

비전 센서 및 능동 조향 제어를 이용한 차선 이탈 방지 시스템 개발

허건수^{*1)} · 박범찬²⁾ · 홍대건²⁾

한양대학교 기계공학부^{*1)} · 한양대학교 대학원 정밀기계공학과²⁾

Development of a Lane Departure Avoidance System using Vision Sensor and Active Steering Control

Kunsoo Huh^{*1)} · Bumchan Park²⁾ · Daegun Hong²⁾

^{*1)}School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Dept. of Precision Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 12 May 2003 / Accepted 28 August 2003)

Abstract : Lane departure avoidance system is one of the key technologies for the future active-safety passenger cars. The lane departure avoidance system is composed of two subsystems; lane sensing algorithm and active-steering controller. In this paper, the road image is obtained by vision sensor and the lane parameters are estimated using image processing and Kalman Filter technique. The active-steering controller is designed to prevent the lane departure. The developed active-steering controller can be realized by steer-by-wire actuator. The lane-sensing algorithm and active-steering controller are implemented into the steering HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation) and their performance is evaluated with a human driver in the loop.

Key words : Lane departure avoidance(차선 이탈 방지), Vision sensor(비전 센서), Kalman filter (칼만 필터), Lane sensing(차선 감지), Active steering control(능동 조향 제어)

1. 서론

현재 ITS(Intelligent Transportation System)의 한 분야인 AVCS(Advanced Vehicle Control System) 연구에서는 차량 능동 조향제어를 수행하여 차선 이탈을 방지하는 운전자 보조 시스템에 대한 연구가 활발하다. 이러한 운전자 보조 시스템은 운전자를 간섭하지 않고 능동 조향 제어를 수행할 수 있는 최근의 steer-by-wire 기술을 통하여 구현 될 수 있다.

차선 이탈 방지 시스템은 차량이 운전자의 의지와 상관없이 외란이나 운전자의 부주의 또는 졸음 운전에 의한 차선 이탈을 방지할 수 있으며 이를 위

하여 차량이 운행중인 도로에 대한 차선의 정보가 필요하고 차선 이탈 조향 제어를 수행할 수 있는 능동조향 제어가 필요하다.

차선 감지 방법으로는 도로에 자석을 매설하여 자기장의 변화를 감지하는 방법과 비전센서를 사용하는 방법이 있으며, 현재에는 비전 센서를 이용하여 차선을 감지하는 방법이 다양하게 연구되고 있다.¹⁻⁵⁾

차선 이탈 방지를 위한 능동 조향 제어에 대한 기존의 연구로 Pilluti⁶⁾ 등은 비전 센서를 이용하여 차선을 감지하고 차량의 차선 이탈시 좌측 또는 우측 후륜에 제동력을 주어 차선 안으로 제어하는 제동 조향(brake steer)을 수행하였다.

*To whom correspondence should be addressed.

