Regular paper | Journal of the KIECS. pp. 349-356, vol. 15, no. 2, Apr. 30. 2020, t. 100, pISSN 1975-8170 | eISSN 2288-2189
http://dx.doi.org/10.13067/JKIECS.2020.15.2.349

눈 영상비를 이용한 운전자 상태 경고 시스템

신문창* · 이원영**

A Driver's Condition Warning System using Eye Aspect Ratio

Moon-Chang Shin* · Won-Young Lee**

요 약

본 논문은 교통사고 방지를 위한 운전자의 눈 영상비를 이용한 상태 경고시스템의 설계에 대해 소개하고 있다. 제안하는 운전자 상태 경고 시스템은 눈 인식을 위한 카메라, 카메라를 통해 들어오는 정보를 처리하는 라즈베리파이, 그리고 그 정보를 통해 운전자에게 경고를 줄 때 필요한 부저와 진동기로 구성되어 있다. 운전자의 눈을 인식하기 위해서 기울기 방향성 히스토그램 기술과 딥러닝 기반의 얼굴 표지점 추정 기법을 사용하였다. 동작을 시작하면, 시스템은 눈 주변의 6개의 좌표를 통해 눈 영상비를 계산한다. 그리고 눈을 뜬 상태와 감은 상태의 눈 영상비를 각각 계산한 후 이 두 값으로부터 눈의 상태를 판단하는데 사용하는 문턱 값을 설정한다. 문턱 값이 운전자의 눈 크기에 적응하면서 설정되기 때문에 시스템은 최적의 문턱 값을 사용하여 운전자의 상태를 판단할 수 있다. 또한 낮은 조도에서도 눈을 인식할 수 있도록 회색조 변환 이미지와 LAB모델 이미지를 합성하여 사용하였다.

ABSTRACT

This paper introduces the implementation of a driver's condition warning system using eye aspect ratio to prevent a car accident. The proposed driver's condition warning system using eye aspect ratio consists of a camera, that is required to detect eyes, the Raspberrypie that processes information on eyes from the camera, buzzer and vibrator, that are required to warn the driver. In order to detect and recognize driver's eyes, the histogram of oriented gradients and face landmark estimation based on deep-learning are used. Initially the system calculates the eye aspect ratio of the driver from 6 coordinates around the eye and then gets each eye aspect ratio values when the eyes are opened and closed. These two different eye aspect ratio values are used to calculate the threshold value that is necessary to determine the eye state. Because the threshold value is adaptively determined according to the driver's eye aspect ratio, the system can use the optimal threshold value to determine the driver's condition. In addition, the system synthesizes an input image from the gray-scaled and LAB model images to operate in low lighting conditions.

키워드

Eye Aspect Ratio, Object Detection, Waring System
눈 영상비, 객체 검출, 경고 시스템

* 서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과 (extruer9557@naver.com)
** 교신저자 : 서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과
· 접 수 일 : 2020. 02. 14
· 수정완료일 : 2020. 03. 15
· 게재확정일 : 2020. 04. 15
· Received : Feb. 14, 2020, Revised : Mar. 15, 2020, Accepted : Apr. 15, 2020
· Corresponding Author : Won-Young Lee
Dept. Electronic and IT Media Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
Email : wylee@seoultech.ac.kr

