

## A Temporal Consistency Architecture for Real-Time Multi-Sensor Track Displays under Out-of-Sequence Measurements

Seungho Kim\*, Joonwoo Lee\*\*, Scott Uk-Jin Lee\*\*\*

\*Student, Dept. of Computer Science & Engineering, Hanyang University, Ansan, Korea

\*\*Student, Dept. of Applied Artificial Intelligence, Hanyang University, Ansan, Korea

\*\*\*Professor, Dept. of Computer Science & Engineering, Hanyang University, Ansan, Korea

### [Abstract]

Heterogeneous sensor delays cause out-of-sequence measurements (OOSMs) in underwater surveillance displays, placing targets at different time instants within a frame and producing discontinuous jumps. Existing studies emphasize estimation accuracy rather than display consistency. We formulate OOSM as a display-layer problem and propose fixed-lag and sensor-aware reorder strategies. On a synthetic workload, fixed-lag reorder eliminates the 215–265 ms intra-frame time spread with 600 ms display latency, while sensor-aware reorder reduces the 99th-percentile frame-to-frame jump from about 59 m to 6 m. Decomposing jumps into temporal-inconsistency and measurement-noise components delineates the display-estimation boundary. The sensor- and tracker-independent architecture generalizes to multi-sensor situational-awareness systems, including vessel traffic services.

▶ **Key words:** Underwater surveillance, Multi-sensor data fusion, Out-of-sequence measurements, Real-time visualization, Temporal consistency

### [요 약]

다중센서 수중감시체계에서는 센서별 통신 지연으로 비순차 측정치(OOSM)가 발생하여 한 프레임의 표적이 서로 다른 시각에 표시되고 화면에서 불연속적으로 도약한다. 기존 연구가 추정 정확도에 집중한 것과 달리, 본 논문은 OOSM을 표시 계층 문제로 정식화하고 고정 지연 및 센서 인지 재정렬을 제안한다. 합성 워크로드에서 고정 지연 방식은 600ms의 표시 지연으로 프레임 내 시간 분산을 215–265ms에서 0ms로 제거했고, 센서 인지 방식은 프레임 간 도약의 99백분위수를 약 59m에서 6m로 줄였다. 도약을 시간 불일치와 측정 잡음으로 분해하여 표시 계층과 추정 계층의 책임 경계를 규명하였다. 제안 아키텍처는 특정 센서나 추적 알고리즘에 의존하지 않아 해상 교통관제 등 다중센서 상황인식 시스템에 적용할 수 있다.

▶ **주제어:** 수중감시, 다중센서 정보융합, 비순차 측정치, 실시간 시각화, 시간 정합성

- 
- First Author: Seungho Kim, Corresponding Author: Scott Uk-Jin Lee
  - \*Seungho Kim (ohgnues@hanyang.ac.kr), Dept. of Computer Science & Engineering, Hanyang University
  - \*\*Joonwoo Lee (joonywlee@hanyang.ac.kr), Dept. of Applied Artificial Intelligence, Hanyang University
  - \*\*\*Scott Uk-Jin Lee (scottlee@hanyang.ac.kr), Dept. of Computer Science & Engineering, Hanyang University
  - Received: 2026. 07. 15, Revised: 2026. 07. 27, Accepted: 2026. 08. 19.

## I. Introduction

수중감시체계는 광역 해역에 분산된 다수의 이기종 센서가 획득한 표적 정보를 하나의 융합된 상황도로 통합하여 지휘관의 의사결정을 지원한다. 운용자는 다중 표적의 위치와 기동을 실시간으로 파악해야 하므로, 어떤 표적을 어떤 시각의 정보로 일관되게 화면에 제시하는가가 상황 인식의 정확도에 직접적인 영향을 미친다.

그러나 각 센서의 측정치는 서로 다른 통신 지연과 전처리 시간을 거쳐 도착하므로, 생성 순서와 다르게 도착하는 비순차 측정치(out-of-sequence measurement, OOSM)가 발생한다 [1-2]. OOSM은 표시 화면에서 두 가지 문제를 야기한다. 동일 프레임의 표적들이 서로 다른 시각의 정보로 갱신되어 시간적으로 불일치하거나, 지연되거나 역순으로 도착한 측정치가 이전 표시를 덮어써 표적이 불연속적으로 도약(teleport)하여 상황 인식을 저해한다. Fig. 1은 센서별 측정치의 생성 시각과 도착 시각, 그리고 그에 따른 화면 표시 순서를 예시한 것이다.

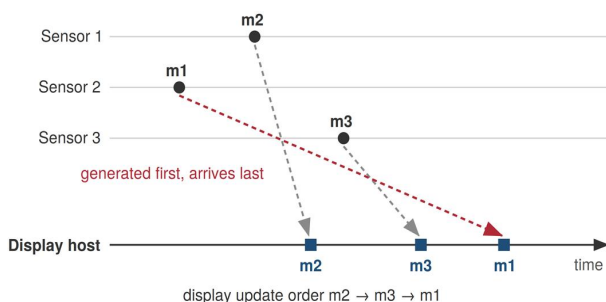


Fig. 1. Out-of-sequence arrival and its effect on display order

기존 OOSM 연구는 대부분 추정(estimation) 계층에 초점을 맞추어, 지연 도착한 측정치를 추적 필터에 어떻게 반영하여 추적 정확도를 보존할 것인가를 다루어 왔다 [1-7]. 그러나 이들 접근의 관심 대상은 지연 측정치를 반영하여 표적 상태 추정의 정확도를 보존하는 데 있으며 [3], 운용자에게 제시되는 화면의 시간 정합성이나 시각적 연속성은 직접적인 설계 목표가 아니다.

