충돌회피를 위한 가속도를 고려한 차선 변경 시스템 개발

강 현 구¹⁾ · 이 동 휘¹⁾ · 허 건 수^{*2)}

한양대학교 대학원 자동차공학과¹⁾ · 한양대학교 미래자동차공학과²⁾

Development of Lane Change System considering Acceleration for Collision Avoidance

Hyunkoo Kang¹⁾ · Donghwi Lee¹⁾ · Kunsoo Huh^{*2)}

¹⁾Department of Automotive Engineering, Graduate School, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 9 March 2012 / Revised 20 August 2012 / Accepted 23 August 2012)

Abstract : This paper presents the lane change system for collision avoidance. The proposed algorithm for the collision avoidance consists of path generation and path following. Using a calculated TTC (Time to Collision), partial braking is operated and collision avoidance path is generated considering relative distance, velocity and acceleration. Based on the collision avoidance path, desired yaw angle and yaw rate are calculated for the automated path following. The lateral controller is designed by a Lyapunov function approach using 3 D.O.F vehicle model and vehicle parameters. The required steering angle is determined from wheel velocity, longitudinal and lateral velocity in order to follow the desired yaw angle and yaw rate. This system is developed MATLAB/Simulink and its performance is evaluated using the commercial software CarSim.

Key words : Lane change(차선 변경), Path generation(궤적 생성), Collision avoidance(충돌 회피), Time to collision(충돌 시간), Intelligent vehicle(지능형 자동차)

1. 서 론

지능형차량(Intelligent vehicle)의 안전 시스템 중 능동 안전 시스템은 각종 센서를 통해 주변 환경을 인식하여 충돌을 방지 또는 피해를 최소화 하도록 운전자를 돕는 시스템을 말한다. 볼보(Volvo), 벤츠(Mercedes Benz), 콘티넨탈(Continental)과 같은 세계적인 자동차 업체 및 부품회사에서 능동 안전 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다. 볼보는 City safety 라는 시스템을 통해 저속(30 km/h 이하)에서의 충돌을 방지하는 시스템을 개발하였다.¹⁾ 벤츠의 능동 안전 시스템으로는 PRE-SAFE Brake가 있다. 이 시스템은 충돌에 대한 구간별 신호에 대한 반응이 없을

시, 비상 제동(emergency braking)을 통해 충돌 피해를 감소시키는 역할을 한다.²⁾ 콘티넨탈의 ESA(Emergency Steer Assist)는 센서로부터 주변 상황을 인식하고, 상대속도에 따라 조향을 통해 충돌을 회피할 수 있는 지점을 설정하여, EPS(Electric Power Steering), ESC(Electronic Stability Control), ARK(Active Rear axle Kinematics)를 사용하여 충돌 회피를 한다.³⁾

본 연구는 가속도를 고려한 궤적 생성 시스템 개발이다. 가속도를 고려한 궤적은 충돌을 회피하는 동시에 안전하게 차선을 변경할 수 있도록 생성한다. 가속도를 고려한 궤적을 생성하는 이유는 충돌 물체와의 회피 전 충돌을 막는 편제동시스템(Partial braking system)이 존재한다고 가정하였기 때문이다.⁴⁾ 상위 제어기에서는 이를 추종할 수 있는 요구

*Corresponding author, E-mail: khuh2@hanyang.ac.kr

요 각(Desired yaw angle) 및 요레이트(Yaw rate)를 계산하고, 하위 제어기에서는 계산된 요구 요 각 및 요레이트와 차량의 종, 횡방향 속도, 요 각, 요레이트, 휠 속을 이용하여 Lyapunov 기법을 통해 제어기를 설계하여 조향을 통해 충돌 회피를 하도록 한다.

2. 차량 모델

횡방향 차량 운동은 횡방향 위치와 요 각으로 구성된 2자유도 자전거 모델(bicycle model)이 사용된다. 하지만 본 논문에서는 종방향 차량 운동도 고려되므로, 기존의 자전거 모델에 종방향 운동을 추가적으로 고려하여 3자유도 차량 모델을 사용한다.⁵⁾ 차량 거동에 관한 식은 다음과 같다.

