

기계학습 기반의 신호등 검출과 형태적 정보를 이용한 인식 알고리즘

Machine Learning based Traffic Light Detection and Recognition Algorithm using Shape Information

김정환*, 김선규*, 이태민*, 임용진*, 임준홍*

Jung-Hwan Kim*, Sun-Kyu Kim*, Tae-Min Lee*, Yong-Jin Lim*, Joonhong Lim*

Abstract

The problem of traffic light detection and recognition has recently become one of the most important topics in various researches on autonomous driving. Most algorithms are based on colors to detect and recognize traffic light signals. These methods have disadvantage in that the recognition rate is lowered due to the change of the color of the traffic light, the influence of the angle, distance, and surrounding illumination environment of the image. In this paper, we propose machine learning based detection and recognition algorithm using shape information to solve these problems. Unlike the existing algorithms, the proposed algorithm detects and recognizes the traffic signals based on the morphological characteristics of the traffic lights, which is advantageous in that it is robust against the influence from the surrounding environments. Experimental results show that the recognition rate of the signal is higher than those of other color-based algorithms.

요약

최근 자율 주행에 관한 다양한 연구가 진행되는 가운데 신호등 검출 및 신호 인식 알고리즘은 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 기존에 알고리즘의 대부분은 색상을 기반으로 검출하고 인식한다. 이러한 방법은 영상의 각도, 거리, 주변 조도 환경 등에 의해 영향을 받아 신호등의 색상이 변화하여 인식률이 낮아진다는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 Haar-like feature 및 SVM(Support Vector Machine) 기반의 신호등 검출과 제원 정보를 이용한 인식 알고리즘을 제안한다. 신호등 검출의 정확성을 향상시키기 위해서 Haar-like feature 이후에 SVM으로 검증한다. Haar-like feature와 SVM는 사전에 지도학습을 시행한다. 검출 과정 후에는 영역 분할을 통해서 신호만을 추출하여 점등 여부를 파악하고 최종적으로 인식하는 과정을 거친다. 제안한 알고리즘은 기존의 알고리즘과 달리 신호등의 형태학적 특성을 기반으로 검출하고 인식하므로 주변 환경으로부터의 영향에 강인하다는 장점이 있다. 블랙박스 영상으로 실험한 결과 기존의 색상 기반 알고리즘보다 신호의 인식률이 높았다.

Key words : Haar-like feature, SVM, Machine Learning, Traffic Light, Autonomous Vehicle, Black-box

* Dept. of Electronic Engineering, Hanyang University

★ Corresponding author

E-mai:jhlim@hanyang.ac.kr, Tel:+82-31-400-4043

※ Acknowledgment

This research was supported in part by Ansan-Si hidden champion fostering and supporting project funded by Ansan city and in part by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (Grant No.2017R1D1A1B03033806).

Manuscript received Mar. 08, 2018; revised Mar. 24, 2018 ; accepted Mar. 26, 2018

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근에 차선이탈 경보 시스템, 첨단 운전자 보조 시스템 등과 같은 자율 주행 및 지능형 안전 시스템에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이 가운데 신호등 검출 및 인식 알고리즘은 중요한 부분 중에 하나이다[1]-[4]. 기존에 신호등 인식 알고리즘의 경우에는 빛으로 신호를 표시하는 신호등의 특징에 착안하여 색상을 기반으로 한 인식 알고리즘이 거의 대부분이다[3]. 이러한 색상 기반은 알고리즘이 간단하지만 그림 1과 같이 영상의 각도, 거리 등의 외부적인 요인과 주간, 야간, 노을 등 주변 환경의 조도가 변하는 상황에 의해 같은 신호임에도 색상이 달라 보여 인식률이 낮아질 수 있다는 단점이 있다.