한편 지연되고 역순으로 갱신되는 원격 개체를 매끄럽게 표시하는 문제는 멀티플레이어 게임 네트워킹과 분산 상호작용 시뮬레이션(distributed interactive simulation, DIS) 분야에서 오랫동안 연구되어 왔다. 표시를 일정 시간 지연시키고 버퍼된 상태 사이를 보간하는 개체 보간(entity interpolation) [8]과, 마지막 상태로부터 외삽하는 추측 항법(dead reckoning) [9-10]이 대표적이다. 그러나 이들 기법은 각 개체가 자신의 상태를 스스로

발신하여 기준이 되는 단일 시점의 정보(single authoritative source)가 주어진다는 전제 위에 있다. 반면 수중감시 환경에서는 하나의 표적을 잡음이 섞인 여러 지연 센서가 관측하므로 그러한 기준 정보가 존재하지 않는다. 따라서 게임과 시뮬레이션 분야의 표시 정합성 기법을 감시 도메인에 그대로 적용할 수 없으며, 다중센서 OOSM 환경에서의 동작 특성은 아직 규명되지 않았다. 국내에서도 소프트웨어 디자인 패턴을 적용한 실시간 분산 시뮬레이션 연구가 수행되었으나, 다중센서 비순차 측정 환경의 표시 계층 정합성은 다루어지지 않았다 [11].

본 논문은 표적 추정 계층이 아닌 실시간 표시 계층의 관점에서 OOSM 문제를 재정의하고, 다중센서 비순차 측정 환경에서 시간적으로 일관되고 시각적으로 연속적인 표적 상황도를 생성하는 표시 아키텍처를 제안한다. 본 논문의 기여는 다음과 같다.

- 다중센서 OOSM이 표시 시간 정합성과 시각적 연속성에 미치는 영향을 정량화하고, 프레임 간 도약을 시간 불일치와 측정 잡음 성분으로 분해한다.
- 고정 지연 재정렬과 센서 인지 재정렬을 제안하여, 공통 표시 시각의 보장과 다중센서 잡음 완화를 함께 지원한다.
- 시간 정합성 조건과 표시 계층의 잡음 하한을 유도하고, 합성 워크로드에서 정합성·연속성·지연·확장성을 평가한다.

## II. Related Work

### 1. Out-of-Sequence Measurement (OOSM) Processing

다중센서 중앙집중식 추적 시스템에서는 센서별 통신 지연과 전처리 시간의 차이로 측정치가 생성 순서와 다르게 융합 센터에 도착할 수 있다 [2]. 대표적 처리 방식은 지연 측정치 도착 이후 시점의 재처리(reprocessing), 지연 측정치의 폐기(discarding), 그리고 현재 추정치를 측정 시점으로 되돌리는 역예측(retrodiction) 갱신이다. 역예측에 기반한 단일 지연(single-lag) 최적 해법이 칼만 필터 틀에서 제시된 이후 [3], 이를 임의의 다중 지연(multi-lag)으로 확장한 기법 [1], 다중센서 다중표적 환경에서 데이터 연관과 가설 관리를 포함하는 기법 [2], 평활(smoothing)과 결합한 일반화된 OOSM 처리 기법 [4], 입자 필터를 이용해 비선형 비가우시안 환경으로 확장한 기법 [5], 최근에는 연속시간 영역에서의 다중표적 최적 처리

[6]와 신뢰전파(belief propagation) 기반의 다중센서 OOSM 갱신 [7] 등으로 이어지고 있다.

이들 연구의 공통 목표는 지연 측정치를 활용한 추적 정확도 향상이며, 운용자 화면의 시간적 일관성이나 시각적 연속성은 주요 연구 대상이 아니었다. 본 연구는 동일한 OOSM 문제를 추정 계층이 아닌 표시 계층의 관점에서 다루고자 한다는 점에서 차별화된다.

## 2. Display Consistency in Distributed Environments

개체 보간(entity interpolation)은 원격 개체의 표시를 일정 시간 지연시키고 버퍼에 저장된 연속된 상태 스냅샷 사이를 보간하여, 낮은 갱신 빈도로 인한 시각적 끊김을 완화한다 [8]. 추측 항법(dead reckoning)은 SIMNET에서 비롯된 DIS 프로토콜의 지연 은폐(latency hiding) 기법으로, 원격 개체의 마지막 위치, 속도, 가속으로부터 다음 갱신 전까지의 상태를 외삽하여 갱신 트랙백을 줄이면서 표시 지연을 은폐한다 [9-10]. 네트워크 지연에 따른 원격 개체의 위치 불일치를 정량화하고 완화하려는 연구도 수행되었다 [12].

그러나 이 기법들은 각 개체가 자신의 상태를 발신하여 기준이 되는 단일 시점의 정보가 주어진다는 전제 위에 있으며, 표적이 스스로 상태를 보고하지 않는 다중센서 감시 환경에는 그 전제가 성립하지 않는다.

