



모형 스케일 자율운항 해양 이동체의 확장칼만필터 기반 측위 기법에 관한 연구

유영준[†]
울산대학교 조선해양공학부

A Study on Localization Technique Using Extended Kalman Filter for Model-Scale Autonomous Marine Mobility

Youngjun You[†]
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Due to the low accuracy of measured data obtained from low-cost GNSS and IMU devices, it was hard to secure the required accuracy of the measured position and heading angle for autonomous navigation which was conducted by a model-scale marine mobility. In this paper, a localization technique using the Extended Kalman Filter (EKF) is proposed for coping with the issue. First of all, a position and heading angle estimator is developed using EKF with the assumption of a point mass model. Second, the measured data from GNSS and IMU, including position, heading angle, and velocity are used for the estimator. In addition, the heading angle is additionally obtained by comparing the LiDAR point cloud with map information for a temporal water tank. The newly acquired heading angle is integrated into the estimator as an additional measurement to correct the inaccuracy in the heading angle measured from the IMU. The effectiveness of the proposed approach is investigated using data acquired from preliminary tests of the model-scale autonomous marine mobility.

Keywords : Localization(측위), Extended Kalman Filter(확장칼만필터), Autonomous Marine Mobility(자율운항 해양 이동체), GNSS(위성 항법장치), IMU(관성측정장치), LiDAR(라이다)

1. 서론

최근 자율운항 해양 이동체에 관한 사회적·기술적 요구가 높아짐에 따라, 자율운항 해양 이동체와 관련된 다양한 연구·개발이 전 세계적으로 이루어져 왔다. 몇몇 연구기관에서는 자율운항 기술에 관한 표준화 관점에서 자율운항 선박의 분류 체계를 제시해 왔으며 (Lloyds, 2017; NFAS, 2017; Utne, 2017; Maritime UK, 2017; SAE, 2016;), 국제해사기구(IMO)에서는 자율운항 관련 규정의 하나로 자율운항 기술 등급을 4단계로 정의한 바 있다 (IMO, 2021).

자율운항 해양 이동체는 국제해사기구에서 규정한 기술 등급에 따라 구분하기 시작했으나, 자율운항 해양 이동체 H/W 및 S/W에 관한 기술 분류는 표준화하기 어려운 측면이 있다. 예를 들어, Rolls-Royce에서는 미래 자율운항시스템을 경로 추정(route planning), 상황 인지(situation awareness), 충돌 회피(collision

avoidance), 상태 정의(ship state definition) 네 가지로 나누어 구분한 바 있다 (AAWA, 2016). Chae and Yi는 자율주행 차량의 S/W 구성을 측위(localization), 인지(perception), 판단/계획(decision & planning), 제어(control) 네 가지 요소로 구분한 바 있다 (Chae and Yi, 2020). 자율 이동체의 요소 기술 분류는 연구·개발자가 설계, 제작, 운용 등 참여할 수 있는 범위에 영향을 받을 수밖에 없다. 특히, 선박, 비행기와 같은 대형 이동체는 설계 및 제작 주체와 운항, 관제 및 제어 등의 운용 주체가 다르기 때문에, 자율운항 기술 분류를 주로 운항, 관제, 및 제어 분야에 한정할 수밖에 없다 (AAWA, 2016). 반면, 개인용 차량, 드론, 및 산업용 로봇과 같은 소형 이동체의 경우 자율운항시스템의 설계, 제작, 운용 등 더 넓은 분야에 연구·개발자가 참여할 수 있기 때문에, 이동체 전체를 아우르는 기술 분류가 이용되는 경향이 있다 (Chae and Yi, 2020). 따라서, 자율운항 해양 이동체의 경우 자율운항 기술을 실선 스케일, 모형 스케일에 적용하는 경우

기술 분류 체계에 차이가 있을 수 있다. 본 연구에서는 모형 스케일 자율운항 해양 이동체를 중심으로 관련 연구를 검토하고자 했기 때문에, 자율주행 차량, 드론 및 산업용 로봇의 기술 분류를 따라 H/W 및 S/W를 구분하였다.

조선·해양 분야에서 자율운항 해양 이동체의 측위, 인지, 판단/계획, 제어 관련 기술 중, 측위 기법에 관한 관심도는 상대적으로 낮다고 판단된다. 그 이유는 두 가지로 설명할 수 있다. 첫째, 상업용 위성항법장치(GNSS), 관성측정장치(IMU) 등 계측 장치의 정확도 또는 오차에 비해, 실선 스케일 이동체의 크기가 크고, 허용 거리와 같은 제한값이 크기 때문이다. 둘째, 해상에서는 위성항법장치의 계측 위치 정확도를 낮추는 반사, 굴절, 회절 등의 영향이 미미하며, 터널, 다리, 주위 건물군에 의해 발생하는 음영 구역(occluded region)이 존재하지 않아 측위 모듈의 안정적인 동작이 가능하기 때문이다 (Novatel Inc., 2015). 따라서, 위성항법장치 및 관성측정장치의 신호 처리에 저역통과필터(low-pass filter)를 적용하는 방법으로 자율운항 해양 이동체의 측위 기능을 구현하기도 했다 (Jo et al., 2021).

