

安全運転支援のための多様な撮影環境における信号認識

木村文香[†] 高橋友和[†] 目加田慶人^{††} 井手一郎[†] 村瀬 洋[†]

[†] 名古屋大学大学院情報科学研究科 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

^{††} 中京大学生命システム工学部 〒470-0393 愛知県豊田市貝津町床立101

E-mail: †{fkimura,ttakahashi,ide,murase}@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp, ††y-mekada@life.chukyo-u.ac.jp

あらまし 車載カメラ画像を使った運転者支援の一つに信号機認識があげられる。一般的なダイナミックレンジのカメラは、色情報の損失(色飽和)が生じやすく、特に信号機のように輝度の高い物体の色情報を正確に取得することが困難である。そこで本稿では、色飽和が生じているカラー画像からも、安定して交通信号機を検出および認識する手法を提案する。昼間や夜間、順光や逆光などの様々な環境で撮影された点灯中の信号機画像から顕著な色飽和画素を除去し、各信号色の色分布を学習した。様々な環境で撮影された画像を用いた実験により、本手法により良好に信号認識が可能であることを示した。特に夜間に撮影した画像に対する認識性能が高かった。

キーワード ITS, 信号機認識, 色飽和, ヒストグラムインターセクション

Recognition of Traffic Signals in Various Conditions for Safety Driving Assistance

Fumika KIMURA[†], Tomokazu TAKAHASHI[†], Yoshito MEKADA^{††},

Ichiro IDE[†], and Hiroshi MURASE[†]

[†] Graduate School of Information Science, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8603 Japan

^{††} School of Life System Science and Technology, Chukyo University,
101 Tokodachi, Kaizu-cho, Toyota-shi, Aichi, 470-0393 Japan

E-mail: †{fkimura,ttakahashi,ide,murase}@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp, ††y-mekada@life.chukyo-u.ac.jp

Abstract Vision based traffic signal recognition is one of the most useful driving assistance systems by an in-vehicle camera. It is difficult to acquire the correct color information of the objects by common image sensing devices, because their dynamic range is too narrow to obtain correct information. This paper proposes a method to detect traffic signals and to recognize their status from images acquired by general digital camera. We collect learning samples to obtain color information of each signal under various conditions, e.g. nighttime, sunward and anti-sunward. To cope with narrow dynamic range, we extract and learn only the pixels that are not saturated. The proposed method proved that it could recognize signals correctly especially when applied to images taken in the nighttime.

Key words ITS, traffic signals recognition, color saturation, histogram intersection

1. はじめに

近年、事故や渋滞・環境対策など、道路交通が抱える様々な問題を最先端の情報通信技術や制御技術を用いて解決する高度道路交通システム (ITS) に関わる研究が活発になされている。その中でも安全運転の支援は、交通事故の減少や渋滞緩和につながることから大変重要である。車両および道路に設置された各種センサにより、道路や周辺車両の状況などの車外環境を把握することで、運転者に走行環境情報の提供および危険警告、

さらに運転補助といった支援が可能となる。

車外環境の把握に用いられる装置のひとつに、車載カメラがあげられる。車載カメラで取得される画像中には車両、歩行者、標識、車線など運転者にとって有用な情報が多く含まれていることから、画像を解析してそれら対象物を認識する手法が多数提案されている。それら対象物のひとつに交通信号機がある。

本稿では、安全運転支援を目的とした画像からの信号認識の初期段階として、静止カラー画像からの信号灯検出および認識手法を検討する。特に、ハイダイナミックレンジカメラなどの

