한국자동차공학회논문집 제9권 제3호, pp.143~154

에지분포함수 기반의 차선이탈경보 알고리즘

A Lane Departure Warning Algorithm Based on an Edge Distribution Function

이 준 웅*, 이 성 웅*
Joon Woong Lee, Sung Woong Lee

ABSTRACT

An algorithm for estimating the lane departure of a vehicle is derived and implemented based on an EDF(edge distribution function) obtained from gray-level images taken by a CCD camera mounted on a vehicle. As the function of edge direction, the EDF is aimed to show the distribution of edge direction and to estimate the possibility of lane departure with respect to its symmetric axis and local maxima. The EDF plays important roles: 1) It reduces noisy effects caused by dynamic road scene. 2) It makes possible lane identification without camera modeling. 3) It also leads LDW(lane departure warning) problem to a mathematical approach. When the situations of lane departure such that the vehicle approaches to lane marks or runs in the vicinity of the lane marks are occurred, the orientation of lane marks in images is changed, and then the situations are immediately reflected to the EDF. Accordingly, the lane departure is estimated by studying the shape of the EDF.

The proposed EDF-based algorithm enhanced the adaptability to cope with the random and dynamic road environments, and eventually led to the reliable LDW system.

주요기술용어 : LDW system(차선이탈경보시스템), Computer vision(컴퓨터비전), Edge distribution function(에지분포함수), Symmetric axis(대칭축)

1. 서 론

1.1 차선이탈경보시스템

차선이탈인식기술은 차량의 횡방향제어를 위한 센싱기술로서 차선이탈경보 및 방지시스템 구현의 발판이 된다.[1-3] 차선이탈경보 및 방지시스템은 주행시 차량이 운전자의 의지와 무관하게 주행차선을 벗어날 경우 이로 말미암아 발생될 수 있는 사고를 미연에 방지하려는 기술이다. 예기치 않는 차선이탈은 운전중 잡담, 졸음, 휴대전화의 사용, 계기판 위의 기기조작, 넥타이착용 등과 같은 운전자의 순간적인 부주의 상황에서 일

* 회원, 전남대학교 산업공학과

어난다. 이러한 차선이탈로 인해 야기될 수 있는 안전사고를 미연에 예방하기 위해 차선이탈 직전에 운전자에게 경보를 내보냄으로써 운전자의 경각심을 고취시키고, 운전자의 핸들조정을 유도하여 원치 않는 차선이탈을 방지하려는 것이 차선이탈경보시스템이다. 즉, 차량을 차선의 중심부에서 잘 주행할 수 있도록 하는 목적을 갖는다고 볼 수 있다.

1.2 차선이탈가능성의 예측

본 연구에서 차선이탈경보는 주행중인 차량의 바퀴가 차선을 벗어나기 직전에 작동되는 것을 목표로 한다. 따라서 차량이 차선으로의 접근여부를 판단할 수 있어야 한다. 경보발생 시점은 현장에서 시험결과를 바탕으로 결정되는 파라메터이지만 차량이 차선중앙으로부터 벗어난 정도는 알고리즘이 판단해야 한다.

차선이탈인식방법 가운데 하나는 차량을 차선중앙에 위치시키고 얻은 영상에서 좌우차선사이의 중심위치를 찾아내 이를 입력상수로 두고, 실제 주행중에 입력된 영상에서 검출된 중심위치를 입력상수인 중심과 비교하여 두 중심 사이의 변위(offset)를 계산하고, 여기에 차량폭과 차선폭 정보를 이용하여 경보시점을 정하는 것을 들 수 있다.[5, 6] 이 방법은 단순해 보이지만 카메라캘리브레이션을 필요로 하고 차량폭과 차선폭 그리고 카메라 설치위치가 변할 때는 입력값을 수시로 바꾸어야 하는 한계를 안고 있다. 또한 차선검출은 반드시 차선의 위치인식을 의미하는 것으로 위치에러 발생시 오경보 상황이 도래된다. 또 다른 유사한 방법으로 차선과 내 차량이 만나는 시간(time to contact)을 계산하여 경보시점을 정하는 것이 있다.

한국에서 포장된 도로의 대부분은 도색된 차선마크에 의해 차선이 표시되어 있기 때문에 차량의 차선이탈여부를 판단할 수 있는 적절한 수단은 차선정보의 변화를 알아내는 것이다. 도색은 흰색, 노란색, 청색 등 세 종류로 되어 있다. 현재 알려진 바로는 도색된 차선마크를 인식할 수 있는 가장 적절한 방법은 컴퓨터비전 기술을 이용하는 것이다.[4,5,8,9] 컴퓨터비전에 의한 차선인식은 차선의 도색상태나 자연환경조건, 도로의 형태 등 많은 잡음요인에 의해 그 신뢰성이 큰 영향을 받지만 현실적으로 이를 대체할 마땅한 대안도 없다. 신경망에 기반한 ALVINN[9]이나 영상의 특징점에 기반한 RALPH[5], GOLD[7] 등이 컴퓨터비전기술을 이용하여 차선을 인식하고, 그 결과를 차량의 자율주행에 이용하려 했던 방법들이다. 그러나 컴퓨터비전기술은 신뢰성확보나 실시간처리에 문제점을 안고 있기 때문에 추출된 영상정보를 어떻게 최적으로 활용하느냐와 차선표식이 가지고 있는 성질을 어떻게 잘 추론하느냐가 신뢰성확보와 실시간처리 문제 해결의 관건이다.

본 논문에서는 기존 연구에서 어려운 점으로 알려진 카메라캘리브레이션, 차선위치인식, 그리고 차선과 카메라간의 기하학적 모델링 등이 없이도 강인한 차선이탈인식 알고리즘을 구현할 수 있다는 것을 보여줄 것이다. 기본 아이디어는 차선내에서의 차량의 주행위치가 변하면 입력영상에 나타난 좌우차선경계의 기울기도 동시에 변한다는 사실에 의해 이 차선경계의 기울기의 변화량을 검출하면 차선이탈가능성을 판단할 수 있으리라는 것이다. 이 아이디어 구현을 위해 1차원의 에지분포함수인 EDF(edge distribution function)를 정의했다. 수학적으로 어떤 함수나 시그널은 우함수와 기함수의 합으로 표현할 수 있고, 두 함수의 에너지량의 분포비율에 의해 함수의 대칭축의 위치를 알 수 있다고 알려졌다.[12] 이러한 원리를 적용하면 EDF의 대칭축의 위치를 찾아낼 수 있다. 영상에서 차선경계의 방향을 0°에서 180°까지 정의했을 때, 차량이 차선중앙을 주행할 때는 좌우차선경계의 기울기가 90°를 중심으로 대칭성을 이루지만, 차량이 차선중앙을 벗어나 좌우 어느쪽의 차선경계에 가까이 접근할 때는 좌우차선경계의 대칭축의 위치도 90°를 벗어난다. EDF는 입력영상에 나타난 차선경계의

기울기변화를 잘 묘사하고 대칭축 검출을 가능케 하므로 EDF를 분석하면 곧바로 차선이탈여부를 판단할 수 있다. EDF에 의한 차선이탈인식은 차종이나 차선폭, 승원의 수, 언덕을 올라갈 때나 내려갈 때, 넓은 도로나 좁은 도로 등에 영향을 받지 않는 장점을 가지고 있다.

