

모바일 기반 영상 자료 활용 교통상충 분석 방향: SSM 지표 검토 중심으로

Direction for Traffic Conflict Analysis Using Mobile-based Image Data: Focused on Review of SSM

남 상 기* · 김 천 호** · 정 연 식***

* 주저자 : 영남대학교 도시공학과 박사 수료

** 공저자 : (유)삼송 SPS팀 팀장

*** 교신저자 : 영남대학교 도시공학과 교수

Sanggi Nam* · Cheonho Kim** · Younshik Chung*

* Dept. of Urban Planning and Engineering, Yeungnam University

** Samsong Industries, Ltd.

† Corresponding author : Younshik Chung, tpgist@yu.ac.kr

Vol. 23 No.5(2024)
October, 2024
pp.147~167

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2024.23.5.147>

Received 25 September 2024
Revised 14 October 2024
Accepted 15 October 2024

© 2024. The Korean Society of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요 약

교통상충 기법은 차량간 시공간적 이동 궤적에 대한 분석을 기반으로 진행되기 때문에, 영상을 통해 수집된 자료를 활용하는 것이 일반적이었다. 최근, 모바일 영상 수집 장치의 기술과 분석 기술의 발전으로 교통상충 기법을 활용한 교통안전 분야 연구는 더욱 도전적으로 다가오고 있다. 이러한 배경하에, 본 연구의 목적은 영상자료 기반 교통상충 기법 활용 연구와 영상자료의 유형 별 대체안전지표(surrogate safety measure: SSM)의 고찰하고, 이를 통해 교통상충 기반 교통안전 연구를 위한 모바일 영상 자료 구축 및 모바일 영상 자료 기반 SSM 활용 방안을 제시하는 것이다. 이를 위해 과거 50년간(1972-2022)간 영상자료 기반 교통상충 관련 연구와 이들 연구에 활용된 SSM을 조사하였다. 총 40건의 연구를 검토하여, 연구에 활용된 영상자료의 유형과, 수집 장비 및 SSM을 정리하였다. 특히, 활용된 SSM의 수식 및 장단점 등 구체적인 내용을 정리하였다. 대부분 연구에서는 고정식 영상을 활용한 반면, 모바일 영상 자료의 단독 활용은 연구는 전무하여, 모바일 영상 자료의 활용에 대한 부분은 기존 연구와의 간격을 보여주었다. 본 연구의 결과는 향후 모바일 영상 자료를 활용한 교통안전 분석 분야 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

핵심어 : 영상 장비, 모바일 영상 자료, SSM, Traffic conflict, 차량 대시캠

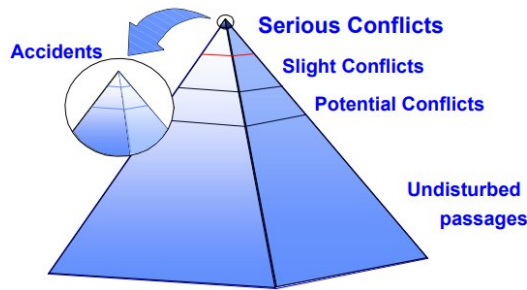
ABSTRACT

Since the traffic conflict technique is typically based on analyzing spatiotemporal movement trajectories between vehicles, it has been expected to use data collected through video footage. Recently, with advances in mobile image-related technologies, research in traffic safety using the traffic conflict technique has become more challenging. This study aims to review the use of image-based traffic conflict studies and surrogate safety measures (SSM) by type of image data and to suggest a direction for constructing mobile image data for measuring traffic conflict. This study reviews SSM used in image-based traffic conflict assessment over the past 50 years (1972-2022). A total of 40 studies were reviewed to identify the types of image data, collection equipment, and SSMs. Most studies have used fixed devices, while there has been no research on the exclusive use of mobile image data, identifying research gaps with previous studies on the use of mobile image data. The results are expected to be used as basic information in traffic safety using mobile image data.

Key words : Mobile Video Data, SSM, Traffic Conflict, Vehicle Dashcam

I. 서론

전통적인 교통안전 분석은 주로 경찰이 수집한 과거 사고 기록 자료 기반으로 한 분석과 모델링에 의존해 왔다. 그러나 이러한 방식은 최근 3-5년간의 사고 이력을 기반으로 하며, 안전 조치를 평가하기 위해서는 충분한 사고 기록 자료가 필요하다. <Fig. 1>의 안전 피라미드(Safety Pyramid) 이론에 따르면, 심각한 사고에 비해 비충돌 이벤트나 경미한 사고가 훨씬 빈번하게 발생하지만, 전통적 접근 방식에서는 이를 충분히 다루지 않았다. 즉, 비충돌 이벤트나 경미한 사고 자료를 활용하면 많은 사고 기록이 필요한 전통적 접근 방식의 한계를 극복할 수 있으며, 이를 위한 방법으로 교통상충 기법이 제안되었다.



<Fig. 1> Safety pyramid (Source: Astarita and Giofre, 2019)

교통상충 기법 기반 교통안전 분석은 지난 수십 년 동안 상당한 관심을 받아왔다. 교통상충 기법은 차량 간 충돌이 발생하지는 않았으나 충돌로 이어질 수 있는 위험한 상황까지 포함한 비충돌 이벤트 접근법으로 차량 충돌 회피 행동에 대한 관찰 및 포착하는 것을 포함하며, 관찰된 비충돌 이벤트 기반으로 대체안전지표 (Surrogate safety measure: SSM, 이하 SSM)을 구현하여 도로 안전에 대해 평가한다(Singh et al., 2023). 이 기법은 비충돌 이벤트를 충돌 빈도 또는 심각도로 변환하는 정확한 방법으로 평가받고 있다(Singh et al., 2023).

교통상충 기법은 영상자료를 활용하는 경우가 많으며, 현재까지는 고정식 영상 장비에서 수집된 자료 기반으로 교통안전 분석을 진행한 경우가 대부분이다. 그러나 고정식 영상 장비는 관측 공간(Region of interest: ROI) 이외의 공간에 대해서는 자료수집이 불가능하다는 제약이 존재하며, 이러한 공간적 제약을 극복하기 위해서는 관측 장비의 수를 증가시켜야 하지만, 예산과의 절충이 필요하다. 최근 차량 블랙박스, 드론 등과 같이 특정 객체에 장착되거나 스스로 움직이며 영상을 수집하는 모바일 영상 장비의 보급과 활용이 증가하고 있다. 이러한 기술적, 사회적 환경의 변화는 교통안전 분야 연구에 새로운 기회로 활용될 수 있다. 즉 모바일 영상 장비의 활용은 고정식 영상 장비의 공간적 한계 극복이 가능하며, 특히, 차량 블랙박스 보급률이 높은 국내 환경에서는 더욱 유리하며, 이러한 모바일 영상 장비를 통해 수집된 자료 기반 교통상충 기법에 대한 연구가 요구된다. 이러한 배경 하에, 본 연구는 영상자료 기반 교통상충 기법을 활용한 교통안전 연구와 이들 연구에 활용된 SSM 지표를 고찰하고, 모바일 영상자료 기반 교통상충 기법을 적용하기 위한 영상자료 구축 방안 및 SSM 도출 방안을 제시하는 것이 목적이다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 SSM의 정의 및 기존 연구 고찰 부분으로 영상자료 기반으로 교통상충에 활용되는 SSM에 대해 고찰하며, 영상자료 기반으로 교통상충 기법을 적용한 연구에 대해 고찰한 후 시사점을 제시하였다. 3장에서는 모바일 영상자료 활용 SSM 구축 방안 및 활용 방안에 대해 제시하였다. 마지막으로 4장에서는 결론을 제시하였다.

II. SSM의 정의 및 기존 연구 고찰

본 장에서는 SSM의 유형, 정의, 장점 및 한계에 대해 고찰하였다. 기존 연구를 보면 교통안전 문제 분석에 따른 교통상충 기법에 대해 고찰한 Mahmud et al.(2017)의 연구에서는 총 38개의 SSM 지표를 고찰하였으며, 교통상충 기반 안전성 평가에 대한 체계적 검토를 수행한 Arun et al.(2021)은 총 59개의 SSM 지표를 고찰하였다. 본 연구에서는 영상 장비에서 수집된 자료 기반으로 교통상충 분석 연구에 한정하여 SSM 지표에 대해 고찰을 진행하였으며, 총 35개 SSM 지표에 대해 고찰하였다.

1. SSM 유형 및 정의

1) 시간 기반 SSM

Hayward(1972)는 비충돌 이벤트에 적용할 수 있는 측정값으로 충돌까지 걸리는 시간(Time-to-collision: TTC)을 개발하였으며, ‘두 차량이 현재 속도를 유지하며 같은 경로로 이동할 때 충돌하는 데까지 필요한 시간’으로 정의하였다(Hayward, 1972). TTC는 일정한 차량 속도를 가정하므로 가속 및 감속으로 발생할 수 있는 사고에 대해서는 알 수가 없으며, 사고 규모는 알 수 있으나 사고 심각성은 알 수 없다. TET (Time-exposed TTC)는 Minderhoud and Bovy(2001)에 의해 개발된 지표로 ‘TTC 값이 임계값보다 낮게 나타나는 총 시간’을 의미한다. TET는 객체별 별도 계산이 가능한 장점이 있으나 임계값 미만 TTC 값에 대한 심각도 수준을 알 수 없다는 한계가 있다. TIT (Time integrated TTC)는 TET와 같이 Minderhoud and Bovy(2001)에 의해 개발되었으며, ‘임계값 미만 시간 동안 TTC-profile을 적분 한 값’을 의미한다. TIT 장점은 TET의 장점이 같으나, 안전 수준 도출이 가능한 것이 추가된다. 그러나 TIT는 의미 해석이 어려우며, 시뮬레이션 연구에는 바람직하지 않다.

