

# 드론 시뮬레이션과 디지털 트윈 통합: 현황 분석 및 기술적 과제

문수영\*

배재대학교 신기술혁신융합대학사업단 연구원

## Integration of Drone Simulation and Digital Twin: Current Status Analysis and Technical Challenges

Sooyoung Moon\*

Researcher, Convergence and Open Sharing System Immersive Media, Pai Chai University

**요약** 드론 기술의 효과적인 운영을 위한 디지털 트윈 기술의 중요성이 증대되고 있다. 디지털 트윈 기술은 실제-가상 드론 간 실시간 통신을 기반으로 드론의 미래 상태를 예측함으로써 현 상황에 맞는 제어를 가능케 한다. 본 연구는 2020년부터 2025년까지 출판된 드론 시뮬레이션에서의 디지털 트윈 통합에 관한 25편의 학술 논문을 분석하고 연구 동향, 기술적 접근법, 응용 분야, 기술적 과제 및 추후 연구 방향을 도출하였다. 본 연구는 다섯 가지 주요 기술적 과제를 도출하였다: (1) Sim-to-Real 격차 최소화, (2) 확장성 및 대규모 시스템 관리, (3) 표준화 부재, (4) 보안 및 프라이버시, (5) 검증 및 인증 체계 미비. 이를 해결하기 위한 향후 연구 방향으로 지능형 적응 동기화 메커니즘, 분산 디지털 트윈 프레임워크, 물리-데이터 하이브리드 모델, 실시간 이상 탐지 및 예측 유지보수, 표준화 및 오픈소스 생태계 구축, 보안 강화 및 프라이버시 보호를 제시하였다. 본 연구는 드론 시뮬레이션에서의 디지털 트윈 통합 기술의 현황을 체계적으로 정리하고, 향후 연구가 나아가야 할 방향을 제시함으로써 이 분야의 학술적·실용적 발전에 기여할 것으로 기대된다.

**주제어** : 드론 시뮬레이션, 디지털 트윈, 무인 항공기, 실시간 동기화, 항공 교통 관리

**Abstract** The importance of digital twin technology for the rapid advancement of drone technology and effective operations is increasing. Digital twin technology, based on real-time communication between physical and virtual drones, enables context-appropriate control by predicting the drone's future state. This study analyzes 25 academic papers published between 2020 and 2025 on digital twin integration in drone simulation, deriving research trends, technical approaches, application domains, technical challenges, and future research directions. This study identifies five major technical challenges: (1) minimizing Sim-to-Real gap, (2) scalability and large-scale system management, (3) lack of standardization, (4) security and privacy concerns, and (5) insufficient verification and certification frameworks. To address these challenges, future research directions are proposed: intelligent adaptive synchronization mechanisms, distributed digital twin frameworks, physics-data hybrid models, real-time anomaly detection and predictive maintenance, standardization and open-source ecosystem development, and enhanced security and privacy protection. This research systematically organizes the current state of digital twin integration technology in drone simulation and presents directions for future research, thereby contributing to both academic and practical advancement in this field.

**Key Words** : Digital Twin, Drone Simulation, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Real-time Synchronization, Sim-to-Real

\*교신저자 : 문수영(symoon@pcu.ac.kr)

접수일 2025년 10월 07일

수정일 2025년 10월 21일

심사완료일 2025년 10월 23일

## 1. 서론

무인항공기 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 또는 드론 기술의 급속한 발전으로 인해 건설, 농업, 국방, 물류 등 다양한 산업분야에서 혁신이 이뤄지고 있다. 글로벌 드론 시장은 2024년 730억 달러에서 2030년 1,636억 달러로 성장할 것으로 전망되며, 연평균 14.3%의 높은 성장률을 보이고 있다[1]. 이러한 급속한 시장 확대와 함께 드론 시스템의 복잡도가 증가하면서, 효과적인 시뮬레이션 및 검증 환경의 필요성이 더욱 커지고 있다.

한편 디지털 트윈은 물리적 객체와 가상 모델 간의 양방향 데이터 교환을 통해 실시간 모니터링, 예측 분석, 시스템 최적화를 가능케 하는 기술이다 [2]. NASA는 디지털 트윈을 "복잡한 시스템의 수명주기를 복제하기 위해 최상의 물리 모델과 센서 업데이트를 활용하는 다중 물리, 다중 스케일, 확률론적 시뮬레이션"으로 정의하고 있다[3]. 이러한 디지털 트윈 기술은 제조업, 건설업, 스마트 시티 등 다양한 분야에서 성공적으로 적용되고 있으며, 최근 드론 시뮬레이션 분야로 그 적용 범위를 확장하고 있다.

드론 시뮬레이션과 디지털 트윈 기술 간 통합의 중요성은 크게 3가지로 요약할 수 있다. 첫째, 전통적인 시뮬레이션 방식이 겪는 'Sim-to-Real 격차' 문제를 완화할 수 있다. 시뮬레이션 환경에서 우수한 성능을 보이던 제어 알고리즘이 실제 드론에 적용될 때 성능이 저하되는 현상은 드론 개발의 주요 장애물로 지적되어 왔다[4]. 디지털 트윈은 물리적 드론과 가상 모델 간의 지속적인 동기화를 통해 이러한 격차를 줄일 수 있다.

둘째, 드론의 전체 수명주기 관리가 가능하다. 설계 단계에서부터 제조, 운용, 유지보수, 폐기에 이르기까지 모든 단계에서 디지털 트윈을 활용하여 성능을 예측하고 최적화할 수 있다[5]. 특히 예측 유지보수(Predictive Maintenance)를 통해 고장을 사전에 방지하고 운영 효율성을 극대화할 수 있다.

셋째, 실제 운용 중인 드론의 개별적 특성을 반영한 정확한 상태 파악이 가능하다. 제조 편차, 사용 이력, 부품 노화 등 개별 드론만의 고유한 특성을 디지털 트윈에 반영함으로써, 일반적인 드론이 아닌 '이 특정 드론'의 정확한 현재 상태와 미래 성능을 예측할 수 있다[6]. 이는 예측 유지보수, 맞춤형 성능 최적화, 실시간 운영의 사결정을 가능하게 한다.

현재 드론 시뮬레이션에서 디지털 트윈 통합에 관한 연

구가 이루어지고 있으나, 이를 종합적으로 분석한 연구는 부족한 실정이다. 특히 기존 연구에서 어떤 기술적 접근법이 사용되고 있으며, 어떤 과제가 해결되지 않았는지에 대한 체계적 정리가 필요하다. 따라서 본 연구는 드론 시뮬레이션에서 디지털 트윈 기술 통합의 현황을 분석하고 주요 기술적 과제를 도출함으로써, 이 분야의 발전 방향을 제시하는 것을 목적으로 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 디지털 트윈 기술과 드론 시뮬레이션의 기본 개념 및 관련 연구를 고찰한다. 3장에서는 드론 시뮬레이션과 디지털 트윈 통합 연구 동향, 기술적 접근법, 응용 분야, 그리고 주요 과제를 다룬다. 4장에서는 주요 발견사항을 논의하고 향후 연구 방향을 제안한다.

