

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0125

슬라이딩 모드 제어를 이용한 시각센서 기반의 차선변경제어 시스템 설계

Vision-Based Lane Change Maneuver using Sliding Mode Control for a Vehicle

장 승 호*, 김 상 우*
Seungho Jang, Sangwoo Kim

ABSTRACT

In this paper, we suggest a vision-based lane change control system, which can be applied on the straight road, without additional sensors such as a yaw rate sensor and a lateral accelerometer. In order to reduce the image processing time, we predict a reference line position during lane change using the lateral dynamics and the inverse perspective mapping. The sliding mode control algorithm with a boundary layer is adopted to overcome variations of parameters that significantly affects a vehicle's lateral dynamics and to reduce chattering phenomenon. However, applying the sliding mode control to the system with a long sampling interval, the stability of a control system may seriously be affected by the sampling interval. Therefore, in this paper, a look ahead offset has been used instead of a lateral offset to reduce the effect of the long sampling interval due to the image processing time. The control algorithm is developed to follow the desired trajectory designed in advance. In the design of the desired trajectory, we take account of the constraints of lateral acceleration and lateral jerk for ride comfort. The performance of the suggested control system is evaluated in simulations as well as field tests.

주요기술용어 : Lane change control(차선변경제어), Advanced vehicle control(첨단차량제어), Automated steering control(자동조향제어)

1. 서 론

차선유지제어와 차선변경제어를 포함하는 차량의 횡측제어는 첨단차량제어시스템(Advanced Vehicle Control System)의 가장 중요한 부분들 중의 하나이다. 차선변경제어는 주행차선을 따라 주행하도록 하는

차선 유지제어와 달리 주행 중인 차선에서 이웃차선으로 차량을 이동시키기 위한 조향 제어이다. 현재까지 차선유지제어는 자율주행차량 개발을 위한 중요한 기반연구로서 다양한 도로 환경에서의 차량제어에 관한 연구 등이 수행되었으나, 이와 달리 차선변경제어에 관한 연구는 미약하게 이루어졌다. 하지만 근래에 들어 운전자의 안전을 위한 충돌회피시스템에 대하여 관심이 고조되면서 차선변경제어의 필요성이 대두되고 있다.

* 회원, 포항공과대학교 전자·컴퓨터공학부

자석이 매설된 도로에서의 차선변경제어는 Hessburg 등과 Chee 등에 의해 제안되었다. Hessburg 등은 횡축가속도센서 정보와 퍼지제어를 이용한 차선변경제어기를 설계하였다. 이들은 임의의 속도에서 등속으로 주행하는 차량에 대하여 운전자의 경험을 바탕으로 퍼지규칙을 설정하였다. 하지만, 이 경우 속도의 변화에 따라 퍼지규칙을 재 설정하여야 한다. 이와 달리 Chee 등은 차량모델을 이용한 차선변경제어기를 제안하였으며, 모의실험과 저속에서(16KPH)의 시험주행을 통하여 그 성능을 입증하였다. 그러나 자석이 매설되어있는 도로는 시험주행로를 제외하고는 거의 없는 실정이며, 차선변경과정에서는 차선을 인식할 수 없으므로 횡축가속도센서나 자이로(gyro)등의 부가적인 센서가 필요하다. Jochem 등은 시각센서를 이용하여 일반도로에서 적용이 가능한 차선변경제어 방안을 제시하였다. 이들은 신경망을 이용하여 차선변경과정을 학습하는 방안과 주행차선과 변경차선에서 각각 차선유지를 수행하는 두 개의 신경망 사이의 스위칭을 통하여 차선변경을 수행하는 방안을 제안하였다. 신경망을 이용하는 경우 차량의 속도, 도로상태 등의 주행상태 변화에 대한 학습이 이루어져야 하지만, 현실적으로 모든 상황에 대하여 학습하는 것은 어려운 일이며, 학습이 이루어지지 않은 주행환경에서의 성능을 보장할 수 없는 문제점이 있을 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 일반도로에서 적용이 가능하며, 차량모델을 이용한 차선변경제어 시스템을 제안한다. 제안된 시스템에서는 부가적인 센서 없이 시각센서만을 이용하고 모델의 불확실성을 수용하기 위하여 경계층을 갖는 슬라이딩 모드 제어 방법을 채택하였다.

시각센서를 이용하여 차선을 인식하는 경우 횡축가속도 센서나 자이로를 적용하는

경우에 비하여 샘플링 간격이 길어질 수밖에 없으며 이는 슬라이딩 모드제어의 큰 이득 특성(high gain characteristic)으로 말미암아 안정성에 심각한 영향을 미치게 된다. 따라서 본 논문에서는 횡축거리오차 대신 전방오차(look ahead error)를 제어기 설계에 이용하여 긴 샘플링 간격의 효과를 줄일 수 있도록 하였으며 모의실험과 주행시험을 통하여 성능을 확인하였다.

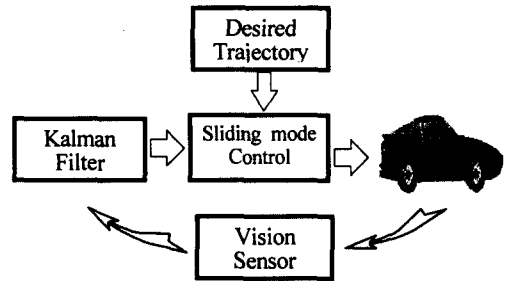


Fig. 1 The block diagram of the lane change control system based on a vision

본 논문에서 제안된 차선변경제어시스템의 구성은 그림 1과 같으며, 미리 설정된 주행경로를 따라 차량이 주행하도록 설계하였다. 주행경로는 운전자의 승차감을 향상시키기 위하여 횡축가속도뿐만 아니라 이의 변화율(jerk)도 차선변경 과정에서 연속이 되도록 설계되었다.

제어기 및 관측기 설계를 위한 차량 모델은 다음 장에서 간략하게 설명하며, 3장에서는 시각센서를 이용한 도로영상처리에 관하여 기술한다. 4장에서는 주행경로 설계에 관하여 설명하고, 5장에서는 설계된 슬라이딩 모드 제어기와 칼만 관측기를 설명한다. 6장에는 제안된 차선변경제어기의 모의실험 결과와 주행시험 결과를 보여주며 7장에서는 결론을 맺는다.

2. 차량 모델

제어기 및 관측기 설계에 이용된 차량 모델은 횡측제어기 설계에 널리 이용되고 있는 횡측방향과 편요각방향을 포함하는 2자유도(degree of freedom)를 갖는 선형 모델이다.

