCC 함수.
Fig. 5. GCC function.

의 거리를 나타낸다. 검은 두 선의 길이 차이를 음파의 속도로 나누어 주면 수중 음원의 방위각을 구하기 위한 지연시간을 구할 수 있다. 이러한 방법을 모든 파티클에 적용하여 각 파티클의 위치한 곳에서의 시간지연을 구할 수 있으며 다음 단계에서 구하게 되는 likelihood 함수와 곱하여 확률적으로 음원의 위치를 추정하게 된다.

Step 2: 제안된 파티클 필터 방법의 두 번째 단계는 GCC 함수를 구하는 것이다. 일반적으로 GCC를 통한 시간지연 추정방법은 GCC 함수에서 가장 큰 peak 만을 사용하여 추정하

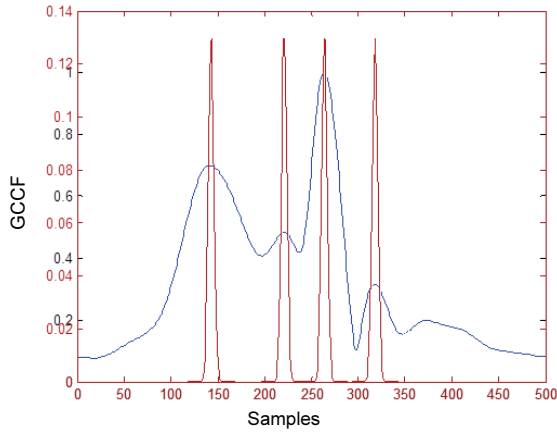


그림 6. GCC 함수와 4개의 peak.
Fig. 6. GCC function and 4 peaks.

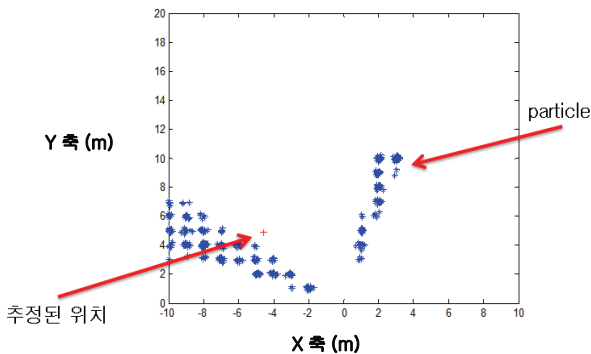


그림 7. 제안된 파티클 필터를 이용한 음원 추정.
Fig. 7. Estimation using proposed particle filter.

지만 제안된 방법에서는 실제 시간지연에 의해 만들어진 peak가 반사파와 잡음신호의 영향으로 가장 큰 값을 가지지 않는 상황에서도 강인하게 동작하도록 하기 위해 가장 큰 peak만이 아닌 4개의 peak를 골라내어 사용한다.

Step 3: 세 번째 단계에서는 두 번째 단계에서 구한 GCC 함수와 4개의 peak를 이용하여 likelihood 함수를 생성한다. Likelihood 함수는 4개의 peak에 그림 6과 같이 붉은색의 확률분포를 구한 후에 이를 GCC 함수와 곱하여 생성한다. 이러한 방식은 각 위치의 파티클에서 계산된 여러 개의 시간지연들 중 GCC 함수에서 구한 4개의 peak에 의한 지연시간과 비슷한 결과를 가지는 파티클들에게 가중치를 주는 효과가 있다.

Step 4: 마지막으로 생성되었던 파티클과 likelihood 함수를 사용하여 음원의 위치를 추정하게 된다. 이전 단계에서 생성된 likelihood 함수를 이용하여 각 파티클에 가중치를 주게 되면 가중치가 높은 파티클들만이 값을 가지게 되고 그 파티클들의 평균을 구하게 되면 그림 7에서와 같이 붉은색 '+'와 같은 추정위치를 구할 수 있다. 그리고 Step 2로 돌아가 과정을 반복한다.

