

수중 초음파 거리 센서를 이용한 수중 로봇의 2차원 지도 확장 실험

Experimental Result on Map Expansion of Underwater Robot Using Acoustic Range Sonar

이영준¹·최진우¹·이윤건¹·최현택[†]

Yeongjun Lee¹, Jinwoo Choi¹, Yoongeon Lee¹, Hyun-Taek Choi[†]

Abstract: This study focuses on autonomous exploration based on map expansion for an underwater robot equipped with acoustic sonars. Map expansion is applicable to large-area mapping, but it may affect localization accuracy. Thus, as the key contribution of this paper, we propose a method for underwater autonomous exploration wherein the robot determines the trade-off between map expansion ratio and position accuracy, selects which of the two has higher priority, and then moves to a mission step. An occupancy grid map is synthesized by utilizing the measurements of an acoustic range sonar that determines the probability of occupancy. This information is then used to determine a path to the frontier, which becomes the new search point. During area searching and map building, the robot revisits artificial landmarks to improve its position accuracy as based on imaging sonar-based recognition and EKF-SLAM if the position accuracy is above the predetermined threshold. Additionally, real-time experiments were conducted by using an underwater robot, yShark, to validate the proposed method, and the analysis of the results is discussed herein.

Keywords: Map Expansion, Exploration, Active SLAM, Underwater robot, Autonomous Underwater Vehicle

1. 서 론

로봇의 자율 탐사를 위해 요구되는 다양한 기술 중에 자기 위치 추정, 지도 작성, 영역 확장 등은 매우 필수적인 기술이라 말할 수 있다. 자기 위치 추정과 지도 작성은 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)이라는 하나의 연구 주제로 결합되어 연구되며, 지도 확장 기술은 목적지 선정 및 경로 생성 기술로 나누어진다. 수중 환경은 인간의 접근이 쉽지 않고 알려지지 않은 미개척지가 매우 많은 지역이다. 이러

한 환경에서 운용되는 수중 로봇은 앞서 언급된 다양한 기술을 바탕으로 한 자율 탐사 기술이 매우 필요한 연구 분야 중 하나라고 말할 수 있다.

자율 탐사를 수행하는데 있어 어떠한 목적을 정하여 탐사 우선순위를 결정할 것인가에 대한 판단이 필요하며, 이러한 판단을 바탕으로 자율 탐사하는 기술을 능동형 탐사 기술 (Active SLAM)이라고 부른다. Active SLAM 연구의 시작은 [1-3]로부터 활발히 연구되었다. [1-3]은 주로 SLAM의 불확실성을 줄이고 얻을 수 있는 정보를 최대화 하는 것을 목적으로 한다. [4]는 SLAM의 오차 공분산을 최적화 시키는 것을 목적으로 하고 로봇의 경로는 고려하지 않았으나, [5-7]은 로봇의 경로를 포함하여 SLAM 불확실성을 줄이는 것을 목적으로 로봇의 탐사 성능을 향상 시키고자 하였다. [8-10]은 pose-graph 기반 SLAM을 기반으로 하는 active SLAM 프레임워크를 제안하였다. 여기서는 information filter를 사용하여 로봇의 재방문 과정의 불확실성에 대한 평가를 수행한 것이 특징이다.

Received : Mar. 14. 2018; Revised : May. 1. 2018; Accepted : May. 2. 2018

※ This research was supported by a grant 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 (PES9390).

1. KRISO, Daejeon, Korea (leeyoungjun@kriso.re.kr) (jwchoi@kriso.re.kr) (yglee@kriso.re.kr)

† Corresponding author: Marine Robotics Research Division, KRISO, Daejeon, Korea (htchoi@kriso.re.kr)

[11-12]는 frontier를 이용하여 로봇의 다음 경로를 생성하고, 주변 환경 및 로봇의 상태에 따라 frontier의 선택 방법 또는 경로 생성 방법을 최적화 하는 연구를 수행하였다. 상기 연구들을 보면 Active SLAM의 중요 파라미터로서 로봇 항법 시스템의 불확실성, 주변 환경에 대한 인지 가능성, 그리고 경로 생성의 적합성 등을 조건으로 로봇의 탐사 성능을 높이도록 미션을 수행한다.