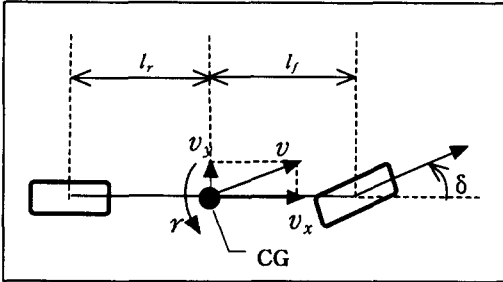


Fig. 2 Vehicle model

그림 2는 차량의 횡측 모델을 보여주고 있다. 만일 차량의 종축 가속도 영향을 무시하면, 차량 모델은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_y \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \delta \quad (1)$$

여기에서

$$a_{11} = -\frac{C_f + C_r}{mv_x}, \quad a_{12} = -v_x + \frac{C_r l_r - C_f l_f}{mv_x},$$

$$a_{21} = \frac{C_r l_r - C_f l_f}{I_z v_x}, \quad a_{22} = -\frac{C_r l_r^2 + C_f l_f^2}{I_z v_x},$$

$$b_1 = \frac{C_f}{m}, \quad b_2 = \frac{C_f l_f}{I_z},$$

C_f 와 C_r 은 앞타이어와 뒤타이어에서의 코너링상수(cornering stiffness), m 은 차량의 질량, I_z 는 차량의 관성 모멘트, v_x 는 종축 방향의 차량속도, l_f 와 l_r 은 무게중심으로부터 차량의 앞 타이어와 뒤 타이어까지의 거리, r 은 편요각속도(yaw rate), v_y 는 횡측방향의 차량속도, δ 는 차량의 조향각을 의미한다.

도로에서의 차량의 위치를 포함하는 확장된 모델은 그림 3과 같다. 그림 3에서 v 는 차량의 진행속도이며, D 는 차량의 무게중심으로부터 l_a 거리에 위치한 전방을 의미하며, y_a 는 차선의 중심으로부터 D 까지의 거리를 의미하는 전방오차이다.

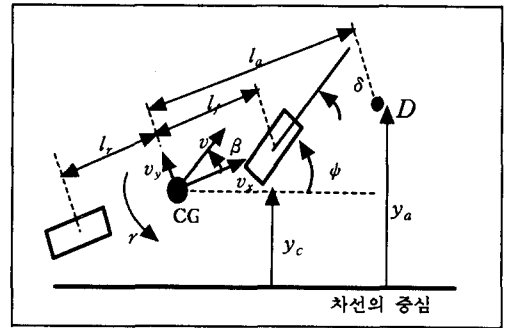


Fig. 3 Vehicle model including positions on the road

만일 $\psi \ll 1$ 이라면, \dot{y}_c 와 y_a 는 다음과 같이 근사될 수 있다.

$$\dot{y}_c \approx v_y + v_x \psi \quad (2)$$

$$y_a \approx y_c + l_a \psi \quad (3)$$

식(2), 식(3)과 $\dot{\psi} = r$ 이라는 사실로부터 \dot{y}_a 는 아래와 같이 결정된다.

$$\dot{y}_a = \dot{y}_c + l_a \dot{\psi} = v_y + v_x \psi + l_a r \quad (4)$$

따라서 식(1), 식(2)과 식(4)을 통하여 얻어진 차량모델은 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B\delta(t) \quad (5)$$

여기에서

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & -v_x A_{22} & A_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & A_{42} & -v_x A_{42} & A_{44} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 + l_a b_2 \\ 0 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

$$x = [y_a \quad \dot{y}_a \quad \psi \quad r]^T, \quad A_{22} = a_{11} + l_a a_{21},$$

$$A_{24} = a_{12} + v_x + l_a a_{22} - l_a A_{22}, \quad A_{42} = a_{21},$$

$$A_{44} = a_{22} - l_a a_{21} \text{이다.}$$

모의실험과 주행시험에 이용된 차량모델의 파라미터 값은 다음과 같다.

$$l_f^o = 1.17m, \quad l_r^o = 1.27m, \quad I_z^o = 2680kgm^2,$$

$$m^o = 1800kg, \quad C_f^o = C_r^o = 80,000N/rad$$

여기에서 o 표시는 노미널(nominal) 값임을 의미한다. 코너링 상수 C_f, C_r 은 도로의 노면상태에 따라 값이 변하며, 차량의 질량과 관성 모멘트는 차량의 승차인원 및 승차위치 등에 따라 변화하게 된다. 따라서 이 파라미터들은 표 1에서 정의된 범위 내에서 변화한다고 가정하였다.

Table 1 Variation ranges of vehicle parameters

파라미터	변화 범위
C_f	$0.7 C_f^o \sim 1.0 C_f^o$
C_r	$0.7 C_r^o \sim 1.0 C_r^o$
m	$0.8 m^o \sim 1.2 m^o$
I_z	$0.8 I_z^o \sim 1.2 I_z^o$

3. 도로영상처리

3.1 역원근변환

편요각과 전방오차 등과 같은 차선에 대한 차량의 위치 정보를 알기 위해서는 영상좌표를 실제 도로에서의 좌표로 전환하는 과정이 필요하다. 이러한 전환과정을 역원근변환이라고 하며, 역원근변환은 도로가 평탄하다는 가정 하에서 이루어진다.

그림 4는 실세계좌표계와 영상좌표계 사이의 위치 관계를 표현하고 있다. 그림 4에서 실제의 3차원 공간과 영상으로 투영된 2차원 공간은 다음과 같이 정의된다.

$$\cdot W = \{(x, y, z)\} \in E^3; \text{실세계 좌표계}$$

$$\cdot I = \{(u, v)\} \in E^2; \text{영상 좌표계}$$

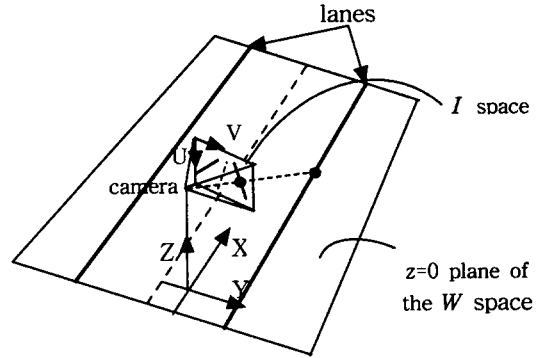


Fig. 4 The relationship between the two coordinate systems

그림 4에서 알 수 있듯이 실세계좌표계는 카메라의 위치에 따라 좌표축이 변화하게 되는데, 카메라의 위치에 따른 실세계좌표계에서의 XY 평면과 $Z\eta$ 평면은 그림 5에 나타나 있다. 그림 5에서 d 는 차선의 중심으로부터 카메라까지의 거리, $\vec{\eta}$ 는 광축(\vec{o})이 $z=0$ 평면으로 투영된 벡터, $\vec{\gamma}$ 는 $\vec{\eta}$ 와 X축이 이루는 각, $\bar{\theta}$ 는 광축과 XY 평면이 이루는 각, $2\alpha_u$ 와 $2\alpha_v$ 는 U축과 V축으로의 카메라의 시야각, h 는 XY 평면에서부터 카메라까지의 높이이다. 그림 5에서 보여지는 바와 같이 실세계좌표로부터 영상좌표로의 전환은 다음의 관계식에 의해 이루어진다.