제안된 파티클 필터 과정을 반복하게 되면 그림 8과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림 8에서 붉은 사선은 음원의 실제

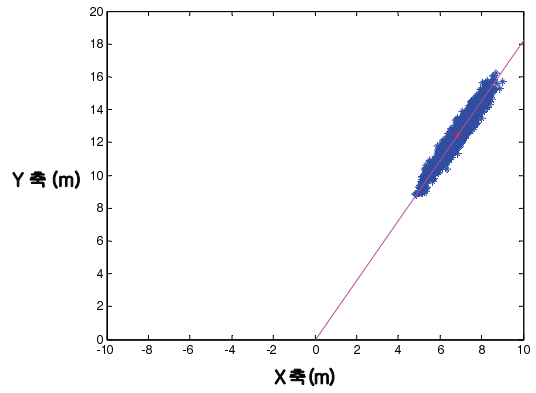


그림 8. 제안된 파티클 필터의 추정 결과.
Fig. 8. Estimation result of the proposed particle filter.

방위각을 표시하고 있으며 붉은색 '+'는 추정된 음원의 위치를 나타낸다. 푸른색 파티클이 긴 타원모양으로 늘어선 것은 사용하고 있는 두 개의 하이드로폰만으로는 음원과의 거리 측정이 불가능하기 때문에 거리에 대한 정보를 포함하지 못함 때문이다.

III. 수중 음원과 로봇의 상대위치 추정

이전 단락에서 제안된 파티클 필터를 이용하여 두 개의 하이드로폰으로부터 입력되는 음향 신호의 지연시간을 추정하고 음원의 방향을 추정하였다. 두 개의 하이드로폰만을 이용하는 경우 거리에 대한 정보를 얻기 힘들기 때문에 음원과 로봇간의 상대위치를 추정하는 것이 매우 힘들다. 하지만 그림 9와 같이 음원 또는 로봇의 모션에 대한 정보가 있다면 상대위치를 어느 정도 구할 수 있다.

본 절에서는 총 3가지의 방식을 이용하여 음원과 로봇의 상대위치를 추정한다. 첫 번째 알고리즘은 삼각도법을 이용한 방법이며 두 번째는 Extended Kalman Filter (EKF)를 이용한 위치 추정 방법이며 마지막으로 파티클 필터를 이용한 방법을 소개한다.

1. 삼각법을 이용한 위치 추정 방법

그림 10에서 동그라미는 수중 음원의 위치를 나타내며 그 좌표는 (x_1, y_1) 이고 수중로봇은 x축 방향으로 직선 주행한다. 따라서 로봇의 위치는 $(x_1, 0)$ 에서 $(x_2, 0)$ 으로 이동했다.

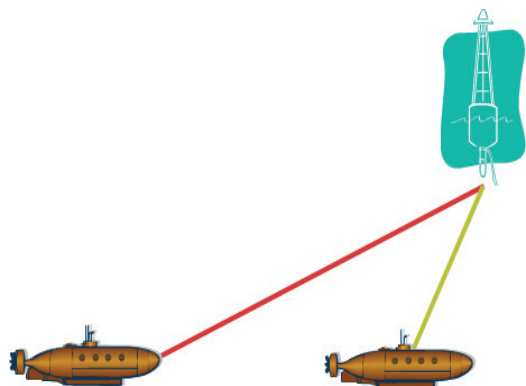


그림 9. 수중 로봇의 모션.
Fig. 9. Motion of the underwater robot.

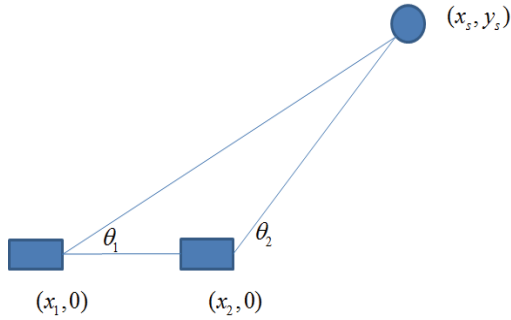


그림 10. 사용된 좌표계.

Fig. 10. Used coordinate.

각각의 위치에서 수중 음원과 이루는 방향각은 각각 θ_1 과 θ_2 나타내었다. 이렇게 설정된 상대 좌표계에서 삼각법을 통해 얻어진 수중 음원의 좌표는 다음과 같다.

$$y_s = \frac{x_2 - x_1}{\tan(\pi/2 - \theta_1) - \tan(\pi/2 - \theta_2)} \quad (1)$$

$$x_s = x_2 + \frac{y_s}{\tan(\theta_2)} \quad (2)$$

삼각법을 이용한 위치 추정 방법은 매우 간단하게 음원의 방향각을 이용하여 상대위치를 추정 할 수 있다. 하지만 음원의 방향각과 이동거리에 오차가 발생하는 경우 정확한 음원의 위치 계산이 어렵다는 단점이 있다.