## 3. Real-Time Situational Awareness Displays and the Common Operational Picture

다중 소스 정보를 융합하여 실시간 상황인식을 지원하는 공통상황도(common operational picture, COP)는 국방 및 공공안전 분야에서 널리 활용되고 있다. 예컨대 AIS와 연안 레이다를 융합하여 고밀도 환경에서도 다수의 선박을 실시간으로 추적하여 표시하는 해양 감시 융합 시스템이 제안되었고 [13], 최근에는 다중센서 베이지안 융합을 통한 해양 상황인식 다중표적 추적으로 발전하였다 [14]. 또한 자율운항선박의 육상 원격관제센터를 대상으로, 불규칙한 보고 간격에서도 궤적 연속성을 유지하는 실시간 해상교통 시각화 체계가 제안된 바 있다 [15].

이상의 연구와 본 논문의 접근을 비교하면 Table 1과 같다. 본 연구는 기준이 되는 단일 시점의 정보가 존재하지 않는 다중센서 비순차 환경에서, 표시 계층의 시간 정합성과 표시 지연 사이의 트레이드오프를 재현 가능한 워크로드 위에서 정량화한다는 점에서 구별된다.

Table 1. Comparison of related approaches and the proposed method

| Approach                                        | Layer           | Authoritative source | Intra-frame consistency | Key metric                 |
|-------------------------------------------------|-----------------|----------------------|-------------------------|----------------------------|
| OOSM processing [1-7]                           | Estimation      | N/A                  | Not a design goal       | Track accuracy             |
| Entity interpolation, dead reckoning [8-10, 12] | Display         | Assumed              | Implicit                | Rendering error            |
| COP fusion systems [13-15]                      | Fusion, display | Partly assumed       | Not a design goal       | Fusion accuracy            |
| Proposed                                        | Display         | Not assumed          | Guaranteed (0 ms)       | Time spread, jump, latency |

## III. Proposed Architecture

### 1. System Model and Problem Definition

본 논문이 대상으로 하는 시스템은 광역 해역에 배치된  $M$ 개의 센서가  $N$ 개의 표적을 관측하고, 그 측정치가 융합 및 표시 호스트로 전달되어 하나의 상황도로 렌더링되는 구조이다. 각 센서는 자신의 표본화 주기에 따라 표적을 관측하며, 하나의 측정치는 관측이 이루어진 시각(생성 시각  $t_{emit}$ )에 만들어지지만, 통신 지연과 전처리 시간을 거쳐 그보다 늦은 시각( $t_{arrival}$ )에 표시 호스트에 도착한다. 센서마다 지연의 평균과 변동(jitter)이 다르므로, 서로 다른 센서 또는 동일 센서의 측정치가 생성 순서와 다른 순서로 도착하는 비순차 측정치(OOSM)가 발생한다.

표시 호스트는 고정된 화면 갱신율로 동작하며, 매 프레임마다 모든 표적의 상태를 하나의 상황도로 렌더링해야 한다. 이때 표시 시스템이 만족해야 할 설계 목표는 다음과 같다.

- (G1) 시간 정합성: 한 프레임에 표시되는 모든 표적은 가능한 한 동일한 시각의 상태를 나타내야 한다. 그렇지 않으면 운용자는 시간적으로 왜곡된 상황을 인식한다.
- (G2) 시각적 연속성: 표적의 화면상 위치는 프레임 간에 매끄럽게 변화해야 한다. 불연속적 도약은 상황 인식을 저해한다.
- (G3) 지연 한계: 위 두 목표를 위해 도입되는 표시 지연은 상한이 있고 예측 가능하며 실시간 운용이 가능한 수준이어야 한다.

한편, 표적 상태 추정의 정확도 향상(추정 잡음 제거, 데이터 연관, 추적 필터 등)은 본 표시 아키텍처의 범위에 포함되지 않는다. 이는 추정 계층의 문제로서, 본 논문은 추

정 결과 또는 측정치 스트림을 입력으로 받아 이를 표시하는 계층에 집중한다.

## 2. Display Pipeline Architecture

제안하는 표시 파이프라인은 (i) 도착한 측정치를 수신하는 수신부, (ii) 측정치를 표적별로 시간 정렬하고 버퍼링하여 표시 시각의 상태를 산출하는 정렬부, (iii) 정렬부가 산출한 프레임 상태를 화면에 렌더링하는 렌더링부로 구성된다 (Fig. 2). 본 논문의 기여는 이 중 정렬부의 설계에 있으며, 렌더링부는 정렬부가 제공하는 프레임 단위의 일관된 상태를 표시하는 역할만 담당한다. 정렬부는 두 개의 인터페이스로 추상화된다. 측정치가 도착할 때 호출되는 *push*와, 매 프레임 표시 시각에 대해 각 표적의 표시 상태를 반환하는 *render*이다. *render*가 반환하는 표시 상태는 표적의 화면 위치와 그 위치가 대응하는 유효 시각으로 구성되며, 유효 시각을 함께 반환하므로 프레임 내 시간 정합성을 외부에서 직접 측정할 수 있다. 어떤 정렬 전략이든 입력은 도착 측정치이고 출력은 프레임 단위 표시 상태이므로 이 두 인터페이스만으로 충분하며, 이를 통해 서로 다른 전략을 동일한 워크로드와 지표로 공정하게 비교할 수 있다.

