

차량 궤적 예측기법을 이용한 차간 거리 제어

Vehicle - to - Vehicle Distance Control using a Vehicle Trajectory Prediction Method

조상민*, 이경수**, 허건수**
Sangmin Cho, Kyongsu Yi, Kunsoo Huh

ABSTRACT

This paper proposes a vehicle trajectory prediction method for application to vehicle-to-vehicle distance control. This method is based on 2-dimensional kinematics and a Kalman filter has been used to estimate acceleration of the object vehicle. The simulation results using the proposed control method show that the relative distance characteristics can be improved via the trajectory prediction method compared to the customary intelligent cruise control algorithm.

주요기술용어 : Trajectory prediction(궤적 예측), Kalman filter(칼만 필터), Bicycle model(자전거모델), Prediction algorithm(예측 알고리듬), Intelligent cruise control(지능형 순항 제어)

Nomenclature

d	: distance or position of the vehicle, m
u, v	: velocity of the vehicle, m/s
a	: acceleration of the vehicle, m/s^2
θ	: aspect angle, degree
α	: tire slip angle, degree
δ	: steering angle, degree
ψ	: yaw angle, degree

Subscripts

x, y	: longitudinal, lateral aspect
L, R	: longitudinal, lateral
f, r	: front, rear
r	: relative

1. 서 론

자동 주행의 종 방향 차량 제어의 측면에서 지능형 순항 제어(ICC) 시스템은 운전자의 조작없이 차량을 일정한 속도로 유지하거나 차량의 주행 방향에 있는 장애물이나 차량을 감지하여 일정한 거리를 유지하도록 쓰로틀이나 브레이크를 제어하는 시스템이다. 또한 자동 주행의 다른 분야로 주변 차량의 거동에 따른 충돌 경보 및 능동적 충돌 회피 기능에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 다양한 상황 하에서의 충돌 경보/회피에 관한 연구¹⁾가 진행되었고, 퍼지논리와 비례적분 제어기를 적용한 연구,²⁾ 타이어 슬립을 고려한 슬라이딩 모드 제어기를 적용한 충돌 회피 시스템에 관한 연구³⁾도 수행되었다.

궤적 예측 알고리듬은 지대공 혹은 공대공 유도 미사일의 조준점을 예측하는 분야에서 많은

* 회원, 한양대학교 대학원 자동차공학과

** 회원, 한양대학교 기계공학부

연구가 진행되었는데, 이는 목표물의 각 방향 가속도가 일정하다는 가정 하에서 미사일의 조준각을 결정한다.⁴⁾

본 논문에서는 기존 지능형 순항제어 알고리듬에 궤적 예측기법을 적용하여 상대차량과 자차량의 궤적을 예측하고 예측된 정보를 이용함으로써, 차량간 거리 제어 성능을 향상시켰다.

2. 차량 궤적 예측 알고리듬

2 차원 좌표계에서 차량의 궤적을 예측하기 위해 진행 방향 가속도(a_L)와 횡 방향 가속도(a_R)는 일정하다고 가정한다. 차량의 운동은 두개의 병진운동과 하나의 회전운동으로 표현할 수 있다. u 를 차량의 속도라 하면 u_x, u_y 는 각각 x, y 방향 속도가 되고, θ 를 차량의 방향각이라 하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$u(t) = u_0 + a_L t \quad (1)$$

$$u_x(t) = u(t) \cos \theta(t) \quad (2)$$

$$u_y(t) = u(t) \sin \theta(t) \quad (3)$$

$$\theta(t) = \frac{a_R}{U_0 + a_L t} \quad (4)$$

Fig. 1은 차량의 좌표계를 나타내고 있다.

식 (4)의 양변을 적분하면 방향각에 관한 식을 얻을 수 있다.

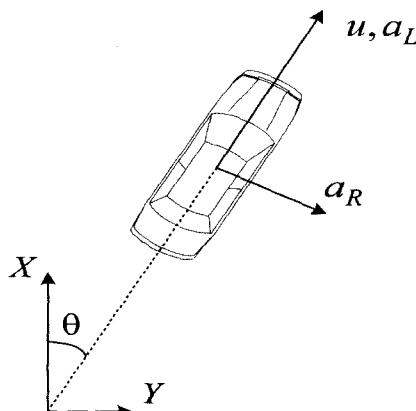


Fig. 1 Geometry of vehicle coordinates

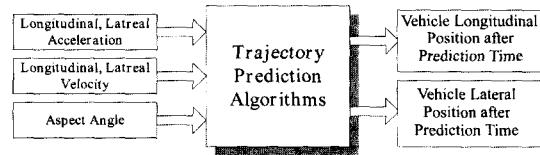


Fig. 2 Trajectory prediction algorithms

$$\theta(t) = \theta_0 + \alpha(t), \quad \alpha(t) = \frac{a_R}{a_L} \ln\left(\frac{u_0 + a_L t}{u_0}\right) \quad (5)$$