차간시간(Gap time: Gap)은 Huang et al.(2013), Pawar and Patil(2017)에서 활용되었으며, ‘선행-후행 차량 간 관계에서 도로의 특정 지점을 선두 차량 후미가 지나간 시점과 후행 차량 앞부분이 지나간 시점 사이 시간’을 의미한다. Gap은 TTC와 같은 장점을 가지고 있으나 일정한 속도로 움직임을 예측해야 하며, 상충 연구에서는 PET에서 더 많은 정보를 얻을 수 있으므로 거의 사용되지 않는다. 상충 후 시간(Post-encroachment time: PET)은 Allen et al.(1978)에 의해 개발되었으며, ‘앞선 객체가 잠재적 충돌 영역을 벗어난 후 다른 객체가 충돌 영역에 도착하는 순간의 시간 차’를 의미한다. PET는 교차 충돌의 경우 TTC 보다 적합하며, 시뮬레이션 환경에서 쉽게 추정할 수 있는 장점이 있다. 그러나 심각도 및 충돌 영향은 고려되지 않는 한계가 있다. pPET (Predicted PET)는 Mohamed and Saunier(2013, 2015)의 연구에서 활용되었으며, ‘도로 사용자가 동일한 속도 및 경로로 계속 주행 시 상호 작용의 각 순간에 예상되는 PET 값’을 의미한다. pPET는 교차 상충에는 TTC 보다 더 적합한 장점이 있으나 일정한 속도로 움직임을 예측해야 하며, 사고와 관계는 조사되지 않은 한계가 있다.

사고까지 걸리는 시간(Time-to-accident: TA)은 스웨덴 도로 교통 안전 평가를 위해 Hyden(1987)에 의해 개발되었으며, ‘속도와 방향에 변화가 없는 상태에서 회피 행동을 시작한 순간부터 충돌이 발생할 때까지 남은 시간’을 의미한다. (Hyden, 1987). TA는 측정하기 쉽고 수동 분석 및 영상 분석을 통해 수치 계산이 가능한 장점이 있으나 회피 행동에 의존하며, 속도와 거리를 주관적 판단에 의존하는 단점이 있다. 차량간 차두시간(Time headway: TH)은 교통 상황 추정에 활용되는 지표 중 하나로 ‘두 차량이 같은 위치에 도달하는 시간’을 의미한다(Mahmud et al., 2017). TH는 측정이 쉽고 안전 수준 구분이 가능한 장점이 있지만 횡방향 이동으로 인한 충돌은 고려하지 않으며, 주로 후속 차량 관련 충돌에만 활용할 수 있는 한계가 있다. 정지선까지 걸리는 시간(Time to stop line: TTS)은 Hurwitz et al.(2012)에서 활용된 지표로 ‘차량이 일정한 속도를 유지할 때

정지선에 도달할 때까지 남은 시간'을 의미한다. TTS의 장점은 상충 가능성에 대한 추정이 간단하며, 적색 신호 주행과 같은 위반 사항 예측에 적합하다. 그러나 사고 위험을 안정적으로 정의할 수 없으며, 상충 차량의 동작을 무시하는 단점이 있다.

2) 공간 기반 SSM

DSS (Difference of space distance and stopping distance)는 Okamura et al.(2011)에 의해 개발되었으며, '공간 거리와 정지거리의 차이'를 의미한다. 여기서 공간거리는 선행 차량과 후행 차량 차이의 합으로 계산된다. DSS는 계산식과 임계값 계산이 간단하고 명확한 장점이 있으나 위험 정도와 지속시간이 고려되지 않는 단점이 있다. Okamura et al.(2011)는 DSS와 동시에 TIDSS (Time integrated DSS)를 제안하였으며, 'DSS와 위험 임계값 사이 통합 값 간격의 전체 합'으로 정의하였다. TIDSS는 위험 정도와 지속시간을 고려하여 DSS의 한계를 극복하였으나 주로 후방 충돌에만 적용할 수 있는 한계가 있다.

DTI (Distance to intersection)은 Noble et al.(2016)에서 활용된 지표로 '대상 차량 범퍼에서 정지선의 가장 앞쪽까지의 거리'를 의미한다. DTI는 계산이 쉬우며, 다른 상충과 결합하여 상충의 진화를 설명할 수 있는 장점이 있다. 그러나 상충을 독립적으로 정의할 수 없으며, 사고 위험정보가 거의 없는 단점이 있다. SD (Stopping distance)는 Oh et al.(2010)에서 활용한 지표로, '차량 감속 시 차량이 커버하는 거리'를 의미한다. SD는 상충을 의사 결정 도구로 활용할 수 있다는 장점이 있으나, 상충 정보를 직접 전달하지 않는 단점이 있다. PICUD (Potential index for collision with urgent deceleration)은 Iida et al.(2001)에 의해 개발되었으며, '선두 차량 비상 브레이크가 작동했을 때, 선행 차량과 후행 차량 모두 완전히 정차하는 거리'를 의미한다 (Mahmud et al., 2017). PICUD는 속도가 비슷한 연속 차량의 충돌 위험을 평가하는데 TTC보다 더 적합하며, 교통 상황과 충돌 변화를 더 민감하게 검지하는 장점이 있다. 그러나 임계값이 나타나지 않으며, 측면 충돌을 고려하지 않고, 선두 차량이 비상 브레이크 점등될 때는 차선 변경 시에만 적용이 가능한 한계가 있다.

PSD (Potential of stopping distance)는 Allen et al.(1978)에 의해 개발되었으며, '잠재적 충돌 지점에 대한 나머지 거리와 허용할 수 있는 최소 정지거리 사이 비율'을 의미한다. PSD의 장점은 충돌에 대한 평가가 가능하며, 계산이 용이하다. 그러나 일부 안전 문제에 대해서만 측정할 수 있는 한계가 있다. UD (Unsafty density)는 Barceló et al.(2003)에 의해 개발되었으며, '시뮬레이션 중 도로상 연속된 두 차량 간 관계에서 '안전하지 않음' 수준'을 의미한다. UD 장점은 마이크로 시뮬레이션 결과보다 더 정확한 결과가 제공되며, 링크 간 비교 연구 수행이 가능하다. 그러나 결과로 나온 값 자체로는 의미가 없으며, 차선 기반 교통 상황에만 적용이 가능한 한계가 있다.

3) 운동학 기반 SSM

도로 곡률 변화(Change of curvature)는 Wei et al.(2019)에서 활용된 지표로 '회전하는 차량이 횡단하는 원호 길이에 대한 접선 각도의 비율'을 의미한다. 본 지표의 장점은 회전 차량이 취하는 회피 조치를 설명할 수 있다. 그러나 충돌을 독립적으로 설명할 수 없고, 충돌과 관계는 검증되지 않았다. 충돌 에너지(Collision energy: CE)는 Astarita and Giofr e(2019)의 연구에 활용되었으며, '잠재적 충돌로 인해 방출되는 총 에너지'를 의미한다. CE의 장점은 운전자 오류 요소를 포착할 수 있으며, 충돌 사고 결과를 시뮬레이션하고 단독 사고 결과를 모델링 할 수 있다. 그러나 운전자 주의 분산 시간 측정이 어려운 단점이 있다.

임계속도(Critical speed: CS)는 Paul and Ghosh (2018)에 의해 활용된 지표로 '상충 차량이 상충 구역에 존재할 때, 주체 차량의 정지를 위해 필요한 속도'를 의미한다. CS는 주요 PET 값에 해당하는 속도를 사전에

계산하고 현장에서 측정된 속도 비교를 통해 상충의 신속한 식별이 가능하며, 실시간 위험 관리 조치의 구현을 지원할 수 있는 장점이 있다. 그러나 차량의 임계 감속률에 대한 지식이 필요하며, 충돌과 관계가 검증되지 않은 한계가 있다. CPI (Crash potential index)는 Cunto and Saccomanno(2008)에 의해 개발되었으며, ‘주어진 시간 간격 동안 주어진 차량의 DRAC (Deceleration rate to avoid the crash)가 최대 가용 감속률(MADR: Maximum available deceleration rate)을 초과할 확률’을 의미한다. CPI는 횡방향 이동에 적합하지 않으며, 교차로에만 적용할 수 있는 단점이 있다. DRAC는 Almqvist et al.(1991)에 의해 개발되었으며 ‘후행 차량과 선행 차량 간 속도를 감속시간으로 나눈 값’을 의미한다. DRAC는 교통 상황에서 차량 속도와 감속을 고려한 장점이 있으나, 잠재적 교통 상황을 정확히 파악하지 못하며, 횡방향 이동에는 적합하지 않다.

Delta-V는 Lareshyn et al.(2017), Ulak et al.(2019) 등에 활용되었으며, ‘충돌 감지 시점부터 충돌이 예상되는 시점까지 두 차량이 모두 일정한 속도로 계속 움직이는 경우 충돌로 인한 차량 속도 변화’를 의미한다. Extended Delta-V는 Lareshyn et al.(2017)에서 활용된 지표로 ‘충돌 감지 시점부터 충돌이 예상되는 시점까지 차량이 일정한 감속 속도로 제동하는 경우 충돌로 인한 차량 속도 변화’를 의미한다. Extended Delta-V와 Delta-V는 상호작용 결과를 평가하는 장점이 있다. 또한 Extended Delta-V는 Delta-V의 등속 가정을 개선한 장점이 추가된다. 그러나 Delta-V와 Extended Delta-V 모두 충돌 심각도와 관계는 유효하지 않으며, 다양한 심각도 수준에 대한 임계값 지침이 부재한 단점이 있다. Jerk는 Tageldin et al.(2015), Wei et al.(2019)에 의해 활용된 지표로 ‘시간에 따른 가속도 변화율’을 의미한다. Jerk는 상충의 심각성을 설명할 수 있으며, 모든 유형의 연구에 활용할 수 있는 장점이 있다. 또한 사고와 긍정적인 관련성이 있다. 그러나 교차로 사고와 관계는 입증되지 않았으며, 속도 데이터 외 다른 데이터 활용이 불가능하다면 노이즈에 큰 영향을 받는 단점이 있다. ΔKE (Kinetic energy loss per unit mass)는 Ma et al.(2018)에서 활용된 지표로 ‘비슷한 질량의 차량 간 충돌로 인해 방출되는 총 운동 에너지’를 의미한다. Lat A/Lat D (Lateral acceleration/deceleration)는 Guo et al.(2010)에서 활용된 지표로 ‘측면 운동 방향에서 차량의 순간 가속/감속’을 의미한다. 본 지표는 충돌 회피 행동으로 취한 스티어링 조작을 설명할 수 있는 장점이 있다. 그러나 상충을 독립적으로 정의할 수 없으며, 사고와의 상관관계가 약한 단점이 있다.