이에 본 논문은 수중로봇의 자율 탐사를 위한 방법으로서 수중로봇의 탐사 영역 확장과 자기 위치 정확도라는 평가 기준을 토대로 로봇의 다음 미션을 결정하도록 하는 탐사 방법을 제안한다. 이를 위해 초음파 거리 센서 및 영상 소나를 활용한 환경인식 기술, 위치 추정 및 지도 작성 기술, 목적지 탐색 및 경로 생성 기술을 구현하였다. 제안된 방법의 검증을 위하여 두 가지 실험을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

2. 수중로봇 자율탐사

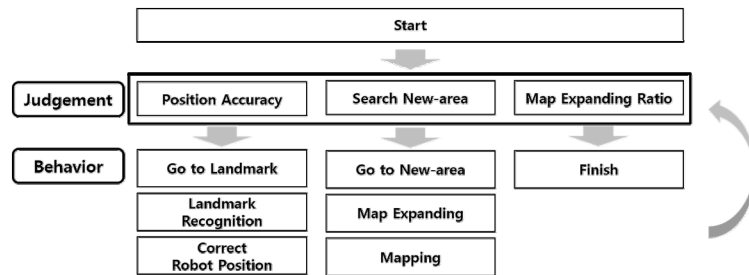
자율 탐사를 수행하는데 있어 어떠한 목적을 정하여 탐사 우선순위를 결정할 것인가에 대한 판단이 필요하다. 본 논문에서는 수중로봇의 자율탐사 우선순위로 로봇의 자기 위치 정확도와 탐사영역의 확장을 최우선 순위로 두고 자율 탐사를 수행한다. 로봇이 지도를 작성하는데 있어 자기 위치 정확도는 매우 중요하다. 위치 오차가 크거나 잘못된 위치로 판단하는 경우 로봇의 위치 오차는 지도의 정확도에 직접적인 영향을 미치게 된다. 이에 수중로봇은 위치 정확도 향상을 위한 자

기위치 보정과 동시에 자율 탐사 과정 중 이러한 기술이 수행될 수 있어야 한다. 탐사영역의 확장은 자율 탐사의 가장 기본이 되는 목표이다. 가능한 넓은 지역에 대해 지도를 작성하고 미탐사지역의 누락이 없도록 하는 것이 탐사 영역 확장의 주된 목적이 된다. [Fig. 1]은 이러한 내용이 반영된 수중로봇의 자율탐사 흐름도를 보여준다. 자율탐사를 위한 행동(Behavior)에 앞서 판단(Judgement) 과정을 통해 수중로봇의 자기 위치 정확도와 탐사 지역의 확장을 평가하여 로봇의 위치 보정을 수행하거나 탐사 영역 확장하는 행동을 수행한다. 사용자에게 사전에 주어진 일정한 영역(pre-defined area) 대비 탐색 영역의 비율인 지도 확장률을 자체 평가하여 일정 기준에 만족하면 탐사를 종료하게 된다.

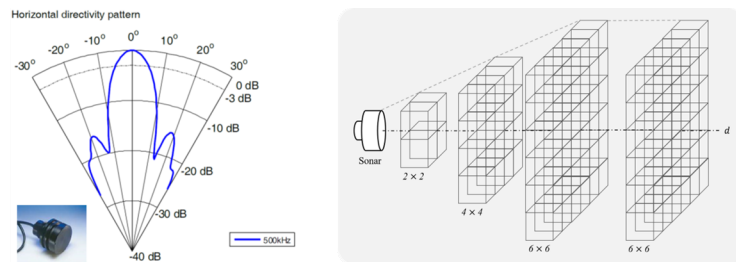
3. 자율탐사 요소기술

3.1 환경 인지

본 논문에서는 자율탐사의 주요 목적인 탐사 영역 확장, 즉 지도 확장(Map expansion)을 위해 초음파 거리 센서가 사용된다. 수중로봇의 물리적 접근 가능 공간에 대한 판단을 위해 활용되는 초음파 거리 센서는 지향하는 영역에 대한 지도 상에 공간 개방 및 공간 점유 유무를 판단하는데 사용된다. 펜슬-빔(Pencil-beam)형의 음향 방사 패턴을 갖는 초음파 센서는 거리에 따라 방사영역이 커지는 원뿔형 모델로 측정 모델을 선정할 수 있다. 하지만 실제 초음파 센서는 [Fig. 2]의 왼쪽과 같이



[Fig.1] Flowchart of underwater robot exploration



[Fig. 2] Radial pattern of acoustic range sonar (Reson TC3029, left) and 3D measurement model (right)

일정 거리 이후로 더 이상 방사영역이 커지지 않는다. 이에 [Fig. 2]의 오른쪽과 같이 방사영역이 거리에 따라 증가한 후 일정 거리 이후에는 동일한 영역을 갖는 측정 모델의 수정이 필요하고, 이를 통해 3차원 점유 격자 지도 상에 초음파 거리 센서의 정보를 통한 공간의 점유 유무 정보를 반영하여야 한다.