## 2. 배경 이론

### 2.1 드론 시뮬레이션

드론 시스템 개발과 운영에서 비행 테스트를 이용한 방식은 다음과 같은 한계를 가진다

- 안전 위험: 알고리즘 오류나 하드웨어 결함으로 인한 추락 위험이 존재하며, 이는 장비 손실뿐만 아니라 인명 피해로 이어질 수 있다
- 높은 비용: 프로토타입 제작, 테스트 시설 운영, 테스트 수행 과정에서 많은 시간과 비용이 소모된다
- 환경적 제약: 날씨, 비행 허가 구역, 비행 시간 등 외부 요인에 의해 테스트가 제한된다
- 재현성 부족: 동일 조건을 정확히 재현하기 어렵다
- 확장성: 다수 드론을 동시에 테스트하거나 대규모 시나리오를 구현하기 어렵다

시뮬레이션은 위 한계를 극복하고 개발 주기 단축과 비용 절감을 위한 효과적 대안을 제공한다[48, 49]. 드론 시뮬레이션은 목적과 충실도 (fidelity)에 따라 <Table 1>과 같이 여러 유형으로 구분된다.

<Table 1> Types of Drone Simulation

| Type          | Characteristics                                     | Advantages                        | Disadvantages           |
|---------------|---|-----------------------------------|-------------------------|
| SIL           | Software-only simulation for algorithm verification | Fast iteration, low cost          | No hardware reflection  |
| HIL           | Flight controller integrated with simulator         | Hardware timing & sensor fidelity | No physical dynamics    |
| Physics-based | Precise aerodynamics & motor modeling               | High fidelity                     | High computational cost |

Software-In-the-Loop (SIL) 시뮬레이션은 알고리즘 검증에 대해 실제 하드웨어 없이 소프트웨어를 이용하는 시뮬레이션이며 빠른 반복 실험이 가능하고 비용이 저렴하다는 장점이 있으나 실제 하드웨어 특성을 반영할 수 없다는 단점이 있다. Hardware-In-the-Loop (HIL) 시뮬레이션은 실제 비행제어 하드웨어와 연동되는 시뮬레이션으로 하드웨어의 동작 타이밍과 센서 특성을 반영할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 물리적 특성을 정밀하게 반영하기는 어렵다. 물리 엔진 기반 (Physics-based) 시뮬레이션은 높은 수준의 충실도, 즉 가상 모델의 현실 반영 정도를 제공하지만 높은 연산 비용이 소모된다. 현재 사용되는 주요 드론 시뮬레이션 플랫폼의 특징은 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Comparison of Drone Simulation Platforms

| Platform       | Physics Engine       | Key Features   | License                  |
|----------------|----------------------|--|--------------------------|
| AirSim [12]    | PhysX                | High-quality rendering, ROS support                      | MIT                      |
| Gazebo [13]    | ODE/Bullet           | ROS integration, robot simulation                        | Apache 2.0               |
| jMAVSim        | Custom physics model | Lightweight simulator with fast execution and easy setup | BSD 3-Clause             |
| Isaac Sim [14] | PhysX                | AI training data generation                              | NVIDIA Developer License |

드론 시뮬레이션에 있어서 한계점은 “Sim-to-real 격차 (Gap)”이다. 이는 시뮬레이션 환경에서 우수한 성능을 보이던 제어 알고리즘이나 자율 비행 모델이 실제 드론에 적용될 때 성능이 크게 저하되는 현상을 말한다 [14]. Sim-to-real 격차의 주요 원인은 크게 모델링 불완전성, 모의/실제 센서 값 차이, 환경 요인 등이 있다.

## 2.2 디지털 트윈

디지털 트윈(Digital Twin)은 물리적 객체, 프로세스, 또는 시스템의 가상 복제본으로, 실시간 데이터와 시뮬레이션을 결합하여 물리 세계와 디지털 세계를 연결하는 기술이다[4]. Grieves는 2002년 미시간 대학교에서 제품 수명주기 관리(Product Lifecycle Management, PLM) 강의 중 디지털 트윈 개념을 처음 제안하였으며, 이는 물리적 제품, 가상 제품, 그리고 이들 간의 연결로 구성된 세 가지 요소로 정의되었다[5].

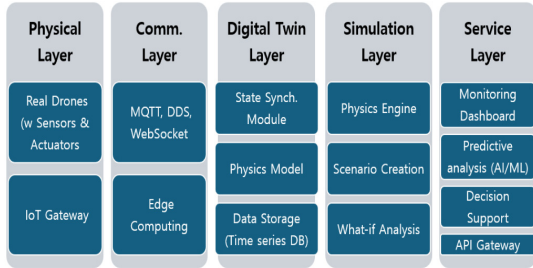
NASA는 디지털 트윈을 "복잡한 시스템의 전체 수명 주기를 복제하기 위해 최상의 물리 모델, 센서 데이터 업데이트, 역사적 데이터를 통합하는 다중 물리, 다중 스케일, 확률론적 시뮬레이션"으로 정의하고 있다[6]. 이 정의는 디지털 트윈이 단순한 3D 모델이나 시뮬레이션을 넘어서는 개념임을 강조한다. 디지털 트윈의 핵심 특징은 다음과 같다:

- 양방향 실시간 통신: 물리적 객체에서 가상 모델로 센서 데이터가 전송되고, 가상 모델에서 물리적 객체로 제어 명령이 전달되는 양방향 데이터 흐름이 실시간으로 이루어진다[7].
  - 개별성(Individuality): 디지털 트윈은 일반적인 모델이 아닌 특정 물리 객체의 고유한 특성(제조 편차, 사용 이력, 노화 상태)을 반영한다[8].
  - 동적 업데이트: 물리적 객체의 상태 변화에 따라 디지털 모델이 지속적으로 업데이트되며, 시간에 따른 변화를 추적한다[9].
  - 예측 및 최적화: 실시간 데이터와 물리 모델을 결합하여 미래 상태를 예측하고 운영을 최적화한다[10].
- Tao 등[7]은 디지털 트윈의 핵심 구성 요소는 1) 물리적 객체, 2) 가상 모델, 3) 물리-가상 간 연결, 4) 실시간 센서 데이터, 그리고 5) 모니터링, 예측 및 최적화 등의 서비스이다. 디지털 트윈 기술은 성숙도에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다[9].

- Level 0: 디지털 모델 (Digital Model)
  - 물리 객체 - 디지털 모델 간 자동화된 통신 없음
  - 수동 데이터 입력
  - 정적 CAD 모델
- Level 1 - 디지털 새도우 (Digital Shadow)
  - 물리 객체 → 디지털 모델 자동 데이터 흐름
  - 실시간 모니터링 가능
  - 예: 센서 대시보드
- Level 2 - 디지털 트윈 (Digital Twin)
  - 양방향 자동 데이터 교환
  - 디지털 모델의 변경이 물리 객체에 영향
  - 예: 자동 제어 시스템
- Level 3 - 자율 디지털 트윈 (Autonomous Digital Twin)
  - AI 기반 자율 의사결정
  - 예: 자율 최적화 시스템

### 2.3 드론 시뮬레이션에서의 디지털 트윈 통합

드론 시뮬레이션과 디지털 트윈 기술의 결합은 1) Sim-to-Real 격차 감소, 2) 예측 정확도 향상, 3) 실시간 의사결정 지원, 4) 안전 강화 측면에서 효과적이다. [Fig 1]은 드론 시뮬레이션에서 디지털 트윈을 통합하는 일반적인 아키텍처를 보여 준다.



[Fig. 1] Digital Twin Architecture

드론 시뮬레이션 -디지털 트윈 통합 핵심 기술 요소는 다음과 같다.