ΔKE 는 충돌 심각도에 대한 간단한 추정치를 제공하며, 충돌 확률 측정과 결합하여 교차로 전반적인 안전 지수를 제공할 수 있는 장점이 있다. 그러나 적용 가능성이 제한적이며, 차량의 물리적 변형으로 인한 에너지 손실을 무시하고 일정한 속도 기반으로 미래 궤적을 예측하는 단점이 있다. RA (Required longitudinal acceleration)은 Sharma et al.(2011)에서 활용된 지표로 ‘적색 신호 점등 전 차량이 정지선 통과를 위해 필요한 가속도’를 의미한다. RA는 적색 신호 주행으로 인한 상충에 적합하며, 딜레마 영역 위험 모델링에 도움이 될 수 있는 장점이 있다. 그러나 적용 가능성이 제한적이며, 운전자 및 포장 특성을 고려하지 않는 단점이 있다. RDR (Required deceleration rate)는 Babu and Vedagiri(2017)에서 활용되었으며, ‘객체와 상충이 발생하는 차량 사이 시간이 PET와 같을 시, 차량의 안전한 정지를 위해 필요한 감속률’을 의미한다. RDR은 DRAC와 유사하며, 차량이 교차한 사후에 측정하여 DRAC 등속 가정을 극복하는 장점이 있다. 그러나 DRAC와 같이 상충 판단을 위한 임계값 탐색이 어렵다. RS (Relative speed/speed difference)는 Lee et al.(2013)에서 활용된 지표로 ‘상충 차량의 최대 상대속도’를 의미한다. RS는 상충을 전체적인 설명을 위해 다른 척도와 함께 활용할 수 있는 간단한 지표인 장점이 있지만 상충에 제한된 정보를 제공하므로 다른 지표와 함께 사용해야 하는 단점이 있다.

4) 기타 SSM

상충 확률(Collision probability: CP)은 Ma et al.(2018)에서 활용된 지표로 ‘교차로 영역을 동일한 셀 면적으

로 나는 뒤 2대 이상의 차량이 같은 셀에 동시에 도착할 확률'을 의미한다. CP는 교차로 수준의 안전성 평가에 적합한 장점이 있다. 그러나 교통량 및 점유율과 같은 거시적 흐름 변수에 기반하므로 미시적 충돌 매커니즘을 설명할 수 없고, 적용 가능성이 제한적인 단점이 있다. 상충 속도(Conflict speed: CS)는 Saunier et al.(2011)에서 활용되었으며, '충돌에 연루된 대상 도로 사용자의 평균 속도'를 의미한다. CS의 장점은 다른 지표와 결합 시 진화하는 상충에 대해 전체적인 그림을 제공할 수 있다. 그러나 상충을 독립적으로 정의할 수 없으며, 사고와 상관관계가 약한 단점이 있다.

회피 행동(Evasive actions: EA)은 Yan and Radwan(2007, 2008), Hutton et al.(2015) 등에서 활용된 지표로 회전 기동 중 사고를 회피를 위해 차량이 빠르게 경로를 변경하거나 갑자기 제동하는 등의 동작을 의미한다. EA는 네트워크 전반에 걸친 대규모 연구에 적합하다. 또한 여러 지표를 활용하여 상충을 포괄적으로 측정할 수 있으며, 사고와 관계가 검증되었다는 장점이 있다. 그러나 사용할 트리거, 임계값에 대한 일관된 정의가 없으며, 적절한 크기 샘플 수집을 위해서는 오랜 기간이 필요하다. 또한 여러 기기를 통한 자료수집이 필요하므로 비용이 많이 소요되는 단점이 있다. NC (Near crash)은 Guo et al.(2010), Wu and Jovanis(2012)를 포함하여 많은 연구에서 활용한 지표로 주체 차량 또는 상충하는 차량이 충돌 회피를 위해 신속한 회피 조작을 요구받는 상황에서 차량 조작이 차량 성능 한계에 가까워지도록 만드는 경우를 의미한다. NC의 장단점은 EA와 같다.

Saf. I (Safety index)는 Alhajyaseen(2014)에서 활용되었으며, '충돌 확률과 심각도를 결합한 지수'를 의미한다. Saf. I는 충돌과 심각도에 대한 측정값을 하나의 지표로 결합하며, 차량 안전 기능의 존재와 같이 충돌 결과에 영향을 미치는 여러 기능을 고려하여 보정 할 수 있다. 또한 심각한 충돌 사고 수와의 관계가 입증되었다. 그러나 충돌에 방출되는 운동 에너지 계산 시 많은 가정이 필요하고 번거로우며, 심각도 수준에 따른 충돌 심각도 정보를 제공하지 않은 단점이 있다. SI (Severity index)는 Autey et al.(2012)에서 활용한 지표로 충돌 직전까지의 상충 심각도를 0에서 1까지 단위 없이 측정하며, 0에 가까울수록 심각도가 낮은 것을 의미한다. SI는 값을 정규화하여 상충 심각도를 쉽게 비교할 수 있으며, 교통상충의 심각성에 대한 뚜렷한 아이디어를 전달하는 장점이 있다. 그러나 운전자 응답 시간에 대한 정보가 필요한데, 이는 현장 연구에서는 쉽게 구할 수 없는 정보이며, 사고와의 관계는 검증되지 않은 한계가 있다. <Table 1>은 앞서 설명한 SSM 지표들의 수식을 정리하였으며, <Table 2>는 각 SSM 지표의 장단점에 대해 정리하였다.

<Table 1> Summary of SSM Equations

SSM	Equation	Parameters
CE	$Z_{5-\theta-\frac{100}{3}} = \frac{L}{v \cdot \delta t} \cdot 2 \cdot \frac{1}{2} m (v \cdot \sin\theta)^2 \cdot \frac{1}{3}$	t: Distraction time θ: Heading angle L: The length of the road segment m: Vehicle mass v: Vehicle speed
Change of Curvature	$\text{Change of Curvature} = \frac{d\theta}{ds}$	θ: Heading angle s: Arc length
Conflict Probability	$\text{Conflict Probability} = \text{prob}_{i,jn} \times \text{prob}_{i,j(n+1)}$	prob _{i,jn} , prob _{i,j(n+1)} : The probabilities of simultaneous arrivals of vehicles n and n+1
Conflict Speed	$\text{Conflict Speed} = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} v}{T}$	t _f , t _i : Final time and Initial time of observation v: Vehicle speed T: Total travel time

SSM	Equation	Parameters
CPI	$CPI_i = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} P(MADR^{(a_1, a_2, \dots, a_n)} \leq DRAC_{i,t}) \cdot \Delta t \cdot b}{T_i}$	<i>MADR</i> : Maximum available deceleration rate (m/s) <i>t_i</i> : Initial simulated time interval for vehicle i <i>t_f</i> : Final simulated time interval for vehicle i Δt : Simulation time interval <i>T_i</i> : Total travel time for vehicle i b: A binary variable(1: interaction exist, 0: otherwise)
CS	$CS = PET \times \frac{a}{0.039}$	a: Acceleration
Delta-V	$\Delta v_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \sqrt{v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2\cos\theta}$ $\Delta v_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \sqrt{v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2\cos\theta}$	<i>m₁</i> , <i>m₂</i> : Mass of vehicle 1 and 2 <i>v₁</i> , <i>v₂</i> : Velocity of vehicle 1 and 2
DRAC	$DRAC_{rear} = \frac{v_2 - v_1}{2d^2}$ $DRAC_{angle} = \frac{2[v_2t_1' - d]}{t_1'}$ $\forall \frac{d'}{v_2} \leq t_1' \leq 2 \frac{d'}{v_2} t_1' = \frac{d' + l_1}{v_1}$	<i>v₁</i> , <i>v₂</i> : Velocity of vehicle 1 and 2 (m/s) d: Longitudinal spatial gap between the rear of the leading vehicle (vehicle 1) and the front of the following vehicle (vehicle 2) <i>t₁'</i> : Time taken by vehicle 1 to clear the conflict area d': Distance of the closest boundary of conflict area from vehicle 2 <i>l₁</i> : Length of vehicle 1
DSS	$DSS = (\frac{v_1^2}{2\mu g} + d_2) - (v^2 \Delta t + \frac{v_2^2}{2\mu g})$	<i>v₁</i> , <i>v₂</i> : Velocity of vehicle 1 and 2 (m/s) μ : Friction coefficient g: Gravity acceleration (m/s) <i>d₂</i> : Distance between <i>v₂</i> and <i>v₁</i> (m) Δt : Reaction time
Extended Delta-V	$v_1 = \begin{cases} v_{o1} - a_1t, & \text{if } (v_{o1} - a_1t) \geq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$ $v_2 = \begin{cases} v_{o2} - a_2t, & \text{if } (v_{o2} - a_2t) \geq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$	<i>v_{o1}</i> , <i>v_{o2}</i> : The initial speeds(m/s) of the subject and conflicting vehicles, respectively, at the start of the conflict t: duration of conflict (s) Δv : The formula given above
Gap Time	$Gap\ Time = t_1 - t_2$	<i>t₁</i> : Time taken by vehicle 1 to reach the conflict area <i>t₂</i> : Time taken by vehicle 2 to reach the conflict area
Jerk	$Jerk = \frac{a_f - a_i}{t_f - t_i}$	<i>a_f</i> , <i>a_i</i> : Acceleration rate of the primary vehicle at the final time and initial time of observation <i>t_f</i> , <i>t_i</i> : Final time and initial time of observation
Lat A/ Lat D	$Lat\ A/Lat\ D = \frac{v_{f,lat} - v_{i,lat}}{t_f - t_i}$	<i>v_{f,lat}</i> , <i>v_{i,lat}</i> : Final speed and initial speed of the vehicle in the lateral direction <i>t_f</i> , <i>t_i</i> : Final time and initial time of observation
PET	$PET = t_2 - t_1$	<i>t₁</i> , <i>t₂</i> : Time taken by vehicle 1 and 2 to reach the conflict area
PICUD	$PICUD(m) = \frac{V_1^2 - V_2^2}{2a} + S_0 - V_2 \Delta t$	<i>V₁</i> , <i>V₂</i> : Velocity of leading car 1 and following car 2 <i>S₀</i> : Distance between car 1 and car 2 Δt : Driver's reaction time 1 α : Deceleration rate to stop
PSD	$PSD = \frac{RD}{MSD}$	RD: Remaining distance to the potential point of collision (m) MSD: Minimum acceptable stopping distance (m)
RA	$RA = \frac{2(d - vt)}{t^2}$	d: The distance from the stop line v: Vehicle speed t: the time remaining till the onset of red