에지는 수학적으로 영상의 밝기정보의 기울기이므로 두 가지 중요한 물리량인 크기와 방향에 의해 정의된다.[11] 차선이탈인식을 위한 영상처리 알고즘에 영상의 특징으로 에지를 선택하게 된 동기가 바로 이 두가지 물리량에 의해 입력영상에 나타난 차선경계의 기울기를 묘사할 수 있으라는 기대 때문이다. 그러나 에지는 미분의 결과로서 잡음에 민감하기 때문에 에지정보를 잘 가공하여 사용할 필요가 있다.[4] 논문의 근간을 이루는 EDF도 추출된 에지의 크기를 방향에 대해 누적시키는 등 재가공함으로써 에지정보의 효율성을 높이는 시도를 하고 있다.[4,9,10]

경보시스템의 로직은 크게 두 가지로 구성된다. 1) 영상처리기술에 의해 도로상의 차선표식을 인식하여 차량이 차선중앙으로부터 벗어난 정도를 파악하고 차선이탈가능성을 예측하는 부분, 2) 속도나 조향각, 턴시그날(turn signal) 등 차량주행정보를 계측하여 운전자가 차선변경을 하려는 의지가 있는지를 파악하는 부분이다. 영상처리에 의하여 차선이탈가능성이 예측되어도 차선을 변경하고자 하는 운전자의 의지가 확인되면 경보음은 내보내지 않는다.[9] 단, 후자는 본 논문에서 다루지 않는다.

2. 에지분포함수

2.1 영상처리영역설정

본 논문에서는 차량내에 설치된 카메라의 광축은 차량중심인 OBL과 일치되고, 틸트(tilt)각과 롤(roll)각도 0°라는 가정을 한다. 이러한 가정하에서 영상에 보이는 차선의 소실점(vanishing point)은 영상의 중심에 위치하므로 차선은 수직방향의 영상중심 아래부분에만 나타난다.[13] 따라서 차선정보 추출을 위한 영상처리는 영상의 중심 아래부분에 국한한다. 또한 처리영역 설정시 차선은 수평과 수직에 가까운 즉, 0°, 180°, 90° 근방에는 존재하지 않을 것이라는 가정을 했다. 실제 진입로(ramp)와 같은 급커브 도로를 제외하면 영상에서 수평방향의 차선은 나타나지 않는다. 또한 차량이 차선을 타고 주행하지 않는다면 90° 근방의 수직성분의 차선도 나타나지 않는다. 이러한 제약조건과 가정에 의하여 설정된 영상처리대상 영역은 그림1에 보인 빗금친 부분으로 하였다. 그러나 이 영역은 고정시키지 않고 차량이 어느쪽 차선으로 접근하느냐에 따라 가변적으로 운영한다.

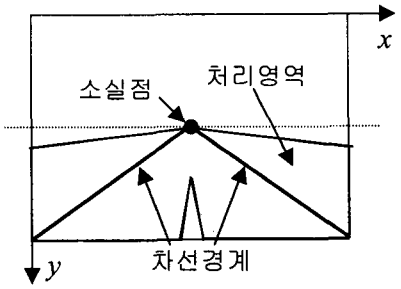


Fig. 1 영상처리영역 설정

2.2 에지추출

논문에서는 도로의 차선에 대해 다음과 같은 가정을 한다. 1) 차선표식은 배경에 비해 밝은 색으로 도색되어 있다. 2) 차선의 방향은 급격히 변하지 않고 연속성을 갖는다. 실제로 도로영상에 대해 에지추출시 차선표식의 경계부가 다른 곳에 비해 뚜렷이 나타나는 것은 차선의 첫 번째 가정이 성립되기 때문이다. 두 번째 가정은 에지의 방향과 크기의 조합에 의해 묘사될 수 있으며, 이는 다음절의 EDF 정의의 동기가 된다. 이 두가지 가정을 뒷받침할 수 있는 사실을 추론하기 위해 영상의 특징으로 에지를 선택하였다. 에지는 밝기값의 차가 큰

곳에서 뚜렷하게 나타나고 방향성분을 가지고 있기 때문에 이러한 목적에 부합된다고 본다. 논문에서는 3×3 소벨(Sobel) 연산자[11]를 이용하여 2.1절에서 설정한 처리영역에 대해 에지를 추출한다. 이때 에지는 영상 $f(x,y)$의 한 점 (x,y)에서 다음 식 (1)과 같이 벡터로 표현되며, 이 벡터는 식 (2)와 (3)과 같이 크기와 방향성분으로 표현된다.

$$\nabla \mathbf{f} = [G_x\ G_y]^T = \left[\frac{\partial f}{\partial x}\ \frac{\partial f}{\partial y}\right]^T \tag{1}$$

$$\nabla f(x,y) = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2} \approx |G_x| + |G_y| \tag{2}$$

$$\alpha(x,y) = \tan^{-1}(G_y/G_x) \tag{3}$$

에지추출에서 방향계산은 많은 시간을 요하는 연산이므로 처리시간을 줄이기 위해 에지방향에 대한 LUT (look-up table)을 미리 구축해 놓고 에지 추출시 매 픽셀마다 식 (3)에 의한 방향값 계산없이 식 (1)의 G_x, G_y 성분에 의해 곧바로 LUT에서 대응되는 값을 찾아 에지픽셀의 방향값으로 한다. 에지추출에 있어서 또 다른 중요한 점은 문턱치(threshold value)의 갱신이다. 차선경계에 있는 에지픽셀들은 다른 픽셀들에 비해 크기는 크지만 수량이 많지 않기 때문에 차선경계에 위치한 에지픽셀들을 가능한 부각시키려면 크기가 작은 픽셀들을 제거해야 한다. 이 때 크기의 임계값이 문턱치(threshold value)인데 이 값의 선정은 컴퓨터비전의 오랜 딜레마가운데 하나이다. 본 논문에서는 사용자의 개입없이 알고리즘 스스로 입력영상의 밝기변화에 적응될 수 있는 임계값 갱신방법으로 저자의 논문[1]에 기술되어 있는 방법을 사용한다.

