

AUV 운용 최적화를 위한 경량 디지털 트윈 프레임워크 제안

Proposal of a Lightweight Digital Twin Framework for AUV Operational Optimization

현 철^{*1)} . 김동건¹⁾ . 김현승¹⁾ . 정동민¹⁾

Chul Hyun^{*1)} . Donggeon Kim¹⁾ . Hyunseung Kim¹⁾ . Dongmin Jeong¹⁾

[초 록]

자율 무인 잠수정(AUV, Autonomous Underwater Vehicle)은 해양 감시, 정찰, 기뢰 탐색, 해저 조사 등 다양한 군사 및 민간 응용 분야에서 활용되고 있다. 그러나 AUV 운용에는 실시간 운용 최적화, 제한적인 수중 통신 환경, 유지보수 및 이상 감지의 어려움과 같은 기술적 한계가 존재한다. 기존 모델링 및 시뮬레이션(M&S) 방식은 AUV의 성능 분석에 유용하지만, 실시간 운용 최적화에는 한계가 있다. 디지털 트윈(Digital Twin, DT)은 실시간 데이터를 반영하여 가상 모델을 지속적으로 업데이트하고, 운용 최적화를 수행할 수 있는 기술로 주목받고 있다. 본 논문에서는 AUV 운용을 위한 DT 적용 방안을 제안하고, 기존 M&S 방식과 비교하여 DT의 장점을 분석한다. 특히, 제한적인 수중 통신 및 연산 자원을 고려하여 Lightweight Digital Twin 개념을 도입하고, 실시간 최적화 및 유지보수 예측을 수행할 수 있는 방안을 제시한다.

[ABSTRACT]

Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) are widely utilized in military and civilian applications such as maritime surveillance, reconnaissance, mine detection, and seabed exploration. However, AUV operations face several technical challenges, including real-time optimization, limited underwater communication, and difficulties in maintenance and fault detection. Traditional Modeling and Simulation (M&S) approaches are useful for performance analysis but have limitations in real-time operational optimization. Digital Twin (DT) technology has gained attention as it enables continuous updates of virtual models based on real-time data, allowing for operational optimization. This paper proposes a DT-based approach for AUV operations and analyzes its advantages compared to conventional M&S methods. Specifically, a Lightweight Digital Twin concept is introduced, considering the constraints of underwater communication and computational resources, to enable real-time optimization and predictive maintenance.

Key Words : Autonomous Underwater Vehicle(자율 무인 잠수정), Digital Twin(디지털 트윈), Real-time Operational Optimization(실시간 운용 최적화), Predictive Maintenance(예측 유지보수), Lightweight Digital Twin(경량 디지털 트윈)

1. 서론

자율 무인 잠수정(AUV, Autonomous Underwater Vehicle)은

해양 감시, 정찰, 기뢰 탐색, 해저 조사 등 다양한 군사 및 민간 응용 분야에서 활발히 활용되고 있다. 특히, 자율운항 기술과 센서 융합의 발전은 AUV의 임무 범위와 운용 효율성을 크게 향상시키며, 각국은 다양한 목적의 AUV 개발을 가속화하고 있다. 그중에서도 군사 및 전략적 활용 가능성이 높은 모델들이 주목받고 있으며, 장거리 작전 수행과 고정밀 탐지 능력의 확보가 중요한 요소로 자리 잡고 있다[1-3].

AUV 기술의 발전은 보다 정밀한 탐색, 장시간 운용, 자율적인 의사결정 능력을 갖춘 기체 개발로 이어지고 있다.

1) LIG넥스원 해양연구소.2팀

(Maritime R&D Center, LIG Nex1, Korea)

* Corresponding author, E-mail: chul.hyun@gmail.com

Copyright © The Korean Institute of Defense Technology

Received : March 11, 2025 Revised : March 30, 2025

Accepted : March 30, 2025

가장 먼저 등장한 Boeing사의 Echo Voyager는 초대형 AUV(XLUUV)로, 하이브리드 추진 시스템을 통해 최대 6개월 간 지속 작전이 가능하며, 원거리 감시 및 해양 연구 등의 장기 임무 수행을 목표로 개발되었다. 이후 Kongsberg사의 HUGIN Superior가 등장하며, 해양 조사, 기뢰 제거, 해저 인프라 점검을 위한 대형 AUV로서, 최대 70시간 작전 지속성과 고정밀 항법 시스템을 제공하는 성능을 갖추었다.



