

# 차량 궤적 예측기법을 이용한 충돌 경보/회피 알고리즘 개발

김재호\* .이경수\*\*

## Development of Collision Warning/Avoidance Algorithms using Vehicle Trajectory Prediction Method

JaehoKim and KyongsuYi

**Key Words :** Collision Avoidance (충돌회피), Collision Warning (충돌 경보), Trajectory Prediction (궤적 예측), Kalman Filter (칼만 필터), Bicycle Model (자전거 모델), Prediction algorithms (예측 알고리즘)

### Abstract

This paper proposes a collision warning/avoidance algorithm using a trajectory prediction method. This algorithm is based on 2-dimensional kinematics and the Kalman filter has been used to obtain the information of the object vehicle. This algorithm has been investigated via computer simulation and showed a good trajectory prediction performance. The proposed collision warning/avoidance algorithm would enhanced driver acceptance for a collision warning/avoidance system.

### 1. 서론

차량의 증가로 인하여 기존의 도로사정의 한계로 말미암아 자동주행에 관한 연구가 세계적으로 진행되고 있으며 많은 부분 실용화 단계로까지 발전되고 있다. 자동주행의 한 분야로 주변 차량의 거동에 따라 충돌 경보 및 능동적인 충돌 회피기능에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.

다양한 상황하에서의 충돌경보/회피에 관한 연구<sup>(1)</sup>가 진행되었고, 퍼지논리와 비례적분제어기를 적용한 연구<sup>(2)</sup>, 타이어 슬립을 고려한 슬라이딩모드제어기의 적용한 충돌회피시스템에 관한 연구<sup>(3)</sup>도 수행되었다.

궤적예측 알고리즘은 지대공 혹은 공대공 유도 미사일의 조준점을 예측하는 분야에서 많은 연구가 진행되었고, 목표물의 각 방향 가속도가 일정하다는 가정하에 미사일의 조준각을 결정한다<sup>(4)</sup>.

본 연구에서는 상대차량과 자차량의 궤적을 예측하여 차량의 출동경보 및 회피시점을 판단하는 알고리즘을 제안하였고 시뮬레이션을 통하여 이를

평가하였다.

### 2. 차량궤적예측 알고리즘

2 차원 좌표계에서 차량의 궤적을 예측하기 위해 진행방향가속도(longitudinal accelertion  $a_L$ )와 횡방향 가속도 (lateral acceleration  $a_R$ )는 일정하다고 가정한다. 차량의 운동은 아래의 식과 같이 두개의 병진운동(translational motion)과 하나의 회전운동(rotational motion)으로 표현한다.

$u$ 를 차량의 속도라 하면  $u_x, u_y$ 는 각각 x, y 방향 속도가 되고,  $\theta$ 를 차량의 방향각(aspect angle)이라 하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$u(t) = u_0 + a_L t \tag{1}$$

$$u_x(t) = u(t) \cos \theta(t) \tag{2}$$

$$u_y(t) = u(t) \sin \theta(t) \tag{3}$$

$$\dot{\theta}(t) = \frac{a_R}{u_0 + a_L t} \tag{4}$$

\* 한양대학교 자동차공학과 대학원

\*\* 한양대학교 기계공학부

식 (4)의 양변을 적분하면 방향각(aspect angle)에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$\theta(t) = \theta_0 + \alpha(t) \quad (5)$$

여기서

$$\alpha(t) = \frac{a_R}{a_L} \ln \left( \frac{u_0 + a_L t}{u_0} \right) \quad (6)$$

차량의 위치는 식(2)와 식 (3)을 적분하여 얻을 수 있다.