SSM	Equation	Parameters
RDR	$RDR = \frac{v}{2PET}$	v: Vehicle speed
RS	Δs	Δs : Relative speed of the pair of interacting vehicles
Saf. I	$Saf. I = \frac{\infty \Delta KE}{e^{\beta PET}}$	ΔKE : Kinetic energy loss per unit mass PET: Post-encroachment time
SD	$SD = \frac{v^2}{254\mu}$	v: Vehicle speed μ : Coefficient of friction of the pavement surface
SI	$SI = e^{-\frac{\Delta^2}{2RT^2}}$	Δ : Temporal proximity measure like TTC or PET
TA	$TA = 1.5 \times \frac{V_i}{16.7 \times \exp(-0.0306 \times 0.5 V_m)}$	V_i, V_m : Initial speed and mean speed
TET	$TET_i^* = \sum_{t=0}^T (\delta_i(t) \cdot \tau_{sc})$	τ_{sc} : Small time step δ : Switching variable (0 or 1)
TH	$TH = t_1 - t_2$	t_1, t_2 : Time taken by vehicle 1 and 2 to reach the conflict area
TIDSS	$TIDSS = \int_0^t \{TH - (DSS)\} dt$	t: Time TH: Threshold
TIT	$TIT_i^* = \sum_{t=0}^T [TTC^* - TTC_i(t)] \cdot \tau_{sc}$	$\forall 0 \leq TTC_i(t) \leq TTC^*$ TTC*: TTC value below the threshold value $TTC_i(t)$: TTC subject vehicle
TTC	$TTC_i(t) = \frac{X_{i-1}(t) - X_i(t) - l_i}{V_i(t) - V_{i-1}(t)}$	$X_{i-1}(t) - X_i(t)$: Relative distance $V_i(t) - V_{i-1}(t)$: Relative speed l: Subject vehicle's length
TTS	$TTS = \frac{x_1 - x_s}{v_1}$	x_1, x_s : the position of the vehicle and stop line v_1 : the vehicle speed
UD	$Unsafety = \Delta S \cdot S \cdot R_b$ $Unsafety Density = \frac{\sum_{s=1}^{S_i} \sum_{V=1}^{V_i} unsafety_{V,S} \cdot d}{T \cdot L}$	ΔS : Relative speed of the pair of interacting vehicles S: Speed of the follower vehicle R_b : Unsafe parameter V_i : Number of vehicles in the link S_i : Number of simulation steps within aggregation period d: Simulation step duration (s) T: Aggregation period duration (s) L: Section length (m)
ΔKE	$\Delta KE = \frac{1}{4}(v_1^2 + v_2^2) - \frac{1}{2}v_1v_2\cos\theta$	$v_{1,2}$: velocity of vehicle 1, 2

<Table 2> Definition, Advantage, Limit of SSM

SSM	Definition	Advantage	Limit	Reference
CE	Total energy released due to a potential collision	Can specifically capture driver error factors; Can simulate possible outcomes of collision and model the results of single collision	It is difficult to measure the driver's attention diversion time	Astarita and Giofré (2019)
Change of Curvature	The ratio of the tangent angle to the arc length traversed by a turning vehicle	Can describe evasive actions taken by turning vehicles	Cannot independently explain the conflict; The relationship with the conflict has not been validated	Wei et al. (2019)

SSM	Definition	Advantage	Limit	Reference
Conflict Probability	when the intersection area is dividing into equal cell areas, the probability that two or more vehicles will arrive in the same cell simultaneously	Safety evaluation of the intersection is suitable	It is based on macroscopic flow variables such as traffic volume and occupancy, so it cannot explain microscopic collision mechanisms; Limited applicability	Ma et al. (2018)
Conflict Speed	The average speed of the road users involved in the collision	When combined with other SSM, it can provide an overall picture of the evolving conflict	It cannot independently define a conflict; The correlation with crashes is weak	Saunier et al. (2011)
CPI	During a given time interval, the probability that the given vehicle's DRAC exceeds the Maximum Available Deceleration Rate.	Partially resolve the limitations of DRAC	Lateral movements are not applied; Only the intersection is affected	Cunto and Saccomanno (2008)
CS	The speed of the host vehicle required to successfully brake when a conflict vehicle is present in the conflict zone	conflicts can be quickly identified; Can support the implementation of real-time risk management measures	Knowledge of the vehicle's critical deceleration rate is required; Relationship with crashes is not validated	Paul and Ghosh (2018)
Delta-V	The change in vehicle speed due to a collision if both vehicles continue to move at a constant speed from the point of collision detection until the expected time of collision	Same as Extended Delta-V; Evaluate the results of the interaction;	Such as Extended Delta-V; The relation with collision severity is not valid; There is a lack of threshold guidelines for various levels of severity	Laureshyn et al. (2017), Ulak et al. (2019)
DRAC	The difference in speed between the leading vehicle and the following vehicle is divided by the deceleration time	In traffic flow, vehicle speed and deceleration are explicitly taken into consideration	Potential traffic condition are not identified exactly; Lateral movements are not applied	Almqvist et al. (1991)
DSS	Difference space distance and stopping distance	The Equation and threshold of the calculation is clear	Danger level and duration time are not considered	Okamura et al. (2011)
DTI	The distance from the target vehicle's bumper to the front edge of the stop line	Measure and calculation are easy; By combining with other conflicts, the evolution of the conflict can be explained;	It cannot independently define a conflict; There is little information about crash risk;	Noble et al. (2016)
EA	Actions such as a vehicle quickly changing its path or suddenly braking to avoid a crash during a turning maneuver	It is suitable for large-scale studies across the entire network; Conflicts can be comprehensively measured by utilizing multiple indicators; The relationship with crashes has been validated	There is no consistent definition of the triggers and thresholds to be used; A long period of time is required to collect a sufficiently large sample; It is costly because multiple devices are used for data collect;	Yan and Radwan (2007, 2008), Hutton et al. (2015)
Extended Delta-V	The change in vehicle speed due to a collision if the vehicle brakes at a constant deceleration rate from the point of detection until the expected time of collision	Same as Delta-V; Improvements were made to the constant velocity assumption of Delta-V	Such as Delta-V;	Laureshyn et al. (2017)

SSM	Definition	Advantage	Limit	Reference
Gap Time	In a leading-following relationship, it is the time between the moment the rear of the lead vehicle crosses a specific point on the road and the moment the front of the following vehicle crosses the same point	Same as TTC, TH	It is necessary to predict the movement at a constant speed; In conflict studies, it is rarely used due to its disadvantage of providing less information compared to PET	Huang et al. (2013), Pawar and Patil (2017)
Jerk	Rate of change of acceleration over time	It can explain the severity of the conflict; It can be utilized for all types of conflict research; It has a positive correlation with crashes	Evidence of a relation with crashes at the intersection has not been established; When only speed data is available, it can be significantly affected by noise	Tageldin et al. (2015) Wei et al. (2019)
Lat A /Lat D	Instantaneous acceleration or deceleration of the vehicle in the lateral direction of motion	Description of steering maneuvers taken as part of collision avoidance	It cannot independently define a collision; Weak correlation with collisions	Guo et al. (2010)
NC	In a situation where the subject vehicle or the conflicting vehicle is required to perform rapid evasive maneuvers to avoid a collision, and the vehicle's operation approaches the limits of its capabilities	Same as EA	Same as EA	Guo et al. (2010), Wu and Jovanis(2012) and several others
PET	After leading vehicle exits potential collision zone, the time difference until the following vehicle reaches the potential collision zone	Cross-crash is more suitable than TTC; Measurements is easy; Video or simulation can be used to measure easily;	The severity level and collision effect are not considered	Allen et al. (1978)
PICUD	When the emergency brake of the leading vehicle is activated, both the leading and following vehicles come to a complete stop.	There are more appropriate methods than TTC to assess the collision risk among vehicles with similar speeds; Traffic condition and changes in collision are perceived more responsively	Threshold is not clear; Side collision is not considered; When emergency brake of the leading vehicle is activated, lane-changes are the only possible action to be applied	Iida et al. (2001)
pPET	The expected PET value at each moment of interaction if road users continue driving at the same speed and on the same path	It is more suitable than TTC for angle/crossing conflicts	The calculation assumes movement at a constant speed; There is a limitation that the relationship with crashes has not been investigated	Mohamed and Saunier (2013, 2015)
PSD	Ratio between potential collision zone distance and the minimum allowable stopping distance	Evaluation of the crash is possible; calculation are easy	It is possible to measure only some safety issues;	Allen et al. (1978)
RA	Acceleration required for a vehicle to pass the stop line before the red light begins	Suitable for conflicts resulting from running a red light; Can aid in modeling risk in dilemma zones	Limited applicability; It does not consider driver and pavement characteristics	Sharma et al. (2011)
RDR	When the time between the object and the vehicle involved in the conflict is the same as PET, the deceleration rate required to safely stop the vehicle	RDR is similar to the more widely used DRAC; By measuring the quantity after the crossing event, it over comes the constant velocity assumption of DRAC	Like DRAC, it is difficult to determine the threshold for conflict assessment;	Babu and Vedagiri (2017)