Ⅰ. 서 론

현대 사회에서 자동차는 생활의 필수품이 되었다. 자동차로 인해 이동의 자유를 얻게 되었지만 잘못 사용하는 경우 운전자 본인과 타인의 안전을 위협하는 흉기가 된다. 따라서 모든 운전자는 주행 중 일어나는 상황에 대해서 즉각 대처를 해야 한다. 최근 하드웨어와 소프트웨어 기술의 발전으로 인해 운전자와 보행자의 안전과 관련한 다양한 연구가 이루어지고 장치들이 개발되고 있다[1-5]. 다양한 사고 원인 중에 결과가 좋지 않은 경우가 바로 운전자가 전방주시의무를 다하지 않은 경우이다. 사고 발생 시 본인과 상대방의 사망 확률이 매우 높기 때문에 사고 방지를 위해 운전자가 전방주시 의무를 다할 수 있도록 돕는 장치들이 개발되었으며, 눈 영상비(eye aspect ratio, EAR)를 활용하여 사용자의 눈 개폐상태를 체크하는 기법과 장치들이 소개되었다[6-9]. 그러나 정상 상태인 눈의 가로, 세로 비율은 사람마다 다르기 때문에 모든 사람들에게 획일화된 눈 영상비를 사용하여 상태를 확인하는 방식은 개선이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 기존의 문제점을 개선한 운전자의 상태 확인 및 경고 시스템을 제안한다. 다음 장에서는 개인의 눈 크기에 맞게 눈 영상비로부터 문턱 값을 계산하는 기법과 눈 상태를 측정하는데 어려움을 줄 수 있는 조명의 영향을 최소화 하는 방법에 대해 논의한다. 제 3장에서는 시스템의 동작 검증을 위해 수행한 실험 내용에 대해 소개하고, 제 4장에서 본 연구에 대한 결론을 정리한다.

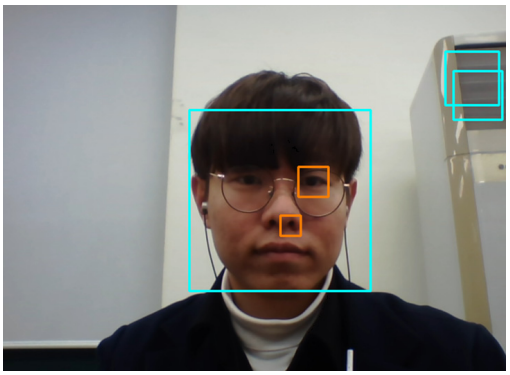

그림 1. Haar-cascade 알고리즘을 사용한 얼굴 인식
Fig. 1 Face recognition using Haar-cascade algorithm

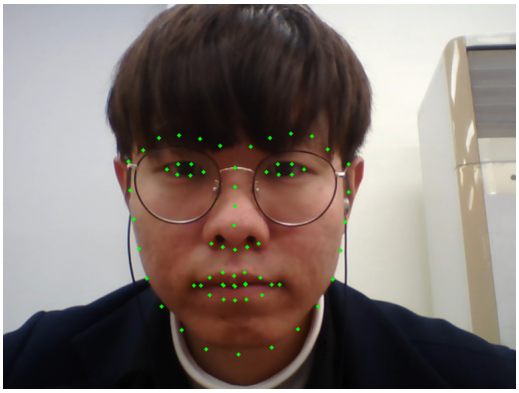

그림 2. Dlib 모델을 이용한 얼굴 인식
Fig. 2 Face landmark detection using Dlib model

Ⅱ. 운전자 상태 경고 시스템

2.1 기울기 방향성 히스토그램

얼굴을 인식하는 방법 중에서 지금 가장 보편적으로 쓰는 것 중 하나는 머신러닝(machine learning)을 이용하여 객체 검출을 하는 것이다[10-11]. 대표적인 머신러닝 기반 객체 검출 알고리즘은 Haar-cascade 방식이며, 명암에 따른 변화를 측정하여 얼굴을 인식한다. 흰색과 검정색의 변화로 눈이 있을 확률을 결정하여 인식하기 때문에 눈을 인식 하는 데에 있어서는 가장 빠르고 효과적인 방법이다. 그러나 그림 1과 같이 코를 얼굴로 인식하는 경우도 있기 때문에 신뢰도가 다소 떨어지는 단점이 있다.