하지만, 자율운항 해양 이동체 연구 개발 대상이 다양해지고, 실선 스케일에서부터 모형 스케일로 적용 범위가 확대 되어감에 따라 측위 기법에 관한 연구 필요성이 제기되고 있다. 첫째, 위성항법장치가 경위도 좌표를 수신할 수 없는 수중 운동체의 경우 정확한 위치, 심도 등을 추정하기 위하여 추측항법(dead reckoning)을 이용한 측위 기법이 연구된 바 있다 (Bellafaire et al., 2022). 둘째, 위성항법장치를 제외한 라이다 또는 카메라 등의 장치를 이용하는 동시적 위치추정 및 지도작성(SLAM) 측위 기법이 연구된 바 있다 (Sawada and Hirata, 2023). 동시적 위치추정 및 지도작성 측위 기법은 위성항법장치를 활용할 수 없는 예인 수조 또는 해양공학 수조 등 시험수조에서 자율운항 해양 이동체 위치, 상태 등 성능 평가에 활용 가능성이 높을 것으로 예상된다. 셋째, 측위 정보의 정확도 향상 또는 오차 저감을 위하여 고정된 지형정보를 활용한 지도 기반 측위 기법(map-based localization)이 연구된 바 있다 (Chalvatzaras et al., 2023).

본 연구는 2023년 자율운항보트경진대회(KABOAT 2023)에 참여하기 위하여 울산대학교 조선해양공학부에서 설계·제작한 모형 스케일 자율운항 해양 이동체 H/W 및 S/W를 시험하는 과정에서, 위성항법장치 및 관성측정장치에서 계측한 정보만으로는 해양 이동체의 위치 및 선수각 정보를 정확하게 추정할 수 없는 문제를 해결하기 위하여 착안하였다. 첫째, 모형 스케일 자율운항 해양 이동체를 점 질량(point mass)으로 가정한 후, 확장칼만 필터를 이용하여 위성항법장치, 관성측정장치에서 획득한 정보를 보정하였다. 둘째, 라이다에서 계측한 가설 수조 외벽의 점 구름(point cloud)을 이용하여, ICP map matching 기술을 적용, 선수각 추정 정확도를 추가로 보정하고자 하였다. 셋째, 모형 스케일 자율운항 해양 이동체 시험 데이터를 이용하여, 센서 계측 정보와 추정기로 보정한 결과를 비교, 분석함으로써 계측된 위치 및 선수각에 포함된 잡음 및 선수각 오차가 보정되는지 확인하였다. 그 결과, 제안한 확장칼만필터 기반 측위 기법이 모형 스케일 자

율운항 해양 이동체에서 제기되었던 저가 계측장비의 계측 부정확한 문제의 개선 가능성을 확인하였다.

2. 모형 스케일 자율운항 해양 이동체의 H/W 및 S/W 구성

2.1 모형 스케일 자율운항 해양 이동체 H/W

본 연구에서 위성항법장치, 관성측정장치 및 라이다를 탑재하고, 데이터 취득 및 계측에 이용된 모형 스케일 자율운항 해양 이동체의 형상은 Fig. 1과 같다. 제작된 해양 이동체의 세부 사양은 Table 1과 같다. 모형 스케일 자율운항 해양 이동체는 자율운항보트경진대회 규정 및 자율운항보트경진대회 경기 규정을 준수하도록 자체 설계, 제작된 것이다 (SNAK & KRISO, 2022; SNAK & KRISO, 2023). Fig. 1에서 보는 것처럼, 하부 선체를 좌현과 우현에 각각 설치하였으며, 쓰러스터 및 서보모터는 각각 4개씩 좌현, 우현의 선수부, 선미부에 설치하였다. 쓰러스터와 서보모터는 추력 및 선수각 제어에 이용되었다.



Fig. 1 The model-scale autonomous marine mobility built in the University of Ulsan

Table 1 Specification of the model-scale autonomous marine mobility

Item	Properties
Lpp [m]	0.91
B [m]	0.70
D [m]	0.61
Max. weight [kg]	60.00
Weight [kg]	39.40
GNSS [-]	Ublox ZED C099-F9P, 1EA
IMU [-]	WITHROBOT myAHRs+, 1EA
LiDAR [-]	Velodyne VLP-16 puck, 1EA
Thrusters [-]	Blue Robotics T200, 4EA
Servo motors [-]	RCmall ASME-04B, 4EA

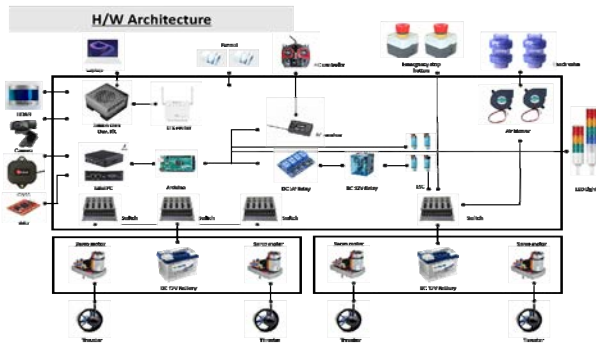


Fig.2 H/W architecture for model-scale autonomous marine mobility

Table 2 Features of equipped GNSS, IMU and LiDAR

Item	Properties
GNSS	Position accuracy (w/ RTK) : 0.01[m] + 1pp[m] CEP Frequency of time pulse signal: 0.25-10[Hz]
IMU	Unpublished
LiDAR	Accuracy : ±3[cm] typical Angular resolution : 0.1°-0.4° Rotation rate: 5-20[Hz]

설계된 자율운항 해양 이동체에서 계측, 연산, 제어 등 임무를 수행하기 위하여 설계된 H/W 구성을 Fig. 2에서 보여주고 있다. 계측 및 연산장치가 탑재된 방수 구역과 배터리, 추진기, 서보모터 등 추력기, 제어가 탑재된 좌현, 우현의 방수 구역으로 구분되어 있다. Table 1에 정리된 주요 장치 외에도 배터리, 스위치, 아두이노, 릴레이, 연산장치(미니 PC 및 내장 보드), 원격 제어기 등이 탑재되어 있지만, 측위 기법과 관련된 주요 계측/제어 장치에 한정하여 설명하였다.

