

지능형 자율주행 제어 알고리즘 개발 및 시험차량 성능평가

김원균[†] · 이경수^{*}

Development of an Intelligent Autonomous Control Algorithm and Test Vehicle Performance Verification

Wongun Kim[†], Kyongsu Yi^{*}

Key Words : Autonomous Control(자율주행 차량제어), Sliding Control(슬라이딩 제어), Preview Control(예견 제어), Electric Vehicle(전기자동차)

Abstract

This paper presents development of a vehicle lateral and longitudinal control for autonomous driving control and test results obtained using an electric vehicle. Sliding control theory has been used to develop a vehicle speed and distance control algorithm. The longitudinal control algorithm that maintains safety and comfort of the vehicle consists of a cruise and STOP&GO control depending on traffic conditions. Desired steering angle is determined through the lateral position error and the yaw angle error based on preview optimal control. Motor control inputs have been directly derived from the sliding control law. The performance of the autonomous driving control which is integrated with a lateral and longitudinal control is investigated by computer simulations and driving test using an electric vehicle. Electric vehicle system consists of DC driving motor, an electric power steering system, main controller (Autobox)

기호설명

C : Clearance (Relative distance) [m]
 τ : Time-gap [sec]
 T_p : Preview time [sec]
 V_p : Preceding vehicle speed [m/s, km/h]
 V_s : Subject vehicle speed [m/s, km/h]
 y_r : Lateral position error [m]
 ε : Yaw angle [rad]

1. 서론

현재까지 자동차 기술은 운송수단인 관점에서 자동차의 기능 위주로 자동차의 성능을 향상

시키는 연구가 주로 진행되어 왔으나, 2000 년 이후에는 자동차가 운송수단뿐 아니라 휴식 및 업무 수행 공간으로 발전하고 있으며, 편의성과 안전성을 획기적으로 향상시키는 지능형 차량 기술이 자동차 선진국에서 활발히 연구 개발되고 있다. 그 중에서 차량의 지능화 및 무인화는 차량의 전자화 기술, 기계-전자 시스템 제어기술, 정보통신 기술, 차량 운전자 인터페이스 기술을 바탕으로 실현가능하고, 지능형 자동차 기술은 향후 자동차 산업의 경쟁력을 결정하는 핵심 요소이다.

지능형 자율주행 제어 알고리즘은 차량 종방향 제어와 횡방향 제어를 동시에 실현하므로 차량을 원하는 위치까지 이동할 수 있게 하는 기능을 가진다. 하지만 현재 지능형 자율주행 제어는 단순한 지정된 위치 이동뿐만 아니라 탑승자의 안전을 중요하게 고려해야 하기 때문에 첨단 안전 장비들이 갖추어 져야 하며, 주행 중 주행 상황을

[†] 김원균, 서울대학교 정밀기계공동연구소
E-mail : virus3764@hanyang.ac.kr
TEL : (02)888-7194 FAX : (02)882-0561

^{*} 서울대학교 기계항공공학부

판단하고 주변 상황에서 운전자를 보호 할 수 있는 기능을 갖춰야 한다.

지구위치확인 시스템(Global positioning system, GPS) 및 지리정보 시스템(Geographical information system, GIS) 등의 발달로 대부분의 차량은 위치 정보를 확인하면서 주행하게 되었다. 고성능 GPS 가 개발되면서 자율주행의 인프라는 빠르게 확장될 것이다. 자율주행을 통해 산업현장의 부품 이송과 편의 시설 등의 교통 자율화 등 편의성, 안전성을 향상 시킬 수 있는 이점이 발생할 것이다.

지능형 자율주행 차량은 다양한 차량 안전기술과 고정밀도의 제어 기술이 접목되어 가능한 것이다. 본 논문에서는 지능형 자율주행 차량 개발을 위한 순항 제어 기반의 종방향 제어기 설계와 최적 예견 제어 기반의 횡방향 제어기를 설계할 것이다. 또한 이를 통합한 자율주행 제어기의 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하고, 실제 시스템에 적용하기 위한 시험차량을 개발하여 제어기를 평가할 것이다.