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} \{ (F_{xf}\delta + F_{xr}) - F_{yff} \} + \dot{\psi}\dot{y} \quad (1)$$

$$\ddot{y} = \frac{1}{m} (F_{yf} + F_{yf}\delta + F_{xf}) - \dot{\psi}\dot{x} \quad (2)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{1}{I_z} (l_f F_{yf} - l_r F_{yff} + l_f F_{xf}\delta) \quad (3)$$

where

m : total mass of vehicle

I_z : yaw moment of inertia of vehicle

δ : front steer angle

ψ : yaw angle

l_f : longitudinal distance from c.g. to front tires

l_r : longitudinal distance from c.g. to rear tires

F_{xf}, F_{yf} : longitudinal and lateral tire force on front tires

F_{xr}, F_{yr} : longitudinal and lateral tire force on rear tires

δ 는 작은 값이므로 $\sin\delta=\delta$, $\cos\delta=1$ 로 가정하여 식을 전개하였다.

횡방향 타이어 힘은 슬립각과 비례한다. 전륜 슬립각은 (4)와 같고 후륜 슬립각은 (5)와 같다.

$$\alpha_f = \delta - \theta_{V_f} \quad (4)$$

$$\alpha_r = -\theta_{V_r} \quad (5)$$

where

θ_{V_f} : front tire velocity angle

θ_{V_r} : rear tire velocity angle

α_f : slip angle at front tire

α_r : slip angle at rear tire

$\theta_{V_f}, \theta_{V_r}$ 는 (6), (7)과 같이 계산된다.

$$\tan(\theta_{V_f}) \simeq \theta_{V_f} = \frac{\dot{y} + l_f \dot{\psi}}{\dot{x}} \quad (6)$$

$$\tan(\theta_{V_r}) \simeq \theta_{V_r} = \frac{\dot{y} - l_r \dot{\psi}}{\dot{x}} \quad (7)$$

식 (4)~(7)을 이용하여 횡방향 타이어 힘을 구하면 (8), (9)와 같다.

$$F_{yff} = 2C_{af} \left(\delta - \frac{\dot{y} + l_f \dot{\psi}}{\dot{x}} \right) \quad (8)$$

$$F_{yrr} = 2C_{ar} \left(-\frac{\dot{y} - l_r \dot{\psi}}{\dot{x}} \right) \quad (9)$$

where

C_{af}, C_{ar} : cornering stiffness of front and rear tires

종방향 타이어 힘은 지면으로부터의 마찰력이다. 종방향 타이어 힘이 생기는 여러 가지 요인 중, 본 논문에서는 슬립율(slip ratio)에 의해서만 발생한다고 가정한다. 가속력 및 제동력은 타이어 회전 속도와 주행속도 차이에 의해 발생하는데 이 결과 접촉면에서 슬립이 발생한다. 슬립율은 전진속도의 백분율로서 (10), (11)과 같이 무차원 수로 정의된다.

$$\sigma_x = \frac{r_{eff}\omega_w - V_x}{V_x} \text{ (제동시)} \quad (10)$$

$$\sigma_x = \frac{r_{eff}\omega_w - V_x}{r_{eff}\omega_w} \text{ (가속시)} \quad (11)$$

r_{eff} 는 타이어의 유효반경(effective radius), ω_w 는 바퀴의 회전속도를 의미한다.

본 논문에서는 슬립율이 작다고 가정하고, 전륜 및 후륜의 종방향 타이어 힘은 (12), (13)이 된다.

$$F_{xf} = C_{\sigma f} \sigma_{xf} \quad (12)$$

$$F_{xr} = C_{\sigma r} \sigma_{xr} \quad (13)$$

$C_{\sigma f}, C_{\sigma r}$ 는 각각 전륜, 후륜의 종방향 타이어 강성을 의미한다.

3. 충돌 회피 알고리즘

본 논문은 전방 차량과의 충돌회피를 위한 차선 변경 시스템 개발이다. 따라서 충돌회피 시 옆 차선에 차량이 없다고 가정한다. 또한 직선도로에서 발생하는 충돌회피 상황이며, 한 방향으로 충돌회피가 일어난다고 가정한다. 센서의 경우, 비전센서(vision)를 통해 차선을 인식하며, 전방 장애물 감지 센서로 상대차량의 주행정보인 상대거리, 속도, 가속도 등을 인식한다고 가정한다.⁶⁾ 그리고 자차량이 차선 중심에 있다고 가정한다.

3.1 가속도를 고려한 차선변경 궤적 생성

본 논문은 제동이 발생된 후, 조향을 통해 전방 차량과의 충돌을 회피한다. 따라서 일정한 속도가 아닌 가속도가 고려된 궤적생성방법이 사용되어야 한다. 이를 위해, ramp sinusoid 방법⁷⁾을 변형하여 일정한 가속도를 고려한 궤적을 생성하는 식을 유도하면 (14)~(17)과 같다.

$$V_e(t) = V_0 + a_x t \quad (14)$$

$$x(t) = V_0 t + \frac{1}{2} a_x t^2 \quad (15)$$

$$y(t) = y_d \left[\frac{x(t)}{x_d(t)} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi x(t)}{x_d(t)}\right) \right] \quad (16)$$

$$a_y(t) = [0.025 V_e(t) - (V_e(t)/44)^{1.85}]g \quad (17)$$

V_e 는 종가속도를 통해 예측된 종방향 속도, a_x 는 종가속도이다.