위성항법장치, 관성측정장치, 및 라이다에서 계측한 신호의 정확도는 Table 2와 같다. 위성항법장치는 비상용 시험 또는 낮은 수준의 상용 시험에서 사용될 수 있는 정도의 제품이라는 하지만, 정확도와 관련된 상세한 정보가 기재되어 있다. 관성측정장치의 경우 전자파 간섭(EMI), 전자파 적합성(EMC) 등급을 받은 제품이 아니었기 때문에, 설치/운용 환경에 따라 계측값의 정확도에 차이가 클 것으로 예상했다. 실제 사전 시험 및 가설 수조 시험 단계에서도 관성측정장치에서 계측된 위치 및 선수각 정보의 낮은 정확도로 인한 측위 성능의 제한을 관찰했고, 가장 큰 원인은 관성측정장치 주위 다른 계측, 연산, 제어 장치에서 발생한 전자기기 때문일 것이라 예상했다. 마지막으로, 라이다는 자율운항 드론, 자율주행 차량 등 상용 시험에서 많이 사용되고 있는 제품으로, 정확도와 관련된 상세한 정보가 기재되어 있었다.

2.2 모형 스케일 자율운항 해양 이동체 S/W

모형 스케일 자율운항 해양 이동체의 S/W 구성은 Fig. 3과 같다.

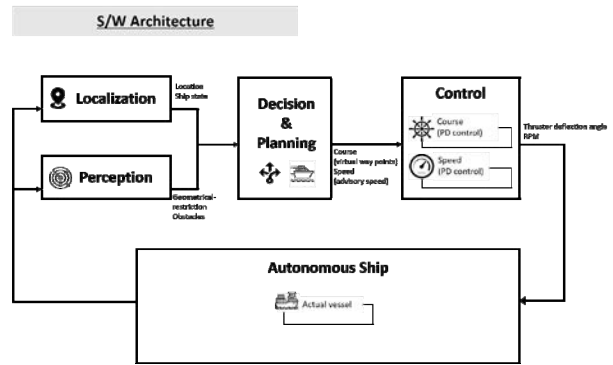


Fig. 3 S/W architecture for model-scale autonomous marine mobility

앞서, 자율주행 차량의 S/W 구성과 같이 측위(localization), 인지(perception), 판단/계획(decision & planning), 및 제어(control) 모듈로 구분하였다. 첫째, 측위 모듈은 위성항법장치, 관성측정장치로부터 획득한 경위도 좌표, 선수각 등의 정보를 처리하여, 선박의 현재 위치를 정확하게 추정한다. 단, Ublox C099-F9P (RTK) 위성항법장치에서 계측한 경위도 좌표의 정확도를 향상하기 위하여, 국토지리정보원에서 제공하는 위성 기준점 정보를 이용하여 보정하였다. 또한, 보정된 경위도 좌표를 국제횡축메르카토르(UTM) 좌표계, 즉 평면상의 위치 정보로 변환, 표시하였다. 둘째, 인지 모듈은 카메라, 라이다로부터 전달된 시각 정보를 처리하여, 해상환경, 장애물, 표식 등을 식별한다. 셋째, 판단/계획 모듈은 측위 및 인지 모듈에서 전달받은 경위도 좌표, 선수각, 장애물 위치 등의 정보를 조합하여, 현재 운항 상태를 판단한다. 또한, 부여된 임무를 수행하기 위한 운항계획(속도 및 침로)을 수립한다. 넷째, 제어 모듈은 운항계획에 따라 해양 이동체의 스러스터의 분당회전수, 서보모터의 조향각 등을 계산하고, 제어한다. 추진기 및 제어기 외력은 모형 스케일 자율운항 해양 이동체에 작용하여 위치, 속도, 가속도 등의 운동 상태를 변화시킨다. 위에서 설명된 과정을 반복함으로써, 자율운항 해양 이동체에 부여된 임무를 수행하도록 S/W가 설계되었다.

