法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-05-10

人間の視覚特性を模倣した自律移動ロボット のための画像処理法に関する提案

SAITO, Hideyuki / 齋藤, 秀幸

```
(出版者 / Publisher)
法政大学大学院理工学・工学研究科
(雑誌名 / Journal or Publication Title)
法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編
(巻 / Volume)
56
(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
8
(発行年 / Year)
2015-03-24
(URL)
https://doi.org/10.15002/00011299
```

人間の視覚特性を模倣した 自律移動ロボットのための画像処理法に関する提案

A STUDY OF NEW LANE DETECTION ALGORITHM BASED BY EMULATING HUMAN COLOR VISUAL SENSATION

齋藤秀幸

Hideyuki Saito 指導教員 小林一行

法政大学大学院理工学研究科システム工学専攻修士課程

Human color sense is different from camera captured color image due to the characteristic human visual sensation of optical illusion and color constancy. Regardless of optical illusion and color constancy, human car-driver can handle an automobile without danger of overturning. In this paper, we describe a new white lane detection algorithm based on similar method of human color visual sensation for autonomous mobile robot. In order to safely drive on track lane guiding course, we emulate human color visual sensation to reduce the effects of lighting and shadows on the course. Validity of proposed new image compensation methods is confirmed by actual while line detection.

Key Words: Mobile robot, Lane detection, Omni- directional camera

1. はじめに

屋外環境での移動ロボットのカメラによる環境認識は、日影と日向で色が異なるという問題と、日照条件が時間とともに変化し色が変化してしまう問題があるため、簡単ではない。そのため、安定した環境認識が求められる移動ロボットの制御にはこのような画像によらない測域センサがよく使われる。測域センサは、数十m先の障害物をcmオーダーの精度で計測できるなど障害物検出センサとして信頼性が高い。

たとえば、屋外の移動ロボットの実験走行会であるつくばチャレンジ 2012[1]では、完走した移動ロボット 5 台中、すべての移動ロボットが外界環境の認識に測域センサを用いており、測域センサとカメラを併用していたロボットは1台のみであった。もちろん、人間と同様にカメラだけで環境認識し、走行する移動ロボットもあったが1台も完走できていないのが現状である。

一方,われわれ人間は,正確な距離が測れる測域センサがないにも関わらず,視覚情報のみで屋外環境を認識し安全に移動できる.つまり,本質的には測域センサは不要であり,画像処理だけでも安全に走行することが可能であるといえる.

そこで本研究では、人間の視覚特性を模倣することで、 より安全な環境認識法を考える。

人間の視覚特性は、輝度認知および色彩認知ともに完全ではない、輝度認知が不完全であることを示すよく知れた例として、Fig.1 にチェッカー・シャドーの錯視図があ

る [2, 3]. これは、明るい場所にあるタイル A とポールの 影のあるタイル B の輝度は、画像処理上では同一である にも関わらず、人間の視覚認知特性では、無意識のうちに その影の存在を知覚し、タイル A とタイル B の輝度は異 なると認識してしまう。このような現象を錯視という。

色彩認知においては、同じ色の物体であっても照明光の違いによる色彩変化により、画像処理上では異なった色として識別される. しかし 人間は照明光の条件が変わっても、照明光の色合いに引きずられることなく、白色光で見た際の色と同色であると判断することができる. この現象は色の恒常性といい、赤、緑、青の色光の相対的な反射率を認識しているため起こると考えられている[4]. 色の恒常性を説明しようとする理論の代表的なものに、E. Land の Retinex 理論がある. この理論では、周辺刺激内の表面間の境界における明度比を順次加算し、なだらかに変化する照明光成分を除去し恒常性のある色を再現する. そのため Retinex 理論では、照明光による鋭いエッジを持つ影が画面内に存在しないこと、 白色面が画像中に必ず存在することなどを前提となる[5].

Retinex 理論による処理は、有用であるが屋外環境で使用される移動ロボットで行う画像では、必ずしも白色面が存在するとは限らず、また影などによる鋭いエッジがある場合もあるため、直接適用することは難しい.

本研究では、大きさの恒常性、形の恒常性、色恒常性といった人間の視覚特性を応用することをめざし、新規アルゴリズムを提案する. その検証として、色が事前に確定し

ているつくばチャレンジ 2012 における停止線の検出を対象とした画像を対象とする.

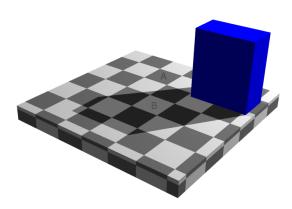


Fig.1. Checker shadow illusion

2. 人間の視覚の特徴

人間の視覚特性を模倣した画像処理をするには、人間がどのように環境を認識しているかを理解する必要がある. Table 1 に人間の視覚とカメラを比較した表を示す.