이에 조금 더 개선된 방식으로는 2016년 제시된 기울기 방향성 히스토그램(histogram of oriented gradients) 기술과 학습된 얼굴 표지점 추정 기법(face landmark estimation)을 사용한다. HOG(: Histogram of Oriented Gradients)는 객체 검출 위해 사용되며 검출 대상 영역을 일정 크기의 셀로 분할하고, 각 셀마다 이미지의 경계 방향에 대한 히스토그램을 구한다[12]. 이 히스토그램은 어떤 위치에서 변화가 a만큼이고 방향이 b라면 b에 해당하는 계급구간에 a의 값만큼 더한 것인데, HOG는 구한 히스토그램의

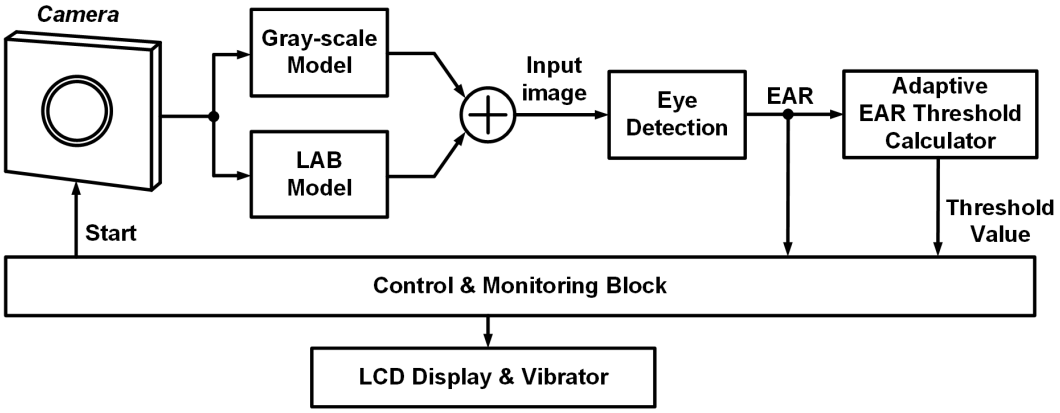

그림 3. 가시광 통신 사용자 인식 시스템의 전체 구조
Fig. 3 Block diagram of the user-aware system using a Visible Light Communication

계급구간 값들을 연결한 벡터이다. 즉, HOG를 통해 이미지의 경계 방향 히스토그램 템플릿으로 볼 수 있다. 템플릿 매칭은 원래 영상의 기하학적 정보를 그대로 유지하며 매칭 할 수 있지만 대상의 형태나 위치가 조금만 바뀌어도 매칭이 잘 되지 않는 문제가 있다. 그리고 히스토그램 매칭은 대상의 형태가 변해도 매칭을 할 수 있지만 대상의 기하학적 정보를 잃어버리고 단지 분포 또는 구성비 정보만을 기억하기 때문에 잘못된 대상과 매칭이 되는 문제가 있다. 그러나 HOG는 이미지 경계의 방향정보를 이용하기 때문에 기본적으로 영상의 밝기 변화, 조명 변화 등에 덜 민감하다는 특징이 있다. 그림 2는 HOG와 얼굴 표지점 추정 기법을 사용하는 Dlib 모델을 이용한 얼굴 인식 결과를 보여주고 있다. 학습된 데이터를 기반으로 얼굴의 눈, 코, 입과 같이 주요 부분에 대한 표지점이 표시되는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 이러한 기법을 사용하여 운전자의 얼굴을 정확히 인식하고 이 중 눈 부분에 대한 데이터를 집중적으로 처리함으로써 효율적으로 운전자의 눈 상태를 확인하도록 하였다.

