

자동 링크 정렬을 지원하는 수중 무선 광통신 시스템 프로토타입 구현

박영호, 임효진, 송유재
영남대학교

krik0897@yu.ac.kr, dlagywls918@ynu.ac.kr, yjsong@yu.ac.kr

요약

본 논문은 LD (Laser Diode) 기반 수중 무선 광 통신 시스템 프로토타입을 구현했으며, 이 시스템은 카메라의 객체 인식 기능을 사용하여 수신기의 위치를 파악하여 링크 정렬을 수행하는 메커니즘을 적용했다. 수중 환경의 가시성 문제를 해결하기 위해 수신기에 녹색 LED(Light Emitting Diode)를 설치했다. 또한, NVIDIA Jetson Nano 에서 실시간 운영 체제와 직접 레지스터 접근 방법을 사용하는 타이머 인터럽트 알고리즘을 활용하여 통신 신뢰성을 최적화한다. 이 시스템의 성능은 대형 수조에서의 실험을 통해 평가하였다.

I. 서론

지구 표면의 71%를 차지하며 다양한 생태계를 보유한 해양에서, 수중 무선 통신 시스템은 실시간 데이터 전송, 수중 장비의 제어 및 모니터링을 가능하게 하는 필수 도구이며, 중요한 환경 데이터 수집을 가능하게 한다. 또한 해양학, 해양생물학, 기후 연구, 지속 가능한 자원 관리 분야의 발전에 크게 기여하며, 우리가 지구 생태계에서 바다가 차지하는 중요한 역할을 이해하는 데 도움을 준다[1]. 특히 무선 주파수를 사용하는 RF 통신이나 음향을 사용하는 음향 통신과 달리 수중 무선 광 통신은 빠른 데이터 전송 속도, 높은 대역폭, 최소한의 지연 시간으로 인해 주목을 받았다[2]. 하지만 위의 장점에도 불구하고 짧은 전송 범위[3], 링크 정렬[4], 송수신기의 전력 관리[5]와 같은 제한 사항을 극복하기 위해 많은 연구를 진행하고 있다. 본 논문에서는 수중에서의 링크 정렬 한계점을 극복하기 위해 송신기와 수신기 사이의 링크를 정렬할 수 있는 링크 정렬 메커니즘을 지원하는 수중 무선 광 통신 시스템의 프로토타입을 구현하였다.

II. 본론

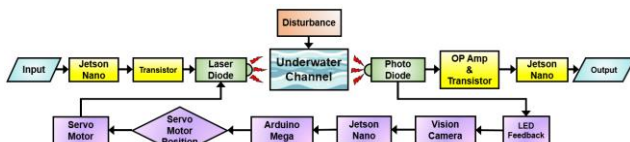


그림 1: 자동 링크 정렬을 지원하는 수중 무선 광 통신 시스템의 블록 다이어그램

본 논문에서 제시하는 시스템은 크게 송신부, 수신부, 링크 정렬을 위한 서보 모터 제어부로 이루어져 있다. 먼저, 송신부는 데이터 송신을 위한 LD(Laser Diode)와 LD 를 제어하기 위한 Jetson Nano 와 트랜지스터를 사용하였다. 수신부는 데이터 수신을 위한 PD(Photo Diode)와 입력 받은 데이터를 이진 데이터로 변환하기 위한 OP-Amp(Operational Amplifier)와 트랜지스터로 구성하였다. 서보 모터 제어부는 송신부에 설치된 카메라가 객체 감지를 이용해 수신부에 설치된 녹색 LED 를 감지하여 해당 위치에 맞게 LD 에 장착된 서보 모터를 구동하도록 구성하였다.

이때, 송신부와 수신부 사이 통신은 타이머 인터럽트 방식으로 진행하였다. 타이머 인터럽트 방식 사용하여

직렬 통신으로 구성하였고 각 bit 사이 간격을 100us 로 설정하여 10kbps 의 통신 속도로 구성하였다.