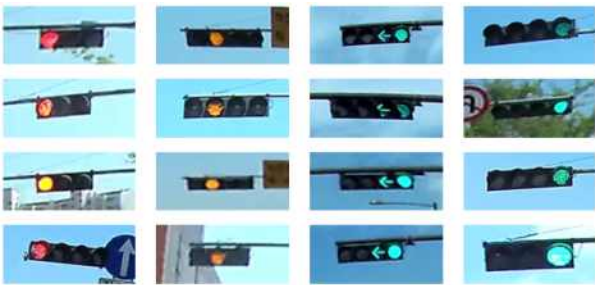


Fig. 1. The changed traffic light color by surrounding environment

그림 1. 주변 환경에 의해 색상 변화를 보이는 신호등

본 논문에서는 이러한 단점을 해결하기 위해서 Haar-like feature와 SVM을 사용하여 신호등을 검출하는 것과 신호등의 형태학적 제원 정보를 이용하여 신호를 인식하는 알고리즘을 제안한다. 신호등의 형태학적 제원은 불변하기 때문이다.

신호등을 검출하기에 앞서 Haar-like feature와 SVM에 지도 학습을 먼저 시킨다. 그리고 연산 수행 시간을 줄이기 위해서 ROI(Region Of Interest)를 설정한다. 렌즈에 의해서 ROI 영상은 왜곡을 가지고 있으므로 보정을 거친다. 보정된 ROI 영상에서 신호등 후보 이미지들을 Haar-like feature를 통하여 검출한다. 검출된 후보 이미지들의 검증 방법으로 사전에 지도 학습된 SVM을 사용하여 최종 후보들을 선출한다. 선출된 후보 이미지들은 정규화 과정과 신호등의 제원 정보를 통해 신호등의 종류에 맞게 분류된다. 최종적으로 각 신호의 영역에 맞게 이미지를 나누고 점등

여부를 판단하여 신호등의 신호를 인식한다. 그림 2는 제안한 신호등 검출 및 인식 알고리즘이다.

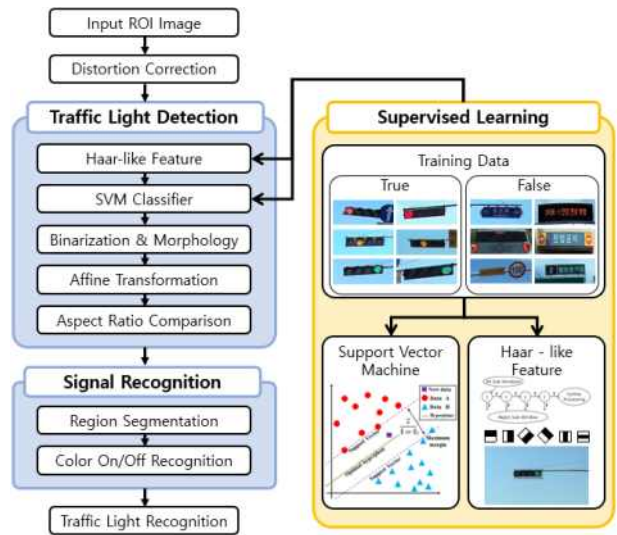


Fig. 2. Traffic light detection and recognition algorithm

그림 2. 신호등 탐지 및 인식 알고리즘

II. 신호등 학습

기계 학습의 유형에는 지도 학습, 준지도 학습, 비지도 학습, 강화 학습이 있다. 본 논문에서는 지도 학습으로 Haar-like feature와 SVM에 신호등의 특징을 학습시켰다.

1. Haar-like feature 지도 학습

Haar-like feature는 픽셀을 이용한 알고리즘과 달리 영역 간의 밝기 차이를 특징으로 분류하는 기법이기에 학습 정보량을 줄일 수가 있어 복잡한 형태의 물체도 쉽게 학습시킬 수 있다. 그러므로 픽셀을 이용한 알고리즘보다 연산량이 적어서 빠른 검출이 가능하다. 또한 영상에서 반복적이고 지역적으로 특징을 검출하기 때문에 검출하려는 대상이 일부분 가려져도 다른 부분의 특징으로 검출해낼 수 있다[5]. 그림 3은 Haar-like feature 무늬로 검출하고자 하는 물체의 특징에 맞게 무늬를 설계할 수 있다.