좌표계의 y 성분의 경우 식 (3)을 적분하면

$$y - y_0 = \int_0^t u \sin \theta dt = EQ1 + EQ2 \quad (7)$$

여기서

$$EQ1 = \int_0^u \frac{u}{a_L} \sin \theta_0 \cos \alpha du \quad (8)$$

$$EQ2 = \int_0^u \frac{u}{a_L} \cos \theta_0 \sin \alpha du \quad (9)$$

EQ1, EQ2을 계산하면

$$EQ1 = \left( \frac{u^2 a_R \sin \theta_0}{a_R^2 + 4a_L^2} \right) \left( \sin \alpha \exp \left( \frac{2a_L \alpha}{a_R} \right) + \cos \alpha \frac{2a_L}{a_R} \exp \left( \frac{2a_L \alpha}{a_R} \right) - \frac{2a_L}{a_R} \right) \quad (10)$$

$$EQ2 = \left( \frac{u^2 a_R \cos \theta_0}{a_R^2 + 4a_L^2} \right) \left( 1 - \cos \alpha \exp \left( \frac{2a_L \alpha}{a_R} \right) + \sin \alpha \frac{2a_L}{a_R} \exp \left( \frac{2a_L \alpha}{a_R} \right) \right) \quad (11)$$

최종적으로 식(3)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} y(t) &= y_0 + EQ1 + EQ2 \\ &= y_0 + \frac{1}{a_R^2 + 4a_L^2} \left( \sin \theta_0 (a_R u^2 \sin \alpha + 2a_L \cos \alpha u^2 - 2a_L u_0^2) \right. \\ &\quad \left. + \cos \theta_0 (a_R u_R^2 - \cos \alpha a_R u^2 + 2a_L \sin \alpha u_L^2) \right) \end{aligned} \quad (12)$$

또한 x 성분은

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0 + \frac{1}{a_R^2 + 4a_L^2} \left( \cos \theta_0 (a_R u^2 \sin \alpha + 2a_L \cos \alpha u^2 - 2a_L u_0^2) \right. \\ &\quad \left. - \sin \theta_0 (a_R u_R^2 - \cos \alpha a_R u^2 + 2a_L \sin \alpha u_L^2) \right) \end{aligned} \quad (13)$$

위의 식(12)와 (13)에 의해 현재 상태에서의 각 방향 가속도, 속도, 위치로부터 시간 t 이후의 위치를 예측할 수 있다.

### 3. 칼만 필터 설계

#### 3.1 차량간 좌표계

충돌시간을 예측하기 위해서는 자차량(CA/ vehicle)뿐만 아니라 상대 차량의 각 방향위치와 속도, 가속도를 알아야 한다. 본 연구에서는 자차량(CA/ vehicle)의 위치( $d_x, d_y$ )와 자차량의 각 방향성분의 속도( $v_x, v_y$ ) 및 가속도( $a_x, a_y$ )를 측정하여 칼만 필터를 이용하여 구한다. 그리고 센서로부터 상대차량과의 상대거리( $d_r$ )와 상대속도( $v_r$ ) 그리고 방위각(azimuth angle  $\theta$ )을 측정하여 칼만 필터를 이용하여 상대차량의 위치( $z_1, z_2$ )와 속도( $\dot{z}_1, \dot{z}_2$ ) 가속도성분( $\ddot{z}_1, \ddot{z}_2$ )을 구한다.

Fig. 1은 각 차량의 좌표계와 센서의 측정신호를 나타낸다.

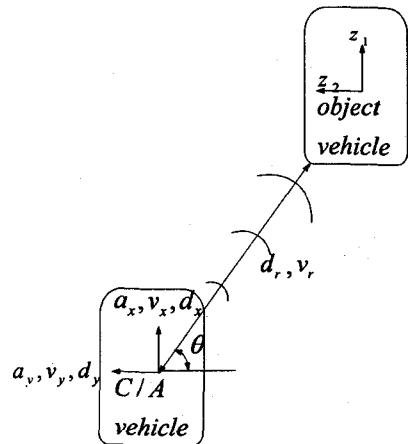


Fig. 1 Schematic of Coordinates and Sensor

### 3.2 3 자유도 차량 모델

진행방향(longitudinal)과 횡방향(lateral)과 요방향으로 구성된 3 자유도 자전거모델(bicycle model)은 Fig. 2 와 같다.

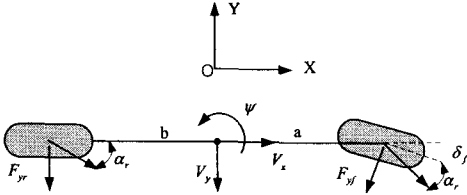


Fig. 2 3 DOF Vehicle Model

자전거 모델의 운동방정식(dynamic equation)은 아래와 같다.