$$u = \frac{\tan^{-1} \left[\frac{h \cdot \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \right)}{y} \right] - (\bar{\theta} - \alpha_u)}{\frac{2\alpha_u}{n-1}} \quad (6)$$

$$v = \frac{\tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) - (\bar{\gamma} - \alpha_v)}{\frac{2\alpha_v}{m-1}}$$

여기에서 (u, v) 는 영상좌표, (x, y) 는 실세계좌표, m 과 n 은 카메라의 해상도($m \times n$)를 표현하는 파라미터이다. 식(6)으로 표현

되는 관계식은 다음의 관계식에 의해 역으로 영상좌표에서 실세계좌표로의 전환이 가능하다.

$$\begin{aligned} x &= T \cdot \cos \left\{ \bar{\gamma} + \left(\frac{2v}{m-1} - 1 \right) a_1 \right\} \\ y &= T \cdot \sin \left\{ \bar{\gamma} + \left(\frac{2v}{m-1} - 1 \right) a_1 \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서 $T = \frac{h}{\tan \left\{ \bar{\theta} + \left(\frac{2u}{n-1} - 1 \right) a_2 \right\}}$ 이다.

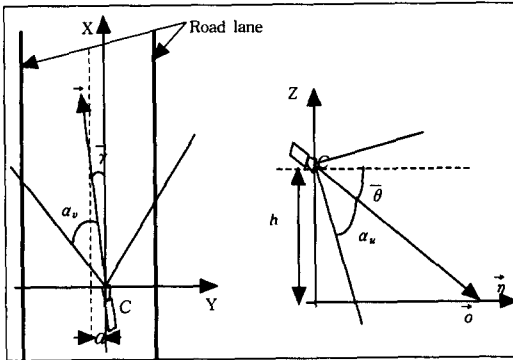


Fig. 5 The XY plane $Z\eta$ plane in the W space according to the camera position

3.2 차선인식 및 차량위치 결정

실시간 차량제어를 위해서는 차선을 포함하는 일부영역의 영상만 처리하여 영상처리 시간을 최소화해야한다. 본 논문에서는 차량모델을 이용하여 도로 상의 차량위치를 예측하고, 예측된 정보를 차선위치 정보로 전환하여 영상처리영역을 줄일 수 있도록 하였다. 차선위치예측 과정은 도로에 대한 다음의 가정을 바탕으로 이루어진다.

- 가정 1: 차선변경은 직선도로에서 이루어진다.
- 가정 2: 차선변경이 이루어지는 두 차선 사이의 간격은 일정하다.

일반적인 차선변경에서는 위의 두 가정은 타당하다고 할 수 있다.

만일 두 차선 사이의 폭을 L 이라 가정하면, 그림 5에서 볼 수 있듯이 두 차선은 실세계좌표계에서 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$y = -\frac{L}{2} - d, z = 0 \quad (8)$$

$$y = \frac{L}{2} - d, z = 0 \quad (9)$$

여기에서 식(8)과 식(9)은 왼쪽과 오른쪽 차선을 의미한다. 식(6)에서 $a_u, a_v, h, \bar{\theta}$ 와 카메라의 해상도 등은 카메라 보정을 통해 얻을 수 있으며, d 와 $\bar{\gamma}$ 는 관측기로부터 예측이 가능하므로 식(6), 식(8)과 식(9)으로부터 다음 영상에서의 차선위치를 예측하게 된다. 그림 6은 예측된 좌측차선 위치에서의 영상처리영역의 예를 보여주고 있다.

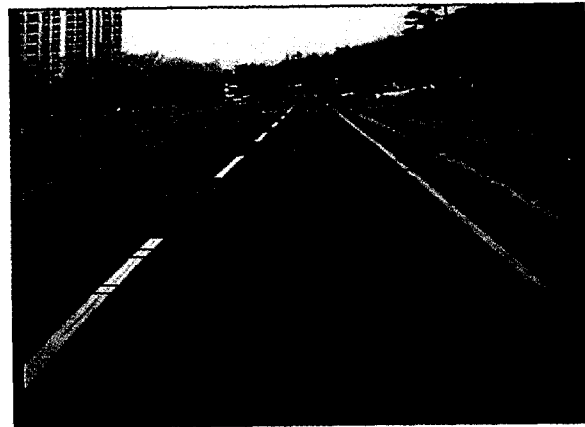


Fig. 6 Processing areas in the predicted left lane position

차선은 그 주변의 도로면과 구별이 가능한 명암 차이를 가지고 있으므로 이를 이용한 차선인식이 이루어진다. 차선인식을 위한 영상처리는 그림 7의 과정을 통해 진행된다.

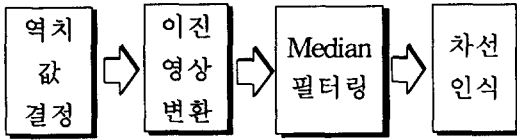


Fig. 7 Lane detection algorithm

역치값(Threshold) 결정은 처리영역 내에서 차선과 도로면 사이의 명암을 구별하기 위한 경계를 설정하기 위한 과정으로 도로 영상은 태양광의 조도변화 및 도로의 상태(예, 차선의 흐린 정도)에 따라 차선과 도로의 명암정도가 변화하게 됨으로 매영상마다 역치값을 재 설정하여야 한다. 본 논문에서는 명암 차가 있는 영상에서 쉽게 이용이 가능한 반복적인 역치선택 방법(Iterative Threshold Selection)을 이용하여 역치값이 계속적으로 갱신될 수 있도록 하였다.