수중로봇의 자기위치추정 및 보정기술은 자기위치 및 지도의 정확도를 높이기 위해 자율탐사에 반드시 필요한 기술 중에 하나이다. 자기위치 보정을 위해 내부센서가 아닌 외부센서 정보를 통해 위치보정에 활용하는데 주로 음향, 광학 카메라, 소나 등이 사용된다. 본 논문에서는 외부센서 정보로 영상 소나를 사용한다. 영상소나는 음향(소나)영상을 출력하는 장비로서 영상 처리를 통해 주변 특징 등을 검출할 수 있다. 소나용 인공표식물[Fig. 4]은 영상소나에서 검출율을 극대화시킨 표식물로서 확률 기반 인식 기법의 적용을 통해 수중 인식이 용이하도록 개발되었다^[13]. 영상소나를 통해 인공표식물의 위치 정보 검출이 가능하고 이를 통해 수중로봇의 자기위치보정에 활용된다. 자기 위치 보정의 수행은 수중로봇이 탐사를 수행하는 도중에 자기 위치의 불확실성이 임의의 값 이상으로 증가하였을 경우 인공 표식물을 재방문하여 자기 위치를 보정하게 된다.

3.2 확장형 칼만 필터 기반 SLAM

일반적으로 관성 항법 장비와 함께 음향, 광학 카메라, 소나 등을 융합하여 자기 위치 추정을 수행하게 된다. 본 논문에서는 IMU (Inertial measurement unit)와 DVL (Doppler velocity log)를 통하여 관성 항법을 수행하고, 영상 소나를 통해 입력되는 수중 인공 표식물의 위치를 토대로 수중로봇의 자기 위치를 보정한다^[14]. 추정된 로봇의 위치는 자율탐사 시 얻게 되는 다양한 정보의 기준 위치로 활용된다.

3.3 지도 확장

수중로봇의 지도확장을 위해 만들어진 지도상에 다음 목적지 선정이 필요하다. 목적지는 지도확장을 목적으로 함으로 미탐색지역이 존재하며 로봇을 통해 접근이 가능하여야 한다. 이러한 정보는 초음파 거리 센서를 통해 작성된 점유 격자 지도에서 확인할 수 있다. 점유 격자지도는 지도상의 단위 공간을 개방(Free), 점유(Occupy), 미개척지(Unknown)로 정의한다. 개방지역과 점유지역이 맞닿는 지역은 로봇이 더 이상 진입할 수 없는 공간으로 확인될 수 있다. 개방지역과 미개척지가 맞닿는 지역은 로봇이 진입할 수 있는 가능성이 있으며 추가 탐사가 필요한 지역이다. 이러한 지역을 경계지역(Frontier)

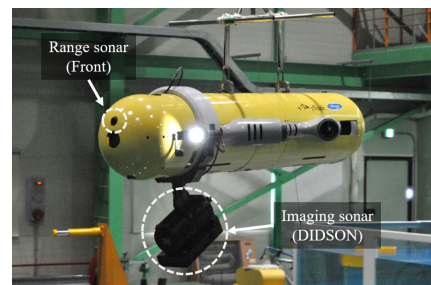
이라 한다^[15]. 경계지역은 매우 넓은 범위에 걸쳐 나타나고 단위 경계지역을 로봇이 모두 탐색할 수 없다. 그러므로 로봇이 1회 탐색 시 탐사 가능한 센서 범위를 기준으로 경계지역을 그룹화(grouping)한다. 이를 통해 일정한 거리 범위에 안에 있는 경계지역끼리 그룹화 되고, 이들의 위치 중심(Center of Gravity, CoG)을 바탕으로 로봇의 다음목적지 후보로 선정할 수 있다.

3.4 경로 생성

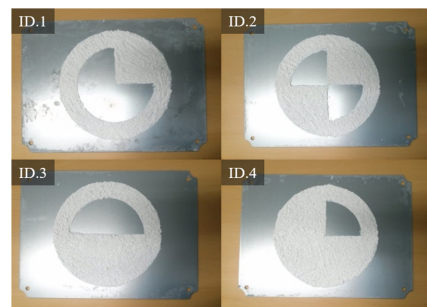
지도 상의 경계지역이 수중로봇의 목적지로 선정되면 개방된 지역을 통해 로봇의 다음 목적지까지 이동이 가능한 경로 계획이 필요하다. 경로계획에는 A^* , D^* , Potential field, Rapidly-Exploring Random Trees (RRT), Depth-first search (DFS) 등의 다양한 기술이 이미 제안되었다. 이 가운데 본 논문에서는 RRT기법^[16]에서 임의의 경로 추가 부분을 수정하여 적용한다.