차량의 위치는 식 (2)와 식 (3)을 적분하여 얻을 수 있는데, 우선 좌표계 y 성분의 경우 식 (3)을 적분하면

$$y - y_0 = \int_0^t u \sin \theta dt = EQ1 + EQ2 \quad (6)$$

가 된다. 여기서,

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

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

최종적으로 차량의 위치 좌표는 다음과 같다.

$$y(t) = y_0 + \frac{1}{a_R^2 + 4a_L^2} (\sin \theta_0 (a_R u^2 \sin \alpha \\ + 2a_L \cos \alpha u^2 - 2a_L u_0^2) \\ + \cos \theta_0 (a_R u_R^2 - \cos \alpha a_R u^2 + 2a_L \sin \alpha u_L^2)) \quad (7)$$

$$x(t) = x_0 + \frac{1}{a_R^2 + 4a_L^2} (\cos \theta_0 (a_R u^2 \sin \alpha \\ + 2a_L \cos \alpha u^2 - 2a_L u_0^2) \\ - \sin \theta_0 (a_R u_R^2 - \cos \alpha a_R u^2 + 2a_L \sin \alpha u_L^2)) \quad (8)$$

위의 식 (7)과 (8)에 의해 현재 상태에서의 각 방향 가속도, 속도, 위치 성분으로부터 시간 t 초 이후의 위치를 예측할 수 있는데, 예측 시간은 0.3초의 간격으로 10개의 시간 구간을 나누어 각 시간 구간에서 매 순간 0.05초 후의 위치를 예측하여 최고 3초 후의 위치까지 예측하도록 하였다.

Fig. 2는 궤적 예측 알고리듬을 나타내고 있다.

3. 차량의 정보추정을 위한 칼만 필터 설계

3.1 차량간 좌표계

충돌시간을 예측하기 위해서는 자차량뿐만 아

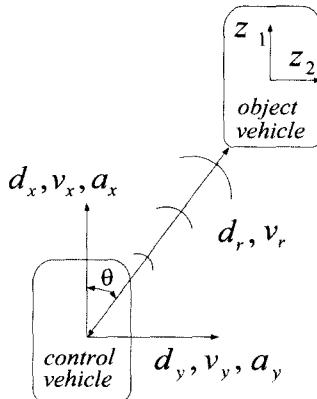


Fig. 3 Schematic of coordinates and sensor

니라 상대 차량의 각 방향위치와 속도, 가속도를 알아야 하는데, 본 연구에서는 자차량의 위치(d_x, d_y)와 각 방향성분의 속도(v_x, v_y)를 측정하고 칼만 필터를 이용하여 각 방향의 가속도(a_x, a_y)를 구한다. 그리고 센서로부터 상대차량과의 상대거리(d_r), 상대속도(v_r) 그리고 방위각(θ)을 측정하고 칼만 필터를 이용해 상대차량의 위치(z_1, z_2)와 속도(\dot{z}_1, \dot{z}_2) 가속도(\ddot{z}_1, \ddot{z}_2) 성분을 구한다.

Fig. 3은 각 차량의 좌표계와 센서의 측정 신호를 나타낸다. 자차량의 진행방향, 횡방향 가속도(a_x, a_y), 속도(v_x, v_y), 위치(d_x, d_y)와 상대차량의 좌표계, 센서로부터 측정되는 상대거리(d_r), 상대속도(v_r)를 나타낸다.

3.2 3자유도 상대 차량 모델

진행(Longitudinal) 방향, 횡(Lateral) 방향과 요(Yaw) 방향으로 구성된 3 - 자유도 차전거 모델(Bicycle model)은 Fig. 4와 같다.