khuh2@hanyang.ac.kr

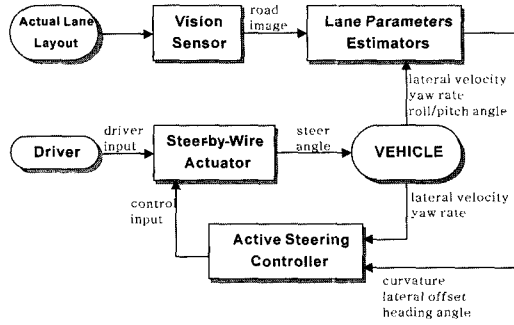


Fig. 1 The structure of lane departure avoidance system

본 논문에서는 차선의 정보를 획득하기 위하여 비전 센서를 사용하여 도로의 영상을 획득하였다. 획득된 도로의 영상 정보로부터 차선의 파라미터를 추정하였으며, 추정된 파라미터와 측정된 차량의 상태변수를 바탕으로 차량의 차선 이탈을 예측하였고, 차량의 차선 이탈이 예상되는 경우 차선 이탈을 방지하는 능동 조향 제어를 설계하였다. 능동 조향 제어기에서 제어 입력은 운전자의 조향각에 제어기에 의한 추가적인 조향각이 더해지는 방법을 사용하였으며, 이는 추가적인 조향 제어 입력이 운전자의 조향 휠에 전달됨이 없이 가할 수 있는 steer-by-wire 액추에이터를 사용하였다. 이러한 비전 센서 및 능동 조향제어를 이용한 차선이탈 방지 시스템의 구조는 Fig. 1과 같으며 크게 비전 센서를 사용하여 차선을 감지하는 부분과 능동 조향 제어기 부분으로 나눌 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 비전 센서를 이용한 차선감지 시스템에 대하여 서술하였으며, 3장에서 능동 조향 제어에 대하여 서술하였다. 그리고 4장에서 조향 HILS를 이용하여 알고리즘을 검증하였고, 마지막 5장에서 결론을 맺었다.

2. 차선 감지 시스템

2.1 차선 감지 시스템의 구조

본 논문에서 사용한 차선 감지시스템은 차량의 전방에 한 개의 CCD카메라를 장착하여 도로의 영상을 획득한 후 차선 파라미터 추정 알고리즘을 사용하여 차선의 곡률(curvature), 차량과 차선사이의 수평거리(lateral offset) 및 차량과 차선이 이루는 각(heading angle)을 추정하였다.

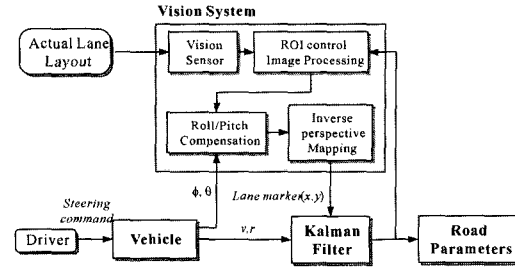


Fig. 2 The structure of lane sensing system

Fig. 2에서 보듯이 비전 시스템에서는 CCD 카메라를 이용하여 도로의 영상을 획득하고, 설정된 ROI(Region of Interest)에 대하여 영상 처리를 통해 차선 마커를 검출한다. 영상 평면에서 검출된 차선 마커는 역원근 변환을 통해 글로벌 좌표계로 변환된다. 칼만필터는 차량에서 출력되는 횡속도와 요우잉속도 그리고 비전 시스템에서 출력되는 차선 마커를 입력으로 하여 차선을 표현하는 파라미터를 추정한다. 추정된 파라미터는 또한 ROI를 설정하는데 이용된다.

좌표계는 Fig. 3과 같이 설정하였다. (X_g, Y_g, Z_g) 는 글로벌 좌표계이며, (X_v, Y_v, Z_v) 는 차량 좌표계이다. h_{cg} 는 글로벌 좌표계에 대한 카메라의 높이이며, ϕ 및 θ 는 차량의 롤 및 피치각이다. (X_c, Y_c, Z_c) 는 카메라 좌표계로서 차량 좌표계에 대해서 (l, w, h) 만큼 떨어져 있고, y 축을 중심으로 β 만큼 기울어져 있다. 그리고 (y, z) 는 영상 좌표계이다.

2.2 역원근 변환

원근 효과를 가진 입력 영상에서 역원근 변환을 이용하여 원근 효과를 제거하고 영상 평면의 위치 정보를 글로벌 좌표계의 위치 정보로 변환한다.

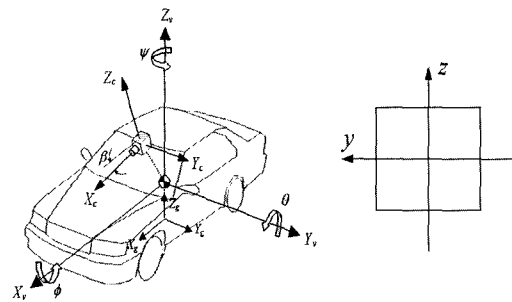


Fig. 3 Coordinate systems

먼저 카메라 좌표계에서 영상 좌표계로 변환은 카메라 핀홀(pin hole) 모델에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} z &= \lambda Z_c / X_c \\ y &= \lambda Y_c / X_c \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 λ 는 초점 거리이다. 따라서 역변환은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c \\ yX_c / \lambda \\ zX_c / \lambda \end{bmatrix} \quad (2)$$

