한국컴퓨터그래픽스학회
Korea Computer Graphics Society Vol. 32, No. 3, P. 13~22

# 위상학적 이진 레이어 분석 기법을 통한 게임 레벨의 구조적 소프트락 검출

조은경 신병석*

인하대학교 전기컴퓨터공학과

misty25678@naver.com, bsshin@inha.ac.kr*

# Structural Soft-lock Detection in Game Levels Using Topological Binary Layer Analysis Method

Eun-Kyung Jo[O] Byeong-Seok Shin*

Inha University Department of Electrical and Computer Engineering

**요 약**

생성 기반 게임 레벨에서는 비가역 공간 전이와 선행 조건 요소의 배치 오류로 인해 구조적 소프트락이 발생할 수 있다. 기존의 플레이 가능성 검증 방식은 플레이어 이동 시뮬레이션과 상태 공간 탐색에 의존하므로, 복잡한 조건 구조에서 높은 연산 비용과 예측하기 어려운 계산 지연을 유발한다. 이 논문은 이러한 문제를 해결하기 위해 위상학적 이진 레이어 분석 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 게임 레벨을 기능별 이진 레이어로 분해하고, 비가역 전이 구조를 기준으로 공간을 유향 구역 그래프로 추상화한 뒤, 선행 조건 요소 간의 위상 관계를 분석하여 구조적 소프트락을 검출한다. 제안하는 방법은 플레이어 이동 시뮬레이션 없이 구조적 인과 모순을 직접 판별할 수 있으며, 탐색 기반 검증 이전에 활용 가능한 경량 구조 검증 방법이다.

**Abstract**

Structural soft-locks may occur in generated game levels due to irreversible spatial transitions and improper placement of prerequisite elements. Conventional playability validation approaches rely on player traversal simulation and state-space search, often resulting in high computational cost and unpredictable latency under complex constraint structures. This paper proposes a Topological Binary Layer Analysis method to address this problem. The proposed method decomposes game levels into functional binary layers, abstracts spatial structures into a directed region graph based on irreversible transitions, and detects structural soft-locks by analyzing topological relationships among prerequisite elements. The proposed method directly identifies structural causal contradictions without player traversal simulation and serves as a lightweight structural validation method applicable prior to search-based validation.

**키워드:** 절차적 콘텐츠 생성, 게임 레벨 검증, 소프트락 검출, 위상 분석, 이진 레이어

**Keywords:** Procedural Content Generation, Game Level Validation, Soft-lock Detection, Topological Analysis, Binary Layer

## 1. 서론

최근 게임 콘텐츠 생성 분야에서는 데이터 기반 생성 모델의 발전과 함께 절차적 콘텐츠 생성(Procedural Content Generation, PCG)을 활용한 게임 레벨 자동 생성 연구가 활발히 이루어지고 있다 [1-4]. 특히 기존 게임 레벨 데이터를 학습한 생성 모델들은 다양한 구조와 시각적 패턴을 반영한 타일 기반 레벨을 대량으로 생성할 수 있으며, 이를 활용한 생성 파이프라인 또한 지속적으로 확장되고 있다. 그러나 이러한 데이터 기반 생성 방식은 공간 구조의 전역적 연결성이나 게임 규칙에 기반한 인과 관계를 안정적으로 보장하

*corresponding author: Byeong-Seok Shin / Inha University Department of Electrical and Computer Engineering (bsshin@inha.ac.kr)

Received : 2026.05.29./ Review completed : 1st 2026.06.07. 2nd 2026.06.25./ Accepted : 2026.06.29.
DOI : 10.15701/kcgs.2026.32.3.13
ISSN : 1975-7883(Print)/2383-529X(Online)

지 못한다. 생성 결과가 시각적으로 자연스럽더라도, 특정 구조적 조건이나 상호작용 규칙을 만족하지 못할 경우 실제 플레이가 불가능한 레벨이 생성될 수 있다.

이러한 문제는 특히 비가역적 공간 전이(Irreversible Spatial Transition)를 포함하는 게임 레벨에서 두드러지게 나타난다. 예를 들어 일회성 붕괴 발판, 단방향 이동 구조, 낙하형 지형과 같은 요소는 플레이어의 이동 방향을 제한하며 특정 구역으로의 재진입을 불가능하게 만든다. 이때 열쇠, 스위치, 이벤트 조건과 같은 선행 조건 요소가 잘못 배치될 경우 플레이어는 특정 구역에 진입한 이후 진행 조건을 충족하지 못하거나 목표 지점으로 복귀할 수 없는 상태에 도달하게 된다. 이러한 구조적 오류는 일반적으로 소프트락(Soft-lock) 문제로 분류되며, 생성 기반 레벨 디자인에서 지속적으로 발생하는 대표적인 플레이 가능성 문제 중 하나이다 [3,5].

기존 연구에서는 이러한 플레이 가능성 검증을 위해 에이전트 기반 탐색(Agent-based Traversal Simulation) 및 상태 공간 탐색(state-space search) 기반 접근법을 주로 활용해 왔다 [5-9]. 대표적으로 A* 기반 탐색 [6], Monte Carlo Tree Search(MCTS) [7], Constraint Satisfaction Problem(CSP) 기반 검증 방식 [8] 등이 사용되며, 가상의 플레이어 에이전트를 실제로 이동시키면서 목표 도달 가능 여부를 판별한다. 이러한 방식은 실제 플레이 흐름과 유사한 탐색 과정을 수행할 수 있다는 장점을 가지지만, 비가역적 이동 구조와 복수의 선행 조건이 결합된 환경에서는 탐색 공간이 급격히 증가할 수 있다. 특히 불가능한 경로를 판별하기 위해 반복적인 백트래킹을 통한 상태 복원이 요구되며, 복잡한 상호작용 구조를 포함하는 레벨에서는 높은 연산 비용과 불규칙한 계산 지연이 발생할 수 있다.

본 연구는 이러한 탐색 기반 검증 방식의 연산 부담을 줄이기 위해, 플레이어 이동 시뮬레이션 이전 단계에서 공간 구조 자체를 분석하는 사전 구조 검증(Pre-validation) 접근법을 제안한다. 이것은 게임 레벨을 기능별 이진 레이어(Binary Layer)로 분리한 뒤, 비가역 전이 요소를 기준으로 공간 구조를 방향성을 가진 독립 구역 형태로 추상화한다. 이후 구역 간 흐름 관계와 선행 조건 요소의 상대적 위치를 비교함으로써, 플레이어 이동 경로를 직접 탐색하지 않고도 구조적 인과 모순 여부를 판별한다.

