

Multi-Modal AI 기반 저비용 AUV 수중 위치 추정 기법

김승현, 김정현, 류기훈, 권재균, 송유재*
영남대학교 전자공학과

tktekt0131@naver.com, acts000219@naver.com, rghun1004@gmail.com, jack@yu.ac.kr,
yjsong@yu.ac.kr

Multi-Modal AI-Based Low-cost Underwater Localization Method for AUVs

Seung-hyun Kim, Jung-hyun Kim, Gi-hun Ryu, Jae Kyun Kwon and Yujae Song*
Dept. of Electronic Engineering, Yeungnam Univ.

요 약

수중 환경에서 자율무인잠수정(AUV; Autonomous Underwater Vehicle) 위치 추정은 고가의 DVL(Doppler Velocity Log), USBL 등의 센서를 이용한다. 본 논문은 비교적 저렴한 관성측정장치(IMU)와 수중 음향 통신 과정에서 획득 가능한 거리 정보만을 활용하여 AUV의 대략적인 위치를 추정하는 AI 기반 멀티모달 센싱 방법을 제안한다. 시뮬레이션 기반 실험에서 제안한 방식은 IMU 데이터의 계산만을 이용한 방식 대비 평균 위치 오차를 약 80% 개선하는 성능을 보여준다.

I. 서 론

수중 무인잠수정(AUV)은 해양 탐사, 감시 및 경찰 등 다양한 임무를 수행하고 있다. 그러나 수중 환경에서 GPS를 사용할 수 없고, 음향 채널은 낮은 대역폭과 긴 전파 지연, 높은 비트 오류율을 보여 항법 및 위치 추정이 본질적으로 어렵다[1]. 보편적으로 활용되는 DVL, USBL과 같은 센서는 높은 비용과 전력을 요구하여 경량 AUV의 운용에는 큰 부담이 된다. 본 연구는 비교적 저가인 IMU만을 기본 센서로 사용하며, 선박과 수중 음향 통신 과정에서 얻는 거리(range) 정보를 추가적으로 활용하여 AUV의 대략적 위치를 지속적으로 추정하는 방식을 제안한다. 그림 1은 AUV가 정해진 구역에서 탐사 및 경찰을 수행하며, 선박에서 IMU 시계열 데이터와 음향 통신 과정에서 얻은 거리 정보를 멀티모달 센싱으로 융합하여 위치를 추정하는 시나리오이다.

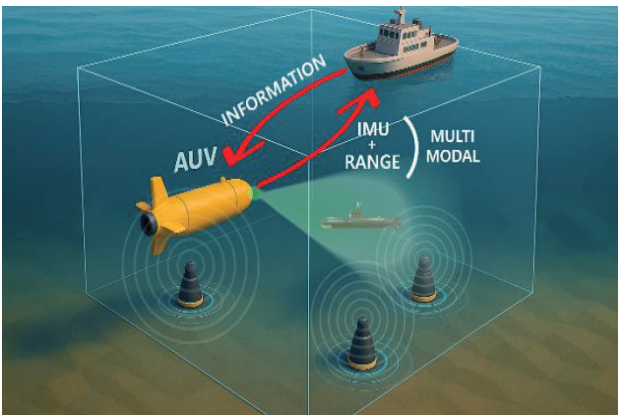


그림 1 경찰 구역 내 AUV 운용 시나리오

II. 본론

본 연구의 목표는 IMU 센서 데이터와 음향 통신 과정에서 얻을 수 있는 거리 정보만으로 AUV의 위치를 안정적으로 추정하는 것이다. IMU 기반 데드레커닝(Dead Reckoning)은 빠르고 간단하지만, 바이어스와 노이즈 축적에 따른 드리프트(drift) 오차가 발생하기 때문에 장시간 운용 시 단독으로 사용하기 어렵다[2]. 따라서 드리프트 오차를 억제하기 위해 Acoustic 정보인 선박과의 거리 정보를 보조 정보로 활용한다.