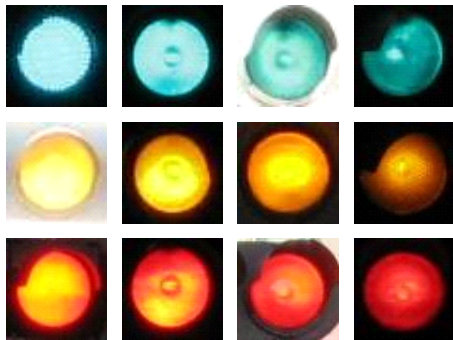


図1 色飽和による信号灯の色変化

特殊なデバイスではなく、一般的なカメラで撮影した画像を対象とし、ダイナミックレンジが狭いことによる影響を考慮した手法の開発を目的とする。

文献 [3] は、色覚障害者のための福祉的補助システムとして、信号機の色情報を運転手に提示することを目的とした信号機抽出手法を提案している。この手法では、HIS 表色系の明度と RGB 値を併用することで静止画像から 95% の精度で信号機の検出が可能である。しかし、固定閾値を用いて信号領域を抽出するため、画像の色情報を正確に計測できることが前提となっている。一方、一般の車両に搭載可能なカメラのダイナミックレンジは十分ではないため、これらの前提が満たされることはない。これに対して、色飽和を抑えて物体の正確な色情報を取得できるハイダイナミックレンジカメラを利用すれば、容易に正確な色情報を取得でき、高い精度で信号認識が可能となる [2]。

提案手法では、周囲環境の様々な変化に対応するために、あらかじめ多様な環境下で撮影した画像を用いて学習する。また認識時には、色飽和が発生している画素を除去し、学習情報との類似度を測定することで画像中から信号機の候補となる領域を抽出する。抽出された領域の形状特徴としてその円形度を用い、最終的に信号機を検出する。

以下、2. では様々な条件での信号灯の色特徴についてまとめ、3. で提案手法の概要を述べ、4. で実験結果をまとめる。

2. 信号機識別の問題点と対策

視認性や色覚異常者による識別を容易にするため、信号や標識の色は色度図上での範囲が規定されている [6]。そのため、信号機認識の手がかりとしては、各信号灯の色特徴が重要となる。しかし、輝度や彩度の高い物体を、一般的なダイナミックレンジのカラーカメラで撮影すると、容易に色飽和が生じてしまう。多様な環境に設置されている信号機は、周囲の光量や太陽の位置などの影響を受けて画像中での色が大きく変化し、周囲が暗い場合には真っ白に色飽和してしまう (図 1)。また、街灯や周囲の車のライトなど紛らわしい物体が多いという問題もある。健常者でも、周囲に信号と類似した光源が多数存在する場合や、疲労から注意力が散漫になっている場合には、本来視認性の高いはずの信号機を見落とすことがある。特に、色覚障害者にとっては輝度の高い物体の色の認識が困難なことから、信号機の色を識別を見誤る可能性が高い。

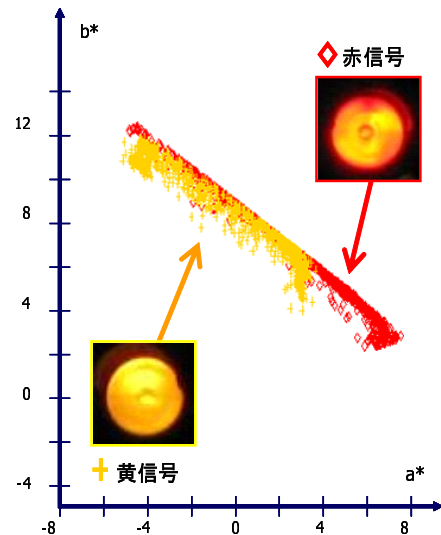


図2 黄信号と赤信号の色空間上での分布

色飽和が特に問題となるのは、飽和により画像中の物体の色が、本来の色から変化してしまう場合である。信号機を撮影する場合、特に、下記の 2 つの場合が問題となる。

- 黄信号と水銀灯の色分布の重なり
- 黄信号と赤信号の色分布の重なり

前者は、黄色の色飽和により水銀灯と色分布が類似してしまうということである。この問題に対しては、顕著な色飽和が発生している画素を色飽和画素として除去してから判定することにより、黄信号の未検出を防止する。後者は、赤信号の色飽和により黄信号と色分布が類似してしまうことである (図 2)。この問題に関しては、学習情報として青・黄・赤 3 色の信号灯の色ヒストグラムを作成し、テスト画像中の検出対象領域のヒストグラムと比較する。これにより、黄信号と赤信号の認識誤りを防止する。

