

수중 자율운동체 디지털 트윈의 정합성 정량 평가 지표 제안

현 철*¹, 김동건*², 김현승*³, 정동민*⁴

Proposal of a Quantitative Fidelity Metric for Digital Twins of Autonomous Underwater Vehicles

Chul Hyun*¹, Donggeon Kim*², Hyunseung Kim*³, and Dongmin Jeong*⁴

요 약

디지털 트윈은 자율운동체의 설계, 시험, 운용 전반에 걸쳐 핵심적인 도구로 자리잡고 있다. 수중체계와 같이 외란이 크고 통신·관측 제약이 동반되는 환경에서는 그 정합성 확보가 더욱 중요해진다. 본 연구에서는 수중 자율운동체(AUV)를 대상으로 디지털 트윈의 정합성을 평가할 수 있는 정량적 지표 체계를 제안하였다. 제안된 지표는 운동 궤적 및 자세 반응의 동기화 수준을 평가하는 SyncLMKD_U, 실시간 정보 반영 신선도를 측정하는 AoDT_UW, 두 지표를 통합한 종합 평가 지표 CFI(Composite Fidelity Index)로 구성된다. 본 논문은 개념 시나리오를 바탕으로 각 지표의 계산 흐름과 해석 방법을 제시하고, 해류 변화 등 주요 환경 요소에 따른 민감도 변화를 분석하였다. 제안된 지표는 기존의 RMSE나 단순 통신 지연 기반 평가를 보완하며, 수중체계 디지털 트윈의 정합성 확보 및 구조적 검증에 위한 실용적 기준으로 활용될 수 있다.

Abstract

Digital twins have emerged as a critical tool across the design, testing, and operation of autonomous systems. In underwater domains—where disturbances, communication constraints, and observability limitations are prevalent—ensuring fidelity between the virtual model and real system is particularly challenging. This study proposes a quantitative evaluation framework to assess the fidelity of digital twins for Autonomous Underwater Vehicles (AUVs). The proposed metrics include SyncLMKD_U, which evaluates synchronization in kinematic response; AoDT_UW, which measures real-time freshness of state updates; and Composite Fidelity Index (CFI), a weighted integration of the two. A conceptual scenario was used to demonstrate the computation flow and interpretation of each metric, including sensitivity analysis under varying current velocities. The proposed framework complements traditional metrics such as RMSE or communication delay and provides a practical basis for verifying and validating digital twins in complex underwater environments.

Keywords

digital twin, autonomous underwater vehicle, fidelity evaluation, quantitative metric, real-time synchronization

* LIG넥스원 해양연구소(*¹ 교신저자)
- ORCID¹: <https://orcid.org/0009-0006-7300-0740>
- ORCID²: <https://orcid.org/0009-0005-2374-1252>
- ORCID³: <https://orcid.org/0000-0003-3974-0631>
- ORCID⁴: <https://orcid.org/0009-0000-5571-2177>

• Received: May 07, 2025, Revised: May 26, 2025, Accepted: May 29, 2025
• Corresponding Author: Chul Hyun
Maritime R&D Center, LIG Nex1
Gyeonggi-do, 13488, Republic of Korea
Tel.: +82-31-5178-4293, Email: chul.hyun@gmail.com

I. 서 론

디지털 트윈(DT, Digital Twin)은 실제 시스템을 가상공간에 재현하여 설계, 운용, 유지보수 단계 전반에 활용할 수 있는 중요한 도구로 자리잡고 있다. 특히 기동형 수중체계(AUV 등) 분야에서는 실제 시험을 수행하는 데 드는 높은 비용, 복잡한 운용 환경, 그리고 시험 중 시스템 손상이나 사고 위험성으로 인해, 현실 시험만으로 충분한 데이터와 경험을 확보하기가 쉽지 않다. 대규모 시험이 제한적인 조건에서도 설계 검증과 운용 예측의 신뢰성을 확보하기 위해, 수중체계에서는 디지털 트윈 기반의 보완적 접근이 효과적인 수단이 될 수 있다[1][2].

수중체계 디지털 트윈을 활용하면 다양한 운용 조건과 환경 변화에 따른 기동 특성, 자세 응답, 센서 동작을 반복적으로 검증하고 분석할 수 있으며, 실제 시험을 대체하거나 보완할 수 있는 기회를 제공한다. 그러나 디지털 트윈이 현실 시스템을 단순히 흉내내는 수준에 머문다면 설계 검증이나 운용 예측에 충분한 신뢰를 제공할 수 없다. 특히 수중체계처럼 외란 요소가 크고 관측이 제한적인 시스템에서는 단순 모델링 정확도만으로 디지털 트윈의 유효성을 평가하기 어렵다. 따라서 디지털 트윈이 생성하는 결과의 정확성과 신뢰성을 체계적으로 검증할 수 있는 기준 설정이 필수적이다.

기존 모델링 및 시뮬레이션(M&S, Modeling & Simulation) 영역에서는 VV&A(Verification, Validation & Accreditation) 체계를 통해 신뢰성을 평가해왔으나[3]-[5], 디지털 트윈은 실시간 데이터 동기화와 환경 외란까지 반영해야 하므로 기존 접근만으로는 한계가 있다. 특히 수중체계는 통신, 센서, 환경 변화 등 복합적 요인이 작용하며, 실시간성·동기화·환경 적응성까지 포함한 다면적 평가가 요구된다. 이와 관련하여, 수중 ROV를 활용한 디지털 트윈 정합성 분석 연구[6]와, 해양 센서 네트워크를 기반으로 실시간 동기화 및 상태 검증을 수행한 사례[7]가 보고된 바 있다.

본 논문에서는 기동형 수중체계를 대상으로, 디지털 트윈의 정합성을 평가할 수 있는 실용적 지표 프레임워크를 제안한다. 제안하는 프레임은 절대적 기준을 강요하지 않고, 디지털 트윈의 사용 목적(설

계 검증, 운용 예측 등)과 성숙도(Level)에 따라 유연하게 적용할 수 있도록 구성된다[1]. 또한 궤적 유사도, 자세 응답 비교, 센서 동기화 수준 등 실제 수중체계 운용과 직결되는 요소를 중심으로 구체적인 평가 지표를 설정한다. 수중 환경에서의 센서 연동, 실시간 반응성, 정합성 검증 등 디지털 트윈 평가 전반을 구조적으로 정리한 UK-RAS Network 보고서[1]는 본 연구에서 제시하는 평가 프레임워크와 유사한 평가 항목과 분석 관점을 공유하고 있다. 아울러 제안한 지표 프레임의 실용성을 확인하기 위해 가상의 AUV 디지털 트윈 적용 사례를 통해 적용 가능성을 검토하고, 향후 다양한 자율체계로의 확장 가능성을 논의한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존 M&S VV&A 및 디지털 트윈 평가 관련 연구를 정리하고, 3장에서는 디지털 트윈 평가 대상과 평가 방향을 설정한다. 4장에서는 수중체계 디지털 트윈을 위한 정합성 평가 지표 프레임워크를 제안하고, 5장에서는 AUV 디지털 트윈 적용 예시를 통해 지표 활용 가능성을 검토한다. 마지막으로 6장에서는 연구 결과를 요약하고, 향후 확장 방향을 제시한다.