핵심 특징은 실제 플레이 경로를 시뮬레이션하기 이전에 공간 구조를 단순화하고, 전역적인 연결 관계와 인과 제약 조건만을 이용하여 구조적 모순을 사전에 검출한다는 점에 있다. 기존 탐색 기반 방식이 가능한 이동 경로와 상태 변화를 반복적으로 추적하는 반면, 이 연구는 공간 구조를 추상화한 뒤 구조적 연결성과 방향성만을 분석 대상으로 사용한다. 이를 통해 반복적인 탐색 및 백트래킹 과정 이전에 구조적 오류를 선제적으로 식별할 수 있으며, 대량의 후보 레벨을 반복적으로 검증하는 생성 기반 환경에서 경량 구조 분석 필터로 활용될 수 있다.

이 논문은 비가역 공간 전이와 선행 조건 의존성이 결합된 게임 레벨 환경에서 플레이어 이동 시뮬레이션을 배제하고 구조적 소프트락을 검출할 수 있는 위상학적 이진 레이어 분석 기법을 제안한다. 제안하는 방법은 복잡한 게임 공간을 기능별 이진 레이어로 분해하고 이를 유향 구역 그래프로 정규화함으로써, 상태 공간 탐색 및 반복적인 백트래킹에 의존하던 기존 검증 방식의 연산 부담을 근본적으로 해소한다. 이는 완전한 플레이 시뮬레이션 수행 이전 단계에서 구조적 인과 모순 여부를 직접 판별하고 불량 후보 레벨을 선제적으로 배제하는 결정론적(Deterministic) 전처리 메커니즘을 제시하였다는 점에서 학술적·실용적 차별성을 가진다.

## 2. 관련 연구

게임 레벨 생성 분야의 초기 연구에서는 규칙 기반 생성이나 문법 기반 생성 기법을 중심으로 제한된 구조의 레벨을 생성하는 방식이 주로 사용되었으며 [2], 이후 데이터 기반 생성 기법의 발전과 함께 기존 게임 레벨 데이터를 학습하여 다양한 형태의 공간 구조를 생성하려는 연구가 활발히 이루어졌다 [1,4]. 최근에는 생성 모델을 활용한 자동 레벨 생성 연구가 확장되면서, 생성 결과의 시각적 다양성과 구조적 복잡성은 크게 증가하였으나, 생성된 구조의 논리적 정합성과 플레이 가능성을 안정적으로 보장하기 위한 검증 과정의 중요성 또한 함께 증가하고 있다 [3].

생성된 레벨의 구조적 유효성을 검증하기 위한 대표적인 접근 방식으로는 경로 탐색 기반 검증 기법이 널리 사용되어 왔다 [5-7]. 이러한 방식은 가상의 플레이어를 레벨 내부에서 이동시키면서 목표 지점 도달 여부를 분석하는 형태로 구성되며, 실제 플레이 흐름과 유사한 탐색 과정을 수행할 수 있다는 장점을 가진다. 특히 아이템 획득 상태 변화나 이벤트 활성화와 같은 동적 상호작용 조건을 직접 반영할 수 있기 때문에, 다양한 게임 규칙을 비교적 직관적으로 검증할 수 있다. 또한 최근에는 강화학습 기반 에이전트를 활용하여 생성된 레벨의 난이도와 플레이 특성을 함께 분석하려는 연구들도 제안되고 있다 [3].

그러나 복수의 상태 변화와 비가역적 전이 구조가 동시에 결합될 경우, 탐색 기반 검증 방식은 높은 연산 비용을 요구할 수 있다. 특히 재진입이 불가능한 공간 구조나 단방향 이동 조건이 포함된 환경에서는 특정 경로의 가능 여부를 판별하기 위해 반복적인 백트래킹 과정이 필요하게 된다. 이 과정에서 탐색 공간이 급격히 증가하며, 불가능한 경로를 판별하기 위한 탐색 비용 또한 크게 증가할 수 있다 [6,7]. 생성 기반 환경에서는 이러한 검증 과정이 대량의 후보 레벨에 대해 반복적으로 수행되므로, 탐색 비용의 증가와 불규칙한 계산 지연은 전체 생성 파이프라인의 성능 저

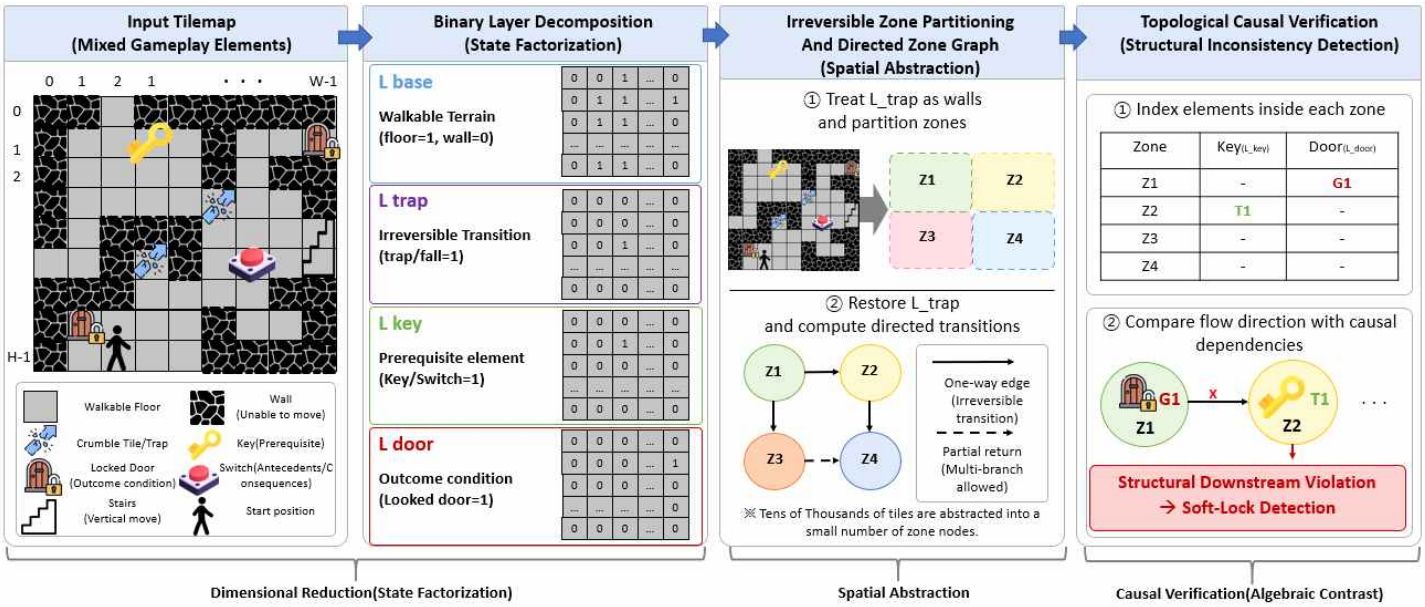


Figure 1. Overview of the Proposed Method

하로 이어질 수 있다.