3. 道路情景画像からの信号機認識手法

3.1 概要

図 3 の手順に従って、静止カラー画像からの信号機検出および認識を行う。

学習段階と認識段階を設け、入力画像は全て一定の絞りとシャッター速度で撮影し、全画像中から色飽和画素を除去する。

学習段階では、複数枚の学習用画像から、学習情報として点灯中の信号灯の色ヒストグラムを作成する。

認識段階では、テスト画像中から学習情報と類似した色情報を持つ画素を候補画素として抽出する。候補画素が抽出された画像に対して適当な大きさの窓を複数用意して画像内を走査し、各窓内で学習情報との色の類似度が高い領域を、信号機を含む可能性のある領域として抽出する。昼夜別々の手法を用いて領域補正を行った後、各領域において円形度による閾値処理を行い信号機を認識する。以降で各処理について詳しく説明する。

3.2 色飽和画素の除去

色飽和が発生している画素においては、本来の色情報が損欠しているため、同色の信号機との色分布も著しく異なり、他

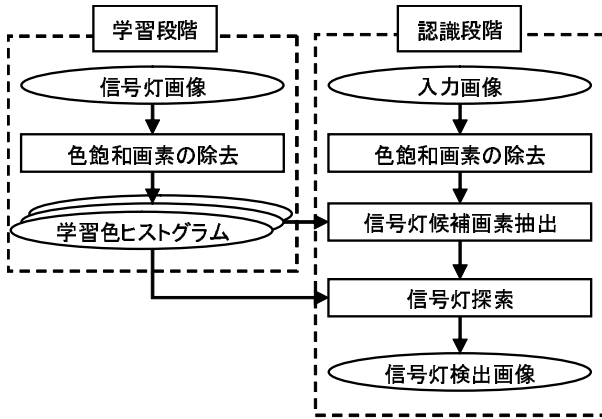


図 3 提案手法の流れ

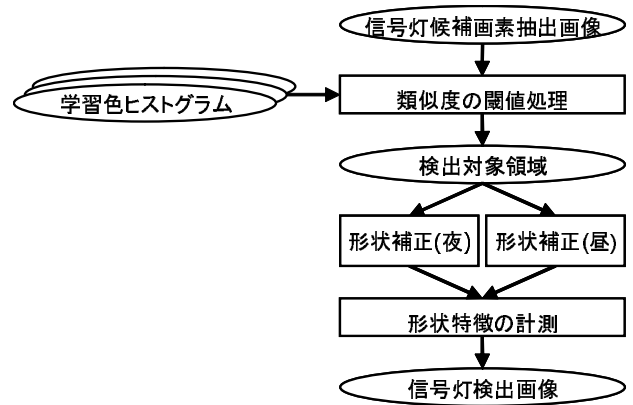


図 4 信号灯探索の流れ

の色の信号灯や街灯の色分布に類似することがある．そこで， R, G, B 各色 8 ビット符号なし整数で表されている画像に対して，

R, G, B のうち 2 つの値が α 以上 ($\alpha = 250$ を使用)，
かつ、残りの 1 つの値が β 以上 ($\beta = 150$ を使用)

