Multi-Modal Sensing 기반 3차원 저비용 적응형 수중 음향 통신 시스템 프로토타입 구현

고원걸, 김형걸, 우용택, 송유재

영남대학교

2201416@yu.ac.kr, rjf031208@yu.ac.kr, yongtaekwoo@yu.ac.kr, yjsong@yu.ac.kr

요 약

본 논문은 음향 통신 기반 수중 무선 음향 통신 시스템의 프로토타입을 구현했으며, 이 시스템은 상대 거리 측정 기능과 상대 속도 측정 기능, 통신 채널 점검 기능이 포함된 음향 모뎀과, 저비용 IMU 센서의 가속도 데이터를 통합하여 AUV의 위치를 추정하는 메커니즘을 개발하였다. IMU 데이터를 통한 수치적인 위치 추정 방식의 오차 문제를 해결하기 위하여, 확장 칼만 필터와, 파티클 필터를 통합한, Hybrid EKF(Extended Kalman Filter)-PF(Particle Filter) 알고리즘을 개발하여 시스템에 적용하였다. 또한, 효율적인 통신을 위해 음향 모뎀에 팬-틸트 모터 시스템을 적용하여, 통신의 신뢰성을 높였다. Hybrid EKF-PF 알고리즘의 성능은 시뮬레이션을 통해 검증하였으며, 전체 통신 시스템의 신뢰성은 수조 실험을 통해 평가하였다.

Ⅰ. 서 론

지구의 생명체 중 80% 이상이 바다에서 살고 있고 이에 대한 조사를 진행하기 위해서 수중 내 3차원 움직임이 가능한 AUV(Autonomous Underwater Vehicle) 및 ROV(Remotely Operated Vehicle)등과 같은 수중 드론의 활용이 증가하고 있다[1].

특히, 수중 드론을 이용한 장거리 수중 탐사를 진행할 때, 탐사 및 제어 데이터를 송수신 위해서는 수중에서 장거리 무선 전 송이 가능한 음향 통식 방식이 채택되어야 한다[2]. 기존 문헌에 따르면 [3], 3차원 모빌리티를 가지는 수중 드론 간 수중 음향 통신을 적용 할 때 통신 성능에 큰 영향을 미치는 요인 중 하나가 음향 모뎀 정렬이다. 즉, 정확한 음향 모뎀 정렬을 통해서 통신의 신뢰도를 높일 수 있다. 정확한 음향 모뎀 정렬을 위해서는 수중 드론의 탐사 시작 시점부터 미션 완수 시점까지 수중 내 정확한 위치 추정이 시간대 별로 진행이 되어야 한다. 다만, 기존의 수중 위치 추정은 DVL[4], USBL[5]같은 고비용 센서가 사용되고 있어 실제적인 활용에 제약이 있다.

따라서 본 논문에서는 수상선-AUV 간 통신 시나리오에서, 저비용 IMU (Inertial Measurement Unit) 센서에 의해서 측정된 AUV의 가속도 데이터와 수중 통신을 위해 활용되는 음향 모뎀으로 측정 가능한 AUV와 수상선 사이의 거리 및 도플러 속도를 활용하는 Multi-Modal Sensing 기반 Hybrid EKF (Extended Kalman Filter)-PF (Particle Filter) 알고리즘을 제안한다. 이에 더하여, 추정된 AUV 수중 위치 정보를 활용하여 적응적으로 수상선-AUV 간 음향 모뎀 정렬이 가능한 수중 통신 시스템 프로토타입을 구현하고 성능 검증 연구를 수행하였다. 제안한 Multi-Modal Sensing 기반의 Hybrid EKF-PF 알고리즘을 통해 수중 위치 추정을 위해 고가의 센서를 활용하지 않더라도, 수상선-AUV 간의 고신뢰 통신이 가능한 점을 실제 대형 수조 테스트를 통해 확인 할 수 있었다.