2.3 EDF

도로차선에 대해 2.2절에서 언급한 두 가지 가정외에 좌우차선이 평행하다는 가정을 할 수 있다. 이 가정과 2.1절의 카메라설치에 관련된 제약조건에 의해 차선중앙에서 얻은 영상의 차선방향은 90°를 중심으로 좌우대칭을 이룬다. 논문에서 이 세 가지 가정을 뒷받침할 수 있는 사실을 동시에 추론하기 위해 다음과 같이 에지방향에 대한 1차원의 이산함수로 EDF를 정의한다.

$$F(d) = \sum_{n(d)} \nabla f(x,y) \tag{4}$$

여기에서 $n(d)$는 에지방향이 $d = \alpha(x,y)$인 에지픽셀의 수량이며 $\nabla f(x,y)$는 식 (2)의 에지크기를 나타낸다. 이때 $n(d)$를 얻기 위해 에지방향 $\alpha(x,y)$를 0°부터 180°사이에서 정의하고 1°단위로 양자화한다. 이렇게 정의된 EDF는 에지영상에서 가장 지배적인 방향이 어디인지와 입력된 영상의 촬영위치가 차선의 중앙인지 아닌지를 추론할 수 있는 정보를 제공한다.

EDF의 구축을 위해 그림 2와 같이 1°단위로 양자화된 각도에 맞게 181개의 셀로 된 1차원의 파라메터 스페이스(parameter space)를 설계했다. 파라메터 스페이스의 모든 셀을 0으로 초기화한 후, 에지픽셀의 방향에 해당되는 셀을 찾아서 그 셀의 현재의 값에 고려하고 있는 픽셀의 에지크기를 더해 준다. 이와 같이 구축된 파라메터 스페이스는 그림 3의 (b)와 같은 형상을 보일 것으로 기대한다. 즉, 그림 3(a)에서 보인 좌우차선방향에 해당되는 각도 θ_1과 θ_2의 근방에서 큰 값을 갖고, θ_1과 θ_2사이에 좌우대칭성을 만족시키는 대칭축이 존재할 것이다.

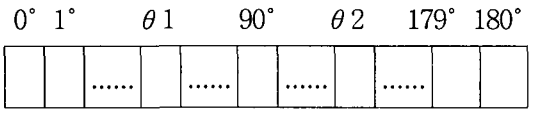
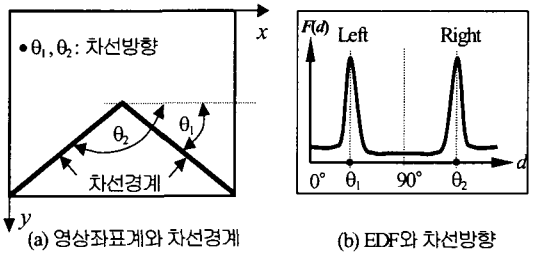


Fig. 2 EDF구축을 위한 파라메터 스페이스



(a) 영상좌표계와 차선경계 (b) EDF와 차선방향

Fig. 3 EDF와 차선방향

이와 같이 정의된 EDF는 다음과 같은 두 가지 특징을 가지고 있다. 첫째 차선경계의 방향에 해당되는 각도의 근방에서 큰 값을 갖는다. 그 이유는 차선방향은 급격한 변화없이 연속성을 가지고 있지만 차선이외의 객체들은 이런 특성을 가지고 있지 않기 때문이다. 따라서 90°를 경계로 좌우에 뚜렷한 값을 가진 로칼 맥시마(local maxima)가 존재하지 않을 때는 입력영상에서 차선의 방향성분을 판별해내기가 쉽지 않음을 알 수 있다. 둘째 함수는 축 대칭인 우함수(even function)와 원점 대칭인 기함수(odd function)의 합으로 나타낼 수 있다는 원리에 의해 EDF도 우함수와 기함수로 분리할 수 있다. 그러므로 EDF의 이런 두 가지 특징은 차선이 영상에 잘 드러나 있는지와 차량이 좌우차선의 중앙에서 주행하고 있는지를 추론할 수 있는 역할을 한다.

EDF의 로칼 맥시마로부터 차선방향을 유추할 수 있지만 영상에 존재하는 여러 가지 잡음 때문에 단일 프레임만 가지고는 어려울 때가 있다. 따라서 최근의 연속적인 N개의 입력영상 각각에 대하여 식 (4)의 EDF를 얻어 이것들의 누적을 취하면 랜덤한 잡음의 효과가 사라지고 차선방향에 대한 일관성이 좀더 뚜렷이 나타날 것이다. 이러한 개념하에 다음 식 (5)와 같이 이동합(moving sum)으로 설계된 EDF 예측기를 구축한다. 식 (6)은 예측기를 처리시간 단축을 위해 순환필터(recursive filter)로 나타낸 것이다.

$$\hat{H}_k(d) = \sum_{i=k-N+1}^{k} F_i(d), \quad k \geq N \tag{5}$$

$$\hat{H}_k(d) = \hat{H}_{k-1}(d) - F_{k-N}(d) + F_k(d), \quad k \geq N+1 \tag{6}$$

여기에서 k는 현재 프레임을 나타내며 프레임수 N은 실험적으로 결정한다. 이렇게 이동합으로 설계된 순환필터는 가정된 상태(state)에서 천이(transition)가 발생해도 현재 상태의 효과가 1/N만큼은 반영되므로 발산하지 않고 다시 수렴하는 장점을 가지고 있다. 따라서 차선변경과 같은 운전상황에서도 EDF의 추종이 발산하지 않고 이루어진다. 반면에 칼만필터는 가정된 스테이트가 안정상태가 되었을 때 칼만게인은 매우 작은 값을 갖게 된다.[14] 따라서 안정상태에 천이가 생겼을 때 측정레지듀(measurement residual)에 칼만게인을 반영하면 상태변수에 미치는 효과가 매우 적으므로 천이상태 이후에 발산하거나 아니면 수렴속도가 매우 늦은 단점을 보인다.