한편, 게임 레벨의 구조적 조건을 명시적으로 모델링하기 위한 방법으로 제약 기반 검증 방식 또한 연구되어 왔다 [8,9]. 이러한 접근 방식은 공간 연결성, 접근 가능 영역, 아이템 획득 순서 등의 조건을 명시적인 제약식 형태로 표현함으로써 구조적 일관성을 검증한다. 특히 논리적 제약 조건을 체계적으로 표현할 수 있다는 점에서 복잡한 상호작용 구조를 분석하는 데 효과적이다. 그러나 공간 구조와 상태 변화가 동시에 결합된 환경에서는 변수 간 의존성이 빠르게 증가하며, 복수의 제약 조건이 상호 결합될 경우 검증 비용 또한 증가하게 된다. 특히 해가 존재하지 않는 경우에는 불가능성을 판별하기 위한 탐색 과정 자체가 장시간 지속될 수 있다는 한계가 존재한다.

최근에는 이러한 탐색 비용 문제를 완화하기 위해, 실제 탐색 이전 단계에서 공간 구조 자체를 단순화하거나 연결 관계를 추상화하여 탐색 공간을 축소하려는 연구들이 제안되고 있다 [10-12]. 대표적으로 연결 영역 분석, 그래프 기반 연결성 분석, 공간 분할 및 위상 구조 기반 추상화 기법 등이 활용되며, 복잡한 공간 구조를 보다 단순한 그래프 형태로 변환함으로써 전체 탐색 비용을 감소시키는 방식이 사용된다 [10,11]. 이러한 접근 방식은 실제 이동 경로 자체를 직접 탐색하기 이전에 구조적 모순이나 불필요한 탐색 영역을 사전에 제거함으로써, 탐색 기반 검증 과정의 효율성을 향상시키는 데 목적을 둔다. 특히 기존의 위상 구조 추상화 연구들은 주로 레벨 전체의 정적 인접 행렬을 구축한 뒤 SCC(Strongly Connected Components) [10] 등 전역 그래프 알고리즘에 의존해왔기에, 맵의 해상도가 높아질수록 컴포넌트 순회를 위한 탐색 연산 비용이 함께 누적되는 한계를 가졌다.

본 연구는 이러한 구조적 사전 분석 접근 방식의 연장선에서, 비가역적 전이 구조와 선행 조건 의존성이 결합된 게임 레벨을 대상으로 하는 위상학적 이진 레이어 분석 방법을 제안한다. 제안 방식은 공간 전체를 기하학적으로 순회하는 탐색 패러다임을 배제하고, 정적 지형과 비가역 구조를 이진 행렬 수준에서 분리 마스킹한 뒤 연결 성분 라벨링(CCL)을 통해 유향 구역 그래프를 대수적으로 즉각 복원한다. 이는 게임 공간을 인과 조건과 분리된 형태의 정규화된 행렬 집합으로 취급하여 연산 오버헤드를 최소화한다. 결과적으로 기존 탐색 기반 검증 방식이 상태 공간 자체를 반복적으로 추적하는 반면 , 본 연구는 무거운 알고리즘 앞단에서 위상학적 인과 모순을 가진 불량 후보군을 선제 차단하는 결정론적 전처리 필터링 메커니즘을 제시한다는 점에서 독창적인 차별성을 가진다.

## 3. 위상학적 이진 레이어 분석 방법

제안하는 방법은 모든 형태의 동적 상호작용이나 범용 게임 규칙을 처리하기 위한 완전한 플레이 시뮬레이션을 위한 솔루션를 목표로 하지 않는다. 대신, 일방통행 지형, 붕괴 발판, 소모성 열쇠와 같이 단조 비가역 진행(Monotonic Irreversible Progression) 특성을 가지는 구조적 하위 클래스에 집중하며, 이러한 환경에서 발생 가능한 인과적 접근 불가능성(Causally Unreachable Prerequisite Structure)을 효율적으로 판별하는 데 목적을 둔다. 이를 위해 전체 검증 과정은 상태 공간 자체를 직접 탐색하는 대신, 공간 구조를 추상화한 유향 구역 그래프와 기능별 이진 행렬 간의 관계를 대수적으로 분석하는 방식으로 구성한다.

Figure 1은 제안하는 위상학적 이진 레이어 분석 방법의 전체 처리 과정을 나타낸다. 전체 파이프라인은 크게 세 단

계로 구성된다. 먼저 입력된 타일 기반 레벨은 기능별 이진 레이어로 분해되어 공간 구조와 상호작용 요소를 독립적으로 표현한다. 이후 비가역 전이 요소를 기준으로 공간 연결 구조를 분할하여 방향성을 가진 유향 구역 그래프를 구성한다. 마지막으로 각 구역 내에 배치된 선행 조건 요소들의 상대적 위치 관계를 분석함으로써, 특정 조건 요소가 구조적으로 접근 불가능한 하류 구역에 배치되어 있는지를 판별한다. 이를 통해 제안 방식은 반복적인 백트래킹이나 전역 상태 복원 과정 없이 구조적 모순 가능성을 선제적으로 제거하며, 대량의 후보 레벨을 처리하는 생성 기반 검증 환경에서 경량 전처리 필터로 활용할 수 있다. 이후 절에서는 이진 레이어 분해, 공간 추상화 및 유향 구역 그래프 생성, 위상학적 인과 검증 과정을 각각 세부적으로 설명한다.

## 3.1 이진 레이어 분해

제안하는 방법은 생성된 게임 레벨의 복잡한 공간 구조와 상호작용 조건을 직접 탐색하지 않고 분석하기 위해, 입력된 타일 기반 레벨을 기능별 이진 레이어 형태로 분해한다.

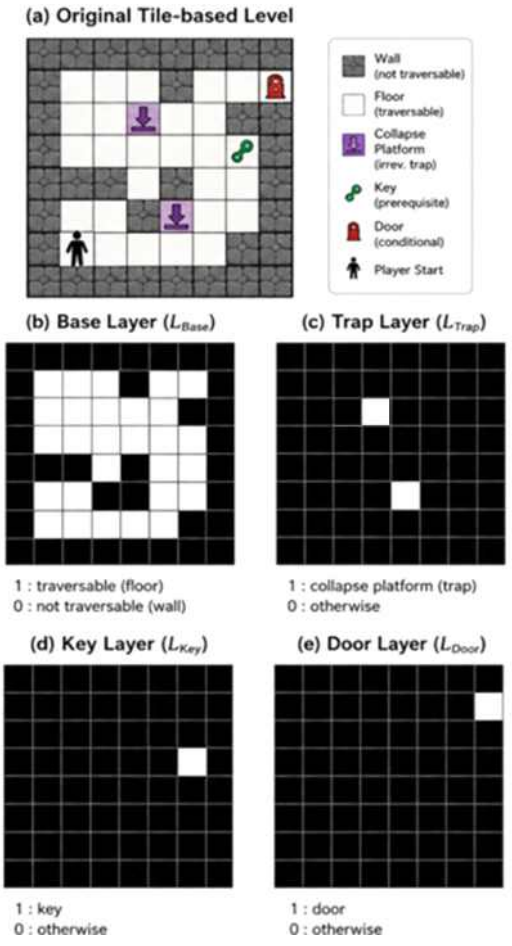


Figure 2. Binary Layer Decomposition of Tile-based Level

제안하는 방법은 생성된 게임 레벨의 복잡한 공간 구조와 상호작용 조건을 직접 탐색하지 않고 분석하기 위해, 입력된 타일 기반 레벨을 기능별 이진 레이어(Binary Layer) 형태로 분해한다. Figure 2는 입력된 타일 기반 레벨이 기능별 이진 레이어로 분리되는 과정을 보여준다. 공간 구조와 상호작용 요소를 독립적인 레이어로 분리함으로써, 이후 수행되는 공간 추상화와 위상학적 검증의 기반을 마련한다.