である画素を、色飽和画素として除去する．

3.3 色ヒストグラムの学習

あらかじめ多様な環境で撮影された信号灯の色情報を学習し、認識に用いる．学習用画像に含まれる点灯中の信号灯領域を人手により抽出し、画像サイズを正規化した後に色ヒストグラムの形で信号灯の色を学習する．本稿では、ヒストグラムを作成する表色系に $L^*a^*b^*$ 表色系を用いた．画素の RGB 値を $L^*a^*b^*$ に表色系変換をし、 a^*-b^* 平面上で 2 次元ヒストグラムを作成する． $L^*a^*b^*$ 表色系は式 1 の各パラメータで表される [6]．ここで X, Y, Z はそれぞれ XYZ 表色系値を表し、 X_n, Y_n, Z_n は標準の光の下の完全拡散面の 3 刺激値である．

$$L^* = \begin{cases} 116 \times \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - 16 & \left(\frac{Y}{Y_n} > 0.008856\right) \\ 903.3 \times \left(\frac{Y}{Y_n}\right) & \left(\frac{Y}{Y_n} \leq 0.008856\right) \end{cases}$$

$$a^* = 500 \times \left(f\left(\frac{X}{X_0}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_0}\right)\right)$$

$$b^* = 200 \times \left(f\left(\frac{Y}{Y_0}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_0}\right)\right)$$

$$f(y) = \begin{cases} y^{\frac{1}{3}} & (y > 0.008856) \\ 7.787 \times y + \frac{16}{116} & (y \leq 0.008856) \end{cases} \quad (1)$$

具体的には、 a^* 軸を ($-8 \leq a^* \leq 8$) の範囲で 17 分割し、 b^* 軸を ($-8 \leq a^* \leq 14$) の範囲で 23 分割して計 391 個のピンの 2 次元ヒストグラムとした．全ての学習用画像から、青・黄・赤信号灯 3 つの 2 次元ヒストグラムを作成し、学習色ヒストグラムとする．

3.4 信号灯候補画素の抽出

学習した色ヒストグラムを用いて、閾値処理により入力画像中より信号灯の候補となる画素を抽出する．作成した学習色ヒ

ストグラム上で閾値を設定し、閾値以上のヒストグラムに対応する a^*-b^* 値をもつ画素のみを入力画像中から抽出する．この処理により、次節で述べる信号灯探索処理を行う領域を限定し、処理の高速化を図る．

3.5 信号灯探索

信号灯探索の流れは図 4 に示すように、信号灯候補領域の検出、形状補正、形状特徴による絞り込みからなる．

3.5.1 検出対象領域の検出

信号灯候補画素が抽出された画像上で窓を走査し、学習ヒストグラムとの類似度が閾値以上となる窓を、検出対象領域として抽出する．本稿では、 $80 \times 80, 60 \times 60, 40 \times 40$ pixel の 3 種類の窓を用いた．同じ画像に対して、異なる大きさの窓を複数適用することで、見かけの大きさが異なる信号灯を検出することができる．より撮影地点に近い信号灯が大きく映ることから、窓サイズの大きいものから処理を始める．ここで、検出の冗長を防ぐために、ある大きさの窓で処理したときに信号灯と判定された領域は、その次の大きさの窓では処理対象外とする．

窓内の有効画素の数がある閾値以上の窓に対して、学習色ヒストグラムとの類似度を計算する．ここで画素数の閾値を T とする．まず、各窓内の有効画素数で学習ヒストグラムを正規化する．ヒストグラム間の類似度として Swain らにより提唱されたヒストグラムインターセクションを用いる [4]．正規化された学習ヒストグラムを L_i 、窓内の有効画素から構成されるヒストグラムを H_i とすると、ヒストグラムインターセクション S_{MH} は、

$$S_{MH} = \frac{\sum_{i=1}^I \min_i(L_i, H_i)}{\sum_{i=1}^I H_i} \quad (2)$$

によって与えられる．ここで I はヒストグラムのビン数を表す．この値は正規化されているため、0 から 1 までの値をとる．ここでは、窓サイズに適した大きさの信号灯を抽出したいため、式 (2) を $\sum_{i=1}^I H_i$ ではなく、類似度を計算する窓を決定する際に使用した閾値 T で重みを付ける．

$$S_{MH} = \frac{\sum_{i=1}^I \min_i(L_i, H_i)}{T} \quad (3)$$

これにより同じ色みでも探索窓に比べて画素数が少ない図形は類似度が小さく、反対に画素数がウィンドウサイズに近いものは類似度が大きくなる。類似度 S_{MH} が閾値以上の窓を、信号灯を含む可能性がある領域として、検出対象領域と呼ぶことにする。