(a) Echo Voyager



(b) HUGIN Superior



(c) Osprey AUV



(d) LIG Nex1 AUV

그림 1. 세계 각국의 군·민수용 AUV 사례

Fig. 1. Examples of Military and Civilian AUVs Worldwide

그 밖에 Teledyne Marine사의 Osprey AUV는 중형 다목적 AUV로 최대 2000m의 수심에서 운용 가능하며, 고속 자율운항 및 장애물 회피 기능을 탑재하여 해저 탐사 및 정보, 감시, 정찰(Intelligence, Surveillance, Reconnaissance, ISR) 작전에 최적화된 모델로 설계되었다. LIG Nex1의 수중자율기뢰탐색체는 소형 AUV로 기뢰 탐색, 해저 지형 조사, 항만 감시 임무에 활용되며, 20시간 이상의 항속 능력과 정밀 탐지 기능을 갖춘 것으로 알려져 있다.

이처럼 AUV 기술이 발전함에 따라 다양한 임무 수행이 가능해졌지만, 여전히 해결해야 할 기술적 과제가 남아 있다. AUV 운용은 환경 변수(해류, 조류, 온도 변화)로 인해 예정된 경로를 유지하는 것이 어렵고, 제한된 에너지를 효율적으로 활용해야 하는 과제가 존재한다. 또한, AUV는 GPS 및 RF 기반 통신이 불가능하여, 음파(Acoustic) 기반 통신을 사용해야 하지만, 이는 낮은 전송 속도와 높은 지연 문제로 인해 실시간 데이터 송수신을 어렵게 만든다[4,5].

기존 모델링 및 시뮬레이션(M&S) 방식은 AUV의 운용을 사전 정의된 환경에서 분석하는 데 유용하지만, 실시간 운용 최적화에는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해, 최근 디지털 트윈(Digital Twin, DT) 기술이 AUV 운용 최적화를 위한 핵심 기술로 주목받고 있다[6-9]. 디지털 트윈은 실시간 데이터를 반영하여 가상 모델을 지속적으로 업데이트하고, 이를 통해 실시간 상태 모니터링, 유지보수 예측, 자율운항 최적화, 항법 보완 등을 수행할 수 있다. 따라서, AUV의 신뢰성과 운용 효율성을 극대화하는 데 중요한 역할을 할 수 있다.

본 논문에서는 AUV 운용을 위한 DT 적용 방안을 제안하고, 기존 M&S 방식과 비교하여 DT의 장점을 분석한다. 특히, AUV의 제한적인 수중 통신 및 연산 자원을 고려하여 Lightweight Digital Twin 개념을 도입하고, 실시간 최적화 및 유지보수 예측을 수행할 수 있는 방안을 제시한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존 연구를 정리하고, AUV 운용에서 디지털 트윈이 적용될 수 있는 기술적 배경을 설명한다. 3장에서는 AUV의 디지털 트윈 적용 프레임워크를 제안하고, 기존 M&S 방식과의 차이점을 비교한다. 4장에서는 AUV의 실시간 운용 최적화 및 항법 보완과 관련된 구체적인 응용 사례를 논의한다. 마지막으로, 5장에서는 연구의 결론을 제시하고 향후 연구 방향을 제안한다.

2. 기존 연구 및 기술적 배경

2.1 AUV 운용의 기술적 한계

AUV는 해양 환경에서 운용되며, 다양한 기술적 문제에 직면한다. 해류 및 조류 변화로 인해 계획된 경로를 유지하는 것이 어렵고, 에너지를 효율적으로 사용하기 위한 최적의 경로 결정이 필수적이다. 또한, 수중 환경에서는 GPS와 RF 기반 통신이 불가능하여, 낮은 대역폭과 높은 지연을 가지는 음파(Acoustic) 통신에 의존해야 한다. 이로 인해 실시간 데이터 공유와 원격 제어가 제한된다. 항법 정확도 유지 역시 중

요한 과제로, 관성항법장치(Inertial Navigation System, INS)와 도플러 속도 로그(Doppler Velocity Log, DVL) 기반 항법 시스템을 사용하지만, 장기 운용 시 오차가 누적될 가능성이 있다. 유지보수 또한 필수적인 요소이며, AUV의 지속적인 운용을 위해 실시간 상태 모니터링과 예측 유지보수가 필요하다.

2.2 기존 연구 및 모델링 & 시뮬레이션(M&S) 방식의 한계
 기존 연구에서는 M&S 기법을 활용하여 AUV의 성능 분석과 운용 최적화를 수행해 왔다. 동역학 모델링, 경로 최적화 시뮬레이션, 항법 시뮬레이션이 대표적인 방법으로 사용되었다. 하지만, 이러한 방식은 사전 정의된 환경에서 수행되기 때문에 실제 운용 중 발생하는 변수에 실시간으로 대응하는데 한계가 있다. 특히, 기존 최적화 기법은 미리 계산된 경로를 따르는 방식이기 때문에, 해류 변화나 센서 오류가 발생할 경우 즉각적인 대응이 어렵다.

