

전(쏘)방향 충돌 회피를 위한 액츄에이터 최적 분배 알고리즘

김규원* · 김범준* · 이경수*

Unified Control of Independent Braking and Steering Using Optimal Control Allocation Methods for Collision Avoidance

Kyuwon Kim*, Beomjun Kim*, Kyongsu Yi*

Key Words : Motor Driven Power Steering(MDPS, 전동식 조향 보조장치), Differential Braking(편제동), Unified Control(통합 제어), Collision Avoidance(충돌 회피)

ABSTRACT

This paper presents a unified control algorithm of independent braking and steering for collision avoidance. The desired motion of the vehicle in the yaw plane is determined using the probabilistic risk assessment method based on target state estimation. For the purpose of coordinating the independent braking and steering, a non-linear vehicle model has been developed, which describes the vehicle dynamics in the yaw plane in both linear and extended non-linear ranges of handling. A control allocation algorithm determines the control inputs that minimize the difference between the desired and actual vehicle motions, while satisfying all actuator constraints. The performance of the proposed control algorithm has been investigated via computer simulations conducted using the vehicle dynamics software CARSim and Matlab/Simulink.

1. 서론

차량 간 충돌에 의한 사고를 줄이기 위해 최근 몇 년 간 다양한 방식의 운전자 안전 확보 기술이 개발되었다. 전체 차량 간의 충돌 사고 중 약 39%를 차지하는 종방향 충돌 사고를 방지하기 위해 자동긴급제동장치(AEBS, Automatic Emergency Braking System), 사전 충돌 안전 시스템(PCS, Pre-Crash Safety System), 전방 자동차 충돌 위험 경보 시스템(FCWS, Forward Collision Warning System) 등의 안전 시스템이 개발되어 양산 적용되고 있다.¹⁾

미국 도로교통안전청의 조사 결과에 따르면, 운전자

의 의도에 의한 차선 이탈이나 운전 부주의에 의한 인접 차선 주행 차량 간 충돌 사고는 전체 충돌 사고의 약 28%를 차지하고 있으며²⁾, 이에 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)}

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

중방향 충돌 방지 기술의 경우, 전방 레이더에서 측정된 타겟의 중방향 상대 거리 및 속도에 기반한 충돌 시간(TTC, Time To Collision) 및 충돌 경보 지수(Warning index) 등에 기반하여 제동 입력을 결정하고 있으며, 차선 이탈 등에 기인한 횡방향 충돌 방지 기술은 전방 카메라의 차선 인지에 기반한 차선이탈시간 및 차선 이탈 거리 등의 위험 지수를 통해 조향각 내지는 차등 제동 제어 입력을 결정한다.

현재 양산되었거나, 양산에 가까운 운전자 안전 지원 시스템은 단일 위험 사고에 대한 사고 시나리오를 기반으로 개별 시스템이 독립적인 기능을 수행하도록 개발이 되었는데, 실제 주행 시에는 다수의 주행 차량과의 충돌 위험 여부에 기반한 복합적인 충돌 위험 판단 기술이 필요하다. 이에, 본 논문에서는 레이더, 카메라 센서의 신호를 기반으로 다수의 차량의 주행 상태를 추정하고, 충돌 회피를 위한 자차량의 요구 거동이 결정되었을 때, 이를 추종하기 위한 조향각 및 차등 제동 제어 입력을 구하는 방식에 대한 연구를 수행하였다.

2. 주행 차량 상태 추정 알고리즘

주행 차량과의 충돌 위험도를 분석하기 위해 주변 차량의 거동을 예측하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 주변차량의 상대적인 운동상태추정은 2차 가우스-마르코프 모델을 기반으로 한 운동 방정식에 칼만 필터를 적용하여 이루어졌다. i 번째 주변차량에 대한 상태변수와 이산 시간 운동 방정식은 다음과 같다.⁵⁾

$$\underline{x}_i = [x_{r,i} \quad y_{r,i} \quad \psi_{r,i} \quad v_{o,i} \quad \dot{\psi}_{r,i} \quad a_{o,i} \quad \ddot{\psi}_{r,i}]^T$$

$$\underline{y}_i = [x_{r,i} \quad y_{r,i} \quad v_{o,i} - v_s \cos \psi_{r,i} - y_{r,i} \dot{\psi}_s]^T \quad (1)$$