4. 검증 실험

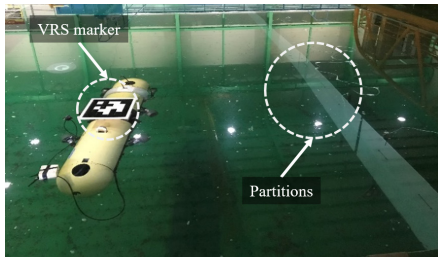
초음파 거리 센서를 이용한 수중 로봇의 지도 확장 기술의 검증을 위하여 실제 수중로봇에 구현, 이를 실내 수조에서 실험하고 성능을 검증한다. 검증 실험에 사용된 로봇은 선박해양플랜트연구소에서 개발한 수중로봇인 yShark이다[Fig. 3]. yShark은 AUV (Autonomous Underwater Vehicle)이며, [Table 1]



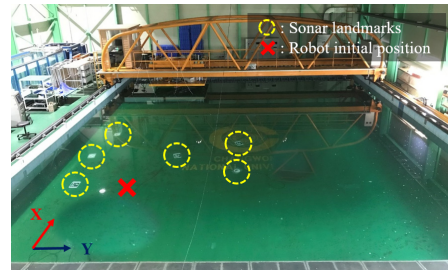
[Fig. 3] Underwater robot, yShark



[Fig. 4] Artificial landmarks for imaging sonar6



[Fig. 5] Vision-based reference system for true position of robot



[Fig. 6] Experimental set-up for map-expansion test

[Table 1] Specifications of yShark's sensor

Sensor	Name	Information	Accuracy
IMU	Honeywell HG1700	linear accel.	0.001g
		angular vel.	1° /hr
DVL	Linkquest NavQuest600	linear vel.	1%±1mm/s
Range sonar	Reson TC3029	distance	0.01m
Imaging sonar	Soundmetric DIDSON	object (r, θ)	-

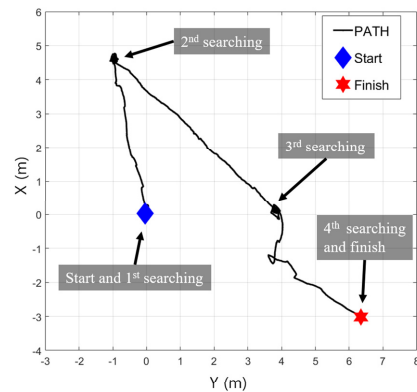
과 같은 관성 항법 및 외부 측정 센서를 장착하고 있다. 추정된 수중로봇의 위치 성능 검증을 위해 영상기반 절대위치 인식시스템(Vision-based Reference System, VRS)을 사용한다. [Fig. 5]에서 보는 것과 같이 로봇 상단에 카메라용 마커를 장착하고 이를 천장에 장착된 카메라를 통해 인식, 영상 처리하여 로봇의 절대 위치를 검출한다.

검증 실험은 총 2가지 형태로 진행된다. 첫 번째는 수중 로봇의 지도 확장 실험만 실시한다. 두 번째 실험에서는 수중로봇의 지도 확장 및 위치 정확도 유지를 위한 위치 보정 과정이 동시에 수행된다. 수조 바닥에는 소나용 인공 표식이 설치되어 있고, 이를 수중 로봇 하부에 설치된 영상 소나를 통해 인식한다. 검증 실험은 대한민국 창원에 위치한 창원대학교 공학수조에서 수행되었다.

4.1 수중로봇의 지도 확장 실험

4.1.1 실험 환경 및 내용

첫 번째 실험은 수중 로봇의 지도 확장 실험이다. 본 실험에서는 초음파 거리 센서에 의한 지도 작성, 경계지역 검출을 통한 탐사 목적지 선정, 경로 생성, 로봇 이동 등의 요소 기술이 실시간 수행되는 것을 확인하고자 한다. [Fig. 6]에서 보듯이 개방된 수조 공간에 대해 지도 작성 및 확장이 수행되며, 로봇은 수조 왼쪽 아래 부분에서 실험이 시작된다.