II. 관련 연구

디지털 트윈(DT)은 모델링 및 시뮬레이션(M&S) 기법을 기반으로 발전해왔지만, 기존 M&S와는 몇 가지 중요한 차이점을 가진다. M&S는 주어진 입력 조건 하에서 시스템 거동을 모사하는 것을 목표로 하지만, 디지털 트윈은 현실 시스템의 상태를 실시간으로 반영하고 예측하는 것을 핵심으로 한다. 이로 인해 디지털 트윈은 단순 모델 정확도뿐만 아니라 실시간 데이터 연동성, 동적 환경 대응성까지 함께 평가해야 하는 새로운 요구사항을 가진다[1][2].

M&S 분야에서는 미 국방부 표준(MIL-STD-3022) 및 DoD 5000.61 지침에 따라 VV&A 체계를 통해 모델의 신뢰성과 정확성을 확보해왔다[3]-[5]. VV&A는 모델 구현의 정확성(Verification), 현실 세계 반영도(Validation), 그리고 특정 사용 목적에 대한 제한적 신뢰성 인증(Accreditation)을 구분하여 체계적으로 수행되며, 군사, 항공, 산업 분야에서 폭넓게 적용되어 왔다.

하지만 기존 VV&A는 주로 오프라인 기반의 모델 검증에 초점을 맞추고 있으며, 실시간 데이터 스트림, 센서 동기화 오차, 통신 지연과 같은 동적 요소에 대한 평가 항목은 상대적으로 부족하다[1][2].

특히 수중체계 분야는, 통신 대역폭 제한과 센서 관측 한계로 인해 실시간 데이터 동기화에 어려움이 존재하며[8], 해류 변화와 같은 환경 불확실성 또한 주요 변수로 작용한다[1]. 수중 디지털 트윈의 경우, 현실 시스템과 가상 시스템 간의 상태 연동이 시시각각 변하는 조건을 고려해야 하며, 기존 정적 모델링 기반 VV&A 접근만으로는 현실적인 신뢰성 확보가 어렵다. 따라서 수중체계 디지털 트윈에 특화된, 실시간성과 환경 적응성을 반영한 평가 프레임이 별도로 요구된다.

국제표준화기구(ISO)에서는 제조업 중심으로 디지털 트윈 프레임워크(ISO 23247)를 제시하여, 물리 시스템과 디지털 트윈 간의 데이터 흐름과 연동 구조를 정의하였다. 이 표준은 제조 공정 최적화를 목적으로 하지만, 복잡한 시스템에서 실시간 상태 모니터링과 데이터 검증이 필수적이라는 점은 수중체계 디지털 트윈 평가에도 시사점을 제공한다[1].

한편, 디지털 트윈 성숙도(Capability level)는 0단계(Standalone DT)부터 5단계(Autonomous DT)까지 구분되며, 각 단계별로 요구되는 데이터 정확성, 실시간성, 예측 능력 수준이 차등화된다[8]. 이러한 접근은 디지털 트윈의 개발 및 운용 목적에 따라 유연하게 평가 지표를 설정해야 함을 시사한다.

결국 수중체계 디지털 트윈의 정합성을 평가하기 위해서는 기존 VV&A 체계를 참고하되 실시간 데이터 흐름 검증, 센서 동기화 정확도 평가, 환경 불확실성 반영 등을 포함하는 확장된 평가 기준이 필수적이다[1,2,8]. 본 논문은 이러한 문제의식 하에, 기동형 수중체계 디지털 트윈의 정합성을 실용적으로 평가할 수 있는 구체적 지표 프레임워크를 제안하고자 한다.

III. 디지털 트윈 개념과 평가 대상 정리

디지털 트윈(DT)은 현실 시스템의 상태를 디지털 공간에 실시간으로 반영하고, 이를 기반으로 예측과 분석을 수행하는 동적 가상화 구조로 정의할 수 있

다[1]. 디지털 트윈은 단순한 물리 기반 모델이나 시뮬레이터와는 달리, 실제 운용 데이터와 지속적으로 연동되며, 시스템 상태 변화에 대응하여 가변적으로 진화하는 특성을 가진다. 따라서 디지털 트윈은 고정된 입력에 대해 결과를 도출하는 전통적 시뮬레이터와 달리, 실시간성(Real-time responsiveness)과 동적 적응성(Dynamic adaptability)을 핵심 특징으로 한다.

그러나 디지털 트윈 자체는 목적이 아니라 수단에 해당한다. 궁극적으로 평가해야 하는 대상은 ‘디지털 트윈이 얼마나 정확하게 현실 시스템의 거동을 재현하고, 변화에 따라 예측하거나 대응할 수 있는가’ 하는 능력이다. 특히 수중체계 디지털 트윈에서는 이러한 평가 관점이 다음 세 가지 측면에서 중요하게 작용한다.

첫째, 재현성(Reproduction fidelity)은 현실 시스템의 기동 궤적, 자세 변화, 센서 응답 등을 얼마나 정밀하게 모사하는지를 의미하며, 통신 지연이나 해류 영향 등, 외란 조건에서도 그 정확도가 유지되는지를 포함한다[1,8].

둘째, 예측성(Predictive capability)은 실시간 데이터 흐름을 기반으로 미래 시스템 상태를 얼마나 정확히 예측할 수 있는지를 판단하는 기준으로, 센서 노이즈나 환경의 불확실성 등 불완전한 정보 하에서도 일관된 예측력을 보이는지가 핵심이다[8].

셋째, 운용성(Operational usability)은 센서 오류, 통신 장애, 환경 급변 등 실제 운용 중 발생 가능한 다양한 상황에 대해 디지털 트윈이 적절히 반응하고, 실시간 의사결정에 효과적으로 기여할 수 있는지를 평가한다[1][2].

기존 모델링 및 시뮬레이션에서는 Validation과 Verification을 통해 모델이 현실 시스템을 얼마나 잘 반영하는지를 평가했지만[3]-[5], 디지털 트윈에서는 이와 더불어 실시간 동기화, 데이터 지연 허용 범위, 센서 간 시간 오차 관리, 환경 적응성과 같은 새로운 요소가 평가 대상에 추가된다[8].

특히 수중체계에 적용되는 디지털 트윈은 몇 가지 고유한 제약 조건을 내포하고 있다. 첫째, 수중 음향 통신 환경은 대역폭이 수십 kbps 수준으로 제한되며, 통신 지연 또한 크기 때문에 실시간 데이터 전송과 동기화가 어려운 구조적 한계를 가진다. 둘

째, 해류, 수온, 수심과 같은 수중 환경 변수는 시시각각 변동하며, 이로 인해 시스템의 동역학적 거동이 강하게 영향을 받는다. 셋째, 수중체계는 지상 또는 공중에서와 달리 외부 관측이 제한적이며, 운용 중 시스템의 상태를 실시간으로 직접 측정하거나 개입하는 것이 매우 어렵다는 특징이 있다. 이러한 특수성을 반영할 때, 디지털 트윈의 평가 대상은 단순히 모델의 수치적 정확도에 국한되지 않으며, 오히려 동적 환경 변화 하에서도 시스템 거동을 신뢰성 있게 재현하고 예측할 수 있는 능력이 핵심 요소로 작용한다.

본 논문에서는 이러한 관점을 바탕으로, 수중체계 디지털 트윈의 정합성을 평가하기 위한 구체적인 지표 프레임워크를 제안한다.