- 실시간 상태 동기화: 물리적 드론과 디지털 모델 간의 상태 일치 유지
- 데이터 융합: 다중 센서 데이터를 융합하여 더 정확하고 신뢰할 수 있는 상태 추정을 수행
- 모델 보정 (Calibration): 초기 시뮬레이션 모델과 실제 드론의 동작 차이를 측정하고, 모델 파라미터 자동조정

드론 시뮬레이션과 디지털 트윈 융합에서 실시간 상태 동기화(Real-time State Synchronization)는 물리적 드론과 가상의 디지털 트윈 모델 간에 센서 데이터와 상태 정보를 지속적으로 교환하여 양방향으로 일치시키는 핵심 프로세스이다. 실제 드론으로부터 수집된 위치, 속도, 자세, 배터리 상태 등의 센서 데이터를 실시간으로 디지털 트윈에 전송하여 가상 모델을 갱신하고, 동시에 시뮬레이션 환경에서 예측된 미래 상태나 최적화된 제어 명령을 물리적 드론에 피드백함으로써 양자 간의 상태를 동기화한다. 이러한 실시간 양방향 동기화는 드론의 현재 상황을 정확히 모니터링하고, 잠재적 위험을 사전에 감지하며, 최적의 비행 경로나 제어 전략을 즉각 적용할 수 있게 하여 드론 운영의 안전성과 효율성을 향상시킬 수 있다.

〈Table 3〉은 실시간 상태 동기화 과정을 보여주는 의사 코드를 나타낸다.

〈Table 3〉 Pseudo code for realtime state synchronization

```

while drone_is_operating:
    sensor_data = receive_from_physical_drone()
    digital_twin.update_state(sensor_data)
    simulation.synchronize(digital_twin.state)
    predicted_state = simulation.predict_future(horizon=10s)
    if anomaly_detected(predicted_state):
        alert_operator()
    if optimization_needed():
        command = generate_optimal_command()
        send_to_physical_drone(command)
    
```

## 3. 드론 시뮬레이션 디지털 트윈 통합 현황 분석

### 3.1 연구 동향 분석

2020년부터 2025년까지 드론 시뮬레이션과 디지털 트윈 통합 관련 25편 논문 출판 동향을 살펴보았다. 〈Table 4〉는 그에 따른 연도별 출판 논문 수를 보여 준다.

〈Table 4〉 Research topics for Drone simulation - Digital Twin integration

| Year | Num. of Papers | Ratio | Cumulative number of papers |
|------|----------------|-------|-----------------------------|
| 2020 | 2              | 12.0% | 2                           |
| 2021 | 4              | 20.0% | 6                           |
| 2022 | 7              | 24.0% | 13                          |
| 2023 | 7              | 24.0% | 20                          |
| 2024 | 4              | 16.0% | 24                          |
| 2025 | 1              | 4.0%  | 25                          |

조사된 25편의 논문들에 대해 연도별 출판 논문 수는 2020년 2편에서 2022-2023년에 각각 7편으로 정점을 이루었으며, 연평균 43%의 높은 성장률을 보였다. 2024년 이후 다소 감소한 것은 연구 분야가 초기 탐색 단계를 지나 성숙 단계로 진입하면서, 개념적 연구보다는 실증적 검증과 표준화 연구로 초점이 이동하고 있음을 시사한다. 조사된 논문들을 대상으로 주요 연구 주제에 따라 분류한 결과는 〈Table 5〉와 같다.

〈Table 5〉 Research Topics for Drone Simulation and Digital Twin

| Research Topic                 | Paper Numbers                            | Count (Ratio) | Key Content  |
|--------------------------------|--|---------------|--|
| System Architecture & Platform | [23], [24], [26], [31], [34], [43], [47] | 7 (28%)       | Digital twin frameworks, integrated platform design            |
| Specific Applications          | [27], [36], [38], [40], [42], [45]       | 6 (24%)       | Swarm flight, UTM, environmental monitoring, propulsion design |
| Path Planning & Control        | [29], [30], [37], [39]                   | 4 (16%)       | Trajectory optimization, flight control algorithms             |
| Communication & Networking     | [28], [32], [33], [35], [38], [41]       | 4 (24%)       | 5G/edge computing, wireless network simulation                 |
| Security & Reliability         | [25], [36]                               | 2 (8%)        | Cybersecurity, anomaly detection                               |
| Training & Validation          | [44], [46]                               | 2 (8%)        | Pilot training, simulator development                          |

\*Some papers cover multiple topics, resulting in totals exceeding 100%

〈Table 5〉 분류 결과를 보면 시스템 아키텍처 연구 (28%) 가 우세한 것으로 나타났다. 이는 드론 디지털 트윈 통합 분야가 아직 기술적 기반을 구축하는 단계임을 보여준다. 대부분의 아키텍처 연구는 모듈화, 확장성, 상호운용성을 핵심 설계 원칙으로 제시하고 있다. 또한 통신 및 네트워킹 연구 (24%)가 급증하였으며 이는 5G 상용화와 엣지 컴퓨팅 기술의 발전이 영향을 미친 것으로 보인다. 특히 이 분야에서는 실시간 데이터 동기화와 저지연 통신에 대한 요구가 증가하고 있다. 주목할 점으로 AI/ML 통합 연구가 증가하고 있으며 드론의 안전 및 보

〈Table 6〉 Distribution of Papers by Research Methodology

| Research Methodology  | Paper Numbers  | Count (Ratio) | Key Content                                    |
|-----------------------|--|---------------|--|
| Experimental Research | [23], [24], [29], [32], [35], [37], [39], [40], [41], [42], [46], [47] | 12 (48%)      | Prototype implementation, empirical validation |
| Simulation Research   | [25], [28], [30], [31], [33], [36], [43]                               | 7 (28%)       | Virtual environment testing                    |
| Theoretical Research  | [26], [27], [34]   | 3 (12%)       | Framework proposal, concept establishment      |
| Survey/Review         | [44], [45]   | 2 (8%)        | Systematic literature review                   |
| Hybrid                | [36], [38]   | 2 (8%)        | Real + simulation combination                  |

\*Some papers cover multiple topics, resulting in totals exceeding 100%

안이 중요함에도 보안 연구 (8%)가 상대적으로 부족한 것으로 나타났다. 위 논문들을 연구 방법론 면에서 분류한 결과는 〈Table 6〉과 같다.

〈Table 6〉에서 실험적 연구 (48%)가 가장 높은 비중을 차지하는 것은 이 분야가 실용적 적용을 중시하며, 개념의 타당성을 실제 시스템을 통해 입증하려는 경향이 강함을 보여준다. 다음으로 시뮬레이션 연구 (28%)는 가상 환경에서 시나리오 테스트를 수행함으로써 비용 효율적으로 위험 없이 다양한 조건 평가가 가능하다.

### 3.2 기술적 접근법 분석

드론 시뮬레이션과 디지털 트윈 간 통합 연구 관련 논문들의 기술적 접근법은 크게 디지털 트윈 통합 아키텍처와 실시간 동기화 메커니즘 관점에서 분석 가능하다. 분석된 25편의 논문들 중 아키텍처를 명시하지 않은 11편을 제외한 14편의 논문들에서 제시된 디지털 트윈 통합 아키텍처를 주요 패턴 별로 구분한 결과는 〈Table 7〉과 같다.