2. 지능형 자율주행 제어 알고리즘 개발

2.1 지능형 자율주행 제어 알고리즘 개념

지능형 자율주행 제어에는 GPS 와 GIS 를 기반으로 한 경로 추정 제어기를 포함하고, 자 차량 이외의 차량 관계를 파악하여 승차감과 안전을 향상 할 수 있는 적응 순항 제어¹⁾⁻⁴⁾가 포함되어야 한다. GPS 의 신호를 받을 수 있다고 가정하고 지정된 도로의 정보를 추정할 수 있도록 구성하였으며, 차간 거리와 상대 속도를 통해 종 방향 제어가 가능하도록 구성하였다.

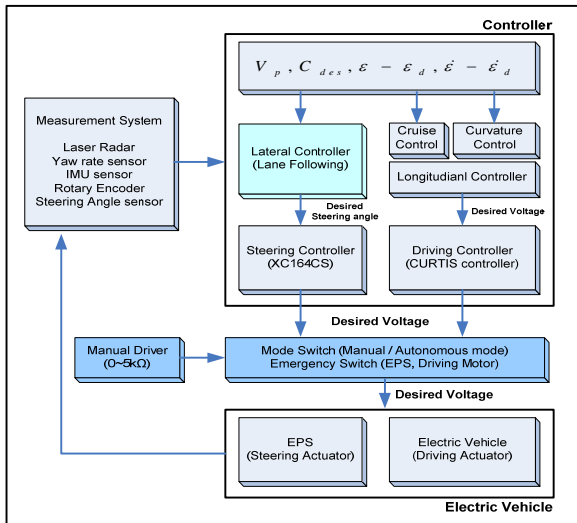


Fig.1 Autonomous control algorithm

2.2 정지/순항 제어 알고리즘

정지/순항 제어 알고리즘의 목표 차간거리는 선행차량을 추종하면서 유지해야 할 목표 값을 의미한다. 식(1)과 같이 정의한다.

$$C_{des} = C_0 + \tau V_p \quad (1)$$

정지/순항 제어 알고리즘은 슬라이딩 컨트롤 이론을 적용하였으며, 슬라이딩 평면은 다음과 같이 정의한다.^{5),6)}

$$S = \frac{1}{2}(C_{des} - C)^2 + \frac{1}{2}(V_p - V_s)^2 \quad (2)$$

정의된 슬라이딩 평면 S 는 식(3)에서 양의 K 값에 대하여 시간이 지나면 0으로 수렴한다.

$$\dot{S} = -K \cdot S \quad (3)$$

차량의 모델은 식(4)와 같이 입력 전압, u 에 대한 출력속도 V 의 비인 1 차 식으로 가정하였다.

$$V_s(s) = \frac{K_v}{TS + 1} \cdot u \quad (4)$$

식(4)를 이용하여 S 의 미분치를 구하면 식(5)와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{S} &= (C_{des} - C)(\dot{C}_{des} - \dot{C}) + (V_p - V_s)(\dot{V}_p - \dot{V}_s) \\ &= (C_{des} - C)(\tau V_p - V_p + V) \\ &\quad + (V_p - V_s)(\dot{V}_p + \frac{1}{T}V_s - \frac{K_v}{T}u) \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)를 u 에 대하여 정리하면 식(6)으로 입력 값을 결정 할 수 있다.

$$\begin{aligned} u &= \frac{T}{K_v(V_p - V_s)}(C_{des} - C)(\tau \dot{V}_p - V_p + V) \\ &\quad + \frac{T}{K_v}(\dot{V}_p + \frac{1}{T}V_s) + K \cdot \text{sat}\left(\frac{S}{\phi}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

u 값은 컨트롤 입력으로 하기 위해 제한 조건을 설정하여 모터 컨트롤러에 입력한다.

2.3 경로 추종 제어 알고리즘

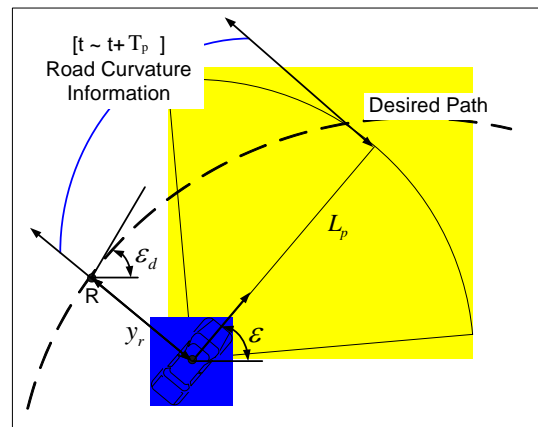


Fig.2 Autonomous Control Algorithm

Figure 2 에 표현된 y_r (Lateral position error)와 $\varepsilon - \varepsilon_d$ (Yaw angle error)를 상태변수로 정의한다.