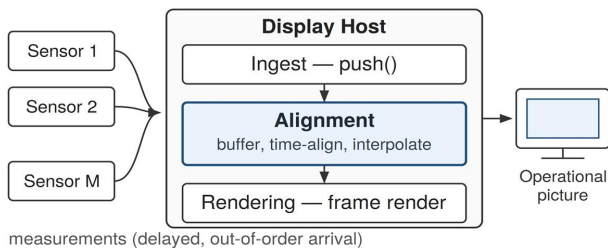


Fig. 2. Multi-sensor Track Display Pipeline

## 3. Baseline: Latest-Wins Display

가장 단순한 기준선인 최신값 표시(latest-wins)는 표적별로 마지막에 도착한 측정치 하나만 유지하고, 매 프레임 해당 측정치의 위치를 그대로 렌더링한다. 구현이 단순하고 표시 지연이 작지만, 표적마다 생성 시각과 출처 센서가 다른 측정치가 사용되어 프레임 내 시간 정합성(G1)이 보장되지 않는다. 또한 역순으로 도착한 측정치가 기존 표시를 덮어쓰면 표적이 불연속적으로 도약하여 시각적 연속성(G2)이 훼손된다.

## 4. Proposed Method: Fixed-Lag Reorder

제안하는 고정 지연 재정렬(fixed-lag reorder) 방식은 게임과 분산 시뮬레이션 분야의 개체 보간 기법을 다중센

서 환경에 이식한 것이다(Fig. 3). 핵심 아이디어는 표시 시각을 현재 시각보다 일정한 지연  $L$ 만큼 뒤로 물리고, 그 지연 시각에 대응하는 상태를 표적별 버퍼로부터 보간하여 산출하는 것이다.

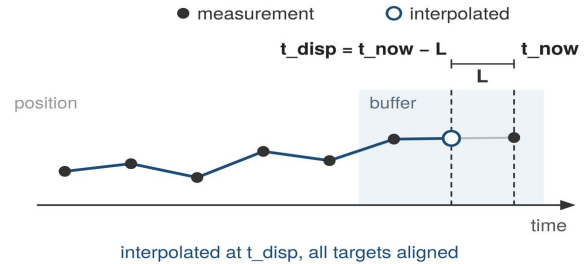


Fig. 3. Fixed-lag Reorder

정렬부는 표적마다 생성 시각 순으로 정렬된 측정치 버퍼를 유지한다. 도착한 측정치를 생성 시각 기준으로 버퍼의 올바른 위치에 삽입하므로 역순 도착에도 버퍼는 항상 시간 순서를 유지한다(버퍼 크기에는 상한을 두어 오래된 측정치를 제거한다). 매 프레임에서 표시 시각  $t_{disp} = t_{now} - L$ 을 계산하고, 각 표적에 대해  $t_{disp}$ 를 사이에 두는 두 측정치를 선형 보간하여 위치를 산출한다. 모든 표적이 동일한  $t_{disp}$ 로 산출되므로 프레임 내 시간 정합성(G1)이 정확히 보장되고(프레임 내 시간 분산이 정확히 0), 연속된 두 측정치 사이를 보간하므로 프레임 간 위치 변화가 매끄러워져 시각적 연속성(G2)이 개선된다. 지연  $L$ 은 모든 표적과 프레임에 대해 균일하고 상한이 있으므로 (G3)를 만족한다.

지연  $L$ 은 시간 정합성 및 연속성과 표시 지연 사이의 트레이드오프를 결정하는 핵심 파라미터이다.  $L$ 이 클수록 역순 도착을 더 많이 흡수하지만 표시가 현재로부터 더 뒤처지므로, 센서 지연 분포에 맞추어 역순 도착을 대부분 포괄하는 최소값으로 설정하는 것이 바람직하다.

## 5. Sensor-Aware Reorder

고정 지연 재정렬은 표적별 단일 버퍼에 모든 센서의 측정치를 혼합하므로 측정치의 출처 센서 정보를 사용하지 않는다. 그러나 센서마다 잡음 특성이 다르고 같은 시각에 여러 센서의 관측이 동시에 존재한다. 이를 활용하기 위해 센서 인지 재정렬(sensor-aware reorder)은 표적과 센서별로 분리된 시간순 버퍼를 유지한다. 표시 시각  $t_{disp}$ 에서 각 센서의 스트림을 개별적으로 보간하여 센서별 위치 추정치를 산출한 뒤, 이들을 역분산 가중( $w_s = 1/\sigma_s^2$ ,  $\sigma_s$ 는 센서  $s$ 의 보정된 잡음 표준편차)으로 결합한다.

이는 다중센서 구조를 표시 계층에서 활용하는 가장 가벼운 방식이다. 동역학(process) 모델이나 시간적 상태 추정 없이 매 순간의 관측만으로 계산되는 공간 융합이므로 표적의 운동을 예측하지는 못한다. 다만 각 센서의 일관된 스트림 내에서 보간하고 여러 센서를 평균함으로써, 단일 혼합 버퍼가 줄이지 못하는 잡음 기인 위치 변동을 상당 부분 감소시킨다.

## 6. Theoretical Analysis

앞서 제안한 두 방식의 동작을 이론적으로 분석하여, (i) 시간 정합성이 보장되는 조건과 (ii) 표시 계층이 도달할 수 있는 잡음의 하한을 유도한다.

**Notation.**  $p(\tau) \in \mathbf{R}^3$ 을  $\tau$ 에서 표적의 진위치라 하자. 센서  $s \in \{1, \dots, K\}$ 는 주기  $T$ 로 표본화하며, 관측  $z_s(\tau) = p(\tau) + \epsilon_s$ 를 생성한다. 잡음  $\epsilon_s$ 는 평균 0과 공분산  $\sigma_s^2 I_3$ 의 정규분포를 따르며 측정치와 센서 간 독립이다. 통신 지연  $d_s$ 에 의해 시각  $\tau$ 에 생성된 측정치는  $\tau + d_s$ 에 표시 호스트에 도착한다. 화면 주기를  $\delta$ , 표시 지연을  $L$ , 표시 시각을  $t_{disp} = t_{now} - L$ 이라 한다.