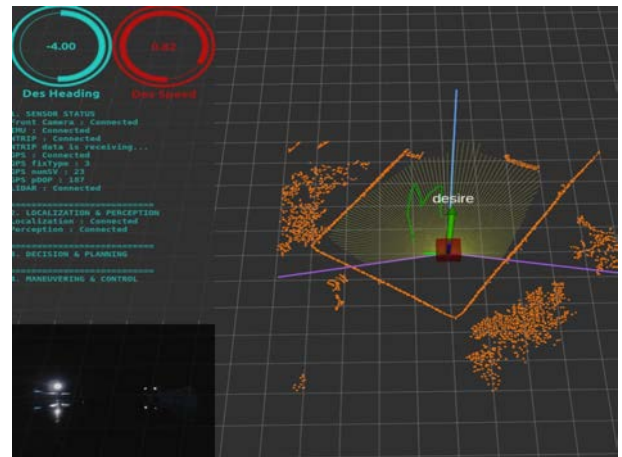


Fig. 4 Screen shot for ROS1 master screen developed in the University of Ulsan

본 연구에서 모형 스케일 자율운항 해양 이동체 S/W는 Ubuntu 20.04.6 LTS, ROS1 Noetic 환경에서 개발되었으며, 모형 스케일 자율운항 해양 이동체의 제어, 관리 및 점검을 위한 관리자 화면은 Fig. 4와 같다. 화면 좌측 상단에는 측위 및 인지 모듈의 정상 작동을 확인하기 위한 계측기 연결 상태 또는 계측값을 표시하고 있으며, 좌측 하단에는 카메라에서 획득한 인지 모듈의 시각 정보를 표시하고 있다. 우측에는 측위 및 인지 모듈에서 획득한 정보를 표시하고 있는데, 주황색 점은 라이다에서 계측한 점 구름 정보를 가리킨다. 녹색 점은 부여받은 임무를 수행하는 동안 해양 이동체의 이동 궤적을 도시하고 있으며, 노란색 실선은 식별된 점 구름 위치로부터 선체까지 거리를 가리킨다. 마지막으로, 녹색 화살표는 자율운항 선박의 선수각을 가리킨다.

3. 확장칼만필터를 이용한 위치 및 선수각 추정기 및 타당성 분석 조건

3.1 확장칼만필터를 이용한 위치 및 선수각 추정기

본 논문에서는 모형 스케일 자율운항 해양 이동체의 운동 상태를 모델링하는데, 점 질량으로 가정한 선형운동모델을 이용하였다. 좌표축은 ENU(East-North-Up)를 이용하였는데, 통상적으로는 진북 방향을 0도로 정의하므로, 관성측정장치의 계측값을 시계 방향으로 90도 회전하여 사용하였다.

위성항법장치 및 관성측정장치에서 획득한 해양 이동체의 위치 및 선수각의 잡음을 저감하고, 정확도를 향상할 수 있는 확장칼만필터를 설계하였다. 특히, 해양 이동체의 경로 추종 제어를 위해서는 선수각이 필요한데, 관성항법장치에서 취득한 계측값은 정확도가 낮아 추가적인 보정이 필요했다. 따라서, 별도의 측량값으로 주어진 가설 수조 외벽 위치 정보를 지도 정보로 사용하고, 라이다에서 취득한 점 구름 정보를 활용하여 선수각 계측값을 추가로 취득하였다, 우선, 계측된 위치 및 선수각 정보를 이용하여 해양 이동체의 지역 좌표계 기준으로 가설 수조의 외벽 위치를 추정했다. 그 후 해양 이동체와 근접한 외벽을 일정 간격을 갖는 점 구름 정보로 변환하였다. 라이다에서 외벽을 계측한 점 구름을 추정값인 점 구름 형태의 외벽 정보와 ICP 방법으로 얻은 외벽 정보를 비교하여, 이동 및 회전 변환행렬을 계산했다. ICP 방법이란 한 대상물에 대해 다른 지점에서 스캔된 두 개의 점 구름이 있을 경우, 두 개의 점 구름을 합쳐 정합하는 알고리즘이다 (Seo and Woo, 2021). 회전 변환행렬의 결과로 얻은 선수각 차이값을 관성측정장치에서 구한 선수각에 더하여, 추가적인 선수각 계측값으로써 활용하였다. 확장칼만필터의 상태 및 입력 벡터는 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [x, y, \psi, u]^T \\ \mathbf{u} &= \gamma \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 x 는 국제횡측메르카토르 좌표계 기준의 종 방향 위

치, y 는 횡 방향 위치, ψ 는 선수각, u 는 종방향 속도를 가리킨다. 종 방향 속도는 상태 방정식의 입력값으로 정의하는 것이 일반적이나, 본 연구에서 활용한 위성항법장치 계측값의 잡음을 고려하기 위하여 상태 벡터에 포함하여 수식을 구성하였다. 입력 벡터는 선회 각속도(γ)로 가정하였다. 단순 점 질량 모델을 이용한 공정 모델(process model)은 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ &= \begin{bmatrix} u \cos \psi \\ u \sin \psi \\ \gamma \\ u \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

연속시간(continuous-time) 시스템 모델을 고정된 샘플링 시간(Δt)으로 이산화하고, 종 방향 속력은 크게 변하지 않는다고 가정하면 이산시간(discrete-time) 시스템 모델은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= F(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \\ &= \begin{bmatrix} x_k + u_k \cos \psi_k \Delta t \\ y_k + u_k \sin \psi_k \Delta t \\ \psi_k + \gamma_k \Delta t \\ u_k \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)의 시스템 모델은 비선형 함수이므로, 확장칼만필터를 적용하였다. 시스템 모델의 자코비행렬(jacobian matrix)은 식 (4)와 같다.

$$J_F = \frac{\partial F}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -u_k \sin \psi_k \Delta t & \cos \psi_k \Delta t \\ 0 & 1 & u_k \cos \psi_k \Delta t & \sin \psi_k \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

시스템의 계측 모델(measurement model)은 위성항법장치 및 관성항법장치에서 획득한 정보를 이용하기 위한 모델과, 라이다에서 획득한 점 구름 정보로부터 얻은 선수각을 계측값으로 이용하기 위한 모델로 구분할 수 있다. 각각 식 (5), (6)과 같다.

