도시 교차로 미시 시뮬레이션 기반 안전성 분석과 시나리오 비교를 위한 인터랙티브 시각화 시스템

이제호[O], 신동화
광운대학교 컴퓨터정보공학부
jehohi04@kw.ac.kr, dhshin@kw.ac.kr

An Interactive Visualization System for Microscopic Simulation-Based Safety Analysis and Scenario Comparison of Urban Intersections

Jeho Lee[O], DongHwa Shin
School of Computer and Information Engineering, Kwangwoon University

요 약

본 연구는 도시 교차로에서 발생하는 미시적 충돌 위험을 효과적으로 분석하기 위해, 미시 교통 시뮬레이션 기반의 인터랙티브 시각화 시스템을 제안한다. SUMO 시뮬레이션으로부터 생성된 차량 궤적 데이터를 활용하여 TTC, MTTC, DRAC과 같은 대리 안전 지표를 산출하고, 이를 시간 및 공간 정보와 결합하여 시각적으로 표현한다. 또한 네트워크 맵, 시계열 차트, 차선 단위 교차로 뷰로 구성된 다중 시각화 구조를 통해 위험 패턴을 직관적으로 탐색할 수 있도록 한다. 특히 자율주행차 시장침투율(MPR)이 서로 다른 시나리오를 동일 시간·공간 기준에서 직접 비교할 수 있는 기능을 제공함으로써, 위험의 발생 시점, 위치, 강도 변화를 통합적으로 분석할 수 있다. 사례 연구 결과, MPR 증가에 따라 위험 이벤트의 발생 빈도와 공간적 확산이 증가하는 비선형적 패턴이 확인되었으며, 제안 시스템이 교차로 안전성 분석 및 의사결정 지원에 효과적으로 활용될 수 있음을 보였다.

1. 서 론

도시 교차로는 상충하는 진행 방향, 복잡한 차로 구성, 그리고 신호 전환이 동시에 작용하는 공간으로, 교통사고가 집중적으로 발생하는 대표적인 위험 지점이다. 그럼에도 불구하고 기존의 교차로 안전 평가는 주로 사고 건수, 접근로별 교통량, 평균 지체와 같은 집계 지표에 의존해 왔다. 이러한 접근은 수 초 단위로 발생하는 근접 충돌 상황이나 특정 차선 및 시간대에 국지적으로 나타나는 위험 패턴을 충분히 반영하지 못한다는 한계를 가진다 [4][5].

특히 자율주행차의 시장침투율(Market Penetration Rate, MPR) 변화와 같이 실제 사고 데이터가 충분히 축적되지 않은 상황에서는, 잠재적 위험을 사전에 분석할 수 있는 미시적 접근이 더욱 중요해진다. 미시 교통 시뮬레이션은 개별 차량의 주행 궤적과 상호작용을 정밀하게 반영할 수 있어 이러한 분석에 효과적인 방법으로 활용되고 있으나 [1], 시뮬레이션을 통해 생성되는 대규모 데이터는 그 자체로 해석이 어렵고 직관적인 분석을 저해하는 요소로 작용한다. 따라서 방대한 시뮬레이션 결과를 사용자 관점에서 이해 가능하게 변환하고, 위험 패턴을 탐색할 수 있는 시각적 분석 도구의 필요성이 증가하고 있다.

기존 연구에서는 개별 시나리오에 대한 분석 결과를 제시하거나 통계적 비교를 수행하는 방식이 주로 사용되어 왔다. 그러나 이러한 방식은 서로 다른 조건 간의 시간적·공간적 대응 관계를 직접적으로 파악하기 어렵다는 한계를 가진다. 특히 자율주행차 도입 수준과 같이 연속적인 변화가 존재하는 변수에 대해서는, 동일한 시간 구간과 동일한 공간 맥락에서 위험 패턴을 비교할 수 있는 분석 환경이 필요하다. 즉, 단순한 수치 비교를 넘어 시나리오 간 위험의 발생 위치, 시점, 강도를 직관적으로 대응시켜 분석할 수 있는 비교 중심의 시각화 도구가 요구된다 [3].

본 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해, 미시 교통 시뮬레이션 기반 교차로 안전 분석을 위한 인터랙티브 시각화 시스템을 제안한다. 제안 시스템은 SUMO 시뮬레이션으로부터 생성된 차량 궤적 데이터를 기반으로 Time-to-Collision (TTC), Modified TTC (MTTC), Deceleration Rate to Avoid a Crash (DRAC)와 같은 대리 안전 지표를 산출하고 [2][5], 이를 시간 및 공간 정보와 결합하여 시각적으로 표현한다. 사용자는 네트워크 맵, 시계열 차트, 차선별 교차로 뷰로 구성된 다중 뷰 인터페이스를 통해 위험 패턴을 직관적으로 탐색할 수 있으며, 특정 시점과 차선에 대한 상세 분석이 가능하다.