$V_x$  는 진행방향속도,  $V_y$  횡방향속도,  $\psi$  는 요각 (yaw angle)이고, 진행방향힘(longitudinal force  $F_x$ ) 은 엔진에서 가해지는 힘이고, 횡방향 힘(lateral force  $F_y$ )은  $F_y = C_\alpha \cdot \alpha$  같이 근사시킨다.

$$\dot{V}_x = \frac{1}{m}(F_x - C_x V_x^2 + \delta_f F_{yf}) + V_y \dot{\psi} \quad (14)$$

$$\dot{V}_y = \frac{1}{m}(F_{yf} + F_{yr} - C_y V_y^2) - V_x \dot{\psi} \quad (15)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{1}{I_z}(a \cdot F_{yf} - b \cdot F_{yr}) \quad (16)$$

여기서  $C_x, C_y$  는 진행/횡방향 공기저항계수 (drag Coefficient)이고  $a, b$  는 무게중심점에서 전/후차축까지의 거리이다.

그리고 타이어 슬립각은 다음과 같이 근사한다.

$$\alpha_f = \delta_f \frac{V_y + a \cdot \psi}{V_x}, \quad \alpha_r = \frac{V_y + b \cdot \psi}{V_x} \quad (17)$$

### 3.3 칼만 필터의 설계

상대가속도( $a_r$ )를 구하는 칼만 필터의 상태변수는 다음과 같이 정의한다.

$$x = [d_r \quad v_r \quad a_r] \quad (18)$$

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (19)$$

$$\dot{x}_2 = x_3 \quad (20)$$

$$\dot{x}_3 = \omega \quad (21)$$

여기서 저크는 외란으로 간주한다. 상태방정식으로 나타내면

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu + G\omega \quad (22)$$

와 같이 나타내어지고,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

이다.

그리고 시스템 측정방정식은

$$y = Cx + Du + v \quad (24)$$

여기서

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

이다

여기서  $v$  는 측정잡음(measurement noise)을 의미한다. 이와 같이 정의된 시스템에 최적의 이득을 구하고 다음과 같은 추정방정식에 의해 상태변수들을 추정하게 된다.

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \quad (26)$$

$$= A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x})$$

$$\hat{y} = C\hat{x} \quad (27)$$

여기서  $L$  칼만 필터 게인이고,  $\hat{x}$  은 칼만 필터를 통해 추정한 값이다.

칼만 필터를 이용하여 얻은 값들은 상대거리와 상대속도 상대 가속도이다.

상대차량의 각 성분들을 구하기 위해서는 측정된 상대적인 방위각을 이용한다.

$$d_{rx} = d_r \sin \theta \quad (28)$$

$$d_{ry} = d_r \cos \theta \quad (29)$$

$$v_{rx} = v_r \sin \theta \quad (30)$$

$$v_{ry} = v_r \cos \theta \quad (31)$$

$$a_{rx} = a_r \sin \theta \quad (32)$$

$$a_{ry} = a_r \cos \theta \quad (33)$$

각 차량의 상대적인 값으로부터 상대차량의 성분을 구하기 위해 자차량의 성분에 상대(relative)성분을 더하여 상대차량의 위치, 속도, 가속도를 구한다.

Fig. 4 는 칼만 필터의 추정성능을 나타낸다.

측정된 신호에 백색잡음( White Noise)이 있는 경우와 칼만 필터를 이용해 구한 신호가 좋은 추정성능을 보임을 알 수 있다.

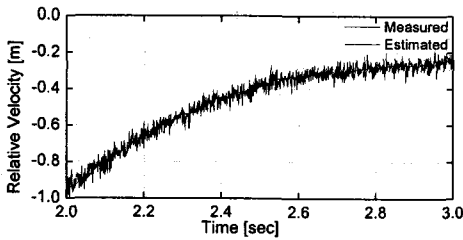


Fig. 3 Comparison of Actual and Estimated Signal

#### 4. 충돌 경고/회피알고리즘

차량궤적예측 알고리즘을 이용하여 자차량과 상대차량의 궤적을 0.05 초마다 예측한다. 이를 예측주기라 하고, 각 예측주기에 0.1 초에서 1 초까지 0.1 초 간격으로 예측시간을 순차적으로 변화시켜 예측한다. 예측된 궤적이 충돌하는 예측시간을 충돌예측시간(collision prediction time)이라 한다.

