

교통 인프라 안전 강화를 위한 AI 기반 도로 위험 요소 및 싱크홀 탐지 기법 연구

김지훈^{1*}, 김상엽², 서윤하³, 조민혁², 유지민², 김다은², 임유리², 신용태^{2**}

¹숭실대학교 컴퓨터학과

²숭실대학교 컴퓨터학부

³숭실대학교 소프트웨어학부

bizkjh9827@gmail.com, yeop@yeop.kr, bobo9245@soongsil.ac.kr, alsgr2348@naver.com, yujimin@soongsil.ac.kr, adune@soongsil.ac.kr, yuri00805@naver.com **shin@ssu.ac.kr

A Study on AI-Based Road Hazard and Sinkhole Detection Techniques for Enhancing Transportation Infrastructure Safety

JiHun Kim^{1*}, SangYeop Kim², YunHa Seo³, MinHyuk Cho², YuRi Im², Daeun Kim², YoungTae Shin^{2**}

¹Department of Computer Science & Engineering

²School of Computer Science & Engineering

³School of Software

요약

본 논문은 도로 손상 및 싱크홀 전조 현상이 단순한 객체로 정의되기 어려운 복합적 시각 패턴이라는 문제의식에서 출발한다. 기존의 도로 손상 탐지 연구가 포트홀이나 균열과 같은 명확한 객체 탐지에 집중해 온 반면, 싱크홀 전조 징후에 대한 표현 학습 관점의 연구는 충분히 이루어지지 않았다. 이에 본 연구는 Grayscale 변환과 Hue 변환을 단순한 데이터 증강이 아닌, 구조 정보와 색상 정보를 분리하여 해석하기 위한 관점으로 재정의하고, 두 시각적 단서를 분리 학습 후 결합하는 개념적 학습 프레임워크를 제안한다. 제안한 접근은 단일 RGB 영상에서도 상호 보완적인 특정 학습이 가능함을 보여주며, 향후 객체로 정의되기 어려운 도로 위험 전조 현상을 인식하기 위한 표현 학습 연구의 기초 방향성을 제시한다.

I. 서론

도로 손상 및 지반 침하로 인한 싱크홀 사고는 예기치 못한 인명 피해로 이어질 수 있는 중대한 도시 안전 문제이다. 실제로 2024년 서울 강동구에서 도로 하부 지반 붕괴로 인해 발생한 싱크홀 사고에서는 주행 중이던 오토바이가 도로 함몰 구간으로 추락하여 운전자가 사망하는 인명 피해가 발생한 것으로 보고되었다. 해당 사고는 도로 표면에서 뚜렷한 이상이 관측되지 않더라도, 지반 이상이 누적될 경우 치명적인 사고로 이어질 수 있음을 보여주며, 싱크홀 전조 징후를 사전에 인식하는 기술의 필요성을 사회적으로 부각시켰다.

이와 같은 위험을 예방하기 위해 영상 데이터를 활용한 인공지능 기반 도로 손상 탐지 연구가 활발히 이루어지고 있다. 최근에는 딥러닝 객체 탐지 모델을 활용하여 포트홀이나 균열과 같은 도로 손상을 자동으로 인식하는 연구가 다수 제안되었다. 그러나 기존 연구의 대부분은 이미 명확히 드러난 손상 객체를 탐지하는 데 초점을 맞추고 있어, 싱크홀 발생 이전 단계에서 나타나는 미세한 전조 징후를 효과적으로 다루는 데에는 한계가 있다[1].

싱크홀 전조 현상은 일반적인 객체(object)로 정의되기 어렵고, 미세 균열의 분기 형태, 도로 표면의 국부적 질감 변화, 조도 조건에 따른 명암 불균일성 등과 같은 복합적인 시각적 패턴으로 나타난다. 이러한 특성으로 인해 전조 징후 탐지는 단순한 객체 검출 문제라기보다, 이미지 내 시각적 정보가 어떻게 표현되고 해석되는지에 대한 문제로 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고 기존 도로 손상 탐지 연구에서는 색상 정보와 구조적 정보가 명확히 구분되지 않은 상태에서 모델 학습이 이루어지는 경우가 많아,

모델이 실제로 어떤 시각적 단서에 의존하여 판단을 내리는지에 대한 해석은 충분히 논의되지 않았다[2].