Table 1. Difference between the human sensation and CCD

Human sensation (eye) Brightness Rod, Cone — Color Cone(L, M, S) CCD (R, G, B) Dynamic About 160dB About 50-60dB Range

目の網膜には光受容器として桿体と錐体の2種類の視細胞が存在する.人は、明暗を錐体と桿体の両方で検出している. 桿体は夜間などの暗所での光検出に機能し、錐体は明るい環境での光検出に用いられている. また、錐体は、3種類の構造が異なる物質により、それぞれ赤・青・緑の色彩に反応する.

視細胞から得られた情報は、大脳皮質の一次視覚野で 処理され動き、形、色の性質の特徴に分けられ、分析され た特徴を連合し、記憶と照合して環境を認識する.

人間の視覚は、対象が同じであっても、見る方向や距離、 照明光などが異なれば網膜に映る像もそれに合わせて変 化するが、対象は比較的一定のものとして知覚される特 徴がある。それを知覚の恒常性という。知覚の恒常性には 以下の4つが挙げられる[6,-7].

(C1)大きさの恒常性:10m 先にいた対象が5m 先に移動した場合,網膜像は2倍の大きさになるが,同一の大きさのものとして知覚する.

(C2)形の恒常性:網膜像の形は対象を見る角度によって

変化する.しかし、見かけはそれほど変化しないで、まっすぐ見たときの形が知覚される.

(C3)明るさの恒常性: 照明の強さに関係なく白い物体は白く、黒いものは黒く知覚される.

(C4)色の恒常性: 色彩のある対象は色照明下でも固有の 色が保たれ知覚される.

また,人間の視覚には錯視現象が現れる[6].白,黄色,緑のものは放散による錯視により,黒,赤,青のものより大きく見える.類似のものが近くにある方がより彩度や明度が似て見える"同化",補色同士が近接するとより鮮やかに見える"対比"などがある.

これら人間の視覚特性により、人間の環境認識では、屋外環境下の照明光の変化や周囲の木や建築物によって生じる影の影響を受けることなく、同一の対象として認識できる。しかし、画像処理においては、それら照明光の変化や影により重大な影響を及ぼし、同じ場所においても同一の対象として認識することは難しい。一般に、市販のカメラは特殊な用途のカメラを除き、人間の目に比べ輝度変化に対するダイナミックレンジは狭い[8]。そのため、屋外環境における光量変化は画像処理への影響が大きい。

特に、カーブや木陰が存在する通路などでは場所により 光量が急激に変化するため、特に移動ロボットに取り付け たカメラでは、オートアイリス機能がうまく機能せず、誤 った認識を生じる場合がある.

そこで本研究で使用するカメラは、カーブや木陰など移動時に生じる光量変化に影響が少ない全方位カメラを用いる。全方位カメラは360度一度に撮影できるカメラであり、外来光が360度から入射する。そのため、全方位からの光量が平均化されるため、移動に伴いアイリス調整量が少なくて済む。

Fig.2(a),(b)につくばチャレンジでの停止線画像を示す. どちらの画像も,全方位カメラで 同日,同場所で取得し,見やすくするため平面変換した画像である. 中央部は,移動ロボット自身が全方位カメラに写り込んだものであり,上部は移動ロボットの前方,下部は移動ロボットの後方が写されている.





(a)10:00AM, Fine&Shadow (b)3:00PM, Cloudy&Shadow Fig.2. Ground plane converted images from Omni-directional camera

時間帯による日の傾きと天候の影響により、木、人、移動ロボットへの日光の照射で生じる影や、全体の色にお

ける違いがわかる. Fig.2(a)は午前 10 時頃, 晴天時の画像, Fig.2(b)は同日の午後 3 時頃, 曇天時の画像である. Fig.2(a)は日光によって, 移動ロボットや木の影が生じており, 白線に影が覆いかぶさっている. Fig.2(b)は雲によって日光が遮られているため, 影が少ない. 加えて画像全体も雲によって暗くなっている.

Fig.3 に、Fig.2 で示した画像の木の影と天候によって生じている輝度差の影響を、エッジ検出を用いて示す.





(a)10:00AM, Fine&Shadow (b)3:00PM, Cloudy&Shadow Fig.3. Edge detection

Fig.3(a)では周囲の木によって生じている影のエッジが 検出され、細かいノイズが多くなっている. 加えてエッジ が強く出る停止線も影によって検出できていない部分が ある.

Fig.3(b)では曇によって日光が遮られているため全体が暗く、停止線と周囲の輝度の差が大きく検出されていないため途切れている部分が多い。われわれ人間にとっては停止線だと簡単に認識できるが、画像処理上では同一の地点の画像でも輝度、色ともに不安定であることから、光と影による影響が大きい。

3. 屋外環境画像認識と人間の視覚特性の対応関係と問題の記述

Fig.4 につくばチャレンジで設けられた停止線を示す.



