

측후방 충돌 안전 시스템을 위한 횡방향 충돌 위험 평가 지수 개발

김규원* · 김범준* · 김동욱* · 이경수*

DEVELOPMENT OF ROBUST LATERAL COLLISION RISK ASSESSMENT METHOD

Kyuwon Kim*, Beomjun Kim*, Dongwook Kim*, Kyongsu Yi*

Key Words : Lateral Collision Risk(횡방향 충돌 위험), Blind Spot(사각 영역), Risk Index(위험 지수)

ABSTRACT

This paper presents a lateral collision risk index between an ego vehicle and a rear-side vehicle. The lateral collision risk is designed to represent a lateral collision risk and provide the appropriate threshold value of activation of the lateral collision management system such as the Blind Spot Detection(BSD). The lateral collision risk index is designed using the Time to Line Crossing(TLC) and the longitudinal collision index at the predicted TLC. TLC and the longitudinal collision index are calculated with the signals from the exterior sensor such as the radar equipped on the rear-side of a vehicle and a vision sensor which detects the distance and time to the lane departure. For the robust situation assessment, the perception of driving environment determining whether the road is straighten or curved should be determined. The relative motion estimation method has been proposed with the road information via the integrated estimator using the environment sensors and vehicle sensor. A lateral collision risk index was composed with the estimated relative motion considering the relative yaw angle. The performance of the proposed lateral collision risk index is investigated via computer simulations conducted using the vehicle dynamics software CARSIM and Matlab/Simulink.

1. 서론

지난 수 년간, 운전자의 안전 확보와 편의를 위해 다양한 방식의 운전자 주행 보조 장치가 개발되었다. 차량 간의 충돌 사고에 대하여 가장 많은 비율을 차지하는 종방향 충돌을 방지하기 위해 자동긴급제동장치(AEBS, Automatic Emergency Braking System), 사전 추돌 안전 시스템(PCS, Pre-Crash Safety System), 전방 자동차 충돌 위험 경보 시스템(FVCWS, Forward

Vehicle Collision Warning System) 등의 안전 시스템이 개발되어 양산 적용되고 있다. 전방 충돌 방지 시스템의 제동 시점과 제동 감속도를 결정하기 위한 전방 충돌 위험 지수로서 충돌시간(TTC, Time to Collision), 충돌위험지수(Warning Index)등이 제안되어 널리 사용되고 있다.¹⁾

주행 중 인접 차선으로의 차선 변경이나 끼어들기(cut-in) 등을 포함한 차선 이탈에 의한 충돌 사고는 전체 충돌 사고의 약 28%를 차지하고 있으며,²⁾ 이에 운전자가 의도치 않게 차선을 이탈하면서 발생할 수 있는 사고를 방지하기 위해 차량 전면에 부착된 비전 센서로 차선까지의 거리 및 차선 이탈 시간을 측정하

* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University
E-mail : ghostkitten@snu.ac.kr

여 운전자에게 이탈 경보를 보내는 차선 이탈 경보 시스템(LDWS, Lane Departure Warning System)이 개발되었고, 전동식 조향 보조 장치(MDPS, Motor Driven Power Steering), 차체 자세 제어 장치(ESC, Electronic Stability Control)의 보급에 따라 모터 토크 및 차등 제어를 통해 본 차선을 유지하도록 운전자를 유도하는 차선 유지 보조 시스템(LKAS, Lane Keeping Assistant System)이 개발되었다. 최근에는 사각 지대에서 주행하고 있는 차량을 인지하지 못한 상태에서의 차선 변경에서 야기되는 측후방 혹은 측방 충돌 위험에 대해 사각지대감지(BSD, Blind Spot Detection) 기술이 측후방에 장착된 레이더나 단거리 감지를 위한 초음파 센서, 사이드 미러에 장착된 후방 차량 감지용 비전센서를 사용하여 수행된 바 있다.^{3,4,5)} 사각 영역에 위치한 차량과의 충돌 위험에 대한 인식이 높아짐에 따라 2008년 사각 지역 감지장치 평가 기술에 대한 국제 표준이 제정되어 활용되고 있다.⁶⁾

현재 개발된 사각지대감지 및 경보는 직선 주행 구간에서 적용되고 있으며, 일정 곡률 이상에서는 작동하지 않는다. 실제로는 곡률 주행 중 차선 이탈에 의한 충돌 사고 가능성을 배제할 수 없기 때문에 도로 환경에 강건한 성능을 지닌 충돌 위험 판단 방식이 필요하다.