입력 레벨은 이동 가능 지형, 비가역 전이 구조, 그리고 선행 조건 요소를 포함한 복합적인 상태 정보를 동시에 포함한다. 제안하는 방법은 이러한 정보를 하나의 통합 상태로 관리하지 않고, 기능별 독립 이진 평면으로 분리하여 표현한다. 이를 통해 복잡한 공간 상태를 단순한 행렬 연산과 마스킹 기반 분석이 가능한 형태로 정규화한다.

입력 레벨은 동일한 해상도를 가지는 복수의 이진 부울 행렬(Boolean Matrix) 집합으로 변환한다. 각 레이어는 특정 기능 요소의 존재 여부만을 표현하며, 해당 속성이 존재하는 좌표는 1, 그렇지 않은 좌표는 0으로 정의한다. 먼저 기본 이동 가능 영역은 정적 지형 레이어 $L_{Base}$ 로 표현한다. 일반 이동가능한 타일은 1, 이동이 불가능한 벽이나 충돌 지형은 0으로 저장한다. 비가역적 공간 전이 요소는 별도의 비가역 전이 레이어 $L_{Trap}$ 에 기록한다. 여기에는 붕괴 발판, 단방향 낙하 지형, 일회성 통과 구조처럼 진입 이후 역방향 복귀가 불가능한 요소들을 포함한다. 또한 선행 조건 관계를 표현하기 위해 열쇠나 스위치와 같은 활성화 요소는 $L_{Key}$ , 잠긴 문이나 차단 장벽과 같은 결과 요소는 $L_{Door}$ 레이어에 각각 저장한다. 각 레이어는 다음과 같이 정의한다.

$$L_{Base}(x,y) = \begin{cases} 1, \text{if the tile is traversable} \\ 0, \text{otherwise} \end{cases}$$

$$L_{Trap}(x,y) = \begin{cases} 1, \text{if the tile contains} \\ \quad \text{irreversible transition} \\ 0, \text{otherwise} \end{cases}$$

$$L_{Key}(x,y) = \begin{cases} 1, \text{if prerequisite item exists} \\ 0, \text{otherwise} \end{cases}$$

$$L_{Door}(x,y) = \begin{cases} 1, \text{if locked structure exists} \\ 0, \text{otherwise} \end{cases}$$

기존 방식에서는 플레이어 이동 상태와 이벤트 진행 상태가 강하게 결합되어 있었기 때문에, 특정 경로의 가능 여부를 판별하려면 전체 상태 공간을 반복적으로 탐색해야 했다. 제안하는 방법의 레이어 분해 과정은 공간 구조와 인과 조건을 서로 분리된 행렬 집합으로 관리하여, 이후 단계에서 수행하는 연결성 분석과 조건 검사를 지역적 비트 연산과 그래프 연산만으로 처리한다. 특히 모든 레이어가 동일한 좌표 체계를 공유하므로, 마스킹(Masking), 중첩(Overlay), 비트 AND 연산을 이용해 특정 구역 내부에 어떤 조건 요소가 포함되어 있는지를 빠르게 추적할 수 있다.

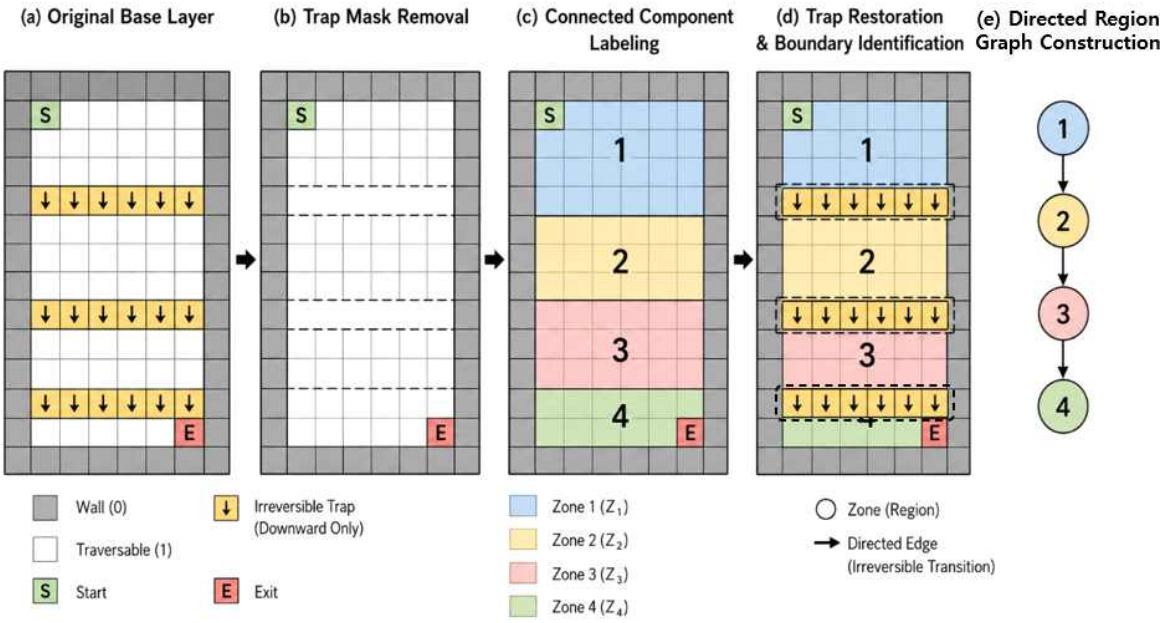


Figure 3. Spatial partitioning and directed region graph construction using irreversible transition masking.

결과적으로 이진 레이어 분해 단계는 복잡한 상태 공간 탐색 문제를 공간 구조 기반의 위상 분석 문제로 변환하는 핵심 전처리 과정으로 기능한다. 이후 단계에서는 분해된 레이어를 기반으로 비가역 전이 구조를 중심으로 한 공간 분할과 유향 구역 그래프 생성 과정을 수행한다.

## 3.2 비가역 구역 분할

제안하는 방법은 플레이어 에이전트를 직접 이동시키지 않고 레벨의 거시적 진행 흐름을 추출하기 위해, 비가역 전이 요소를 기준으로 공간 구조를 구역 단위로 분할한다. Figure 3은 비가역 전이 요소를 제거한 이후 독립 구역을 형성하고, 이후 방향성을 복원하여 유향 구역 그래프를 생성하는 전체 과정을 단계적으로 보여준다.