$$\begin{aligned} \dot{y}_r &= v_y + v_x \cdot (\varepsilon - \varepsilon_d) \\ \Delta \varepsilon_d &\approx \frac{v_x \cdot \Delta t}{\rho}, \quad \dot{\varepsilon}_d = \frac{v_x}{\rho} \end{aligned} \quad (7)$$

상태변수의 미분항은 식(7)과 같이 근사화 시킬 수 있다. ⁷⁾ 최적 예견 제어 이론을 적용하여 $t \sim t + T_p$ 까지의 도로 정보를 통하여 제어 입력을 결정하였다. 제어 대상은 자전거 모델(Bicycle model)로 구성하였다. 이를 상태 변수에 대해 정리하면 식(8)을 얻을 수 있다. ⁷⁾

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot \delta_f + F_d \cdot w_d \quad (8)$$

$$x = [y_r \quad \dot{y}_r \quad \varepsilon - \varepsilon_d \quad \dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_d]^T$$

$$J = \lim_{t_f \rightarrow \infty} \frac{1}{t_f} E \left[\int_0^{t_f} \frac{1}{2} (y^T \cdot Q_y \cdot y + u^T \cdot R \cdot u) dt \right] \quad (9)$$

최적 예견 제어에서 성능 지수(Performance index)은 식(9)와 같이 표현된다. 제어 입력은 식(10)과 같이 피드백 제어와 피드 포워드 제어 입력으로 구성된다. ^{8),9)}

$$\delta_f(t) = -G \cdot x(t) + M(t)$$

$$\left(\begin{aligned} G &= R^{-1} \cdot B^T \cdot P_{ss} \\ M(t) &= -R^{-1} \cdot B^T \cdot \int_0^{T_p} F_1(\xi) \cdot w(t + \xi) \cdot d\xi \\ F_1(t) &= e^{A_c \cdot t} \cdot P_{ss} \cdot F, \quad A_c = A - B \cdot R^{-1} \cdot B^T \cdot P_{ss} \end{aligned} \right) \quad (10)$$

3. 시험 차량 구성 및 모델링

3.1 시험 차량 구성



Fig.3 Configuration of the Test Vehicle

자율주행 알고리즘을 평가하기 위해 Figure 3 과

같은 실험 차량을 구성하였다. 레이저 레이더 (Laser Radar), 관성 측정 장치(Inertia measurement unit, IMU), 각속도(Yaw Rate) 센서와 구동 및 조향 모듈로 이루어져있다.

Figure 4 는 시험 차량의 조향 및 구동 제어 블록 다이어그램을 나타내고 있다. 조향 제어는 각속도 센서와 조향각 센서를 통해, 구동 제어는 레이저 레이더와 IMU 센서를 통해 측정하여 중앙 컨트롤러에서 제어입력을 결정하게 된다.

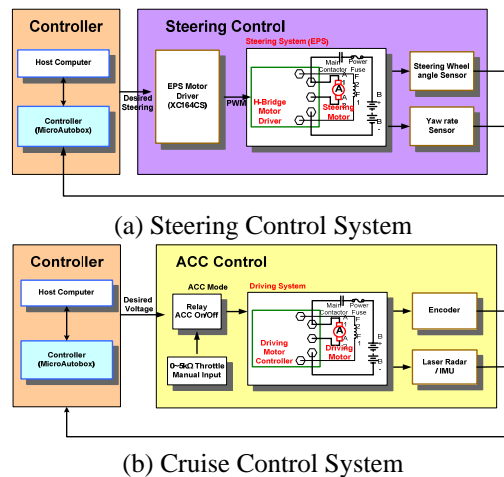


Fig.4 Steering and Cruise Control System

3.2 시험 차량 모델링

시험차량의 구동 모터 컨트롤러는 각각의 전압 입력에 대한 일정 속도를 제어할 수 있도록 설계 되어 있다. 따라서 전압의 상승과 하강에 따라 속도를 조절하기 위해 가속과 감속을 하게 된다. 이를 1 차 전달함수로 표현하여 종방향 차량 모델링을 하였다. Figure 5 는 전압 입력에 대한 속도 프로파일을 나타내고 이를 1 차 전달함수로 표현한 것을 나타내고 있다. 전달함수는 식(4)에 표현하였다.