그림 2: 자동 링크 정렬을 지원하는 수중 무선 광 통신 시스템의 전체 구성도

또한 각 bit 사이 간격인 100us 주기로 타이머 인터럽트를 할 때 발생하는 오차를 줄이기 위해 RTOS(Real Time Operating System) 적용 및 DRA(Direct Register Access) 방식을 사용하였다. 또한, 기존의 타이머 인터럽트 방식은 추가적인 동기화 데이터 없이 CPU 내부 클럭을 이용하여 통신하는 방식으로 비동기 통신 방식으로 분류할 수 있다. 하지만 이는 타이머 인터럽트의 시간 구간 오차가 발생함에 따라 BER(Bit Error Ratio)에 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서 시간 구간 오차가 발생하더라도 BER 에 큰 영향을 주지 않게 하도록 시간 구간의 중간 지점에서 샘플링을 하는 방식을 고안하였다. 이 방식은 실제 데이터 통신 전 0xAA 반복 데이터를 송수신하여 수신부가 데이터 시간 구간의 중간 지점에서 샘플링 하도록 동기화하는 동기 통신 방식을 고안하였다.

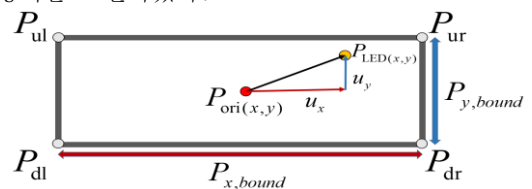


그림 3: 자동 링크 정렬 메커니즘의 위치-각도 변환 방식

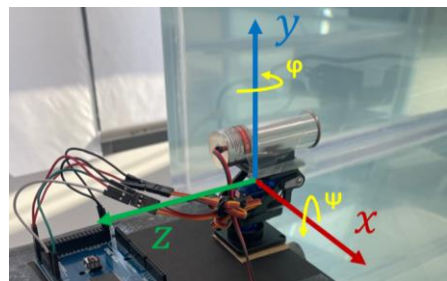


그림 4: 수중 무선 광 통신 시스템의 절대 좌표계

다음으로 자동 링크 정렬 메커니즘은 카메라, 2 축 서보모터 팬-틸트 및 LED 를 사용하여 구성하였다. 송신부에는 객체 감지를 위한 카메라가 설치되어 이를 통해 수신부의 위치를 감지한다. 하지만 수중 환경에서는 빛의 흡수와 산란, 탁도 등으로 인해 카메라의 가시성이 크게 제한된다. 따라서 수신부에 녹색 LED 를 설치하여 송신부의 카메라가 보다 쉽게 수신부의 위치를 감지할 수 있도록 하였다. 그림 3 과 같이 송신부의 카메라가 수신부의 녹색 LED 를 감지하면, 위치는 각도 데이터로 변환하여 서보 모터를 구동한다. 본 논문에서 제시한 시스템에서는 그림 4 의 좌표계를 기준으로 z 축 상 송신부와 수신부 간 거리가 고정 및 수신부가 xy 평면상에서 무작위로 움직인다고 가정한다.