**Theorem 1 (Temporal-consistency condition).** 지연 최소 센서의 지연 상한을  $d_{\min}$ 이라 할 때,  $L \geq d_{\min} + T$ 이면 시동 이후 모든 프레임에서  $t_{disp}$ 가 도착 측정치에 의해 상하로 브라켓되어, 고정 지연 보간이 경계 클램핑 없이 정확히 수행되고 프레임 내 유효 시각의 분산이 실제로 0이 된다.

*Proof.* 상측 브라켓, 즉 생성 시각이  $t_{disp}$  이상이면 이미 도착한 측정치의 존재를 보이면 충분하다(하측 브라켓은 버퍼 이력으로부터 자명하다). 지연이 가장 작은 센서를 택하면,  $t_{disp}$  직상의 표본 시각  $\tau_u$ 는  $\tau_u \leq t_{disp} + T$ 를 만족하고  $\tau_u + d_{\min}$ 에 도착한다. 이 표본이  $t_{now}$ 까지 도착할 필요충분조건은 다음과 같다.

$$\tau_u + d_{\min} \leq t_{disp} + T + d_{\min} \leq t_{now} \Leftrightarrow L \geq d_{\min} + T \quad (1)$$

따라서 정리가 성립한다.

$L < d_{\min} + T$ 이면 보간이 최신 경계 표본으로 클램핑되어 표시가 정지하거나 역순 도착 시 도약이 재유입되므로, 식 (1)은 시간 정렬이 실질적으로 유효한 조건을 규정한다. 실험의 지연은 정규분포로 모의되므로 가장 빠른 센서의 평균 지연 0.10s를  $d_{\min}$ 으로 취하면  $T = 0.5s$ 에서  $L^* = 0.60s$ 이며, 지연  $L$ 에 따른 실측 브라켓 비율은 Table 2와 같다.

Table 2. Bracket fraction vs. display lag  $L$  (fastest-sensor mean delay 0.10s,  $T = 0.5s$ )

| Lag $L$ (s)      | 0.15  | 0.30  | 0.45  | 0.60  | 0.75  | 0.90  |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bracket fraction | 0.266 | 0.854 | 0.992 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

브라켓 비율은 이론값  $L^* = 0.60s$ 에서 정확히 1.000에 도달하여 Theorem 1과 일치하므로, 본 논문의 실험은  $L = 0.6s$ 를 사용한다. 조건에 미달하는  $L = 0.45s$ 에서는 약 0.8%의 프레임이 클램핑되며, 이는  $align_{ms} = 0$  지표가 숨기는 표시 열화이다. 8개 시드 각각에서 해당 시드의  $L^*$  (0.55-0.66s)에서 브라켓 비율이 1.000에 도달하였다.

**Proposition 2 (Display-layer noise floor).** 센서 인지 융합의 융합 잔차(3D RMSE)는 식 (2)와 같다.

$$SE = \sqrt{2} \sigma_{eff}, \quad \sigma_{eff}^2 = \left( \sum_{s=1}^K \frac{1}{\sigma_s^2} \right)^{-1} \quad (2)$$

여기서  $\sigma_{eff}$ 는 유효 잡음 표준편차이며, 균일 잡음  $\sigma_s = \sigma$ 이면  $RMSE = \sqrt{2} \sigma / \sqrt{K}$ 이다.

*Proof.* 센서  $s$ 의 스트림 내에서  $t_{disp}$ 를 브라켓하는 두 표본( $\tau_0 \leq t_{disp} \leq \tau_1$ ,  $\tau_1 - \tau_0 = T$ )의 선형 보간값은 식 (3)과 같다.

$$\hat{p}_s = (1-a)z_s(\tau_0) + az_s(\tau_1), \quad a = (t_{disp} - \tau_0) / T \quad (3)$$

이 보간값의 잡음 성분은 측당 분산  $[(1-a)^2 + a^2] \sigma_s^2$ 을 가지며, 위상  $a \sim U[0, 1]$ 에 대해  $\mathbf{E}[(1-a)^2 + a^2] = 2/3$ 이다. 역분산 가중 융합  $\hat{p} = \sum_s w_s \hat{p}_s / \sum_s w_s$ ,  $w_s = 1/\sigma_s^2$ 의 측당 잡음 분산은 식 (4)와 같다.

$$\sum_s w_s^2 \cdot \frac{2}{3} \sigma_s^2 / \left( \sum_s w_s \right)^2 = \frac{2}{3} \sigma_{eff}^2 \quad (4)$$

3축을 결합하면  $RMSE = \sqrt{2} \sigma_{eff}$ 이 된다.

균일  $\sigma = 15m$ 에서 이론값은  $RMSE = 21.2/\sqrt{K}$ 이며, 센서 수  $K$ 를 변화시킨 실측은 Table 3과 같다.

Table 3. Sensor-aware fusion RMSE vs. sensor count  $K$  (uniform  $\sigma = 15m$ )

| $K$              | 1     | 2     | 3     | 4     | 6    | 8    | 12   |
|------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| RMSE (m)         | 21.25 | 15.12 | 12.84 | 11.16 | 9.27 | 7.83 | 6.55 |
| RMSE· $\sqrt{K}$ | 21.3  | 21.4  | 22.2  | 22.3  | 22.7 | 22.1 | 22.7 |

$RMSE \cdot \sqrt{K}$ 가 21-23으로 거의 일정하여  $1/\sqrt{K}$  법칙을 확인한다.  $\sigma \in \{8, 15, 25, 40\}m$ 와

$K \in \{2, 4, 6, 8\}$ 의 전 공간에서 5개 시드로  $RMSE^2 = a(\sigma^2/K) + b$ 를 회귀하면  $a = 2.25$  (이론 2.0),  $R^2 = 0.9999$ 로 스케일링이 전 영역에서 성립한다. 측정 계수가 이론값보다 약 6% 높은 것은 유한 프레임들의 위상 이산화 등 이차 효과이다.