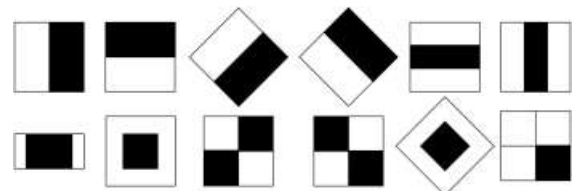


Fig. 3. Haar-like feature patterns

그림 3. Haar-like feature 무늬

가. 이미지 적분

영역 간의 밝기 차이를 나타내는 특징값은 설계한 Haar-like feature 무늬가 이미지상에서 이동할 때 영역 내를 적분하여 얻을 수 있다. 특징값이 이득값을 넘기면 신호등에 대한 Haar-like feature가 되는 것이다. 이미지 내 x, y 좌표에서 적분 이미지는

$$ii(x, y) = \sum_{x' \leq x, y' \leq y} i(x', y') \quad (1)$$

와 같이 구할 수 있다. 여기서 $ii(x, y)$ 는 적분 이미지이고 $i(x, y)$ 는 원본이다.

나. AdaBoost

하나의 Haar-like feature만을 가지고는 강건한 분류기를 설계할 수 없다. 이에 학습 알고리즘으로 AdaBoost(adaptive boosting)를 같이 사용한다. AdaBoost는 다수의 약한 분류기를 결합하여 하나의 강건한 분류기를 생성하는 학습 알고리즘이다. 그림 4와 같이 올바르게 인식된 특징에 대해서는 가중치를 감소시키고 잘못 인식된 특징에 대해서는 가중치를 증가시켜 다음 단계의 약한 분류기에 반영시킨다. 이러한 과정을 단계적으로 구성하여 최종적으로 강건한 분류기를 생성한다. AdaBoost의 알고리즘은 그림 4와 같다.

Algorithm 1. AdaBoost
 Given : $(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)$ where $x_i \in X, y_i \in \{-1, +1\}$
 Initialize weights : $D_1(i) = 1/m$ for $i = 1, \dots, m$.
 For $t = 1, \dots, T$:
 • Train weak learner using distribution D_t
 • Get weak hypothesis $h_t : X \rightarrow \{-1, +1\}$
 • Aim : select h_t with low weighted error :

$$\epsilon_t = \Pr_{i \sim D_t} [h_t(x_i) \neq y_i].$$

 • Choose $\alpha_t = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 - \epsilon_t}{\epsilon_t} \right)$.
 • Update, for $i = 1, \dots, m$:

$$D_{t+1(i)} = \frac{D_{t(i)} \exp(-\alpha_t y_t h_t(x_i))}{Z_t}$$

 where Z_t is a normalization factor (chosen so that D_{t+1} will be a distribution).
 Output the final hypothesis:

$$H(x) = \text{sign} \left(\sum_{t=1}^T \alpha_t h_t(x) \right).$$

Fig. 4. AdaBoost algorithm for classifier learning
 그림 4. 분류기 학습을 위한 AdaBoost 알고리즘

지도 학습을 위한 Positive 이미지로는 다양한 종류의 신호등으로 하였으며 Negative 이미지는 신호등이 없는 표지판, 도로 영상 등으로 입력했다. 그림 5는 AdaBoost 학습 순서도이다.