카메라 좌표계에서 차량 좌표계로, 그리고 차량 좌표계에서 글로벌 좌표계로의 변환은 각각 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \\ w \\ h \end{bmatrix} + R_c \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h_{cg} \end{bmatrix} + R_v \begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, R_c 는 카메라 틸트각(tilt angle)에 의한 회전 행렬(rotation matrix)이고 R_v 는 차량의 롤, 피치 운동에 의한 차량 회전 행렬이다.

지면이 평면이라 가정하면 Z_g 는 0이므로 식 (2)와 (3)에 의해 식 (4)와 같이 X_c 가 구해진다.

$$X_c = \frac{-h_{cg} - R_v(3,1)l - R_v(3,2)w - R_v(3,3)h}{R(3,1) + yR(3,2)/\lambda + zR(3,3)/\lambda} \quad (4)$$

여기서, $R=R_cR_v$ 이다. 따라서 여기서 구한 X_c 를 이용하여 영상 평면으로부터 얻은 차선 좌표를 글로벌 좌표계로 역원근 변환을 할 수 있다.

2.3 칼만 필터를 이용한 차선 감지 모델

글로벌 좌표계에 대하여 차선은 다항식을 사용하여 식 (5)와 같이 근사화 할 수 있다.

$$Y_g(X_g) = c_{h0} + c_{h1}X_g + c_{h2}X_g^2/2 \quad (5)$$

여기서, c_{h0} 는 차량 중심과 차선과의 수평거리(lateral offset)이며, c_{h1} 은 차량과 수평차선이 이루는 각(heading angle), c_{h2} 는 수평차선 곡률(curvature)을 의미한다.

칼만필터를 이용하여 식 (5)의 차선 파라미터를 추정하기 위해서는 차선 파라미터의 동적 시스템을 구성해야 한다. Dickmanns²⁾는 차량의 운동과 도로 형상의 변화에 따라 동적으로 변하는 차선 파라미터를 다음 식 (6)과 같이 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} \dot{c}_{h0} \\ \dot{c}_{h1} \\ \dot{c}_{h2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & u & 0 \\ 0 & 0 & u \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{h0} \\ c_{h1} \\ c_{h2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 u 는 직진 방향 속도, v 는 횡속도, r 은 요우 임 속도이다. 식 (6)을 이산화하여 칼만필터를 설계 하였으며, 설계된 칼만필터로 식 (6)에서 상태변수인 차선의 파라미터 추정하였다. 여기서 측정값은 다음 식(7)과 같다.

$$Y_k = \begin{bmatrix} Y_{g1} \\ \vdots \\ Y_{gn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_{g1} & X_{g1}^2/2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_{gn} & X_{gn}^2/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{h0} \\ c_{h1} \\ c_{h2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

3. 능동 조향 제어 시스템

3.1 능동 조향 제어 시스템 구조

본 논문에서 차선이탈 방지를 위한 능동 조향 제어 시스템의 구조는 Fig. 4와 같다. 능동 조향 제어기는 차선 감지시스템에서 추정된 차선 파라미터를 바탕으로 주행중에 차량의 차선 이탈을 감지하는 부분과 차량의 차선 이탈 시 피드포워드 제어 및 피드백 제어를 수행하는 조향 제어기로 구성되어 있다. 그리고 제어기에서의 조향입력은 steer-by-wire 액추에이터를 사용하여 운전자의 조향각과 더해져서 차량에 전달된다.