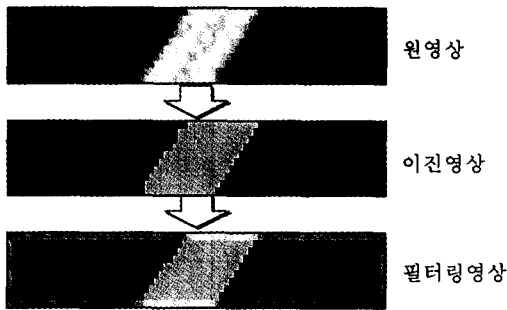


Fig. 8 Processed images

역치값이 결정되면 256 명암을 갖는 영상은 차선과 도로면으로 구분되는 이진 영상으로 전환된다. 이 과정에서 도로면에 태양광의 반사가 나타나거나 차선이 희미한 경우 차선과 도로면의 명암 차이가 낮아지게 되어 잡음이 발생할 수 있으므로 미디언(Median)필터링 과정을 거치게 된다. 그림 8은 위에서 설명한 처리 과정의 결과 영상들을 보여주고 있다.

필터링된 영상에서 차선을 구성하는 픽셀

(pixel)들은 도로면을 이루는 픽셀들과 뚜렷이 구분되어 나타나게 된다. 차선을 이루는 픽셀들이 결정되면, 이 픽셀들은 식(7)으로 표현되는 역원근변환에 의해 실세계좌표로 전환된다. 전환되는 과정에서는 $\bar{y}=0$ 로 가정한다. 즉, 실세계좌표계의 X축을 카메라의 방향으로 설정한다. 그림 9는 도로영상이 역원근변환을 통하여 실세계좌표계로 변환되는 과정을 보여주고 있다.

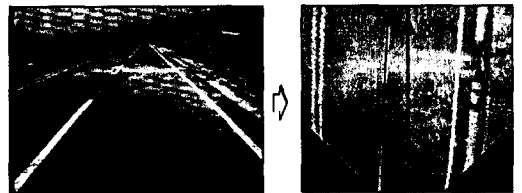


Fig. 9 Image transform by using the inverse perspective mapping

역원근변환을 통해 전환된 좌표들은 직선 차선을 구성하는 점들이므로, 이 점들이 이루는 직선을 결정할 수 있다. 차선을 나타내는 직선은 다음과 같이 표현된다.

$$x \cos \theta - y \sin \theta + \rho = 0 \quad (10)$$

여기에서 θ 와 ρ 값은 다음 식으로 표현되는 χ^2 을 최소화하도록 결정하였다.

$$\chi^2 = \sum_i (x_i \cos \theta - y_i \sin \theta + \rho)^2 \quad (11)$$

여기에서 (x_i, y_i) 는 차선을 구성하는 픽셀들이 실세계좌표계로 전환된 좌표들을 의미한다. 카메라와 차량이 정확하게 정렬되어 있다면, 그림 9에서 볼 수 있듯이, 전방오차(y_a)와 편요각(ψ)은 다음의 관계식에 의해 결정된다.

$$y_a = |(l_a - l_c) \cos \theta + \rho| - \frac{l}{2} \quad (12)$$

$$\psi = -\bar{\gamma} = \theta - \frac{\pi}{2} \quad (13)$$

여기에서 l_c 는 차량의 무게중심으로부터 카메라까지의 거리이다.

4. 주행경로의 설계

주행경로를 설정하여 차선변경을 수행하도록 하는 방안은 여러 가지 면에서 장점을 가지고 있다. 그 중의 하나는 충돌회피시스템의 장애물 회피제어에 적용하기가 용이하다는 것이다. 즉, 주행경로를 Zvi Shiller 등이 제안한 바와 같이 장애물 회피가 가능한 경로로 설정하면 충돌회피시스템에 적용이 가능하다. 또한, 횡측속도, 횡측가속도와 차선변경시간 등의 여러 가지 요소를 임의로 설정할 수 있으므로 운전자의 승차감 등의 요소를 고려할 수 있다는 것이다.

차선변경을 위한 횡측가속도경로는 기본적으로 다음의 두 조건을 만족하여야 한다.

$$\text{조건 1: } \int_0^{t_L} \ddot{y}_{cd}(t) dt = 0, \quad \ddot{y}_{cd}|_{t=0, t_L} = 0$$

$$\text{조건 2: } \int_0^{t_L} \int_0^t \ddot{y}_{cd}(\tau) d\tau dt = L_c$$

여기에서 t_L 은 차선변경이 이루어지는 시간이며, L_c 는 차선 변경이 이루어지는 거리, y_{cd} 는 차량의 무게중심이 추종해야 할 횡측거리이다. 또한, 차선변경 동안에 운전자의 승차감에 중요한 영향을 미치는 횡측가속도의 시간에 대한 변화율(lateral jerk)이 연속적으로 이루어질 수 있도록 다음과 같은 조건을 추가하였다.

$$\text{조건 3: } \frac{d}{dt} \ddot{y}_{cd}(t) \Big|_{t=0, t=t_L} = 0$$

조건 3은 차선변경이 이루어지는 시점과 종료되는 시점에서 횡측가속도의 불연속적인

변화를 방지하여 좋은 승차감을 유지하도록 하기 위한 것이다. 또한, 횡측가속도와 횡측가속도의 변화율은 다음의 한계를 넘지 않도록 설계되었다.

$$\text{조건 4: } \max |\ddot{y}_{cd}(t)| \leq 0.2g$$

$$\text{조건 5: } \max \left| \frac{d}{dt} \ddot{y}_{cd}(t) \right| \leq 0.1g/\text{sec}$$

여기에서 g 는 중력가속도를 의미한다. 위의 조건들을 만족하기 위한 주행 경로는 5차의 다항식을 이용하여 설계하였으며, 설계된 주행경로는 다음과 같다.

$$\ddot{y}_{cd}(t) = A_L t^2 \left(t - \frac{t_L}{2}\right) (t - t_L)^2 \quad (14)$$

본 논문에서는 t_L 과 L_c 는 각각 8초와 3m로 설정하였다. 그림 10은 설계된 주행경로를 나타내고 있으며, 좌측으로부터 횡측가속도, 횡측속도, 횡측거리의 주행경로이다.