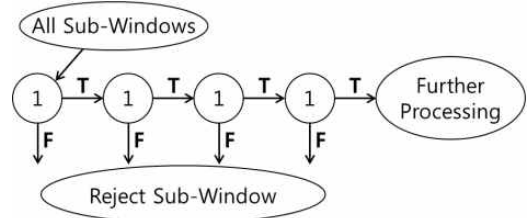


Fig. 5. AdaBoost algorithm flowchart
 그림 5. AdaBoost 학습 알고리즘 순서도

2. SVM 지도 학습

데이터를 분류할 때 최적화된 경계면이 없으면 오차가 발생할 수 있다. SVM은 이러한 단점을 해결하기 위해서 그림 6과 같이 그룹 간에 거리가 가장 먼 최적의 분리 경계면을 갖는 초평면(Hyperplane)을 구하여 분류를 한다[6]. 서포트 벡터들 사이의 거리(margin)는

$$\text{margin} = 2s = \frac{2|d(x)|}{\|W\|_2} = \frac{2}{\|W\|_2} \quad (2)$$

와 같이 구할 수 있다. 여기서 s 는 분할 띠의 한 쪽 너비이고 $d(x) = W^T X + b = 0$ 이다. W 는 초평면에 수직인 법선 벡터이고 b 는 바이어스다. X 는 $X = (x_1, \dots, x_d)^T$ 로서 d 차원 특징 공간의 점이다.

본 논문에서 SVM은 후보 이미지들을 검증하는 단계이므로 Haar-like feature 결과 이미지들로 지도 학습했다. Haar-like feature로 얻어진 이미지가 신호등이면 True이고 아니면 False이다.

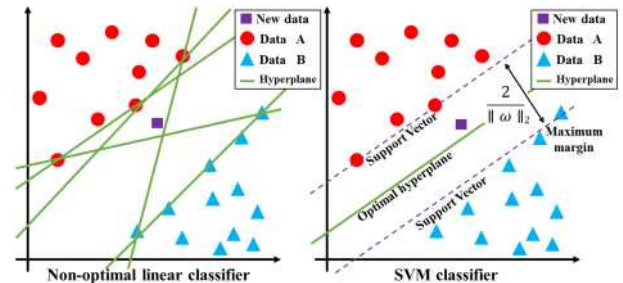


Fig. 6. Non-optimal linear classifier and SVM classifier
 그림 6. 비최적 선형 분류기 및 SVM 분류기

III. 신호등 검출

1. ROI 지정 및 왜곡 보정

입력 영상의 모든 영역에 대해서 영상 처리를

수행하면 불필요한 부분도 포함되어 연산량 증가로 처리 속도의 감소가 발생할 수 있고 오차율이 올라갈 수도 있다. 본 논문에서는 신호등을 검출하는 것이 목적이므로 그림 7과 같이 영상의 하단 50% 영역과 좌측과 우측 각각 20% 영역을 제외한 부분을 관심 영역으로 지정했다. 또한 렌즈의 특성으로 인해 왜곡되는 이미지를 보정하였다.



Fig. 7. Region of interest
그림 7. 이미지 내 ROI 지정

2. Haar-like feature 및 SVM

왜곡이 보정된 ROI 이미지가 입력되면 1차적으로 사전에 지도 학습한 Haar-like feature를 이용해 신호등 후보 이미지들을 검출한다. 이후 SVM으로 검증해서 최종 신호등 후보 이미지들을 선출한다.

3. 이진화 및 모폴로지

Haar-like feature와 SVM으로 선출된 후보 이미지들은 주변 배경을 포함하고 있다. 신호등을 인식할 때 주변 배경은 불필요한 잡음으로 인식률에 영향을 미칠 수 있다. 본 논문에서는 이진화와 모폴로지를 이용한 신호등 검출 방법을 제안했다.

가. 이진화

이진화에서 적절한 임계값 T 을 설정하는 것은 가장 중요하다. 신호등 영상에서 배경은 신호등과 비교해 상대적으로 밝은 영역이므로 본 논문에서는 픽셀 주변 영역의 평균밝기를 임계값으로 이용하는 지역 가변 이진화 사용했다. 임계값은

$$T(x, y) = \frac{1}{n^2} \sum_{x_i} \sum_{y_i} I(x + x_i, y + y_i) - C \quad (3)$$

와 같이 픽셀을 중심으로 $n \times n$ 주변 영역의 평균 밝기에서 상수 C 만큼을 빼서 결정한다. 그러므로

$n \times n$ 크기와 상수 C 를 설정하는 것에 따라서 결과가 달라진다.