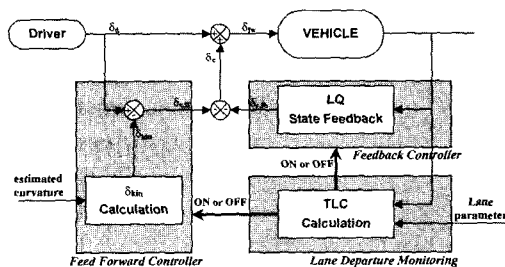


Fig. 4 Blockdiagram of the active steering controller

3.2 차선 이탈 감지

차량의 주행시 차선의 이탈 감지는 앞 장에서의 차선 감지 시스템으로부터 추정된 차선 파라미터와 현재 차량의 상태를 입력받아 차량 및 도로의 진행 방향을 예측하여 차량의 중심(CG)이 차선을 이탈하게 될 시간까지를 나타내는 값인 TLC(Time-to-Lane Crossing)를 계산한다.

차량의 2자유도 모델에 현재 차량의 조향각, 요속도 및 횡속도를 입력하여 현재시점에서 차량의 미래 궤적을 예측하고, 차선 감지 시스템으로 추정된 차선 파라미터를 바탕으로 차선의 방정식을 계산하여 차선의 형상을 예측한다. 이렇게 예측된 차량의 미래 궤적과 차선의 형상이 만나는 점까지의 시간을 계산하면 차량이 차선을 이탈하는데 걸리는 시간을 계산할 수 있다.

3.3 조향 제어기 설계

전 절에서 계산된 TLC에 따라 차량이 차선을 이탈하게 되면 조향 제어기가 작동하게 된다. 본 논문에서는 TLC가 1초 이하일 때 조향 제어기가 작동하도록 구성하였다. 본 논문에서 제안하고 있는 조향 제어 알고리즘은 피드포워드 제어기와 피드백 제어기로 구성되어 있다. 피드포워드 제어기는 차량의 운행 궤적이 차선의 곡률을 따라가도록 제어하는 부분이며 피드백 제어기는 차량이 차선 이탈시 차선 안으로 들어오도록 제어하는 부분이다.

차량의 2자유도 모델식은 다음 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{v} &= \left(\frac{2C_1 + 2C_2}{mu} \right) v + \left(\frac{2C_1 a - 2C_2 b}{mu} - u \right) r - \frac{2C_1}{m} \delta_d \\ \dot{r} &= \left(\frac{2C_1 a - 2C_2 b}{I_z u} \right) v + \left(\frac{2C_1 a^2 + 2C_2 b^2}{I_z u} \right) r - \frac{2C_1 a}{I_z} \delta_d \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 u 는 차량의 직진속도, v 는 횡속도, r 은 요속도, δ_d 는 운전자가 주는 조향각이며, m 은 차량의 질량, I_z 는 z축에 대한 관성 모멘트를 나타내고, a 와 b 는 무게중심에서 전륜 및 후륜까지의 거리를 나타내며 C_1 및 C_2 는 타이어의 코너링 강성계수이다.

식 (8)에서 정상상태 조향(steady state cornering)에서의 조향각과 곡률과의 관계를 구하기 위하여 가속도 항을 0으로 두고 $r=u/R$ 을 대입하여 조향각

에 대하여 정리하면 식 (9)와 같이 차선의 곡률로 주행하기 위하여 필요한 조향각을 계산할 수 있다.

$$\delta_{kin} = \left((a+b) + \frac{(C_1 a - C_2 b) mu^2}{2(C_1 C_2 (a+b))} \right) \hat{k} \quad (9)$$

여기서 δ_{kin} 는 곡률에 따른 정상상태 조향시 요구되는 조향각이며, \hat{k} 는 차선의 곡률이며 R 은 $1/\hat{k}$ 이다.

따라서 차선의 곡률에 따른 조향각 보상값인 피드포워드 조향제어 입력은 다음 식 (10)과 같이 계산된다.

$$\delta_{c,ff} = -(\delta_d - \delta_{kin}) \quad (10)$$

여기서 $\delta_{c,ff}$ 는 피드포워드 조향 제어 입력값이다.

피드백 제어기는 차선 이탈시 차선 안쪽으로 차량이 들어오도록 능동적으로 제어하는 부분으로 LQ 제어기를 적용하였다. LQ 제어기의 설계를 위하여 차량모델과 차선 모델을 결합하여 제어기 설계를 위한 새로운 운동방정식을 유도하였다.