閾値以上の類似度を持つ窓は、1つの物体に対して複数検出されてしまう。そこで、ある範囲内の窓は類似度が最大の窓1つに絞る。類似度が最大の窓はそのまま候補窓として抽出し、その窓から候補窓の範囲内では検出対象がないものとした。

3.5.2 領域形状の補正

前節までの処理は、信号灯の色特徴に着目していた。色特徴に着目した場合、飽和している画素は信頼性の観点から除去し、更に学習情報と類似しない色の画素も取り除いた。しかし、形状特徴に着目する場合、それらの画素も形状を構成する大切な画素であるため、考慮に入れて形状特徴を計測する必要がある。

夜間に撮影された画像の場合、信号灯は画像中に含まれる輝度の高い領域に限られているので、画像全体を単一の閾値で2値化することで安定して抽出することができる。具体的には、候補窓を抽出した後に判別分析法を用いて画像全体を2値化した。しかし入力画像が昼の画像の場合、画像全体のヒストグラムが複雑となり、かつ、周囲環境によって画像中の信号灯領域の濃度値も大きく変化するため、単純な閾値処理では、信号灯領域を円形として取り出せない。そこでこの場合、色差に着目して、候補窓内の有効画素を中心とした4近傍領域拡張を行う。これにより、前処理やカラーセグメンテーションで除外された画素でも、隣接画素に信号灯らしい色の画素があれば処理対象画素とすることができる。色差は次式で定義した。

$$D(p_1, p_2) = \sqrt{(R_1 - R_2)^2 + (G_1 - G_2)^2 + (B_1 - B_2)^2} \quad (4)$$

ただし、 R_i, G_i, B_i は画素 p_i のRGB値である。ある画素 p_c とその4近傍画素との間で、色差が閾値 (=10) より小さい画素を信号灯候補画素に加える。新たに加わった画素の4近傍と p_c との間で同様の処理を行い、これを拡張される画素がなくなるまで繰り返す。

3.5.3 形状特徴の計測

信号灯の形状特徴として、円形特徴を利用する。信号灯は車体のほぼ正面に位置するため、円形特徴を有することが多いためである。式(5)で図形の円形度を計測し、領域の形状特徴を計測する。

$$\text{円形度} = \frac{4S}{L_{max}^2} \quad (5)$$

ここで S は図形の面積、 L_{max} は重心から境界までの最大距離である。各領域ごとにその円形度を計測し、その値が閾値以上であれば信号灯として抽出した。

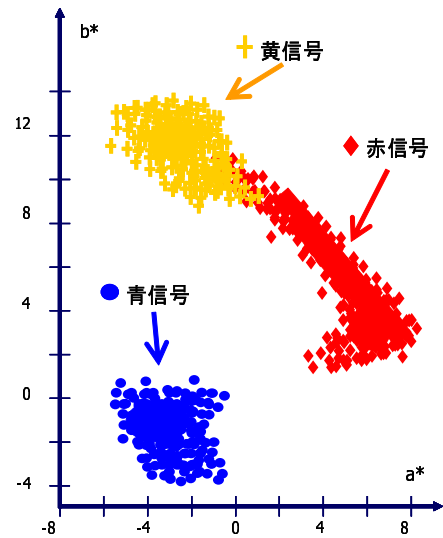


図5 学習に用いた信号灯の色分布。図2と比較すると黄信号と赤信号の重複部分が減少していることがわかる

4. 実験と考察

4.1 実験方法

カラーカメラにより撮影した画像に対して本手法を適用し、信号灯検出および認識の実験を行った。異なる日時、地点で撮影した様々な画像を用いて、信号灯認識の正解率を調べた。実験には以下のデータを使用した。交差点から30m~100m離れた地点から撮影を行い、各交差点に設置されている全ての信号機を撮影した。特に夜間の画像に顕著に現れる色飽和を抑制するために、絞りを高めに固定して撮影する。