나. 모폴로지

모폴로지에서 팽창(Dilation)과 침식(Erosion)은 기본 연산이다. 팽창은

$$f + S = \cup_{x \in f} S_x \quad (4)$$

와 같이 f 에 구조요소 S 를 씌워 겹치는 곳을 모두 1로 바꾼다. 그러므로 팽창은 구조 요소만큼 외부로 팽창시키는 연산으로 객체의 최외곽 화소를 확장하는 결과를 가진다. 결과적으로 객체 내부의 빈 공간이 채워지고 크기가 확대된다. 반면에 배경은 축소된다. 침식의 경우에는

$$f - S = X | X + s \in f, \forall s \in S \quad (5)$$

와 같은 형태로 구조요소 S 를 씌워 겹치는 곳이 모두 1인 경우에만 그 화소를 1로 결정하기에 객체의 크기가 축소되고 배경은 확장된다. 객체의 크기가 축소되므로 영상 내의 잡음인 작은 객체를 제거할 수 있다. 이러한 팽창과 침식 연산을 조합하여 열기와 닫기 연산을 수행할 수 있다. 열림 연산은

$$f \circ S = (f - S) + S \quad (6)$$

와 같이 침식 후 팽창 연산을 수행한다. 결과적으로 침식 연산을 통해 객체는 축소되며 배경의 잡음이 제거되고 팽창 연산에 의해 원래의 크기로 돌아온다. 닫힘 연산은

$$f \bullet S = (f + S) - S \quad (7)$$

와 같이 팽창 수행 후 침식 연산한다. 결과적으로 팽창 연산을 통해 객체가 확장되고 내부의 빈 공간이 채워지며 침식 연산을 통해 원래의 크기로 축소되어 인접한 객체를 연결하는 작용을 한다. 본 논문에서는 이러한 모폴로지의 특징들을 이용해서 배경에 존재하는 잡음을 제거하고 신호등에 대한 이미지만 추출했다.

4. Affine 변환 및 종횡비 검증

가. Affine 변환

모폴로지 결과 이미지는 신호등의 테두리를 경계로 백·흑으로 나누어져 있다. 그러므로 경계선을 따라 최외곽선을 검출할 수 있다. 검출된 신호등의 최외곽선은 각도 및 거리 등 외부 요인에 의해서 이미지가 왜곡될 수 있다. 그러므로 신호등의 검출률을 높이기 위해서는 정규화 과정이

필수이다. 그림 8과 같이 Affine 변환을 통해 왜곡된 신호등 이미지를 보정할 수 있다.

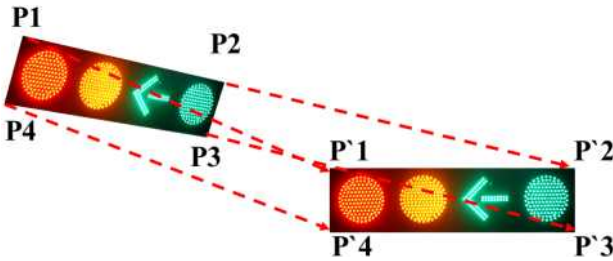


Fig. 8. Affine transformation of traffic light
그림 8. 신호등의 Affine 변환

Affine 변환은

$$\begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 $\cos\theta$ 와 $\sin\theta$ 는 회전 행렬이고 α 와 β 는 크기 조정 행렬이다. t_x 와 t_y 는 평행 이동 행렬이다. 회전각과 중심좌표를 대입하여 왜곡된 신호등 이미지를 수평 한 형태로 보정할 수 있다.