본 논문에서는 이러한 문제의식에 기반하여, 기존의 데이터 증강 기법으로 널리 사용되어 온 Grayscale 변환과 Hue 변환을 단순한 데이터 다양화 수단이 아닌, 서로 다른 시각적 단서(cue)를 분리하여 해석하기 위한 관점으로 재정의한다. Grayscale 변환은 명암 대비와 질감 중심의 구조적 정보를 강조하는 수단으로, Hue 변환은 촬영 환경과 카메라 설정 차이에 따른 색상 편향을 완화하기 위한 색상 정보 제어 수단으로 해석한다. 이를 통해 도로 손상 및 싱크홀 전조 탐지 문제를 색상 정보와 구조적 정보의 관점에서 재조명하고, 두 정보 축을 구분하여 고려하는 개념적 학습 프레임워크를 제안한다.

본 연구는 새로운 네트워크 구조를 제안하기보다는, 이미지 기반 도로 위험 탐지에서 색상 정보와 구조적 정보의 역할을 명확히 구분하여 해석하는 관점을 제시하고, 이를 기반으로 싱크홀 전조와 같은 객체로 정의되기 어려운 위험 징후를 인식하기 위한 개념적 학습 프레임워크를 제안한다. 제안한 관점은 향후 다양한 딥러닝 모델과 결합되어 표현 학습 관점의 연구로 확장될 수 있을 것으로 기대한다.

II. 관련연구

1 YOLO-RD: A Road Damage Detection Method for Effective Pavement Maintenance[3]

본 연구는 YOLO 기반 객체 탐지 모델을 활용하여 포트홀, 균열 등 다양한 도로 손상을 실시간으로 탐지하는 방법을 제안하였다. RGB 영상 기반

학습을 통해 높은 탐지 성능을 달성하였으나, 색상과 구조 정보를 분리하여 학습하는 구조는 고려하지 않았으며, 싱크홀과 같은 전조 현상 탐지에는 한계가 있다.

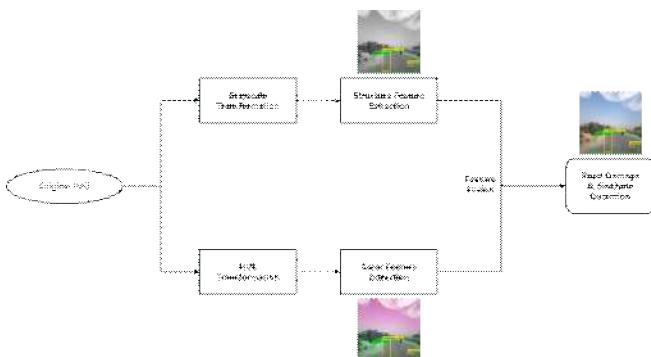
2. Novel Chromaticity Similarity Based Color Texture Descriptor for Digital Pathology Image Analysis[4]

색상 정보와 구조적 텍스처 정보를 분리하여 활용하는 연구들은 주로 의료 영상 및 일반 영상 분석 분야에서 제안되어 왔다. 특히 조직병리 영상 분석에서는 색상 기반 표현과 Grayscale 기반 텍스처 특징을 분리하여 결합하는 방식이 효과적인 것으로 보고되었다. 그러나 이러한 접근은 대부분 의료 영상 도메인에 국한되어 있으며, 단일 RGB 영상으로부터 Grayscale 및 Hue 표현을 구조적·색상적 특징으로 명시적으로 분리하여 학습하는 도로 손상 탐지 연구는 거의 보고된 바가 없다.

기존 연구들은 Grayscale 및 색상 변환을 주로 데이터 증강이나 입력 표현 개선 관점에서 활용한 반면, 본 연구는 이를 특정 표현 수준에서의 역할 분리 학습으로 확장하여 도로 손상 및 싱크홀 전조 탐지 성능 향상을 목표로 한다.

III. 제안하는 방법

본 연구에서는 단일 RGB 영상으로부터 도로 손상 및 싱크홀 전조 현상을 효과적으로 탐지하기 위해, Grayscale 기반 구조 정보와 Hue 기반 색상 정보를 분리하여 학습한 후 결합하는 특정 표현 분리 학습 프레임워크를 제안한다. 기존의 색상 변환 기반 데이터 증강 방식은 서로 다른 영상 표현을 동일한 학습 경로로 처리함으로써 특징이 네트워크 내부에서 혼합되는 한계가 있다. 이에 반해, 본 연구는 영상 표현의 차이를 단순한 입력 다양화가 아닌 특정 학습 단계에서의 역할 분리로 정의한다. 제안하는 특정 표현 분리 학습 프레임워크의 전체 구조는 [그림 1]에 나타내었다.