먼저 정적 지형 레이어 ($L_{Base}$)에서 비가역 전이 레이어 ($L_{Trap}$)에 해당하는 좌표를 일시적으로 제거한다. Figure 3 (b)는 이러한 마스킹 과정을 나타낸다. 이 단계는 비가역 전이 요소를 일반 이동 가능 공간과 분리하기 위한 전처리 과정이며, 제거 이후의 공간은 서로 독립적인 연결 영역으로 분리된다. 이후 연결 성분 라벨링(Connected Component Labeling)을 수행하여 각 연결 영역을 고유한 구역 $Z_n$ 으로 정의한다. Figure 3(c)와 같이 분할된 구역들은 동일한 연결성을 공유하는 독립 공간 단위로 해석한다.

구역 집합은 다음과 같이 정의한다.

$$Z = \{Z_1,\ Z_2,\ \dots\ ,\ Z_n\}$$

예를 들어 하나의 붕괴 발판이 두 공간을 연결하고 있었다면, 해당 전이 요소를 제거하는 순간 두 영역은 서로 다른 연결 성분으로 분리된다. 제안하는 방법은 이러한 단절 구조를 이용하여, 비가역 전이 요소를 공간 흐름을 구분하는 경계로 해석한다.

구역 분할이 완료되면 일시적으로 제거했던 비가역 전이 요소를 다시 복원한다. Figure 3 (d)는 복원된 전이 구조가 각 구역 사이의 진입 및 이탈 방향을 형성하는 과정을 보여준다. 이때 제안하는 방법은 단순한 연결 여부만을 기록하지 않고, 비가역 전이의 방향성을 함께 고려하여 단방향 간선(Directed Edge)을 생성한다. 예를 들어 특정 전이 구조가 $Z_i$ 에서 $Z_j$ 로의 이동은 허용하지만 동일한 경로를 통한 역방향 복귀를 허용하지 않는다면, 구역 그래프에는 $Z_i \rightarrow Z_j$ 형태의 방향 간선을 추가한다.

최종적으로 전체 레벨은 Fig. 3 (e)와 같이 방향성을 가지는 유향 구역 그래프(Directed Region Graph)로 축약된다. 구역 그래프 $G$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$G = (V, E)$$

여기서 $V$ 는 분할된 공간 구역 집합이며, $E$ 는 비가역 전이에 의해 형성되는 방향 간선 집합이다. 각 간선은 다음 조건을 만족한다.

$$e_{ij} \in E \rightarrow Z_i \rightarrow Z_j$$

즉 플레이어가 $Z_i$ 에서 $Z_j$ 로 이동할 수 있으나 동일한 전이 구조를 통해 역방향 복귀할 수 없는 경우 방향 간선을 생성한다.

이와 같은 구역 분할 과정은 전체 공간 구조를 소수의 구역 노드와 방향 간선으로 압축한다. 기존 방식이 타일 단위 공간과 플레이어 상태를 동시에 고려해야 했다면, 제안하는

방법은 공간 구조를 위상적 흐름 관계로 축약하여 이후 검증 과정을 경량 그래프 분석 문제로 변환한다. 따라서 대규모 레벨에서도 탐색 기반 시뮬레이션 없이 공간의 진행 구조를 빠르게 추출할 수 있으며, 이후 수행하는 인과 관계 검사의 연산량 또한 크게 감소한다.

### 3.3 위상학적 인과 검증

제안하는 방법은 공간의 연결 구조를 이용하여 플레이어의 실제 이동 경로를 시뮬레이션하지 않고도 선행 조건 요소와 결과 조건 요소 사이의 인과 관계를 검증한다.

기존의 탐색 기반 검증 방식은 플레이어 이동, 아이템 획득, 이벤트 활성화와 같은 상태 변화를 순차적으로 시뮬레이션하면서 목표 도달 가능 여부를 판단한다. 이러한 방식은 다양한 상호작용을 세밀하게 추적할 수 있다는 장점을 가지지만, 비가역 전이 구조와 복수의 선행 조건이 결합될 경우 반복적인 상태 복원과 백트래킹을 요구한다. 반면 제안하는 방법은 실제 이동 과정을 재현하지 않고, 구역 간 흐름 방향과 조건 요소의 상대적 위치 관계만을 비교하여 구조적 모순 여부를 직접 판별한다.

우선 3.1절에서 분리한 선행 조건 레이어 $L_{Key}$ 와 결과 조건 레이어 $L_{Door}$ 를 각 구역 $Z_n$ 에 중첩하여, 특정 조건 요소가 어느 구역에 속하는지를 인덱싱한다. 이 과정은 구역 마스크와 기능 레이어 간의 비트 AND 연산을 이용하여 수행한다. 예를 들어 특정 열쇠 $T_i$ 와 문 $G_i$ 가 각각 어떤 구역에 배치되어 있는지를 다음과 같이 정의한다.

$$T_i \in Z_a, \quad G_i \in Z_b$$

이후 제안하는 방법은 유향 구역 그래프 상의 선후 관계를 이용하여 선행 조건 일관성(prerequisite consistency)을 검사한다. Figure 4 (b)는 정상적인 배치 예시를 나타낸다. 열쇠가 상류 구역에 존재하고 문이 이후 구역에 위치하는 경우, 플레이어는 진행 흐름을 따라 선행 조건을 획득한 이후 해당 문을 개방할 수 있다. 이러한 구조에서는 인과 관계와 공간 흐름 사이의 충돌이 발생하지 않는다.

반면 Figure 4(c)는 구조적 소프트락이 발생하는 경우를 보여준다. 특정 문 $G_i$ 가 위치한 구역보다 하류 구역에 해당 문의 열쇠 $T_i$ 가 배치된 경우, 플레이어는 미래 구역으로 이동한 이후 원래 구역으로 복귀할 수 없게 된다. 이 연구는 이러한 구조를 하류 위반(Downstream Violation)으로 정의한다.

하류 위반 조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Z_b < Z_a \quad \text{and} \quad T_i \in Z_a \quad \text{and} \quad G_i \in Z_b$$

여기서 ($Z_b$ \prec $Z_a$)는 유향 구역 그래프 상에서 $Z_a$ 가 $Z_b$ 의 하류 구역임을 의미한다. 즉 열쇠가 문보다 이후 진행 구역에 위치하는 경우, 선행 조건과 공간 흐름 사이의 인과적 불일치가 발생한다.

제안하는 방법은 이러한 조건을 탐색 이전 단계에서 직접 검사한다. 따라서 플레이어 이동이나 인벤토리 상태를 반복적으로 시뮬레이션하지 않더라도, 구조적으로 해결 불가능한 레벨을 즉시 판별할 수 있다. 특히 Figure 4와 같이 조건 요소의 상대적 위치와 유향 흐름 구조만을 비교하여 소프트락 가능성을 검출하기 때문에, 실제 탐색 과정에서 발생하는 깊은 백트래킹이나 상태 복원 비용을 요구하지 않는다.