Ⅱ. 본론

A. Multi-Modal Sensing 기반 Hybrid EKF-PF 알고리즘

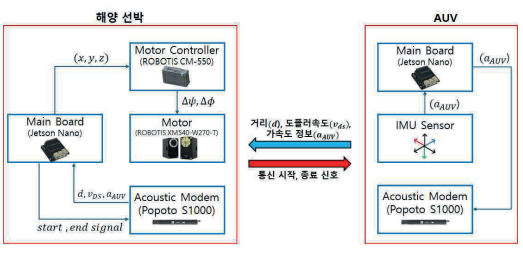


그림 1: 시스템 구조 및 통신 과정

본 논문에서 제시하는 시스템은 그림 1과 같이 크게 수상선, AUV로 이루어져 있다. 먼저 AUV에서는 Nvidia Jetson Nano를 메인보드로 삼아 IMU 센서와 음향 모뎀을 연결시켰다. 이때, AUV의 메인보드에서는 IMU 센서의 AUV 가속도 데이터를 메인보드에서 통합하고 음향 모뎀에서는 지상 선박과 AUV 사이의 거리, 도플러 속도 데이터를 취합한 후 메인보드에서 취합한 데이터와 음향 모뎀이 취합한 데이터를 음향 모뎀을 통해 지상 선박으로 전송한다. 지상 선박에서는 음향 모뎀을 통해 AUV에서 보낸 데이터를 수신하고, 수신한 데이터를 메인 보드(Jetson Nano)에서 취합한다. 메인 보드에서 취합된 데이터는 가속도 데이터를 활용하여 AUV의 좌표를 Hybrid EKF-PF 알고리즘을 통해 계산된다. EKF 필터는 기존의 KF(Kalman Filter)에 비선형성을 강화한 필터이고, PF 필터는 비선형 모델의 확률 분포를 모사한 필터이다. 이에 따라 자유로운 유영이 가능해야 하는 AUV에 있어서는 각 필터가 지상에서의 위치 추정 시스템에 적용되었을 때, 큰 문제가 발생할 가능성이 있다. 이를 해결하기 위해 Hybrid EKF-PF 알고리즘을 제안한다.

먼저 AUV의 상태 벡터를 선정한다. Hybrid EKF-PF 알고리즘에서는 상태 벡터 X_{t-1}를 다음과 같이 정의하였다.

$$X_{t-1} = [x_{t-1}, y_{t-1}, z_{t-1}, v^x_{t-1}, v^y_{t-1}, v^z_{t-1}]^T \quad (1)$$

또 이를 제어하는 제어변수 u_t는 수신한 가속도 정보로 설정한다. 상태 벡터와 제어 변수를 통한 위치 추정 알고리즘은 그림 2와 같이 이루어진다.

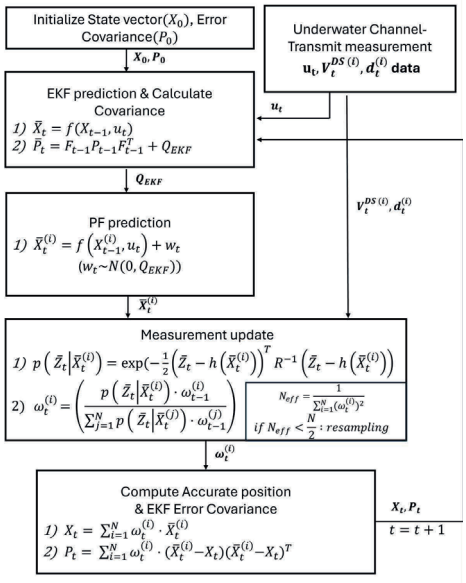
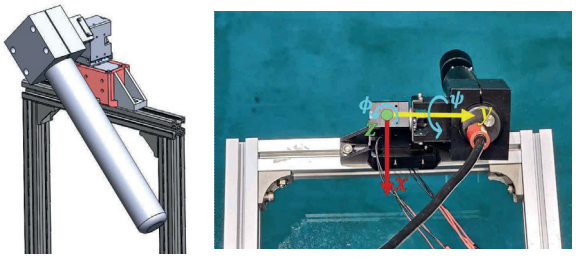