2.1 AI 모델 구조 및 성능

본 연구는 IMU 시계열과 거리 정보를 결합해 DR의 추정치를 보정하는 잔차 회귀 구조를 채택하였다. IMU 센서의 정보는 10ms 단위로 측정하며 축적하고 2초마다 IMU window와 거리 정보 송신을 가정하였다.

입력으로는 최근 2초 길이의 IMU window와 윈도우 끝 시각의 DR 위치 P_{DR} , 선박과 AUV 사이의 측정 거리 r_{meas} , 선박의 좌표 b 를 사용한다. IMU 시계열 데이터는 표준화 이후 GRU를 통과하여 AUV의 시간적 움직임을 요약한 z_{imu} 로 변환된다. P_{DR} 과 r_{meas} 를 사용하여 DR이 구면 반경에서 얼마나 어긋났는지 알려주는 r_{res} 와 방사방향 단위 벡터 \hat{u} 를 계산하고 보조 MLP를 거쳐 z_{aux} 로 변환된다. 이렇게 얻은 $[z_{imu}; z_{aux}]$ 를 결합하여 MLP_{head} 에 입력하고 DR 오차의 보정치인 $\Delta\hat{P}$ 를 출력한다. 최종적으로 P_{DR} 에 보정치 $\Delta\hat{P}$ 를 더하여 위치를 추정한다.

그림 2 는 AI 모델 구조를 나타낸 블록도이다.

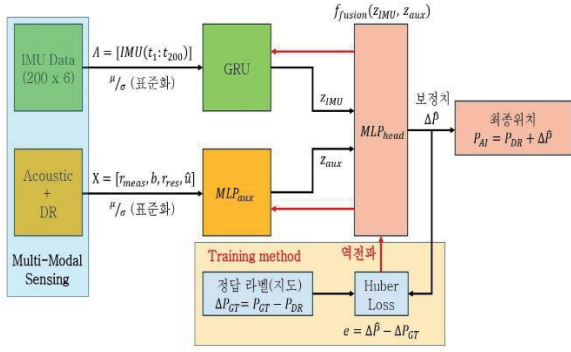


그림 2 저비용 AUV 수중 위치 추정을 위한 제안 Multi-modal AI 프레임워크 블록도

학습 시에는 예측된 보정치와 실제 보정치의 차이를 최소화하기 위해 Huber 손실 함수를 사용하였다. Huber 손실은 식(1)와 같이 작은 오차에 대해서는 L2 처럼 작동하여 정밀한 학습을 유도하고, 큰 오차에 대해서는 L1 처럼 작동하여 조정치를 유지한다.

$$Huber(e) = \begin{cases} \frac{1}{2}e^2, & |e| \leq \delta \text{ (L2 구간)} \\ \delta(|e| - \frac{1}{2}\delta), & |e| > \delta \text{ (L1 구간)} \end{cases} \quad (1)$$

e 는 오차 벡터로 식(2)를 통해 얻을 수 있다. 이 값이 MLP_{head} 로 역전파(Backpropagation)되어 GRU 와 보조 MLP 까지 동시에 최적화한다.

$$e = \Delta \hat{P} - \Delta P_{GT} \quad (2)$$

성능 평가는 기본적인 DR 추정선과 IMU 시계열만으로 학습한 모델, IMU 시계열과 거리 정보를 결합하여 학습한 모델을 비교한다.