**Corollary (Display-estimation boundary).** 식 (2)의 잡음 하한  $\sqrt{2}\sigma_{eff}$ 은 유한한  $\sigma_s$ 와  $K$ 에 대해 항상 양(+)이다. 프레임 간 잡음 도약도 동일하게  $\propto \sigma_{eff} > 0$ 의 하한을 가지므로, 동역학 모델 없이 매 순간의 관측만으로 동작하는 표시 계층 연산만으로는 이 하한 이하로 줄일 수 없다. 반면 시간적 상태 추정(칼만 필터나 추적 등)은 운동 모델을 통해 측정치를 시간에 걸쳐 결합하여 유효 표본 수를 순간적  $K$ 보다 크게 늘리므로 하한 아래로 내려갈 수 있으며, 이 지점이 표시 계층과 추정 계층의 경계를 이룬다.

## IV. Experiments and Evaluation

### 1. Experimental Setup and Synthetic Workload

제안 방식의 평가를 위해 다중센서 비순차 측정 환경을 재현하는 합성 워크로드를 구성하였다. 합성 워크로드는 지연과 잡음 조건을 통제하고 결과를 재현 가능하게 한다. 특히 본 논문의 핵심 지표인 프레임 내 시간 분산과 도약의 성분 분해는 각 측정치의 생성 시각과 표적의 진값(ground truth)을 모두 알아야 계산할 수 있어, 이러한 정보가 함께 기록되지 않는 실측 데이터로는 직접 산출하기 어렵다. 실측 데이터를 이용한 검증은 향후 과제로 논한다.

워크로드는 한 변이 10km인 3차원 공간에  $M=6$ 개의 고정 센서와  $N$ 개의 표적을 배치한다. 각 표적은 서로 다른 심도에서 등속 선회(constant-turn) 모델로 기동하며, 각 센서는 2Hz로 모든 표적을 관측하되 표준편차 15m의 위치 잡음을 더한다. 센서별 통신 지연은 평균 0.05-0.40초, 변동 0.02-0.15초의 정규분포로 모의하여 측정치의 비순차 도착을 유발한다. 또한 초당 40개의 클러스터 측정치를 주입하여 처리 부하를 반영한다. 화면 갱신율은 30 FPS, 시나리오 길이는 20초이며, 표적 수는 50, 100, 200, 500으로 변화시켰다. 제안 방식의 표시 지연은 §III-6의 조건  $L \geq d_{\min} + T$ 에 따라  $L = 0.6s$ 로 설정하였다. 재현성을 위해 난수 시드를 고정하였고, 초기 1초는 버퍼 충전 구간으로 지표 계산에서 제외하였다.

### 2. Evaluation Metrics

다음의 네 가지 지표를 통해 평가하였다.

- **시간 정합성 ( $align_{ms}$ ):** 한 프레임에 표시된 표적들의 유효 표시 시각의 최댓값과 최솟값의 차(프레임 내 시간 분산). 작을수록 프레임이 시간적으로 일관됨을 의미한다.
- **시각적 연속성 ( $jump_{p99}$ ):** 연속된 두 프레임 사이 표적별 화면 위치 변화 크기와 99백분위수. 작을수록 도약이 적고 표시가 매끄러움을 의미한다.
- **표시 지연 ( $lag_{ms}$ ):** 표시 시각과 유효 표시 시각의 차의 평균. 정합성과 연속성을 얻기 위해 지불하는 비용이다.
- **확장성 ( $proc_{ms}$ , 지속 처리율):** 프레임당 데이터 계층 처리 시간(수신+정렬)의 평균과, 그 99백분위수로부터 환산한 지속 가능 처리율.

### 3. Data-Layer Results

Table 4는 두 방식의 측정 결과이다.

**시간 정합성.** 최신값 표시는 약 215-265ms의 프레임 내 시간 분산을 보인 반면, 고정 지연 재정렬은 모든 조건에서 0.0ms를 달성하여 설계 목표 (G1)을 정확히 충족한다.

**시각적 연속성.** 고정 지연 재정렬의 99백분위 도약은 약 34-52m로 최신값 표시의 약 58m보다 개선되었으나, 측정 잡음(축당 15m)에 기인한 성분이 여전히 지배적으로 남았다. 그 원인은 §IV-4의 성분 분해에서 규명한다.

**표시 지연.** 고정 지연 재정렬은 균일하게 600ms(최신값 표시의 약 2.7배)의 지연을 보인다. 이 지연은 지연 파라미터  $L$ 로 결정되며, §III-6의 조건  $L \geq d_{\min} + T$ 에 따라  $L = 0.6s$ 로 설정하였다.