이를 해결하기 위해 DT가 주목받고 있으며, 기존 M&S 방식과 달리 실시간 데이터를 반영하여 가상 모델을 지속적으로 업데이트하는 방식으로 운용 최적화를 수행할 수 있다. DT는 유지보수 예측 및 장기적 운용 효율성 개선에도 기여할 수 있으며, 본 연구에서는 이러한 기존 연구의 한계를 보완하여 AUV 운용을 위한 DT 기반 프레임워크를 제안한다.

2.3 디지털 트윈 구현 수준 및 소요 기술 요소

디지털 트윈은 산업 전반에서 적용이 확대되고 있으며, 수중 체계에 대한 연구도 점차 활발해지고 있다. 해외에서는 Boeing, Kongsberg, Saab 등 선도 기업들이 AUV나 UUV(Unmanned Underwater Vehicle) 개발에 DT 기반 설계와 검증 절차를 일부 도입하고 있으며, 최근에는 미국 DARPA의 DELTA 프로그램을 통해 실시간 수중 DT 응용 가능성을 타진하는 시도도 이루어지고 있다.

국내의 경우 디지털 트윈 개념은 대부분 제조업과 스마트팩토리 분야에서 먼저 적용되고 있으며, 수중체계에 특화된 실시간 적용 사례는 매우 드물다. LIG Nex1 등 일부 방산체계 개발 과정에서 유사 개념이 초기 설계 시뮬레이션에 제한적으로 반영된 사례가 있으나, 실시간 DT 적용은 아직 연구 초기 단계다.

디지털 트윈 구현을 위해 요구되는 기술 요소는 다음과 같이 요약할 수 있다:

- 정확한 물리 모델링 및 동역학 기반 해석: 시스템의 운동 특성과 환경 반응을 재현할 수 있어야 함
- 센서 융합 및 실시간 데이터 수집 기술: 다양한 onboard 센서(INS, DVL, 환경 센서 등)를 통해 데이터를 안정적으로 수집하고 정합해야 함
- 모델 업데이트 및 추론 엔진: 머신러닝 또는 상태 추정 필터(Kalman Filter 등)를 활용한 상태 예측 및 보정
- 온보드 연산 및 경량화 기술: 통신 제한 환경에서 실시간 분석을 수행할 수 있는 경량화된 onboard 처리 구조
- 가상-물리 피드백 연계 인터페이스: 시스템 행동에 영향을 주는 시뮬레이션 결과를 실제 시스템 제어에 반영하는 연계

기술

이러한 요소들이 통합되어야만 실시간 대응 능력을 갖춘 AUV용 디지털 트윈 체계를 실현할 수 있을 것이다.

3. AUV 운용을 위한 디지털 트윈 적용 프레임워크

3.1 디지털 트윈 기반 AUV 운용의 개념적 접근

디지털 트윈은 기존의 모델링 및 시뮬레이션 방식과 달리, 실시간 데이터를 반영하여 시스템의 상태를 지속적으로 업데이트하고 최적화할 수 있는 가상 모델을 의미한다. AUV 운용에서 디지털 트윈을 효과적으로 활용하기 위해서는 AUV의 동작을 가상 공간에서 재현하고, 센서 데이터를 활용하여 실시간 분석과 최적화를 수행할 수 있도록 설계해야 한다.

AUV에서 디지털 트윈을 적용하기 위해 고려해야 할 핵심 요소는 다음과 같다.

- 실시간 데이터 수집 및 반영: AUV가 운용 중 획득하는 센서 데이터를 지속적으로 반영하여 가상 모델이 항상 최신 상태를 유지해야 한다.
- 가상 모델의 동적 업데이트: 단순한 시뮬레이션이 아니라, 실제 AUV의 동작과 환경 변화를 반영하여 가상 모델을 실시간으로 업데이트해야 한다.
- 운용 최적화 및 예측 기능: 디지털 트윈은 단순한 모니터링을 넘어, 수집된 데이터를 분석하여 최적의 운용 전략을 실시간 제시하고, 예상되는 문제를 사전에 감지하여 대응해야 한다.
- 수중 환경에서의 제한적인 통신 및 연산 자원 고려: AUV는 일반적으로 GPS 및 RF 기반 통신을 사용할 수 없는 환경에서 운용되므로, 데이터 전송이 제한적이며, 온보드(Onboard)에서 실행 가능한 경량 디지털 트윈(Lightweight Digital Twin) 방식이 필요하다.