경보/회피시간(warning/avoidance time)과 충돌예측시간을 비교하여 운전자에게 경고(warning)를 할 것인지 회피운동(avoidance)을 할 것인지를 판단한다.

본 연구에서는 경고시간(warning time)을 1 초, 회피시간(avoidance time)을 0.5 초로 정의하였다.

충돌예측시간이 경고시간보다 크면 어떠한 신호도 발생하지 않고 경고시간보다 작고 회피시간보다 크면 운전자에게 충돌경보신호를 보내게 된다.

충돌예측시간이 경고시간보다 작으면 차량은 회피신호를 발생한다.

시뮬레이션상에서는 경고신호가 발생하면 1 이 회피신호가 발생하면 2 가 출력되고, 경고/회피신

호가 발생하지 않으면 0 이 출력된다.

table 1 은 계산된 충돌회피예측시간과 경고/회피시간과의 판단논리는 나타낸다.

Collision prediction time > warning time	No sign
warning time > Collision prediction time > avoidance time	Warning sign
Collision prediction time < avoidance time	Avoidance sign

table 1. Collision Warning/Avoidance Logic

Fig. 4 는 table 1 의 논리를 적용하여 충돌경보/회피신호를 발생하는 알고리즘을 나타낸 순서도이다. 각 차량의 궤적을 예측하고 충돌예측시간을 계산한다. 계산된 충돌예측시간으로 충돌경보회피판단논리에 따라 충돌경보/회피 신호가 발생하게 된다.

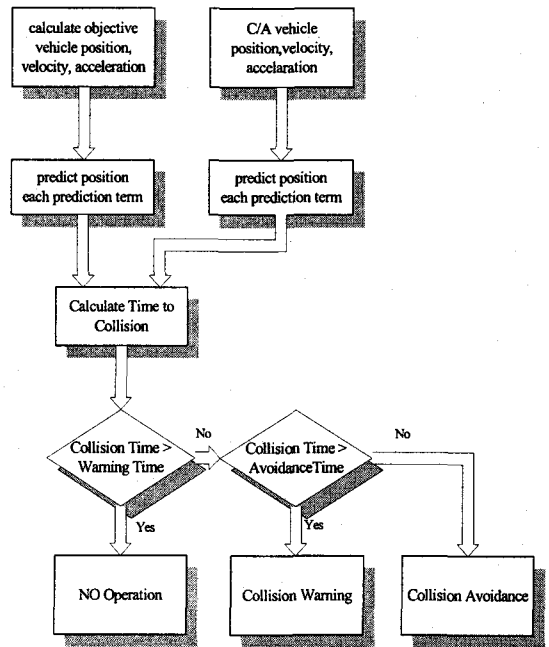


Fig. 4 Collision Warning/Avoidance Algorithms

#### 5. 시뮬레이션 결과

충돌경보회피에 관한 시뮬레이션은 두 대의 차량이 동일차선에서 주행하며 선행하는 상대차량이 감속하는 상황과 상대차량이 같은 속도로 옆차선에서 주행하며 횡방향으로 접근하는 두가지 상황

에 대하여 시뮬레이션 하였다

Fig 5 는 차량궤적예측 알고리즘을 이용하여 일정한 감속도로 감속하는 차량의 궤적을 예측한 것을 나타낸다.

0.5 초의 예측시간으로 궤적을 예측한 경우 실제 궤적과 유사한 궤적을 나타내는 것을 볼 수 있다. 실제궤적의 예측시간후의 궤적과 예측한 궤적이 유사함을 알 수 있다.

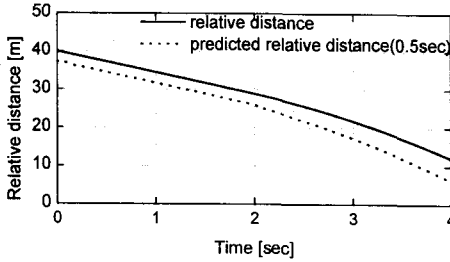


Fig. 5 Comparison of Relative Distance

Fig. 6 는 상대차량의 진행방향속도를 나타낸다.