IV. 수중체계 디지털 트윈 정합성 평가 지표 프레임 제안

디지털 트윈의 정합성 평가는 단순한 모델링 정확도를 넘어서, 현실 시스템의 상태를 실시간으로 재현하고 외란에 대응하는 능력을 포함한 종합적인 신뢰성 검토가 필요하다. 본 연구에서는 실제 수중체계와 이를 모사하는 디지털 트윈 간의 출력 데이터를 시간 동기화 기반으로 비교하고, 정량적인 지표를 통해 정합성을 평가하는 프레임워크를 제안한

다. 전체 구조는 그림 1에 나타난 바와 같이, Real System과 Digital Twin의 주요 구성 요소를 1:1로 대응시킨 후, 핵심 출력값들을 평가 지표를 통해 비교·해석하는 방식으로 구성된다.

그림 1은 본 논문에서 제안하는 정합성 평가 프레임워크의 전체 흐름을 나타낸다. 왼쪽의 Real System은 실제 AUV의 기체 운동, 제어기, 센서, 통신 환경으로 구성되며, 이로부터 생성된 실측 데이터를 기준으로 삼는다. 오른쪽의 Digital Twin은 해당 시스템을 모사하는 6DOF 운동 모델, 제어기 모델, 센서 에뮬레이터, 통신 지연 모델을 포함한다. 양 시스템의 출력은 중앙의 Metric Computation 모듈에서 동기화된 시간 축을 기준으로 비교되며, 궤적 유사도, 자세 응답 유사도, 센서 동기화 수준, 복합 매트릭(SyncLMKD-U, AoDT-UW)이 평가에 사용된다. 이들 평가 결과는 최종적으로 정합성 등급 또는 복합 지표(CFI)로 종합된다.

4.1 궤적 유사도 평가

디지털 트윈의 궤적 재현 능력은 정합성 평가의 핵심 요소 중 하나이며, 현실 시스템의 위치 변화를 얼마나 정확하게 모사하는지를 판단하는 데 중심이 된다.

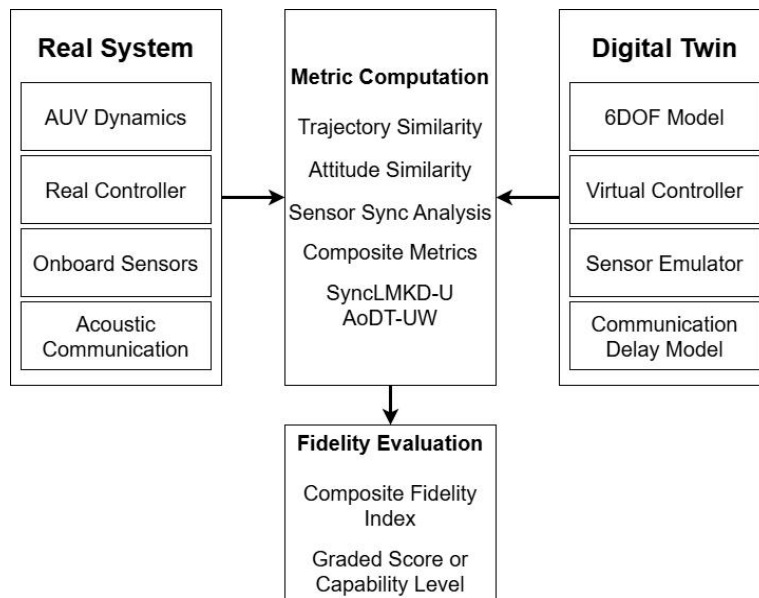


그림 1. 실제 시스템과 디지털 트윈 간 정합성 평가 구조도
Fig. 1. Fidelity evaluation framework between real system and digital twin

이를 정량적으로 분석하기 위해, 동기화된 시간 축을 기준으로 실제 궤적과 디지털 트윈 궤적 간의 위치 오차를 계산한다. 대표적인 평가지표로는 RMSE(Root Mean Square Error)와 DTW(Dynamic Time Warping) 거리가 사용된다[1][2]. RMSE는 두 궤적 간 평균 거리 오차를 나타내며 전체적인 오차 수준을 평가할 수 있고, DTW는 두 궤적이 시간적으로 완전히 동기화되지 않은 경우에도 궤적 유사도를 비교할 수 있어, 통신 지연이나 샘플링 주기 불일치가 존재하는 수중 환경에서 특히 유용하다.

다만, 수중 항법 시스템에서는 관성 센서 오차 누적(Inertial drift) 현상이 빈번하게 발생하기 때문에, 궤적 비교 시 초기 조건 보정이나 상대적 위치 기반 분석이 병행되어야 한다[8].

4.2 자세 응답 유사도 평가

자세(Roll, pitch, yaw) 응답 정합성은 수중체계의 동적 안정성과 직접적으로 연결된다. 디지털 트윈이 실제 시스템의 자세 변화를 얼마나 정확히 재현하는가는 제어기의 신뢰성과 성능 검증에 있어 중요한 평가 기준이 된다.

자세 응답 비교에는 주로 각속도(Roll rate, pitch rate, yaw rate) 및 자세 각도 비교 방식이 활용되며, 동적 응답 패턴의 일치도를 정량적으로 분석하기 위해 Cross-correlation 기법이 널리 사용된다[2].

실제와 디지털 트윈 간 초기 자세 오차가 존재할 수 있으므로 이를 보정한 상태에서 비교해야 하며, 센서 노이즈나 고주파 진동에 따른 미세한 오차를 제거하기 위해 필터링 기법을 병행하는 것이 바람직하다.

4.3 센서 동기화 및 응답성 평가

수중체계에서는 통신 지연, 패킷 손실, 센서 지터 등으로 인해 현실 센서와 디지털 트윈 센서 모델 간의 시간 정합성이 쉽게 깨질 수 있으므로, 센서 동기화 상태와 응답성을 정량적으로 평가하는 것이 필요하다.

평가 항목으로는 센서 출력 간의 시간 오프셋(Time offset), 평균 전송 지연(Latency), 그리고 지연

의 변동성(Variance) 분석이 포함된다.

특히 Cross-correlation 기반 분석을 통해 센서 출력의 시계열 정합도를 평가할 수 있으며, 상황에 따라서는 센서 손실률(Loss rate)까지 함께 고려해야 디지털 트윈의 실시간 신뢰성을 보다 정확하게 판단할 수 있다[8].

4.4 수중환경 특화 복합 메트릭 제안

기존 RMSE나 DTW 기반 지표만으로는 수중환경 특수성, 특히 통신 지연, 해류 외란에 의한 실시간성 저하 문제를 충분히 반영할 수 없다. 이에 본 연구에서는 수중체계 디지털 트윈 정합성 평가를 위해, 기존 메트릭을 수중운동체 특성에 맞게 확장한 SyncLMKD-U와 AoDT-UW 복합 메트릭을 제안한다.

4.4.1 SyncLMKD-U: 수중환경 정합성 평가를 위한 로그 기반 운동 동기화 지표

디지털 트윈이 실제 물리 시스템의 동작을 얼마나 정밀하게 재현하고 있는지를 평가하기 위해, 본 연구에서는 Cardoso가 제안한 SyncLMKD(Log Mean Kinematics Difference Synchronization)[9]를 기반으로 한 수중환경 특화 지표인 SyncLMKD-U를 채택하였다. 이 지표는 목표 궤적, 실제 궤적, 디지털 트윈 궤적 간의 동기화 수준을 정량적으로 비교할 수 있도록 설계되었으며, 특히 비선형 궤적 추종 및 외란 조건 하에서의 운동 정합성을 평가하는 데 효과적이다.