차량에 운전자에 의한 조향각과 제어기에 의한 조향각이 함께 입력이 될 때의 차량의 2자유도 모델식은 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{v} &= \left(\frac{2C_1 + 2C_2}{mu} \right) v + \left(\frac{2C_1 a - 2C_2 b}{mu} - u \right) r - \frac{2C_1}{m} \delta_d - \frac{2C_1}{m} \delta_c \\ \dot{r} &= \left(\frac{2C_1 a - 2C_2 b}{I_z u} \right) v + \left(\frac{2C_1 a^2 + 2C_2 b^2}{I_z u} \right) r - \frac{2C_1 a}{I_z} \delta_d - \frac{2C_1 a}{I_z} \delta_c \end{aligned} \quad (11)$$

차선 파라미터의 운동방정식은 식 (12)와 같이 단순화 하여 적용하였다.

$$\dot{y}_e = -v - u \psi_e, \quad \dot{\psi}_e = -r \quad (12)$$

식 (11)과 식 (12)를 결합하고 차량과 차선사이의 거리의 적분식을 상태변수로 추가하여 식 (13)의 상태변수를 가지는 LQ 제어기 설계를 위한 운동방정식을 구성하였으며 식 (14)과 같다.

$$x = \left[v \quad r \quad y_e \quad \psi_e \quad \int y_e \right] \quad (13)$$

$$\dot{x} = A \cdot x + G \cdot \delta_d + B \cdot \delta_c \quad (14)$$

위 운동방정식으로 식 (15)의 성능지수를 최소화 하는 LQ 제어기를 설계하였으며 따라서 피드백 제어기의 제어입력은 식 (16)과 같다.

$$J = \int_0^{\infty} \left(q_y y_e^2 + q_\psi \psi_e^2 + q_i \left(\int y_e \right)^2 + q_p \delta_c^2 \right) dt \quad (15)$$

$$\delta_{c,fb} = -Kx \quad (16)$$

여기서, q_y, q_ψ, q_i, q_p 는 가중치(weighting factor)이며, K 는 LQ 게인, $\delta_{c,fb}$ 는 피드백 조향 제어 입력값이다.

따라서 능동 조향 제어기에서의 조향 제어 입력은 다음 식 (17)과 같으며 steer-by-wire 액츄에이터에서 차량으로 입력되는 조향각은 운전자의 조향각에 조향 제어기의 조향 입력이 더해져서 식 (18)과 같다.

$$\delta_c = \delta_{c,ff} + \delta_{c,fb} = -(\delta_d - \delta_{kin}) - Kx \quad (17)$$

$$\delta_{fw} = \delta_d + \delta_c \quad (18)$$

여기서, δ_d 는 운전자의 조향 입력각이고, δ_c 는 조향 제어기에서의 조향 입력각이며, δ_{fw} 는 차량의 전륜 조향각이다.

4. 조향 HILS를 이용한 검증

본 논문에서 제안한 차선이탈 방지시스템을 조향 HILS(Hardware-In-the-Loop Simulator)를 이용한 실험을 통하여 검증하였다. 실험에 사용된 조향 HILS는 Fig. 5와 같이 차량동역학 모델을 가지고 있는 시뮬레이션 프로그램과 조향 휠을 포함한 하드웨어로 구성되어 있으며, 운전자에 의한 조향 입력은 조향각 센서를 통하여 컴퓨터로 전달된다. 운전자에게 실제와 같은 환경을 만들어 주기 위해서 BLDC모터를 사용하여 조향 휠로부터 느낄 수 있는 복원 토크(self-aligning torque)가 구현되어 있으며 또한 연속적인 운전자의 조향 입력에 따른 차량의 운동이 애니메이션(animation)으로 보여지게 되어있어 운전자는 실제 도로에서 운전하는 것과 비슷한 환경에서 운전 동작을 할 수 있도록 구성 되어있다.