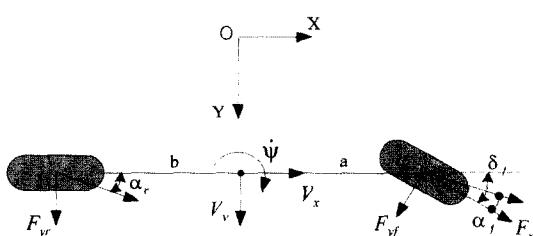


Fig. 4 3-DOF vehicle model

위의 상대 차량 자전거 모델의 운동 방정식(Dynamic equation)은 아래와 같다.

$$\dot{V}_x = \frac{1}{m} (F_x - C_x V_x^2 + \delta_f F_y) + V_y \psi \quad (9)$$

$$\dot{V}_y = \frac{1}{m} (F_{yf} + F_{yr} - C_y V_y^2) - V_x \psi \quad (10)$$

$$\dot{\psi} = \frac{1}{I_z} (a \cdot F_y - b \cdot F_x) \quad (11)$$

V_x 는 진행방향속도, V_y 는 횡방향속도, ψ 는 요각(Yaw angle)이다. 진행 방향힘(Longitudinal force F_x)은 엔진에서 가해지는 힘이고, 횡방향힘(Lateral force F_y)은 $F_y = C_a \cdot \alpha$ 와 같이 근사화 한다.(C_a 는 cornering stiffness)

C_x, C_y 는 진행/횡 방향 공기저항 계수(Drag coefficient)이고 a, b 는 무게 중심점에서 전/후 차축까지의 거리이다.

그리고 타이어 슬립 각(tire slip angle)은 다음과 같이 근사화 한다.

$$\alpha_f = \delta_f - \frac{V_y + a \cdot \psi}{V_x}, \quad \alpha_r = -\frac{V_y - b \cdot \psi}{V_x} \quad (12)$$

3.3 차량의 위치추정을 위한 칼만필터 설계

차량 가속도를 구하는 칼만 필터의 상태변수는 다음과 같이 정의한다.

$$x = [d \ v \ a]^T \quad (13)$$

상태방정식(State equation)은

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu + Gw \quad (14)$$

와 같이 나타내고 A, B, G 행렬은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서 w 는 저크(Jerk)로 외란을 의미한다.

w 는 0-평균 값(zero mean value)과 0.00001의 편차(variance)값을 가지는데, 여기서는 일반적인 저속주행 상황에서의 저크를 시뮬레이션을 통해 계산하고 근사한 백색 잡음으로 가정하였다.

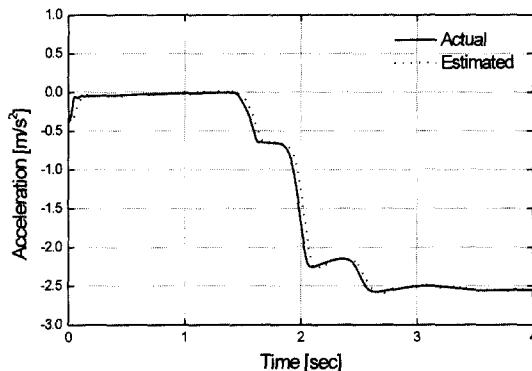


Fig. 5 Comparison of actual and estimated accelerations

시스템 측정 방정식(Measurement equation)은

$$y = Cx + Du + n \quad (16)$$

와 같이 나타내고 C, D 행렬은 다음과 같다.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서 n 은 측정 잡음(Measurement noise)으로 0-평균 값(zero mean value)과 0.000001의 편차(variance) 값을 가지는데, 가속도 센서 특성을 고려하여 계산하고 근사한 백색 잡음으로 가정하였다.

이와 같이 정의된 시스템에서 최적의 이득을 구하고 다음과 같은 추정 방정식을 통해 상태 변수들을 추정하게 된다.

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = Ax + Bu + L(y - \hat{y}) \quad (18)$$

$$\hat{y} = C\hat{x} \quad (19)$$

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

Fig. 5는 실험에 사용한 값과 동일한 추정 이득으로 가속도를 추정한 결과로, 실제 가속도에서 약간 차이지만 적절한 가속도 추정결과를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

4. ICC차량에의 적용

Fig. 6은 지능형 순항 제어 알고리듬의 구조를 보여준다.