$$\mathbf{z}_1 = G_1(\mathbf{x}) = [x, y, \psi, u]^T \quad (5)$$

$$J_{G_1} = \frac{\partial G_1}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{z}_2 = G_2(\mathbf{x}) = \psi \quad (6)$$

$$J_{G_2} = \frac{\partial G_2}{\partial \mathbf{x}} = [0 \ 0 \ 1 \ 0]$$

여기서, 공정 모델 및 계측 모델을 이용한 확장칼만필터 수식은 식 (7), (8)과 같다. 여기서, 식 (8)의 계측값 업데이트는 식 (5), (6)에서 기술한 계측 모델을 이용해 순차적으로 업데이트한다. 단, 계측값을 업데이트할 때 수신한 데이터가 현재 추정된 공분산(covariance)을 기준으로 3-시그마(sigma)에 해당하는 검증 게이트(validation gate)를 가정하여 계측값의 업데이트 여

부를 결정하였다. 여기서, 검증 게이트를 적용한 이유는 저가 계측 장치의 낮은 정밀도 때문에, 계측값을 항상 업데이트하는 것이 급격한 성능 저하를 야기할 수 있기 때문이다. 또한, 이동체 연구 분야에서 3-시그마 정도의 값이 일반적으로 사용되고 있다.

본 연구에서 점 질량을 가정하여 사용한 공정 모델은 스케일에 따른 차이가 없기 때문에, 공정 모델 자체는 크기에 상관없이 동일하게 적용된다. 식 (8)에서 k 는 이산화된 시간 성분을 가리킨다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k|k-1} &= F(x_{k-1|k-1}, u_{k-1|k-1}) & (7) \\ P_{k|k-1} &= J_F P_{k-1|k-1} J_F^T + Q \\ S_k &= J_{G_i} P_{k|k-1} J_{G_i}^T + R_{G_i} & (8) \\ K_k &= P_{k|k-1} J_{G_i}^T S_k^{-1} \\ \hat{x}_{k|k} &= \hat{x}_{k|k-1} + K_k (z_k - G_i(\hat{x}_{k|k-1})) \\ P_{k|k} &= (I - K_k J_{G_i}) P_{k|k-1} \\ &, i = 1, 2 \end{aligned}$$

3.2 타당성 분석 조건

2023년 08월 07일부터 2023년 08월 11일 5일간 경상남도 창원시 로보랜드에서 진행된 2023 자율운항보트경진대회 중 모형 스케일 자율운항 해양 이동체를 이용한 임무를 수행하기 전 가설 수조를 따라 한쪽 외벽에서 반대쪽 외벽까지 원격제어를 통해 이동하는 사전 시험이 수행되었다. 사전 시험의 목적은 모형 스케일 자율운항 해양 이동체의 측위, 인지, 판단/계획 모듈의 정상 작동 여부를 확인하기 위한 것으로, 이때 저장된 데이터를 본 연구에 활용하였다. 사전 시험 시 별도의 측량 장치나 고정밀 장비를 이용하여 계측한 값이 없기 때문에, 정량적 비교에 한계가 있다. 따라서, 계측된 데이터를 분석하는 방법에 따른 차이를 정성적인 관점에서 분석하는 것으로 본 연구를 수행하였다. Table 3에서는 세 가지 방법론을 보여주고 있다. "None"은 위성항법장치 및 관성측정장치에서 계측한 값을 별도 처리 없이 이용하는 방법을 가리키며, "EKF"는 위성항법장치와 관성측정장치의 취득값만을 확장칼만필터의 계측 모델로 사용한 측위 기법을 적용하여 후처리한 결과를 가리킨다. "EKF + ICP"은 라이다 점 구름 데이터와 수조 측량값을 참조하여 ICP 알고리즘을 이용해 선수각을 계측하고, 이를 확장칼만필터의 계측 모델로 추가하여 사용한 결과를 가리킨다.

Table 3 Position and heading angle estimator for the autonomous marine mobility

Type	Model	Application
None	-	GNSS + IMU
EKF	Point mass	GNSS + IMU
EKF + ICP	Point mass	GNSS + IMU + LiDAR (heading angle)

4. 결과 상대 비교 및 분석

Fig. 5(a)는 모형 스케일 자율운항 해양 이동체의 이동 궤적을 보여주며, 확대한 부분은 Fig. 7에서 살펴볼 486-step 부근의 궤적이다. 위성항법장치 계측값을 보면 점의 간격이 불균일하나, 확장칼만필터를 이용한 보정 결과는 점의 간격이 상대적으로 균일하다. 본 사전 시험에서 해양 이동체의 이동 속도가 거의 일정했음을 고려할 때, 점의 간격이 상대적으로 균일해졌다는 것은 계측값의 잡음이 보정되었기 때문이라고 생각된다. Fig. 5(b)는 모형 스케일 자율운항 해양 이동체의 선수각 시계열을 보여준다. 앞서 살펴본 486-step 부근뿐만 아니라 전체 구간에서 확장칼만필터와 ICP를 이용한 선수각 추정 기법을 적용했을 때 선수각 추정값이 다를 수 있다. 즉, 약 30초에서 60초 사이 구간에서 "EKF + ICP"를 적용하여 추정한 선수각이 "None" 또는 "EKF"를 적용하여 추정한 선수각에 비해 뚜렷하게 크다. Fig. 6, 7에서 상세히 설명하겠지만, 이 차이는 관성측정장치의 낮은 정확도에 기인한 오차를 저감한 효과에 기인한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 특정 시점에 계측, 추정한 값을 Fig. 6, 7과 같이 도시한 후, 추정값의 정확도 향상 여부를 상대 비교를 통해 분석하고자 했다. 이는 고정밀 위성항법장치, 관성측정장치로부터 얻은 계측값(즉, 참값으로 간주할 수 있는 값)이 없었기 때문이다.