表1 実験条件

使用カメラ	Canon PowerShot S2IS
カメラの設定	絞り 7.1, シャッタースピード 1/100
ビット数	RGB各 8bit
画素数	1,600 × 1,200 pixels
撮影時刻	10:00 ~ 24:00
学習に用いた信号灯数	青, 黄, 赤各 30基
撮影交差点数	25地点
実験に使用した画像枚数	365枚 (昼 181枚, 夜 184枚)
認識対象	半径 10 pixels 以上の信号灯
画像に含まれる認識対象数	426基 (電球式 368基, LED式 58基)

実験では、類似度、円形度の閾値をそれぞれ変化させ、各閾値における認識率を、再現率、適合率により評価した。

4.2 昼画像からの信号認識実験

4.2.1 認識結果

学習に用いた信号灯の色分布図を図5に示す。実験に用いた昼の画像例と、信号灯検出結果の一例を図6に示す。信号灯として認識された領域を矩形で表示してある。図7に円形度の閾値を変化させたときの認識率の変化を示す。再現率と適合率はそれぞれ未検出と誤検出の程度を表す指標であり、どちらも検出が良好であるほど100%に近づく。



図 6 昼画像の実験結果例 (円形度 0.7, 類似度 1.0)

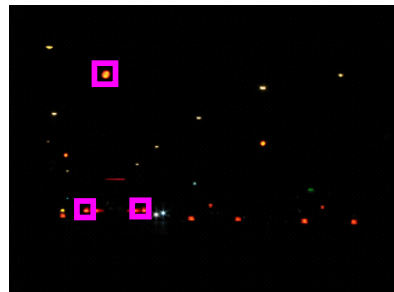
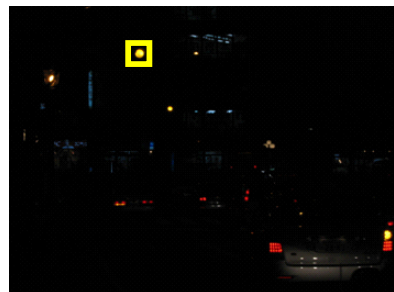
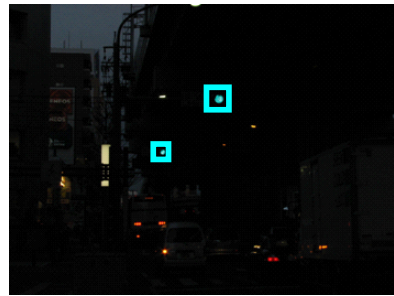


図 8 夜画像の実験結果例 (円形度 0.7, 類似度 0.5)

今回の実験では、最高で再現率 73.6%, 適合率 93.1% (円形度 0.7, 類似度 1.0) で認識が可能であった。このとき、信号灯の色別の再現率は、青信号が 65.1%, 黄信号が 72.1%, 赤信号が 76.7%であった。図 7 から、昼画像の場合再現率が低く未検出が多く発生していることがわかる。未検出となる原因には、検出対象領域が抽出されなかった場合と、領域補正をしても十分な円形領域が得られなかった場合がある。入力が昼画像の場合、検出対象領域は抽出されても、領域補正がうまくいかない例が多かった。

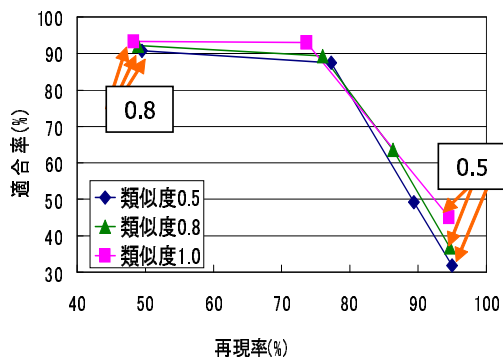


図 7 昼画像の認識率. 図中の枠つきの数字は円形度の閾値を表す.