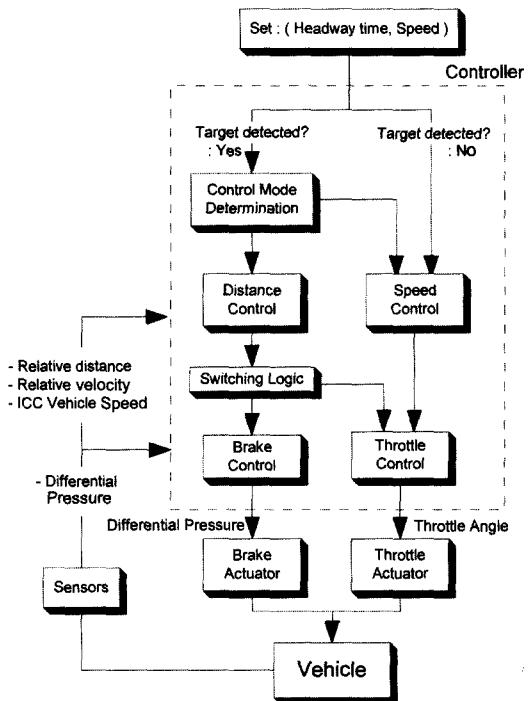


Fig. 6 Block diagram of ICC control algorithm

지능형 순항 제어의 헤드웨이 거리(Desired Clearance)는 다음과 같이 정의한다.⁸⁾

$$d_h = t_h v_p \quad (20)$$

여기서 t_h 는 헤드웨이 시간으로 1.2sec로 정의하고, v_p 는 선행(상대) 차량의 속도이다.

지능형 순항 제어는 운전자가 설정한 속도와 헤드웨이 시간을 사용하여 적절히 속도 또는 거리를 제어한다. 선행차량(Target)이 없는 경우는 속도제어를 하며, 이때 브레이크는 사용하지 않고 쓰로틀 만으로 제어한다. 선행차량이 있는 경우는 속도제어 또는 거리제어를 하며 선행차량과의 상대거리를 헤드웨이 거리만큼 유지하도록 한다.

따라서 옆 차선에서 주행하는 상대차량이 자차량의 주행차선으로 차선변경을 할 경우, 갑자기 줄어든 상대거리를 보상하기 위해 급 감속을 하게 된다. 그러나 옆 차선에서 주행하는 상대차량의 정보를 알고 그 위치를 예측한다고 가정하

면, 상대차량의 예측된 궤적이 자차량의 주행차선으로 차선변경한다고 미리 판단하여 예측된 차선변경의 상대거리가 헤드웨이 거리보다 작으면 거리제어를 하게되고, 헤드웨이 거리보다 크면 설정된 속도로 주행하게 된다.

본 논문에서는 단순화된 차량모델을 이용하여 차간 거리제어하는 지능형 순항제어 알고리듬을 사용하였다.⁸⁾

5. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 상황은 상대차량이 옆 차선에서 자차량과 동일한 100km/h의 속도로 주행하던 중 0.1G의 감속도로 감속하며 자차량의 주행차선으로 들어온 뒤, 다시 0.05G의 가속도로 가속주행하는 상황으로 초기의 상대거리는 19m이고 상대차량이 감속하기 시작하는 1초까지는 초기 상대거리가 유지된다.

Fig. 7은 시간에 따른 상대차량의 횡 방향 궤적을 나타낸 것이다.

Fig. 8은 상대차량의 속도변화에 따른 일반 지능형 순항 제어 차량(w/o prediction)의 속도변화와 궤적 예측기법을 이용한 지능형 순항제어 차량(with prediction)의 속도변화를 나타낸 것이다. 일반 지능형 순항제어 차량은 상대차량이 헤드웨이 센서에 감지되는 순간부터 거리제어를 하며 감속하는 반면, 궤적 예측기법을 이용한 지능형 순항제어 차량은 예측한 궤적을 통해 거리제어함으로써 상대차량의 거동과 상대거리에 대한 감속이 일반 지능형 순항제어 차량보다 약 2