Fig. 6은 338-step에서 계측한 가설 수조의 외벽 정보, 계측 정보를 활용하여 추정한 외벽 정보, 라이다를 통해 획득한 점 구름(PCs)을 각각 도시한 것이다. 사전 시험에 이용된 위성항법장치와 관성측정장치의 계측 주기가 달라, 두 장치의 계측값이 모두 갱신된 후에 계측 정보를 활용하도록 구성하였다. (즉, 샘플링 시간 간격은 고정값이 아니다.) 여기서 338-step은 33.696초를 가리킨다. Fig. 6(a)에서는 계측한 외벽 정보와 확장칼만필터를 이용하여 추정한 외벽 정보에 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 하지만, 라이다를 통해 계측한 점 구름을 살펴보면, 계측한 외벽 정보와 확장칼만필터를 이용하여 추정한 외벽 정보 모두 뚜렷한 차이가 있음을 알 수 있다. 관성측정장치의 반응 속도 및 정확도가 낮아, 관성측정장치의 계측값만을 이용하여 추정된 위치 및 선수각에 오차가 큰 것으로 분석하였다. 제작된 자율운항 해양 이동체의 크기, 가설 수조의 크기 등을 고려할 때, Fig. 6(a)에서 나타난 선수각의 오차는 주어진 임무를 정상적으로 수행할 수 없을 정도로 큰 것으로 생각된다.

Fig. 6(b)는 위성항법장치 및 관성측정장치로 계측한 가설 수조의 외벽 정보와 확장칼만필터 및 ICP map matching을 적용하여 추정한 외벽 정보를 도시하였다. 여기서 파란색 점은 수조의 외벽 정보 중 이동체 주변의 외벽 정보를 점 구름 정보로 변환한 결과이다. 붉은색 점은 이 점 구름 정보를 라이다로 계측한 점 구름에 매칭하여 이동한 결과이다. 붉은색 점이 파란색 점과 위치가 다른데, 이는 라이다 점 구름 정보에 외벽뿐 아니라 수면의 일부, 부표 등의 장애물들이 함께 계측되므로 ICP map matching 결과의 위치가 불확실했기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 선수각 정보만을 활용하였다. 이 결과를 보면 위성항법장치 및 관성측정장치만으로 계측한 수조 외벽의 위치와 추정한 위치 간에 뚜

릿한 차이가 나타나며, 추정된 위치가 라이다로 계측한 외벽과 유사함을 확인할 수 있다. 즉, 식(8)에서 언급한 계측값 업데이트 시 라이다에서 계측한 점 구름 정보를 기반으로 한 선수각을 추가로 이용한 결과, 선수각 추정 정확도가 뚜렷하게 향상되었음을 알 수 있다.

Fig. 7에서는 486-step에서 계측한 가설 수조의 외벽 정보, 계측 정보를 활용하여 추정된 외벽 정보, 라이다를 통해 획득한 점 구름을 각각 도시하였다. 여기서, 486-step은 48.495초를 가리킨다. Fig. 7(a)에서도 Fig. 6(a)와 같이 계측한 외벽 정보와 확장칼만필터를 이용하여 추정된 외벽 정보에 거의 차이가 없음을 알 수 있고, 라이다를 통해 계측한 점 구름은 계측, 추정된 외벽 정보와 뚜렷하게 다름을 알 수 있다.

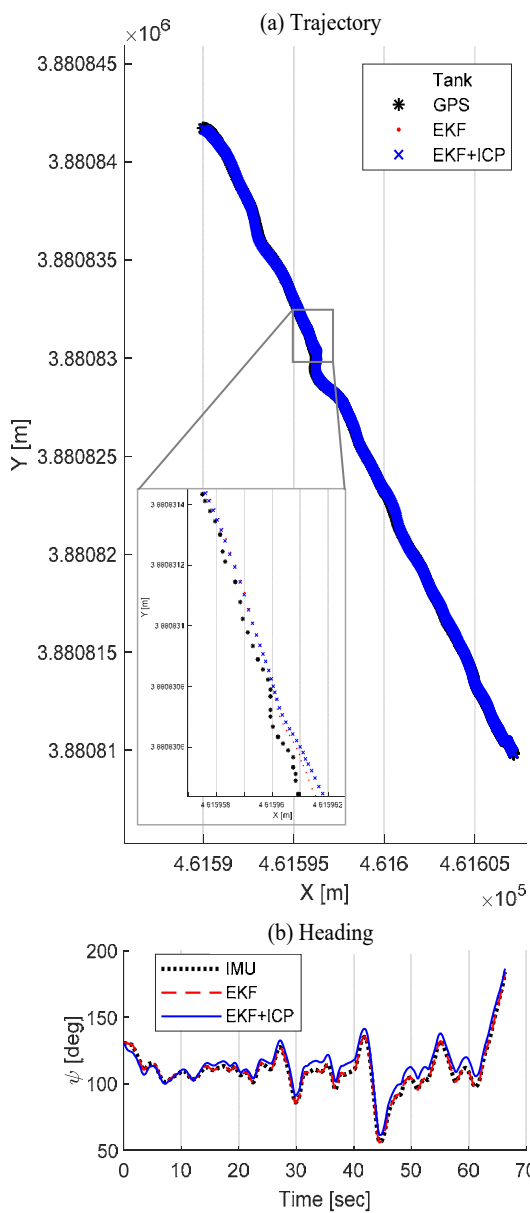


Fig. 5 Trajectories and time series of heading angle for model-scale autonomous marine mobility