종방향 거리 식인 (15)을 보면 종가속도인 a_x 가 포함되어 식이 유도되었고, 진행되는 종방향 속도 또한 a_x 가 포함되어 예측되는 속도를 유도하였다. 차선변경 궤적생성에 사용되는 횡가속도인 (17)에 예측되는 속도 (14)를 대입하여 차선변경 중 속도가 변화함에 따라 함께 변화되는 횡가속도를 생성할 수 있다.

전체 종횡 방향 차선거리는 (18), (19)와 같다.

$$x_d(t) = C_x V_e(t) \sqrt{\frac{y_d}{a_y(t)}} \quad (18)$$

$$y_d = 3.8m \quad (19)$$

종방향 거리는 가속도를 통해 예측된 속도를 통

Fig. 1 Collision avoidance path considering acceleration

해 계산한다. C_x 는 상수 계수로 전체 종방향 차선 변경 거리를 결정한다. 횡방향 거리는 차선 폭인 $y_d = 3.8m$ 로 일정하다. 최소 회전 반경은 (20)과 같다.

$$R_{\min}(t) \cong \frac{x_d(t)^2}{2\pi y_d} \quad (20)$$

가속도를 고려한 차선궤적 생성 방법이 기존 방법과 다른 점은 일정한 속도가 아닌, 가속도를 고려하여 종방향 속도 및 이동거리를 계산하고 이를 통해 횡방향 이동거리 및 횡가속도를 계산하는 것이다. 이러한 과정을 통해 (16)에서 사인함수의 주기를 변하게 하여 속도 및 가속도가 고려된 궤적이 생성된다.

80km/h의 속도에서 0g부터 -0.5g까지 -0.1g 간격으로 궤적을 생성해보면 Fig. 1과 같다. 감속이 많이 될수록 전체 충돌회피를 위한 종방향 차선변경 거리인 x_d 값이 작아지고, 이로 인해 더욱 큰 곡률의 차선변경궤적이 생성되는 것을 확인할 수 있다.

3.2 TTC를 고려한 충돌회피 알고리즘

전방 차량과의 TTC(Time To Collision)를 계산하여 충돌회피 알고리즘을 설계한다. 전방 차량과의 상대 거리, 속도, 가속도 등의 정보는 전방 장애물 감지 센서를 통해 인식된다. TTC는 상대거리와 상대속도를 통해 계산된다. TTC 계산방법은 (21)과 같다.

$$TTC = \frac{L}{V_{rel}} \quad (21)$$

L 은 전방 차량과의 상대거리, V_{rel} 는 전방 차량과의 상대속도를 의미한다.

주행 중, TTC가 1.6 sec 일 때 편제동을 시작한다.⁴⁾ 이는 감속을 통해 운전자에게 충돌위험을 알리는 동시에, 충돌을 방지하는 역할을 한다. 편제동 후, 운전자의 충돌회피 반응이 없으면 TTC가 1 sec 일 때 조향을 통해 충돌을 회피한다. 3.1에서 설명된 가속도를 고려한 차선변경 궤적생성 방법에 충돌회피 알고리즘을 적용시킨다.

3.3 제어기 설계

생성된 충돌회피 궤적을 추종하기 위해 상위제어기는 충돌회피 궤적으로부터 나오는 요구 요 각 및 요구 요레이트를 계산하고 하위제어기는 계산된 값을 통해 Lyapunov 기법을 통해 제어기를 설계하여 요구 요 각 및 요구 요레이트를 추종하도록 한다.

3.3.1 상위 제어기 설계

가정에서 비전센서를 통해 차선인식을 하고 차량 위치를 인식하기 때문에 DGPS(Differential Global Positioning System)와 같이 x, y점을 받을 수 없다. 따라서 요 각 및 요레이트를 통해 충돌회피 궤적을 추종한다.