본 논문에서는 단기간 내에 양산 가능한 환경센서인 전방 비전 센서 및 측후방에 장착된 레이더 센서의 정보에 기반하여 자차량 센서를 고려한 비선형 추정기를 통해 센서 신호들의 신뢰도를 높이고, 곡률 주행 상황에서도 측방 주행 차량과의 충돌 위험을 나타낼 수 있는 횡방향 충돌 위험 지수를 개발하였다.

2. 레이더 센서 후처리 알고리즘

측후방 레이더 센서 신호의 정확도를 높이기 위해 자차량 센서 신호를 융합한 신호 처리 알고리즘을 적용하였다. 자차량 센서는 차량 속도 센서와 요 속도 센서로 두 센서는 매우 높은 정확한 차량 거동 정보를 출력한다. 레이더 신호는 자차량과 측후방 차량 간의 종/횡방향 상대 거리 및 상대 속도를 출력하며 외란 혹은 레이더 특성에 의해 정확도가 떨어지는 신호를 보정하기 위해 상태 추정기를 설계하였다.

곡선 도로 주행 시, 인접 차선의 측후방에서 주행 중인 차량은 차선을 따라 주행하면서 요각(yaw angle, ψ)이 발생하게 된다. 자차량의 측후방 레이더에서 출

력되는 정보는 측후방 차량의 요각이 고려되지 않기 때문에 실제 측후방 차량과의 충돌 위험성을 고려하기 위해 자차량과 측후방 차량의 상대 요각을 포함한 필터링 방식이 필요하다.

상태 및 측정 신호를 식(1), (2) 과 같이 설정하면 차량의 종방향 상대 거리(x_r), 횡방향 상대 거리(y_r) 및 상대 요각(ψ_r) 과 각각의 변화율을 포함한 차량간의 상대 거동은 식(3) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \underline{x} &= [x_r \quad y_r \quad \psi_r \quad v_o \quad \dot{\psi}_r \quad a_o \quad \ddot{\psi}_r]^T \\ \underline{y} &= [x_r \quad y_r \quad v_o - v_s \cos \psi_r - y_r \dot{\psi}_s]^T \\ \underline{u} &= [v_s \quad \dot{\psi}_s]^T \end{aligned} \quad (1)$$

$$\dot{\underline{x}} = f(\underline{x}, \underline{u}) + \underline{w} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ \psi_r \\ v_o \\ \dot{\psi}_r \\ a_o \\ \ddot{\psi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_o - v_s \cos \psi_r - y_r \dot{\psi}_s \\ -x_r - v_s \sin \psi_r \\ \psi_o - \psi_s \\ a_o \\ \dot{\psi}_o \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

식(2)를 이산화시켜 확장 칼만 필터를 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\underline{x}}[k] = f_d(\hat{\underline{x}}[k-1], w[k-1]) + K[k] \cdot (z[k] - \hat{z}[k]) \quad (4)$$

f_d 는 식(2)의 시스템 행렬의 이산화 행렬이며 추정기 계인 $K[k]$ 는 각 상태의 편미분 근사화를 통해 다음과 같은 time propagation 및 measurement update 과정으로 결정된다.

$$\begin{aligned} & \text{Time update} \\ \bar{\underline{x}}[k] &= f_d(\hat{\underline{x}}[k-1]) \\ F[k-1] &= \left. \frac{\partial f}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{x}=\hat{\underline{x}}[k-1]} \\ M[k] &= F[k-1] \cdot P[k-1] \cdot F[k-1]^T + W \end{aligned} \quad (5)$$

Measurement update

$$\begin{aligned} \hat{x}[k] &= \bar{x}[k] + K[k] \cdot (z[k] - H_p \bar{x}[k]) \\ K[k] &= M[k] H^T \cdot (H M[k] H^T + V[k])^{-1} \\ P[k] &= (I - K[k] H) \cdot M[k] \end{aligned} \quad (6)$$

3. 횡방향 충돌 위험 지수

주행 중 인접 차선의 차량과의 횡방향 충돌 위험을 나타내기 위해 다양한 방식의 충돌 위험 표시 방식이 제안되었는데, 자차량이 충돌 위험 상황에 직면했을 때 충돌 위험 차량과의 예측되는 충돌 면적을 계산하거나, 후방 주행 차량과의 현재 충돌시간을 적용하는 방식, 충돌 위험 상황에서 차량, 운전자의 확률적 행동 분포를 통해 위험도를 측정하는 방식이 연구된 바 있다.^{7,8)} 기존의 연구에서는 차량간 위치, 방향, 속도, 가속도, 주행 패턴 등의 정보들의 정확한 인지를 기반으로 구성되었는데, 이는 고가의 GPS장비나 차량간 통신, 차량-인프라 간 통신에 의한 정보 획득으로서, 현재 혹은 가까운 미래에 양산가능성이 높은 환경센서로는 높은 수준의 정보 획득이 어렵다. 본 연구에서는 단기간 내에 양산 가능성이 있는 비전 센서와 레이더 센서를 기반으로 횡방향 충돌 위험을 효과적으로 나타낼 수 있는 지수를 제안하였다.