2. EKF를 이용한 위치 추정 방법

EKF는 칼만 필터를 비선형 시스템에서도 사용할 수 있도록 개선된 방법이다[11]. 이 방법에서도 삼각법에서 사용한 좌표계를 이용한다. 이 방법을 사용하여 수중 음원의 위치를 추정하기 위해서는 다음과 같은 시스템 모델을 사용한다.

$$\mathbf{x}(n+1) = \mathbf{F}(n, \mathbf{x}(n)), \quad (3)$$

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{C}(n, \mathbf{x}(n)) + \mathbf{v}(n) \quad (4)$$

여기서 n 은 시간 스텝이고, $\mathbf{x}(n)$ 은 상태벡터, $\mathbf{y}(n)$ 는 측정 벡터, $\mathbf{v}(n)$ 는 측정 잡음이다. 그리고 $\mathbf{x}(n)$, $\mathbf{y}(n)$, $\mathbf{F}(n)$, $\mathbf{C}(n)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}(n) = [x_s - x_n, y_s, l_n]^T, \quad (5)$$

$$\mathbf{y}(n) = [\theta_{n-1}, \theta_n, l_n]^T, \quad (6)$$

$$\mathbf{F}(n, \mathbf{x}(n)) = [x_s - x_n - l_n, y_s, l_n]^T, \quad (7)$$

$$\mathbf{C}(n, \mathbf{x}(n)) = \begin{bmatrix} \tan^{-1}\left(\frac{y_s}{x_s - x_n}\right) \\ \tan^{-1}\left(\frac{y_s}{x_s - x_n - l_n}\right) \\ l_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 수중음원의 좌표는 (x_s, y_s) 이고 로봇의 좌표는 (x_n, y_n) 이고 l_n 은 이동거리이다.

상태벡터의 첫 번째 성분은 로봇과 음원 사이의 x축 거리 이고 두 번째 성분은 로봇과 음원 사이의 y축 거리이다. 그

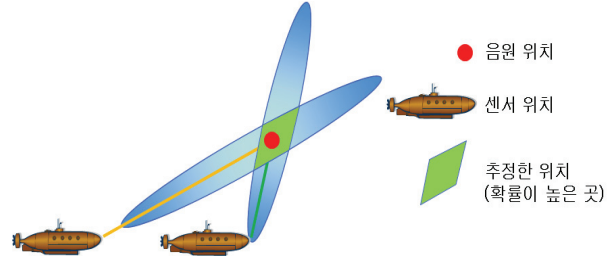


그림 11. 파티클 필터를 이용한 수중음원 위치 추정 방법.

Fig. 11. Underwater sound source localization using particle filter.

리고 마지막 성분은 로봇의 이동거리로 구성되어 있다. 측정 벡터의 첫 번째 성분은 이전 위치에서 측정된 음원의 방향각 이고 두 번째 성분은 현재 위치에서 측정된 음원의 방향각 그리고 마지막으로 측정된 로봇의 이동거리로 구성되어 있다. 비선형 시스템을 선형화 하기 위해 $\mathbf{F}(n, \mathbf{x}(n))$ 과 $\mathbf{C}(n, \mathbf{x}(n))$ 을 다음과 같이 선형화 한다

$$\mathbf{F}(n+1, n) = \left. \frac{\partial \mathbf{F}(n, \mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}(n|y(n))}, \quad (9)$$

$$\mathbf{C}(n) = \left. \frac{\partial \mathbf{C}(n, \mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}(n|y(n-1))}, \quad (10)$$

따라서 선형화된 시스템 모델은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{x}(n+1) = \mathbf{F}(n+1, n)\mathbf{x}(n), \quad (11)$$

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{C}(n)\mathbf{x}(n) + \mathbf{v}(n). \quad (12)$$

위에서 구한 선형 시스템 모델을 가지고 칼만 필터를 구성 하여 음원과 로봇간의 상대위치를 추정할 수 있다.