3.2 AUV 운용을 위한 디지털 트윈 프레임워크 설계

AUV에서 디지털 트윈을 효과적으로 적용하기 위해, 센서 데이터 수집, 가상 모델 업데이트, 실시간 운용 최적화, 유지보수 예측 등의 기능을 포함하는 프레임워크를 구축해야 한다. 본 연구에서는 클라우드 연동을 최소화하고, AUV 내부에서 실행 가능한 Lightweight Digital Twin 개념을 적용하는 방식을 제안한다. 이를 통해 제한적인 수중 통신 환경에서도 일정 수준의 자율성을 유지하면서, 필요 시 오프보드 분석 결과를 반영할 수 있는 구조를 구축하는 것을 목표로 한다.

이러한 차이를 보다 명확히 하기 위하여 기존 M&S 방식과 제안된 DT 기반 방식 간의 구조적 차이를 표.1과 같이 정리하였다.

표 1. 기존 M&S 방식과 제안된 DT 기반 프레임워크 비교
 Table 1. Comparison between Conventional M&S Approach and the Proposed DT-Based Framework

항목	기존 M&S 방식	제안된 DT 기반 방식
실시간성	사전 정의된 모델 기반	센서 기반 실시간 데이터 반영
운용 유연성	고정 경로 기반 운용	실시간 환경 변화 반영 경로 재계획 가능
유지보수	정기 점검 방식	이상 탐지 기반 예측 유지보수 수행
통신/연산 환경	오프라인 중심 시뮬레이션	제한된 통신과 온보드 기반 경량 연산 구조 적용

표 1과 같은 비교는 디지털 트윈 기반 프레임워크가 기존 방식보다 유연성과 신뢰성 측면에서 우수할 수 있음을 개념적으로 설명할 수 있다.



그림 2. AUV 운용을 위한 디지털 트윈 프레임워크 개념도
Fig. 2. Conceptual Framework of Digital Twin for AUV Operations

그림 2는 본 논문에서 AUV 운용을 위해 제안하는 디지털 트윈 적용 방안을 개념적으로 도식화한 것이다. 이 프레임워크는 크게 온보드 DT(Onboard Digital Twin)와 오프보드 DT(Offboard Digital Twin)로 구성되며, AUV 시스템과의 피드백 루프를 통해 실시간으로 운용 최적화를 수행할 수 있도록 한다. 온보드 DT는 실시간 센서 데이터를 분석하여 즉각적인 의사결정을 수행하는 기능을 담당하며, 필요 시 오프보드 DT의 분석 결과를 반영하여 운용 최적화를 지원하는 방식으로 활용될 수 있다.

AUV에서 디지털 트윈을 구성하는 주요 요소는 다음과 같다.

3.2.1 센서 데이터 수집 및 실시간 반영

AUV의 디지털 트윈을 운용하기 위해서는 정확한 센서 데이터 수집 및 실시간 반영이 필수적이다. 주요 데이터 소스는 다음과 같다.

- INS(관성항법장치): 가속도, 각속도를 측정하여 AUV의 위

치 및 자세를 계산한다.

- DVL(도플러 속도 로그): 해저 기준 속도를 측정하여 INS의 누적 오차를 보정한다.
- 수심계 및 환경 센서: 해양 환경(수온, 염분, 해류 등) 데이터를 제공한다.
- 추진 및 조향 시스템 데이터: AUV의 모터 출력, 배터리 상태, 조향각 등을 측정하여 운용 최적화에 활용한다.

AUV 내부에서 이 데이터를 수집하고, DT 시스템이 이를 분석하여 실시간으로 AUV의 상태를 평가하고, 필요할 경우 보정값을 제공할 수 있어야 한다.

3.2.2 가상 모델 동적 업데이트 및 최적화

디지털 트윈은 기존 M&S 방식과 달리, 실제 운용 데이터를 반영하여 가상 모델을 지속적으로 업데이트하는 특징을 가진다. 이를 통해 AUV의 예상 동작과 실제 동작 간의 차이를 분석하고, 실시간으로 최적의 운용 전략을 제시할 수 있다.

- AUV의 운동 모델(Motion Model) 을 실시간 데이터로 업데이트하여, 예상되는 움직임과 실제 동작 간의 차이를 분석한다.
- 환경 데이터를 반영하여 해류 변화에 따른 영향을 실시간으로 예측할 수 있다.
- 센서 신뢰도를 평가하고, 필요할 경우 필터링 알고리즘을 조정하여 항법 정확도를 유지할 수 있다.