본 시스템은 동일 교차로에 대해 서로 다른 MPR 시나리오를 동시에 비교할 수 있는 기능을 제공한다. 동일한 시간 세그먼트와 공간적 기준을 공유하는 상태에서 시나리오별 위험 지표를 대응시켜 시각화함으로써, 단순 평균값 비교로는 파악하기 어려운 미시적 차이를 명확하게 드러낼 수 있다. 이를 통해 특정 시점에서의 위험 집중 현상,



(그림 1) 교통 시각화 시스템 분석 인터페이스

차선별 안전성 변화, 그리고 자율주행차 혼입 비율 증가에 따른 비선형적 안전성 변화를 효과적으로 분석할 수 있다.

결론적으로 본 연구의 목적은 복잡한 미시 시뮬레이션 데이터를 단순 지표가 아닌 상호작용적 탐색과 시나리오 간 직접 비교가 가능한 형태로 제공함으로써, 도시 교차로의 잠재적 충돌 위험을 보다 정밀하게 진단할 수 있는 분석 환경을 구축하는 데 있다.

2. 미시 시뮬레이션 기반 안전성 분석

본 연구에서는 도시 교차로 내 차량 간 상충 상황을 정밀하게 분석하기 위해 미시 교통 시뮬레이션을 활용하였다. Simulation of Urban MObility (SUMO)는 개별 차량 단위의 이동을 모델링할 수 있는 시뮬레이터로, 차량의 위치, 속도, 가속도와 같은 동적 정보를 시간 단위로 제공한다 [1]. 본 연구에서는 SUMO로부터 생성된 FCD를 활용하여 교차로 주변 차량 궤적 데이터를 추출하고 분석에 사용하였다.

시간에 따른 안전성 변화를 효과적으로 파악하기 위해 세그먼트 기반 분석 방법을 적용하였다. 전체 시뮬레이션 시간(1시간)을 일정 간격으로 분할하고, 각 구간에서 차량 간 상호작용 데이터를 집계하여 안전 지표를 산출하였다. 이를 통해 특정 시점에서 발생하는 순간적 위험뿐만 아니라, 시간 흐름에 따른 위험 패턴을 분석할 수 있도록 하였다.

안전성 평가는 대리 안전 지표(Surrogate Safety Measures)를 기반으로 수행되었다 [2]. TTC은 두 차량 간 충돌까지의 예상 시간을 의미하며, 값이 작을수록 위험도가 높다. MTTC는 상대 가속도를 고려하여 보다 현실적인 위험도를 반영하며, DRAC는 충돌을 회피하기 위해 필요한 최소 감속도를 의미한다. 본 연구에서는 이 세 가지 지표를 활용하여 교차로 내 잠재적 충돌 위험을 정량적으로 분석하였다.

3. 인터랙티브 시각화 및 비교 시스템

본 연구에서는 미시 교통 시뮬레이션으로부터 생성되는 대규모 시계열 데이터를 직관적으로 해석하기 위해 인터랙티브 시각화 시스템을 설계하였다. 시스템은 시뮬레이션 로그를 전처리하고 안전지표를 산출하는 분석 모듈, 그리고 사용자 상호작용을 기반으로 결과를 탐색·비교하는 프런트엔드 모듈로 구성된다 [3].

시각화 계층은 다중 뷰(Multi-view) 구조를 기반으로 하며, 각 뷰가 서로 다른 분석 단위(공간, 시간, 차선, 사건)를 담당하고 동기화되어 작동한다. 이를 통해 사용자는 단일 그래프나 단일 지도에서 놓치기 쉬운 위험의 전개 과정을 입체적으로 파악할 수 있다.

핵심 뷰인 교통 맵(그림 1-A)은 교차로 주변 차량의 위치와 이동 흐름을 공간적으로 표현하며, TTC·MTTC·DRAC 등 선택 지표에 따라 차량 또는 구간의 위험도를 색상으로 인코딩한다. 시계열 차트(그림 1-B)는 지표의 시간 변화 패턴을 제공하고, 특정 시점을 선택하면 맵 및 하위 분석 뷰가 동일 시각으로 동기화되어 위험 전후 맥락을 추적할 수 있도록 한다. 차선 단위 교차로 집계 뷰(그림 1-C)는 접근로/차선별 누적 위험 또는 교통량을 비교 가능하게 표현하여, 위험이 집중되는 차선을 빠르게 식별하도록 지원한다.

본 시스템은 사건 중심 탐색을 위해 세그먼트 목록 패널(그림 1-D)과 차선 선택/강조 패널(그림 1-E)을 제공한다. 사용자는 고위험 이벤트 구간을 우선적으로 선택하고, 관심 차선을 필터링하여 동일 차선의 위험 변화를 여러 뷰에서 일관되게 추적할 수 있다. 분석 조건 설정 패널(그림 1-F)에서는 교차로, 누적 주기, 시나리오 등을 조정할 수 있으며, 시간·세그먼트 재생 제어(그림 1-G)를 통해 특정 위험 구간을 반복 재생하면서 급감속, 상충 직전 거동, 추종 불안정과 같은 미시적 위험 징후를 상세히 검토할 수 있다.