SyncLMKD는 다음과 같이 식 (1)로 정의된다.

$$SyncLMKD = \frac{(K_{ideal} - K_{virt}) - (K_{ideal} - K_{real})}{\ln \left| \frac{K_{ideal} - K_{virt}}{K_{ideal} - K_{real}} \right|} \quad (1)$$

여기서 K_{ideal} 은 계획된 이상 궤적, K_{real} 은 실제 시스템에서 측정된 위치, 그리고 K_{virt} 은 디지털 트윈에서 예측된 위치를 의미한다.

이 지표는 단순한 절대 오차가 아니라, 디지털 트윈이 실제 시스템을 따라가는 정도와 그 과정에

서 발생하는 비율 기반 왜곡을 로그 평균 방식으로 정량화한다는 점에서 차별성을 가진다. 특히 회피 기동이나 방향 전환이 많은 궤적에서 동기화된 위치 변화 양상을 세밀하게 분석할 수 있다.

본 연구에서는 수중체계의 고유한 환경적 특성을 반영하여, 해류와 센서 지연 요소를 계수화한 확장형 지표인 SyncLMKD-U를 적용한다. SyncLMKD-U는 다음과 같이 식 (2)로 정의된다.

$$SyncLMKD_U = \alpha_{current} \cdot \alpha_{delay} \cdot SyncLMKD \quad (2)$$

여기서 $\alpha_{current}$ 는 수심과 시간에 따른 해류 속도 또는 방향의 변화율을 기반으로 정의되며, 평균 항법 기준 조건 대비 환경 영향이 큰 경우 1.0을 초과하도록 설정될 수 있다. α_{delay} 는 센서 샘플링 주기, 통신 지연, 제어기 응답 지연 등을 통합 반영한 계수이며, 일반적으로 기준 응답 시간 대비 상대 지연율을 기준으로 계산된다. 각 계수는 고정값이 아닌, 주어진 시뮬레이션 시나리오 또는 환경 설정에 따라 동적으로 산출되며, 통상적으로 $\alpha \in [0.8, 1.3]$ 범위 내에서 조정될 수 있다. 이러한 계수들은 수중 환경에서의 외란 영향이나 시스템 지연이 DT의 동기화 성능에 어느 정도 영향을 미치는지를 비교 평가하는 데 사용된다.

SyncLMKD-U의 수치 결과는 일반적으로 다음과 같은 경향을 보인다. 정합성이 우수한 시뮬레이션의 경우 SyncLMKD-U 값은 0.1 이하의 범위에 수렴하며, 외란이나 지연 요인이 커질수록 지수적으로 증가하는 경향이 있다. 절대값 자체를 임계 기준으로 사용하는 것보다는, 다양한 시나리오 간 상대 비교를 통해 정합성 유지 수준을 판단하는 방식이 바람직하다.

따라서 본 지표는 수중 DT 시뮬레이션의 동적 궤적 추종 능력, 외란 대응 정합도, 실시간 반영 수준 등을 복합적으로 평가할 수 있는 실용적 지표로 활용될 수 있으며, 향후 실환경 기반 시험이 어려운 초기 설계 단계에서도 반복 검증용 지표로 적용 가능하다.

4.4.2 AoDT-UW: 수중 환경에서 디지털 트윈의 실시간성 평가를 위한 상태 신선도 지표

디지털 트윈이 실제 시스템의 최신 상태를 얼마나 잘 반영하고 있는지를 정량적으로 평가하기 위해, 본 연구에서는 AoDT(Age of Digital Twin) 개념 [10]을 기반으로 한 수중 환경 특화 신선도 지표인 AoDT-UW를 제안한다. 이 지표는 기존의 AoI(Age of Information) 개념에서 확장된 것으로, 물리 시스템의 상태가 디지털 트윈에 반영되기까지의 시간 지연을 중심으로 정의되며, 실시간성 및 데이터 동기화의 핵심 지표로 활용된다.

AoDT는 일반적으로 다음과 같이 식 (3)으로 표현된다.

$$\zeta_i(t) = t - u_i(t) \quad (3)$$

여기서 t 는 현재 시각, $u_i(t)$ 는 디지털 트윈이 최종적으로 수신한 실제 시스템의 상태 갱신 시각, 그리고 $\zeta_i(t)$ 는 디지털 트윈의 시점에서 본 현재 정보의 ‘신선도’ 또는 ‘지연 시간’을 의미한다.

이 지표는 실시간 제어나 판단이 중요한 응용 분야에서, 디지털 트윈이 얼마나 오래된 정보를 기준으로 동작하고 있는지를 시간 단위로 표현함으로써 시스템의 유효성 검증에 활용된다.

수중 환경은 다음과 같은 요인으로 인해 AoDT 값이 커질 가능성이 높다.

- 수중 음향 통신 기반의 낮은 대역폭 (수십 kbps 수준)
- 통신 왕복 지연
- 센서 동작 간격과 처리주기 불일치
- 자율운동 조건에서의 상태 전송 불균형 등

이러한 특수성을 반영하여 본 연구에서는 수중 체계에 특화된 신선도 평가 지표인 AoDT-UW(Underwater) 형태로 구성하였다. AoDT-UW는 다음과 같은 보정 항목을 고려하여 식 (4)로 정의된다.

$$AoDT_UW = \zeta_i(t) \cdot (1 + \beta_{comm}) \cdot (1 + \beta_{proc}) \quad (4)$$

여기에서 β_{comm} 은 물리 시스템으로부터 디지털 트윈까지의 통신 지연률, β_{proc} 는 수신된 데이터를 처리하고 DT에 반영하는 데 소요되는 내부 처리 지연률을 의미한다.

각 보정 계수는 시스템 구조 또는 운용 시나리오에 따라 설정되며, 일반적으로 $\beta \in [0.0, 0.5]$ 범위에서 설정될 수 있다. 예를 들어, 실시간 제어 기반 DT보다는 비동기 수집형 DT의 경우 해당 계수가 더 크게 적용될 수 있다.

AoDT-UW 값이 작을수록 DT가 최신 상태를 기준으로 동작하고 있음을 의미하며, 실시간 운용성이 우수한 환경에서는 수초 이하(예: < 2sec) 수준의 값을 유지하는 것이 바람직하다. 반대로, 장기 누락이나 통신 중단이 발생한 시나리오에서는 수십 초 이상으로 급증할 수 있으며, 이러한 경우 DT의 판단 기반이 실기체 상태와 현저히 불일치할 가능성이 존재함을 시사한다.

이 지표는 특히 DT의 실시간 반영 능력, 운영 시점의 최신성 확보 여부, 그리고 동기화 기반 신뢰성을 판단하는 데 효과적이며, 수중 체계처럼 실시간 통신이 제한된 환경에서도 기반 성능 진단 메트릭으로 활용 가능하다.