$$\underline{u}_i = [v_s \quad \dot{\psi}_s]^T$$

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

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_{r,i} \\ y_{r,i} \\ \psi_{r,i} \\ v_{o,i} \\ \dot{\psi}_{r,i} \\ a_{o,i} \\ \ddot{\psi}_{r,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{o,i} - v_s \cos \psi_{r,i} - y_{r,i} \dot{\psi}_s \\ -x_{r,i} - v_s \sin \psi_{r,i} \\ \dot{\psi}_{r,i} - \dot{\psi}_s \\ a_{o,i} \\ \ddot{\psi}_{r,i} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

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

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

추정기 게인 K_k 는 각 상태의 편미분 근사화를 통한 시스템 행렬과 측정 행렬을 이용한 다음과 같은 time propagation 및 measurement update를 통해 결정된다.

Time update

$$\bar{\underline{x}}[k] = f_d(\hat{\underline{x}}[k-1])$$

$$F[k-1] = \left. \frac{\partial f}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{x}=\hat{\underline{x}}[k-1]} \quad (5)$$

$$M[k] = F[k-1] \cdot P[k-1] \cdot F[k-1]^T + W$$

Measurement update

$$\hat{\underline{x}}[k] = \bar{\underline{x}}[k] + K[k] \cdot (z[k] - H_p \bar{\underline{x}}[k])$$

$$K[k] = M[k] H^T \cdot (H M[k] H^T + V[k])^{-1} \quad (6)$$

$$P[k] = (I - K[k] H) \cdot M[k]$$

3. 확률 기반 위험도 판단

자차량과 주변차량의 잠재적 충돌가능성은 두 차량의 독립적 거동을 가정하면, 각각의 밀도확률함수의 곱의 적분값으로 다음과 같이 표현할 수 있다. 식을 살펴보면, 충돌가능성은 자차량의 확률밀도함수에 각 위치 별로 정의된 도메인상에 상대차량이 존재할 확률을 곱한 값을 면적분한 값으로 정의됨을 알 수 있다. 이때 상대차량의 존재해야 하는 도메인은 자차량의 차체크기로 지정하였다.

$$CP_i^k(k) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ P(X_{i,p,k} \in D_{X_{p,k}}) \cdot f_k(X_{p,k}) \right\} dp_{x,p,k} dp_{y,p,k} \quad (7)$$

where,

$$P(X_{i,p,k} \in D_{X_{p,k}}) = \iint_{D_{X_{p,k}}} f_{i,k}(X_{i,p,k}) dp_{i,x,p,k} dp_{i,y,p,k}$$

$$D_{X_{p,k}} = \{(x, y) \mid \|x - p_{x,p,k}\| \leq \varepsilon_x \\ \cap \|x - p_{y,p,k}\| \leq \varepsilon_y\}$$

$$X_{p,k} = [p_{x,p,k} \quad p_{y,p,k}]^T \quad (8)$$

식(1)의 주변 주행 차량에 대한 예측된 거동에 대해 자차량의 주행 상태에 따라 식(7)의 예측된 충돌 확률이 변화하며, 자차량의 종방향 및 횡방향 가속도 변화에 따라 충돌 확률을 가속도 평면 상에 나타낼 수 있다. 여기서 차량의 동역학적 거동 한계, 운전자 의도, 액추에이터 한계를 고려하면 충돌 회피를 위한 요구 거동은 다음과 같이 결정된다.

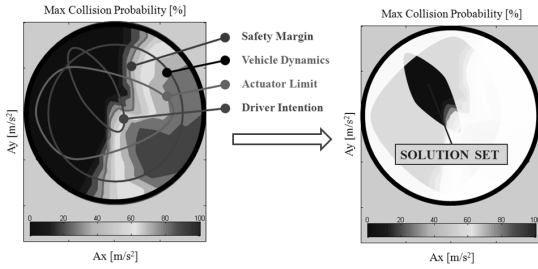


Fig. 1 Desired State Determination

4. 비선형 차량 모델 구성

최적 제어 알고리즘을 구성하기 위해 Fig.2와 같이 차량의 거동을 묘사하는 비선형 차량 모델을 구성하였다.