그림 10에 나타난 주행경로는 차량의 무게중심에의 주행경로이므로 전방거리에서의 주행경로로 전환하는 과정이 필요하다. 식(3)으로부터 \ddot{y}_{ad} 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

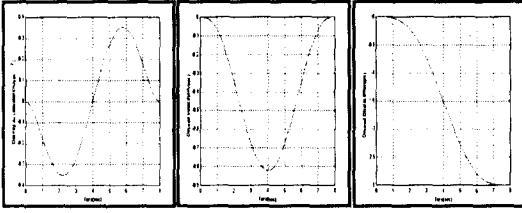
$$\ddot{y}_{ad}(t) = \ddot{y}_{cd}(t) + l_a \ddot{\psi}_d(t) \quad (15)$$

만일, $v_y \ll v_x \psi$ 이라면, 식(2)으로부터 ψ_d 는 다음과 같이 근사된다.

$$\psi_d(t) \approx \frac{\dot{y}_{cd}(t)}{v_x} \quad (16)$$

따라서 식(15)과 식(16)을 이용하면, $\ddot{y}_{ad}(t)$ 은 다음과 같다.

$$\ddot{y}_{ad}(t) = \ddot{y}_{cd} + \frac{l_a}{v_x} \left(\frac{d}{dt} \ddot{y}_{cd} \right) \quad (17)$$



a. Acceleration b. Velocity c. Displacement

Fig. 10 Desired trajectory for a lane change maneuver

5. 제어기 및 관측기의 설계

5.1 슬라이딩 모드 제어기의 설계

식(5)로 표현되는 차량모델에 불확실한 파라미터들이 존재하므로 이러한 불확실성에 대하여 안정성을 보장할 수 있는 슬라이딩 모드 제어를 이용하여 주행경로를 따라 차선변경이 이루어지도록 하는 제어기를 설계하였다. 슬라이딩 모드 제어의 설계에 있어서 가장 중요한 요소는 슬라이딩 평면을 설정하는 것이다. 본 논문에서는 다양한 모의실험과 주행시험을 통하여 슬라이딩 평면을 다음과 같이 설정하였다.

$$S = \dot{e}(t) + 2e(t) = 0 \quad (18)$$

여기에서 $e(t)$ 는 측정된 차량의 전방오차와 주행경로에서 얻어진 원하는 위치 사이의 추적 오차로 다음과 같이 정의된다.

$$e(t) = y_a(t) - y_{ad}(t) \quad (19)$$

식(5)으로부터 \ddot{y}_a 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\ddot{y}_a = f(y_a, \psi, r) + B_1 \delta \quad (20)$$

여기에서 $f = A_{22}\dot{y}_a - v_x A_{22}\psi + A_{24}r$, $B_1 = b_1 + l_a b_2$ 이다. $|f - f^0| \leq F$ 을 만족하는 F 는 아래와 같이 결정된다.

$$F = \alpha \cdot |f^0(y_a, \psi, r)| \quad (21)$$

여기에서 $f^0(\cdot)$ 은 $f(\cdot)$ 의 노미널 값을 의미하며, 표 1에 나타난 매개 변수들의 범위를 고려할 때, $\alpha = 0.4167$ 이다. 위와 마찬가지로 B_1 의 변화범위도 다음과 같이 결정된다.

$$|B_1 - B_1^0| \leq \alpha \cdot |B_1^0| \quad (22)$$

여기에서 B_1^0 은 B_1 의 노미널 값이다. 그리고 식(18), 식(19)과 식(20)으로부터 S 은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\dot{S} = f(y_a, \psi, r) + B_1 \delta - \ddot{y}_{ad}(t) + 2\dot{e}(t) \quad (23)$$

식(18)과 식(23)으로부터 도달 조건 ($S \dot{S} < -\eta S, \eta > 0$)을 만족하는 슬라이딩 모드 제어 입력은 아래와 같다.

$$\delta = B_1^{-1} \{-f^0 + \ddot{y}_{ad} - 2\dot{e} - K \operatorname{sgn}(S)\} \quad (24)$$

여기에서 $\operatorname{sgn}(S) = \begin{cases} 1 & \text{for } S > 0 \\ -1 & \text{for } S < 0 \end{cases}$ 이며, K

는 시스템의 불확실한 항을 보상하는 부분으로 식(25)과 같이 주어진다.

$$K \geq \eta + \frac{2}{1+\alpha} F + \frac{\alpha}{1+\alpha} |\ddot{y}_{ad} - 2 \cdot \dot{e}|, \eta > 0 \quad (25)$$

식(24)으로 표현되는 제어입력은 슬라이딩 평면근처에서 $\operatorname{sgn}(S)$ 의 불연속성에 의하여 채터링 현상이 나타날 수 있다. 따라서 식(24)으로 표현되는 제어입력을 슬라이딩 평면 근처의 경계 영역 내에서 연속함수인 $\operatorname{sat}(S)$ 를 이용하여 채터링 현상을 줄일 수 있도록 설계하였다. 이 때의 제어입력은 다음과 같다.

$$\delta = B_1^{-1} \{-\hat{f} + \ddot{y}_{ad} - 2\dot{e} - K \operatorname{sat}(S)\} \quad (26)$$

여기에서
$$\text{sat}(S) = \begin{cases} S & \text{for } |S| < \phi \\ \phi \cdot \text{sgn}(S) & \text{for } |S| \geq \phi \end{cases}$$
, $\phi > 0$ 이다.

5.2 관측기의 설계

슬라이딩 모드 제어를 위해서는 상태변수 y_a, \dot{y}_a, ψ, r 과 주행경로에 의한 $y_{ad}, \dot{y}_{ad}, \ddot{y}_{ad}$ 의 값을 알고 있어야 한다. 여기에서 \dot{y}_a, r 은 시각센서에 의해 측정이 불가능하므로 칼만필터를 이용하여 이를 추정하기 위한 관측기를 설계하였다. 본 논문에서 적용된 차선변경제어기는 시각센서의 처리시간에 의해 15Hz로 동작한다. 따라서, 식 (5)으로 표현되는 차량 모델을 샘플링 간격이 0.0667초인 이산시간모델로 전환하고, 이에 대한 칼만필터를 구성하였다. 관측기 설계를 위한 이산시간모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \Phi x(k) + \Gamma \delta(k) + \Gamma w(k) \\ y(k) &= Hx(k) + v(k) \end{aligned} \quad (27)$$

여기에서

$$\begin{aligned} x(k) &= [y_a(k) \quad \dot{y}_a(k) \quad \psi(k) \quad \dot{\psi}(k)]^T, \\ y(k) &= [y_a(k) \quad \psi(k)]^T, \\ \Phi &= e^{AT}, \\ \Gamma &= \int_0^T e^{A\eta} d\eta B, \end{aligned}$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$w(k)$ 는 시스템의 외란, $v(k)$ 는 시각 센서의 측정 잡음이다.