SSM	Definition	Advantage	Limit	Reference
RS	Maximum relative speed of the conflict vehicle	It is simple and can be used with other measures to provide a comprehensive explanation of the conflict	It provides limited information about the conflict, so it should be used in conjunction with other indicators	Lee et al. (2013)
Saf. I	An index combining collision probability and severity	It combines measurements of collision probability and severity into a single index and can be adjusted by considering various factors that influence collision outcomes, such as the presence of vehicle safety features; The relationship with the severity crashes has been established	Calculating the kinetic energy released in a collision requires many assumptions and is cumbersome; It does not provide collision severity information based on severity levels	Alhajjaseen (2014)
SD	The distance covered by a vehicle during deceleration	It can be used as a decision-making tool for predicting conflicts;	It does not provide direct information about the conflict;	Oh et al. (2010)
SI	Measuring conflict severity from 0 to 1, with no units where a value closer to 0 indicates lower severity, right up until the moment before a collision	Provides a clear idea of the severity of traffic conflicts; Suitable for large-scale studies across the entire network; Normalizing the values allows for easy comparison of conflict severity	Information on driver response time is needed, but this is data that is not easily obtainable in field studies	Autey et al. (2012)
TA	The time remaining until a collision occurs from the moment one object involved in the traffic conflict begins evasive action, without any change in speed and direction.	measurement is easy; calculating through hand-work or video analysis is possible;	TA measurements depend on evasive action; Speed and distance depend on subjective judgment;	Hyden (1987)
TET	The total time during which the TTC measurements are below the TTC threshold.	Separate data can be generated for each vehicle;	TET remains unaffected, when TTC measurements fall below the TTC threshold;	Minderhoud and Bovy (2001)
TH	The time it takes for two vehicles to reach the same position	Measurement is easy; Safety level can be distinguished;	Collision caused by lateral movements are not considered; A rear-end collision can be applied	-
TIDSS	The total sum of the integrated value intervals between DSS and the danger threshold	Danger level and duration time are considered;	Rear-end collision is only suitable;	Okamura et al. (2011)
TIT	The value obtained by integrating the TTC-profile over the time below the threshold.	Safety level of collision can be deduced; Same as TET	Advantages of uncertainties in driver action are small; It is difficult to interpret the meaning of the results; It is not desirable for simulation studies;	Minderhoud and Bovy (2001)
TTC	If they continued on their present path and speed, the time until a collision between the vehicles would occur.	TTC is far more frequently used in practice than PET or TA due to theoretical issues; Many automobile collision avoidance systems have used TTC as an important warning criterion;	Assuming a constant vehicle speed, it is not possible to account for crashes that may occur due to acceleration or deceleration; Can provide the magnitude of crashes but not their severity;	Hayword (1972)
TTS	The time remaining until the vehicle reaches the stop line while maintaining a constant speed	It is simple to estimate the likelihood of a conflict; It is suitable for predicting violations such as running a red light	It cannot reliably define crash risk; It ignores the action of the conflicting vehicle.	Hurwitz et al. (2012)

SSM	Definition	Advantage	Limit	Reference
UD	In simulations, the level of 'unsafe' between two consecutive vehicles on the road	More accurate results are provided than those typically obtained for micro-simulation; Comparative studies between links can be conducted;	The result values are meaningless on their own; It can only be applied to lane-based traffic conditions;	Barceló et al. (2003)
ΔKE	Total kinetic energy released due to a collision between vehicles of similar mass	Provides a simple estimate of collision severity; By combining with collision probability measurements, it can provide an overall safety index for the intersection	Limited applicability; Ignoring energy losses due to physical deformation of the vehicle; Predicting future trajectories based on constant speed at the measurement point	Ma et al. (2018)

2. 자료수집 장비에 따른 기존 사례 분석

1) 고정식 영상 장비 기반 사례 분석

Hayward(1972)는 워싱턴 D. C. 중심업무지구의 14번가와 F Street 사이에 있는 4지 신호 교차로에 설치된 2대의 CCTV(Closed-circuit television)로 교통 이벤트 데이터 수집 후 TTC를 산출하였다. Hyden and Linderholm(1984)은 스웨덴 총 115개 교차로의 CCTV에서 교통 상충 데이터를 수집하여 TTC를 산출하였다. Michael et al.(2000)은 미국 맨해튼 3개 고속도로에 설치된 영상카메라를 활용하여 차량 추적 데이터를 수집하여 TH를 산출하였다. Uno et al.(2003)은 교토의 차량 교차 구간에 설치된 영상카메라에서 차량 추적 데이터 및 교통량을 수집하였으며 TTC와 PICUD를 산출하였다. Songchitrukka and Tarko(2006)은 미국 인디애나주 라파예트 지역의 총 16개 4지 신호 교차로에 영상카메라를 설치하여 차량 추적 데이터와 교통량을 수집하였으며, 각각 상충 및 차량 추적 데이터 기반으로 PET를 산출하였다.

Yan and Radwan(2007)은 4차로 주요 도로와 2차로의 보조 도로에 각 접근로에 전용 좌회전 차선이 있는 4지 신호 교차로에 2대의 영상카메라를 설치하여 회전 차량(좌회전, 우회전, 유턴) 교통량을 수집하였으며, 좌회전 및 유턴 차량에 대한 EA를 분석하였다. 또한 Yan and Radwan(2008)은 이전과 같은 데이터로 우회전 차량에 대한 EA를 분석하였다. Oh et al.(2010)은 한국 성남시의 정자 교차로와 내정교차로에 설치된 CCTV에서 교통상충 및 차량 추적 데이터를 추출하였으며 SD를 산출하였다. Ismail et al.(2011)은 캘리포니아 오클랜드의 교차로 내 보행자 안전 평가를 위해 설치된 영상카메라에서 교통상충 데이터를 수집하였으며, TTC, PET, Gap을 산출하였다. Saumier et al.(2011)은 켄터키의 한 4지 신호 교차로에 설치된 영상에서 238건의 교통 상충과 116건의 사고데이터를 수집하여, Delta-V와 CS를 도출하였다.

Sharma et al.(2011)은 인디애나주 로블스빌의 SR 37과 SR 32가 교차하는 4지 신호 교차로에 설치된 CCTV에서 개별 차량 추적 데이터와 신호 상태를 수집하였으며 RA를 산출하였다. Guido et al.(2011)은 이탈리아 코센자 시 도심 회전교차로에서 영상카메라로 차량 추적 데이터를 수집하였으며, DRAC, TTC, PSD, TIT를 산출하였다. Sayed et al.(2012)은 캐나다 앨버타 주 에드먼턴 시 118 애비뉴 교차로에 설치한 2대의 영상카메라에서 교통상충 데이터를 수집하였으며, TTC와 SI를 산출하였다. Autey et al.(2012)은 미국 97번 고속도로 내 비신호교차로에 설치된 2개의 영상카메라에서 차량 추적 데이터를 수집하였으며, TTC, SI, 상충 빈도를 산출하였다. Caliendo and Guido(2012)는 살레노 시 비신호교차로에서 발생한 경찰의 공식적인 사고데이터를 활용하였으며, 교통량 데이터는 교차로의 영상카메라에서 수집하여 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 기반으로 수집된 데이터 기반으로 TTC, PET를 산출하였다.

Meng and Qu(2012)는 싱가포르 지하 고속도로 내 CCTV에서 교통량을 수집하여, TTC 및 교통 상충 빈도

를 산출하였다. Hurwitz et al.(2012)은 7번 도로와 103번 도로가 교차하는 4지 신호 교차로의 정지선으로부터 500-600피트 떨어진 고정 구조물에 4개의 영상카메라를 설치하여 신호가 바뀌는 시기와 정지선을 통과하는 시점 데이터를 수집하였으며, TTS를 산출하였다. Peesapati et al.(2013)은 조지아주 애틀란타시 18개 신호 교차로에 영상카메라를 설치하여 차량 추적 데이터를 수집하여, PET를 산출하였다. Lee et al.(2013)은 경기도 평택시의 4지 신호 교차로에 영상카메라를 설치하여 차량 통행량과 보행량을 수집하였다. 수집한 데이터 기반으로 교통 시뮬레이션을 시행하였으며, TTC, PET, RS, Delta Speed, DR을 산출하였다. Mohamed and Saunier(2013)은 기존 Saunier et al.(2011)의 데이터를 활용하였으며, TTC와 교차점이나 교차 구역에 도로 사용자가 도달하는 예측 시간 차이인 pPET를 산출하였다.

Sayed et al.(2013)은 퍼시픽 Street의 Burrard 다리 램프의 4지 신호 교차로 내 3개의 영상카메라를 설치하여 객체 추적 데이터를 수집하였으며, TTC 및 교통 상충 빈도를 산출하였다. Huang et al.(2013)은 중국 난징의 10개 신호 교차로에 4개의 영상카메라를 설치하여 1,774건의 후방 충돌, 551건의 차선 변경, 572건의 교차 충돌을 포함하여 총 2,897건의 교통상충 데이터를 수집하였으며, TTC, Gap 등을 산출하였다. Alhajyaseen (2014)은 일본 나고야 5개 신호 교차로 인근 고층 빌딩 꼭대기에 영상카메라를 설치하여 개별 차량 추적 데이터를 수집하였으며, PET, Saf. I를 산출하였다. Tageldin et al.(2015)은 중국 상하이 우닝지역 및 란시 교차로에 설치된 영상카메라로 도로 객체 추적 데이터를 수집하였으며, TTC, DR, Jerk를 산출하였다. Essa and Sayed(2015)는 캐나다 서리시 72번가와 128번가의 총 2개 신호 교차로에 8대의 영상카메라를 활용하여 교통량, 차량 추적 데이터, 녹색시간에 도착하는 차량 수, 교통 구성 및 대중교통 버스 수 데이터를 수집하였으며, 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션을 통해 수집된 데이터 기반으로 TTC를 산출하였다. Mohamed and Saunier(2015)은 캐나다 몬트리올의 교차로 근처 고층 건물에 설치한 영상카메라에서 차량 추적 데이터를 수집하였으며, TTC와 pPET를 산출하였다.