2.2 시스템의 구조

그림 3은 운전자 상태 경고 시스템의 전체적인 구조를 보여준다. 운전자 상태 경고 시스템은 운전자의 눈이 정면에서 보이는 곳에 설치되어, 상태이상을 인식할 시에는 운전자에게 소리나 진동으로 경고함으로

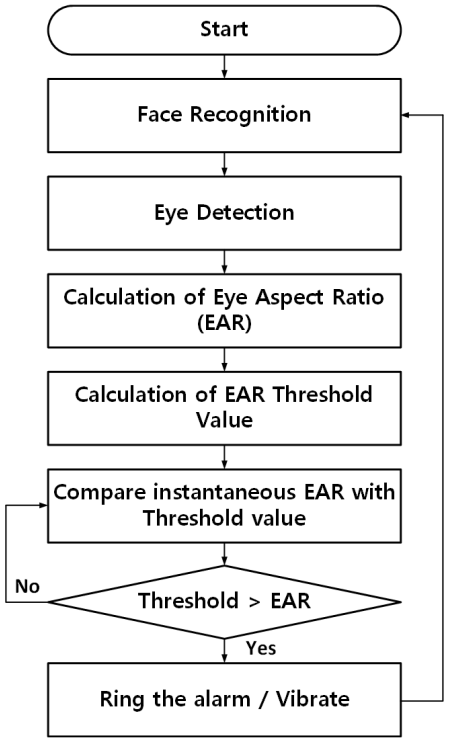

그림 4. 운전자 상태 경고 시스템 알고리즘
Fig. 4 Algorithm of the driver's condition warning system

써 운전자가 스스로 경각심을 갖도록 하는 방식을 사용한다. 영상처리를 위한 프로세싱 모듈은 라즈베리파

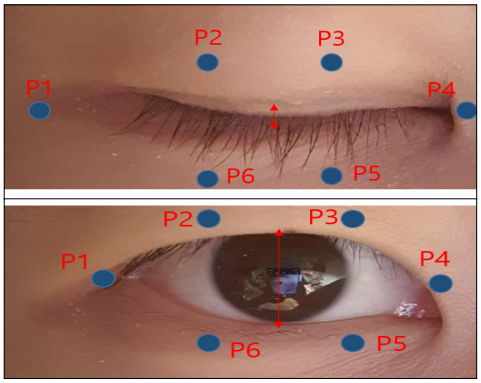

그림 5. EAR 계산을 위한 눈 표지점 좌표
Fig. 5 Coordinates of eye landmarks for EAR calculation

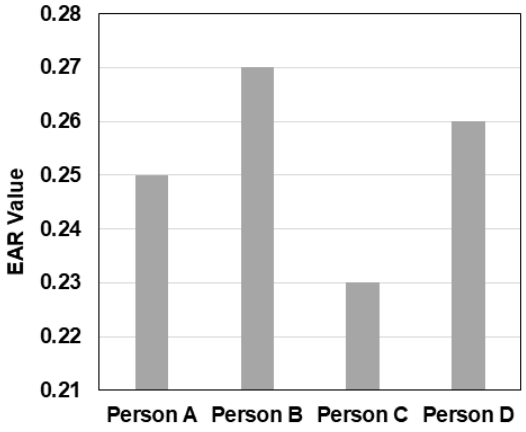

그림 6. 눈을 뜬 상태의 개인별 EAR 값
Fig. 6 Individual EAR values when eyes are opened

이를 사용하였다. 라즈베리파이에는 운전자의 눈 상태를 관찰 할 수 있는 카메라 1개와 상태 이상을 감시할 때 경고를 줄 수 있는 진동기가 연결된다. 운전자의 눈을 인식하기 위해서 OpenCV기반의 딥러닝 라이브러리인 DLIB을 사용한다. 그림 4는 눈 영상비를 이용한 운전자 상태 경고 시스템의 동작 순서를 보여주고 있다. 시스템 동작이 시작되면 먼저 운전자의 얼굴을 찾는 작업을 한다. 얼굴 인식이 완료 되면, 미리 학습된 데이터를 받아 눈의 위치를 찾고 각 포인트를 눈에 맵핑하고 눈 영상비를 계산한다. 이 때, 계산된 눈 영상비는 운전자가 평소 정상 상태의 눈 영상비 값으로 설정된다. 시스템은 정상 상태의 눈 영상비에 미리 지정된 마진 값을 적용하여 문턱 값을 만들게 되며, 이 값은 실시간으로 계산된 눈 영상비와 비교되어진다. 실시간으로 계산된 눈 영상비가 문턱값 이하의 값이 일정 프레임 이상 유지되는 경우 LCD를 통해 경고 메시지를 나타내고, 하드웨어의 GPIO를 통해 진동 장치에 신호를 보내 진동기가 울리게 하여 운전자에게 상태경고를 준다.