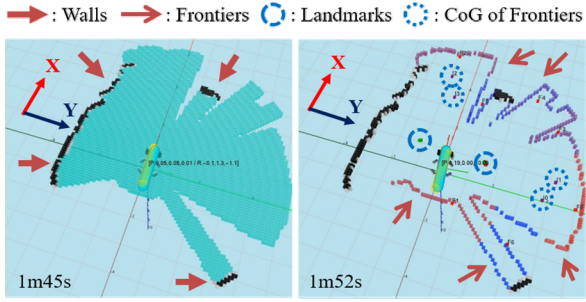
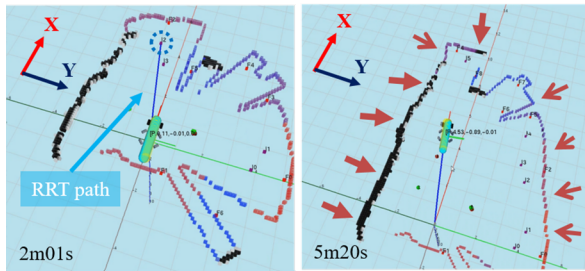
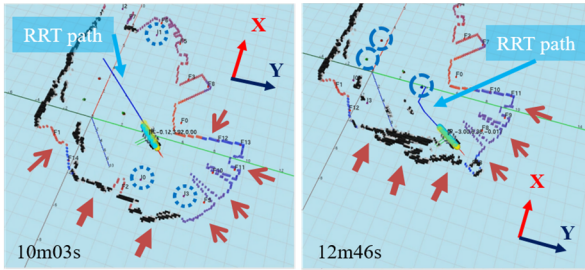
[Fig. 7] Robot path at map-expansion test

4.1.2 실험 결과

첫 번째 실험은 약 13분 간 진행되었으며, [Fig. 7]은 수중 로봇의 전체 이동 경로를 보여준다. 시작 지점을 포함하여 총 4곳의 목적지에서 초음파 거리 센서를 통해 주변 영역을 탐색한다. 초음파 거리 센서는 로봇에 고정되어 있기 때문에 해당 탐색지에서 로봇은 회전운동을 수행한다.

[Fig. 8 (a)]는 초기 시작지점에서 수행한 주변 탐색 및 경계 지역 검출 결과이다. 초음파 거리 센서에 의해 업데이트된 영역은 마치 부채살과 같은 형태를 갖는다. 이는 초음파 거리 센서의 잡음으로 인해 필터링 되어 제대로 업데이트가 되지 않은 영역이다. 경계지역이 검출되면 로봇의 크기에 따라 경계 지역이 그룹화 되고, 로봇으로부터 거리가 먼 그룹의 위치 중심으로 '다음 목적지'가 선택된다. [Fig. 8 (b)]는 이렇게 선택된 목적지까지 경로 계획이 완료되고 이동하는 모습을 보여준다. [Fig. 8 (b)]의 오른쪽과 [Fig. 8 (c)]의 왼쪽과 같이 로봇과 목적지까지 공간이 개방되어 있으면 RRT 경로는 일직선으로 생성되는 것을 볼 수 있다. [Fig. 8 (c)]의 오른쪽은 로봇과 목적지 사이에 장애물이 존재하여 이를 회피하기 위한 경로가 생성된 것을 볼 수 있다. 이를 통해 올바른 경로 생성이 수행되고 있음을 확인할 수 있다.

[Fig. 8 (c)]의 오른쪽은 세 번째 목적지를 거쳐 네 번째 목적지에 도착한 결과이다. 네 번째 목적지는 [Fig. 6]의 수조에서

(a) 1st scanning and frontier detection(b) Path planning and move to 2nd point(c) Move to 3rd and 4th point

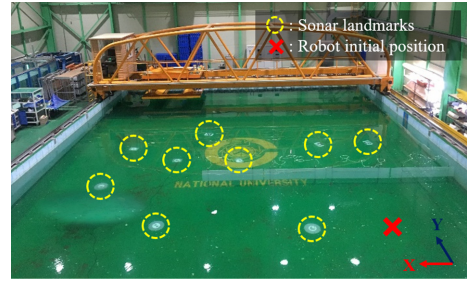
[Fig. 8] Map at map-expansion test

오른쪽 아래 부분으로 수조의 모서리이다. 해당 장소에서 주변 영역 탐색을 위해 로봇 회전을 수행하였으나 주변 지도가 확장되지 않았고 ‘다음목적지’로 이동하기 위한 경로 생성이 되지 못하여 실험이 종료되었다. 본 실험 외에 추가 실험에서 위와 같이 수조의 모서리 진입 후 탈출하지 못하는 사례가 여러차례 발생하였다. 이는 초음파 거리 센서의 잡음으로 인한 올바른 지도 업데이트가 발생하지 못한 점과 정밀한 경로 생성이 되지 못한 점을 문제점으로 말할 수 있다.