赤信号を黄信号と誤って認識するなど色飽和による誤分類は発生しなかった。

4.2.2 考察

昼の画像からの検出で一番問題となったのが円形成分の抽出である。円形度を計算する場合、飽和画素や有効画素の抽出で除外された画素も考慮に入れないと、信号灯の領域が正しく抽出できないため、円形度が低くなってしまふ。そこで色差を利用して領域拡張を行うことで図形の整形を試みたが、飽和が顕著な場合は拡張が不十分となってしまう、また色差が小さい場合は拡張されすぎてしまい、正しい領域が得られなかった。信号機の「かさ」が灰色の場合、灰色と青信号の色が似ているため、領域が拡張されすぎてしまい、他の 2 色に比べて再現率が低くなった。また、図 7 から、円形度の閾値を小さく設定すると、適合率が大きく落ち込むことがわかる。このことから、円形特徴は信号を他の物体と識別する大きな手がかりであることがわかる。そのため、正確な形状特徴の抽出が認識率の向上につながるということがわかった。

4.3 夜画像からの信号認識実験

4.3.1 認識結果

実験に用いた夜の画像例と、信号灯検出結果の一例を図 8 に示す。また、図 9 に円形度の閾値を変化させたときの認識率の変化を示す。

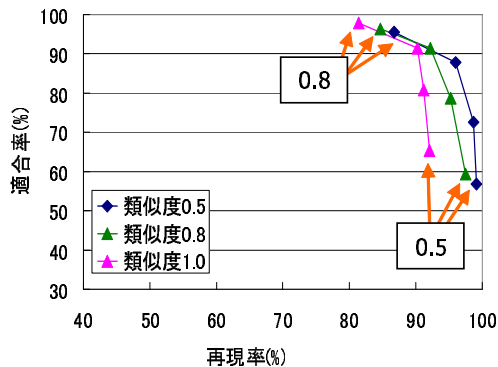


図 9 夜画像の認識率. 図中の枠つきの数字は円形度の閾値を表す.

入力が夜画像の場合, 最高で再現率 96.6%, 適合率 87.9% (円形度 0.7, 類似度 0.5) で認識できた. このとき, 信号灯の色別の再現率は, 青信号が 98.2%, 黄信号が 96.0%, 赤信号が 93.6%であった. 図 9 から, 昼画像に比べて全体的に認識率が向上していることがわかる. ただし, 昼画像を用いた実験に比べて, 車両のランプ等の過検出が多く発生した. 過検出の画像例を図 10 に示す. 昼画像を用いた実験と同様に, 信号灯の色を誤ることはなかった.

4.3.2 考察

円形度を 0.7 に固定した場合, 類似度の値に関係なく適合率が 90%前後となり, 逆に円形度を 0.5 に固定した場合, 類似度が 1.0 のとき以外は適合率が 50%~63%と低い値をとった (図 9). 円形度が認識結果に大きく影響することは昼画像での実験と同様であった. 夜画像からの認識実験のほうが再現率, 適合率ともに昼画像からの認識実験より高くなったのは, 判別分析法を用いて 2 値化することで安定して信号の形状を抽出できたことによる.

夜画像の未検出の原因は, その色特徴を正確に抽出できなかったことに起因したと考えられる. 夜画像は, 昼画像と比べて周囲の環境光が少ないので色飽和を生じやすい. そのため, 前処理として飽和画素の除去を行うと, 信号領域の画素が極端に減ってしまう例もあった (図 11). そのため, 窓内の画素数が面積閾値 S 以下になってしまい, 類似度が計算されなかったり, 計算されたとしても小さな値になってしまい, 候補窓が抽出されなかった.