나. 종횡비 검증

왜곡이 보정되면 검출 영역의 면적과 폭, 단면비를 계산하여 신호등의 조건과 일치하는지 최종 검증을 한다. 그림 9와 같이 도로교통법에 따라 3색 신호등은 가로·세로의 비율이 3:1이며 4색의 경우에는 4:1 비율이다. 너비와 종횡비의 조건을 만족하는 객체는 최종 신호등 객체로 판별했다.

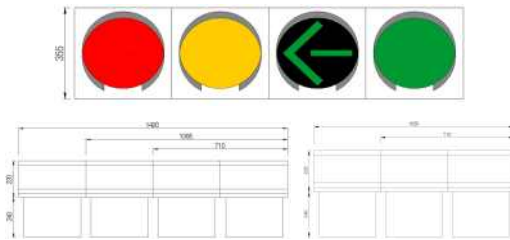


Fig. 9. Traffic light standard
그림 9. 신호등 규격

IV. 신호 인식

1. 신호 영역 분할 및 인식

신호등의 종류가 다양하므로 검증된 신호등 객체 이미지에서 종횡비로 3색과 4색 신호등을 구분한다. 이후 신호를 인식하기 위해서 신호등의

종류에 맞게 신호 영역을 분할한다. 그림 10과 같이 3색 신호등은 3등분으로 영역을 분할하며 4색은 4등분을 한다. 여기서 ㉠는 ‘정지’, ㉡는 ‘감속 및 정지’, ㉢는 ‘주행’, ㉣는 ‘방향’을 의미한다.

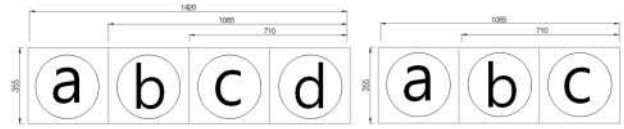


Fig. 10. Signal region segmentation
그림 10. 신호 영역 분할

영역 분할 후 신호의 점등 여부 인식은 색상을 이용한다. 영역이 분할되어 있으므로 주변 환경 변화에 따른 색상 인식 오류를 피할 수가 있다. 하지만 조도에 따른 오류가 발생할 수 있으므로 색상의 범위를 넓게 지정한다. 본 논문에서는 ㉠와 ㉡영역은 적색 계열의 HSV로 지정하며 ㉢와 ㉣영역에서는 녹색 계열로 지정하여 판단한다.

V. 실험 결과

가. 실험 환경

본 논문에서는 제안한 알고리즘을 구현하기 위해 Visual Studio 2015 환경에서 OpenCV3.1 라이브러리를 사용했다. 컴퓨터의 사양은 윈도우10 64bit에 인텔 코어 i7-6700이고 램은 16GB이다. 실험 데이터는 차량의 블랙박스 영상으로 얻었으며 해상도는 1980x1080이다. Haar-like feature의 지도 학습에 사용한 True 이미지는 300개이고 False 이미지는 2000개이다. SVM에 사용한 True는 1850개이고 False는 2000개이다.