4.2 수중로봇의 지도 확장 및 위치 보정 실험

4.2.1 실험 환경 및 내용

두 번째 실험은 수중로봇의 지도 확장과 위치 정확도 유지를 위한 위치 보정 과정이 동시에 수행되는 수중 로봇의 전체 자율탐사(Active SLAM) 실험이다. 1차 실험에서 수행된 지도 확장과 함께 로봇의 위치 정확도 보정 과정이 추가되고, [Fig.



[Fig. 9] Experimental set-up for overall test

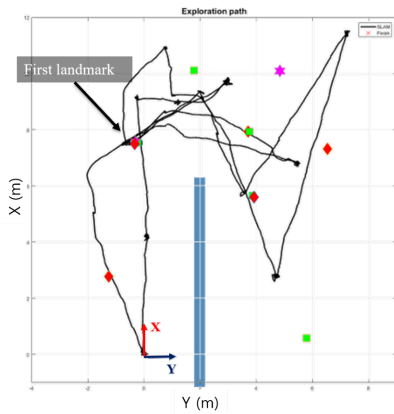
1]에 나타난 자율탐사 흐름에 맞추어 로봇은 판단하고 탐사를 수행한다. 로봇의 위치 보정을 위해 자기 위치 불확실성이 일정한 임계값 이상보다 크면 등록된 인공표식물 중 위치 불확실성이 가장 작은 인공표식물로 재방문(재인식)하여 로봇의 위치 불확실성을 낮추는 과정을 수행한다. 여기서 위치 불확실성은 확장형 칼만 필터의 오차 공분산을 사용하고 임계값은 0.3 m을 사용한다.

실험 환경은 가로 14 m, 세로 10m의 수조를 사용하며, 수조 가운데 영역분할을 위한 플라스틱 가벽을 설치하여 전체적인 탐사 영역이 ‘c’ 모양이 되도록 하였다. 수조 바닥에는 임의의 위치에 소나용 인공 표식물을 설치하였다. 로봇은 [Fig. 9]의 오른쪽 하단에서 출발한다. 지도 확장률의 계산을 위해 실험 시작 전 지도 크기를 X축(로봇의 전후방향)으로는 -3 m부터 13 m, Y축(로봇의 좌우방향)으로는 -3 m부터 10 m까지로 미리 정의한다. 점유 격자지도의 점유 상태별 단위 복셀(voxel, v)의 개수를 통해 지도 확장률(η)를 정의한다. 식(1)은 지도 확장률 수식을 나타낸다. 본 실험에서는 η 가 0.01이하가 되면 탐사를 종료하도록 정의하였다.

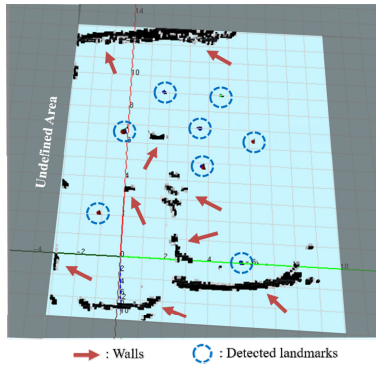
$$\eta = \frac{\sum v_{free} + \sum v_{occupy}}{\sum v_{all}} \quad (1)$$

4.2.2 실험 결과

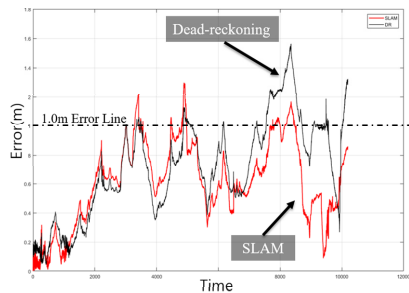
두 번째 실험에서 수중 로봇은 46분 48초 동안 107.15 m를 이동하였다[Table 2]. 로봇이 이동하는 동안 수조 바닥에 설치된 총 9개의 인공 표식물 중에 8개의 인공 표식물이 지도에 등록되었다. [Fig. 10]은 수중 로봇의 전체 이동 경로 및 지도에 등록된 인공 표식물을 보여준다. 로봇은 이동 중에 첫 번째 인공 표식물(First landmark)을 5회 재방문하였다. 이것은 앞서 언급하였듯이 탐사 중 자기 위치 오차가 증가하여 첫 번째 인공 표식물을 인식하고 자기 위치 오차를 감소, 보정하기 위해 재방문한 것이다. 로봇의 지도 확장 및 자기 위치 정확도 유지를 위한 자율탐사(Active SLAM) 기법이 올바르게 수행되었다고 평가할 수 있다.