이러한 조향 HILS에 본 논문에서 제안한 차선 감

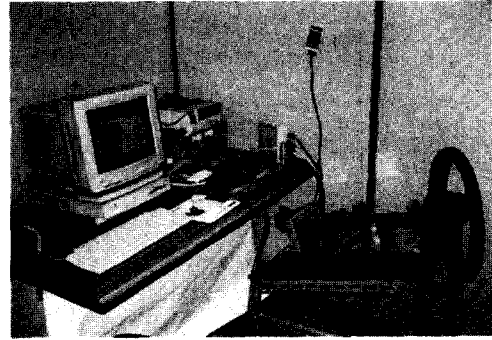


Fig. 5 Steering HILS

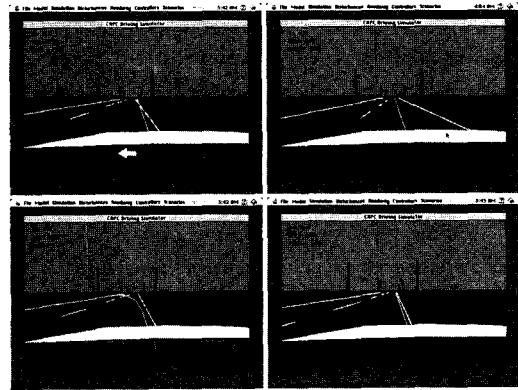


Fig. 6 Graphical simulation result

지 시스템과 능동 조향 제어 시스템을 적용하여 실험을 수행하였다. 실험은 차량이 90km/h의 속도로 직선 도로를 등속 주행하고 있을 때 차선 감지 알고리즘으로부터 좌측 차선은 접선이며, 우측 차선은 실선으로 구성된 차선의 파라미터를 감지하고 운전자가 임의로 우측 차선을 두 번 이탈했을 때의 조건으로 수행 되었다.

실험 결과는 Fig. 6 ~ Fig. 9에 나타내었으며, 차량이 차선을 이탈하는 경우 능동 조향 제어기에 의해 차량이 차선 안쪽으로 제어됨을 볼 수 있다.

Fig. 6은 차량이 조향 제어될 때 조향 HILS의 화면을 나타낸 그림이다. 차량이 정상주행을 하다가 운전자에 의해 차량이 우측 차선 밖으로 첫 번째 이탈한 경우로 차량의 방향이 도로의 가장 자리를 향하게 되면 TLC는 줄어들고 TLC가 1초보다 작아지면 차량이 차선을 벗어나게 되어 조향 제어 장치가 작동하여 차량이 차선 안으로 들어오고 있음을 보여준다. 그림에서 우측 위 그림과 좌측 아래 그림 사이

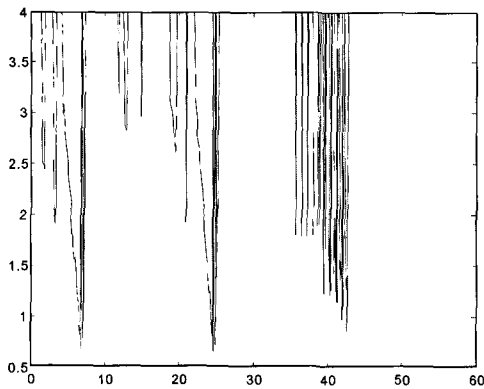


Fig. 7 TLC (Time-to-Lane Crossing)