2.4 입력영상의 잡음도 분석

도로환경은 여러 잡음요인에 의하여 심지어는 사람 눈으로도 차선식별이 어려운 경우가 있다. 예를 들어 도로표면이 심하게 마모된 경우, 강우시, 톨게이트 진출입시, 전방차량에 의해 차선이 가려 있을 경우 또는 터널 입출구에서 순간적으로 조도차가 심하게 발생할 때, 시멘트포장도로에서 햇빛이 강하게 반사될 때 등이 차선 식별이 어려운 경우로 볼 수 있다. 차선식별정보에 의존하여 제어를 하는 시스템에서 이런 상황이 발생했을 때 이를 인지하지 않고 검출된 차선정보를 토대로 행한 액츄에이팅은 신뢰성을 보장할 수 없을 뿐 아니라 역으로 위험을 초래할 수 있다. 따라서 쉬운 일은 아니지만 시스템이 사전에 이러한 상황을 감지해 낼 수만 있다면 에러가 있는 정보로 시스템을 동작시키는 오류는 피할 수 있을 것으로 판단된다.

이를 위해 논문에서는 먼저 그림 3의 (b)와 같이 EDF를 90°를 중심으로 왼쪽과 오른쪽으로 나누고 나눠진 각 영역의 평균 μ와 표준편차 σ를 계산한다. 그리고 이 두 통계량의 비 μ/σ를 취해 보면 입력영상에서 차선표식의 윤곽이 잘 드러났는지의 여부를 알 수 있다. 여기에서 μ/σ를 잡음도지수라 명명한다. 차선표식의 윤곽이 잘 드러난 영상은 차선경계에서 얻어진 에지픽셀들이 그림 3의 (b)에서 보여준 바와 같이 EDF가 큰 값을 갖도록 한다. 따라서 함수의 평균 μ에 비해 표준편차 σ가 큰 값을 갖게 되고 결과적으로 μ/σ 값은 작아진다. "차선윤곽이 잘 드러난 영상에서 μ/σ 값이 작다." 라는 명제는 항상 성

립하지만 그 역은 성립하지 않는다. 즉 μ/σ가 작다고 해서 항상 영상에서 차선윤곽이 잘 보이는 것은 아니다. 잡음도지수 μ/σ는 입력영상의 잡음도 해석에 필요조건은 되지만 충분조건은 못된다. 이러한 사실 때문에 현재 개발된 알고리즘에서는 입력영상의 잡음도 해석에 한계를 안고 있다. 이를 극복할 수 있는 특징을 찾아내는 것이 앞으로의 과제이다.

3. LDW시스템의 경보조건

3.1 EDF의 대칭성

어떤 함수 $f(x)$는 우함수 $f_e(x)$와 기함수 $f_o(x)$의 합으로 나타낼 수 있으며 각각은 다음과 같이 표현된다.

$$f_e(x)=\frac{f(x)+f(-x)}{2},\quad x\in(-\varphi/2,\varphi/2)$$
$$f_o(x)=\frac{f(x)-f(-x)}{2} \tag{7}$$

여기서 φ는 함수$f(x)$가 정의되는 구간이다. 특히 우함수는 축대칭성을 나타내고, 기함수는 원점에 대한 대칭성을 묘사하는 특징이 있다.

이러한 수학적 배경을 토대로 차량이 좌우차선 어느 쪽으로도 치우침 없이 중심부를 잘 주행하고 있는지의 추론은 90° 근방에서 EDF가 어느 정도로 우함수에 의해 지배되는지를 계산함으로써 이루어진다.

- 대칭축 탐색구간 설정

EDF의 대칭축은 차량이 도로 중심부를 주행할 때는 90°근방에서 나타나지만 주행위치가 중심부에서 치우쳐질수록 대칭축의 위치도 90°에서 벗어난다. 대칭축 탐색구간 β는 차선변경시에도 그 위치를 알아내기 위하여 다음과 같이 실험적으로 설정하였다. 즉, $\beta:90°\pm40°\,(50°\le\beta\le130°)$.

- 대칭축의 위치를 탐색하기 위한 함수의 평가 구간(evaluation interval)

실제 고속도로 영상에서 보이는 자차량의 주행차선 방향은 사용된 렌즈의 광학특성에 의해 다소 차이가 나지만 EDF가 정의되는 범위 0°~180°에서 15°미만이나 165°이상에서는 나타나지 않는다고 가정한다. 이에 따라 대칭축의 위치를 탐색하기 위한 EDF의 평가 구간 w는 150°로 정한다. 물론 w를 180°로 정해도 무방하지만 계산시간만 더 소요되므로 효율적이지 못하다.

- 대칭성척도 (Symmetry Measure)

먼저 식 (4)에 정의된 EDF를 다음과 같이 우함수와 기함수로 분리한다.

$$F_e(x_s+x)=\frac{F(d)+F(-d)}{2},\quad d\in(0,w/2),\quad x_s\in\beta$$
$$F_o(x_s+x)=\frac{F(d)-F(-d)}{2},\quad d\in(0,w/2),\quad x_s\in\beta \tag{8}$$

여기에서 치환변수 $x=d-x_s$이며 x_s는 임의로 가정된 대칭축이다. x_s가 얼마만큼의 대칭성을 가지고 있는지 평가하기 위하여 Zielke et al.[12]의 대칭성척도 $S(x_s,w)$를 사용한다.

$$S(x_s,w)=\frac{\int_0^{w/2}|F'(x_s+x)|^2\,dx-\int_0^{w/2}|F_o(x_s+x)|^2\,dx}{\int_0^{w/2}|F'(x_s+x)|^2\,dx+\int_0^{w/2}|F_o(x_s+x)|^2\,dx},$$
$$-1\le S(x_s,w)\le 1 \tag{9}$$

여기에서 $F'(x_s+x)=F_e(x_s+x)-\frac{2}{w}\int_0^{w/2}F_e(x_s+x)dx$ 이며 적분은 각 함수의 에너지량을 계산한 것이다.

- 대칭축의 선정

대칭축 탐색구간 β내에서 계산된 대칭성척도 $S(x_s,w)$ 가운데 가장 큰 값을 가진 x_s를 EDF의 대칭축으로 선정한다.