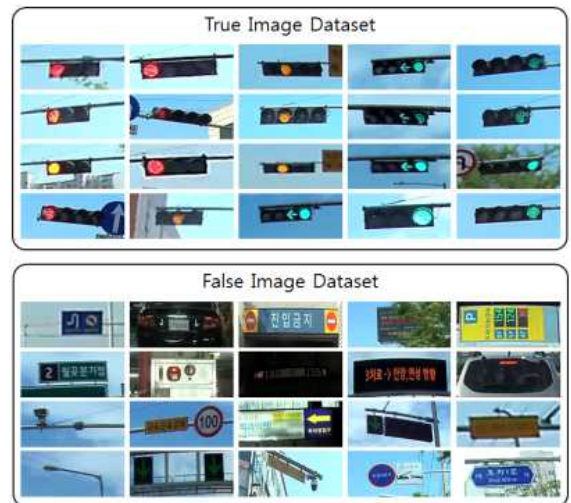


Fig. 11. Dataset image for supervised learning
그림 11. 지도 학습을 위한 데이터 이미지

먼저 ROI를 통해 이미지 영역을 줄이고 1차적으로 Haar-like feature를 수행하여 신호등 후보 이미지들을 검출했다. 2차적으로는 SVM으로 검증하여 검출의 정확성을 높였다. 이후 배경 이미지를 제외한 신호등 객체만을 추출하기 위해서 그림 12와 같은 과정을 진행했다.

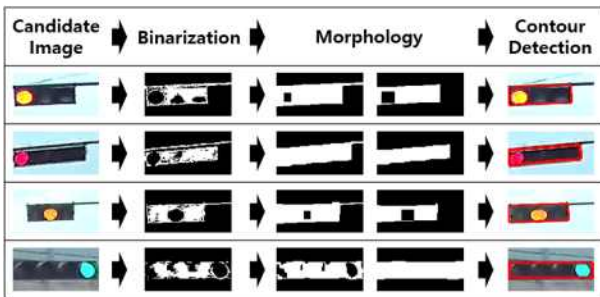


Fig. 12. Traffic light detection process
그림 12. 신호등 검출 과정

후보 이미지에서 신호등 객체만을 추출하기 위해 먼저 지역 가변 이진화를 수행하여 신호등을 강조하고 배경의 잡음을 제거했다. 이진화 수행 후 모폴로지 연산을 반복적으로 수행하여 신호등 객체만을 남기고 나머지 잡음들을 제거했다. 이후 OPencv3.1의 findContours() 함수를 사용하여 외곽선을 검출했다.

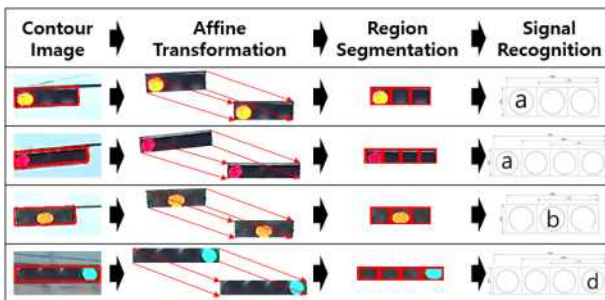


Fig. 13. Traffic light recognition process
그림 13. 신호 인식 과정

외곽선을 검출한 후에는 그림 13과 같이 Affine 변환을 수행하여 각도 및 거리에 의한 왜곡을 보정했다. 왜곡이 보정되면 검출한 객체가 신호등인지를 검증하기 위해서 영역의 면적과 폭, 단면 비를 계산했다. 검증된 객체 이미지는 종횡비에 따라서 3색과 4색 신호등의 종류로 분류되었다. 여기서 종횡비는 3.5를 기준으로 하였다. 3.5 이하의 종횡비를 가진 객체는 3색 신호등으로 분류하고 3.5 이상의 종횡비를 가진 객체는 4색 신호등으로 정한다. 영역 분할 후에는 색상이 변해도 영향을

받지 않으므로 색상 검출을 통해서 신호의 점등 여부를 판별했다. 채도와 명도의 변화에 영향을 받지 않기 위해서 색상 공간을 RGB에서 HSV로 변환하여 판별했다. 표 1은 신호등의 각 영역에 따른 색상 검출을 위한 HSV의 범위를 나타낸다. 그림 14는 제안한 알고리즘의 결과로 색상 변화에 상관없이 신호등을 검출하고 신호를 인식할 수 있음을 보여준다.