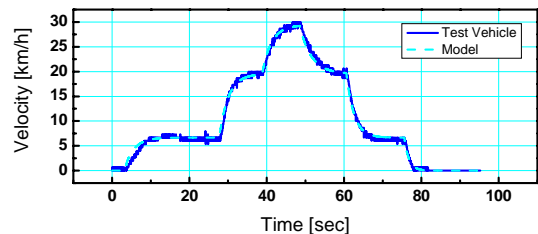


Fig.5 Validation of the Longitudinal Model

경로 추정 알고리즘의 차량 모델은 자전거 모델(Bicycle model)로 정의하였다. 시험 차량의 횡방향 모델은 입력 조향 값에 대한 각속도(Yaw rate)를 비교하여 구성하였다. 시험 차량에서 조향 입력을 가하여 측정한 각속도 측정 값과 자전거 모델의 각속도 값이 일치하도록 한 것이다.

Figure 6 은 시험 차량과 Bicycle model 의 Yaw rate 을 비교한 것이다.

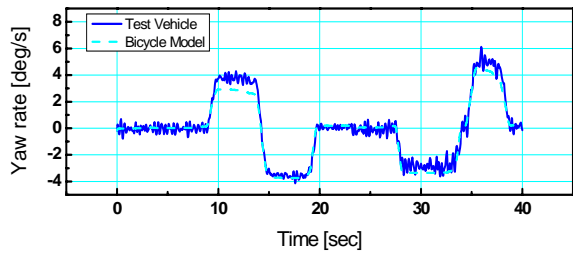


Fig.6 Validation of the Lateral Model

4. 제어 알고리즘 성능 평가

4.1 컴퓨터 시뮬레이션 결과

4.1.1 주행 도로 정보

시험 주행 도로는 Figure 7 과 같이 이중차선 변경(Double lane change, DLC) 도로이다. 총 100M 길이며, 횡방향 차선 거리는 2.5M 로 하였다.

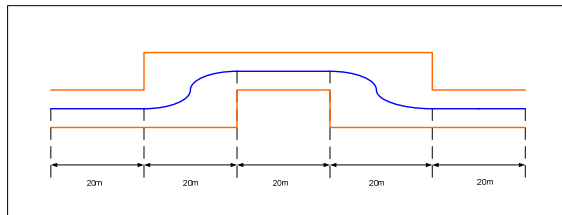
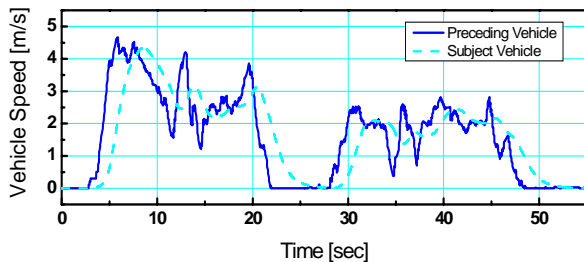