〈Table 7〉 System Architecture Pattern Distribution

| Architecture Type    | Paper Numbers                | Count (Ratio) | Characteristics                     |
|----------------------|------------------------------|---------------|-------------------------------------|
| Edge Computing-based | [29], [32], [35], [38], [41] | 5 (35.7%)     | Low latency, local processing       |
| Cloud-based          | [23], [26], [27], [34]       | 4 (28.6%)     | Scalability, centralized management |
| Hybrid               | [24], [36], [43], [47]       | 4 (28.6%)     | Hierarchical processing             |
| Onboard Processing   | [37]                         | 1 (7.1%)      | Full autonomy                       |

\*11 papers do not specify architecture

1) 엣지 컴퓨팅 기반 아키텍처 (35.7%)는 클라우드에 연결된 엣지 서버에서 실행되는 디지털 트윈 인스턴스와 드론 간 연동을 특징으로 하며 실시간 응답성을 제공하는 방식이다. 이 때 엣지 서버에서 실행되는 디지털 트윈 인스턴스는 실시간 상태 동기화, 물리 시뮬레이션, 즉각적 의사결정, 로컬 데이터 처리 등을 수행한다. 엣지 컴퓨팅 기반 아키텍처는 클라우드 기반 아키텍처에 비해 평균 지연시간이 더 짧고 오프라인 작동이 가능하며, 네트워크 의존도가 낮다는 장점이 있다. 2) 클라우드 기반 아키텍처 (28.6%)는 클라우드 상에서 디지털 트윈 서비스가 실행되며, 대규모 드론 관리와 고도화된 분석이 필요한 경우에 적합한 방식이다. 클라우드 기반 방식의 장점은 높은 확장성, 빅데이터 또는 AI 활용 용이, 네트워

크를 통한 접근 가능 등이 있다. 그러나 옛지 컴퓨팅 방식에 비해 높은 네트워크 지연, 높은 통신 비용과 네트워크 의존성, 보안/프라이버시 우려 등의 단점도 존재한다. 3) 하이브리드 아키텍처는 클라우드와 옛지 컴퓨팅 방식의 장점을 결합한 계층적 아키텍처이다. 즉 클라우드 계층에서는 장기적 분석과 최적화, 다수 드론 (fleet) 관리, 모델 훈련 등을 수행하며, 옛지 계층에서는 실시간 디지털 트윈 인스턴스를 실행하고 로컬 의사결정과 비행 제어 등을 수행하는 방식이다. 즉 옛지 컴퓨팅 방식의 실시간성과 클라우드 컴퓨팅 방식의 고도화된 분석 기능이 결합된 방식이다. 4) 온보드 처리 방식은 모든 처리가 드론 내부에서 이루어지는 방식을 의미하며, 외부 통신 의존도가 최소화 또는 제거되고 완전히 자율적으로 동작 가능한 방식이다.

실시간 상태 동기화는 디지털 트윈이 적용된 드론 시뮬레이션에 있어 핵심 기능으로, 동기화 방법에 따라 이벤트 기반, 주기적 전송, 적응형, 델타 인코딩 등으로 분류 가능하다. <Table 8>은 분석된 논문들 중 동기화 방법이 명시된 13편의 논문에 대한 동기화 방법 채택 현황을 나타낸다.

<Table 8> Adoption Status of Synchronization Methods

| Synchronization Method | Paper Numbers                | Count (Ratio) | Characteristics                  |
|------------------------|------------------------------|---------------|----------------------------------|
| Event-based            | [23], [25], [29], [36], [38] | 5 (38.5%)     | Transmission on change detection |
| Periodic Transmission  | [24], [32], [37], [39], [47] | 5 (38.5%)     | Fixed interval transmission      |
| Adaptive               | [35], [41]                   | 2 (15.4%)     | Dynamic interval adjustment      |
| Delta Encoding         | [43]                         | 1 (7.7%)      | Transmission of changes only     |

이벤트 기반 동기화는 주요 상태 변화가 발생했을 때만 데이터를 전송하여 대역폭을 효율적으로 사용하는 방식이다. 주기적 전송은 고정된 시간 주기로 전체 상태를 전송하여 일관성을 보장하는 방식으로, 네트워크 대역폭을 효율적으로 사용하며, 중요 이벤트에 즉각 대응 가능하고 배터리 소모량을 줄일 수 있다는 장점이 있다.

그러나 임계값 설정이 어렵고, 임계값 이하의 작은 변화가 점진적으로 일어날 경우 상태 업데이트가 늦어져 디지털 트윈과 실제 드론 간 상태 차이가 커질 수 있다. 또한 이벤트가 동시 다발적으로 발생할 때 네트워크 사용량이 늘어남에 따른 일부 패킷 지연/손실 발생이 가능

하다는 단점도 존재한다. 주기적 전송 방식은 고정된 시간 간격으로 전체 상태를 전송하는 방식으로, 지연시간이 예측 가능하고 구현이 간단하며, 디지털 트윈과 실제 드론 간 상태 차이가 동기화 주기 이내로 제한되고 모든 데이터 전송으로 인한 데이터 무결성이 확보된다는 장점이 있다. 그러나 높은 대역폭 소비, 불필요한 데이터 전송으로 인한 배터리 사용량 증가 등의 단점이 있다.

적응형 동기화 방식은 드론의 드론의 비행 상태, 네트워크 품질, 임무 단계 등에 따라 동기화 주기를 동적으로 조정하는 방식이다. 해당 방식은 필요에 따라 동기화 주기를 조절하며 상황별 최적 품질을 제공하고 자원 사용을 최적화 한다. 또한 네트워크 안정성과 확장성이 향상된다는 장점도 제공한다. 그러나 알고리즘이 복잡하고 파라미터 튜닝이 어려우며 문제 상황 발생 시 디버깅이 어렵다는 단점이 존재한다. 델타 인코딩은 실제 드론과 디지털 트윈 간 데이터 전달 시, 전체 상태가 아닌 '이전 상태로부터의 변화(델타)' 전송하며 이를 통한 네트워크 대역폭의 효과적 사용, 저대역폭 환경에 적합, 상태 변화 패턴 분석에 용이하다는 장점이 있다 그러나 패킷 손실에 취약하고 오차 누적이 발생하며 구현이 복잡하다는 단점이 있다.

### 3.3 응용 분야별 분석

디지털 트윈과 드론 시뮬레이션 통합 기술은 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다. 분석된 25편의 논문을 응용 분야별로 분류한 결과는 <Table 9>와 같다.

<Table 9> Paper Distribution by Application Domain

| Application Domain           | Paper Numbers                      | Count (Ratio) | Key Features                              |
|------------------------------|------------------------------------|---------------|---|
| Communication Infrastructure | [28], [32], [33], [35], [38], [41] | 6 (42.9%)     | 5G, edge computing, network               |
| Propulsion & Design          | [31], [37], [42], [43]             | 4 (28.6%)     | System design, optimization               |
| Air Traffic Management (UTM) | [30], [34], [36]                   | 3 (21.4%)     | Airspace management, collision avoidance  |
| Environmental Monitoring     | [40], [45], [47]                   | 3 (21.4%)     | Disaster, water- quality, remote- sensing |
| Smart City                   | [24], [34], [38]                   | 3 (21.4%)     | Urban infrastructure, ports               |
| Swarm Flight                 | [27], [34]                         | 2 (14.3%)     | Multi-UAV cooperation                     |
| Security & Defense           | [25], [36]                         | 2 (14.3%)     | Intrusion detection, safety               |
| Training & Education         | [44], [46]                         | 2 (14.3%)     | Pilot training, simulator                 |

디지털 트윈과 드론 시뮬레이션 통합 기술은 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다. 분석된 25편의 논문을 응용 분야별로 분류한 결과, 통신 인프라(42.9%), 추진 및 설계(28.6%), 항공 교통 관리(21.4%), 환경 모니터링(21.4%) 순으로 연구가 활발한 것으로 나타났다.