Table 1. Traffic light HSV range
표 1. 신호등 HSV 범위

Position	Color Type	Hue	Saturation	Value
Ⓐ, Ⓑ	Red tone	$0 \leq H \leq 90$	$0.5 \leq S$	$0.5 \leq V$
		$300 \leq H \leq 360$		
ⓒ, Ⓓ	Green tone	$90 \leq H \leq 240$	$0.5 \leq S$	$0.5 \leq V$



Fig. 14. Result of traffic light detection and recognition
그림 14. 신호등 검출 및 인식 결과

VI 결론

본 논문은 Haar-like feature와 SVM 기반의 신호등 검출과 제원 정보를 이용한 인식 알고리즘을 제안했다. 실험 결과 제안한 알고리즘은 색상을 기반으로 한 기존의 알고리즘보다 주변 환경에 강인하였다. 특히 조도와 각도에 영향을 받아 신호의 색상이 변해도 신호등의 영역을 기반으로 점등 여부를 판단하기에 인식률을 높일 수 있었다. 하지만 형태학적 특성을 지도학습 기반으로 신호등을 검출하기 때문에 배경이 복잡한 경우와 학습하지 않은 새로운 형태의 신호등에서는 인식률이 낮았다. 향후 연구에서는 이러한 부분을 해결하기 위해서 비지도 학습을 통해서 복잡한 배경과 새로운 형태의 신호등을 지속적으로 학습시켜 인식률을 향상할 예정이다.

References

- [1] Yang Ji, Ming Yang, Zhengchen Lu, Chunxiang Wang, "Integrating Visual Selective Attention Model with HOG Features for Traffic Light Detection and Recognition," *IEEE conf on Intelligent Vehicles Symposium*, 2015, pp. 280-285.
- [2] Gwang-Gook Lee, Byung Kwan Park, "Traffic light recognition using deep neural networks," *IEEE International conf on Consumer Electronics*, 2017, pp. 277-278.
- [3] Sang-Hyuk Lee, "Traffic light detection and recognition algorithm using shape characteristics of traffic light," Master thesis, Hanyang Univ., 2018.
- [4] Nevrus Kaja, Adnan Shaout, Omid Dehzangi, "Two Stage Intelligent Automotive System to Detect and Classify a Traffic Light," *IEEE conf on New Trends in Computing Sciences*, 2017, pp. 30-35.
- [5] P. Viola, M. Jones, "Rapid object using a boosted cascade of simple features," *IEEE conf on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2001, pp. 511-518.
- [6] Saturnino Maldonado-Bascon, Sergio Lafuente Arroyo, Pedro Gil-Jimenez, "Road-Sign Detection and Recognition Based on Support Vector Machines," *IEEE Tras. on Intelligent Transportation System*, vol.8, pp. 264-278, 2007.DOI: 10.1109/TITS.2007.895311

BIOGRAPHY

Jung-Hwan Kim (Member)



2013 : BS degree in System Control Engineering, Hoseo University.
2015 : MS degree in Electronic Systems Engineering, Hanyang University.

2016~current : PhD degree course in Electronic Engineering, Hanyang University.

Sun-Kyu Kim (Member)



2013 : BS degree in Electronic Systems Engineering, Hanyang University.

2015 : MS degree in Electronic Systems Engineering, Hanyang University.

2015~current : PhD degree course in Electronic Engineering, Hanyang University.

Tae-Min Lee (Student Member)



2016 : BS degree in Computer Engineering, Mokwon University.

2016~current : MS degree course in Electronic Engineering, Hanyang University.

Yong-Jin Lim (Student Member)



2015 : BS degree in System Control Engineering, Hoseo University.

2017~current : MS degree course in Electronic Engineering, Hanyang University.

Joonhong Lim (Member)



1979 : BS degree in Electronic Engineering, Seoul National University.

1981 : MS degree in Electrical Engineering, KAIST.

1986 : PhD degree in Electrical and Computer Engineering, University of Iowa.

1986~1989 : Assistant Professor, Dept. of Electronic Engineering, Korea Aerospace Univ.

1989~current : Professor, Dept. of Electronic Engineering, Hanyang Univ.