결과적으로 위상학적 인과 검증 단계는 공간 구조와 조건 의존성 사이의 모순 여부를 직접 분석함으로써, 플레이 가능성 검증 문제를 경량 위상 관계 검사 문제로 변환한다. 이러한 구조는 이후 복잡도 분석에서 보이듯, 대규모 생성 레벨 환경에서도 예측 가능한 연산 비용을 유지하는 핵심 기반으로 작용한다.

이와 같은 위상학적 인과 검증 메커니즘은 단조 비가역 진행 특성을 지닌 레벨 환경에서 발생하는 구조적 오류를 감지하는 데 효과적이다. 다만 본 기법은 공간의 유향 선후 관계를 기반으로 모순을 판별하므로, 복잡한 동적 제약 조건이 얽힌 상황에서는 검출 능력의 한계를 가진다. 예를 들어, 특정 구역의 진입 조건에 복수의 선행 아이템이 동시에 요구되는 다중 논리 구조(AND/OR)나, 조건 간의 의존성이 서로 순환하는 형태(Cyclic Constraints)의 레벨에서는 인과 관계를 완벽히 판별하기 어렵다. 또한 공간 구조 자체에는 결함이 없으나 플레이어가 소모성 자원을 임의로 오남용하여 발생하는 동적 자원 고갈형 소프트락의 경우, 본 기법에서 감지되지 않고 통과하는 거짓 음성(False Negative)이 발생할 수 있다. 제안 방법은 완전한 검증 알고리즘을 대체하기보다는 최악의 연산 비용을 유발하는 구조적 불량 레벨을 전처리 단계에서 선제 차단하는 경량 필터로 설계되었다. 따라서 동적 상호작용으로 인한 일부 미검출 오류는 후속 계층의 상태 공간 탐색 탐지기를 통해 최종 보완되므로, 전체 레벨 검증 파이프라인의 신뢰성을 훼손하지 않는다.

### 3.4 복잡도 분석

제안하는 방법은 플레이어 이동 시뮬레이션과 상태 공간 탐색을 수행하지 않으며, 레이어 분해, 공간 추상화, 그리고 인과 관계 검사를 중심으로 구성된 결정론적 구조 분석 절차를 따른다. 따라서 전체 검증 과정은 탐색 트리의 확장이나 반복적인 상태 복원 과정에 의존하지 않는다.

먼저 3.1절의 이진 레이어 분해 단계는 입력 타일맵을 동일한 해상도의 기능 레이어로 변환하는 과정이다. 각 타일을 한 번씩만 순회하며 속성 정보를 기록하므로, 연산 비용은 입력 맵의 가로 및 세로 크기에 선형적으로 비례한다.

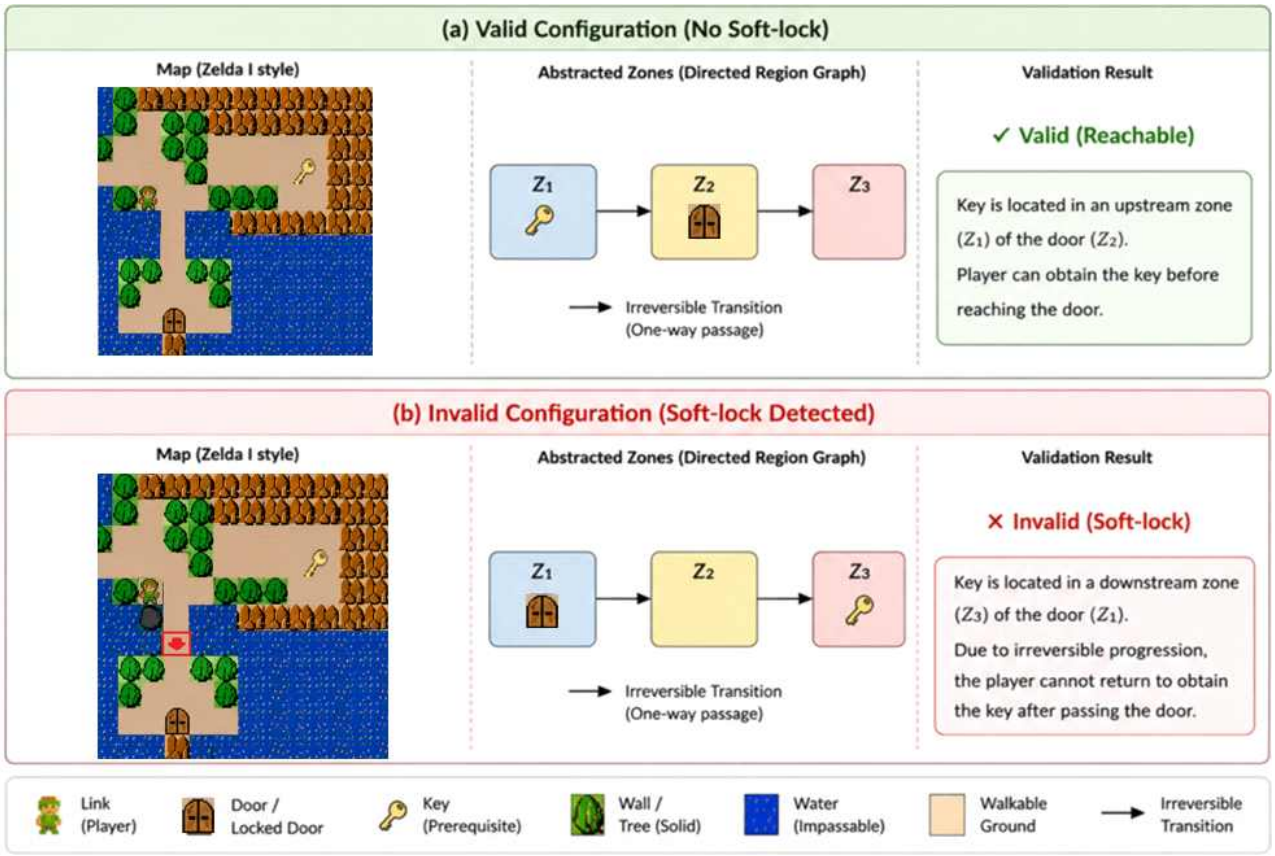


Figure 5. Structural validation examples on directed region configurations. (a) Valid configuration satisfying prerequisite ordering. (b) Structural soft-lock caused by downstream prerequisite placement.