3. 파티클 필터를 이용한 위치 추정 방법

파티클 필터를 이용하여 음원과 로봇간의 상대위치를 추정하기 위해 각각의 파티클에 주어지는 가중치의 변화에 음원 또는 로봇의 모션에 관한 정보를 주어야 한다. 첫 번째 변화는 현재 측정된 음원의 방위각에 인접한 파티클에 가중치를 크게 하고 두 번째로는 로봇 또는 음원의 이동을 파티클에 적용하여 첫 번째 변화에서 가중치와 중첩하여 가중치를 계산한다. 이러한 교차점을 여러 번 계산할수록 추정 정확도가 향상된다. 그림 11은 파티클 필터를 이용한 수중 음원의 상대위치를 추정하는 방법을 도식화 하였다.

IV. 실험결과

1. 시뮬레이션 환경

본 논문에서 소개한 음원과 로봇간의 상대위치를 추정하기 위한 세가지 방법들은 Matlab을 통해 시뮬레이션 되었다. 상대위치를 추정하기 때문에 로봇의 위치를 (0m, 0m)로 고정하고 수중 음원이 (10m, 53m)이며 매 sample 시간마다 x축 상에서 왼쪽으로 1m씩 이동하는 환경을 가정 하였다. 로봇이 추정하는 수중 음원의 방위각에 오차가 있다고 가정하고 실험에서는 ± 10 도 범위로 uniform distribution으로 측정 오차가 발생 하도록 설정하였다. EKF 방법의 경우 초기 값이 필요하기 때문에 초기 값으로 (50m, 50m)를 주었으며 파티클 필터 방법에서 파티클은 모두 2000개를 사용하였다.

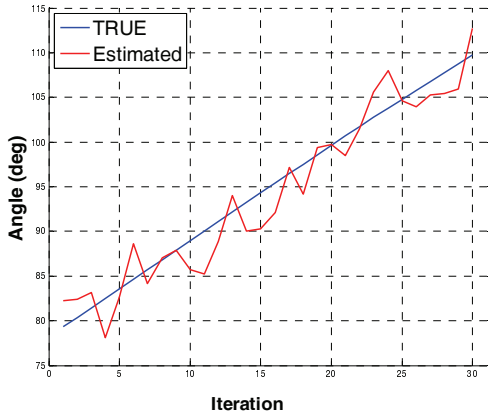


그림 12. 각 위치의 실제 방위각 및 측정된 방위각.
Fig. 12. True azimuth and measured azimuth.

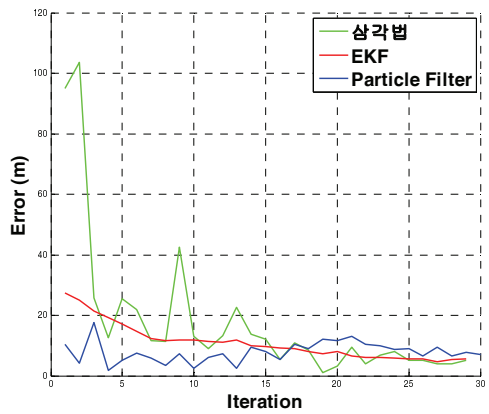


그림 13. 위치 추정 알고리즘의 거리 오차.
Fig. 13. Error of localization algorithms.

2. 시뮬레이션 결과

그림 13에서 나타난 각각의 알고리즘의 거리 오차 그래프를 보면 알 수 있듯이 삼각법의 경우 매번 들어오는 입력만을 사용하여 값을 구하기 때문에 측정오차에 의해 편차가 심하다. EKF의 경우 수렴 성능은 좋으나 적절한 초기 값을 사용하지 않으면 성능이 급격히 저하되는 단점이 있다. 파티클 필터의 경우 초기 값을 알지 못하더라도 어느 정도 성능이 보장되지만 사용하는 파티클의 수에 비례하여 계산량이 증가하는 단점이 있어 사용시에 적절한 파티클 수를 고려해야 한다. 그리고 파티클 필터의 오차가 iteration 15회 이후부터 삼각법과 EKF보다 상대적으로 크게 나타났다. 이는 삼각법과 EKF는 시뮬레이션 초기의 데이터와 현재의 데이터를 이용하여 계산함으로써 발생하는 문제로 보이며 단일한 모션에서는 잘 동작하지만 여러 가지 모션이 혼합된 실제 로봇에서는 그 성능을 보장하기 어려울 것으로 생각된다.