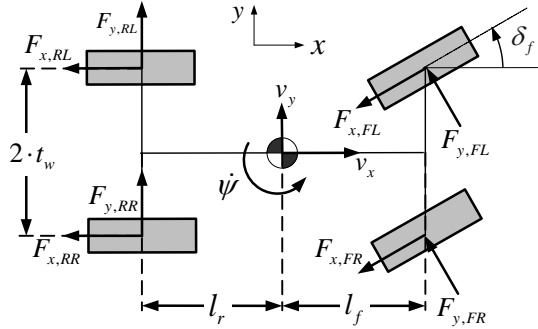


Fig. 2 Architecture of Lateral Collision Index

조향각이 크지 않을 때, 차량의 종방향, 횡방향, 요방향에 대한 거동은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{v}_x &= v_y \gamma - \frac{\sum F_x}{m} - \frac{F_{y,FL} + F_{y,FR}}{m} \delta_f \\ \dot{v}_y &= -v_x \gamma + \frac{\sum F_y}{m} - \frac{F_{x,FL} + F_{x,FR}}{m} \delta_f \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{\gamma} &= \frac{t_w}{I_z} (F_{x,FL} - F_{x,FR} + F_{x,RL} - F_{x,RR}) + \frac{l_f}{I_z} (\sum F_{y,F}) \\ &\quad - \frac{l_r}{I_z} (F_{y,RL} + F_{y,RR}) - \frac{l_f}{I_z} (\sum F_{x,F}) \delta_f \\ &\quad + \frac{t_w}{I_z} (F_{y,FL} - F_{y,FR}) \delta_f \end{aligned}$$

식(9)에서 제어 입력은 제동력에 해당하는 종방향 타이어힘과 조향각이므로, 횡방향 타이어힘을 상대 변수에 대해 표현하기 위해 전륜의 횡방향 타이어힘의 합과 차를 다음과 같이 표현할 수 있다.⁶⁾

$$F_{y,FL} + F_{y,FR} = \frac{m l_r}{l_r + l_f} (a_y + l_f \gamma) = m_f a_{y,f}$$

$$F_{y,FL} - F_{y,FR} = \frac{m_f h}{t_w g} |a_y| a_{y,f} \quad (10)$$

where, $a_{y,f} = a_y + l_f \dot{\gamma}$

전륜 횡방향 타이어힘의 차이는 전축 횡방향 가속도의 방향을 고려하여 차량 무게 중심점의 가속도를 곱한 값과 비례한다.

식(9)에 나타난 각 륜의 횡방향 타이어힘은 미끄러짐 각과 속도 및 조향각에 따라 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} F_{y,FL} + F_{y,FR} &= C_f \left(\delta_f - \frac{v_y + l_f \gamma}{v_x} \right) \\ F_{y,RL} + F_{y,RR} &= C_r \left(-\frac{v_y - l_r \gamma}{v_x} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

식(10),(11)의 관계에 따라 식(9)는 종방향 타이어힘과 조향각의 제어 입력에 대해 다음과 같이 재구성된다.

$$\begin{aligned} \dot{v}_x &= v_y \gamma - \frac{\sum F_x}{m} - \frac{m_f a_{y,f}}{m} \delta_f \\ \dot{v}_y &= -\frac{C_f + C_r}{m v_x} v_y - \left(v_x + \frac{C_f l_f - C_r l_r}{m v_x} \right) \gamma + \frac{C_f - \sum F_{x,F}}{m} \delta_f \\ \dot{\gamma} &= -\frac{C_f l_f - C_r l_r}{I_z v_x} v_y - \frac{C_f l_f^2 + C_r l_r^2}{I_z v_x} \gamma + \frac{t_w}{I_z} (\sum F_{x,L} - \sum F_{x,R}) \\ &\quad + \frac{l_f (C_f - F_{x,FL} - F_{x,FR}) + m_f h |a_y| a_{y,f}}{I_z} \delta_f \end{aligned} \quad (12)$$