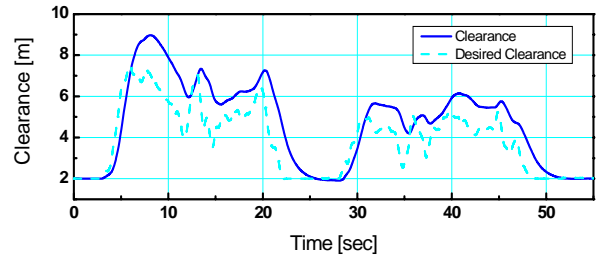
Fig.7 Information of the test road

4.1.2 정지/서행 순항 및 경로추정 통합 알고리즘 시뮬레이션 결과

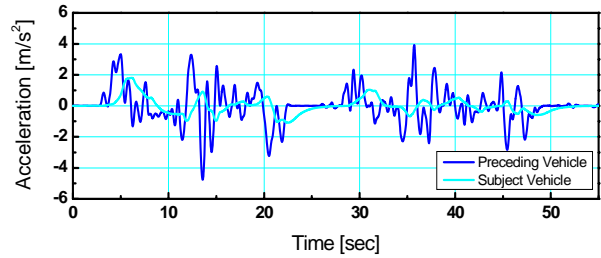
DLC 도로에 선행차량의 속도 및 상대 거리 정보를 입력하여 시뮬레이션을 구성하였다. Figure 8 의 (a)~(c)는 종방향 제어 관련된 인자들을 표시한 것이다. 타임갭(τ)을 설정하여 선행차량의 속도에 반응하도록 하였다. 선행차량의 속도 및 차간거리 프로파일에 잘 추종하는 것을 확인 할 수 있다. (f)에서 횡방향 거리 오차가 발생하는데 속도가 변하는 상황에서 경로 추정 알고리즘의 변화가 필요한 것을 나타내고 있다.



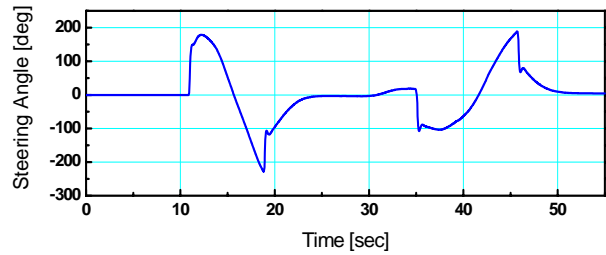
(a) Test Vehicle Velocity



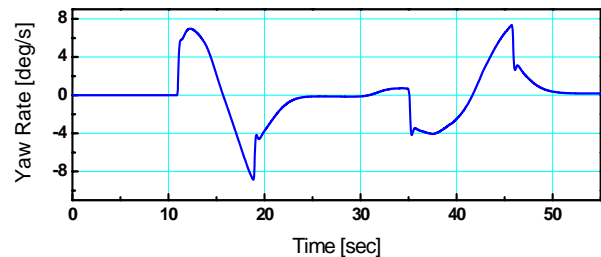
(b) Clearance



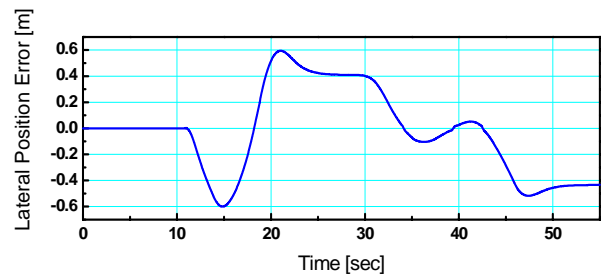
(c) Acceleration



(d) Steering Angle



(e) Yaw rate



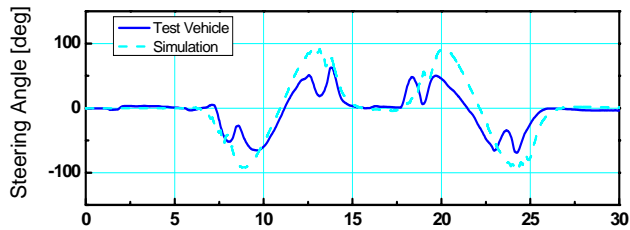
(f) Lateral Position Error

Fig.8 Integrated Lateral and Cruise Controller Simulation Result for Double Lane Change