2.3 눈 영상비의 문턱값 설정

눈 영상비(eye aspect ratio, EAR)는 그림 5와 같이 눈 인식에 의해 검출된 안구에 p1부터 p6까지의 6개의 좌표를 이용하여 계산된다. 본 연구에서는 T Soukupova와 J. Cech[6]의 얼굴 표지점 추정을 이용한 눈 인식 방법을 사용하여 눈을 찾고 좌표를 지정하였다. 각 눈은 6개의 (x, y)좌표로 표현되며, 눈의 왼쪽 끝에서 시작하여 나머지 영역을 시계방향으로 돌며 좌표를 지정한다. 눈 영상비는 식 (1)을 이용하여 도출할 수 있다.

$$EAR = \frac{\| p_2 - p_6 \| + \| p_3 - p_5 \|}{2 \| p_1 - p_4 \|} \quad (1)$$

식 (1)의 분자는 수직 눈 표지점 사이의 거리를 계산하는 반면 분모는 수평 눈 표지점 사이의 거리를 계산한다. 수평 포인트 세트는 하나뿐이지만 수직 포인트 세트는 두 세트가 있기 때문에 분모를 적절하게 가중시킨다. 사용자가 눈을 뜨고 있는 경우, 분자가 0보다 큰 값을 가지게 되어 EAR이 0보다 큰 값이 되며, 사용자가 눈을 감은 경우 분자가 0에 가까운 값이 되어 EAR이 0에 가까운 값을 가지게 된다. 따라서 시스템은 EAR 결과가 지정된 문턱 값을 넘었는지 확인함으로써 눈을 감았는지 뜨고 있는지 여부를 판단할 수 있다.

일반적으로 쓰는 값은 0.30이며, 본 연구에서 수행한 실험에서는 0.23 이하로 문턱 값을 지정한 경우는 눈 인식이 잘 되지 않는 문제가 있었다. 그래서 프로그램이 실행되면 초기 문턱 값으로 0.25가 설정되어 동작한다.

하지만 사람의 눈은 크기가 전부 다르기 때문에,

```
a = BGRtoLAB(Frame)
b = BGRtoGRAY(Frame)
c = a + b

Repeat

    Read Frame
    Resize Frame, width = 600

show the c
```

그림 7. 입력 영상처리를 위한 의사코드
Fig. 7 Pseudo code for input image processing

고정된 문턱 값을 사용하는 경우 눈을 뜨고 있음에도 눈을 감고 있다고 인식하는 문제가 발생한다. 그림 6은 서로 다른 4명의 실험자의 평상시 EAR 측정값을 보여주고 있다. 평상시 눈을 뜨고 있을 때 최소 0.23부터 최대 0.27까지 다양한 EAR을 보여주는 것을 알 수 있다. 실험자C의 경우는 시스템의 문턱 값을 0.25로 설정하는 경우 평상시에도 눈이 감긴 상태라고 인식하는 문제가 발생한다. 따라서, 본 연구에서는 이를 개선하기 위해 적응형 EAR 문턱 값 설정 기법을 적용하였다. 시스템이 동작하게 되면 사용자로 하여금 눈을 편안한 상태로 뜨고 있도록 안내하고 이때의 EAR 값을 저장한다. 이때 최종적으로 저장되는 값은 7회 측정값의 평균을 사용한다. 그리고 눈을 감도록 안내한 후 EAR 값을 저장한다. 이 값 또한 7회 측정값의 평균을 사용한다. 시스템은 두 EAR 값의 평균값을 새로운 문턱 값으로 이용하게 된다. 이러한 방식을 통해서 각각 사람마다 최적의 EAR 문턱 값을 지정하여 사용할 수 있어 사용자가 바뀌어도 눈의 상태를 올바르게 판단할 수 있다.