[Fig. 10] Robot path at overall test



[Fig. 11] Map at overall test



[Fig. 12] Position error of robot

[Table 2] Results of 2nd test

Contents	Information
Total experimental time	46 m 48 s
Total distance	107.15 m
Revisiting (position correction)	5 times
Exploration coverage	87%

[Fig. 10]의 첫 번째 인공 표식물은 로봇이 탐사를 시작하고 첫 번째로 지도에 등록된 인공 표식물이다. 이는 로봇의 자기

위치 오차가 가장 작을 때 등록된 인공 표식물로서 나머지 인공 표식물보다 가장 작은 위치 오차를 가질 수밖에 없다. 결과적으로 로봇은 매번 자기 위치 보정을 위해 첫 번째 인공 표식물을 방문하게 된다. 이것은 탐사 영역이 넓어질수록 효율이 떨어지는 단점을 갖는다.

실험 중 작성된 격자 지도는 [Fig. 11]에서 볼 수 있다. 실험 초기에 지도의 전체 크기를 지정하였다. 이러한 지도 영역에서 전체 탐사 영역과 유사한 ‘C’자 형의 지도가 작성되었다. 격자지도의 상단과 하단의 검은 선 부분은 수조의 벽면을 나타낸다. 하단의 벽면은 본래 하단의 좌, 우 벽이 연결되어 일렬로 작성되어야 하지만 우측 벽을 작성할 때는 로봇의 위치 정확도 오차가 증가하여 벽면의 지도 작성 오차로 반영되었다. 지도의 우측면은 본래 수조의 개방된 지역으로 벽이 검출될 수 없다. 반대로 지도의 좌측면은 벽이 검출되어야 한다. 실제 실험 시에는 초음파 거리센서를 통해 수조 벽면이 검출되었으나 초기 지도 작성을 위해 주어진 지도의 영역(pre-defined area)을 벗어나는 영역이기 때문에 지도에 벽이 작성되지 않았다. 수조의 중앙에는 가벽이 설치되어 있다. 가벽은 지도 상에 올바르게 일렬로 표현되지 않고 점과 같이 늘어서 있다. 가벽은 수조의 좌측 영역을 탐색할 때와 우측 영역을 탐색할 때 초음파 거리 센서에 의해 중복 탐지된다. 하지만 우측 영역을 탐색할 때와 좌측 영역을 탐색할 때 로봇의 위치오차가 발생하여 이를 통해 작성된 가벽이 삭제되거나 다른 위치에 작성되는 문제가 발생하였다. 로봇의 위치 오차가 지도의 품질에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. [Fig. 12]는 실험 중에 나타난 실제 위치와 로봇의 추정된 위치 사이의 오차를 보여준다. SLAM과 관성항법(dead-reckoning) 오차는 실험 중반까지 비슷한 경향을 보이나 그 이후에 관성항법 오차는 서서히 발산하고 SLAM 오차는 1 m 아래에서 유지됨을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 수중로봇의 자율 탐사에 필요한 지도 확장 방법에 대한 기술을 제안하고, 이를 실제 수중 로봇의 탑재하여 실험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 본 논문에서는 수중 로봇의 탐사를 위해 탐사 영역 확장과 로봇의 자기 위치 정확도라는 두 가지 기준을 제시하였다. 그리고 이 기준을 바탕으로 로봇의 다음 행동을 판단하는 기준으로 정하였다. 자율탐사에 필요한 요소 기술인 환경 인식, 위치 추정, 지도 작성, 경로 계획 등을 구현하여 실제 로봇에 탑재하여 실험을 수행하였다. 이 결과 정해진 영역 범위 내에서 자율 탐사를 올바르게 수행하였다. 하지만 본 실험을 통하여 다음의 몇 가지 문제점 또는 개선점을 발견하였다. 이는 1) 초음파 거리 센서의 잡음 처리,

2) 수중로봇의 수조 모서리 미탈출, 3) 수중로봇 위치보정 대상체 선정의 효율성, 4) 수중로봇 위치보정 성능 증대, 5) 지도 크기의 증대이다. 본 연구를 통해 Active SLAM의 기본 뼈대를 마련하였다. 다음 연구 내용으로 앞서 언급되었던 단점들을 보완하고 광대역에 대한 수중로봇 자율탐사가 가능하도록 연구를 확장 시킬 것이다.