그림 2: Multi-Modal Sensing 기반 Hybrid EKF-PF 알고리즘

B. 알고리즘 기반 모터 정렬 시스템



(a)적응형 음향 모뎀 정렬 시스템 설계
(b)적응형 음향 모뎀 정렬 시스템 구현

그림 3: 팬-틸트 서보모터를 이용한 적응형 음향 모뎀 정렬 시스템

알고리즘에서 산출된 최종 상태벡터 X_t를 토대로, 음향 모뎀 정렬을 하는 과정을 다음과 같은 수식에 의해 이뤄진다.

$$\begin{aligned}\triangle\phi &= \mathrm{atan2}(y_t,x_t)-\mathrm{atan2}(y_{t-1}x_{t-1})\\ \triangle\psi &= \mathrm{atan2}(z_t,\sqrt{x_t^2+y_t^2})-\mathrm{atan2}(z_{t-1},\sqrt{x_{t-1}^2+y_{t-1}^2})\end{aligned} \quad (2)$$

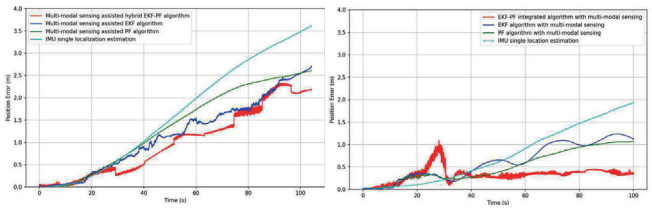
그리고 위와 같이 계산된 각도 변화량에 대해 그림 3에서 보이는 최종

$$\begin{aligned}\phi_t &= \phi_{t-1}+\triangle\phi\\ \psi_t &= \psi_{t-1}+\triangle\psi\end{aligned} \quad (3)$$

각도 계산식은 다음과 같다.

Ⅲ. 실험 결과

A, 시뮬레이션 실험 결과



(a)선형 궤적-시간대별 오차 그래프
(b)비선형 궤적-시간대별 오차 그래프

그림 4: 궤적에 따른 시간대별 오차 그래프

실제 수중 환경에서는 상황에 따른 센서 잡음과 환경적인 변수로 인해서 정확한 가속도 데이터를 도출하는 것이 어렵기 때문에 제안된 시스템에 대한 신뢰성을 높이기 위해서 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 환경의 현실성을 높이기 위해서 가속도 데이터에 가우시안 잡음을 추가하여 시뮬레이션의 AUV의 궤적이 직선형 궤적일 때와 곡선형 궤적일 때로 나누어 진행하였다. 그림 4의 (a)에는 IMU에서 얻은 가속도 데이터를 이중 적분하여 위치를 추정한 IMU 단일 추정 궤적과 Hybrid EKF-PF 알고리즘을 비교한 그림이다. 추정 궤적들은 시간이 흐름에 따라 점진적으로 오차가 증가하는 경향을 보인다. 그 중에서도 IMU 단일 추정 궤적은 오차 증가 폭이 가장 크고 Hybrid EKF-PF 알고리즘은 오차 증가폭이 가장 작다. 그림 4의 (b)도 마찬가지로 IMU 단일 추정 궤적이 오차 증가 폭이 가장 크고 Hybrid EKF-PF 알고리즘이 오차 증가폭이 가장 작다. 그림 4의 그래프들을 통해 알 수 있듯이 Hybrid EKF-PF 알고리즘의 위치 추정이 가장 작은 오차를 가짐을 알 수 있다.

B. 수조 실험

그림 5와 같은 수조 환경에서 Hybrid EKF-PF 알고리즘을 통한 음향 모뎀 정렬과 수동으로 정확한 음향 모뎀 정렬을 실행하였다. 통신 성능에 대한 지표로 SNR(Signal-to-Noise Ratio)로 선정하였고 해당 지표는 실험에서 사용하는 음향 모뎀에서 도출되는 지표이다. 실험을 진행했을 때 그림 6에서 보이듯이 모터의 미정렬시와 알고리즘에 의한 정렬을 비교했을 때 통신의 성능이 월등히 좋아졌음이 보인다. 이는 Hybrid EKF-PF 알고리즘이 실제 환경에서도 유의미하게 작동하는 시스템임을 시사하는 바이다.