**확장성.** 두 방식 모두 표적 수 500까지 데이터 계층 처리율이 30 FPS를 크게 상회하여(제안 방식 최저 약 1,600 fps), 데이터 계층 처리는 실시간 표시의 병목이 아니다.

Table 4. Data-layer performance comparison of latest-wins and fixed-lag reorder

| Method                             | Targets | $align_{ms}$ | $jump_{p99}$<br>(m) | $lag_{ms}$ | $proc_{ms}$ | Throughput<br>(fps) |
|------------------------------------|---------|--------------|---------------------|------------|-------------|---------------------|
| Latest-wins<br>(baseline)          | 50      | 214.6        | 57.56               | 220.5      | 0.009       | 54,918              |
|                                    | 100     | 243.4        | 58.96               | 209.1      | 0.017       | 36,809              |
|                                    | 200     | 265.3        | 58.76               | 205.0      | 0.033       | 16,925              |
|                                    | 500     | 219.9        | 59.58               | 243.4      | 0.133       | 2,229               |
| Fixed-lag<br>reorder<br>(proposed) | 50      | 0.0          | 33.83               | 600.0      | 0.057       | 7,130               |
|                                    | 100     | 0.0          | 37.13               | 600.0      | 0.081       | 4,926               |
|                                    | 200     | 0.0          | 43.89               | 600.0      | 0.182       | 2,413               |
|                                    | 500     | 0.0          | 52.02               | 600.0      | 0.360       | 1,579               |

#### 4. Jump Decomposition and the Display-Estimation Boundary

§IV-3에서 시각적 연속성 개선이 크지 않았던 원인을 규명하기 위해, 진값을 이용하여 프레임 간 도약을 두 성분으로 분해한다. 표적의 화면 위치 변화는 유효 표시 시각의 진값 변화에 해당하는 시간 불일치 성분과, 표시 위치와 해당 시각 진값의 차가 변화하는 측정 잡음 성분으로 정확히 분해된다. 전자는 공통 표시 시각으로 정렬함으로써 표시 계층이 제거할 수 있고, 후자는 원칙적으로 추정 계층만이 제거할 수 있다. 아울러 §III-5의 센서 인지 재정렬을 함께 비교한다. 본 실험은 Table 4와 동일한 균일 센서 잡음 조건에서 수행하였으며, 분해 결과를 Table 5에 제시한다.

고정 지연 재정렬은 시간 불일치 성분을 사실상 제거한다(약 2-3m에서 0.35m로). 그럼에도 그 측정 잡음 성분(약 37-52m)은 최신값 표시(약 59m)와 같은 규모로 남아, 시간 정렬만으로는 잡음 기인 도약을 줄일 수 없음을 보여준다. 반면 센서 인지 재정렬은 잡음 성분을 약 6m로 크게 감소시킨다. 각 센서의 일관된 스트림 내에서 보간하고 여러 센서를 융합함으로써 단일 혼합 버퍼가 접근하지 못한 잡음 변동을 완화한 것이다.

그러나 센서 인지 융합 이후에도 약 6m의 잔여 잡음 하한이 남는다. 이는 매 순간의 관측만으로 계산되는 공간 융합이 도달할 수 있는 한계로, 이를 더 줄이려면 시간에 걸친 상태 추정이 필요하다. 즉 본 분해는 표시 계층이 시간 불일치 도약은 완전히, 잡음 도약은 부분적으로 제거할 수 있으며 잔여 잡음 하한이 표시 계층과 추정 계층의 경계를 이룸을 실험을 통해 확인한 것이다. 8개 시드 반복에서도 세 전략의 분리는 안정적이었다(시간 불일치  $0.34 \pm 0.01\text{m}$ , 고정 지연 재정렬 잡음  $43.1 \pm 6.3\text{m}$ , 센서 인지 재정렬 잡음 하한  $5.6 \pm 0.8\text{m}$ ).

Table 5. Component decomposition of frame-to-frame jump (99th percentile, m)

| Strategy             | Targets | Temporal comp. | Noise comp. | Total jump | Time spread |
|----------------------|---------|----------------|-------------|------------|-------------|
| Latest-wins          | 100     | 2.40           | 58.9        | 59.0       | 243.4       |
| Fixed-lag reorder    | 100     | 0.35           | 37.2        | 37.1       | 0.0         |
| Sensor-aware reorder | 100     | 0.35           | 6.0         | 6.0        | 0.0         |
| Latest-wins          | 500     | 3.33           | 59.5        | 59.6       | 219.9       |
| Fixed-lag reorder    | 500     | 0.35           | 52.0        | 52.0       | 0.0         |
| Sensor-aware reorder | 500     | 0.35           | 6.2         | 6.2        | 0.0         |

#### V. Conclusion

본 논문은 다중센서 OOSM을 표시 계층의 시간 정합성 문제로 정식화하고 고정 지연 및 센서 인지 재정렬을 제안하였다. 합성 워크로드에서 고정 지연 방식은 600ms의 표시 지연으로 프레임 내 시간 분산을 215-265ms에서 0ms로 제거했고, 센서 인지 방식은 프레임 간 도약의 99백분위수를 약 59m에서 6m로 낮췄다. 도약 성분 분해와 이론적 분석은 표시 계층이 시간 불일치를 제거할 수 있으나 잔여 잡음의 추가 감소는 추정 계층의 역할임을 보였다. 제안 방식은 생성 시각이 기록된 측정치 스트림만을 요구하므로 해상교통관제, 항공관제, 지상 감시에 적용할 수 있다. 다만 합성 데이터와 선형 보간만으로 평가했으며 운용자 효과는 검증하지 않았다. 향후 실제 센서 데이터, 대안적 보간-예측 기법, 사용자 실험을 통해 이를 검증할 예정이다.

#### ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement (KRIT) Grant funded by Defense Acquisition Program Administration (DAPA) (KRIT-CT-23-026, Integrated Underwater Surveillance Research Center for Adapting Future Technologies, 2023-2029)

#### REFERENCES

- [1] Y. Bar-Shalom, H. Chen, and M. Mallick, "One-step solution for the multistep out-of-sequence-measurement problem in tracking," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 40(1), pp. 27-37, Jan. 2004. DOI: 10.1109/TAES.2004.1292140.
- [2] M. Mallick, J. Krant, and Y. Bar-Shalom, "Multi-sensor multi-target tracking using out-of-sequence measurements," Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion, pp. 135-142, Annapolis, MD, USA, July 2002. DOI: 10.1109/ICIF.2002.1021142.
- [3] Y. Bar-Shalom, "Update with out-of-sequence measurements in tracking: Exact solution," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 38(3), pp. 769-777, July 2002. DOI: 10.1109/TAES.2002.1039398.
- [4] F. Govaers and W. Koch, "Generalized solution to smoothing and

- out-of-sequence processing,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 50(3), pp. 1739–1748, July 2014. DOI: 10.1109/TAES.2014.130009.
- [5] M. Orton and A. Marrs, “Particle filters for tracking with out-of-sequence measurements,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 41(2), pp. 693–702, Apr. 2005. DOI: 10.1109/TAES.2005.1468758.
- [6] Á. F. García-Fernández and W. Yi, “Continuous-discrete multiple target tracking with out-of-sequence measurements,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, 69, pp. 4699–4709, 2021. DOI: 10.1109/TSP.2021.3100999.
- [7] X. Lu et al., “Robust centralized multi-sensor multi-target tracking based on belief propagation with out-of-sequence measurements,” *Expert Systems with Applications*, 280, Article 127573, 2025. DOI: 10.1016/j.eswa.2025.127573.
- [8] S. Liu, X. Xu, and M. Claypool, “A survey and taxonomy of latency compensation techniques for network computer games,” *ACM Computing Surveys*, 54(11s), Article 243, pp. 1–34, Jan. 2022. DOI: 10.1145/3519023.
- [9] W. Cai, F. B. S. Lee, and L. Chen, “An auto-adaptive dead reckoning algorithm for distributed interactive simulation,” *Proceedings of the 13th Workshop on Parallel and Distributed Simulation*, pp. 82–89, Atlanta, GA, USA, May 1999. DOI: 10.1109/PADS.1999.766164.
- [10] A. Hakiri, P. Berthou, and T. Gayraud, “Survey study of the QoS management in distributed interactive simulation through dead reckoning algorithms,” *arXiv*, 2010. <https://arxiv.org/abs/1008.3758>.
- [11] J. Suk and I. Ryoo, “Data transmission processing system design for real-time distributed simulation by using software design patterns,” *Journal of Digital Contents Society*, 10(4), pp. 649–657, Dec. 2009.
- [12] S. Aggarwal et al., “Accuracy in dead-reckoning based distributed multi-player games,” *Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM Workshop on Network and System Support for Games*, pp. 161–165, Portland, OR, USA, Aug. 2004. DOI: 10.1145/1016540.1016559.
- [13] J. García, J. L. Guerrero, A. Luis, and J. M. Molina, “Robust sensor fusion in real maritime surveillance scenarios,” *Proceedings of the 13th International Conference on Information Fusion*, pp. 1–8, Edinburgh, UK, July 2010. DOI: 10.1109/ICIF.2010.5712037.
- [14] D. Gaglione et al., “Bayesian information fusion and multitarget tracking for maritime situational awareness,” *IET Radar, Sonar & Navigation*, 14(12), pp. 1845–1857, Dec. 2020. DOI: 10.1049/iet-rsn.2019.0508.
- [15] H. S. Kim et al., “Development and empirical validation of a real-time AIS-based maritime traffic visualisation framework for shore-based remote control centres of maritime autonomous surface

ships,” *Journal of Marine Engineering & Technology*, 25(3), pp. 363–378, 2026. DOI: 10.1080/20464177.2025.2604375.

## Authors



Seungho Kim is a Ph.D. candidate in Computer Science & Engineering at Hanyang University, Ansan, Korea. He received the B.E. degree from the School of Computer Science at Hanyang University ERICA,

Ansan, Korea, in 2024. His research interests include artificial intelligence for software engineering (AI4SE), software testing, and software quality. In particular, his work focuses on applying artificial intelligence and large language models to automated test generation, test repair, and software defect prediction. His research aims to improve the reliability, maintainability, and trustworthiness of software systems.



Joonwoo Lee received the B.S. degree in Computational Data Science from the University of Sydney, Sydney, Australia. He is currently pursuing the integrated M.S. and Ph.D. degree in Artificial Intelligence with

the Department of Artificial Intelligence Convergence, Hanyang University, Ansan, Republic of Korea. His research interests include software engineering, software quality, software automation, and artificial intelligence for software engineering (AI4SE), with a particular focus on the evaluation and improvement of AI-assisted software development.



Scott Uk-Jin Lee received the B.E. degree in software engineering and the Ph.D. degree in computer science from The University of Auckland, Auckland, New Zealand, in 2004 and 2009, respectively.

In 2011, he joined Hanyang University ERICA, Ansan, Republic of Korea, where he is currently a Professor with the School of Computer Science and also serves as the Director of the SW-AI Convergence Education Institute. His research interests include software maintenance and evolution, software analytics, software quality, automated software engineering, and empirical software engineering.