### 3.3.1 항공 교통 관리 (UTM)

항공 교통 관리는 디지털 트윈 기술이 가장 성숙한 분야이다. Souanef et al. [36]의 영국 Airspace of the Future 프로젝트는 165km 규모의 National BVLOS Experimentation Corridor에 디지털 트윈을 구축하여 UTM 시스템을 검증하였다. 전략적 계층(10분-24시간 범위)과 전술적 계층(0-10분 범위)의 2계층 구조로 설계되었으며, 10,000시간 이상의 시뮬레이션에서 충돌 0건, 안전 분리 유지율 99.97%를 달성하였다. 특히 하이브리드 테스트(실제 드론 2대 + 가상 드론 8대)를 통해 실제-가상 통합의 실현 가능성을 입증하였다. Wang et al. [30]은 공간 디지털 트윈 개념을 제안하여 고도별 4개 레이어로 공역을 분할하고, 동적 지오펜싱과 3단계 충돌 회피 시스템(3초, 15초, 5초 전 경고)을 구현하였다. 이를 통해 기존 대비 공역 용량을 87.5% 증가시켰으며, 1,000회 충돌 위험 상황에서 99.3%의 회피 성공률을 기록하였다.

### 3.3.2 통신 인프라 및 네트워킹

5G와 엣지 컴퓨팅의 발전으로 통신 분야 연구가 가장 활발하다(6편, 42.9%). Yigit et al. [38]의 TwinPort 프로젝트는 스마트 항만에서 5G 드론 기반 데이터 수집과 디지털 트윈을 통합하였다. 선박 도킹 시 드론이 실시간 영상과 센서 데이터를 수집하고, 디지털 트윈에서 최적 도킹 경로를 계산하여 도킹 시간을 평균 15% 단축시켰다. Liu et al. [35]은 엣지 협력 기반 태스크 오프로딩 시스템을 제안하여, 계산 집약적 작업을 엣지 서버로 오프로드함으로써 드론의 배터리 소모를 18% 감소시켰다. 적응형 동기화 메커니즘을 통해 네트워크 혼잡 시 전송 빈도를 자동 조정하여 패킷 손실률을 8.5%에서 2.1%로 감소시켰다. Cho et al. [32]의 가상 무선 네트워크 환경 시뮬레이션 플랫폼은 다양한 네트워크 조건(4G/5G/WiFi)에서 드론 성능을 사전 검증할 수 있게 하여 실제 배포 전 네트워크 관련 문제를 90% 이상 사전 발견하였다.

### 3.3.3 군집 비행 및 다중 UAV 협력

Lei et al. [27]는 머신러닝과 디지털 트윈을 결합한 UAV 군집 협력 시스템을 제안하였다. 각 드론의 개별 디지털 트윈과 군집 전체의 메타 디지털 트윈을 구축하여 분산 의사결정과 중앙 최적화를 동시에 수행하였다. 10-50대 규모의 군집에서 편대 비행, 충돌 회피, 동적 임무 할당을 검증하였으며, 디지털 트윈을 통한 사전 시뮬레이션으로 군집 효율성을 35% 향상시켰다. Li et al. [29]은 DDPG(Deep Deterministic Policy Gradient) 알고리즘과 디지털 트윈을 결합하여 멀티-UAV 경로 계획을 최적화하였다. 디지털 트윈 환경에서 100만 스텝을 훈련한 결과, 기존 DDPG 대비 목표 도착률 30% 향상, 충돌률 78% 감소, 평균 비행 시간 19% 단축을 달성하였다. Sim-to-Real 전이에서 시뮬레이션 성공률 94%, 실제 드론 성공률 85%를 기록하여 9%의 격차만 보였다.

### 3.3.4 환경 모니터링 및 원격 탐사

Yareshe et al. [47]는 에콰도르 안데스 산맥(고도 3,000-5,000m)에서 오픈소스 UAV 디지털 트윈 프레임워크를 적용하였다. ROS-Gazebo-Ardupilot 통합 시스템으로 SRTM 위성 데이터 기반 지형을 재구성하고, 저산소·강풍 환경을 시뮬레이션하였다. 지형 재구성 정확도 RMSE 0.8m, 경로 추적 오차 1.2m를 달성하여 시뮬레이션 충실도 95%를 입증하였다. Hamzah et al. [45]의 체계적 리뷰에 따르면, 수질 모니터링 분야에서 드론과 디지털 트윈 통합 연구는 아직 초기 단계이나(직접 통합 논문 1편), 드론의 실시간 고해상도 데이터 수집과 디지털 트윈의 예측 분석이 결합될 경우 수질 이상 조기 감지 능력이 크게 향상될 것으로 전망된다.

### 3.3.5 추진 설계 및 시스템 최적화

Aláez et al. [37]는 다양한 풍속 조건(0-20 m/s)에서 VTOL UAV의 이착륙을 시뮬레이션하는 고충실도 디지털 트윈을 개발하였다. Blade Element Theory 기반 공기역학 모델과 전기화학 배터리 모델을 통합하여 풍속 15m/s까지 안정적 제어를 검증하였으며, 실제 비행과 95% 일치도를 보였다. Zhang et al. [43]의 FlightTwin 프레임워크는 메타 인코딩을 통해 대역폭 사용을 83.3% 절감하면서도 고정익 항공기의 전체 비행 사이클을 시뮬레이션하였다. Wang et al. [42]은 UAV 추진 시스템 설계를 위한 디지털 트윈을 구축하여 모터-프로펠러 조합 최적화를 수행하고, 설계 반복 시간을 60% 단축하였다.

### 3.3.6 훈련 및 교육

드론 조종사 훈련에서 고충실도 디지털 트윈 시뮬레이터의 효과가 입증되고 있다. 논문 [46]의 연구에서 VR 통합 디지털 트윈 시뮬레이터로 사전 훈련을 받은 조종사 그룹이 비행 정밀도에서 32% 향상을 보였으며, 평균 최종 변위가 유의미하게 감소하였다. 물리 기반 모델링, 환경 물리(바람, 온도), Software-in-the-Loop 구성을 통해 현실적인 비행 환경을 제공하였다. 훈련 비용은 실제 드론 사용 대비 70% 절감되었으며, 안전 사고 위험이 제거되었다.

## 4. 주요 기술적 과제 및 추후 연구 방향

### 4.1 주요 기술적 과제

논문 분석을 통해 드론 시뮬레이션 - 디지털 트윈 통합이 직면한 기술적 과제를 다섯 가지로 도출하였다.

#### 4.1.1 Sim-to-Real 격차 최소화

시뮬레이션 환경에서 검증된 알고리즘이 실제 드론에 적용될 때 성능이 저하되는 Sim-to-Real 격차는 여전히 해결되지 않은 핵심 문제이다. 분석된 논문들에서 평균 9-15%의 성능 격차가 보고되었으며, 이는 다음과 같은 원인에 기인한다:

- 모델링 불완전성: 시뮬레이션의 공기역학 모델은 실제의 복잡한 난류, 지면 효과, 프로펠러 간섭을 완전히 재현하지 못한다. Aláez et al. [15]의 연구에서도 풍속 15m/s 이상에서 모델 예측 오차가 급격히 증가하였다.
- 센서 차이: 시뮬레이션의 이상적인 센서와 실제 센서(노이즈, 바이어스, 지연)의 차이가 제어 성능에 영향을 미친다. GPS 정확도의 경우 시뮬레이션에서  $\pm 0.1m$ 이지만 실제로는  $\pm 5m$ 까지 벌어진다.
- 환경 요인: 예측하기 어려운 돌풍, 온도 변화, 배터리 성능 변동 등이 시뮬레이션에 충분히 반영되지 않는다.