3. 해양환경 실험

수중 음원의 방위각 추정 알고리즘과 위치추정 알고리즘의 해양환경에서도 실험이 수행되었다. 실제 해양환경에서 데이터를 얻기 위해 경상남도 거제도에 위치한 해양과학기술원 남해연구소에서 2012년 11월 5일부터 6일까지 이틀간 실험이 이루어졌다. 음향 발생기와 하이드로폰은 아래 그림과 같이 설치 하였으며 음향 발생기는 오른쪽에서 왼쪽으로

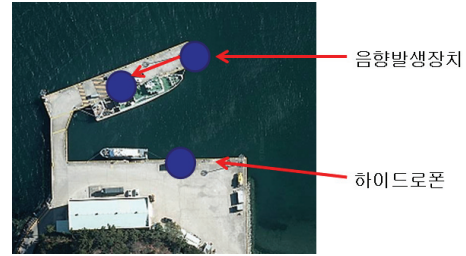


그림 14. 실험환경.
Fig. 14. Experiment environment.

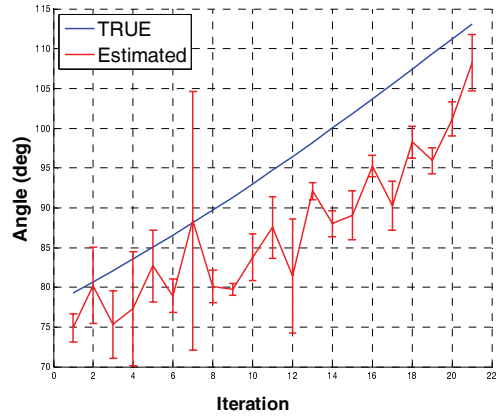


그림 15. 방위각 추정 실험결과.
Fig. 15. Azimuth estimation.

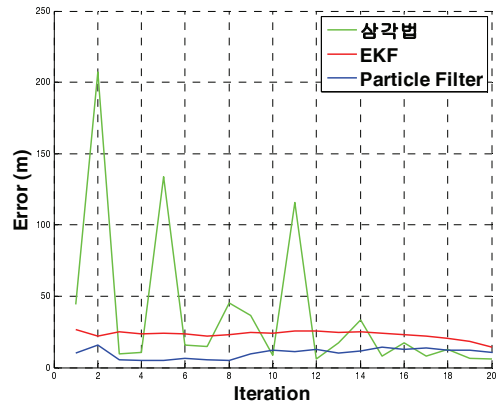


그림 16. 위치 추정 실험결과.
Fig. 16. Localization.

1.5m의 거리 간격을 두고 데이터를 측정하였으며 앞서 설명한 시뮬레이션 환경과 동일하게 시스템을 구성하여 결과를 도출하였다.

4. 해양환경 실험결과

그림 15에서 해양환경에서 측정된 데이터를 이용하여 추정한 방위각 결과를 볼 수 있다. 푸른색 선은 지도상의 위치를 통해 알아낸 방위각이고 붉은색 선은 제안된 파티클 필터를 통해 추정된 방위각의 평균과 표준편차를 나타낸다. 총 21군데에서 측정된 데이터는 약 70도에서 110도의 분포로 얻어졌으며 이 데이터는 음원의 상대위치를 추정하기 위해서 다시 사용된다.

위에서 추정된 방위각 데이터를 이용하여 소개된 위치 추

정 알고리즘의 결과를 그림 16을 통해서 확인할 수 있다. 각 알고리즘의 거리 오차 그래프는 시뮬레이션으로 얻어진 그래프와 유사함을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문은 반사파와 잡음신호가 존재하는 수중 환경에 강인하게 음원의 방위각을 추정하고 로봇 또는 음원의 모션정보를 이용하여 서로의 상대위치를 추정하는 알고리즘은 제안하였고, 시뮬레이션과 해양환경 실험을 통해 검증하였다. 그 결과 고가의 센서나 복잡한 알고리즘 없이 두 개의 하이드로폰을 이용하여 추정이 가능하였다. 하지만 반사파와 잡음신호의 영향을 더욱 줄여 추정 성능을 높이기 위해서는 추가적인 연구가 더 필요하다. 수중 잡음 및 채널의 특성과 사용하고 있는 신호 증폭기의 특성을 고려한 전처리 연구가 필요하며 파라미터에 강인한 알고리즘의 개발이 필요하다. 또한 실측실험 때에 DGPS와 같은 장비를 이용하여 정확한 레퍼런스를 이용한 알고리즘의 성능 분석이 필요하다. 향후 전처리 알고리즘을 통한 성능향상과 알고리즘 개선을 진행할 것이다.