중방향 속도, 횡방향 속도, 요속도를 상태 변수로 가지는 상태 공간 방정식은 식(13)과 같이 나타낼 수 있다. 제어 입력은 각 타이어의 중방향 제동력과 조향각이며, 제동력은 제동 압력에 비례하므로 중방향 가속도, 횡방향 가속도 및 전축 횡방향 가속도, 각 룬의 제동력은 측정 가능하다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, z) + g(z, u) \\ x &= [v_x \quad v_y \quad \gamma]^T \\ u &= [F_{x,FL} \quad F_{x,FR} \quad F_{x,RL} \quad F_{x,RR} \quad \delta_f]^T \\ f(x, z) &= \begin{bmatrix} v_y \gamma \\ -\frac{C_f + C_r}{mv_x} v_y - \left(v_x + \frac{C_f l_f - C_r l_r}{mv_x} \right) \gamma \\ -\frac{C_f l_f - C_r l_r}{I_z v_x} v_y - \frac{C_f l_f^2 + C_r l_r^2}{I_z v_x} \gamma \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

$$g(z, u) = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} & -\frac{m_f a_{y,f}}{m} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_{25} \\ \frac{t_w}{I_z} & -\frac{t_w}{I_z} & \frac{t_w}{I_z} & -\frac{t_w}{I_z} & g_{35} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{x,FL} \\ F_{x,FR} \\ F_{x,RL} \\ F_{x,RR} \\ \delta_f \end{bmatrix}$$

where,

$$g_{25} = \frac{C_f - F_{x,FL} - F_{x,FR}}{m}$$

$$g_{35} = \frac{l_f (C_f - F_{x,FL} - F_{x,FR}) + m_f h |a_y| \frac{a_{y,f}}{g}}{I_z} z$$

차량의 제동력과 조향각에 대한 물리적 한계를 반영하기 위해 각 액츄에이터의 출력 한계와 반응 속도를 고려하였다. 브레이크 액츄에이터의 제동력은 노면 마찰계수가 1에 가까울 때의 수직하중보다 커질 수 없다. 각 룬의 수직하중은 중방향, 횡방향 가속도와 차량 파라미터의 관계에 따라 추정 가능하다. 브레이크 액츄에이터의 반응 속도는 각 룬의 관성 질량과 제동력을 발생시키는 캘리퍼 성능에 따라 달라진다.

$$0 \leq F_{x,ij} \leq F_{z,ij}, \quad i = L, R; \quad j = F, R \quad (14)$$

$$-\dot{F}_{x,\max} \leq \dot{F}_{x,ij} \leq 0$$

전(前)륜의 물리적 조향각 한계는 약 30도 정도이나, 주행 중 차량의 안정성을 고려하기 위해 식(15)와 같이 속도와 곡률에 따른 조향 한계 영역을 설정할 필요가 있다.

$$|\delta_f| \leq \max \left[\delta_{\max}, K_{steer} a_y + \frac{L}{R} \right] \quad (15)$$

where, $L = l_f + l_r$, $K_{steer} = \frac{ml_r}{2C_f L} - \frac{ml_f}{2C_r L}$

여기서 K_{steer} 는 언더스티어 계수로, 임의의 차속에 서 차량의 횡방향 안정성을 유지하면서 최대의 횡가속도에 도달할 수 있는 한계 조향각을 계산할 수 있다. 조향 속도는 조향계 액츄에이터의 조향 성능과 직접적인 관련이 있으며, 고정된 값을 사용한다.

$$-\dot{\delta}_{f,\max} \leq \dot{\delta}_f \leq \dot{\delta}_{f,\max} \quad (16)$$

5. 액츄에이터 최적 분배 알고리즘

액츄에이터 제어 알고리즘의 목적은 충돌 회피를 위해 주어진 요구 거동을 추종하기 위한 각 룬의 제동력과 조향각의 제어 입력을 결정하는 것이다.

추종하려는 요구 거동이 전체 제어 입력값보다 적기 때문에 과도의 제어 입력간의 최적값을 구하기 위해 control allocation 방식을 사용한다. 식(13)에서 $g(z, u)$ 는 제어 입력에 대해 선형($B(z)u$)으로 표현된다.