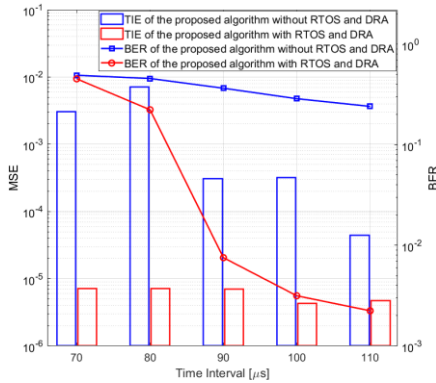


그림 5: 각 bit 사이 시간 간격 별 제안된 알고리즘의 적용 여부에 따른 시간 구간의 MSE(Mean Square Error) 및 BER

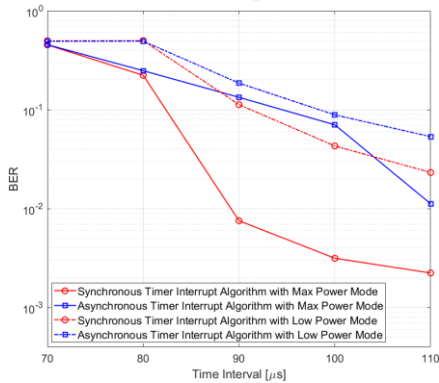


그림 6: 각 bit 사이 시간 간격 별 동기화 데이터의 추가 여부 및 전력 소모량에 따른 BER

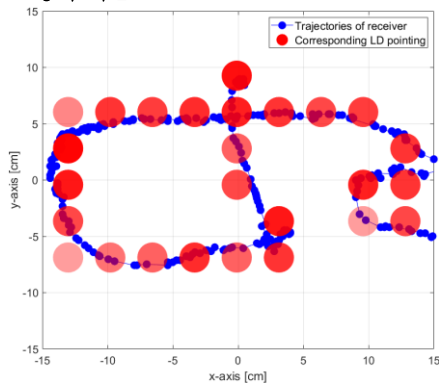


그림 7: 수신부의 이동 경로 및 이에 상응하는 LD pointing의 위치

그림 5 는 본 논문에서 제안된 수중 무선 광 통신 시스템의 성능을 시간 간격 오차와 BER 측면에서 보여준다. 그림 5 에서, 시간 간격 값에 관계없이 본 논문에서 제안된 방식을 적용한 시스템이 현저히 낮은 MSE 와 BER 을 보여준다.

그림 6 은 본 논문에서 제안한 동기화 여부 및 전력 소모량에 따른 BER 측면의 시스템 성능을 보여준다. 그림 6 에서, 시간 간격 값과 전력 소모량에 상관없이 동기 통신 방식이 더 낮은 BER 을 보여준다. 따라서 수중 전력 소모 문제로 인해 저전력 모드를 사용하더라도 본 논문에서 제안한 동기화 방식을 적용한다면 시스템의 성능을 높일 수 있음을 보여준다. 또한, 최대 전력 모드를 사용하면 높은 속도의 클럭을 가용할 수 있어 대체로 저전력 모드를 사용하여 통신할 때보다 더 낮은 BER 을 보인다. 이는 하드웨어의 성능이 높아 질수록 본 논문에서 제안한 시스템의 성능이 높아짐을 보인다.

그림 7 은 수신부의 이동 경로에 따라 이에 상응하는 송신부의 이동 경로를 보여준다. 본 논문에서 제안한 시스템에서 사용한 서보 모터의 한계로 인해 최소 각도 단위가 1 도이다. 이는 최대 0.6cm 의 오차를 불러올 수 있다. 실험 결과, 그림 7 에서 평균적으로 0.2820cm 의 오차를 보인다. 결과적으로 총 286 번의 이동 중 93 번의 링크 정렬 오차가 발생하였다.

III. 결론 및 개선 방향

본 논문에서 링크 정렬 메커니즘을 특징으로 하는 수중 무선 광 통신 시스템의 프로토타입을 구현하고, 실험을 통해 송신기와 수신기 사이의 링크를 원활하게 정렬하는 방식을 보였다. 제안된 시스템의 메인 보드로 사용된 Jetson Nano Developer Kit 는 리눅스 커널 형태의 소프트웨어 기능만을 제공하므로 하드 실시간 기능을 제공하는 메인 보드를 사용하면 통신 성능을 극대화시킬 수 있음을 보여준다. 또한, 높은 해상도를 가진 모터의 사용은 링크 정렬의 정확도를 향상시킬 수 있는 가능성을 제시한다.

참고 문헌

- [1] M. Jouhari, K. Ibrahimi, H. Tembine, J. Ben-Othman, Underwater wireless sensor networks: A survey on enabling technologies, localization protocols, and internet of underwater things, *IEEE Access* 7 (2019) 96879- 96899. doi:10.1109/ACCESS.2019.2928876.
- [2] M. F. Ali, D. N. K. Jayakody, Y. Li, Recent trends in underwater visible light communication (uvlc) systems, *IEEE Access* 10 (2022) 22169- 22225. doi:10.1109/ACCESS.2022.3150093.
- [3] A. Celik, N. Saeed, B. Shihada, T. Y. Al-Naffouri, M.-S. Alouini, End-to-end performance analysis of underwater optical wireless relaying and routing techniques under location uncertainty, *IEEE Transactions on Wireless Communications* 19 (2) (2020) 1167- 1181. doi:10.1109/TWC.2019.2951416.
- [4] H. Shin, S. M. Kim, Y. Song, Learning-aided joint beam divergence angle and power optimization for seamless and energy efficient underwater optical communication, *IEEE Internet of Things Journal* (2023) 1-1doi:10.1109/JIOT.2023.3304655.
- [5] S. A. Nezamalhosseni, L. R. Chen, Optimal power allocation for mimo underwater wireless optical communication systems using channel state information at the transmitter, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 46 (1) (2021) 319- 325. doi:10.1109/JOE.2019.2963551.