REFERENCES

- [1] Diosi, Albert and Kleeman, Lindsay, "Advanced sonar and laser range finder fusion for simultaneous localization and mapping," *Proc. IROS, 2004*, vol. 2, pp. 1854-1859, 2004.
- [2] C. H. Knpp 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.
- [3] J. Guivant, E. M. Nebot, and S. Baiker, "Localization and map building using laser range sensors in outdoor applications," *Journal Robot. Syst.*, vol. 17, no. 10, pp. 565-583, 2000.
- [4] G. W. Yoon, J. B. Kim, and B. K. Kim, "Outdoor mobile robot localization algorithm using line/arc features based on laser range finders and 2½D map," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 7, pp. 658-663, 2012.
- [5] D. Park, K. Kwak, W. K. Chung, and J. Kim, "Infrastructure-based localization system using underwater wireless sensor network," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 8, pp. 699-705, 2012.
- [6] C. H. Knpp 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.
- [7] M. S. Arulampalam, S. Maskell, N. Gordon, and T. Clapp, "A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian bayesian tracking," *Special Issue of IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 50, no. 2, pp. 174-188, 2002.
- [8] I. M. Rekleitis, "A particle filter tutorial for mobile robot localization," Technical Report TR-CIM-04-02, Centre for Intelligent Machines, McGill University, 3480 University St., Montreal, Quebec, Canada H3A 2A7, 2004.
- [9] D. B. Ward and R. C. Williamson, "Particle filter beamforming for acoustic source localization in a reverberant environment," in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2002.
- [10] E. A. Lehmann and R. C. Williamson, "Particle filtering

algorithm for tracking an acoustic source in a reverberant environment," *Speech and Audio Proc., IEEE Trans.*, vol. 11, pp. 826-836, Nov. 2003.

- [11] S. Huang and G. Dissanayake, "Convergence and consistency analysis for extended Kalman filter-based SLAM," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 23, no. 5, pp. 1036-1049, 2007.



신재욱

2008년 경북대학교 전자전기컴퓨터 학부 학사. 2010년 포항공과대학교 전자전기공학과 석사. 2010년~현재 포항공과대학교 박사과정 재학중. 관심분야는 Adaptive filtering, Localization, Underwater Robots.



송주만

2008년 경북대학교 전자전기컴퓨터 학부 학사. 2010년 포항공과대학교 전자전기공학과 석사. 2010년~현재 포항공과대학교 박사과정 재학중. 관심분야는 Adaptive filtering, Localization, Underwater Robots.



이석영

2008년 경북대학교 전자전기컴퓨터 학부 학사. 2010년 포항공과대학교 전자전기공학과 석사. 2010년~현재 포항공과대학교 박사과정 재학중. 관심분야는 Adaptive filtering, Localization, Underwater Robots.



최현택

1991년 한양대학교 전자공학 학사. 1993년 한양대학교 전자공학과 석사. 2000년 한양대학교 전자공학과(제어 및 로봇틱스) 공학박사. 1993년~1995년 KT 연구개발원 S/W 연구소 전임연구원. 1996년~2000년 한양대학교 컴퓨터교육위원회 강사. 2000년~2000년 KT 연구개발원 멀티미디어 연구소 전임연구원. 2000년~2003년 하와이 주립대학교 기계공학과 Post-Doc. 2003년~현재 한국해양과학기술원 책임연구원. 관심분야는 수중 로봇, 해양 시스템, 강인 제어.



박부건

1988년, 1990년 서울공과대학 제어계측공학과에서 공학사와 공학석사 학위수여. 1995년 미국 스탠포드 대학교 전기공학과에서 공학박사 학위수여. 1993년 인도 IIST 방문학자. 1995년과 1996년 스탠포드 대학 연구원 역임. 1996년 이후 현재까지 포항공과대학교 전자전기공학과 교수. 관심분야는 LPV, Delayed Systems, Signal Processing.