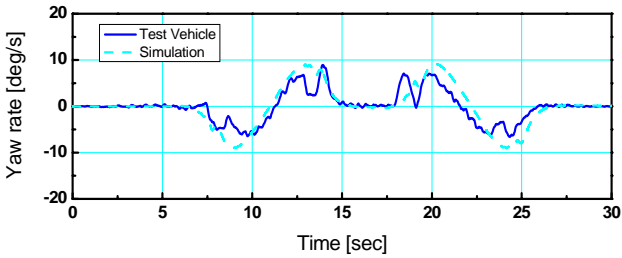
4.2 시험 차량 실험 결과

4.2.1 등속에서의 실험 결과

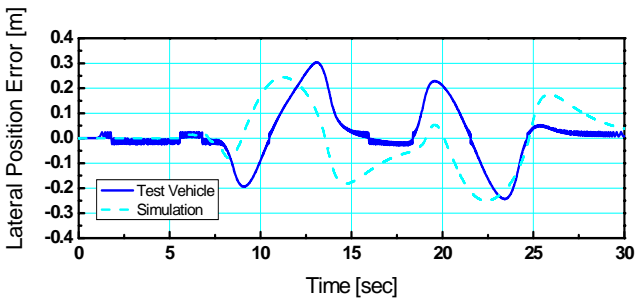
실제 DLC 주행 도로에서 선행차량이 존재하지 않는 상황에서 등속으로 주행하는 차량에서 경로 추정 제어기 성능 평가를 하였다. 차량의 속도는 20[Km/h]로 일정하다. Figure 9의 (a), (b)에서 시뮬레이션 결과와 시험 차량의 결과가 정확히 일치 하지 않는 것을 확인 할 수 있다. 자전거 모델(Bicycle model)이 정확히 차량 거동을 표현하지 못하고, 조향 입력에 따른 조향 보조 장치(Electric Power Steering, EPS)의 하위 제어기 특성을 표현한 모델이 없었기 때문이다. 또한 각속도(Yaw rate)센서의 위치 결정의 불확실성이 원인일 것이다. (c)에서 오차의 범위는 시뮬레이션과 크게 벗어나지 않는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Steering Angle



(b) Yaw rate

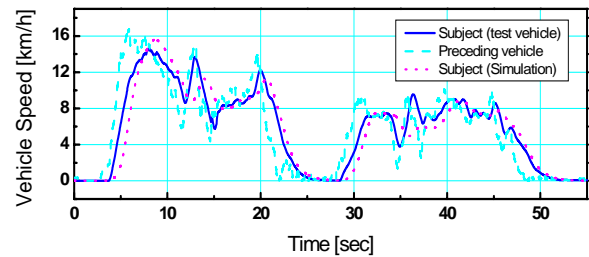


(c) Lateral Position Error

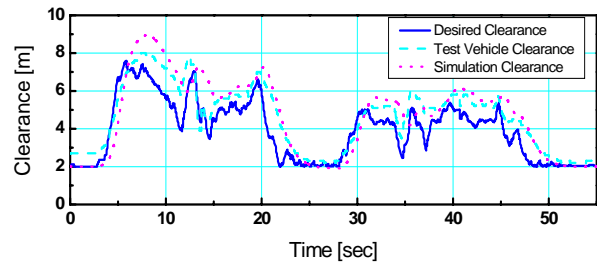
Fig.9 Integrated Lateral and Cruise Controller Simulation Result for Double Lane Change

4.2.2 선행 차량이 존재하는 상황의 실험 결과

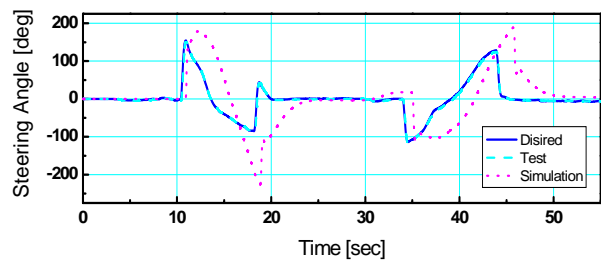
실제 DLC 도로에서 선행차량이 존재하는 주행 상황이다. 선행 차량의 주행 속도 및 차간 거리에 따라 시험 차량이 제어되는 것을 확인할 수 있다. Figure 10의 (e)에서 시뮬레이션 결과와 비교하여 횡방향 위치 오차가 상대적으로 큰 것으로 보아 속도의 변화에 따른 경로 추정 제어 알고리즘의 조절이 필요한 것을 알 수 있다. 또한 등속 실험 결과의 문제점인 차량 모델 및 EPS 모델의 부정확함에 의한 결과라 할 수 있을 것이다.