이 때의 칼만필터는 아래와 같다.

$$\hat{x}(k+1) = \Phi \hat{x}(k) + \Gamma \delta(k) + L(k)(y(k) - H\hat{x}(k)) \quad (28)$$

$L(k)$ 는 칼만필터이득으로 다음과 같다.

$$L(k) = \Phi P(k) H (R + H^T P(k) H)^{-1} \quad (29)$$

여기서, $P(k)$ 는 다음의 관계식에 의해 갱

신된다.

$$P(k+1) = \Phi P(k) \Phi^T + Q - \Phi P(k) H \cdot (R + H^T P(k) H)^{-1} H^T P(k) \Phi^T \quad (30)$$

그리고 $Q = \Gamma \sigma_w^2 \Gamma^T$, $R = \begin{bmatrix} \sigma_y^2 & \sigma_{y\psi}^2 \\ \sigma_{y\psi}^2 & \sigma_\psi^2 \end{bmatrix}$, σ_w^2 은 외란의 분산, σ_y^2 은 횡축거리 측정 잡음의 분산, $\sigma_{y\psi}^2$ 은 횡축거리 측정 잡음과 편요각 측정 잡음 사이의 공분산, σ_ψ^2 은 편요각 측정 잡음의 분산이다. 외란의 분산(σ_w^2)는 설계 파라미터로서 본 논문에서는 모델 파라미터의 불확실성, 속도의 불확실성, 외란요소 등을 고려하여 $\sigma_w^2 = 0.0001$ 이라 하고, 시각센서에 의한 잡음의 분산은 실험 데이터를 이용하여 다음과 같이 설정하였다.

$$\sigma_y^2 = 0.000108, \sigma_{y\psi}^2 = 0.0, \sigma_\psi^2 = 0.000169 \quad (31)$$

6. 모의실험 및 주행시험 결과

모의실험은 저속 및 고속에서의 제어기 성능을 확인하기 위하여 30km/h과 80km/h의 속도일 때에 대하여 이루어졌다. 모의실험에 이용된 차량 모델의 파라미터는 불확실성을 고려하여 $m = 1.1m^0$, $I_z = 1.1I_z^0$, $C_f = C_r = 0.8C_f^0$ 로 설정하였으며, 측정잡음은 (31)에 나타난 값이 적용되었으며, 외란은 분산이 0.00000324인 백색잡음을 적용하였다. 또한, 구동 장치는 다음과 같은 일차 시스템으로 가정하였다.

$$\dot{\delta}(t) + 5\delta(t) = 5u(t) \quad (32)$$

여기에서 $u(t)$ 는 제어기의 출력이며, $\delta(t)$ 는 차량의 조향각이다.

그림 11은 차량의 속도가 30km/h인 저속에서 전방거리가 0m, 0.5m인 경우를 비교한 결과이다. 결과를 살펴보면 전방거리(l_2)가

0.0m인 경우 추적오차의 성능이 전방거리가 0.5m인 경우에 비하여 향상되고, 과도응답 특성이 줄어드는 반면, 전방거리가 0.5m인 경우가 조향각의 변화량과 제어이득이 줄어들어 운전자의 승차감을 향상시키는 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

그림 12는 80km/h로 주행하는 차량에서 전방거리를 2m로 설정했을 때의 결과로 볼

안정한 모습을 보여주고 있다. 이는 고속으로 주행하는 차량에 있어서 샘플링 간격이 제한된 경우 슬라이딩 모드 제어가 안정성을 보장할 수 없다는 사실을 설명하고 있다. 이러한 문제는 그림 13에서 볼 수 있듯이 전방거리를 적절하게 설정하는 경우 해결이 가능하다는 것을 알 수 있다. 그림 13은 차량의 속도가 80km/h일 때 전방거리를 4m,

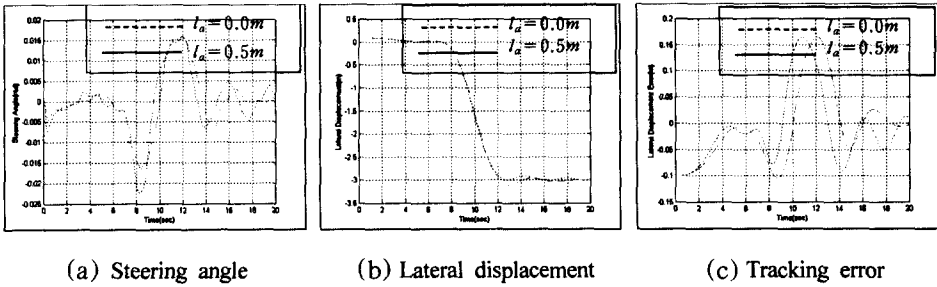


Fig. 11 Simulation result 1 ($v=30\text{km/h}$)

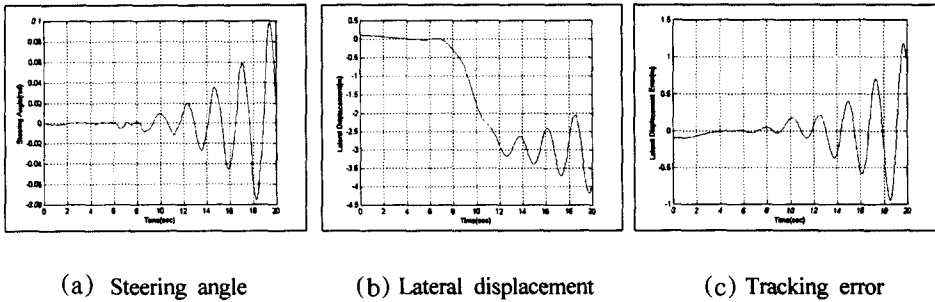


Fig. 12 Simulation result 2 ($v=80\text{km/h}$, $l_a=2.0\text{m}$)

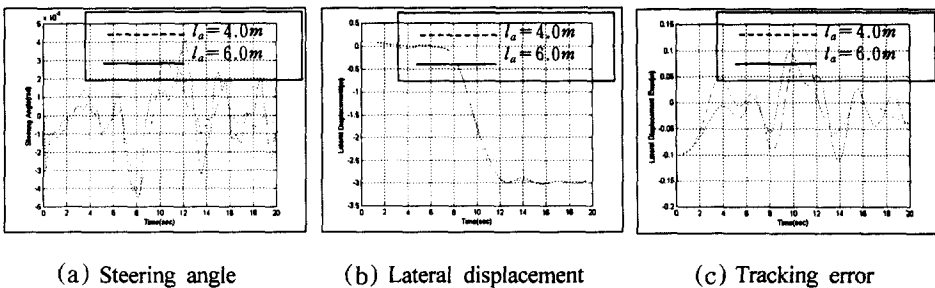
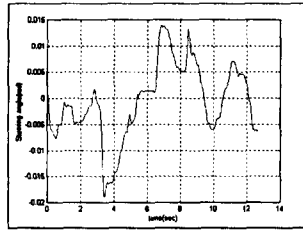