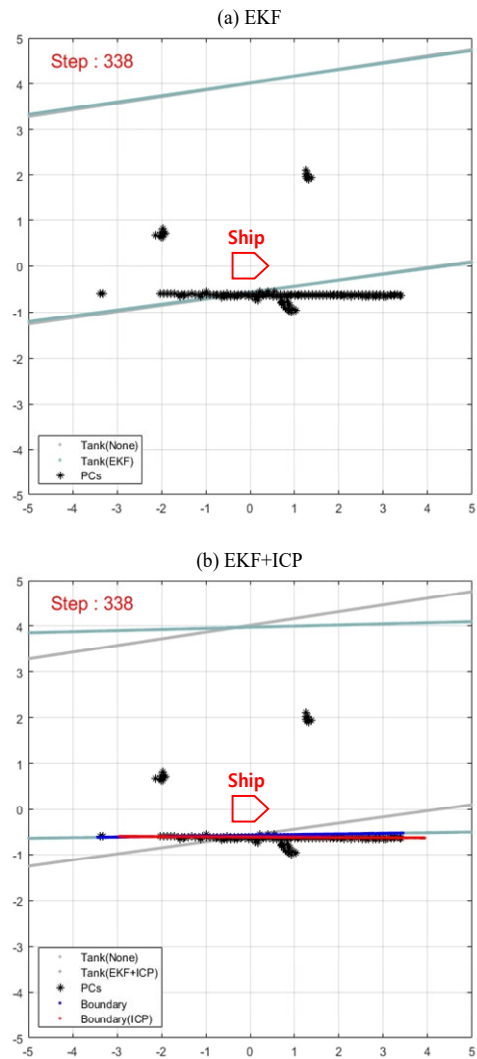


Fig. 6 Tank boundaries when implementing the proposed approach using measured data acquired from GNSS, IMU, and LiDAR at 338-step

Fig. 7(b)에서도 Fig. 6(b)과 같이 계측한 가설 수조의 외벽 정보와 확장칼만필터 및 ICP map matching을 적용하여 추정된 외벽 정보에 뚜렷한 차이가 나타났다. 그러나 앞서 Fig. 6(b)와 달리, 파란색 점으로 표시한 외벽 추정 위치가 검정색 별표로 표시된 라이다로 계측된 점 구름과 일치하지 않는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 제시한 위치 및 선수각 추정기 설계 특성과 관련된 것으로 이해된다. 라이다로 계측한 점 구름을 위치 보정에 사용하지 않았기 때문이다. 또한, 라이다뿐만 아니라 관성계측장치 정보도 확장칼만필터의 선수각을 업데이트하는데 사용했다. 즉, Fig. 6(b)에서는 관성계측장치의 선수각 계측값이 3-시그마로 가정된 검증 게이트를 초과했기 때문에, 라이다에서 계측한 값만을 이용하여 선수각을 업데이트했다. 반면, Fig. 7(b)에서는 관성계측장치의 선수각 계측값이 3-시그마로 가정된 검증 게이트 이내였기 때문에 두 값을 모두 이용하여 선수각이 업데이트되었다.

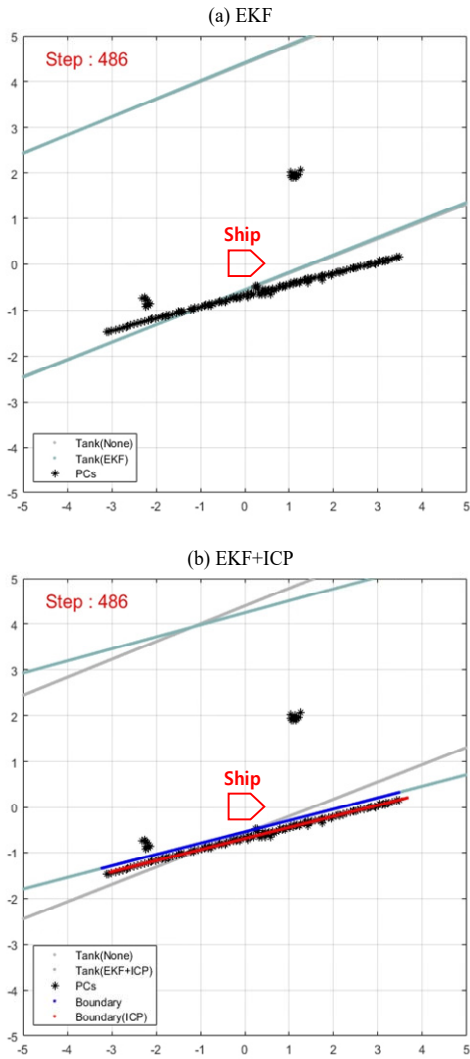


Fig. 7 Tank boundaries when implementing the proposed approach using measured data acquired from GNSS, IMU, and LiDAR at 486-step

5. 결론

본 연구는 울산대학교 조선해양공학부에서 설계·제작한 모형 스케일 자율운항 해양 이동체를 이용하는 과정에서, 관성측정장치의 낮은 정확도로 인해 측위 모듈에서 추정된 위치 및 선수각의 부정확도를 향상하기 위하여 수행되었다.