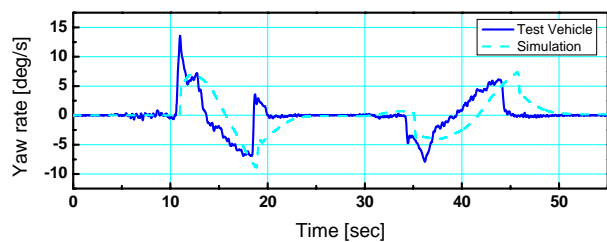
(a) Test Vehicle Velocity



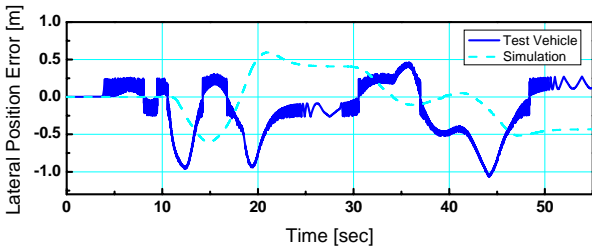
(b) Clearance



(c) Steering Angle



(d) Yaw rate



(e) Lateral Position Error

Fig.10 Integrated Controller Simulation and Test Vehicle Result for Preceding Vehicle at DLC

5. 결 론

본 논문에서는 지능형 자율주행 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘을 시험차량에 적용하여 제어 성능을 평가하였다. 시험 차량의 응답 특성을 고려하여 차량의 종방향 모델을 정의하였고, 저속 주행 상황의 응답특성을 고려하여 횡방향 자전거(Bicycle) 모델을 정의하였다. 종방향 순항제어 알고리즘은 슬라이딩 제어 이론을 이용하여 시험차량의 속도를 제어하고, 횡방향 제어 알고리즘은 최적 예견 제어 이론을 사용하여 도로 궤적을 벗어나지 않도록 조향 입력을 결정하였다.

시뮬레이션 결과와 시험 차량 실험 결과를 비교하였을 때, 차량의 이동 궤적, 속도 등이 유사한 경향을 보이지만, 조향 입력과 각속도(Yaw rate)는 정확히 일치 하지 않는 현상을 확인하였다. 이는 센서의 측정 값에 대한 오차와 실제 플랜트의 모델링 오차가 원인일 것이다. 실제 시스템에 제어를 적용하기 위해서는 센서의 특성과 플랜트의 정확한 모델링, 시험차량을 통한 검증이 필요할 것이다.

이후 고성능 GPS 를 이용한 위치 파악이 가능하다면 현재의 각속도(Yaw rate)센서와 IMU 센서를 통해 위치를 결정하는 시스템과 결합하여 보다 좋은 성능의 제어를 설계할 수 있을 것이라 판단된다.

후 기

이 연구결과는 산업자원부 지원 하에 수행하는 자동차 기반 기술 개발 산업의 핵심과제인 Human Factor 응용 첨단안전 차량 조종 성능 평가 기반 기술 산업임을 밝힙니다.

- (1) Lee, C. and Yi. K., "An Investigation of Vehicle-to-Vehicle Distance Control Laws Using Hardware-in-the-Loop Simulation", Journal of KSME, Part A, Vol26, No. 7, pp1401-1407, 2002
- (2) Fancher, P., Bareket, Z., Ervin, R., Peng, H., "Relationships between Manual Driving and Driving with Adaptive Cruise Control," Proc. Of AVEC2004, 7th International Symposium on Advanced Vehicle Control, August 23-27, Arnhem, The Netherlands, 2004
- (3) Yi, K., Hong, J. and Kwon, Y., "A Vehicle Control Algorithm for Stop-and-Go Cruise Control", Journal of Automobile Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Vol 215 Part D, pp.1099-1115, 2001
- (4) Yi, K. and Kwon, Y., "Vehicle-to-Vehicle Distance and Speed Control Using an Electronic Vacuum Booster", JSAE Review 22, pp. 403-412, 2001
- (5) Uematsu, K. and Gerdes, J.C., "A Comparison of Several Sliding Surfaces for Stability Control," AVEC'02, Paper No.20024578, 2002
- (6) Chung, T., Ha, J. Kim, J., Yi, K. and Lee, J. "Development of Vehicle Stability Control System Based on Sliding Control", Spring Conference Proceeding of KSAE, Vol. II, pp. 577-582, 2003
- (7) Huei Peng " Vehicle Lateral Control for Highway Automation ". University of California at Berkeley, 1992.4
- (8) Jeffrey B.Burl, Linear Optimal Control, pp.179~226, 1998
- (9) Long Chain Chen " An active suspension system with preview control for passenger automobiles ", Massachusetts Institute of Technology, 1988. 3