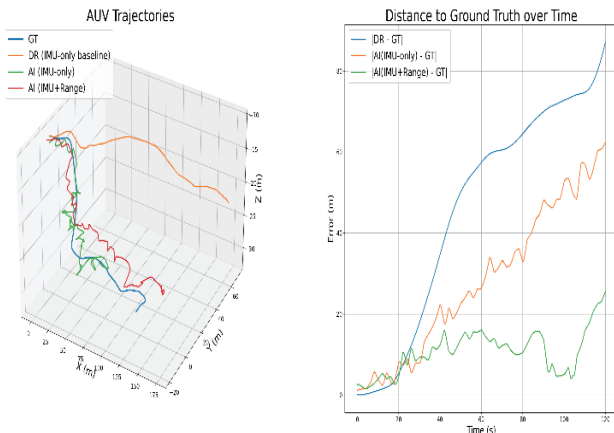


그림 3 Case 에 따른 AUV 궤적 및 위치 추정 오차

그림 3 은 Case 별 추정 궤적과 위치 오차율을 나타낸다. DR 은 시간이 지날수록 위치 오차율이 증가하며 최대 80m 까지 증가한다. IMU 시계열 데이터만 사용한 경우에도 시간이 지날수록 위치 오차율이 최대 60m 까지 증가한다. IMU 데이터와 Acoustic 데이터를 모두 사용한 경우 약 20m 의 위치 오차율을 보여주며 궤적 역시 GT 와 가장 근접하였다. 다만 장시간 운영에서 한계가 있음을 보여준다.

2.2 비콘 활용 시나리오

본 연구에서는 장시간 운영에서 드리프트 오차를 안정적으로 억제하기 위해, 정해진 구역 내에 비콘을 임의의 좌표에 배치하였다고 가정하였다. AUV 가 비콘의 반경 10m 이내로 진입하면 모든 위치 정보를 비콘의 좌표로 재설정(reset)하며 다시 추정을 시작한다.

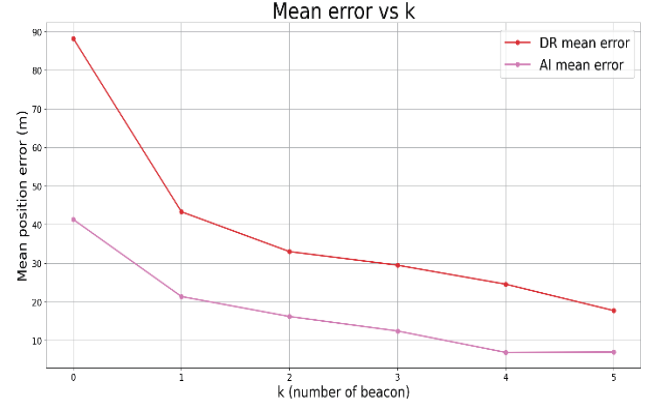


그림 4 비콘 기반 초기화 횟수에 따른 평균 위치 오차

그림 4 에서 x 축 k 는 운용시간 동안 비콘을 만난 횟수, y 축은 평균 위치 오차를 나타내며, 리셋 빈도가 위치 정확도에 미치는 효과를 확인할 수 있다. k 가 0 일 때는 드리프트가 누적되어 오차가 크게 증가하지만, k 가 커질수록 누적 드리프트가 주기적으로 제거되어 평균 오차가 감소한다.

III. 결론

본 논문은 DVL, USBL 과 같은 고비용 센서 대신 비교적 저가인 IMU 와 수중 음향통신으로 얻는 Acoustic 정보인 거리 정보만으로 AUV 의 위치를 추정하는 멀티모달 센싱 알고리즘을 제안하였다. 동일 궤적에서 비교 결과, IMU 와 거리정보로 학습한 결과가 가장 낮은 오차율을 보였으며, DR 과 비교하였을 때 평균 위치 오차가 80% 개선되었다. 또한 비콘 시나리오를 도입하면 장시간 운용 시 드리프트 오차가 주기적으로 제거되며, 비콘을 만나는 횟수가 증가할수록 평균 위치 오차가 감소함을 확인했다. 이를 통해 장기간 운용시에도 감시 및 정찰 임무에서 요구되는 위치 추정이 가능함을 알 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 결과물은 2025 년도 경상북도 지역혁신중심 대학지원체계 (RISE)-(Megaversity 연합대학)의 지원을 받아 수행된 결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] Tan, Hwee-Pink, *et al.* "A survey of techniques and challenges in underwater localization." Ocean Engineering 38.14-15 (2011): 1663-1676.
- [2] Jimenez, Antonio R., *et al.* "A comparison of pedestrian dead-reckoning algorithms using a low-cost MEMS IMU." 2009 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing. IEEE, 2009.