3.2.3 실시간 운용 최적화 및 경로 재계획

AUV 운용 중 발생하는 예상치 못한 환경 변화에 대응하기 위해, 디지털 트윈은 실시간 데이터를 활용하여 최적의 운용 경로를 지속적으로 수정할 수 있어야 한다.

- 온보드 DT는 AUV의 추진기 출력 및 배터리 상태를 고려하여 최적의 에너지 효율을 유지하는 역할을 수행할 수 있다.
- 기존 M&S 방식은 사전에 계산된 최적화 경로를 따르지만, DT 방식은 실시간 데이터 분석을 통해 운용 중 최적의 전략을 지속적으로 업데이트할 수 있다.

3.2.4 유지보수 예측 및 이상 감지

AUV는 장기간 운용될수록 배터리 성능 저하, 추진기 출력 감소, 센서 오류 등 다양한 유지보수 이슈가 발생할 수 있다. 디지털 트윈을 활용하면 다음과 같은 이점을 기대할 수 있다.

- 모터, 배터리, 센서의 이상 감지를 실시간으로 수행할 수 있다.
- 특정 부품의 성능 저하가 감지되면, 운용 전략을 조정하여 임무 수행 중에도 AUV가 정상적으로 동작할 수 있도록 지원할 수 있다.

- 기존 방식은 정기 점검을 통해 유지보수를 수행하지만, DT를 적용하면 운용 중 실시간 유지보수 최적화가 가능하다.

4. 디지털 트윈을 활용한 AUV 운용 최적화

디지털 트윈(DT)은 AUV 운용의 여러 측면에서 혁신적인 최적화를 가능케 한다. 기존 M&S 방식이 사전 정의된 조건에서의 최적화에 머물렀다면, DT는 운용 중 수집되는 실시간 데이터를 바탕으로 가상 모델을 지속적으로 조정함으로써, 운용 중 발생하는 상황 변화에 즉각 대응하고 최적 의사결정을 지원한다.

특히 AUV 운용에서 DT가 기여할 수 있는 영역으로 실시간 상태 모니터링 및 유지보수 예측, 자율운항 최적화 및 환경 적응, 항법 성능 보완의 세 가지를 들 수 있다. 이하에서는 각 항목별로 DT 활용 방안을 상세히 논의한다.

4.1 실시간 상태 모니터링 및 유지보수 예측

AUV의 상태 모니터링은 임무 신뢰성 확보를 위해 필수적이다. DT를 활용하면 AUV의 다양한 센서 출력을 실시간으로 분석하여, 사람이 감지하기 어려운 미묘한 이상 징후도 조기에 발견할 수 있다. 예를 들어 추진기 전류 소비 패턴을 실시간으로 추적하다가, 통상적인 범위를 벗어나는 진동이나 부하 증가 징후를 포착하면 이를 즉시 경고하여 운용자가 대응하게 하거나, DT 스스로 추진기 출력 제한 등 예방조치를 취하도록 할 수 있다.

또한 DT는 예측 유지보수(Predictive Maintenance)의 구현을 가능하게 한다. 과거 임무 데이터와 현재 추세를 바탕으로 특정 부품의 남은 수명을 예측하거나, 고장 발생 확률을 계산하여 일정 임계치를 넘으면 사전에 부품 교체나 점검을 권고할 수 있다. 이를 위해 DT는 머신러닝이나 통계 모델을 활용하여 정상 동작 패턴 대비 이상 패턴을 학습해두고, 실시간 데이터를 지속 비교한다. 예를 들어 배터리의 충전 전 거동 데이터를 추적하여 용량 저하 추세를 모델링하고, 임무 중 해당 모델에 현 상태를 대입하여 “현재 추세라면 N회 임무 후 교체 필요”와 같은 인사이트를 제공할 수 있다. 이는 정해진 주기마다 부품을 교체하는 전통 방식보다 유연하고 경제적인 유지보수를 가능케 해준다.

더 나아가, DT 기반 모니터링은 안전성 향상에도 기여한다. 임무 중 치명적 고장이 예측되는 경우 AUV에게 즉각 임무 중단 및 회수를 지시함으로써 AUV를 분석하는 등의 최악의 사태를 막을 수 있다. DT 운용을 통해 운용자는 지상국에서 AUV의 가상 복제본을 활용하여 제한적이거나 상태 변화를 추적할 수 있으며, 항후 수중 통신 기술이 발전할 경우보다 향상된 실시간 투명성을 확보할 가능성도 존재한다.

그림 3은 디지털 트윈 기반 실시간 상태 모니터링 및 유지보수 예측의 기본 개념 흐름을 시각화한 것이다. AUV에서 센서 데이터를 수집한 후, 이상 징후를 탐지하고, 고장 가능성을 분석하여 예측 유지보수 판단에 이르는 일련의 과정을 나타내고 있다.