모형 스케일 자율운항 해양 이동체를 점 질량으로 가정한 후, 확장칼만필터를 이용하여 위치 및 선수각의 정확도를 향상할 수 있는 추정기를 개발하고자 했다. 계측한 값을 별도 처리 없이 이용하거나, 확장칼만필터만을 적용한 위치 및 선수각 추정기의 경우 정확도 향상이 거의 없음을 확인했다. 하지만, 확장칼만필터와 ICP map matching을 적용한 위치 및 선수각 추정기를 이용했을 때, 추정된 위치 및 선수각의 정확도가 뚜렷하게 향상되었음을 확인했다.

앞서 Fig. 6, 7에서 설명한 것처럼, 본 연구에서는 라이다에서

취득한 점 구름 정보를 후처리 없이 사용했기 때문에, ICP map matching 결과 중 비교적 잡음이 작은 선수각 정보만을 보정에 활용할 수 있었다. 선수각 보정만으로는 정확한 위치 추정에 한계가 있다고 판단하여, 후속 연구로서 라이다 점 구름의 후처리를 통해, 잡음을 저감한 후 ICP map matching을 위치 보정에도 적용하고자 한다. 이를 통해, 위치 및 선수각 추정의 정확도를 향상할 것으로 기대한다.

Nomenclature

Abbreviation	Terminology
AAWA	Advanced Autonomous Waterborne Applications
ASEE	American Society for Engineering Education
CEP	Circular Error Probable
EKF	Extended Kalman Filter
EMC	Electromagnetic Susceptibility
EMI	Electromagnetic Interference
GNSS	Global Navigation Satellite System
ICP	Iterative Closest Point
IMO	International Maritime Organization
IMU	Inertial Measurement Unit
KABOAT	Korea Autonomous Boat Competition
KRISO	Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering
LiDAR	Light Detection And Ranging
LR	Lloyds Register
LTS	Long-Term Service
MASS	Maritime Autonomous Surface Ships
NFAS	Norwegian Forum for Autonomous Ships
NTNU	Norwegian University of Science and Technology
ROS	Robot Operating System
RTK	Real Time Kinematic
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SNAK	Society of Naval Architects of Korea
UK	United Kingdom
USA	United States of America
UTM	Universal Transverse Mercator (Coordinate System)

후기

본 논문은 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업(2021RIS-003)의 결과입니다. 또한, 2023년도 자율운항보트경진대회에 참여, 모형 스케일 자율운항 해양 이동체를 설계·제작했던 울산대학교 조선해양공학부 학부 과정 강민우, 김수빈, 김승태, 윤성철, 이예찬, 이정훈, 이지후, 장애범 학생에게 감사의 뜻을 전합니다.

References

- Advanced Autonomous Waterborne Applications Partners, 2016. Remote and Autonomous Ships: The Next Steps. Advanced Autonomous Waterborne Applications Project Coordination(<https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/%20customers/marine/ship-intel/rr-ship-intel-aawa-8pg.pdf>).
- Bellafaire, M.J., Mayer, T.E., Corlett, E.J. and Rawashdeh, O.A., 2022. Evaluation of dead reckoning navigation for underwater drones using ROS, *2022 American Society for Engineering Education – North Central Section Conference*, Pennsylvania, USA.
- Chae, H. and Yi, K., 2020. Virtual target-based overtaking decision, motion planning, and control of autonomous vehicles, *IEEE Access*, 8, pp.51363–51376 (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9034121>).
- Chalvatzaras, A., Pratikakis, I. and Amanatiadis, A., 2023. A survey on map-based localization techniques for autonomous vehicles, *IEEE Transactions on intelligent vehicles*, 8(2), pp.1574–1596.
- International Maritime Organization, 2021. *Outcome of the regulatory scoping exercise for the use of maritime autonomous surface ships*, International Maritime Organization, London, United Kingdom.
- Jo, H., Kim, J., Kim, S., Woo, J. and Park, J., 2021. Development of autonomous algorithm for boat using robot operating system. *Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 60(6), pp.121–128.
- Lloyds, 2017. *Ship right: design and construction – LR code for unmanned marine systems*, Lloyds Register, London, United Kingdom.
- Maritime UK, 2017. *Being a responsible industry: an industry code of practice – Version 1.0*, Society of Maritime Industry, London, United Kingdom.
- Norwegian Forum for Autonomous Ships, 2017. Definitions for autonomous merchant ships, *Norwegian Forum for Autonomous Ships*, SINTEF Ocean AS, Trondheim, Norway.
- Novatel Inc., 2015. *An introduction to GNSS: GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo and other global navigation satellite systems*, Novatel Inc., Calgary, Canada (<https://www.calameo.com/read/00191579602f9b13b088e>).
- Sawada, R. and Hirata, K. 2023. Mapping and localization for autonomous ship using LiDAR SLAM on the sea. *Journal of Marine Science and Technology*, 28, pp.410–421.
- SAE International, 2016. *Surface vehicle recommended practice*, SAE International, Warrendale, USA.
- Seo, D. and Woo, R., 2021. Vehicle localization method for lateral position within lane based on vision and HD map, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, 20(5), pp.186–201.
- Society of Naval Architects of Korea & Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, 2022. Regulations for Korea autonomous boat competition, Document distributed by SNAK, URL: <http://www.snak.or.kr> [Accessed 21 July 2023].
- Society of Naval Architects of Korea & Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, 2023. Contest rules for Korea autonomous boat competition, Document distributed by SNAK, URL: <http://www.snak.or.kr> [Accessed 21 July 2023].
- Utne, I., 2017. Norwegian University of Science and Technology Centre for Autonomous Marine Operations and Systems – Shipping and digitalization, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.



유영준