Ahmed et al.(2016)은 말레이시아 비신호교차로의 1개의 영상카메라를 설치하여 차량 추적 데이터를 수집하였으며, 교통상충 빈도와 심각도를 분석하였다. Babu and Vedagiri(2017)은 바시의 차낙야 교차로(4지 비신호교차로), 푸네의 MIDC 교차로(3지 비신호교차로), 푸네의 시마르스 교차로(3지 비신호교차로)의 CCTV에서 교통상충 데이터를 수집하였으며, PET, RDR를 산출하였다. Lareshyn et al.(2017)은 벨라루스 민스크 4지 신호 교차로의 근처 옥상에 설치된 2대의 카메라로 객체 추적 데이터를 수집하였으며, Delta-V, Extended Delta-V, TTC를 산출하였다. Pawar and Patil(2017)은 인도 마하라슈트라 남서부의 콜하푸르시의 4지 교차로 3개와 3지 교차로 1개에 각 3개씩의 영상 카메라를 설치하여 차량 추적 데이터를 수집하였으며, Gap을 산출하였다.

Ma et al.(2018)은 중국 광저우의 비신호교차로에 설치된 영상카메라에서 차량 추적 데이터를 수집하였으며 교통상충 빈도 및 각 면적에서 발생하는 CP를 계산하였다. Paul and Ghosh(2018)은 인도 NCR 지역 비신호교차로에 설치된 CCTV에서 교통 운영 데이터와 상충 데이터를 수집하였으며, PET와 CS를 산출하였다. Astarita and Giofre(2019)는 교차로에 설치된 영상카메라에서 차량 추적 데이터를 수집하였으며, 시뮬레이션을 통해 TTC 및 CE를 산출하였다. Wei et al.(2019)은 상하이 내 카오안 로드와 북쪽 지오송 로드 사이 교차로에 설치된 영상카메라를 통해 419대 중차량, 2,930대 승용차, 805대 자전거의 객체 추적 데이터를 수집하였으며, Jerk, Change of curvature, CR을 산출하였다. Ulak et al.(2019)은 플로리다주 탈라해 시에 위치한 신호 없는 3지 교차로에 3개의 영상을 설치하여 교통량 및 차량 추적 데이터를 수집하였으며 이를 기반으로 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 기반으로 Max Delta-V와 TTC를 산출하였으며, 심각도 수준을 세분화하였다. Raju et al.(2022)은 인도 서부 고속도로 일부 구간의 영상카메라에서 추적 데이터를 수집하였으며, DRAC, TTC, TET, TIT을 산출하였다.

2) 이동식 영상 장비 기반 사례 분석

Guo et al.(2010)은 100대 차량에 다양한 센서 및 카메라를 장착하여 운전 상황에 대한 운전자 행동과 차량 추적 데이터를 수집하였으며, Lat A, TTC, DRAC, PET를 산출하였다. Wu and Jovanis(2012)는 영상카메라, 센서, 레이더 등을 포함한 데이터 수집 장비를 총 241명이 운전하는 차량에 설치하여 운전 행태 데이터를 수집하였으며, Lat A, NC, TTC 등의 지표를 산출하였다. Hutton et al.(2015)는 차량 내 전후방 카메라 기반으로 차량의 좌회전 중 차량을 촬영한 영상 데이터를 수집하였으며, PET, NC, EA를 산출하였다. Noble et al.(2016)은 차량 내 설치된 적응형 정지 디스플레이 및 카메라 기반으로 운전 행태 데이터를 수집하였으며, TTC와 RDR을 산출하였다. <Table 3>은 기존 연구들에 대해 종합한 표이다.

<Table 3> Summary of Literature Review

Reference	Data collection equipment	SSM
Hayward(1972)	Two CCTV installed at the signalized intersection between 14 th street and F street in Washington D.C.'s CBD	TTC
Hyden and Linderholm(1984)	CCTV Installed at a total of 115 signalized intersections in Sweden	TTC
Michael et al.(2000)	Video cameras installed on three Highways in Manhattan, USA	TH
Uno et al.(2003)	Video cameras installed at weaving section in Kyoto, Japan	TTC, PICUD
Songchitrukra and Tarko(2006)	Video cameras installed a total of 16 signalized intersections in Lafayette, Indiana, USA	PET
Yan and Radwan(2007)	Two video camera installed at a 4-legged signalized intersection between 4-lane main road and 2-lane minor road	EA (Left-turn, U-turn)
Yan and Radwan(2008)	Two video camera installed at a 4-legged signalized intersection between 4-lane main road and 2-lane minor road	EA (Right-turn)
Oh et al.(2010)	CCTV Installed at intersections of Jungja and Naejung in Seongnam city, Korea	SD
Ismail et al.(2011)	Video cameras installed at a signalized intersections in Oakland, California, USA	TTC, PET, Gap
Saunier et al.(2011)	Video camera installed at a 4-legged signalized intersection in Kentucky, USA	Delta-V, Conflict Speed
Sharma et al.(2011)	CCTV installed at a 4-legged signalized intersection in Noblesville, Indiana, USA	RA
Guido et al.(2011)	Video cameras installed at a roundabouts in Consenza, Italy	DRAC, TTC, PSD, TIT
Sayed et al.(2012)	Two video cameras installed at a signalized intersections in Alberta, Canada	TTC, SI
Autey et al.(2012)	Two video cameras installed unsignalized intersection in 97 interstate highway	TTC, SI, Average Conflict
Caliendo and Guido(2012)	Video cameras installed at a unsignalized intersections in Salerno, Italy	TTC, PET
Meng and Qu(2012)	CCIV installed at a underground highway in Singapore	TTC, Conflict frequency
Hurwitz et al.(2012)	Four cameras were installed on fixed structures 500 to 600 feet away from the stop line at the 4-legged signalized intersection of Route 7 and Route 103	TTS
Peesapati et al.(2013)	Video cameras installed a signalized intersections in Georgia, USA	PET

Reference	Data collection equipment	SSM
Lee et al.(2013)	Video cameras installed at a 4-legged signalized intersection in Pyeongtaek, Korea	TTC, PET, RS, Delta Speed, DR
Mohamed and Saunier(2013)	Video camera installed at a 4-legged signalized intersection in Kentucky, USA	TTC, pPET
Sayed et al.(2013)	Three video cameras installed at the signalized intersection between the Burrard bridge ramp and Pacific street	TTC, Conflict frequency
Huang et al.(2013)	Four video cameras installed at a 10 4-legged signalized intersections	TTC, Gap
Alhejyaseen(2014)	Video camera installed on the rooftop of a building five signalized intersections in Nagoya, Japan	PET, Saf. I
Tageldin et al.(2015)	Video cameras installed at a signalized intersection of Wu Ning road and Lan Xi road in the city of Shanghai, China	TTC, DR, Jerk
Essa and Sayed(2015)	Eight video cameras installed at two signalized intersections in Surrey, Canada	TTC
Mohamed and Saunier(2015)	Video cameras installed on the rooftop of a building near a 4-legged signalized intersections in Montreal, Canada	TTC, pPET
Ahmed et al.(2016)	Video camera installed at a unsignalized intersections in Malaysia	Conflict frequency, Conflict severity
Babu and Vedagiri(2017)	CCTV installed at the Chanakya intersection (4-legged unsignalized intersection) in Vashi, the MIDC intersection (3-legged unsignalized intersection) in Pune, Samarth intersection (3-legged unsignalized intersection) in Pune	PET, RDR
Laureshyn et al.(2017)	Two video cameras installed on the rooftop of a building near a 4-legged intersection in Minsk, Belarus	Delta-V, Extended delta-V, TTC
Pawar and Patil(2017)	Three video cameras installed at three 4-legged intersections and one 3-legged intersection in Kolhapur, India	Gap
Ma et al.(2018)	Video camara installed at a unsignalized intersection in Guangzhou, China	Traffic conflict, CP
Paul and Ghosh(2018)	CCTV installed 4-legged unsignalized intersection in NCR area, India	PET, CS
Astarita and Giofre(2019)	Roundabout, signalized intersection and Complex unsignalized intersection in common cities	TTC, CE
Wei etl al.(2019)	Video camera installed at a 4-legged signalized intersection between cao'an road and north jiasong road in Shanghai	Acceleration, Jerk, Change of curvature, CR
Ulak et al.(2019)	Three video cameras install at a 3-legged unsignalized intersection in Tallahassee, Florida, USA	Max Delta-V, TTC
Raju et al.(2022)	Video camera installed on some segments of western highway in India	DRAC, TTC, TET, TIT
Guo et al.(2010)	Various sensors and cameras installed on 100 vehicles	Lat A, TTC, DRAC, PET
Wu and Jovanis(2012)	Data collection equipment, including video cameras, sensors, and radar installed in vehicles driven by a total of 241 drivers	Lat A, NC, TTC
Hutton et al.(2015)	Front and back camera in vehicle	PET, NC, EA
Noble et al.(2016)	Adaptive stop display and camera installed inside the vehicle.	TTC, RDR