다만, 현재 수중 환경의 특성을 고려할 때, 실시간 모니터링보다는 온보드 DT를 중심으로 한 자율적 상태 분석 및 필

수 데이터의 정제 전송이 보다 현실적인 접근법이 될 것이다. 이러한 온보드 DT 중심의 자율 분석 및 예측 기능은 AUV 운용의 신뢰도를 높이고, 비가시적인 수중 환경에서 발생할 수 있는 돌발적인 운영 리스크를 사전에 감지하고 대응할 수 있도록 지원할 것으로 기대된다.



그림 3. 실시간 상태 모니터링 및 유지보수 예측 흐름도
Fig. 3. Flowchart for Real-time Monitoring and Predictive Maintenance

DT를 활용한 실시간 모니터링 및 유지보수 예측은 고장을 사전에 막고, 가동시간(Uptime)을 최대화하며, 불필요한 정비를 줄여 유지비용을 절감하는 효과를 제공한다. 이는 군용 AUV뿐 아니라 다양한 국방 무인체계에 적용 시 전력 가용성 향상에 크게 기여할 수 있는 분야이다.

4.2 자율운항 최적화 및 환경 적응성 강화

AUV가 자율적으로 임무를 완수하려면, 주어진 목표를 달성하면서도 끊임없이 변화하는 해양 환경에 적응해야 한다. 디지털 트윈(DT)은 이러한 자율운항을 보다 유연하고 지능적으로 수행할 수 있도록 지원할 수 있다.

DT를 활용하면 실시간 경로 재계획이 가능해질 것으로 기대된다. AUV가 운항 중 예상치 못한 강한 해류를 만나거나 장애물을 감지하는 경우, DT는 가상 환경에서 대안 경로를 탐색하여 AUV의 최적 운항 방향을 도출할 수 있다. 예를 들어, 목표 지점까지의 직선 경로에 강한 역해류가 흐르는 상황에서는 DT가 상대적으로 에너지 소비가 적은 우회 경로를 탐색하여 AUV를 유도할 수 있다. 반대로 순항 중 전방에 예상치 못한 장애물이 나타나는 경우, DT는 회피 가능 경로를 평가하여 충돌을 방지하는 방안을 제공할 수 있다. 이러한 기능들을 통해 AUV는 사전에 계획된 경로에 얽매이지 않고 보다 유연하게 임무를 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

그림 4는 자율운항 최적화를 위한 디지털 트윈의 개념 흐름을 시각화한 것이다. AUV는 실시간 환경 정보를 수집하고 해류나 장애물과 같은 외란 요소를 감지한 후 기존 경로와

비교하여 대안 경로를 시뮬레이션한다. 이런 과정에서 최적의 경로를 재계획하고 에너지 효율성과 임무 성공률을 높이는 전략을 실시간으로 반영할 수 있다.



그림 4. 자율운항 최적화를 위한 환경 적응 경로 재계획 흐름도
Fig. 4. Conceptual Flowchart of Adaptive Path Replanning for Autonomous Operation

추가로 DT는 AUV의 운항 파라미터 최적화를 지원할 수 있다. 이는 단순한 경로 변경뿐만 아니라 속도, 심도 등의 운항 변수까지 포함하는 개념이다. 예를 들어, 해류 방향과 세기에 따라 보다 효율적인 침로와 속도를 설정하거나, 목적지까지의 거리를 고려하여 속도 프로파일을 조정하는 등의 운용 방안을 제시할 수 있다. 이러한 최적화는 에너지 소비 절감과 임무 수행 시간 단축에 기여할 가능성이 크다.

4.3 항법 보완 및 성능 최적화

AUV의 정확한 위치 추정에는 수중 운용에서 해결해야 할 중요한 도전 과제 중 하나이다. GPS를 사용할 수 없는 환경에서 AUV는 INS+DVL 조합에 의존하지만, 시간이 지남에 따라 INS 드리프트 오차가 누적되고, DVL 신호 손실 등의 문제가 발생할 가능성이 있다. 이에 따라, 디지털 트윈(DT)을 활용하여 항법 성능을 보다 효과적으로 보완하고 최적화하는 방안을 고려할 수 있다.

우선적으로 DT를 활용하면 다중 센서 데이터를 융합하여 항법 정확도를 개선할 수 있을 것으로 기대된다. 예를 들어, AUV의 INS가 일정 수준의 드리프트를 보일 경우, DT가 수심 센서나 지자기 센서 등의 추가적인 데이터를 바탕으로 보정값을 도출하는 방식이 가능하다. 또한, 디지털 트윈은 가상 모델 내에서 과거 경로 데이터를 활용하여 현재 위치의 최적 추정치를 제공하는 역할을 수행할 수 있다.