상위제어기에서는 충돌회피 궤적을 추종하기 위해 요구 요 각 및 요레이트를 생성한다. 생성방법은 (22) ~ (24)와 같다.

$$\dot{\psi}_d(t) = \frac{V_e(t)}{R_{\min}(t)}k \quad (22)$$

$$R_{\min} = \frac{x_d^2 \left[1 + \frac{4y_d^2}{x_d} \sin^4\left(\frac{2\pi x}{x_d}\right) \right]^{\frac{3}{2}}}{2\pi y_d \sin\left(\frac{2\pi x}{x_d}\right)} \quad (23)$$

$$\psi_d(t) = \int_{t_0}^t \dot{\psi}_d(t) dt \quad (24)$$

ψ_d 는 요구 요 각, $\dot{\psi}_d$ 는 요구 요레이트, k 는 요구 요레이트의 가중치를 의미한다.

TTC가 1 초 일때, 요구 요레이트 (22)은 충돌회피 궤적으로부터 계산되는 최소 회전반경과 가속도를 통해 예측된 속도를 통해 계산된다. 이때 최소 회전반경 (23)은 (20)의 근사치와는 달리 연속 함수로 유

도하였다. 또한 제동에 의해 횡력 발생이 감소되므로 이를 보상하기 위해 가중치 k 를 곱한다. 요구 요레이트를 적분하여 요구 요 각 (24)를 계산하여 이 값들을 하위제어기를 설계하여 추종 하도록 한다.

3.3.2 하위 제어기 설계

요구 요레이트 및 측정된 요레이트를 Lyapunov 기법을 통해 추종한다. Lyapunov 기법을 사용하는 이유는 알고 있는 차량 파라미터를 이용하여 분석적으로 제어기를 설계할 수 있기 때문이다.⁸⁾

Candidate Lyapunov function은 (25)~(29)를 통해 이루어진다.

$$e = \psi - \psi_d \quad (25)$$

$$\dot{e} = \dot{\psi} - \dot{\psi}_d \quad (26)$$

$$r = \dot{e} + \alpha e \quad (27)$$

$$V = \frac{1}{2}r^2 \quad (28)$$

$$\dot{V} = (\dot{e} + \alpha e)(\ddot{e} + \alpha \dot{e}) \quad (29)$$

(25), (26)은 오차에 관한 식이고, 이를 (27)과 같이 r function으로 정리하고, 이를 통해 (28)과 같은 candidate Lyapunov function을 구성하고, (29)는 이를 미분한 식이다.

$\dot{V}$ 가 음의 값을 가지면 전체 시스템은 전역 점근 안정성(global asymptotic stability)이라고 할 수 있다. 따라서 control law는 (30), (31)이다.

$$\dot{V} = -kV \quad (30)$$

$$\dot{V} = -\lambda r^2 \quad (31)$$

Control law인 (30)에 (28)을 대입하면 (31)로 유도할 수 있다. (31)에 (25)~(27)을 대입하면 (32)이다.

$$\ddot{\psi} - \ddot{\psi}_d + \alpha \dot{e} = -\lambda(\dot{e} + \alpha e) \quad (32)$$

(32)에 3자유도 차량 모델 중 (3)을 대입하면 (33)과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{I_z}(l_f F_{yf} - l_r F_{yr} + l_f F_{xf} \delta) - \ddot{\psi}_d + \alpha(\dot{\psi} - \dot{\psi}_d) \\ &= -\lambda\{\dot{\psi} - \dot{\psi}_d + \alpha(\psi - \psi_d)\} \end{aligned} \quad (33)$$

전륜, 후륜의 횡방향 타이어 힘은 (8), (9)이고, 종방향 타이어 힘은 (12), (13)이다. 감속이 발생하는

시스템이므로 수식 (12)의 슬립율에 (10)을 대입한다. 이를 정리하면 (34)와 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{I_z} \left[l_f 2C_\alpha \left(\delta - \frac{\dot{y} + l_f \dot{\psi}}{\dot{x}} \right) - l_r 2C_\alpha \left(-\frac{\dot{y} - l_r \dot{\psi}}{\dot{x}} \right) \right. \\ & \left. + l_f 2C_\sigma \frac{r_{eff} \omega_w - \dot{x}}{\dot{x}} \delta \right] - \ddot{\psi}_d + \alpha (\dot{\psi} - \dot{\psi}_d) \\ & = -\lambda [\dot{\psi} - \dot{\psi}_d + \alpha (\psi - \psi_d)] \end{aligned} \quad (34)$$

(34)를 입력인 조향각에 관해 정리하면 (35)와 같다.

$$\begin{aligned} \delta = & \frac{I_z \dot{x}}{2l_f \{ \dot{x} (C_\alpha - C_\sigma) + C_\sigma r_{eff} \omega_w \}} \\ & \left[\frac{1}{I_z} \left\{ 2C_\alpha \frac{(l_f^2 + l_r^2)}{\dot{x}} \dot{\psi} + 2C_\alpha \frac{(l_f - l_r)}{\dot{x}} V_y \right\} + \ddot{\psi}_d \right. \\ & \left. - (\lambda + \alpha) (\dot{\psi} - \dot{\psi}_d) - \lambda \alpha (\psi - \psi_d) \right] \end{aligned} \quad (35)$$

(35)에 차량의 각 파라미터 값을 대입하고, 차량 센서로부터 정보를 받으면 안정한 제어 값이 출력된다.