2.4 야간 주행을 위한 영상 처리

조명은 영상처리에서 중요하게 작용하는 부분 중 하나이다. 운전은 야간에도 수행하기 때문에 어두운 상황에서도 영상을 인식을 해야 하며, 갑자기 들어온 빛이 있어도 정확하게 영상 인식이 되어야한다. 따라서 본 연구에서는 눈을 인식하는데 있어 밝기의 영향을 최소화 할 수 있도록 시스템 설계를 진행하였다.

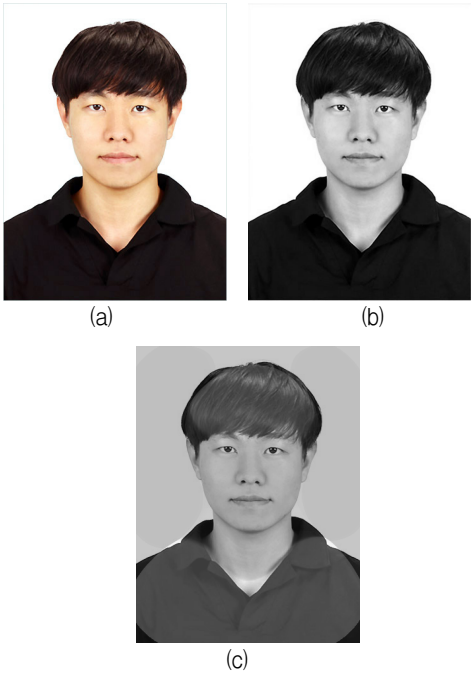

그림 8. (a) 원본 이미지, (b) 회색조 이미지, (c) 회색조+LAB 모델 이미지
Fig. 8 (a) original image, (b) gray-scaled image, (c) gray-scale + LAB model image

빛이 최소로 들어오는 상황에서 얼굴과 눈을 인식하기 위해서 그림 7의 의사코드(pseudo code)가 보여주는 방식으로 원본 영상 이미지에 RGB색공간(RGB color space)이 아닌 LAB색공간($L^*a^*b^*$ color space)으로 변환한 이미지를 합성하여 운전자 상태 경고 시스템의 입력영상으로 사용하였다. LAB색공간은 색을 구성하는 방법의 하나로, 실제 안구가 색을 인식하는 방식에 비추어서 간상세포가 느끼는 밝기(Lightness), 원추 세포가 느끼는 적록과 황청(a Channel, b Channel) 윈도우의 조합으로 구성된다. 여기서 밝기를 제외한 두 요소는 적록(red-green), 황청(yellow-blue)으로 서로 대립되는 색을 묶은 개념으로 이 요소들은 회색을 기준점으로 잡고 서로 반대 방향으로 뻗어가는 구조이다.

그림 8은 회색조로 변환한 원본 이미지와 LAB모델로 변환한 이미지를 합성한 결과를 보여주고 있다.

회색조 변환만 사용했을 때는 어두운 색을 가진 머리카락, 옷과 같은 부분이 자세히 표현되지 않는 반면에 회색조모델과 LAB모델을 합성한 결과는 기존에 잘 보이지 않았던 머리카락과 상의 부분의 주름이 잘 표현되는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 시스템에 적용함으로써 야간 주행이나 터널 주행 시 운전자의 눈 인식 성공률을 증가시켰다.