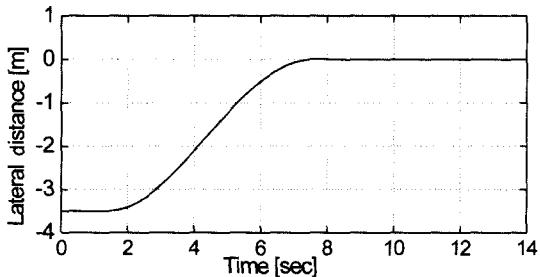


Fig. 7 Side vehicle position

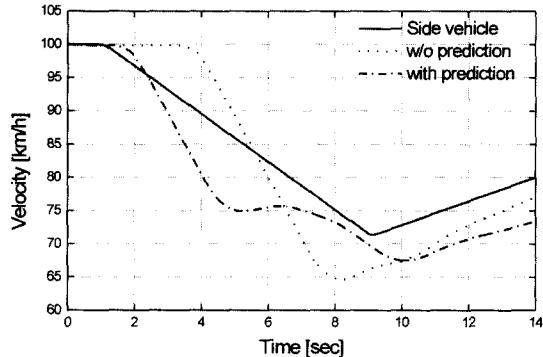


Fig. 8 Comparison of vehicles' velocity

초 정도 미리 제어되고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 일반 지능형 순항제어 차량(w/o prediction)의 거동을 나타낸 것으로 상대차량이 자차량의 주행차선으로 진입하는 시간 이전엔 거리제어가 이루어지지 않다가, 진입하기 시작한 3.5초 부근부터 거리제어가 시작된다. 따라서 자차량이 급감속하여 상대차량과의 상대거리가 약

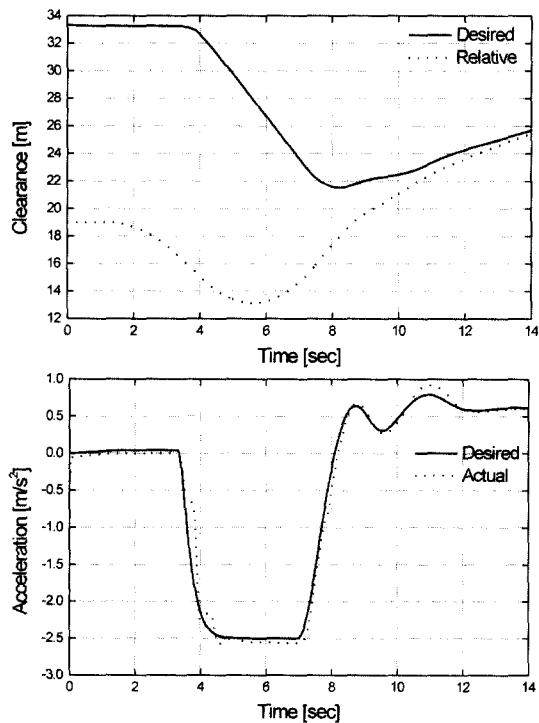


Fig. 9 Customary ICC vehicle

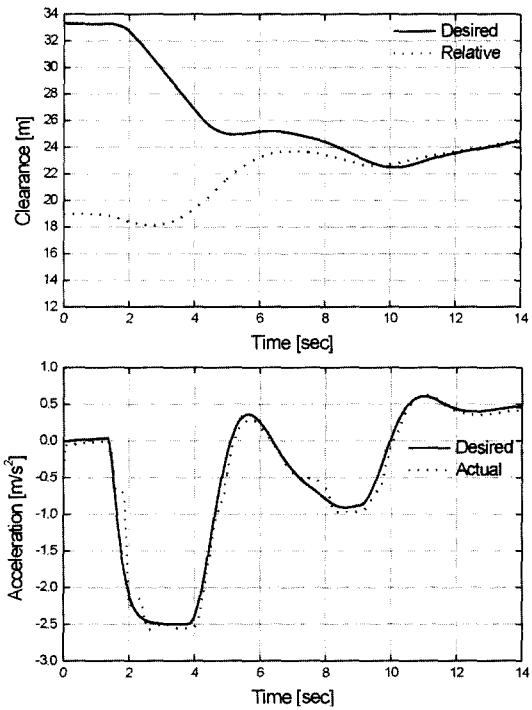


Fig. 10 ICC vehicle using trajectory prediction method

13m까지 급격히 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 궤적 예측기법을 이용한 지능형 순항제어 차량의 거동으로 상대차량의 차선변경이 시작된 후인 1.5초 부근부터 자차량이 감속하는 것을 볼 수 있다. 상대차량과의 상대거리가 초기상대거리 19m에서 약 18m까지 서서히 줄어들어 일반 지능형 순항제어 차량보다 약 5m 정도 상대거리를 더 확보하는 것을 확인할 수 있다.

두 방식의 비교 결과, 상대거리 관점에서 일반 지능형 순항제어와 비교해 상대거리를 보다 길게 확보함으로써 보다 안전성(안전거리)이 증가한다 볼 수 있고, 가속도 관점에서는 약 2초 정도 미리 제어함으로써 감속하는 시간이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11과 Fig. 12는 일반 지능형 순항제어와 궤적 예측기법을 이용한 지능형 순항제어의 브레이크 차압과 스로틀 앵글의 변화를 비교한 그림으로 브레이크 차압의 양과 스로틀 앵글의 변화량이 현저히 줄어듦을 확인할 수 있다.