4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 환경은 충돌회피 알고리즘 및 제어기는 MATLAB/Simulink로 개발되었다. 이를 차량동역학 해석 프로그램인 CarSim을 이용하여 검증하였다.

시뮬레이션 상황은 고마찰 노면에서 자차량이 60km/h로 주행 중 전방의 정지 물체를 감지하고, TTC가 1.6초 일 때 -0.5g 편제동이 작동한다. TTC가 1초가 되면, 충돌회피 알고리즘이 적용된 충돌 회피 경로를 생성 후 차선 변경을 시도한다. Fig. 2는 생성된 궤적과 차량의 궤적을 나타내고 있다. 파란색 박스는 차량의 궤적, 초록색 박스는 전방차량, 붉은색 선은 충돌회피 알고리즘으로 생성된 궤적을 의미한다. 그림을 통해 차량이 감속 중에 차선을 변경하는 것을 확인하였다. Fig. 3,4를 통해서 상위제어기에서 나온 값을 잘 추종 하는 것을 확인하였다. Fig. 5,6은 하위 제어기에서 계산된 조향 입력과, 차량의 속도를 나타낸다.

Fig. 2 Simulation result of vehicle path

Fig. 3 Desired yaw rate and actual yaw rate

Fig. 4 Desired yaw angle and actual yaw angle

Fig. 5 Steering angle

Fig. 6 Vehicle velocity

5. 결 론

본 논문은 충돌회피를 위한 차선변경 시스템 개발에 관한 연구이다. 충돌회피 알고리즘은 TTC가 1.6 초일 때부터 시작된다. 이때 운전자에게 충돌 경고를 주기 위한 편제동이 시작되는데, 운전자의 충돌회피 반응이 없을 경우 TTC가 1 초 일 때 조향을 통해 충돌을 회피하게 된다.

조향을 통해 충돌을 회피하기 위해 충돌 회피 경로를 생성하고 이를 추종한다. 궤적을 생성할 때 ramp sinusoid 방법을 이용하여 가속도와 상대차량과의 관계를 고려한 궤적을 생성하는 충돌회피 알고리즘을 개발하였다. 또한 이를 추종하기 위해 Lyapunov 기법을 이용한 제어를 설계하였다. 설계된 제어를 통해 나오는 조향각으로 충돌회피를 위한 차선변경이 실행된다. 이를 상용 소프트웨어를 통해 시뮬레이션 검증을 수행하였다.

후 기

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업(07기술혁신A01)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT 융합 고급인력과정 지원사업(NIPA-2013-H0401-13-1009)의 연구결과로 수행되었습니다.

References

- 1) M. Distner, M. Bengtsson, T. Broberg and L. Jakobsson, "City Safety-a System Addressing Rear-end Collisions at Low Speeds," 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Stuttgart, Germany, Paper No.09-0371, 2009.
- 2) U. Mellinshoff, T. Breitling, R. Schöneburg and H. G. Metzler, "The Mercedes-Benz Experimental Safety Vehicle ESF 2009," 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Stuttgart, Germany, Paper No.09-0165. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration, 2009.
- 3) B. Hartmann, A. Eckert and P. E. Rieth, "Emergency Steer Assist - Advanced Driver Assistance System for Emergency Lane Change Maneuvers," In Proceedings of FISITA World Automotive Congress, Budapest, 2010.
- 4) H. L. Bloecher, J. Dickmann and M. Andres, "Automotive Active Safety & Comfort Functions using Radar," 2009 IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Vancouver, Canada, 2009.
- 5) R. Rajamani, Vehicle Dynamics and Control, Springer, New York, pp.223-231, 2006.
- 6) S. H. Jang and S. W. Kim, "Vision-based Lane Change Maneuver Using Sliding Mode Control for a Vehicle," Transactions of KSAE, Vol.8, No.6, pp.194-207, 2000.
- 7) N. H. Sledge and K. M. Marshek, "Comparison of Ideal Vehicle Lane-Change Trajectories," SAE 971062, 1997.
- 8) R. A. Freeman and P. V. Kokotović, Robust Nonlinear Control Design; State-Space and Lyapunov Techniques, Birkhäuser, New York, pp.33-63, 1996.