- 차선이탈 가능성의 예측

EDF의 대칭축 x_s가 90°근방에서 많이 벗어나 있으면 차량이 주행중에 차선중심으로부터 벗어난 것으로 간주한다. 이때 이탈(deviation)량 ρ는 다음과 같이 계산한다.

$$\rho=|x_s-x_c| \tag{10}$$

여기에서 x_c는 실험적으로 설정된 파라메터로서 차량이 차선중앙을 정확히 주행할 때의 EDF 대칭축이다. 카메라의 광축이 2.1절에서 가정한 바와 같이 차량의 중심과 일치되면 x_c는 90°이지

만 차량의 중심로부터 옾셋(offset)이 있거나 광축이 차량의 중심과 일치되지 않으면 90°근방의 값이 된다. 만약 $\rho > \varepsilon$ 이면 차선이탈 가능성이 있다고 판단한다. 여기에서 ε 은 실차실험으로 결정할 파라메터이다.

3.2 EDF의 로칼맥시마

EDF의 좌우영역 각각의 로칼맥시마 탐색은 Luenberger[15]의 "local maximum point" 정의에 따라 이루어졌다. 탐색된 로칼맥시마에 의해 차선이탈계수(departure index)를 다음과 같이 정의한다.

$$\xi = \frac{x_l^* - x_c}{x_c - x_r^*} \tag{11}$$

여기에서 x_l^* 과 x_r^* 은 그림 3(b)의 θ_1과 θ_2에 대응되는 EDF의 로칼맥시마이고, x_c는 수식 (10)에서 정의한 것과 동일한 파라메터이다. $\xi \le \eta_1$이거나 $\xi \ge \eta_2$이면 차선이탈가능성이 있는 것으로 판단한다. 이때 η_1과 η_2는 실험적으로 결정되는 파라메터들로서 η_1=0.7, η_2=1.3으로 결정되었다. ξ이 1에 가까우면 차량이 차선중앙을 잘 주행하는 것으로 볼 수 있다. 차선이탈계수 ξ은 앞 절의 EDF의 대칭성척도에 기반한 ρ와 보완관계이다.

4. 실험결과

제안된 차선이탈예측알고리즘은 실험차량으로 도로를 주행하면서 그림 4의 상단그림에 보인 바와 같이 차량의 룸미러후미에 설치된 CCD 카메라로부터 입력되는 영상을 가지고 평가되었다. 그림4의 영상처리보드는 입력되는 아날로그영상을 디지털화하여 에지검출, EDF구축, 차선이탈가능성의 예측 등을 수행하며, 카메라의 NTSC 시그날외에 주행중인 차량으로부터 속도, 조향각, 턴시그날, 와이퍼온오프시그날, 브레이크시그날 등을 받아들여 운전자의 차선변경의지를 확인할 수 있는 구조로 설계되어 있으며 부저 또는 스피커를 통해 경보음을 내보낸다. 또한 실시간 에지검출을 위해 FPGA(field programmable gate array)가 사용되었다.[9] 그러나 영상처리보드는 현재 개발중에 있기 때문에 실질적인 실험평가는 펜티엄급의 PC로 이루어졌다. 평가에 사용된 영상의 크기는 160×120 이었으며 EDF 예측기에 사용된 입력영상 시퀀스는 N=5를 취했다. 사용된 카메라 렌즈의 수평의 뷰잉각도는 40°이다.

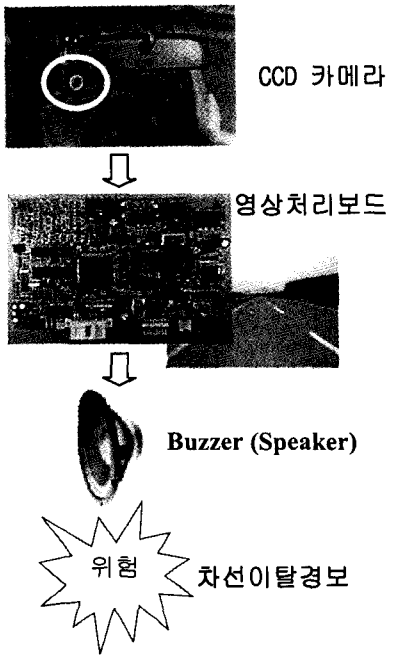
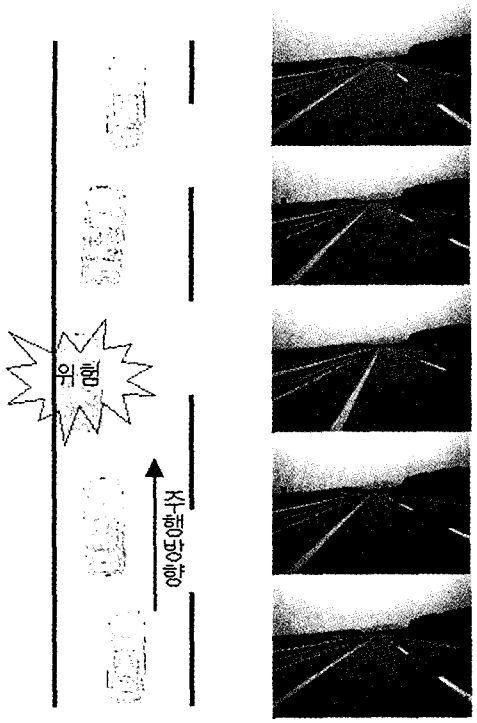


Fig. 4 처리흐름도

그림 5는 주행중인 차량의 위치와 그 상황에서의 입력영상을 나타낸 것이다. 그림 5를 통해 확인할 수 있는 것은 주행차량의 위치에 따라 입력되는 영상에서 차선의 방향과 위치가 동시에 변한다는 것이다. 차량이 왼쪽차선으로 접근하면 그림 3(a)의 θ_1과 θ_2가 작아지고, 반대로 오른쪽 차선으로 접근하면 θ_1과 θ_2가 커진다. 차선이탈경보는 차량이 차선을 이탈하기 직전에 울리도록 튜닝되어 있다.