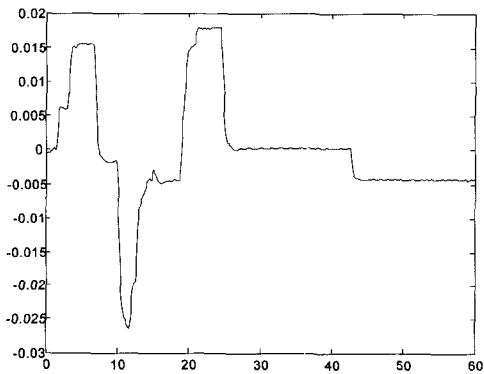


Fig. 8 Heading angle

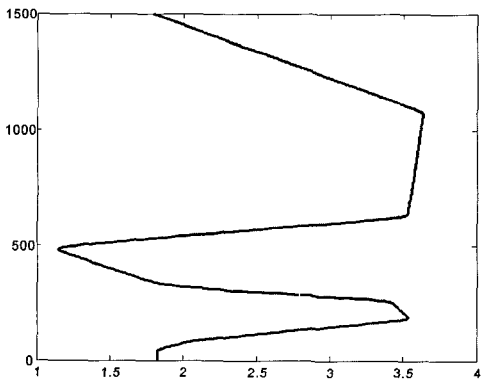


Fig. 9 Vehicle trajectory

에서 조향 제어가 수행되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 계산된 TLC를 도시한 그래프로 시간이 약 8초 및 약 25초 구간에서 TLC가 1초보다 작아지고 이 때 제어가 수행되어 다시 TLC가 증가함을 보여주고 있다. Fig. 8은 차량과 차선이 이루는 각 (heading angle)의 추정값을 나타낸 것으로 조향 제

어가 수행되는 구간에서 이 값이 0으로 떨어짐을 볼 수 있다. Fig. 9는 차량의 궤적으로 차량이 차선을 벗어나는 경우 조향 제어가 수행된 결과를 보여준다.

5. 결론

본 논문에서는 비전센서 및 능동 조향 제어를 이용하여 차선 이탈 방지 시스템을 개발하였다. 차선 이탈 감지시스템은 차선감지 시스템과 능동 조향 제어 시스템으로 구성되며, 차선감지 시스템에서는 CCD 카메라에서 입력된 도로 영상을 바탕으로 차선의 파라미터를 추정하였으며, 능동 조향 제어 시스템에서는 추정된 차선 파라미터를 바탕으로 차량이 차선을 이탈하는 것을 예측하고, 차선을 이탈하지 않도록 추가적인 조향 입력을 주는 조향 제어기를 개발하였다. 개발된 알고리즘은 조향 HILS를 통하여 검증하였고, 이를 통하여 운전자의 의지와 상관없이 차량이 차선을 이탈하는 경우 차선 안으로 제어됨을 보였다.

이러한 steer-by-wire 액추에이터를 이용한 차선 이탈 방지 시스템은 기존의 연구 방법인 브레이크 조향 제어의 단점이었던 속도 저하 및 늦은 응답 속도를 개선 할 수 있을 것으로 판단되고, 향후 연구로 제안된 제어기의 안정성 및 강인성을 검토하고 실차에 적용하기 위한 강인한 차선 감지 알고리즘 개발을 수행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 지원으로 수행되었음(과제번호: R01-2000-000-00301-0).

References

- 1) C. F. Lin, A. G. Ulsoy, and D.J. LeBlanc, "Lane Geometry Reconstruction: Least Square Curve Fit Versus Kalman Filter," ASME Advanced Automotive Technologies, DSC-Vol.56/DE-Vol.86,pp.63-70, 1995.
- 2) E. D. Dickmanns, B. D. Mysliwetz, "Recursive 3-D Road and Relative Ego-state Recognition," IEEE Trans. on PAMI, Vol.14, No.2, pp.199-213, 1992.

- 3) A. Takahashi, Y. Ninomiya, "Model-Based lane recognition," Proc. IEEE Intelligent Vehicles 96, pp.162-166, 1996.
- 4) K. Huh, Y. Park, "Development of a Robust Lane-Sensing System Using Vision Sensors," Proceedings of AVEC'02, pp.769-774, 2002.
- 5) J. W. Park, J. Y. Song, K. Y. Jhang, I. S. Chang, J. W. Lee, "The Detection of Traffic Lanes and the Distance to the Forward Vehicle using the Machine Vision," Transactions of KSAE, Vol.7, No.3, pp.310-320, 1999.
- 6) T. Pilutti, G. Ulsoy, D. Hrovat, "Vehicle Steering Intervention Through Differential Braking," Proc. of the American Control Conference, pp.1667-1671, 1995.