また, 図 9 から, 円形度を 0.7 に設定すると類似度の値に関

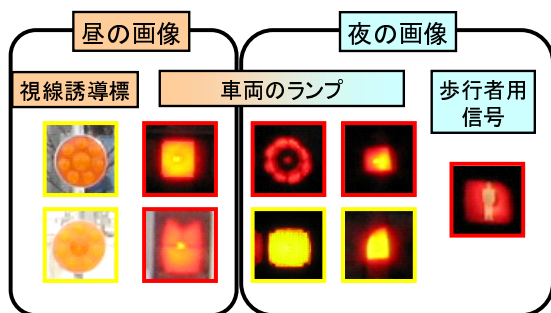


図 10 過検出の画像例 (円形度 0.7, 類似度 1.0)

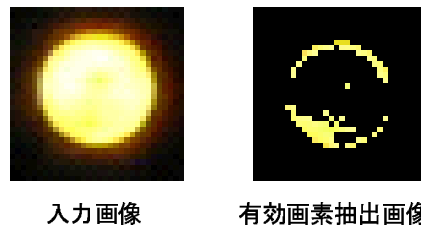


図 11 飽和画素の除去により画素が極端に減少する例

係なく適合率が 90%前後となることがわかる. 夜画像の場合は, 昼画像よりも類似度の閾値を低く設定することで高い精度で信号認識が可能となることがわかった.

5. むすび

本稿では, 安全運転支援に向けて, 色特徴および形状特徴を利用して, 静止カラー画像から信号灯を認識する手法を提案した.

安価なデジタルカメラで生じやすい色飽和画素をあらかじめ除去し, 学習情報と比較することで, 未検出や誤分類を防止した. 学習情報を用いて, 画素の色と領域の色ヒストグラムに着目して, 信号機を含む可能性のある領域を抽出した. 色特徴を計算した後, 形状特徴にのみ着目して円形度を計算し, 信号を抽出した. 実験の結果, 昼画像では再現率 73.6%, 適合率 93.1%, 夜画像では再現率 96.6%, 適合率 87.9%で信号認識が可能であった.

今後の課題として, 天候, 背景, 日時など, より多様な状況で撮影された画像への適用が挙げられる. また, 昼画像の形状抽出手法として, 領域拡張にエッジ検出を併用するなど, 手法の見直しが必要である. 加えて, 車載カメラで撮影された動画画像への適用が挙げられる.

謝辞 日頃より熱心に御討論頂く名古屋大学村瀬研究室諸氏に感謝する. 本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金および 21 世紀 COE プログラム補助金による.

文献

- [1] F. Lindner, U. Kressel, and S. Kaelberer: "Robust Recognition of Traffic Signals", Proc. IEEE 2004 Intelligent Vehicles Symposium, pp.49-53, Jun. 2004
- [2] U. Frank, D. Gavrila, S. Goerzig, F. Linder, F. Paetzold, and C. Woehler: "Autonomous Driving Goes Downtown", IEEE Intelligent Systems, vol.13, no.6, pp.40-48, Nov/Dec. 1998
- [3] 菊江 寿, 廣瀬健一, 長江貞彦: "色弱者のための信号認識システム -信号機特定判別手法の一考察-", 電子情報通信学会 2004 年総合大会, D-12-22, Mar. 2004
- [4] 村瀬 洋, V.V. Vinod: "局所色情報を用いた高速物体探索 -アクティブ探索法-", 電子情報通信学会研究会技術報告, PRMU97-17, May 1997
- [5] Iyadh Cabani, Gwenaelle Toulminet, and Abdelaziz Bensrhair: "Color-based Detection of Vehicle Lights", Proc. IEEE 2005 Intelligent Vehicle Symposium, pp.277-282, Jul. 2005
- [6] 日本色彩学会: "新編色彩科学ハンドブック (第 2 版)", 東京大学出版会, 1998
- [7] 田村秀行: "コンピュータ画像処理", オーム社, 2003