주행 중 횡방향 위험 상황은 Fig.1과 같이 자차량이 인접 차선 후방에서 주행하고 있는 차량을 발견하지 못하고 차선 변경을 시도하거나, 줄음 등의 부주의한 운전으로 차선을 이탈하는 경우 발생한다.

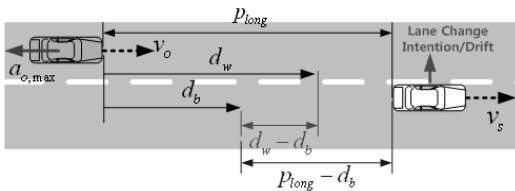


Fig.1 Schematic Description of Lateral Collision Risk

주행 차선을 이탈하여 인접 주행 차량과의 충돌 위험이 있는 영역으로 진입하기까지의 거리(DLC, Distance to Line Crossing)는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

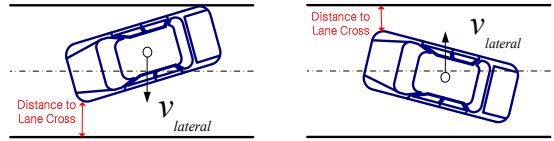


Fig.2 Distance to Line Crossing

차량이 차선 이탈까지 걸리는 시간(Time to Line Crossing, TLC)은 DLC와 횡방향 속도(\$v_{lateral}\$)를 이용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$TLC = \frac{DLC}{v_{lateral}} \quad \text{where, } v_{lateral} \approx \frac{d(DLC)}{dt} \quad (7)$$

인접 차선의 후방 주행 차량이 충돌 위험 상황을 인식하고 최대 감속도로 감속을 한다면 충돌 위험은 자차량과 후방 주행 차량 간의 종방향 충돌 위험 지수로 나타낼 수 있다. 종방향 충돌 위험 지수는 적응형 순항 제어 시스템(ACC, Adaptive Cruise Control), 자동비상제동장치(AEBS, Automatic Emergency Brake System) 등의 운전자 지원 시스템에서 다양하게 사용되고 있는 지수로서,¹⁾ 측후방 대상 차량에 대해 이를 적용하여 나타내었다.

충돌 경보지수(Warning index, \$x_{lat}\$)는 측후방 차량과의 충돌 상황의 물리적 한계를 고려한 위험도로서 다음과 같이 나타낸다.

$$x_{lat, nom} = \frac{|x_{max} - x_{lat}|}{|x_{max} - x_{th}|} \quad \text{where, } x_{lat} = \frac{P_{long} - d_b}{d_w - d_b} \quad (8)$$

식(6)의 \$P_{long}\$은 차간 거리를 나타내며 \$d_b\$과 \$d_w\$은 각각 제동 거리 및 경보거리를 의미하며 다음의 수식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} d_b &= v_{o,rel} T_{s,delay} + f(\mu) \left(\frac{v_o^2 - (v_o - v_{rel})^2}{2a_{o,max}} \right) \\ d_w &= v_{o,rel} T_{s,delay} + f(\mu) \left(\frac{v_o^2 - (v_o - v_{rel})^2}{2a_{o,max}} \right) + v_o T_{h,delay} \end{aligned} \quad (9)$$

충돌 경보지수는 현재 주행 상태에서 제동 여유거리와 운전자의 작동 지연을 고려한 여유거리의 비율을 나타내고, 값이 클수록 안전한 주행 상황이라 볼 수 있다.

충돌 시간은 운전자가 시각적으로 느끼는 충돌 위험과 밀접한 관계가 있으며, 위험이 높아 질수록 큰 값을 가지기 위해 다음과 같은 역 충돌 시간을 정의한다.

$$TTC^{-1} = \frac{v_o - v_s}{P_{long}} \quad (10)$$

자차량이 주행 차선을 이탈하여 인접 차선 주행 중인 측후방 차량과의 충돌 위험이 높아질 때까지의 시간에서 예측되는 종방향 충돌 위험은 충돌 경보지수와 역 충돌 시간을 통합하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{long,p} = \max \left(\frac{|x_{max} - x_p|}{|x_{max} - x_{th}|}, \frac{|TTC_p^{-1}|}{|TTC_{th}^{-1}|} \right) \quad (11)$$

식(11)에서의 역 충돌 시간(TTC_p^{-1})과 충돌 경보지수(x_p)는 차량이 현재 상태로 주행할 때, 차선이탈시간에서 예측되는 지수이다.