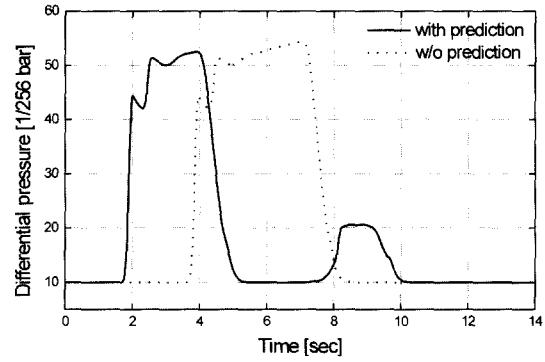


Fig. 11 Comparison of vehicles' differential pressure

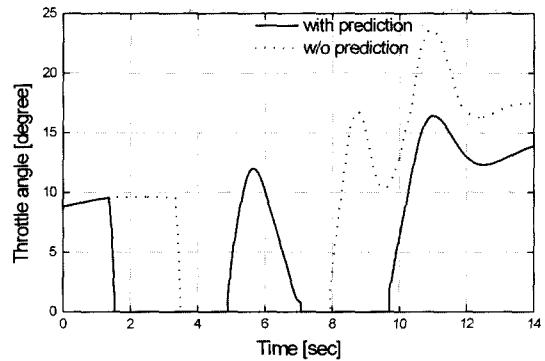


Fig. 12 Comparison of vehicles' throttle angle

6. 결 론

본 연구에서는 차량의 위치, 속도 및 가속도를 이용해 각 차량의 궤적을 예측한 뒤, 이를 지능형 순항제어 차량에 적용하여 일반 지능형 순항제어 차량과 비교하였다.

궤적 예측기법을 이용한 순항제어는 기존의 지능형 순항제어와는 달리 예측된 정보를 이용한 제어기로 구성하여 상대차량과 자차량의 주행 궤적을 예측하고, 예측한 궤적을 통해 자차량과의 상대거리(Relative Clearance)와 헤드웨이 거리(Desired Clearance)를 비교하여 거리제어함으로써 상대거리를 보다 길게 확보할 수 있었고, 그로 인해 스로틀과 브레이크의 사용시간이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 상대차량과 자차량의 주행 궤적 예측 기법을 이용한 지능형 순항제어 차량은 선행차

량과의 상대거리 관점에서 보다 안전한 성능을 보이며 기존의 순항제어와 비교하여 감/가속 시간이 줄어듦으로써 연비를 향상시킬 수 있을 것이라 사료된다.

후기

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

참고문헌

- 1) S. H. Kim, C. H. Song, K. S. Kim, S. Lee, M. Woo, K. Yi, "Hardware-in-the Loop Simulations of a CW/CA System for Automobiles," 5th World Congress on ITS, Paper No.4077, pp.1-8, 1999.
- 2) S. K. Oh, E. S. Kim, J. J. Lee, "Autonomous Intelligent Cruise Control using Scanning Laser Sensor," 5th 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," 5th World Congress on ITS, Paper No.1022, pp.1-8, 1998.
- 4) Lu P. Tsao, C. L. Chou, C. M. Chen, C. T. Chen, "Aiming Point Guidance Law for Air-to-Air Missiles," International Journal of Systems Science, Vol.29, No.2, pp.95-102, 1998.
- 5) Y. Seki, J. Ohya, M. Miyoshi, "Collision Avoidance System for Vehicles Applying Model Predictive Control Theory," IEEE International Conference, Intelligent Transportation Systems, 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) K. Yi., S. Lee, J. Lee, "Modeling and Control of an Electronic Vacuum Booster for Vehicle-to-Vehicle Distance Control," 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Ann Arbor, USA, Paper No.29, 2000.
- 9) 류제하, 김종엽, "자동주행 차량의 차선변경 충돌회피 알고리듬의 개발 및 HILS 시험," 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, pp.627-632, 1999.
- 10) 이경수, 정태영, 우민수, 이성철, 오태일, 김성하, "차량 충돌 경보/회피 알고리듬," 한국자동차공학회 ITS부문 학술 강연 초록집, pp. 30-38, 1997.