두 대의 차량이 동일한 차선에서 주행하고있다. 자차량이 100 Km/h 로 정속주행하고 상대차량이 초기속도 80 Km/h 로 주행하는 상황에서 일정한 감속도(-2.0m/s<sup>2</sup>)로 감속하는 경우를 나타낸다. 시뮬레이션 시작 2 초후 차속이 감속되기 시작하여 55 Km/h 까지 감소한다.

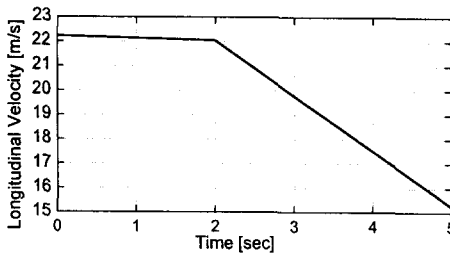


Fig. 6 Velocity of Object Vehicle

Fig. 7 에서는 상대차량과 자차량간의 상대거리를 나타내고있다. 상대차량이 감속하여 자차량과 상대차량의 상대거리가 점점 가까워져 충돌직전 상황까지 접근하는 것을 볼 수 있다.

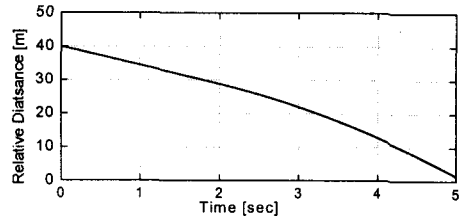


Fig. 7 Relative Distance

Fig. 8 은 충돌예측시간을 나타낸 그림이다. 예측 시간내에 충돌이 일어나지 않을 경우 충돌예측시간(Collision Prediction Time)은 2 초로 나타나고, 4 초부근에서 최초로 예측시간내에 충돌이 일어난다.

상대차량의 감속에 의해 차간 상대거리와 상대속도가 작아지면 충돌예측시간이 점점 줄어든다.

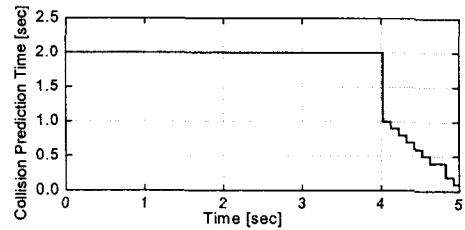


Fig. 8 Prediction Collision Time

Fig. 9 은 충돌예측시간이 경보시간보다 작아지는 순간 충돌경보신호가 발생하고 충돌예측시간이 회피시간보다 작아지면 회피운동신호가 발생하는 것을 나타낸다. 예측시간(Prediction Time) 이내에 충돌이 일어나지 않으면 충돌경보/회피 신호(collision warning/avoidance sign)는 0 으로 나타나고, 경보신호가 발생하면 충돌경보/회피 신호는 1 이 되고, 회피신호가 발생하면 충돌경보/회피 신호는 2 가 된다.

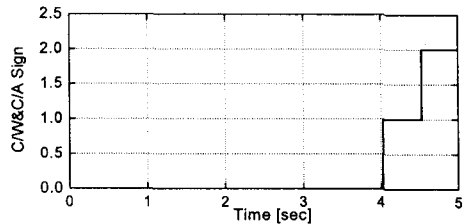


Fig. 9 Collision Warning/Avoidance Sign

Fig. 10 은 상대차량이 옆 차선에서 주행하는 상황을 시뮬레이션한 것이다. 각 차량의 속도는 100 Km/h로 동일하고, 상대차량이 조향하여 횡방향으로 접근하는 상황을 나타내고있다. 초기상대거리는 1.6m 이고 상대차량이 접근하여 자차량의 무게중심기준으로 1.2m 까지 접근한다.