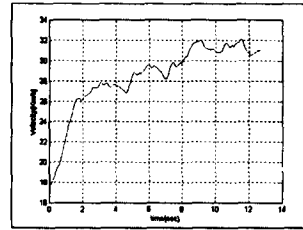
Fig. 13 Simulation result 3 ($v=80\text{km/h}$)

6m로 설정하여 모의실험을 수행한 결과이다. 전방거리를 6m로 설정하였을 때가 4m인 경우에 비하여 추적오차성능이 좋고, 제

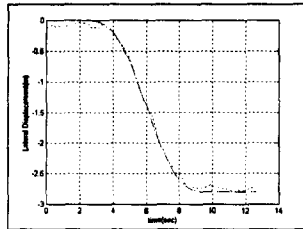
어입력의 변화가 부드러워 승차감을 향상시키고 있음을 알 수 있다. 하지만, 30km/h 속도에서의 모의실험결과에서 볼 수 있듯이



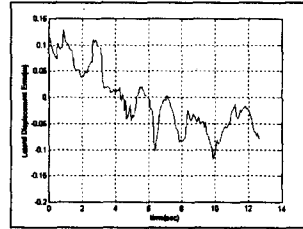
(a) Steering angle



(b) Longitudinal velocity

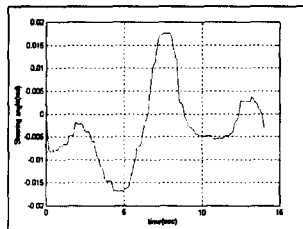


(c) Lateral displacement

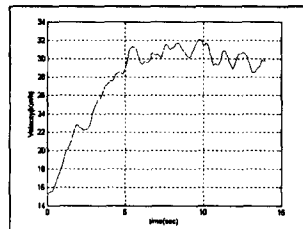


(d) Tracking error

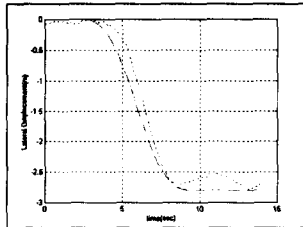
Fig. 14 Vehicle test result 1 ($v=30\text{km/h}$, $l_a=0.0\text{m}$)



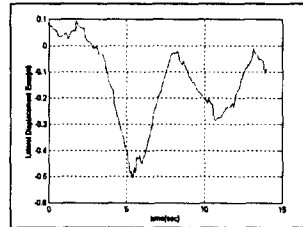
(a) Steering angle



(b) Longitudinal velocity



(c) Lateral displacement



(d) Tracking error

Fig. 15 Vehicle test result 2 ($v=30\text{km/h}$, $l_a=1.0\text{m}$)

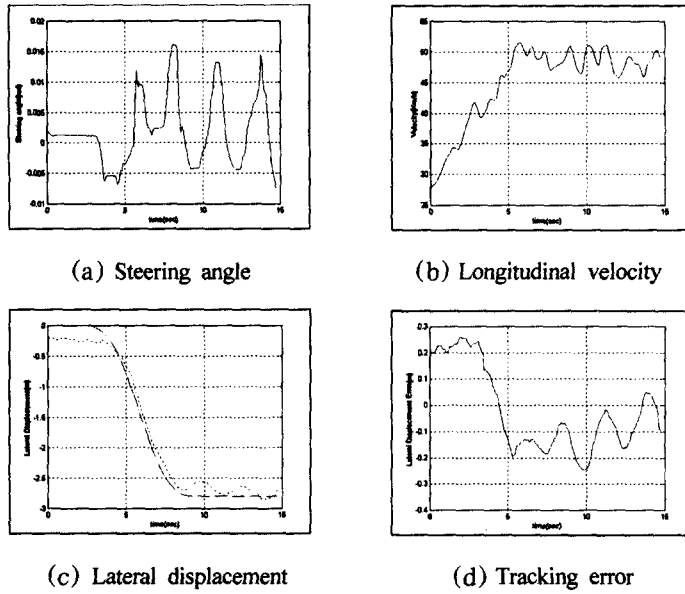


Fig. 16 Vehicle test result 3 ($v=50\text{km/h}$, $l_a=2.5\text{m}$)

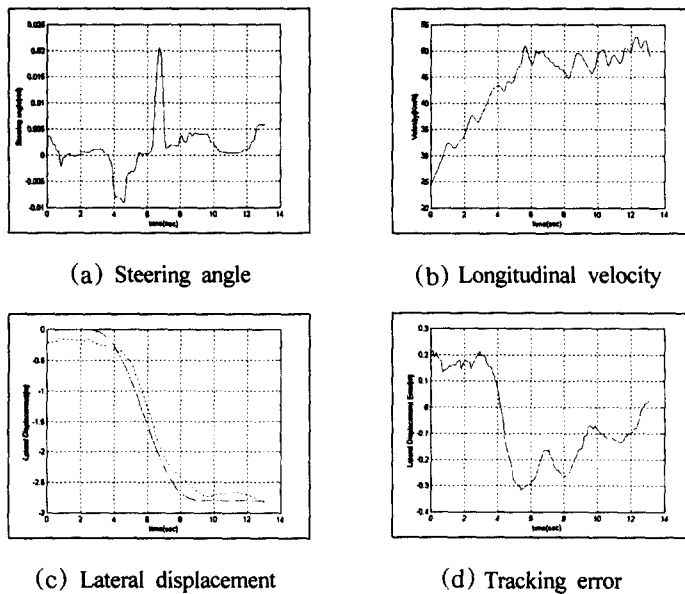


Fig. 17 Vehicle test result 4 ($v=50\text{km/h}$, $l_a=3.0\text{m}$)

전방거리를 너무 길게 설정하는 경우 승차감이 향상될 수는 있으나, 추적오차 성능이 저하되며, 과도응답특성이 커지게 된다. 따라서, 전방거리의 설정은 시스템의 안전성,

추적오차 성능, 운전자의 승차감을 고려하여 적절히 설정되어야 한다는 사실을 보여준다. 적절한 전방거리를 설정하는 경우 제안된 차선변경제어기는 차량의 불확실 파라미

터 및 외란에 강인한 특성을 지니며, 최대 추적오차가 $\pm 15\text{cm}$ 정도로 우수한 제어 성능을 보여주고 있다.