References

- [1] R. Bajcsy, "Active perception," *Proceedings of the IEEE*, Vol.76, No.8, pp.996-1005, Aug., 1988.
- [2] P. Whaithe and F. P. Ferrie, "Autonomous exploration: Driven by uncertainty," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.19, No.3, pp.193-205, Mar., 1997.
- [3] H. J. S. Feder, J. J. Leonard, and C. M. Smith, "Adaptive mobile robot navigation and mapping," *International Journal of Robotics Research*, Vol.18, No.7, pp.650-668, Jul., 1999.
- [4] R. Sim and N. Roy, "Global a-optimal robot exploration in SLAM," *2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, pp.661-666, 2005.
- [5] H. H. Gonzalez-Banos and J. C. Latombe, "Navigation strategies for exploring indoor environments," *International Journal of Robotics Research*, Vol.21, No.10-11, pp.829-848, Oct., 2002.
- [6] F. Bourgault, A. A. Makarenko, S. B. Williams, B. Grocholsky, and H. F. Durrant-Whyte, "Information based adaptive robotic exploration," *IEEE/RSSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Lausanne, Switzerland, pp.540-545, Dec., 2002.
- [7] C. Stachniss, G. Grisetti, and W. Burgard, "Information gain-based exploration using Rao-Blackwellized particle filters," *Robotics: Science & Systems (RSS)*, Cambridge, USA, 2005.
- [8] R. Valencia, J. Andrade-Cetto, and J. Porta, "Path planning in belief space with pose SLAM," *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China, pp.78-83, 2011.
- [9] R. Valencia, J. Miro, G. Dissanayake, and J. Andrade-Cetto, "Active pose SLAM," *2012 IEEE/RSSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vilamoura, Portugal, pp.1885-1891, 2012.
- [10] R. Valencia, M. Morta, F. Andrade-Cetto, and J. M. Porta, "Planning reliable paths with pose SLAM," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol.29, No.4, pp.1050-1059, 2013.
- [11] J. Bae, S. Lee, and B.-H. Lee, "Mobile robot path planner for environment exploration," *Journal of Korea Robotics Society*, Vol.1, No.1, pp.9-16, Sept., 2006.
- [12] H. Ryu and W. K. Chung, "Local Map-based Exploration Strategy for Mobile Robots," *Journal of Korea Robotics Society*, Vol.8, No.4, pp.256-265, Dec., 2013.
- [13] Y. Lee, J. Choi, N.-Y. Ko, and H.-T. Choi, "Probability-based Recognition Framework for Underwater Landmarks using Sonar Images," *MDPI Sensors*, Vol.17, No.9, pp.1953, 2017.

- [14] Y. Lee, J. Choi, N.-Y. Ko, T. Kim, and H.-T. Choi, "Experimental result of Real-time Sonar-based SLAM for underwater robot," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, Vol.54, No.3, pp.524-534, 2017.
- [15] B. Yamauchi, "A frontier-based approach for autonomous exploration," *IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, Monterey, USA, p.146-151, 1997.
- [16] S. M. LaValle, "Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning," *Iowa State University*, Oct, 1998.



이영준

2009 충남대학교 메카트로닉스공학과(학사)
2014 충남대학교 메카트로닉스공학과(석사)
2011~현재 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 수중로봇연구부 기술원

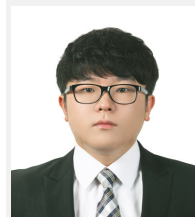
관심분야: 수중로봇 자율탐사, 소나 기반 물체 인식



최진우

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

관심분야: 수중로봇, 위치인식, SLAM



이윤건

2015 광운대학교 로봇학부(학사)
2017 성균관대학교 기계공학과(석사)
2017~현재 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 수중로봇연구부 연구원

관심분야: 수중로봇, 무인수상선



최현택

1991 한양대학교 전자공학과(학사)
1993 한양대학교 전자공학과(석사)
2000 한양대학교 전자공학과(박사)
2003~현재 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 수중로봇연구부 책임연구원

관심분야: 수중로봇, 해양시스템, 강인제어