본 연구에서 사용된 계수 $\alpha_{current}$, α_{delay} , β_{comm} , β_{proc} 는 시나리오별 환경 특성을 반영하기 위한 경험적 가중치로 설정되었으며, 고정값이 아닌 범위 내에서 조건에 따라 조정 가능하도록 설계되었다. 향후에는 해류 세기, 통신 대역폭, 센서 지연 등 주요 환경 변수와의 함수적 관계를 기반으로 계수를 자동 설정하거나 프로그램 가능하도록 구조화하는 연구가 필요할 것이다.

4.4.3 정합성 기반 복합 평가 지표 구성

앞 절에서 제시한 SyncLMKD-U와 AoDT-UW는 각각 디지털 트윈의 운동 궤적 정합성과 실시간 상태 반영 능력을 독립적으로 평가하는 정량 지표이다. 그러나 실제 수중체계에서의 디지털 트윈 운용 상황은 이 두 요소가 동시에 영향을 미치므로, 단일 지표만으로 디지털 트윈의 성능을 총괄적으로 판단하는 데에는 한계가 있다. 이에 따라 본 연구에서는

운동 정합성과 상태 신선도를 통합 반영한 복합 평가 지표(CFI, Composite Fidelity Index)를 다음과 같이 식 (5)로 정의한다.

$$CFI = \omega_1 \cdot \text{SyncLMKD}_U + \omega_2 \cdot \text{AoDT}_UW \quad (5)$$

여기에서 ω_1, ω_2 는 정규화 가중치 계수이며, $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 을 만족한다. 기본적으로 두 지표는 동일한 스케일 상에서 비교 가능하도록 정규화되어야 하며, 운용 목적에 따라 가중치를 조정할 수 있다.

예를 들어, 경로 추종 정밀도가 중요한 미션에서는 $\omega_1 = 0.7, \omega_2 = 0.3$ 과 같이 운동 정합성에 높은 비중을 둘 수 있고, 상황 인지와 실시간 제어가 핵심인 환경에서는 반대로 $\omega_1 = 0.4, \omega_2 = 0.6$ 과 같이 설정할 수 있다.

CFI는 수치적으로 클수록 정합성이 낮음을 나타내며, 상대 비교를 통해 시나리오별 디지털 트윈의 운용 신뢰성을 종합적으로 평가할 수 있는 기반 지표로 활용 가능하다. 특히 복합 외란 조건, 센서 고장, 통신 지연이 혼합된 복잡한 시뮬레이션 상황에서는 단일 지표 기반 판단보다 CFI 기반 분석이 더 효과적으로 작용할 수 있다.

또한, CFI는 실제 개발/운용 단계에서 다음과 같은 활용 가능성을 가진다.

- 설계 초기 단계에서 구현된 DT 모델의 적정성 판단 기준
- 시뮬레이션 반복 실험 간 성능 개선 정도 정량 비교
- 실기체 연동 실험 전 사전 점검 지표
- 향후 시스템 검증 시 VV&A 또는 기술적 정합성 근거로 활용 가능

이러한 복합 지표는 단순한 정합성 평가를 넘어서, 디지털 트윈의 활용 목적, 응용 도메인, 임무 조건에 따라 가중치를 조절 가능한 유연한 구조를 제공함으로써, 다양한 자율운용 수중체계에의 실질 적용 가능성을 확장시킬 수 있다.

본 연구에서 비교한 실제 시스템과 디지털 트윈

간의 구성 요소 및 출력 항목의 대응 구조는 다음 표 1에 정리되어 있으며, 이는 정합성 평가 지표의 구체적 적용 및 해석 기준으로 활용될 수 있다. 각 구성 요소는 물리 동역학, 제어기 반응, 센서 응답, 통신 특성 등으로 구분되며, 이로부터 생성되는 출력 항목은 위치, 자세, 센서 신호, 지연 특성 등으로 구성된다.

표 1은 이러한 대응 관계를 요약하여 제시함으로써, 정합성 지표별 적용 대상과 비교 구조를 직관적으로 이해할 수 있게 하였다. 이런 내용은 사용 목적에 따라 특정 항목에 가중치를 부여하거나 평가 관점을 유연하게 조정하는 데에도 활용될 수 있다.

V. 적용 시나리오 기반 정합성 평가 예시

본 장에서는 앞서 제안한 디지털 트윈 정합성 평가 지표들이 수중자율운동체(AUV)에 어떻게 적용될 수 있는지를 가상의 시나리오를 통해 설명한다. 수치와 조건은 실제 데이터를 기반으로 한 것이 아니라, 정합성 평가 지표의 적용 흐름을 설명하고 해석 가능성을 제시하기 위한 개념적 사례로 설정된 것이다. 따라서 결과 수치는 해석의 참고용이며, 제안된 지표의 구조적 적용 방식과 상대적 경향 분석에 중점을 둔다. 앞서 4.1~4.3절에서는 궤적 오차(RMSE), 궤적 유사도(DTW), 자세 응답의 상관성, 센서/통신 지연과 같은 기존 정합성 지표들을 검토

하였다. 본 장에서는 이러한 기존 지표들이 갖는 한계를 보완하고, 수중체계의 복합 특성을 반영할 수 있도록 제안된 지표(SyncLMKD_U, AoDT_UW 등)의 적용 흐름과 해석 관점을 중심으로 설명한다.

5.1 평가 대상 및 환경 조건 설정

평가 대상은 수심 50m 내외의 연안 해역에서 운용되는 소형 자율형 수중운동체(AUV)로 가정한다. 임무는 지정된 점열 waypoints)을 따라 이동하면서 수심, 자세, 속도, 위치 등을 안정적으로 유지하는 것이다. AUV는 표준적인 6-DOF 운동 특성을 가지며, 내부 자율제어기(PID 기반)를 통해 각 축의 속도 및 방향을 조절하는 것으로 설정하였다. 본 적용 시나리오에서는 디지털 트윈의 구성 및 정합성 평가에 필요한 물리 환경 조건, 통신 특성, 센서 구성 등을 종합적으로 반영하였다.

표 2는 해당 시나리오에서 가정한 환경 설정 및 평가 요소를 요약한 것이다. 본 조건은 실제 해양시험 환경과 유사한 수준으로 설정하였으며, SyncLMKD-U 및 AoDT-UW와 같은 지표 적용 시의 대표적인 입력 변수로 활용된다.

이러한 조건을 기반으로, 본 장에서는 디지털 트윈 정합성을 4장에서 제안한 세 가지 지표(SyncLMKD-U, AoDT-UW, CFI) 시나리오에 적용하고 해석한다.