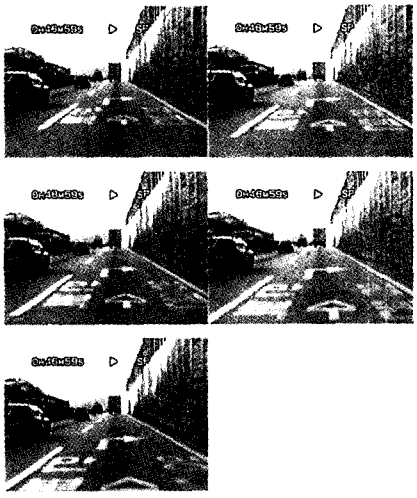


(a) 차량위치 (b) 입력영상

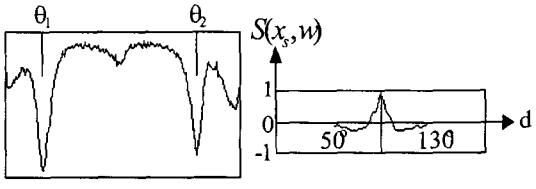
Fig. 5 차선이탈경보

그림6은 제안된 알고리즘의 일련의 처리과정을 보여주고 있다. 그림6의 (a)는 다섯 개로 이루어진 입력영상시퀀스이며, 그림6의 (b)는 식 (5)로 정의된 EDF 예측기에 의해 구축된 $\hat{H}(d)$이며 $\hat{H}(d)$의 로칼맥시마 θ_1과 θ_2는 각각 30°와 151°였다. 그림6의 (c)는 $\hat{H}(d)$에 대해 평가된 대칭성척도 $S(x_s,w)$를 나타낸 것이다. 대칭축 탐색은 $50° \le \beta \le 130°$ 구간에서 이루어졌고, 90°에서 대칭성척도 $S(90,150)=0.89678$로 최대값을 보여주었다. 따라서 차량이 좌우차선 중심부에서 잘 주행하고 있음을 알 수 있다. 그림6의 (d)는 새로 입력된 영상이며 그림6의(e)는 새로 입력된 영상에 대해 구축된 $F(d)$이다. $F(d)$의 로칼맥시마 θ_1과 θ_2는 각각 30°와 150°로서 수식 (11)의 차선이탈계수 ξ는 x_c가 90°일 때 1이다. 그림6의 (f)는 새로 입력된 영상의 $F(d)$에 적용된 대칭성척도를 보여준 것이다. $F(d)$는 $S(90,150)=0.79643$로 90°에서 최대값을 가졌다. 또한 잡음도지수 μ/σ는 왼쪽이 1.0386이고 오른쪽이 1.0458로 작은 값을 제공하였다. 그림6의 (g)는 식 (6)으로 정의된 순환필터에 의해 구축된 $\hat{H}(d)$이다.

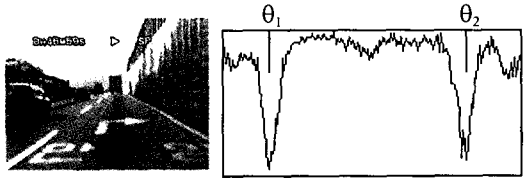
이 실험결과를 통해 알 수 있는 것은 도로표면상에 글자나 화살표와 같은 잡음이 존재해도 제안된 알고리즘은 매우 강인한 결과를 보인다는 것과 대칭성척도로 얻은 대칭축 90°는 현재 실험차량이 차선중심부를 잘 주행하고 있다는 것이다.



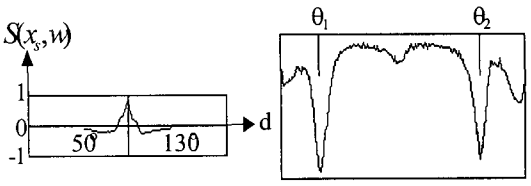
(a) 입력영상 시퀀스



(b) EDF $\hat{H}(d)$ (c) 대칭성척도



(d) 입력영상 (e) EDF $F(d)$



(f) 대칭성척도 (g) EDF $\hat{H}(d)$

Fig. 6 차선이탈예측알고리즘 평가

그림 7은 그림 5에서 보여준 영상에 대하여 차량이 차선으로 접근할 때 EDF와 대칭성척도가 어떻게 변화하는지를 보여주고 있다. 차량이 차선중앙을 주행할 때는 대칭축이 88°에 있다가 외쪽 차선으로 접근하면서 대칭축도 82°, 73° 이렇게 왼쪽으로 이동되고 있음을 알 수 있다.

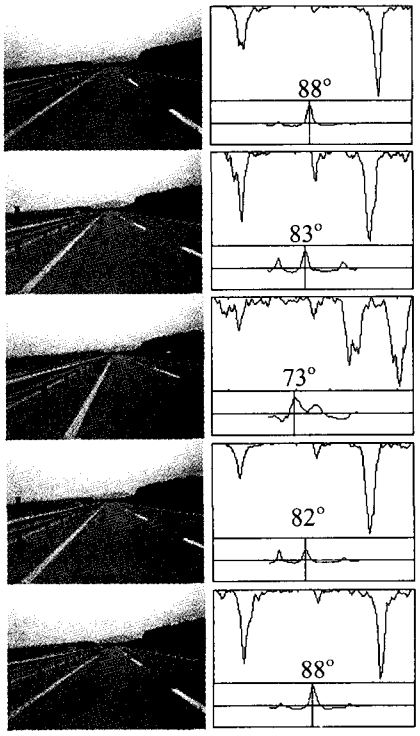
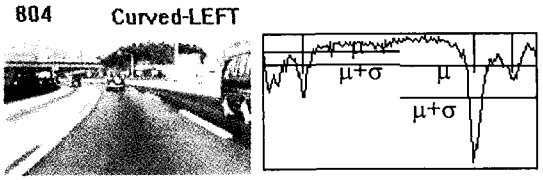
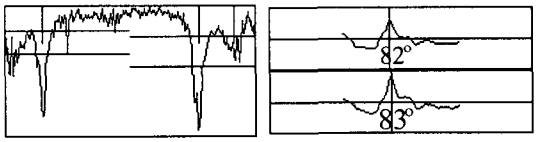


Fig. 7 차량의 주행위치에 따른 EDF와 대칭축의 변화

그림 8은 도로가 곡로일 경우에 제안된 알고리즘이 어떻게 작동되는지를 보여준다. $\hat{H}(d)$의 대칭축은 82°이고 F(d)의 대칭축은 83°였다. $\hat{H}(d)$의 로칼맥시마 θ_1과 θ_2는 각각 28°와 140°로서 수식 (11)의 차선이탈계수 ξ는 x_c가 90°일 때 1.24이다. 이 결과로 우리는 차량이 중앙을 조금 벗어나 왼쪽차선에 가까이 주행하였음을 알 수 있다. EDF상에 수평으로 표시된 직선은 90°를 중심으로 EDF를 좌우로 분할하여 각각의 영역에서 함수의 평균 μ와 표준편차 σ를 계산한 결과를 표시한 것이다.