차선변경을 위한 주행시험은 실험 도로의 길이 문제로 인해 시속 30km/h 및 50km/h 에서 이루어졌다. 그림 14는 30km/h 의 속도에서 전방거리를 0m 로 설정하였을 때의 실험 결과이며, 그림 15는 30km/h 의 속도에서 전방거리가 1m 일 때의 실험 결과이다. 실험 결과를 살펴보면 모의실험결과와 유사하게 전방거리가 커짐에 따라 추적오차성능이 저하됨을 알 수 있다. 그림 16은 50km/h 의 속도에서 전방거리가 2.5m 일 때의 실험 결과이며, 그림 17은 같은 속도에서 전방거리를 3m 로 설정하였을 때의 결과이다. 여기에서도 모의실험과 유사하게 대체로 전방거리가 증가하는 경우 제어입력의 변화는 줄어드는 반면 추적오차성능이 저하되는 결과를 보여주고 있다. 주행시험에서의 조향각 측정은 핸들에 부착된 인코더(encoder)에 의해 이루어짐으로 정확한 조향각 측정에 어려움이 있으며, 조향각 제로 위치에서의 오프셋(offset) 문제와 조향 시스템의 백래쉬(backlash) 등에 의해 모의실험 결과에 비하여 대체적으로 추적오차성능이 떨어지는 결과가 나타나고 있으나, 적절한 전방거리를 이용하는 경우에 차선 전환이 이루어지는 시점에서는 오차가 $\pm 20\text{cm}$ 로 이내로 차선변경을 수행하고 있음을 알 수 있다.

7. 결론

본 논문에서는 일반도로에서 추가의 보조 센서 없이 시각센서만을 이용한 차선변경 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템에서는 차량의 횡측 모델과 슬라이딩 모드 제어 기법을 이용하여 제어기를 설계하였다. 신경망이나 퍼지규칙을 이용하여 제어기를 설계할 경우 제어기 학습에 장시간이 소요되며

학습되지 않은 상황에 대하여 성능을 보장하기 어려우나, 본 논문에서처럼 모델을 이용할 경우 제어기는 일반적인 상황에 대한 성능을 보장할 수 있다. 하지만 시각 센서를 차량의 횡측제어에 이용하는 경우 영상 정보 처리시간이 다른 센서에 비하여 길어지므로 차량이 고속으로 주행하는 경우 슬라이딩 모드 제어기가 불안정해질 수 있는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위하여 시각센서의 특징인 전방거리 정보를 이용하여 고속에서의 성능을 보장할 수 있음을 모의실험과 주행시험을 통하여 보였다. 또한, 제안된 제어기가 모의실험에서 보여준 차량의 불확실 파라미터와 외란에 대하여 강인한 특성과 추적오차성능을 주행시험을 통하여 확인하였다. 주행시험 결과에서는 조향각 제로 위치에서의 오프셋과 백래쉬로 인한 문제에도 불구하고 제안된 제어기가 비교적 우수한 차선변경을 수행할 수 있음을 보였다.

시각센서의 특성상 태양광의 변화나 그림자, 차선의 명암 등의 여러 가지 원인에 의해 차선인식에 실패할 수 가능성을 가지고 있다. 차선인식의 실패는 전체 제어시스템의 신뢰성에 심각한 문제를 일으킬 수 있으므로 앞으로는 다양한 도로환경에서 적용 가능한 차선인식 기법에 관한 연구와 조향 시스템의 백래쉬와 같은 비선형 특징을 제어기의 설계에 고려하는 방안에 대한 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 BK21 사업을 통하여 포항공과대학교 전자·컴퓨터공학부에 주어진 교육부의 재정지원과 국방과학연구소의 장기기초연구비(TEM D-419-981301) 지원을 통해 수행하였습니다.

참 고 문 헌

- 1) Frank L. Lewis, "Applied Optimal Control And Estimation," Prentice-Hall, New Jersey, pp. 481-493, 1992.
- 2) J. E. Slotine, W. Li, "Applied Nonlinear Control," Prentice-Hall, New Jersey, pp. 276-289, 1991.
- 3) R. Jain, R. Kasturi, Brian G. Schunck, "Machine Vision," McGraw-Hill, pp. 76-86, 1995.
- 4) J. Ackermann, J. Guldner and V. I. Utkin, "A Robust Nonlinear Control Approach To Automatic Path Tracking of A Car," *Proc. IEEE Int. Conf. Control '94*, pp. 196-201, 1994.
- 5) Todd Jochem, Dean Pomerleau, Charles Thorpe, "Vision Guided Lane Transition," *proc. of the Intelligent Vehicles '95*, pp. 30-35, 1995.
- 6) Albeto Broggi, "A Massively Parallel Approach to Real-Time Vision-Based Road Markings Detection," *proc. of the Intelligent Vehicles '95*, pp. 84-89, 1995.
- 7) W. Chee, M. Tomizuka, "Lane Change Maneuver of Automobiles for The Intelligent Vehicle and Highway System(IVHS)," *Proc. of the American Control Conference*, pp. 139-413, 1995.
- 8) Cem Hatipoglu, Umit Ozguner and Konur A. Unyelioglu, "Advanced Automatic Lateral Control Schemes For Vehicles on Highways," 1996 *IFAC 13th Technical World Congress*, San Francisco, USA, pp. 477-482, 1996.
- 9) P. Hingwe, M. Tomizuka, "Experimental Evaluation of a Chatter Free Sliding Mode Control for Lateral Control in AHS," *Proc. of the American Control Conference*, pp. 3365-3369, June 1997.
- 10) J. Ackermann, J. Guldner, W. Sienel, R. Steinhauser, "Linear and Nonlinear Controller Design for Robust Automatic Steering," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol.3, pp. 132-143, 1995.
- 11) T. Hessburg, M. Tomizuka, "Fuzzy Logic Control for Lane Change Maneuvers in Lateral Vehicle Guidance," *California PATH Working Paper UCB-ITS-PWP-95-13*, pp. 1-10, 1995.
- 12) M. Nagai, M. Onda, and T. Katagiri, "Application of genetic algorithm to analysis of driver's behaviour in collision avoidance," *Int. J. of Vehicle Design*, vol. 18 no. 6, 1997.
- 13) Massimo Bertozzi and Alberto Broggi, "GOLD: a Parallel Real-Time Stereo Vision System for Generic Obstacle and Lane Detection," *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 7, no. 1, pp. 62-81, 1998.
- 14) Zvi Shiller, Satish Sundar, "Emergency Lane-Change Maneuvers of Autonomous Vehicles," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 120, pp. 37-44, 1998.