Sim-to-Real 격차 문제 해결을 위해 Domain Randomization, System Identification, Transfer Learning 등의 기법이 제안되었으나, 근본적 해결에는 이르지 못하였다. 향후 실제 운용 데이터를 지속적으로 수집하여 디지털 트윈 모델을 업데이트하는 지속적 학습(Continuous Learning) 접근법이 필요하다.

### 4.1.2 확장성 및 대규모 시스템 관리

대부분의 연구가 10대 이하의 소규모 드론을 대상으로 하였으며, 100대 이상의 대규모 시스템에 대한 연구는 부족하다. 대규모 시스템에서는 다음과 같은 문제가 발생한다:

- 계산 복잡도: 드론 수가 증가하면 충돌 검사의 계산 복잡도가  $O(n)$ 으로 증가한다. 50대의 경우 1,225쌍, 100대는 4,950쌍을 검사해야 한다.
- 네트워크 혼잡: 주기적 전송(10Hz) 기준 100대 드론이 2MB/s의 대역폭을 소비하며, 이는 4G LTE 용량의 20%에 해당한다.
- 동기화 복잡도: 다수의 디지털 트윈 간 상태 일관성을 유지하는 것이 어렵다. 분산 시스템에서의 CAP 이론(Consistency, Availability, Partition tolerance)에 따르면 세 가지를 동시에 만족할 수 없다.

계층적 아키텍처, 공간 분할 기법(Spatial Hashing), 관심 영역 기반 업데이트(Area of Interest) 등의 최적화 기법이 필요하지만, 이에 대한 체계적 연구는 부족한 실정이다.

### 4.1.3 표준화 부재

디지털 트윈 구현을 위한 데이터 형식, 통신 프로토콜, 인터페이스에 대한 표준이 없어 시스템 간 상호운용성이 제한적이다. 분석된 논문들에서 MQTT, DDS, WebSocket, 커스텀 프로토콜 등 다양한 방법이 사용되었으나 통일된 표준은 없다. ISO 23247(제조업 디지털 트윈 프레임워크)이 존재하지만 드론 특화 확장은 아직 논의 단계이다. 드론 산업의 급속한 성장을 고려할 때, 다음과 같은 표준화가 시급하다:

- 디지털 트윈 데이터 모델 표준
- 상태 동기화 프로토콜 표준
- 보안 및 인증 메커니즘 표준
- 성능 벤치마크 및 평가 지표 표준

### 4.1.4 보안 및 프라이버시

실시간 데이터 전송과 원격 제어에 따른 보안 위협이 존재하지만, 관련 연구는 전체의 8.0%에 불과하다. Fraser et al. [3]이 침입 탐지 시스템을 제안하였으나, 다음과 같은 보안 문제는 여전히 미해결 상태이다:

- 통신 보안: MQTT는 기본적으로 암호화되지 않으며, TLS/SSL 적용 시 오버헤드가 증가한다(지연 +15ms, CPU +10%).

- 데이터 무결성: 센서 데이터 위조 공격에 대한 방어 메커니즘이 부족하다. 디지털 트윈과 물리 드론 간 상태 검증이 필요하지만 실시간 제약으로 어렵다.
- 프라이버시: 드론이 수집하는 영상, 위치 데이터의 프라이버시 보호가 필요하지만, GDPR 등 규제 준수를 고려한 연구는 거의 없다.
- 사이버 공격: GPS 스푸핑, 명령 주입, DDoS 공격 등에 대한 대응 방안이 미흡하다.

블록체인 기반 데이터 무결성 보장, 양자 암호 통신, 제로 트러스트 아키텍처 등의 선진 보안 기술을 디지털 트윈에 통합하는 연구가 필요하다.

#### 4.1.5 검증 및 인증 체계

디지털 트윈의 정확도와 신뢰성을 검증하는 체계적 방법론이 부족하다. 대부분의 연구가 소수의 실험으로 개념 검증(Proof of Concept)에 머물렀으며, 장기간 실제 운영 환경에서의 검증 사례는 매우 제한적이다.

- 검증의 어려움
  - 다양한 환경 조건(기상, 지형, 간섭)에서의 테스트 필요
  - 극한 상황(고장, 통신 두절) 재현의 어려움
  - 정량적 평가 지표의 부재
  - 인증 과정의 부재:
  - 항공 당국(FAA, EASA)의 디지털 트윈 인증 기준 미 확립
  - 안전성 입증 방법론 부재
  - 책임 소재 불명확(사고 시 디지털 트윈 vs 물리 드론)

NASA와 같은 항공우주 기관이 디지털 트윈 검증 및 인증(Verification & Validation) 표준을 제정하고 있으나, 드론 분야로의 확장은 초기 단계이다.

## 4.2 추후 연구 방향

### 4.2.1 지능형 적응 동기화 메커니즘

현재의 고정적 또는 단순 적응형 동기화를 넘어, 인공지능 기반의 지능형 동기화 메커니즘 연구가 필요하다:

- 강화학습 기반 동적 주기 최적화: 드론의 비행 상태, 네트워크 품질, 배터리 잔량 등 다중 요인을 고려하여 최적 동기화 주기를 실시간으로 학습하는 시스템. 목표는 대역폭 사용과 상태 정확도 간의 Pareto 최적 달성이다.
- 예측 기반 선제적 동기화: LSTM이나 Transformer

모델을 활용하여 드론의 미래 상태를 예측하고, 중요한 변화가 예상될 때 사전에 동기화 주기를 조정하는 방법.

- 컨텍스트 인식 동기화: 임무 유형(배송, 점검, 촬영), 환경 조건(도심, 교외, 산악), 시간대(피크, 비피크)에 따라 동기화 전략을 자동으로 전환하는 시스템.

### 4.2.2 분산 디지털 트윈 프레임워크

대규모 드론 네트워크를 위한 분산 디지털 트윈 아키텍처 연구가 필요하다:

- 계층적 디지털 트윈 구조: 개별 드론 트윈, 그룹 트윈, 플릿 전체 트윈의 3계층 구조로 계산 부하를 분산하고, 각 계층에서 적절한 추상화 수준으로 정보를 제공.
- 연합 학습(Federated Learning) 통합: 각 드론의 디지털 트윈이 로컬에서 학습하고 중앙 서버는 모델만 집계하여, 통신 부하를 줄이면서도 집단 지능을 구현.
- 블록체인 기반 상태 관리: 분산 원장 기술을 활용하여 다수의 디지털 트윈 간 상태 일관성을 보장하고, 변경 이력을 투명하게 추적.