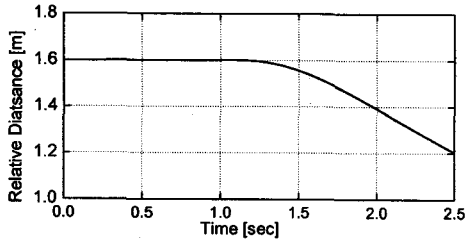


Fig. 10 Relative Distance

Fig. 11 은 시간에 따른 충돌예측시간을 보여준다. 상대차량이 횡방향으로 접근하기 시작하는 시점에서 횡방향가속도의 영향으로 충돌예측시간이 1 초가 되고, 상대차량의 조향에 의한 접근에 따라 충돌예측시간은 감소한다.

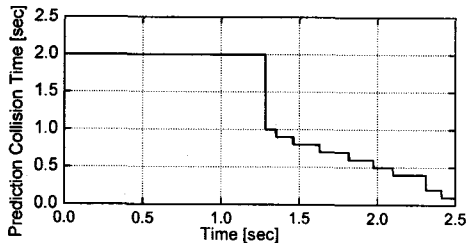


Fig. 11 Prediction Collision Time

Fig. 12 는 충돌 경고/회피논리에 따라 발생하는 신호를 보여준다. 충돌예측시간이 정해진 경고/회피시간보다 작아지면 경고/회피신호가 발생한다.

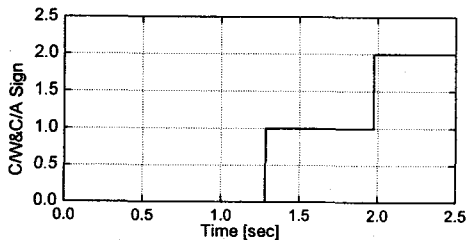


Fig. 12 Collision Warning/Avoidance Sign

## 6. 결론

본 연구에서는 차량의 위치와 속도 및 가속도를 이용하여 각 차량의 궤적을 예측하여 현재로부터 충돌이 일어날 수 있는 시간을 예측하고, 충돌예측시간을 충돌경보/회피 판단 논리를 거쳐 차량이 차량의 충돌경보/회피를 판단하는 알고리즘을 제안하였고, 시뮬레이션을 통하여 이를 평가하였다. 상대차량의 주행궤적예측기법을 이용한 충돌경보회피제어기법은 운전자의 편안함(Driver Acceptance)을 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

상대차량의 주행특성을 고려한 충돌회피제어에 관한 연구가 향후연구이며 다양한 경보/회피시간에 대한 실차 실험을 통한 연구가 필요하다.

## 후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-2-30400-007-3)지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

- (1) S. H. Kim, C. H. Song, K. S. Kim, S. Lee, M. Woo and K. Yi., "Hardware-in-the Loop Simulations of a CW/CA System for Automobiles", 5<sup>th</sup> World Congress on ITS, Paper NO. 4077, pp. 1-8, 1998
- (2) S. K. Oh, E. S. Kim, J. J. Lee, "Autonomous Intelligent Cruise Control using Scanning Laser Sensor", 5<sup>th</sup> World Congress on ITS, Paper NO. 4044, pp. 1-7, 1998
- (3) P. Seiler, B. Song, S. Lee, "Application of Nonlinear Control to a Collision Avoidance System", 5<sup>th</sup> World Congress on ITS, Paper NO. 1022, pp. 1-8, 1998
- (4) Lu P. Tsao, C. L. Chou, C.M. Chen, and C. T. Chen, "Aiming point guidance law for air-to-air missiles", International Journal of Systems Science, Volume 29, NO 2, pp. 95-102, 1998
- (5) Y. Seki, J. Ohya, M. Miyoshi, "Collision Avoidance System for Vehicles applying Model Predictive Control Theory", Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) pp. 453-458, 1999
- (6) D. Swaroop, S. M. Yoon, "The Design of a Controller for a Following Vehicle in an Emergency Lane Change", California PATH Working Paper UCB-ITS-PWP-99-3, pp. 1-16, 1999
- (7) H. Jula, E. B. Kosmatopoulos, P. A. Ioannou, "Collision Avoidance Analysis for Lane Changing and Merging", California PATH Working Paper UCB-ITS-PRR-99-13, 1999
- (8) 류제하, 김종엽, "자동주행 차량의 차선변경 충돌회피 알고리즘의 개발 및 HILS 시험", 한국자동차공학회 추계학술대회, pp. 627-632, 1998