횡방향 충돌 위험은 자차량이 차선을 이탈하면서 인접 차선의 측후방 주행 차량이 높은 종방향 충돌 위험도를 가질 때 발생하므로 횡방향 충돌 위험 지수는 Fig. 3과 같이 나타낸다.

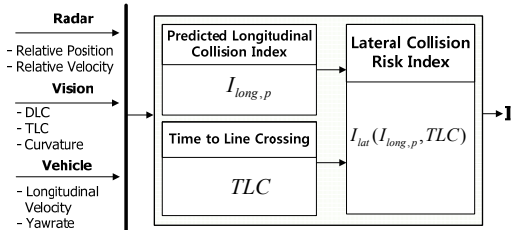


Fig.3 Architecture of Lateral Collision Index

횡방향 위험 지수는 최대값 1을 가지면서 위험 상황에서는 점차 큰 값을 가지도록 다음과 같은 수식으로 나타낸다.

$$I_{lateral} = \min(I_{long,p}, 1) \cdot \min\left(\frac{TLC_{th}}{TLC}, 1\right) \quad (12)$$

4. 시뮬레이션 결과

횡방향 충돌 위험 시뮬레이션 상황은 Fig. 4 와 같다. 100kph속도의 자차량은 인접 차선의 측후방에서 110kph로 주행 중인 차량과 함께 차선을 따라 곡선로를 주행한다. 이때 자차량은 고속으로 접근하는 측후

방 차량을 발견하지 못하고 차선 변경을 시도하다가 뒤늦게 측후방 차량을 발견하고 본 차선으로 돌아오려는 조향을 시도한다.

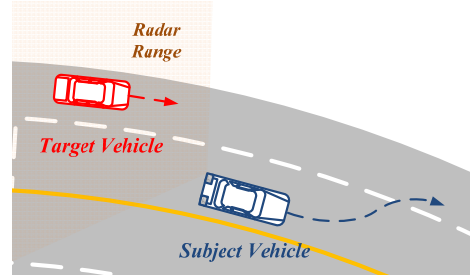


Fig.4 Simulation Scenario

자차량은 4초에서부터 약 1초간에 걸쳐 왼쪽 차선으로의 차선 변경을 시도하며, 측후방 주행 차량을 발견한 이후 빠른 보정 조타 거동으로 본 차선으로 복귀하여 차선을 유지하려는 거동을 보인다. 100m직진로 주행 이후 500m반경의 곡선로를 주행하는 차량의 조향각 및 궤적과 속도는 다음과 같다.

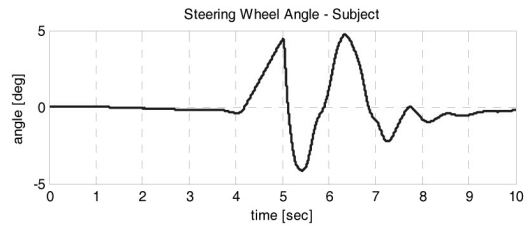


Fig.5 Subject Vehicle Steering Wheel Angle

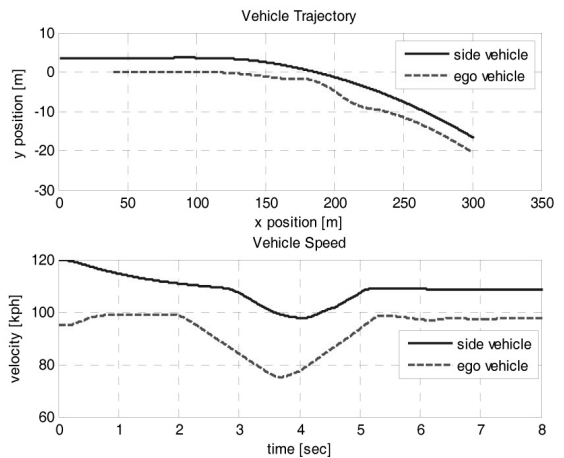


Fig.6 Vehicle Trajectory and Vehicle Speed

차량량과 측후방 차량의 상대 운동방정식에 기반한 필터링 결과로서 곡로 주행시 발생하는 요각을 고려하여 측후방 접근차량과 자차량의 상대 속도 및 거리는 다음과 같이 나타난다.