III. 시스템 구현 결과

표 1은 적응형 EAR 문턱 값 설정 기법의 동작 결과를 보여주고 있다. 초기 구동 시 시스템은 사용자에게 눈을 뜬 상태를 유지하라는 안내를 한 후에 영상 프레임으로부터 7회 연속 이미지를 추출하고, 각각의 이미지로부터 EAR 값을 계산한다. 이렇게 계산된 7개의 EAR 값들의 평균값을 사용자가 눈을 뜨고 있는 상태의 EAR 값으로 설정한다. 같은 방법으로 눈을 감은 상태에서 7회 EAR 값을 측정한 후 평균값을 눈을 감은 상태의 EAR 값으로 설정한다. 실험 결과에서 볼 수 있듯이 눈을 뜬 상태의 3번째 EAR 값과 눈을 감은 상태의 1번째 EAR 값이 각각 감은 상태와 뜬 상태로 측정이 된 것을 볼 수 있다. 그러나 7회 측정값들의 평균치를 최종 EAR 값으로 사용하기 때문에 사용자가 중간에 눈을 깜빡이는 경우에도 최종 결과인 OPEN_EAR과 CLOSE_EAR 간에는 확실한 차이가 있음을 알 수 있다. 시스템에서는 이 두 값의 중간 값을 문턱 값으로 지정하여 사용자가 눈을 뜬 상태인지 감은 상태인지를 판단하는데 사용하게 되는데, 이처럼 시스템이 사용자의 눈 크기에 적응하면서 최적의 문턱 값을 지정함으로써 눈 상태 검출의 오차를 줄일 수 있다.

그림 9는 야간 운전 상황을 고려한 어두운 영상으로부터의 눈 인식 결과를 보여주고 있다. 카메라로부터 받은 영상 이미지를 그대로 사용하는 경우 눈 표지점 좌표를 표시하지 못하는 반면, 원본 이미지의 회색조 이미지와 LAB 모델 이미지를 합성하여 사용한 경우는 눈을 인식하여 눈 표지점의 6개 좌표를 표시하는 것을 알 수 있다.

그림 10은 눈 영상비를 이용한 운전자 상태 경고 시스템의 최종 구동 모습을 보여주고 있다. 적응형

표 1. 적응형 EAR 문턱 값 계산 실험 결과
Table. 1 Experimental result of adaptive EAR threshold calculation

Eye Opened	
1st EAR	0.2555
2nd EAR	0.2587
3rd EAR	0.1829
4th EAR	0.2788
5th EAR	0.2606
6th EAR	0.2643
7th EAR	0.2683
OPEN_EAR (Avg.)	0.2527

Eye Closed	
1st EAR	0.2135
2nd EAR	0.1673
3rd EAR	0.1926
4th EAR	0.1508
5th EAR	0.1682
6th EAR	0.1765
7th EAR	0.1518
CLOSE_EAR (Avg.)	0.1744

OPEN_EAR (Avg.)	0.2527
CLOSE_EAR (Avg.)	0.1744
EAR Threshold	**0.2136**

(a) (b)

그림 9. (a) 원본 이미지와 (b) 회색조+LAB 모델 이미지를 사용한 눈 표지점 인식 결과
Fig. 9 (a) original image and (b) eye landmark recognitions using gray-scale + LAB model image

EAR 문턱 값 설정 과정을 거쳐 0.24가 문턱 값으로 설정된 것을 볼 수 있다. 캡쳐된 화면을 보면 사용자의 눈이 감겨 EAR 값이 0.20이 되었으며, 시스템은

그림 10. 눈 영상비를 이용한 운전자 상태 경고 시스템의 동작
Fig. 10 Operation of the driver's condition warning system using eye aspect ratio

이 상태를 운전자가 졸음운전을 하고 있다고 판단하여 왼쪽 상단에 표시된 것과 같이 운전자에게 경고를 준다. 실제 경고 방식은 화면에 경고 문구와 함께 라즈베리파이의 GPIO에 연결된 진동기를 동작시킨다. 이러한 과정을 통해 운전자가 졸음 등으로 인해 전방주시를 하지 않는 경우 운전자에게 상황에 대한 경고함으로써 사고 발생을 미연에 방지할 수 있도록 도울 수 있다.