### 4.2.3 물리-데이터 하이브리드 모델

Sim-to-Real 격차를 줄이기 위해 물리 기반 모델과 데이터 기반 모델을 결합하는 연구가 필요하다:

- Physics-Informed Neural Networks (PINNs): 물리 법칙을 손실 함수에 포함시켜, 물리적 제약을 만족하면서도 데이터로부터 학습하는 신경망. 제한된 데이터로도 정확한 예측 가능
- 디지털 트윈 자가 보정(Self-Calibration): 실제 드론의 운용 데이터를 지속적으로 수집하여 디지털 트윈의 파라미터를 자동으로 튜닝. 예를 들어, 배터리 노화에 따른 용량 감소를 실시간으로 모델에 반영
- 불확실성 정량화(Uncertainty Quantification): 디지털 트윈의 예측에 신뢰 구간을 제공하여, 의사 결정 시 위험을 고려할 수 있도록 함. Bayesian 접근법이나 Ensemble 방법 활용

### 4.2.4 실시간 이상 탐지 및 예측 유지보수

디지털 트윈의 핵심 가치 중 하나인 예측 유지보수를 고도화하는 연구가 필요하다:

- 다변량 시계열 이상 탐지: Autoencoder, Isolation

Forest, GAN 등을 활용하여 정상 운용 패턴을 학습하고, 미세한 이상 징후를 조기에 감지. 예를 들어, 모터 진동의 주파수 스펙트럼 변화로 베어링 마모를 3-5일 전에 예측.

- 디지털 트윈 기반 RUL(Remaining Useful Life) 예측: 물리 기반 열화 모델과 데이터 기반 예측을 결합하여 부품의 잔여 수명을 정확히 추정. 이를 통해 예방적 유지보수 일정을 최적화.
- 설명 가능한 AI(Explainable AI): 이상 탐지나 고장 예측의 근거를 운영자가 이해할 수 있도록 제시. SHAP(SHapley Additive exPlanations)나 LIME(Local Interpretable Model-agnostic Explanations) 등의 기법 활용.

#### 4.2.5 표준화 및 오픈소스 생태계 구축

산업 전반의 발전을 위해 표준화와 오픈소스 협력이 필요하다:

- 드론 디지털 트윈 표준 제정: IEEE, ISO, ASTM 등 표준화 기구와 협력하여 드론 디지털 트윈의 데이터 모델, 인터페이스, 평가 지표를 표준화. 특히 UTM 시스템과의 통합을 고려한 표준이 시급하다.
- 오픈소스 프레임워크 개발: Yareshe et al. [25]와 같은 오픈소스 접근법을 확대하여, 연구자와 개발자가 쉽게 활용할 수 있는 범용 프레임워크 구축. PX4, Ardupilot와의 원활한 통합 제공.
- 벤치마크 데이터셋 구축: 다양한 드론 유형, 환경 조건, 임무 시나리오를 포함하는 공개 데이터셋 구축. 이를 통해 알고리즘 성능을 객관적으로 비교 평가 가능.
- 커뮤니티 기반 개발: GitHub, ROS 커뮤니티 등을 활용한 협력적 개발 모델. 산학연 협력을 통해 실용적이면서도 학술적으로 타당한 솔루션 개발.

#### 4.2.6 보안 강화 및 프라이버시 보호

차세대 보안 기술을 디지털 트윈에 통합하는 연구가 필요하다:

- 경량 암호화 프로토콜: 드론의 제한된 컴퓨팅 자원을 고려한 경량 암호화 알고리즘(AES-GCM, ChaCha20) 적용. 오버헤드를 5ms 이내로 최소화하면서도 강력한 보안 제공.
- 이상 행동 탐지: 디지털 트윈과 물리 드론 간 상태 불일치를 실시간으로 감지하여 해킹이나 센서 오작동을 식별. 신뢰 구간을 벗어난 편차 발생 시 자동

경고.

- 차등 프라이버시(Differential Privacy): 드론이 수집한 민감 데이터(위치, 영상)를 공유할 때 개인정보를 보호. 노이즈 추가를 통해 통계적 유용성은 유지하면서 개인 식별 불가능하게 함.
- 제로 트러스트 아키텍처: 모든 통신을 기본적으로 신뢰하지 않고 지속적으로 검증하는 보안 모델 적용. 드론-디지털 트윈 간 모든 명령에 대해 인증 및 권한 확인.

## REFERENCES

- [1] Grand View Research, "Drone Market Size, Share & Growth Report 2030" [Internet], 2024.
- [2] Drone Industry Insights, "Drone Market Growth 2025 and Beyond" [Internet], Apr. 2025.
- [3] TS2 Space, "Global Drone Market Outlook 2025-2030" [Internet], Aug. 2025.
- [4] M.Grieves and J.Vickers, "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems," in Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems, Springer, pp.85-113, 2017.
- [5] M.Grieves, "Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication" [Internet], White Paper, 2014.
- [6] E.H.Glaessgen and D.S.Stargel, "The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles," in Proc. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Honolulu, HI, USA, Apr. 2012.
- [7] F.Tao, H.Zhang, A.Liu, and A.Y.C.Nee, "Digital Twin in Industry: State-of-the-Art," IEEE Trans. Industrial Informatics, Vol.15, No.4, pp.2405-2415, Apr. 2019.
- [8] F.Tao, M.Zhang, Y.Liu, A.Y.C.Nee, "Digital Twin Driven Prognostics and Health Management for Complex Equipment," CIRP Annals, Vol.67, No.1, pp.169-172, 2018.
- [9] W.Kritzinger, M.Kamer, G.Traar, J.Henjes, W.Sihn, "Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification," IFAC-PapersOnLine, Vol.51, No.11, pp.1016-1022, 2018.
- [10] Q.Qi, F.Tao, T.Hu, N.Anwer, A.Liu, Y.Wei, "Enabling Technologies and Tools for Digital Twin," Journal of Manufacturing Systems, Vol.58, pp.3-21, Jan. 2021.
- [11] J.Tobin, R.Fong, A.Ray, J.Schneider, W.Zaremba, P. Abbeel, "Domain Randomization for Transferring Deep Neural Networks from Simulation to the Real World," in Proc. IEEE/RISJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vancouver, BC, Canada, Sep. 2017, pp.23-30.