표 1. 실제 시스템과 디지털 트윈 구성 요소 및 출력 비교

Table 1. Comparison of real system and digital twin components and outputs

Evaluation aspect	Real system component	Digital twin component	Output variable	Evaluation metric
Dynamics	AUV physical body with hydrodynamic effects	6DOF dynamic model	Position, Velocity	RMSE, DTW (Trajectory Similarity)
Control	Onboard controller (ex. PID)	Virtual controller model	Roll, Pitch, Yaw, Angular Velocity	RMS error, Cross-correlation
Sensor response	IMU, DVL, Depth sensor with real noise	Sensor emulator with simulated noise	Sensor signal time series	Time offset, Signal correlation
Communication	Acoustic modem with latency and packet loss	Communication delay/loss model	Latency, Loss rate	AoDT-UW (Freshness Metric)
Environmental effects	Ocean current, depth, temperature disturbances	Modeled current and disturbance input	Deviation in response under disturbance	Alpha factors in SyncLMKD-U
Overall output	Measured navigation and sensor data	Simulated navigation and sensor data	Combined trajectory and sensor state streams	Composite Fidelity Index (CFI)

표 2. 수중 AUV 운용 시나리오의 주요 조건

Table 2. Operational conditions of the underwater AUV scenario

Category	Condition and description
Operating depth	Approximately 50 meters
Current velocity	Average 0.3 m/s (fluctuation range ± 0.1 m/s)
Communication	Underwater acoustic link
Bandwidth	62.5 kbps (data exchange at 1 Hz rate)
Average latency	Approximately 0.8 seconds
Sensor configuration	IMU, depth gauge, Doppler Velocity Log (DVL)
Sensor sampling rates	IMU: 50 Hz / Depth: 10 Hz / DVL: 5 Hz
DT model components	6-DOF dynamic model, sensor noise/delay model, control model, current field model

본 시나리오에서의 정합성 평가는, 앞서 4장에서 제시한 정합성 평가 구조도를 기반으로 구성된다. 해당 구조를 따라 실세계 AUV 운용으로부터 시작해 센서, 통신, 디지털 트윈 내부 모듈을 거쳐 출력 결과를 생성하고, 이를 다양한 정합성 지표를 통해 비교, 해석한다. 각 평가 지표가 어떤 출력 항목을 기반으로 적용되는지는 그림 1의 각 블록 간 연결 구조를 통해 확인할 수 있다.

본 시나리오는 단일 환경 조건을 기준으로 설정되었으나, 후속 절에서는 해류 세기 변화, 센서 응답 지연 확대 등 다양한 조건 변화에 따른 정합성 민감도 분석 결과도 함께 제시한다.

5.2 SyncLMKD-U를 활용한 운동 정합성 평가

수중 AUV 디지털 트윈의 운동 정합성을 평가하기 위해, 앞서 제안한 SyncLMKD-U 지표를 적용하였다.

시나리오 상에서 AUV는 다중 점열(Waypoints)을 따라 기동하며, 해류에 의한 간헐적 방위 편차가 포함된 상황을 가정하였다. 이때 실제 궤적과 디지털 트윈 궤적 간 평균 위치 오차는 2.1 m, 자세 응답의 RMS 오차는 약 3.5° 수준으로 설정하였다. 해당 조건에서 계산된 SyncLMKD-U 값은 약 18.7로 산출되었다고 가정하였다.

해당 수치는 개념적으로 정합성 수준을 등급화했을 때(0 - 15: 우수, 15 - 30: 보통, 30 이상: 미흡), 보통 수준에 해당한다고 해석할 수 있다. 이는 디지털 트윈이 기본적인 운동 특성은 충실히 모사하고 있으나, 회피 기동이나 고속 방향 전환과 같은 동적 상황에서는 오차가 증가할 수 있음을 시사한다. 여기에서의 등급 구간은 시뮬레이션 결과 및 개념적 민감도 분석 과정에서 확인된 수치 분포의 범위를 참조하여 설정되었으며, 이는 정량적 평가보다는 상대적 해석을 돕기 위한 경험적 구간이다.

예를 들어, 곡선 반경이 5m 이하로 급격히 작아지는 회전 구간에서는 실제 기체의 유체역학적 반응과 디지털 트윈의 모델 간 차이에 의해 일시적인 위치 정합도 저하 현상이 발생할 수 있을 것이다. 이로 인해 고속 회전 시에 수중 유체력에 대한 반응 특성의 차이가 SyncLMKD-U 값의 일시적 상승으로 연결될 수 있다.

따라서 SyncLMKD-U는 단순 궤적 RMSE나 DTW 거리만으로는 알기 어려운 정렬 비율, 반응 시차, 비선형 구간의 민감도 등을 효과적으로 반영할 수 있는 지표로 판단되며, 시뮬레이터 구조의 검증 및 운동 모델 보정 기준으로 활용 가능성이 높다고 볼 수 있다.

5.3 AoDT-UW를 활용한 실시간성 평가

디지털 트윈의 실시간성 정합성을 평가하기 위해, 본 시나리오에서는 AoDT-UW(Age of Digital Twin for Underwater systems) 지표를 적용하였다.

수중 환경의 특성상, 실시간성을 저해하는 주요 요인으로는 통신 지연, 센서 샘플링 주기의 불일치, 디지털 트윈 내부 연산 지연 등이 있다. 이에 따라 본 연구에서는 AoDT-UW 계산 시 이러한 요소들을 반영할 수 있도록, 통신 지연 보정 계수와 센서 주기 기반 보정 계수를 통합 적용하였다.

시나리오 상에서 평균 통신 지연은 0.8초, 주요 센서의 샘플링 주기는 1-20Hz 수준으로 가정되었으며, 디지털 트윈 내 동기화 주기는 1Hz로 제한된 것으로 설정하였다. 이 조건에서 계산된 AoDT-UW 값은 평균 약 3.2초로 산출되었다고 가정하였다.

이는 디지털 트윈이 현실 AUV 상태를 약 3초 지연된 기준으로 반영하고 있음을 의미한다. 이 수치는 일반적인 수중 음향 통신 기반 운용 조건에서는 비교적 수용 가능한 수준이지만, 임계값(예: 5초 이상)을 초과할 경우에는 상태 반영 지연에 따른 판단 오류 가능성이 급격히 증가할 수 있다. 기동성이 높은 상황이나 상태 변화가 빈번한 작전 환경에서는, 지연 누적이 제어 정확도 및 상황 인식 신뢰도에 직접적인 영향을 미칠 수 있다.

이러한 점에서 AoDT-UW는 단순히 통신 지연 시간이나 센서 주기를 나열한 수치가 아니라, 디지털 트윈이 실제 AUV의 상태를 얼마나 시의성 있게 반영하고 있는지를 종합적으로 평가할 수 있는 유효한 지표로 기능함을 시사한다.

5.4 복합 정합성 지표(CFI) 적용 및 해석

앞 절에서 각각 분석한 운동 정합성 지표(SyncLMKD-U)와 실시간성 지표(AoDT-UW)는, 수중 환경 디지털 트윈의 서로 다른 측면을 정량적으로 평가하기 위한 상호보완적인 기준으로 기능한다. 본 절에서는 이 두 지표를 가중 평균 방식으로 통합한 복합 정합성 지표(CFI)를 적용하여, 디지털 트윈의 종합적 성능 수준을 단일 지표로 해석하는 방안을 제시한다.

CFI는 4.4.3에서와 같이 정의 되고, 기본 가중치는 정합성 중심 해석을 위해 $\omega_1 = 0.6, \omega_2 = 0.4$ 로 설정하였다. 이는 수중운동체의 경우 궤적/자세 반응의 정합성이 상대적으로 우선되는 경향을 반영한 선택이며, 상황에 따라 조정 가능하다.

앞서 산출된 결과인 SyncLMKD-U = 18.7, AoDT-UW = 3.2를 적용하면, CFI 값은 식 (6)과 같이 계산된다.

$$CFI = 0.6 \cdot 18.7 + 0.4 \cdot 3.2 = 11.22 + 1.28 = 12.50 \quad (6)$$

산출된 CFI 값은 구성 요소 간 균형성과 반응성 수준을 고려할 때 비교적 안정적인 정합성 수준을 반영하는 것으로 해석될 수 있으며, 동적 회피 기동

이나 장거리 항주와 같은 복잡한 운용 조건에서도 기본적인 정렬성과 실시간 동기화가 일정 수준 확보되어 있음을 보여준다.