이후 3.2절에서 수행한 공간 추상화 과정은 연결 성분 라벨링을 통해 독립 구역을 추출하고, 비가역 전이 구조를 재연결하여 유향 구역 그래프를 생성한다. 연결 성분 분석은 전체 격자를 단일 스캔하면서 수행하며, 방향 간선 생성 과정 또한 비가역 전이 요소 수에 비례한다. 마지막으로 3.3절의 위상학적 인과 검증 단계는 생성된 유향 구역 그래프 상에서 조건 요소의 상대적 위치 관계만을 비교한다. 이 과정은 구역 수와 간선 수에 비례하는 경량 그래프 검사로 수렴한다. 결과적으로 제안하는 방법의 전체 연산 비용은 입력 맵의 해상도와 구역 그래프의 크기에 의해 결정된다. 즉 레벨 규모가 증가하더라도 전체 비용은 공간 크기와 구조 요소 수에 따라 안정적으로 증가하며, 탐색 기반 방식에서 나타나는 지수적 상태 공간 증가와는 다른 계산 특성을 가진다. 이러한 구조는 대량의 후보 레벨을 반복적으로 생성하는 환경에서도 예측 가능한 연산 패턴을 유지하며, 구조적 모순 여부와 관계없이 안정적인 검증 비용을 제공한다.

탐색 기반 방식은 정상 레벨보다 오히려 해결 불가능한 레벨에서 더 큰 연산 비용을 요구하는 경우가 많다. 반면 제안하는 방법은 구조적 모순 여부만을 직접 검사하므로, 레벨이 정상인지 불량인지와 무관하게 유사한 연산 패턴을 유지한다. 즉 구조가 복잡하거나 소프트락 가능성이 높은 레벨이 입력되더라도 연산 시간이 급격히 증가하지 않는다.

따라서 제안하는 방법은 최단 경로를 계산하거나 완전한 플레이 시뮬레이션을 대체하는 범용 솔루션라기보다는, 탐색 이전 단계에서 구조적 모순 가능성을 선제적으로 제거하는 경량 구조 필터이다. 이러한 특성은 대량의 후보 레벨을 반복적으로 생성하고 검증하는 PCG 환경에서 특히 유용하며, 이후 탐색 기반 검증 엔진이나 플레이 테스트 단계가 처리해야 할 연산 부담을 효과적으로 감소시킨다.

## 4. 실험 결과

이 연구는 탐색 이전 단계에서 구조적 소프트락 가능성을 선제적으로 검출하는 경량 구조 필터를 제안한다. 따라서

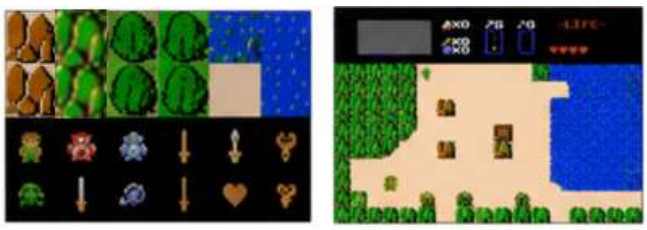

Figure 4. Example Zelda I-style level representation. The left image illustrates a tilemap constructed using VGDL-based Zelda tiles [1], whereas the right image presents the corresponding in-game rendering.

검증 과정에서는 복잡한 플레이 시뮬레이션의 완전성을 평가하기보다, 비가역 공간 구조와 선행 조건 의존성이 결합된 레벨에서 구조적 인과 모순을 안정적으로 판별할 수 있는지에 초점을 맞추었다.

Figure 4는 검증에 사용한 Zelda I 스타일 타일 기반 레벨 표현 예시를 보여준다. 예시 맵은 Zelda 계열 타일 구조와 공간 표현 방식을 참고하여 구성하였으며, 타일 시각화에는 VGDL 기반 Zelda tileset 표현 형식을 활용하였다 [1]. 이 연구는 실제 실험 데이터셋 전체를 공개하거나 개별 레벨 구조를 직접 분석 대상으로 제시하기보다, 제안하는 구조 검증 방식이 적용되는 대표적인 공간 표현 형식을 시각적으로 설명하는 데 목적을 둔다.

Figure 5은 제안하는 방법의 구조 검증 사례를 나타낸다. Figure 5 (a)는 정상적인 진행 구조를 보여준다. 열쇠가 문보다 상류 구역에 위치하므로 플레이어는 진행 과정에서 선행 조건을 충족한 이후 목적 구역으로 이동할 수 있다. 반면 Figure 5 (b)는 구조적 소프트락 사례를 나타낸다. 특정 문보다 이후 단계의 하류 구역에 해당 문의 열쇠가 배치되어 있으며, 비가역 전이 구조로 인해 플레이어는 원래 구역으로 복귀할 수 없다. 제안하는 방법은 실제 플레이어 이동이나 상태 시뮬레이션 없이도 이러한 하류 위반 구조를 직접 검출하였다.

Table 1. Structural comparison between search-based validation methods and the proposed method.

| Property | Search-based Validation | Proposed Method |
|---|---|---|
| Player simulation | Required | Not required |
| Backtracking | Possible | None |
| State restoration | Required | Not required |
| Contradiction detection | Indirect | Direct |
| Worst-case behavior | Search-dependent | Deterministic |
| Pre-validation suitability | Limited | Suitable |

Table 1은 기존 탐색 기반 검증 방식과 제안하는 방법의 구조적 특성을 비교한 결과를 나타낸다 [5-9]. 기존 방식은 플레이어 이동 시뮬레이션과 상태 공간 탐색을 기반으로 동작하므로, 복수의 조건 요소와 비가역 구조가 결합될 경우 반복적인 상태 복원과 백트래킹을 요구할 수 있다. 반면 제안하는 방법은 공간 구조를 유향 구역 그래프로 추상화한 뒤, 조건 요소의 상대적 위치 관계만을 분석하므로 탐색 과정 자체를 요구하지 않는다.

Table 2. Example processing behavior of the proposed method under different map resolutions.

| Map Size | Zones | Irreversible Edges | Processing Time (ms) |
|---|---|---|---|
| 32×32 | 4 | 3 | 0.12 |
| 64×64 | 9 | 7 | 0.31 |
| 128×128 | 17 | 12 | 0.74 |
| 256×256 | 31 | 24 | 1.63 |

추가적으로 제안하는 방법의 계산 특성을 확인하기 위해 서로 다른 규모의 타일 기반 레벨 환경을 대상으로 처리 시간을 측정하였다. Table 2는 맵 해상도 증가에 따른 구역 수와 비가역 전이 수, 그리고 전체 처리 시간의 변화를 나타낸다. 제안하는 방법은 레벨 규모가 증가하더라도 비교적 안정적인 연산 패턴을 유지하였으며, 비가역 구조와 조건 요소 수가 증가하는 경우에도 급격한 연산 지연을 보이지 않았다.

이러한 결과는 제안하는 방법이 탐색 기반 검증 방식과 다른 계산 특성을 가진다는 점을 보여준다. 기존 방식이 플레이어 상태와 경로 탐색을 동시에 처리하는 과정에서 연산 비용이 구조 복잡도에 따라 크게 변동하는 반면, 제안하는 방법은 공간 구조와 인과 관계를 직접 분석하므로 비교적 예측 가능한 계산 패턴을 유지한다. 특히 불가능한 구조를 판별하는 과정에서도 깊은 백트래킹이나 상태 복원을 요구하지 않으므로, 구조적 모순 여부와 관계없이 안정적인 처리 시간을 유지한다.