(a) 입력영상 (b) EDF $\hat{H}(d)$



(c) EDF $F(d)$ (d) 대칭성척도

Fig. 8 곡로에서의 적용예

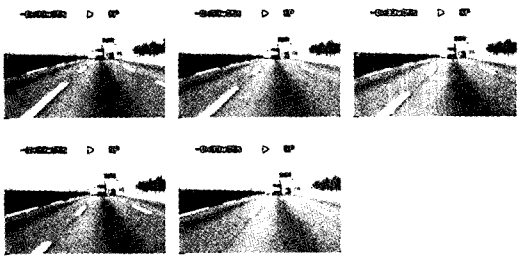
한국의 도로구조·시설기준에 관한 규정에서는 100km/h 주행속도의 도로에서는 최소곡률반경이 460m로 되어 있다. 이 경우 곡률반경 460m인 원주에서 호의 길이 40m일 때 현의 길이는 39.987m로서 차량전방의 40m내에서 곡로인 경우도 차선은 직선로와 다름없다. 80km/h 주행속도의 도로는 최소곡률반경이 280m, 그리고 60km/h 주행속도의 도로는 최소곡률반경이 140m로 되어 있다. 또한 차로의 최소폭도 80km/h의 주행속도로 설계된 도로에서는 3.5m이지만 60km/h의 경우는 3m이다. 60km/h의 경우 호의 길이 20m일 때 중심에서 현까지의 길이가 139.643m이므로 이 경우 곡로를 직선로로 간주하기는 다소 무리가 있다. 따라서 60km/h의 주행속도로 설계된 도로의 곡로구간에서는 곡률

반경뿐 아니라 로폭도 좁으므로 1차원의 EDF에서 얻은 차선의 방향정보로 경보로직을 적용할 때 오경보발생율이 높아질 수 있다.

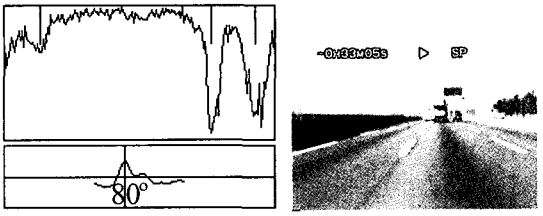
곡로인 도로에 제안된 알고리즘을 적용하는 실험과정에서 다음과 같은 사실을 확인할 수 있었다. 왼쪽으로 휜 도로에서 차량이 중심에서 왼쪽으로 조금만 치우쳐도 마치 직선로에서 왼쪽 차선방향으로 차선이탈이 일어난 것과 유사한 현상이 발생하고, 오른쪽으로 휜 도로에서 차량이 중심에서 오른쪽으로 조금만 치우쳐도 마치 직선로에서 오른쪽 차선방향으로 차선이탈이 일어난 것과 유사한 현상이 발생한다. 운전자의 운전패턴이 왼쪽으로 휜 도로에서는 왼쪽 차선으로 붙어서 주행하는 경향이 있고, 오론쪽으로 휜 도로에서는 오른쪽 차선으로 붙어서 주행하는 경향이 있었다. 따라서 제안된 경보알고리즘에서 곡로는 운전자의 운전패턴에 따라 직선로에 비해 오경보율이 높아졌다. 그러나 이런 현상이 모든 운전자에게 일관되게 발생하는 것은 아니기 때문에 정량적으로 데이터화는 것은 어렵다.

중앙분리대가 없이 교행하는 2차선으로 설계된 88고속도로에서 분석결과 야간운전시 운전자의 운전패턴이 오른쪽 차선으로 붙어서 주행하는 경향을 보였는데 이것은 혹시나 중앙선을 침범하는 차량에 대비하기 위함이 아닐까 하고 여겨졌다. 이런 경우 오른쪽차선으로 지나치게 접근하면 제안된 알고리즘에서는 경보발생 상황으로 인식된다. 이런 부분이 경보알고리즘에 있어서 어려운 부분인데 차선이탈경보시스템 구현의 목표가 차량을 차선중심에서 주행하도록 유도하는데 있기 때문에 모든 상황을 다 만족시킬 수 있는 파라메터설정은 사실상 어려운 것으로 여겨진다.

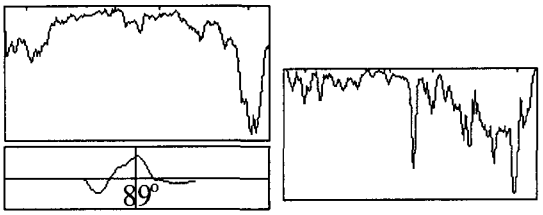
그림 9에 설명한 실험예는 EDF의 예측기의 중요성을 설명하기 위한 것이다. 그림 9(a)는 3개 차선으로 되어 있는 고속도로의 가운데 차선을 주행하다 완만한 각도로 왼쪽으로 차선변경을 시도하는 순간에 연속적으로 촬영한 5개의 입력영상이며, 그림 9(b)는 $\hat{H}(d)$와 $\hat{H}(d)$의 대칭성척도를 동시에 표시한 것이다. 이 때 $\hat{H}(d)$의 로칼맥시마 θ_1과 θ_2는 각각 24°와 137°로서 수식 (11)의 차선이탈계수 ξ는 x_c가 90°일 때 1.4이다. 만약에 $\hat{H}(d)$를 사용하지 않고 그림 9(c)의 현재영상만 가지고 EDF를 추정했을 때 EDF와 대칭성척도는 그림 9(d)와 같이 나타났다. 이 경우 차량이 주행중인 차선의 왼쪽차선의 기울기 θ_2는 EDF에 거의 나타나지 않았고, 오른쪽 차선의 기울기도 원근투영효과로 인하여 옆 차선의 기울기와 가까워졌기 때문에 EDF의 형상이 애매해져 θ_1에 대한 로칼맥시마도 제대로 검출되지 않았다. 더욱이 EDF의 대칭축은 89°로서 차량이 차선중앙을 잘 주행했을 때의 결과와 유사하다. 이렇게 된 원인은 한국의 도로구조 · 시설기준에 관한 규정상 도색된 차선표식의 간격이 10m로 되어 있는데 우연의 일치로 현재영상에서 자차량 가까운 곳에 차선표식이 나타나지 않았고, 또한 소실점 가까운 곳에서도 여러 요인 때문에 자차선의 기울기 성분이 부각되지 않았기 때문이다. 그림 9(e)가 영상의 하단부 즉, 자차량 가까운 곳만을 취하여 EDF를 얻은 결과인데 여기에서 알 수 있는 것은 EDF에서 차선에 관련된 어떤 특징도 찾기 어렵다는 것이다. 결국 잡음이 없이 자차선 성분이 잘 나타난 영상에서는 현재 영상만 가지고도 경보알고리즘에 적용할 수 있는 EDF의 구축이 가능하지만 본 실험결과에서와 같이 환경조건이나 조명조건 등에 전혀 관련이 없는 양호한 조건에서도 EDF의 예측기를 활용하는 것이 좋다고 할 수 있다.