CFI는 SyncLMKD-U와 AoDT-UW의 통합 지표로 구성되기 때문에, 단일 지표의 등급 구간을 그대로 적용하기보다는 해당 지표의 특성에 적합한 상대적 기준을 통해 해석하는 것이 바람직하다.

본 지표는 향후 다양한 시나리오 조건 변화(해류, 센서 지연, 통신 상태 등)에 따른 성능 평가 및 개선 효과 비교에 유용하게 활용될 수 있으며, 설계 초기 단계에서 디지털 트윈의 실용성과 활용성을 판단하는 비교 지표로 기능할 수 있다.

5.5 환경 변수 변화에 따른 민감도 분석

디지털 트윈 정합성 지표의 실용성과 유효성을 판단하려면 운용 환경 조건 변화에 따라 지표가 어떤 정량적 경향성을 보이는지를 개념적으로 파악하는 작업이 필요하다. 여기에서는 가상의 수중 운용 시나리오를 기반으로, 대표적인 외란 변수인 해류 속도와 통신 지연의 변화를 중심으로 SyncLMKD-U, AoDT-UW, 그리고 통합 지표인 CFI가 어떻게 반응할 수 있는지를 해석적으로 검토하였다.

우선 해류 속도가 각각 0.1 m/s, 0.3 m/s, 0.5 m/s 수준으로 증가하는 조건을 가정하고, 이에 따른 정합성 지표의 예시적 수치를 개념적으로 설정하였다. 이러한 수치는 시뮬레이션이나 실제 계측 기반의 결과는 아니며, 지표 적용 시의 민감도 해석 흐름과 해석 가능성을 설명하기 위한 목적에서 제시된 것이다. 해당 결과는 다음 표에 정리하였다.

표 3에서 보듯이, 해류 속도가 증가할수록 세 정합성 지표 모두 일정한 비율로 상승하는 경향을 보이는 것으로 가정하였다.

특히 SyncLMKD-U는 곡선 기동이나 저속 정밀 제어 상황에서 외란에 민감하게 반응하는 지표로, 0.5 m/s 수준 이상의 해류 조건에서는 궤적 정렬 및 반응 동기화 측면에서 성능 저하가 발생할 가능성이 높음을 시사한다.

표 3. 해류 속도 변화에 따른 정합성 지표의 변화
Table 3. Variation of fidelity metrics under different current velocities

Current velocity(m/s)	SyncLMKD-U	AoDT-UW (sec)	CFI
0.1	12.4	2.1	8.28
0.3	18.7	3.2	12.5
0.5	27.9	4.8	18.66

AoDT-UW 또한 통신 지연과 상태 갱신 주기에 민감하게 반응하는 특성상, 수중 환경이 불안정해질 수록 디지털 트윈의 정보 갱신이 상대적으로 지연될 수 있음을 개념적으로 나타낸다. 이로 인해 제어기나 판단 로직이 지연된 상태 기준으로 작동할 가능성이 증가하며, 정합성 신뢰도에 영향을 줄 수 있는 요인으로 작용할 수 있다. 이러한 변화는 CFI 지표에도 반영되어, 정합성 전반이 외란 강도에 따라 민감하게 변할 수 있음을 구조적으로 설명해준다.

한편, 수중 환경에서 자주 문제시되는 또 다른 제약 요소로 통신 지연을 들 수 있다. 해류와는 달리, 통신 지연은 물리적 거리, 대역폭 제한, 데이터 재전송 조건 등에 따라 변동하며, 디지털 트윈의 실시간 반영성과 직접적으로 연결된다. 본 연구에서는 개념 검토를 위한 가상 조건을 설정하고, 통신 지연 조건을 0.4초에서 1.2초까지 0.1초 간격으로 변화시키며 정합성 지표의 반응 경향을 분석하였다. 해당 결과는 그림 2에 그래프로 도시하였다.

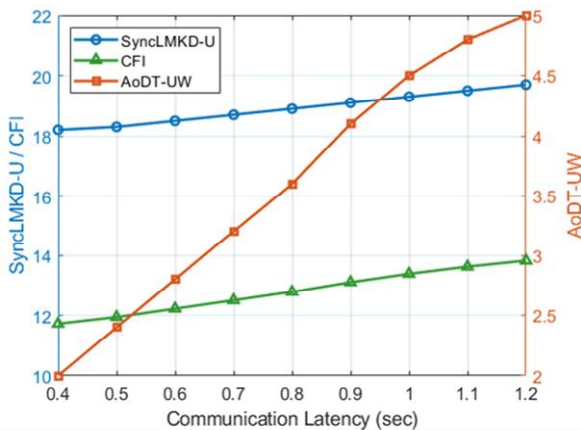


그림 2. 통신 지연 변화에 따른 디지털 트윈 정합성 지표의 민감도 분석 예시

Fig. 2. Sensitivity analysis example of digital twin fidelity metrics under communication latency variations

해당 그래프에서 SyncLMKD-U는 주로 기동 궤적 및 자세 반응 기반의 정합성을 반영하기 때문에 전체적으로 안정적인 값을 유지한다. 반면 AoDT-UW는 통신 지연 증가에 따라 민감하게 상승하며, 실시간 반영 지연에 민감한 특성을 시각적으로 보여준다. CFI는 이 두 요소의 가중 통합 결과로서, 지연 증가에 따라 정합성 저하가 종합적으로 반영되는 경향을 보인다.

사용된 통신 지연 값은 수중 음향 통신 시스템에서 보고되는 일반적인 범위(수백 ms~수 초)를 기반으로 설정되었으며, 정합성 지표의 상대 민감도 특성과 평가 프레임의 해석 가능성을 확인하기 위한 개념적 예시로 제시되었다.

이상과 같이, 해류 속도와 통신 지연이라는 두 가지 대표적 환경 제약 요소에 대한 정합성 지표 반응 분석을 통해, SyncLMKD-U와 AoDT-UW가 각각의 영향을 어떤 방식으로 수용하고 반영하는지를 확인할 수 있었다. 전자는 기동 정렬성 기반의 반응성을, 후자는 실시간 동기화 중심의 반응성을 강조하며, CFI는 이 둘을 통합하여 다양한 운용 조건 하에서도 정합성 수준을 종합적으로 평가할 수 있는 구조임을 보여준다.

본 절의 결과는 개별 수치 자체보다는 정합성 지표의 상대 민감도 해석과 운용 변수 변화에 따른 구조적 반응 특성을 드러내는 데 중점을 두었다. 이러한 분석은 지표의 절대적 성능을 단정하는 것이 아니라, 개념적 해석 구조를 제시하고 그 반응 경향을 정량적으로 살펴보는 데 목적이 있으며, 향후에는 다양한 시나리오 및 기존 지표들과의 비교 적용을 통해 평가 프레임의 확장성과 실효성을 보다 체계적으로 검토해나갈 예정이다. 이러한 과정을 통해 제안된 정합성 평가 프레임워크는 수중 체계 운용에서 다양한 제약 요소를 고려할 수 있는 분석 기반으로 실질적 활용 가능성을 갖는다.