만약 운용 중 해저 지형 미확보로 인해 속도 측정 불가능대와 같이 DVL 데이터의 신뢰성이 일시적으로 저하되는 경우, DT는 직전까지의 속도 및 가속도 데이터를 기반으로 단

기적인 Dead-reckoning을 수행하며, 동시에 가능한 위치 범위를 추정하여 오차가 크게 누적되지 않도록 지원할 수 있다. 이를 통해 DT는 항법 보정 기능을 보완하는 역할을 수행하며, 기존 센서 기반 항법 시스템의 한계를 보완하는 방향으로 활용될 수 있다.

그림 5는 디지털 트윈이 항법 필터링 시스템의 신뢰도를 보완하는 구조를 나타낸 개념도이다. INS와 DVL에서 수집된 데이터는 센서 융합 및 필터에 입력되며, 이 출력은 DT 시스템에 의해 실시간으로 감시된다. DT는 이상 징후나 외란을 감지할 경우 필터의 파라미터를 조정하거나 환경 정보를 추가 반영하여 항법 결과의 신뢰도를 높일 수 있다. 이를 통해 AUV는 GPS가 사용 불가능한 해역에서도 보다 안정적으로 경로를 유지할 수 있다.

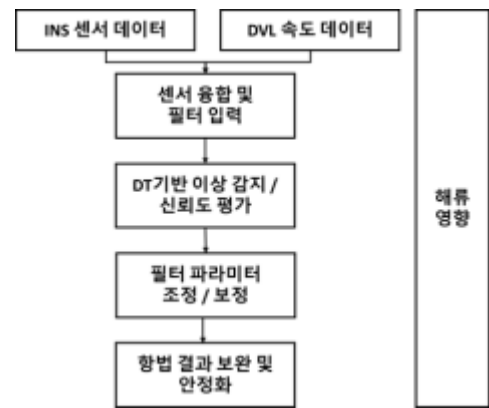


그림 5. 디지털 트윈 기반 항법 보완 및 필터 보정 개념도
Fig. 5. Digital Twin-Based Navigation Enhancement and Filter Compensation Concept

또한, DT는 항법 필터링의 동적 조정에도 기여할 수 있다. 전통적인 Kalman 필터 기반 항법에서는 프로세스 잡음 및 측정 잡음 공분산 값이 고정될 수 있지만, DT는 실시간으로 센서 신뢰도를 평가하고 이에 따라 항법 필터의 설정값을 조정하는 방안을 지원할 수 있다. 예를 들어, DVL 신호가 불안정한 상황에서는 DT가 필터 내 DVL 측정값의 가중치를 자동으로 낮추어 오차를 줄이는 방식으로 적용될 수 있다. 이러한 적응형 필터링 기법은 운용 환경 변화에 따른 항법 성능 최적화를 가능하게 하며, 결과적으로 AUV의 위치 추정 정확도를 향상시키는 데 기여할 수 있다.

나아가 DT는 과거 항법 오차 패턴을 학습하여 향후 항법 성능을 개선하는 데 활용될 수도 있을 것이다. 예를 들어, 특정 해역에서 해류 영향으로 인해 INS가 체계적으로 한쪽으로 편향되는 경향이 있었던 경우, DT는 과거 데이터를 기반으로 이러한 편향을 조기에 인지하고, 해당 해역에서의 오차 보정을 사전에 적용하는 방안을 제안할 수 있다. 그리고 실시간으로 예상 오차 범위를 지속적으로 평가하고, 일정 임계 이상으로 오차가 커질 경우 미션 계획 내에서 수면 부상 후 GPS보정과 같은 위치 재보정 동작 등의 대응을 트리거하는 방식도 고려될 수 있다. 이는 DT가 단순히 현재 항법 성능을 보완하는 것뿐만 아니라, 장기적인 관점에서 보다 신뢰성 높

은 항법 전략을 지원할 수 있음을 의미한다.