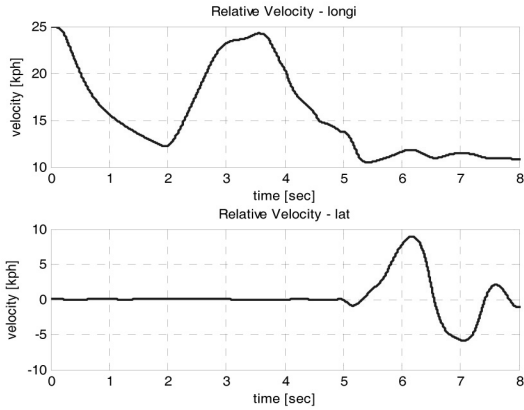


Fig.7 Vehicle Relative Velocity

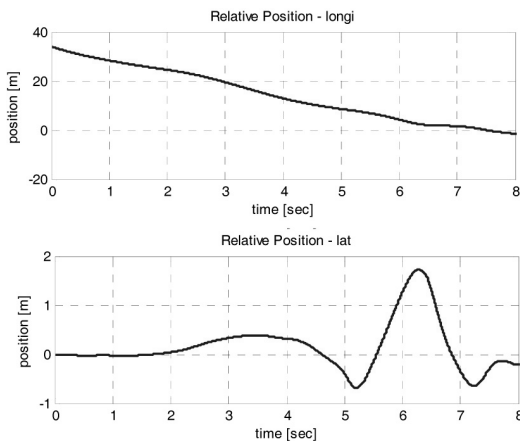


Fig.8 Vehicle Relative Position

차선 변경 시의 차량량의 조향각이나 곡률 도로 주행시 차선 유지 주행에서 발생하는 요각을 고려하였기 때문에 주어진 곡선 도로 주행 시뮬레이션 상황에서 측후방 레이더에서 검지되는 타겟은 직선 구간에서 주행 중인 차량과 유사하게 검지됨을 확인하였다. 이를 통해 제안한 횡방향 충돌 위험 지수를 계산하면 Fig. 9와 같이 나타난다.

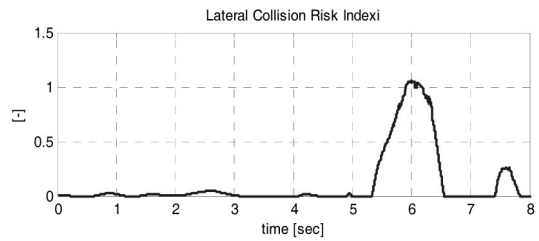


Fig.9 Vehicle Relative Position

5. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

측후방 레이더를 장착한 차량에서 사각지대(Blind Spot)를 포함한 인접 차선 측후방 영역에서 접근하는 차량과의 상대 거동을 기반으로 곡선 도로 주행 상황에서도 상대 요각을 고려하여 위험도를 판단할 수 있는 추정기를 설계하였다.

위험도 판단을 위해 기존 연구에서 제안된 종방향 충돌 위험 지수와 차선 이탈 경보 시스템에 적용되는 비전 센서 정보를 융합하여 새로운 방식의 횡방향 충돌 위험 지수를 제안하였다.

후 기

본 연구는 BK21, 서울대학교 정밀기계연구소, 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(20120000922).

참고문헌

- (1) Seungwuk Moon, Kyongsu Yi, "Human driving data-based design of a vehicle adaptive cruise control algorithm", *Vehicle System Dynamics*, Vol.8, No.4, pp.661-690, 2008.
- (2) National Highway Traffic Safety Administration, "Pre-Crash Scenario Typology for Crash Avoidance Research", 2007
- (3) Jongchul Kim et al., "The Development of Side Obstacle Warning System using 24GHz Radar", *한국자동차공학회 2005년도 전기 전자, ITS 부문 Symposium* pp. 128~133
- (4) S-J Huang and S-T Chao, "A new lateral im-

- pact warning system with grey prediction”, Imeche Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol.224, pp. 285-297, 2008
- (5) D. Balcones et al., “Real-Time Vision-Based Vehicle Detection for Rear-End Collision Mitigation Systems”, Computer Aided Systems Theory - EUROCAST 2009, Vol(5717), 2009, pp. 320-325
- (6) ISO-17387, 2008
- (7) Nico Kaempchen, Bruno Schiele, and Klaus Dietmayer, “Situation Assessment of an Autonomous Emergency Brake for Arbitrary Vehicle-to-Vehicle Collision Scenarios”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 10, No. 4, pp. 678-687
- (8) Christoph Mertz, et al, “Collision Warning and Sensor Data Processing in Urban Areas”, Carnegie Mellon University Research Showcase, 2005