3. 시사점

영상자료 기반 SSM 지표는 전체 35개의 SSM 지표가 시간 기반 SSM, 공간 기반 SSM, 운동학 기반 SSM, 기타 SSM으로 구분되어 활용되고 있었으며, 대체로 TTC와 PET가 가장 많이 활용되고 있었다. 또한 SSM 지표들은 지표에 따라 장단점이 나타나기 때문에 연구 목적 및 교통환경에 따라 다양한 SSM 지표가 활용되고 있었으며, 이는 연구에 따라 적절한 SSM 지표를 선택하여 활용하는 것이 중요함을 시사한다. 다음으로 SSM 지표 산출을 위한 영상 장비를 보면 대체로 일정 공간을 촬영하는 고정식 장비에서 데이터를 수집하는 경우가 많았다. 이는 기존 교통사고 데이터의 한계를 넘어 비충돌 이벤트에 대한 자료수집이 가능하기는 하지만 일정 공간을 벗어나면 데이터 수집이 불가능한 새로운 한계가 나타났다. 최근 모바일 영상 장비 기반으로 교통 관련 데이터 수집이 이뤄지고 있으며, 이를 활용할 수 있는 환경이 조성되어 있음에도 현재까지 모바일 영상 장비 기반 비충돌 이벤트 데이터 수집이 활발하게 이뤄지고 있지는 않은 실정이다. 즉 모바일 영상 장비를 활용하여 데이터 수집을 통해 교통안전 분석이 진행된다면 기존 고정식 영상 장비의 한계 극복이 가능할 것이다. 또한 현재 급속도로 발전 중인 AI(Artificial intelligence) 기술과 Edge-computing 기술을 활용한다면 실시간 교통안전 분석이 가능해져 도로교통안전이 향상될 것으로 보인다.

Ⅲ. 모바일 영상자료 활용 안전 분석 방안

1. 모바일 영상 자료 기반 SSM 구축 방안

모바일 영상자료는 이동하면서 수집된 동영상 데이터를 의미하며, 차량 블랙박스, 스마트폰, 태블릿, 드론 등과 같은 장비 기반으로 이동하면서 수집된 모든 데이터를 모바일 영상자료라고 한다(<Fig. 2> 참조). 모바일 영상자료는 이동하면서 영상자료를 수집하므로 하나의 장소에서 계속해서 자료를 수집하는 고정식 영상 장비에 비해 수집되는 데이터 양은 적다. 그러나 모바일 영상 자료는 높은 접근성, 실시간 데이터 수집 및 고정식 영상 장비 음영지역에서 데이터 수집이 가능하므로 교통 안전 분석에 유용하다. 특히, 모바일 영상자료는 다양한 각도와 위치에서 영상을 확인할 수 있어 다양한 교통환경에서 데이터 수집이 가능하다.



<Fig. 2> Examples of mobile-based image data collections (source: SBS News(left), and YouTube(right))

모바일 영상자료를 활용한 SSM 적용을 위해 차량 대시캠 등 다양한 모바일 영상 장비를 활용하여 영상자료를 수집한 후 수집 영상의 전처리를 통해 분석에 적합한 형태로 변환한다. 여기에는 영상 안정화, 노이즈

제거, 해상도 조절 등이 포함된다. 다음으로 교통상충과 관련 없는 데이터 제거 후 데이터 분석 계획에 따라 교통상충과 관련된 객체의 움직임(차량 추적 등)을 분석하여 위험 요소를 식별한다. 마지막으로 위험 요소 및 상황에 따라 산출할 SSM 지표 결정 후 SSM 산출에 필요한 데이터를 도출하여야 한다.

SSM 산출에 필요한 데이터는 차량 속도, 차량 가속도, 차량 위치, 차량 간 통행시간 등이 있다. 이와 같은 데이터 도출을 위해 필요한 가장 기초적인 데이터는 시간 및 거리 데이터이다. 모바일 영상 장비에서 시간 데이터를 추출하는 방법은 영상 내에서 1초당 프레임 수를 계산한 후 교통상충이 발생한 프레임 차이를 확인하여 시간을 추출할 수 있다. 또한 거리의 경우 교통상충이 발생한 지점 확인 후 카카오맵과 같은 인터넷 지도 상 축적을 확인하여 거리를 추출할 수 있다. 추출한 시간과 거리 데이터 기반으로 차량 속도, 가속도 등 SSM 산출에 필요한 데이터를 도출할 수 있다.

2. 모바일 영상 자료 기반 SSM 활용 방안

고정식 영상자료에서 수집된 데이터 기반으로 상황에 따른 SSM 적용 사례를 보면 TTC, PET, DRAC의 경우 많은 사례에서 활용되었다. 또한 후미 추돌에는 CI, TH, TA, PICUD, UD, DSS, TIDSS, CPI 등의 지표가 적용되었으며, 차선 변경 시에는 CI, UD 등이 적용되었다. 이외 보행자 충돌 및 주차 차량 충돌에도 SSM 지표를 활용하는 것으로 확인하였다. 고정식 영상자료의 SSM 적용 사례를 보면 대체로 차량 속도, 차량 위치, 가속도와 관련된 변수들이 많이 활용된 것으로 나타났으며, 앞서 모바일 영상 자료 기반 SSM 구축 방안에서 제시한 바와 같이 고정식 영상 장비에서 수집된 데이터는 모바일 영상 장비에서도 모두 수집이 가능하다. 또한 최근 AI 기술 및 Edge-computing 기술의 성장으로 <Fig. 3>과 같이 변수들에 대한 실시간 추출 및 SSM 도출이 가능하며, 모바일 영상자료 기반 교통상충 분석이 가능할 것으로 보인다. 즉 기존 고정식 장비 기반으로 수집된 데이터 기반으로 산출한 SSM 장점은 그대로 살릴 수 있을 것으로 예상되며, 모바일 영상 장비의 장착 위치나 각도에 따라 고정식 영상 장비에 비해 단점이 보완될 수도 있을 것으로 보인다.



<Fig. 3> Examples of data collection using mobile video equipment (source: Tomas et al., 2023)

또한 모바일 영상자료는 차량 후방 카메라 및 차량 옆면 카메라를 통해 다양한 각도 및 환경을 제공함으로써 고정식 영상 장비에 비해 더욱 광범위하고 세밀한 분석이 가능할 것으로 보인다. 특히 모바일 영상자료는 동적 환경에서 데이터 수집이 가능하므로 도로 환경 변화나 이동 중인 객체와의 상호 작용에 대한 즉각적 대응이 가능할 것으로 보인다. 따라서 모바일 영상자료는 교통안전 분석 연구와 실무에서 중요한 역할을 할 수 있으며 SSM 지표를 통해 현재보다 정교한 교통안전 진단과 예방 조치를 가능하게 할 것이다.

IV. 결 론

본 연구는 영상자료 기반 교통상충 기법을 활용한 교통안전 연구에 대해 고찰하는 것이 목적이다. 이에 따라 영상자료 기반 교통상충에 활용되는 SSM 지표 총 35개에 대해 검토하였으며, 영상 장비에 따라 활용되는 SSM 지표에 대해 검토하였다. 검토결과 데이터 수집 장비는 대부분 CCTV와 같은 고정식 영상 장비이며, 모바일 영상 장비를 활용하는 경우는 드물게 나타났다. 또한 수집 데이터 또는 연구 목적에 따라 다양한 SSM 지표가 활용 중인 것으로 나타났다.

모바일 영상자료는 드론, 차량 대시캠 등 모바일 기기를 통해 수집된 자료를 말하며, 고정식 영상자료에 비해 다양한 시야 및 환경에 대한 데이터 수집이 가능한 장점이 있다. 또한 수집된 데이터를 전처리하여 필요한 데이터 추출 후 SSM 도출이 가능한 것으로 나타났다. 또한 AI 기술과 Edge-computing 기술을 도입한다면 실시간 교통안전 대책을 제시할 수 있을 것이며, 동적 환경에서 데이터 수집이 가능하므로 이동 중에도 객체와 상호 작용에 대한 즉각 대응이 가능할 것으로 보인다. 교통 상황에 대해 광범위하고 세밀한 분석이 가능할 것으로 예상된다. 따라서 모바일 영상자료는 교통안전 연구와 실무에서 중요한 역할을 할 수 있으며, SSM 지표 기반으로 교통안전 진단과 예방을 가능하게 할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENTS

이 논문은 2023년도 정부(경찰청)의 재원으로 과학치안진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00260576, 자율주행자동차 교통사고 조사·분석 기술 개발을 위한 교통사고 재현S/W 개발).

REFERENCES

- Ahmed, A., Sadullah, A. F. M. and Yahya, A. S.(2016), “Field study on the behavior of right-turning vehicles in malaysia and their contribution on the safety of unsignalized intersections”, *Transportation Research Part F*, vol. 42. pp.433-446.
- Alhajyaseen, W. K. M.(2014), “The integration of conflict probability and severity for the safety assessment of intersections”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 40, no. 2, pp.421-430.
- Allen, B. L., Shin, B. T. and Cooper, P. J.(1978), “Analysis of traffic conflicts and collisions”, *Transportation Research Record*, vol. 677, pp.67-74.
- Almqvist, S., Hyden, C. and Risser, R.(1991), “Use of speed limiters in cars for increased safety and a better environment”, *Transportation Research Record*, vol. 1318, pp.34-39.
- Arun, A, Haque, M. M., Washington, S., Sayed, T. and Mannering, F.(2021), “A systematic review of traffic conflict-based safety measures with a focus on application context”, *Analytic Methods in Accident Research*, vol. 32, pp.1-46.
- Astarita, V. and Giofre, V. P.(2019), “From traffic conflict simulation to traffic crash simulation: introducing traffic safety indicators based on the explicit simulation of potential driver errors”, *Simulation Modeling Practice and Theory*, vol. 94 pp.215-236.