차량 운동방정식의 상태와 요구 거동의 차이를 최소화하기 위해 식(13)을 재구성하면 다음과 같다.

$$|\dot{x}_{des} - f(x, z)| = g(z, u) \quad (17)$$

비선형 운동방정식에 의한 영향을 고려하기 위해 식(17)의 우변을 제어 입력에 대한 선형식과 비선형식으로 분리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(z, u) = B(z)u + \varepsilon(z, u) \quad (18)$$

$$|\dot{x}_{des} - f(x, z) - \varepsilon(z, u)| = B(z)u$$

이때, 제어 입력의 성능 한계와 차량의 운동방정식

에 의한 구속조건을 만족시키며 다음의 성능지수를 최소화하는 제어 입력값이 최적 입력값이 된다.

$$u_{opt} = \arg \min_u W^T u$$

$$\text{such that } \begin{cases} \dot{x} = f(x, z) + g(z, u) \\ u_{min} \leq u \leq u_{max} \end{cases} \quad (19)$$

where, $W^T = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4 \ w_5]^T$

6. 시뮬레이션을 통한 성능 검증

본 연구에서 제안한 충돌 회피를 위한 조향각과 각륜 제동력 간의 분배 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 차량용 시뮬레이션 소프트웨어인 Carsim, Matlab/Simulink를 이용하였다. 임의의 충돌 회피를 위한 종방향/횡방향 가속도 입력이 각각 주어졌을 때, 각 액츄에이터 별 지연시간을 고려한 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 시뮬레이션 결과, 100kph초기 속도에서 임의의 충돌 회피 가속도가 결정되면, 브레이크 제동력과 조향각 제어를 통해 각 요구 가속도를 추종하는 것을 확인할 수 있다.

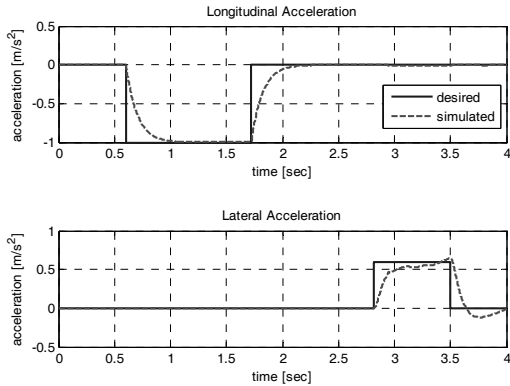


Fig. 3 Longitudinal / Lateral Acceleration

7. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

MDPS, ESC의 상용 액츄에이터를 고려한 비선형 차량 운동방정식을 구성하였다. 이를 기반으로 차량

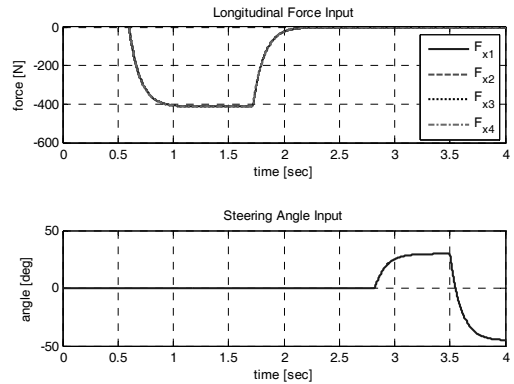


Fig. 4 Longitudinal Force and Steering Angle

종횡방향 및 요 거동의 각 액츄에이터 제어 입력에 대한 선형관계를 도출하였다.

각 액츄에이터의 성능 한계를 정의하고, 요구 가속도를 추종하기 위한 운동방정식의 구속 조건 만족과 액츄에이터 입력 크기 최소화를 목적으로, control allocation 방식을 적용한 시뮬레이션을 통해 결과를 확인하였다.

후 기

본 연구는 현대자동차, 만도, 서울대학교 정밀기계연구소, 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임

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) S-J Huang and S-T Chao, "A new lateral impact warning system with grey prediction", Imech Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol.224, pp. 285-297, 2008
- (4) D. Balcones et al., "Real-Time Vision-Based Vehicle Detection for Rear-End Collision Mitiga-

- tion Systems”, Computer Aided Systems Theory EUROCAST 2009, Vol(5717), 2009, pp. 320-325
- (5) Beomjun Kim, Changhyun Jeong, Jinyong Kim and Kyongsu Yi, “Probabilistic and Holistic Vehicle States Prediction with Enhanced Driver Model and Application to Smart Cruise Control Systems”, ESV 2013, 2013
- (6) Aleksander Hac, David Doman and Michael Oppenheimer, “Unified Control of Brake- and Steer-by-Wire Systems Using Optimal Control Allocation Methods”, 2006 SAE World Congress, 2006