결과적으로 DT의 항법 보조 기능을 활용하면 AUV는 장기간 운용 중에도 보다 안정적인 항법 성능을 유지할 수 있을 것으로 기대된다. 위치 오차가 누적되어 임무 수행에 영향을 주는 상황을 줄이고, 필요 시 보정 동작을 자동으로 수행함으로써 내비게이션 정밀도를 향상시키는 것이 가능할 것이다. 이러한 기술은 고정밀 위치 추정이 요구되는 기뢰 제거 임무나, 다중 AUV 협업 운용 시 정확한 상대 위치 인식이 필요한 경우 등에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

5. 결론 및 향후 연구 방향

AUV 운용을 위한 디지털 트윈 적용 방안을 제안하고, 기존 모델링 및 시뮬레이션 방식과 비교하여 DT의 장점을 분석하였다. 기존 M&S 방식이 사전 정의된 환경에서 성능을 평가하는 데 유용하지만, 실시간 대응이 어렵다는 한계를 가진 반면, DT는 AUV 운용 중 수집한 데이터를 반영하여 가상 모델을 지속적으로 업데이트하고, 운용 최적화를 실시간으로 수행할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 차이를 구조적으로 정리하여 비교표로 제시하였다. 특히 실시간성, 운용 유연성, 유지보수 대응력, 통신/연산 효율성 측면에서 DT 프레임워크가 기존 M&S 방식 대비 개념적으로 높은 성능을 제공할 수 있음을 비교 분석하였다. 이 비교는 정량적 실험은 아니지만, 시스템 구조적 차이를 기반으로 기능적 우위를 논리적으로 제시하는 데 목적이 있다.

제안한 AUV 디지털 트윈 프레임워크는 실시간 상태 모니터링, 유지보수 최적화, 자율운항 지원, 항법 보완 등의 측면에서 기존 방식보다 높은 유연성과 신뢰성을 제공할 수 있음을 확인하였다. 또한, AUV의 제한적인 수중 통신 및 연산 자원을 고려하여, 클라우드 의존도를 낮추고 온보드(Onboard) 실행이 가능한 Lightweight Digital Twin 개념을 도입하는 방향을 제시하였다.

향후 연구에서는 제안된 개념을 실제 AUV 환경에서 구현하고, 실험적 검증을 통해 DT의 성능을 평가하는 과정이 필요하다. 또한, DT 기반 자율운항 최적화, 유지보수 예측, 항법 보완 등의 개별 기능을 고도화하는 연구가 추가적으로 이루어져야 한다.

본 연구는 AUV 운용에서 DT의 가능성을 탐색하는 초기 연구로서, 향후 연구를 위한 기초적인 방향성을 제공한다. 이를 바탕으로, AUV의 자율운항 기술과 운용 최적화 연구가 더욱 발전할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] T. B. Curtin, D. M. Crimmins, J. Curcio, and M. Benjamin, "Autonomous Underwater Vehicles: Trends and Transformations," *Mar. Technol. Soc. J.*, Vol. 39, No. 3, pp. 65-75, 2005.
- [2] O. Hassanein, A. Gopalakrishnan, S. Francis, F. Alkhatib, S. Ali, "Unmanned Underwater Vehicles: Applications and Challenges," *Journal of Hunan University Natural Sciences*, Vol. 50, No. 11, pp. 74-82, 2023.
- [3] R. G. Damian, N. Jula, and S. V. Paturca, "Autonomous Underwater Vehicles - Achievements and Current Trends," *Sci. Bull. Nav. Acad.*, Vol. XXI, No. 1, 2018.
- [4] F. O. Adetunji, N. Ellis, M. Koskinopoulou, I. Carlucho, and Y. R. Petillot, "Digital Twins Below the Surface: Enhancing Underwater Teleoperation," *OCEANS 2024 - Singapore*, pp. 1-8, April, 2024.
- [5] M. Stojanovic, "Underwater Acoustic Communications: Design Considerations on the Physical Layer," 2008 Fifth Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services, pp. 1-10, January, 2008.
- [6] A. Vasiljevic, U. Brönnner, M. Dunn, G. García-Valle, J. Fabrini, R. Stevenson-Jones, B. L. Bye, I. Mayer, A. Berre, M. Ludvigsen, and R. Nepstad, "A Digital Twin of the Trondheim Fjord for Environmental Monitoring—A Pilot Case," *J. Mar. Sci. Eng.*, Vol. 12, No. 9, pp. 1530, 2024.
- [7] N. Assani, P. Matić, and M. Katalinić, "Ship's Digital Twin—A Review of Modelling Challenges and Applications," *Appl. Sci.*, Vol. 12, No. 12, Article 6039, 2022.
- [8] D. Lu, Y. Ning, J. Wang, K. Du, and C. Song, "Research on Model Reduction of AUV Underwater Support Platform Based on Digital Twin," *J. Mar. Sci. Eng.*, Vol. 12, No. 9, Article 1673, 2024.
- [9] N. S. Madusanka, Y. Fan, S. Yang, and X. Xiang, "Digital Twin in the Maritime Domain: A Review and Emerging Trends," *J. Mar. Sci. Eng.*, Vol. 11, No. 5, Article 1021, 2023.