[그림 1] 제안하는 Grayscale - Hue 기반 특징 표현 분리 학습 프레임워크.

입력으로 주어지는 RGB 영상은 Grayscale 영상과 Hue 영상으로 각각 변환된다. Grayscale 영상은 도로 균열, 포트홀의 윤곽, 표면의 미세한 형태 변화와 같은 형상 및 구조적 특징을 강조하며, Hue 영상은 강우로 인한 물고임, 아스팔트 표면 색상 변화, 토양 노출 등 환경적·색상 기반 특징을 효과적으로 반영한다. 두 영상은 동일한 원본으로부터 생성되지만, 서로 다른 의미 정보를 포함하도록 설계된다.

변환된 Grayscale 영상과 Hue 영상은 각각 독립적인 특징 추출 경로를 통해 처리된다. 두 경로는 동일한 네트워크 구조를 사용하지만 입력 표현이 다르기 때문에, Grayscale 경로에서는 구조 중심 특징이, Hue 경로에서는 색상 중심 특징이 주로 학습된다. 이와 같이 특정 추출 단계에서 표

현을 분리함으로써, 구조 정보와 색상 정보 간의 상호 간섭을 최소화한다. 각 경로에서 추출된 특징 표현은 이후 결합 단계에서 하나의 통합 특징으로 융합되며, 결합된 특징은 객체 탐지 헤드에 전달되어 도로 손상 및 싱크홀 전조 영역을 최종적으로 탐지한다. 이러한 분리 - 결합 구조를 통해, 단일 RGB 영상에서도 상호 보완적인 특정 학습이 가능하도록 한다.

IV. 결론

본 연구에서는 단일 RGB 영상 기반 도로 손상 및 싱크홀 전조 탐지 성능 향상을 위해, Grayscale 기반 구조 정보와 Hue 기반 색상 정보를 분리하여 학습한 후 결합하는 특정 표현 분리 학습 프레임워크를 제안하였다. 기존의 색상 변환 기반 접근이 입력 수준의 데이터 증강에 머무른 것과 달리, 본 연구는 특정 학습 단계에서 영상 표현의 역할을 분리함으로써 구조 정보와 색상 정보 간의 상호 간섭을 최소화하였다.

제안한 방법은 Grayscale 영상으로부터 도로 균열 및 형상 중심 특징을, Hue 영상으로부터 색상 변화 및 환경적 요인을 반영한 특징을 각각 학습한 뒤 이를 결합하여 객체 탐지를 수행한다. 이를 통해 단일 RGB 영상만으로도 상호 보완적인 특정 학습이 가능함을 확인하였으며, 도로 손상 및 싱크홀 전조 탐지에서의 유효성을 보였다.

본 연구는 색상 - 구조 분리 표현 학습 개념을 도로 손상 탐지 도메인에 적용하였다는 점에서 의의가 있다. 향후에는 다양한 도로 환경과 기상 조건에 대한 추가 검증과 함께, 경량화 및 실시간 처리 성능 개선을 통해 실제 도로 관리 시스템으로의 적용 가능성을 확장할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 SW중심대학사업의 지원을 받아 수행되었음(2024-0-00071)

참 고 문 헌

- [1] Maeda, H., Kashiyama, T., Sekimoto, Y., Seto, T., and Omata, H., "Road Damage Detection with Models Learning from Each Other," IEEE Access, vol. 8, pp. 113252 - 113265, 2020.
- [2] Maeda, H., Sekimoto, Y., Seto, T., Kashiyama, T., and Omata, H., "A Large-Scale Benchmark for Road Damage Detection and Classification," Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing (ICIP), pp. 3453 - 3457, 2018.
- [3] Kim, S., Park, J., and Lee, H., "YOLO-RD: A Road Damage Detection Method for Effective Pavement Maintenance," Sensors, vol. 25, no. 3, Article ID 11902777, 2025.
- [4] Li, X., and Plataniotis, K. N., "Novel chromaticity similarity based color texture descriptor for digital pathology image analysis," PLoS ONE, vol. 13, no. 11, e0206996, 2018.