(a)순차적 입력영상



(b) $\hat{H}(d)$와 대칭성척도 (c) 현재영상



(d) $F(d)$와 대칭성척도 (e)근거리영역의 $F(d)$

Fig. 9 차선변경구간에서의 알고리즘 적용예

5. 결 론

컴퓨터비전을 이용한 차선이탈경보시스템의 궁극적인 이슈는 여러 가지 나쁜 환경조건하에서 어떻게 차선정보를 강인하게 얻어내느냐 하는 것이다. 실제 경보시점의 선택은 실험으로 설정하는 것이므로 이론적 접근은 수반하지 않는다. 이런 관점에서 논문에서 제안한 EDF기반의 차선이탈경보시스템은 성공적이라 할 수 있다. 제안된 로직은 60km/h의 주행속도로 설계된 도로의 곡로를 제외하고는 도로의 형태나 차량의 종류, 탑승자의 수에 따른 차량의 무게중심의 변화 등에 영향을 받지 않았다. 이동합에 의한 EDF의 예측, 대칭축과 로칼맥시마에 의한 경보조건의 설정, 잡음지수의 정의 등은 여러 잡음 환경에 대응할 수 있는 발판의 토대가 되었다.

논문에서 제안된 방법의 단점은 카메라의 광축이 차량의 중심과 평행하지 않을 때 오경보가 발생할 수 있다는 것이다. 경보알고리즘의 구성은 카메라의 광축이 차량의 중심과 평행이라는 것을 전제로 되어 있는데 어떤 요인에 의해 카메라의 광축이 틀어졌을 때 이를 사전에 감지하지 못한다면 오경보의 요인이 된다. 이는 제안된 방법에만 국한되는 문제라기보다는 컴퓨터비전을 이용한 제어문제에서 공통으로 나타나는 문제라 볼 수 있다.

제안된 알고리즘은 펜티엄 PC(330MHz)급의 컴퓨터에서 초당 15프레임(영상처리영역 : 80×120)의 처리가 가능하다. 이 정도의 처리속도는 차량이 120km/h로 주행한다고 했을 때 초당 이동거리가 33.3m이므로 프레임당으로는 2.23m에 불과하다. 또한 1차원의 EDF는 실험결과에서 밝혔듯이 80km/h의 주행속도로 설계된 도로에서도 약 40m까지는 곡로도 직선로처럼 보이므로 차선이탈경보시스템의 응용에는 별 무리가 없다는 결론을 얻었다.

제안된 알고리즘의 평가를 위해 여러 형태의 도로에서 실험을 하면서 에러가 없는 차선이탈경보를 하기 위해서는 운전자의 운전습관의 반영, 환경적 영향하에서의 강인성 확보, 경보시점의 선택 등 고려하여야 할 요인이 너무 많다는 것을 알았다. 환경적 영향하에서의 강인성 문제는 알고리즘 보완이 필요하지만 나머지 두 가지 문제는 시스템을 선택적으로 적용하면서 HMI(human machine interface) 개념을 반영할 필요가 있었다.

참 고 문 헌

1) 이준웅, "자동차 추돌경보 시스템개발을 위한 컴퓨터비전과 레이저레이다의 응용", 자동차공학회논문집, Vol. 7, No. 5, pp.258-267, 1999.

2) K. Sato, T. Goto and Y. Kubota, "A Study on a Lane Departure Warning System using a Steering Torque as a Warning Signal", Proc. AVEC' 98, pp. 479-484, 1998.

3) M. Tomizuka and P. Hingwe, "Vehicle Lateral Control for Automated Highway Systems", Proc. AVEC' 98, pp.25-32, 1998.

4) 이준웅, "영상처리 기반의 차선인식 알고

리즘", 제어·자동화·시스템공학, 제4권, 제6호, pp.631-636, 1998.

5) D. A. Pomerleau and T. Jochem, "Rapidly Adapting Machine Vision for Automated Vehicle Steering", IEEE Expert Intelligent Systems and Their App., April, pp.19-27, 1996.

6) J. H. Seo, H. C. An, S. S. Jeong and Y. G. Kong, "Development of Lane Deviation Warning and Preventing System through Vision System and Steering Control", 98 Seoul ITS Congress, CD-Rom, 98.

7) M. Brattoli, R. Tasca, A. Tomasini, E. Chioffi, D. Gerna and M. Pasotti, "A Vision-Based Alert System", Proc. IEEE Intelligent Vehicles 96, pp.195-200, 1996.

8) D. A. Pomerleau, "Neural Network Perception for Mobile Robot Guidance", Kluwer Academic Publishers, 1993.

9) J. W. Lee, K. S. Kim, S. S. Jeong and Y. W. Jeon, "Lane Detection Warning System : Its Logic and On-Board Equipment" (20005331), JSAE, Japan, pp.9-11, 2000.

10) 이운근, 백광렬, 이준웅, Lane Detection Using a Cumulative Distribution Function, 한국전기학회하계학술대회논문집, pp. 2814-2818, 2000.

11) R. G. Gonzalez and R. E. Woods, "Digital Image Processing", Addison-Wesley, 1992.

12) T. Zielke, M. Brauckmann and W. V. Seelen, "Intensity and Edge-Based Symmetry Detection with an Application to Car-Following", CVGIP-Image Understanding, Vol. 58, No. 2, pp. 177-190, 1993.

13) 이준웅, 장인수, 강동중, 권인소, "화상처리를 이용한 도로의 차선인식", 한국자동차공학회추계학술대회논문집, pp. 1183-1187, 1997.

14) A. Gelb, "Applied Optimal Estimation", M.I.T Press, 1984.

15) D. G. Luenberger, "Introduction to Linear and Nonlinear Programming", Addison Wesley, U.S.A., 1973.