본 시스템의 핵심 기여는 시나리오 간 동시 비교 분석이다. 동일 교차로 환경에서 MPR을 달리한 복수 시나리오를 동일 시간 세그먼트 기준으로 정렬하고 병렬 배치하여, 동일 시점·동일 공간에서 나타나는 위험 패턴을 직접 대응 비교할 수 있도록 하였다. 이 방식은 평균값이나 총량 통계 중심의 비교와 달리, 위험의 발생 위치, 발생 시점, 차선별 확산 양상을 동시에 해석하게 해 준다.

결과적으로 사용자는 자율주행차 혼입 수준 변화에 따른 안전성 차이를 정량·정성 측면에서 함께 확인할 수 있으며, 위험 완화 전략(신호 운영, 차선 운영, 속도 관리)의 우선순위를 보다 명확히 도출할 수 있다.

4. 사례 연구 및 결과

본 연구에서는 미시 교통 시뮬레이션 데이터를 기반으로 도시 교차로의 안전성을 분석하기 위한 인터랙티브 시각화 시스템을 제안하였다. 기존의 교차로 안전 분석이 사고 건수나 평균 교통량과 같은 집계 지표에 의존해 온 것과 달리, 본 연구는 TTC, MTTC, DRAC과 같은 대리 안전 지표를 활용하여 차량 간 잠재적 충돌 위험을 미시적으로 분석하였다. 또한 시간 세그먼트 기반 분석을 통해 교차로 내 위험의 시간적 변화 패턴을 정량적으로 파악하고, 이를 사용자 중심의 인터랙티브 시각화 환경에서 직관적으로 탐색할 수 있도록 하였다.

본 연구의 핵심은 서로 다른 시나리오를 동일 시간·공간 기준에서 직접 비교할 수 있는 시각화 구조를 제안한 데 있다. 사례 연구에서는 동일 교차로와 동일 세그먼트(3,180초-3,240초) 구간을 기준으로 MPR 30%와 80% 시나리오를 비교하였으며, 그 결과 MPR 80% 조건에서 TTC 이벤트가 6건에서 16건으로, DRAC이 3건에서 10건으로 증가하는 등 위험 이벤트의 발생 빈도가 크게 증가하는 양상이 확인되었다. 이러한 변화는 단순한 교통량 증가뿐만 아니라 차량 간 반응 특성과 밀집 구간에서의 상호작용 증가가 복합적으로 작용한 결과로 해석된다.

시계열 차트에서는 MPR 80% 조건에서 특정 시점에 위험 이벤트가 연속적으로 발생하며 피크가 집중되는 현상이 나타났고, 네트워크 맵에서는 위험 차량이 교차로 접근로 전반으로 확산되는 양상이 확인되었다. 반면 MPR 30% 조건에서는 위험 이벤트가 일부 차선에 국한되어 발생하는 경향을 보였으며, 교차로 뷰에서도 특정 접근 방향에서 위험이 집중되는 비균질적 패턴이 관찰되었다. 이러한 결과는 교차로 내 위험이 균일하게 증가하는 것이 아니라 특정 차선과 시간 구간에 집중되는 구조적 특성을 가지며, 자율주행차 혼입 수준 변화에 따라 교통 안전성이 비선형적으로 변화할 수 있음을 시사한다.

제안한 시스템은 시계열, 공간, 차선 단위 정보를 통합적으로 제공하고 시나리오 간 직접 비교를 지원함으로써, "언제, 어디서, 어떤 차선에서 위험이 발생하는지"를 효과적으로 파악할 수 있는 분석 환경을 제공한다는 점에서 의의를 가진다. 이는 향후 교차로 설계, 신호 운영 전략 수립, 자율주행차 도입 정책 결정 과정에서 활용 가능한 의사결정 지원 도구로 확장될 수 있다. 다만 본 연구는 SUMO 기반 시뮬레이션 데이터와 제한된 MPR 시나리오에 의존한다는 한계를 가지며, 향후 다양한 교차로 유형과 실제 교통 데이터를 반영한 확장 연구 및 비교 분석 기능의 고도화가 필요하다.

참고 문헌

[1] D. Krajzewicz, J. Erdmann, M. Behrisch, and L. Bieker, "Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban Mobility," International Journal On Advances in Systems and Measurements, Vol.5, No.3&4, pp.128-138, 2012.

[2] M. M. Minderhoud and P. H. L. Bovy, "Extended Time-to-Collision Measures for Road Traffic Safety Assessment," Accident Analysis and Prevention, Vol.33, No.1, pp.89-97, 2001.

[3] Z. Wang, M. Lu, X. Yuan, J. Zhang, and H. Van De Wetering, "Visual Traffic Jam Analysis Based on Trajectory Data," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.19, No.12, pp.2159-2168, Dec. 2013.

[4] C. Xu, P. Liu, W. Wang, and Z. Li, "Evaluation of the impacts of traffic states on crash risks on freeways," Accident Analysis and Prevention, Vol.47, pp.162-171, 2012.

[5] T. Sayed and C. Zein, "Traffic conflict standards for intersections," Transportation Planning and Technology, Vol.22, No.4, pp.309-323, 1999.