VI. 결 론

본 연구에서는 수중체계 디지털 트윈의 정합성을 정량적으로 평가하기 위한 새로운 지표 체계를 제안하였다. 기존의 RMSE, 지연 시간 등 단편적인 수치 기반 평가에서 벗어나, 궤적 동기화 정합성

(SyncLMKD-U), 실시간 정보 반영성(AoDT-UW), 그리고 이를 통합한 복합 지표(CFI)를 도입함으로써 디지털 트윈의 전체적인 재현 능력과 실시간성 수준을 함께 평가할 수 있는 구조를 제시하였다.

제안된 지표들은 단순 오차 측정을 넘어, 외란 조건(해류), 제어 지연, 통신 상태 등의 요소를 포함한 수중환경 특화 정합성 분석이 가능하다는 점에서 기존 방법론 대비 실용성과 해석력이 향상된 것으로 평가된다. 특히, 기존의 전통적인 지표들과 병행하여 활용될 경우, 단순한 오차 정량화뿐만 아니라 비선형 응답, 환경 기반 지연, 복합적 동기화 능력 등 실환경 유사성 판단에 있어 보완적 역할을 수행할 수 있는 장점이 있다.

또한 가상의 시나리오를 통해 적용 예시를 제시하였으며, 환경 조건 변화에 따른 민감도 분석을 통해 지표들의 상대적 반응성과 해석 가능성도 검토하였다. 아울러 본 연구에서 제안한 정합성 지표들은, 3장에서 제시한 재현성, 예측성, 운용성의 평가 기준과도 개념적으로 대응되며, 수중 환경 특성에 맞춘 정량적 검증 체계를 구성하는 데 실질적 기준점으로 활용될 수 있다.

하지만 본 연구는 실측 데이터를 기반으로 하지 않은 개념 검증 수준의 평가 구조에 머무르고 있으며, 정확한 수치 기준의 일반화 또는 표준화에는 한계가 존재한다. 따라서 향후에는 다음과 같은 방향의 확장이 필요하다.

- 실제 AUV 시험 데이터를 기반으로 한 지표 적용 사례 추적 및 성능 기준 보정
- 해저 지형/해류/통신 환경을 포함한 복합 시나리오 내 반복 평가 구조 정립
- SyncLMKD_U와 AoDT_UW의 정규화 방법 고도화 및 자동 가중치 최적화 연구
- 자율 제어기(AI 기반 포함)와의 연동성을 고려한 실시간 정합성 평가 프레임 확장

본 연구에서 제안한 정합성 평가 지표 프레임은 단순한 시뮬레이션의 성능 검토를 넘어서 디지털 트윈 기반 수중체계의 설계, 검증, 운영 전반에 걸쳐 활용 가능한 정량적 기준점을 제공할 수 있다는 점에서 의미가 있으며, 향후 자율운용 플랫폼 개발 및 디지털 트윈 신뢰성 확보를 위한 기반 기술로서의 실용 가능성을 기대할 수 있다.

References

- [1] UK-RAS Network, "Digital Twins for Marine Operations: From Surface to Deep Water", <https://www.ukras.org.uk/publications/digital-twins-for-marine-operations>. [accessed: May 02, 2025].
- [2] X. Zhang, Y. Li, and L. Wang, "Design and Implementation of Digital Twin System for Underwater Vehicles", *Atlantis Highlights in Engineering*, Atlantis Press, Vol. 14, pp. 67-71, May 2021. <https://doi.org/10.2991/ahe.k.210527.013>.
- [3] Defense Acquisition University (DAU), "Defense Modeling & Simulation Verification, Validation, & Accreditation (VV&A)", <https://www.dau.edu/tools/defense-m-and-s-vva>. [accessed: May 02, 2025].
- [4] Defense Systems Information Analysis Center (DSIAC), "What Makes a Simulation Credible? Cost-Effective VV&A in Defense Applications", <https://dsiac.dtic.mil/technical-inquiries/view/what-makes-a-simulation-credible>. [accessed: May 02, 2025].
- [5] Department of Defense Office of the Secretary of Defense, "Modeling & Simulation for Test and Evaluation - Guidance", <https://www.dote.osd.mil/pub/reports/FY2019/pdf/dod/2019guidance.pdf> [accessed: May 02, 2025].
- [6] F. O. Adetunji, N. Ellis, M. Koskinopoulou, I. Carlucho, and Y. R. Petillot, "Digital Twins Below the Surface: Enhancing Underwater Teleoperation", *Proc. of OCEANS 2024 - Singapore*, Singapore, Singapore, Apr. 2024. <https://doi.org/10.1109/OCEANS51537.2024.10682270>.
- [7] A. Barbie, N. Pech, W. Hasselbring, S. Flögel, F. Wenzhöfer, M. Walter, E. Shechkinova, M. Busse, M. Türk, M. Hofbauer, and S. Sommer, "Developing an Underwater Network of Ocean Observation Systems with Digital Twin Prototypes - A Field Report from the Baltic Sea", *IEEE Internet Computing*, Vol. 26, No. 3, pp. 45-54, May 2022. <https://doi.org/10.1109/MIC.2021.306524> 5.
- [8] D. Menges and A. Rasheed, "Digital Twin for

Autonomous Surface Vessels - Capability Levels and Syncing Challenges", arXiv preprint arXiv:2411.03465, Nov. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.03465>.

- [9] F. S. Cardoso, T. de S. Araújo, R. F. Rohrich, and A. S. de Oliveira, "Modeling, Evaluation and Metrics Performance of the SyncLMKD in Distributed Kinematics Variations", Scientific Reports, Vol. 15, No. 635, Mar. 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84997-7>.
- [10] G. Khalaf, M. Itani, and S. Sharafeddine, "A UAV-Aided Digital Twin Framework for IoT Networks with High Accuracy and Synchronization", arXiv preprint arXiv:2504.15967, Apr. 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.15967>.

저자소개

김 현 승 (Hyunseung Kim)



2014년 2월 : 인하대학교
항공우주공학과(공학사)
2016년 2월 : 인하대학교
항공우주공학과(공학석사)
2016년 1월 ~ 현재 :
LIG넥스원 선임연구원
관심분야 : 비행 제어 및 유도,
Modeling & Simulation, 딥러닝

정 동 민 (Dongmin Jeong)



2008년 2월 : 경북대학교
전자전기컴퓨터학부(공학사)
2010년 2월 : 경북대학교
전자전기컴퓨터학부(공학석사)
2010년 1월 ~ 현재 :
LIG넥스원 수석연구원
관심분야 : Signal Processing,
Sonar, Modeling & Simulation

현 철 (Chul Hyun)



2001년 2월 : 서울대학교
전기공학부(공학사)
2011년 2월 : 서울대학교
전기컴퓨터공학부(공학박사)
2011년 2월 ~ 현재 :
LIG넥스원 수석연구원
관심분야 : M&S 효과도분석,
항법유도제어, AUV, 우주감시

김 동 건 (Donggeon Kim)



2009년 2월 : 중앙대학교
기계공학부(공학사)
2011년 2월 : 중앙대학교
기계공학부(공학석사)
2016년 8월 : 중앙대학교
기계공학부(공학박사)
2016년 3월 ~ 현재 : LIG넥스원

수석연구원
관심분야 : 적외선, 열전달 M&S, Generative AI