Table 3. Performance comparison of validation methods in high-resolution environment (256×256)

| Validation Method | Verification Time (Normal Level) | Verification Time (Soft-lock Level) |
|---|---|---|
| A* Search | 15.47 ms | 352.12 ms |
| CSP | 32.16 ms | 284.71 ms |
| Proposed Method | 1.49 ms | 1.63 ms |

Table 3은 제안 방법의 실질적인 효용성을 검증하기 위해, 가장 높은 복잡도를 가진 고해상도 레벨 데이터셋을 대상으로 기존의 대표적인 검증 방식인 A* 탐색[6] 및 CSP 기반 기법[9]과의 직접 비교 실험을 수행하였다. 실험 결과, 구조적 인과 모순으로만 구성된 해당 데이터셋에 대해 제안 방법은 기존 탐색 기반 방식들과 동일하게 100%의 검출 정밀도(Precision)와 재현율(Recall)을 달성하였다. 그러나 완전 탐색 과정에서 지수적 백트래킹을 유발하여 수십에서 수십 밀리초 이상의 연산 지연을 보인 기존 기법들과 달리, 제안

방법은 1.63 ms의 일관된 최소 연산 비용만으로 소프트락을 완벽히 검출함으로써 고해상도 레벨 환경에서의 뛰어난 정량적 연산 효율성을 입증하였다.

따라서 제안하는 방법은 완전한 플레이 가능성 판별 엔진이라기보다, 탐색 이전 단계에서 구조적 결함을 제거하는 경량 검증 계층으로 해석하는 것이 적절하다. 이러한 특성은 대량의 후보 레벨을 반복적으로 생성하는 환경에서 탐색 기반 검증과 플레이 테스트의 연산 부담을 감소시키는 데 유용하게 활용될 수 있다.

## 5. 결론

이 연구는 생성 기반 게임 레벨에서 발생하는 구조적 소프트락 문제를 해결하기 위해, 플레이어 이동 시뮬레이션 없이 공간 구조와 인과 관계를 직접 분석하는 위상학적 이진 레이어 분석 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 입력 레벨을 기능별 이진 레이어로 분해한 뒤, 비가역 전이 구조를 기준으로 공간을 독립 구역으로 분할하고, 이를 유향 구역 그래프로 추상화하여 선행 조건 요소 간의 위상학적 관계를 분석한다. 이러한 접근은 기존 탐색 기반 검증 방식이 요구하던 반복적인 상태 복원 과정 없이, 구조적 인과 모순을 탐색 이전 단계에서 직접 판별할 수 있도록 한다. 구조 검증 사례와 비교 분석 결과는 제안하는 방법이 탐색 기반 플레이 가능성 검증을 대체하는 범용 솔루션이 아니라, 구조적 결함을 선제적으로 제거하는 경량 검증 계층으로 효과적으로 기능할 수 있음을 보여주었다. 결과적으로 이 연구는 게임 레벨 검증 문제를 상태 공간 탐색 중심의 접근에서 공간 구조 기반 위상 분석 문제로 재정의하였으며, 생성 기반 레벨 검증 과정에서 예측 가능하고 효율적인 구조 분석 방법을 제시하였다는 점에서 의의를 가진다.

## 감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: RS-2026-25479030). 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 "유연소재 촉각 인터페이스에 대한 지능적 촉각 생성과 미세 반응 추론 기술(Generative Haptics and Fine Response Inference for Flexible Tactile Interfaces)" 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호: IITP-RS-2025-02214780)

## References

[1] M. Summerville, S. Snodgrass, M. Guzdial, C. Holmgren, A. K. Hoover, A. Isaksen, A. Nealen, and J. Togelius, “The Video Game Level Corpus,” Proceedings of the 7th International Conference on Computational Creativity, pp. 353-359, 2016.

[2] N. Shaker, J. Togelius, and M. J. Nelson, Procedural Content Generation in Games, Springer, pp. 1-14, 2016.

[3] G. N. Yannakakis and J. Togelius, Artificial Intelligence and Games, Springer, pp. 195-236, 2018.

[4] J. Liu, S. Snodgrass, and G. N. Yannakakis, “Deep Learning for Procedural Content Generation,” IEEE Transactions on Games, vol. 13, no. 1, pp. 19-37, 2021.

[5] T. S. Sturtevant, “Benchmarks for Grid-Based Pathfinding,” IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games, vol. 4, no. 2, pp. 144-148, 2012.

[6] P. E. Hart, N. J. Nilsson, and B. Raphael, “A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths,” IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, vol. 4, no. 2, pp. 100-107, 1968.

[7] C. Browne, E. Powley, D. Whitehouse, S. Lucas, P. I. Cowling, P. Rohlfshagen, S. Tavener, D. Perez, S. Samothrakis, and S. Colton, “A Survey of Monte Carlo Tree Search Methods,” IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games, vol. 4, no. 1, pp. 1-43, 2012.

[8] J. Xu and J. Morris, “Procedural Generation in 2D Metroidvania game with Answer Set Programming,” CS & IT Conference Proceedings, vol. 13, no. 5, 2023.

[9] J. Whitehead, “Spatial Layout of Procedural Dungeons Using Linear Constraints and SMT Solvers,” Proceedings of the 15th International Conference on the Foundations of Digital Games, pp. 1-9, 2020.

[10] R. E. Tarjan, “Depth-First Search and Linear Graph Algorithms,” SIAM Journal on Computing, vol. 1, no. 2, pp. 146-160, 1972.

[11] H. Samet, “Foundations of Multidimensional and Metric Data Structures”, Morgan Kaufmann, 2006.

[12] S. M. LaValle, Planning Algorithms, Cambridge University Press, pp. 185-243, 2006.

## 〈저자소개〉

**조은경**

- 2006년 2월 상명대학교 법학과(학사)
- 2023년 8월 인하대학교 전기컴퓨터공학과(석사)
- 2023년 9월~현재 인하대학교 전기컴퓨터공학과(박사과정 중)
- 관심분야: 게임, 컴퓨터그래픽스, 데이터사이언스, 딥러닝, HCI
- https://orcid.org/0000-0002-9551-6813

**신병석**

- 1990년 2월 서울대학교 컴퓨터공학과(학사)
- 1992년 2월 서울대학교 컴퓨터공학과(석사)
- 1997년 2월 서울대학교 컴퓨터공학과(박사)
- 2000년 3월~현재 인하대학교 컴퓨터공학과 교수
- 관심분야: AI, 컴퓨터 비전, 실시간 렌더링, 볼륨 그래픽스, 의료영상
- https://orcid.org/0000-0001-7742-4846