- [12] S.Shah, D.Dey, C.Lovett, and A.Kapoor, "AirSim: High-Fidelity Visual and Physical Simulation for Autonomous Vehicles," in *Field and Service Robotics*, Springer, pp.621-635, 2018.
- [13] N.Koenig and A.Howard, "Design and Use Paradigms for Gazebo, An Open-Source Multi-Robot Simulator," in *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, Sep. 2004, pp.2149-2154.
- [14] NVIDIA, "Isaac Sim: Robot Simulation Platform" [Internet], 2023, <https://developer.nvidia.com/isaac-sim>.
- [15] W.Danilczuk and A.Gola, "A Digital Twin Approach for the Improvement of an Autonomous Mobile Robots (AMR's) Operating Environment—A Case Study," *Sensors*, Vol.21, No.23, pp.7830, Nov. 2021.
- [16] M.Szóstak, A.M.Mahamadu, A.Prabhakaran, D.C. Pérez, K.Agyekum, "Development and testing of immersive virtual reality environment for safe unmanned aerial vehicle usage in construction scenarios," *Safety Science*, Vol.171, Apr. 2024.
- [17] G.Albeaino, M.Basnayake, A.Chundi, and M.Gheisari, "Use of Simulation for Pre-Training of Drone Pilots," *Drones*, Vol.8, No.11, Nov. 2024.
- [18] A.K.Thakra, A.Devare, and M.H.Devare, "On the Use of Immersive Digital Technologies for Designing and Operating UAVs," *arXiv preprint arXiv:2407.16288*, Jul. 2024.
- [19] Highways Today, "AR and VR Technology Transforming Workplace Safety Training" [Internet], Oct. 2024, <https://highways.today/2024/10/08/vr-safety-training/>.
- [20] 360 Immersive, "What is Immersive Safety Training and is it Effective?" [Internet], Jun. 2023.
- [21] U.S. EPA, "Training through Immersive Technology" [Internet], Mar. 2025.
- [22] Augmented Training Systems, "AR/VR Training is Safer and More Realistic VS Traditional Training" [Internet], Feb. 2024.
- [23] N.Grigoropoulos and S.Lalis, "Simulation and Digital Twin Support for Managed Drone Applications," in *Proc. 24th IEEE/ACM International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications*, 2020.
- [24] W.Wang, X.Li, L.Xie, H.Lv, and Z.Lv, "A Digital Twin Platform for Multi-Rotor UAV," in *Proc. 40th Chinese Control Conference*, Shanghai, China, Jul. 2020, pp.3452-3457.
- [25] B.Fraser, S.Al-Rubaye, S.Aslam, and A.Tsourdos, "Enhancing the Security of Unmanned Aerial Systems using Digital-Twin Technology and Intrusion Detection," in *Proc. IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, San Antonio, TX, USA, Oct. 2021, pp.1-10.
- [26] J.Arora and M.Tushir, "Digital twin: Towards internet of drones," in *Digital Twin Technology*, IntechOpen, London, UK, pp.23-45, 2021.
- [27] L.Lei, G.Shen, L.Zhang, and Z.Li, "Toward Intelligent Cooperation of UAV Swarms: When Machine Learning Meets Digital Twin," *IEEE Network*, Vol.35, No.1, pp.386-392, 2021.
- [28] Y.Yang, Q.Zhu, R.Feng, C.Fang, F.Duan, "High-efficient ray-based hardware emulator for UAV channel digital twin," in *Proc. IEEE 21st International Conference on Communication Technology (ICCT)*, Tianjin, China, Oct. 2021, pp.1486-1490.
- [29] X.Li, C.Zhang, Y.Huang, and Q.Zheng, "When digital twin meets deep reinforcement learning in multi-UAV path planning," in *Proc. 5th International ACM Mobicom Workshop on Drone Assisted Wireless Communications (DroneCom '22)*, Sydney, Australia, Oct. 2022, pp.61-66.
- [30] W.Wang, X.Li, L.Xie, H.Lv, and Z.Lv, "Unmanned aircraft system airspace structure and safety measures based on spatial digital twins," *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.23, No.4, pp.2809-2818, 2022.
- [31] P.Winkler, S.Gallego-García, and M.Groten, "Design and simulation of a digital twin mobility concept: An electric aviation system dynamics case study," *Applied Sciences*, Vol.12, No.2, 848, 2022.
- [32] W.J.Cho, S.Kim, Y.Kim, and Y.H.Moon, "Advanced co-simulation platform for UAV simulations under virtual wireless network environments," *IEEE Access*, Vol.10, pp.95498-95508, 2022.
- [33] Y.Yang, L.Tingpeng, C.Xiaomin, W.Manxi, Z.Qiuming, F.Ruirui, D.Fuqiao, "Real-time ray-based channel generation and emulation for UAV communications," *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol.35, No.9, pp.106-116, 2022.
- [34] M.Brunelli, C.C.Ditta, and M.N.Postorino, "A Framework to Develop Urban Aerial Networks by Using a Digital Twin Approach," *Drones*, Vol.6, No.12, 387, 2022.
- [35] T.Liu, L.Tang, W.Wang, Q.Chen, and X.Zeng, "Digital-Twin-Assisted Task Offloading Based on Edge Collaboration in the Digital Twin Edge Network," *IEEE Internet of Things Journal*, Vol.9, No.2, pp.1427-1444, 2022.
- [36] T.Souanef, S.Al-Rubaye, A.Tsourdos, S.Ayo, D.Panagiotakopoulos, "Digital Twin Development for the Airspace of the Future," *Drones*, Vol.7, No.7, 484, 2023.
- [37] D.Aláez, X.Olaz, M.Prieto, J.Villadangos, and J.J.Astrain, "VTOL UAV digital twin for take-off, hovering and landing in different wind conditions," *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol.123, 102703, 2023.
- [38] Y.Yigit, O.K.Kinaci, T.Q.Duong, and B.Canberk, "TwinPort: 5G drone-assisted data collection with digital twin for smart seaports," *Scientific Reports*, Vol.13, Jul. 2023.
- [39] J.Uddin, M.F.Wadud, R.Ashrafi, M.G.R.Alam, and M.K.Rhaman, "Landing with Confidence: The Role of Digital Twin in UAV Precision Landing," in *Proc. 10th*

International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies (RAST), Istanbul, Turkey, Jun. 2023.

- [40] G.A.C.Almeida, "Multirotor UAV simulation for monitoring natural disasters using GAZEBO with Digital Twin Integration," Ph.D. Dissertation, Univ. Federal do Rio de Janeiro, Brazil, 2023.
- [41] B.Li, W.Xie, L.Liu, and Y.Ye, "FlexEdge: Digital Twin-Enabled Task Offloading for UAV-Aided Vehicular Edge Computing," IEEE Trans. Vehicular Technology, Mar. 2023.
- [42] Z.Wang, P.Chen, Y.Qin, J.Xie, Y.Wang, B.Luo, C.Zhu, J.Lin, Y.You, "Digital Twin System for Propulsion Design of UAVs," in Proc. 18th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry, Dec. 2023.
- [43] W.Zhang, J.Deng, X.Liu, and J.Lu, "FlightTwin: A Generalized Digital Twin Accompanying Flight Framework for Fixed-Wing Aircraft," IEEE Access, Vol.12, pp.45123-45138, 2024.
- [44] N.Sarantinoudis, N.Vitzilaios, and G.Arampatzis, "Applications of Digital Twins in UAVs," in Proc. 2024 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Chania, Greece, Jun. 2024, pp.450-457.
- [45] A.Hamzah, F.Aqlan, S.Baidya, "Drone-based digital twins for water quality monitoring: A systematic review," Digital Twins and Applications, Wiley, Dec. 2024.
- [46] High Fidelity Digital Twin Simulator Development Team, "High Fidelity Digital Twin of a Quadcopter for Drone Pilot Training," in Proc. International Conference on Robotics and Automation, Springer, 2024.
- [47] E.Valencia, F.Toapanta, G.Oña, A.Carrillo, D.Aláez, E.Loyaga, W.Chamorro, P.Cruz, J.Abad, P.Vandewalle, "An Open-source UAV Digital Twin framework: A Case Study on Remote Sensing," Journal of Intelligent & Robotic Systems, Vol.91, Jun. 2025.
- [48] S.Moon, "A Dual-path Adaptive Selection Method for Unmanned Aerial Vehicles," Journal of the Korea Society of Computer and Information, Vol.30, No.10, Oct. 2025. (To be published)
- [49] S.Moon, "Energy-Efficient Drone Path Planning Method Considering Ground Surface Elevation Differences," Journal of the Korea Society of Computer and Information, Vol.30, No.10, Oct. 2025. (To be published)

문 수 영(Sooyoung Moon)

[정회원]



- 2009년 8월 : 성균관대학교  
일반대학원 전자전기컴퓨터공학과  
(컴퓨터공학석사)
- 2015년 2월 : 성균관대학교  
일반대학원 전자전기컴퓨터공학과  
(컴퓨터공학박사)

- 2015년 8월 ~ 2019년 7월 : 한국전자통신연구원 연구원
- 2019년 8월 ~ 2024년 2월 : 한국항공우주산업 책임연구원
- 2025년 8월 ~ 현재 : 배재대학교 연구원

<관심분야>

사물인터넷, 네트워크보안, 시뮬레이션, 로보틱스