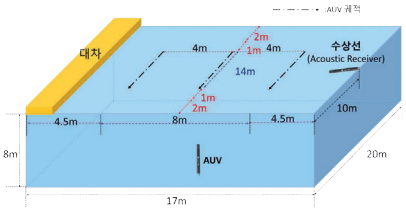
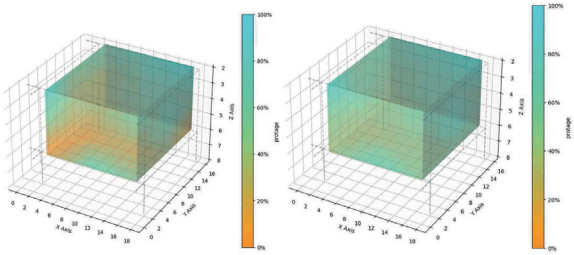


그림 5: 수조 실험 환경



(a) 모터 미정렬시 수조 환경에서 위치별 통신 성능 분포
(b) 모터 정렬시 수조 환경에서 위치별 통신 성능 분포

그림 6 : 정렬 시스템 유무에 다른 위치별 통신 성능 분포 그래프

Ⅳ. 결론

앞서 설명한 것과 같이 본 논문에서는 Multi-Modal Sensing을 기반 3차원 저비용 적응형 수중 음향 통신 시스템의 제안 및 이것을 구현한 Multi-Modal Sensing 기반 적응형 음향 모뎀 정렬 시스템의 개발에 대한 소개를 진행했다. 이 시스템은 음향 모뎀 정렬의 정확성을 향상하기 위해서 Hybrid EKF-PF 알고리즘을 통해서 AUV의 위치를 도출하였다. IMU의 가속도 데이터를 활용하여 추정한 Naive 추정보다 Hybrid EKF-PF 알고리즘을 통한 추정이 오차 폭이 더 작은 것을 확인할 수 있었고 이를 수조 환경에서 실험하였을 때 Hybrid EKF-PF 알고리즘을 통한 정렬이 정확한 수동 정렬과 SNR 지표에서 유의미한 수치의 차이가 없음도 확인하였다. 이에 Multi-Modal Sensing 기반 음향 통신 시스템이 실제 환경에서도 유의미하게 작동하는 시스템을 입증하였다.

참 고 문 헌

[1]이동우, 최국철, 조용진, “AUV의 강화학습 기반 3차원 Dynamic Window Approach 알고리즘 가중치 최적화” 제4회 한국인공지능학술대회 논문집, pp. 160 - 162, 2023년 9월.

[2] Park H., Kim D., Kim J. S., Hahn J. Y., and Park J. S.,“Performance improvement of long-range underwater acoustic communication in deep water using spatiotemporal diversity,” *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, vol. 38, no. 5, pp. 587 - 592, 2019 (https://doi.org/10.7776/ASK.2019.38.5.587)

[3] L. J. C. van Schriek, “Evaluating Effectiveness of Directional Acoustic Modems Integrated onto Autonomous Platforms,” M.S. thesis, Dept. of Applied Physics, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, USA, Jun. 2018.

[4] 유태석, 김문환, 윤선일, 김대중, “강결합 방식의 INS/DVL/RPM 복합항법시스템 설계,” 《한국해양공학회지》, 제33권 제5호, pp. 470 - 478, 2019년 10월. (https://doi.org/10.26748/KSOE.2019.085)

[5] Panmuk Lee, Jinyoung Park, Hyuk Baek, Simoon Kim, Bonghwan Jeon, Hoseong Kim, Pilyeop Lee, “Underwater Navigation of AUVs Using an Uncorrelated USBL Measurement Error Model,” Journal of Ocean Engineering and Technology, vol. 36, no. 5, pp. 340 - 352, October 2022. (https://doi.org/10.26748/KSOE.2022.019)