Ⅳ. 결 론

본 논문은 오픈소스 하드웨어중 하나인 라즈베리파이를 이용하여 운전자의 눈 영상비를 이용한 상태 경고시스템의 설계 방법에 대해 소개하고 있다. 제안하는 시스템은 눈 인식을 위한 카메라와 카메라를 통해 들어오는 정보를 처리하는 라즈베리파이, 그리고 그 정보를 통해 운전자에게 경고를 줄 때 필요한 진동기로 구성되어 있다. 주 처리 역할의 라즈베리파이에서는 연결된 웹캠을 이용하여 운전자의 눈을 인식하고 좌표를 입력하여 눈 영상비를 계산한다. 눈의 상태를 판단하는데 사용되는 문턱치 값은 사용자마다 최적의 값을 설정할 수 있도록 사용자가 눈을 감았을 때와 눈을 떴을 때의 영상비의 평균을 이용한다. 사용자의 눈 영상비 값이 지정된 문턱치보다 낮게 유지될 때는 연결된 진동기에 신호를 전송하여 진동이 울리게 함으로써 운전자가 전방주시를 할 수 있도록 돕는다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] B. Kim and B. Lee, "Biosignal-based Driver's Emotional Response Monitoring System: Part 1. System Implementation," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 13, no. 3, 2018, pp. 677-684.

[2] J. Kwon, D. Kim, T. Hwang, and H. Park, "A Development of Effective Object Detection System Using Multi-Device LiDAR Sensor in Vehicle Driving Environment," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 13, no. 2, 2018, pp. 313-320.

[3] Y. Ahn and S. Kwak, "Long Distance Vehicle Recognition and Tracking using Shadow," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 14, no. 1, 2019, pp. 251-256.

[4] K. Jang and S. Kwak, "Fast Center Lane Detection Method for Vehicle Applications," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 9, no. 6, 2014, pp. 649-656.

[5] J. Jin, B. Yoo, W. Lee, and G. Kim, "Development of technology in estimating of high-risk driver's behavior," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 11, no. 5, 2016, pp. 531-538.

[6] T. Soukupova and J. Cech, "Eye-Blink Detection Using Facial Landmarks," *21st Computer Vision Winter Workshop*, Rimske Toplice, Slovenia, Feb. 2016.

[7] J. Wong and P. Lau, "Real-Time Driver Alert System Using Raspberry Pi," *ECTI Trans. on Electrical Eng., Electronics, and Communication*, vol. 17, no. 2, 2019, pp. 193-203.

[8] W. Chang, L. Chen, and Y. Chiou, "Design

and Implementation of a Drowsiness-Fatigue-Detection System Based on Wearable Smart Glasses to Increase Road Safety," *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, vol. 64, no. 4, 2018, pp. 461-469.

[9] W. Chee, P. Lau, and S. Park, "Real-time Lane Keeping Assistant System on Raspberry Pi," *IEIE Trans. on Smart Processing & Computing*, vol. 6, no. 6, 2017, pp. 379-386.

[10] Y. Kim, S. Park, and D. Kim, "Research on Robust Face Recognition against Lighting Variation using CNN," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 12, no. 2, 2017, pp. 325-330.

[11] H. Shin, S. Lee, J. Park, and J. Song, "Performance Improvement of Optical Character Recognition for Parts Book Using Pre-processing of Modified VGG Model," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 14, no. 2, 2019, pp. 433-438.

[12] N. Dalal and B. Triggs, "Histograms of oriented gradients for human detection," *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, San Diego, USA, June 2005.

저자 소개

신문창(Moon=Chang Shin)

2020년 서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과 졸업(공학사)

※ 관심분야 : 영상처리, 임베디드 디바이스 프로그래밍

이원영(Won-Young Lee)

2006년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(공학사)

2008년 KAIST 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사)

2012년 KAIST 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사)

2012~2015년 삼성전자 메모리사업부 책임연구원

2015년~현재 서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과 조교수

※ 관심분야 : VLSI, High-speed Serial Interface