- Autey, J., Sayed, T. and Zaki, M. H.(2012), “Safety evaluation of right-turn smart channels using automated traffic conflict analysis”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 45, pp.120-130.
- Babu, S. S. and Vedagiri, P.(2017), “Traffic conflict analysis of unsignalised intersections under mixed traffic conditions”, *European Transport-Transporti Europei*, vol. 66, pp.1-12.
- Barcelo Bugada, J., Dumont, A. G., Montero Mercade, L., Peramau, J. and Torday, A.(2003), “Safety indicators for microsimulation-based assessments”, *In Transportation Research Board 82nd Annual Meeting*, pp.1-18.
- Caliendo, C. and Guida, M.(2012), “Microsimulation approach for predicting crashes at unsignalized intersections using traffic conflicts”, *Journal of Transportation Engineering*, vol. 138, no. 12, pp.1453-1467.
- Cunto, F. and Saccomanno, F. F.(2008), “Simulated safety performance of rear-end and angled vehicle interactions at isolated intersections”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 36, no. 11. pp.1794-1803.
- Essa. M. and Sayed, T.(2015), “Simulated traffic conflicts do they accurately represent field-measured conflicts?”, *Transportation Research Record*, vol. 2514, pp.48-57.
- Guido, G., Saccomanno, F., Vitale, A., Astarita, V. and Festa, D.(2011), “Comparing safety performance measures obtained from video capture data”, *Journal of Transportation Engineering*, vol. 137, no. 7, pp.481-491.
- Guo, F., Klauer, S. G., Hankey, J. M. and Dingus, T. A.(2010), “Near crashes as crash surrogate for naturalistic driving studies”, *Transportation Research Record*, vol. 2147, pp.66-74.
- Hayward, J. C.(1972), “Near-miss determination through use of a scale of danger”, *51th Annual Meeting of the Highway Research Board*, pp.24-34.
- Huang, F., Liu, P., Yu, H. and Wang, W.(2013), “Identifying if VISSIM simulation model and SSAM provide reasonable estimates for field measured traffic conflicts at signalized intersections”, *Accident Analysis and Prevention*, vol. 50, pp.1014-1024.
- Hurwitz, D. S., Knodler Jr, M. A., Moore, D. and Tuss, H.(2012), “Evaluating the potential of advanced vehicle detection systems in mitigating dilemma zone safety conflicts”, *Institute of Transportation Engineers: ITE Journal*, vol. 82, no. 3, pp.24-28.
- Hutton, J. M., Bauer, K. M., Fees, C. A. and Smiley, A.(2015), “Evaluation of left-turn lane offset using the naturalistic driving study data”, *Journal of Safety Research*, vol. 54, pp.1-15.
- Hyden, C. and Linderholm, L.(1984), *The swedish traffic-conflicts technique*, International Calibration Study of Traffic Conflict Techniques Berlin, Heidelberg, pp.133-139.
- Hyden, C.(1987), “The development of a method for traffic safety evaluation: the swedish traffic conflicts technique”, *Bulletin Lund Institute of Technology*, Department 70.
- Iida, Y., Uno, N., Itsubo, S. and Sukanuma, M.(2001), “Traffic conflict analysis and modeling of lane-changing behavior at weaving section”, *In Proceedings of Infrastructure Planning*, vol. 24, no. 1, pp.305-308.
- Ismail, K., Sayed, T. and Saunier, N.(2011), “Methodologies for aggregating indicators of traffic conflict”, *Transportation Research Record*, no. 2237, pp.10-19.
- Laureshyn, A., Ceunynck, T. D., Karlsson, C., Svensson, A. and Daniels, S.(2017), “In search of the severity dimension of traffic events: Extended delta-v as a traffic conflict indicator”, *Accident*

- Analysis and Prevention*, vol. 98, pp.46-56.
- Lee, C. K., Yun, I., Choi, J. H., Ko, S. J. and Kim, J. Y.(2013), “Evaluation of semi-actuated signals and pedestrian push buttons using a microscopic traffic simulation model”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 17, pp.1794-1760.
- Ma, Y., Qin, X., Grembek, O. and Chen, Z.(2018), “Developing a safety heatmap of uncontrolled intersections using both conflict probability and severity”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 113, pp.303-316.
- Mahmud, S. S., Ferreira, L., Hoque, M. S. and Tavassoli, A.(2017), “Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: a review of recent developments and research needs”, *IATSS Research*, vol. 41, no. 4, pp.153-163.
- Meng, Q. and Qu, X.(2012), “Estimation of rear-end vehicle crash frequencies in urban road tunnels”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 48, pp.254-263.
- Michael, P. G., Leeming, F. C. and Dwyer, W. O.(2000), “Headway on urban streets: Observational data and an intervention to decrease tailgating”, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 3, no. 2, pp.55-64.
- Minderhoud, M. M. and Bovy, P. H.(2001), “Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 33, no. 1, pp.89-97.
- Mohamed, M. G. and Saunier, N.(2013), “Motion prediction methods for surrogate safety analysis”, *Transportation Research Board*, vol. 2386, pp.168-176.
- Mohamed, M. G. and Saunier, N.(2015), “Behavior analysis using a multilevel motion pattern learning framework”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2528, pp.116-127.
- Morocho, E.(2020), *Car detection and velocity estimation with deep learning*[6s], YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=W1KM45jItms>.
- Noble, A. M., Dingus, T. A. and Doerzaph, Z. R.(2016), “Influence of in-vehicle adaptive stop display on driving behavior and safety”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 10, pp.2767-2776.
- Oh, J., Kim, E., Kim, M. and Choo, S.(2010), “Development of conflict techniques for left-turn and cross-traffic at protected left-turn signalized intersections”, *Safety Science*, vol. 48, pp.460-468.
- Okamura, M., Fukuda, A., Morita, H., Suzuki, H. and Nakazawa, M.(2011), “Impact evaluation of a driving support system on traffic flow by microscopic traffic simulation”, *Advances in Transportation Studies*, (Special Issue 2011), pp.99-102.
- Paul, M. and Ghosh, I.(2018), “Speed-based proximal indicator for right-turn crashes at unsignalized intersections in India”, *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, vol. 114, no. 6, pp.1-9.
- Pawar, D. S. and Patil, G. R.(2017), “Minor-street vehicle dilemma while maneuvering at unsignalized intersections”, *Journal of Transportation Engineering, Part a: Systems*, vol. 143, no. 8, pp.1-11.
- Peesapati, L. N., Hunter, M. P. and Rodgers, M. O.(2013), “Evaluation of post encroachment time as surrogate for opposing left-turn crashes”, *Transportation Research Record*, vol. 2386, pp.42-51.
- Raju, N., Arkatkar, S. S., Easa, S. and Joshi, G.(2022), “Investigating performance of a novel safety measure for assessing potential rear-end collisions: An insight representing a scenario in

- developing nation”, *IATSS Research*, vol. 46, pp.138-146.
- Saunier, N., Mourji, N. and Agard, B.(2011), “Mining microscopic data of vehicle conflicts and collisions to investigate collision factors”, *Transportation Research Record*, vol. 2237, pp.41-50.
- Sayed, T., Ismail, K., Zaki, M. H. and Autey, J.(2012), “Feasibility of computer vision-based safety evaluations: Case study of a signalized right-turn safety treatment”, *Transportation Research Record*, vol. 2280, pp.18-27.
- Sayed, T., Zaki, M. H. and Autey, J.(2013), “Automated safety diagnosis of vehicle-bicycle interactions using computer vision analysis”, *Safety Science*, vol. 59, pp.163-172.
- SBS News, <https://www.onseoul.net/news/articleView.html?idxno=27398>, 2024.10.15.
- Sharma, A., Bullock, D. and Peeta, S.(2011), “Estimating dilemma zone hazard function at high speed isolated intersection”, *Transportation Research Part C*, vol. 19, pp.400-412.
- Singh, D., Das, P. and Ghosh, I.(2023), “Surrogate safety assessment of traffic facilities under ordered and disordered traffic condition: Systematic literature review”, *KSCCE Journal of Civil Engineering*, vol. 27, no. 11, pp.5008-5029.
- Songchitruksa, P. and Tarko, A. P.(2006), “Practical method for estimating frequency of right-angle collisions at traffic signals”, *Transportation Research Record*, vol. 1953, pp.89-97.
- Tegeldin, A., Sayed, T. and Wang, X.(2015), “Can time proximity measures be used as safety indicators in all driving cultures? Case study of motorcycle safety in China”, *Transportation Research Record*, vol. 2520, pp.165-174.
- Tomas, M. C. A., Oropilla, J. D., Senga, E. N. and Tandoc, D.(2023), “Distance estimation of vehicles using triangle similarity and feature extraction”, *CIIS' 20: Proceedings of the 2023 6th International Conference on Computational Intelligence and Intelligent Systems*, pp.39-45.
- Ulak, M. B., Ozguven, E. E., Sando, T., Boot, W., AbdelRazig, Y., Sobanjo, J. O.(2019), “Assessment of traffic performance measures and safety based on driver age and experience: A microsimulation based analysis for an unsignalized T-intersection”, *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, vol. 9, no. 6. pp.455-469.
- Uno, N., Iida, Y., Itsubo, S. and Yasuhara, S.(2003), “A microscopic analysis of traffic conflict caused by lane-changing vehicle at weaving section”, *In Proceedings of the 13th mini-EURO Conference-Handling Uncertainty in the Analysis of Traffic and Transportation Systems*, Bari, Italy, pp.10-13.
- Wei, Y., Li, K. and Tang, K.(2019), “Trajectory-based identification of critical instantaneous decision events at mixed-flow signalized intersection”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 123, pp.324-335.
- Wu, K. F. and Jovanis, P. P.(2012), “Crashes and crash-surrogate events: exploratory modeling with naturalistic driving data”, *Accident Analysis and Prevention*, vol. 45, pp.507-516.
- Yan, X. and Radwan, E.(2007), “Effect of restricted sight distances on driver behaviors during unprotected left-turn phase at signalized intersections”, *Transportation Research Part F*, vol. 10, pp.330-344.
- Yan, X. and Radwan, E.(2008), “Influence of restricted sight distances on permitted left-turn operation at signalized intersections”, *Journal of Transportation Engineering*, vol. 134, Issue 2, pp.68-76.