Fig.4. Appearance of stop line

つくばチャレンジの停止線は、事前に色と幅が決められているが、日光の傾きや天候、木や建築物による影などの影響が出やすい. これらの既知情報と、人間の知覚特性を考慮した画像処理法を提案するための問題を以下のように整理する.

(P1)白線との距離の変化にどのように対応し白線とし

て認識させるのか?

(P2)影,光の影響にどのように対応し白線として認識させるのか?

(P3)色味の変化にどのように対応し白線として認識させるのか?

(P4)形状の変化にどのように対応し白線として認識させるのか?

人間の物体認識では明暗認識と色認識に分けられ処理 されるため、提案する手法においても取得した画像から グレースケールに変換した画像と、カラー画像に分けて 処理を行う.

(P1)は、 物体の大きさの変化(C1)に対応する. 画像上の物体の大きさは、全方位カメラ画像を地平面変換することで対応する.

(P2)は、明るさの恒常性(C3)に対応し、 明るさ変化に 不変なエッジ検出を用いる.

(P3)は、色の恒常性(C4)に対応し、赤、緑、青の色 光の相対的な反射率から求める.

(P4)は、形状の恒常性(C2)に対応し、 形状の変化に 頑強な Hough 変換を用いる.

また、本研究ではつくばチャレンジのルールよりつぎ の仮定を設ける.

(A1)停止線の色は白である.

(A2)停止線の幅は 5cm 程度である.

4. 提案する画像処理アルゴリズム

Fig.5 に人間の認知の流れを模倣した白線検出の流れを 示す. 全方位カメラは双曲面ミラーにより取得する画像 はミラーの形状に沿って歪んでしまう. 全方位カメラか ら取得した画像の歪みの補正を行う. 補正された画像を グレースケールに変換し、Sobel オペレータによるエッジ 検出を行い2値化する.この際,白線検出に支障の出ない よう, 車両の映り込む領域にマスクをかける. 2 値化され た画像に、白線幅を強調するためテンプレートマッチン グを行う. 色味の変化へ対応するために、抽出された白線 候補点の色情報を,赤(R),緑(G),青(B)の値に分けてRGB 値の固有値と固有ベクトルを算出し, 色の分布について 調べる. 色の分布(固有ベクトル)が偏っている場合, 白 を検出する RGB 値の閾値を分布の偏りに合わせて変化さ せ,色の確認を行う.最後に形状の変化へ対応するため, 抽出された白線候補点に対して Hough 変換を行い白線の 検出を行う.

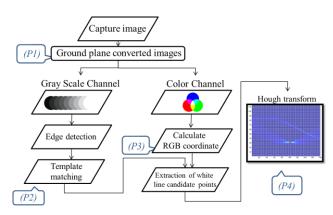


Fig.5. White line detection algorithm

(1) 光、影の影響を考慮した白線候補点の抽出

(P2)に対応する明るさの恒常性の処理として, 地平面画像をグレースケールに変換する. 本論文で用いる CCD カメラは NTSC 方式のため,変換には NTSC 加重平均法を用いる[9]. 式(1)に RGB 画像からグレースケール画像に変換する際の輝度 Y の変換式を示す.

$$Y = 0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B \tag{1}$$

つぎに、エッジ検出を用いて画像の 2 値化を行う. 影に隠れている白線でも、白線の周囲が影に隠れていれば白線とその周囲には輝度差が存在するため、影の影響を受けずに明確にエッジ検出することが可能である. エッジ検出にはSobel オペレータを利用する. Sobel オペレータはエッジを検出する方向と直交方向に平滑化を行っており、ノイズに強いオペレータであることから今回選択した. Sobel オペレータは、注目画素を中心とした上下左右の9 つの画素値に対して、Fig.6 に示すような係数をそれぞれ乗算し結果を合計する. ここでは2乗和の平方根Sを用いる.

$$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}$$

(a) Vertical Operator S_x (b) Horizontal Operator S_y Fig.6. Sobel Operator

白色は放散による錯視により大きく見える. そのため, 白線幅テンプレートを用いてテンプレートマッチングに より白線幅を強調する. 本論では白線の幅が一定 ((A2) より 5cm 程度) である点に着目し, 幅を基にしたテンプレ ートにより検出を行う[10].

実験では、画像の 1pixel が 5cm×5cm となるように設定 し、Fig.7 に示す 2 つの白線幅テンプレートを用いテンプ レートマッチング処理を行った.

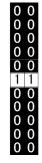


Fig.7. Template binary images

(2) 色の恒常性による RGB の相対的な反射率補正

(P3)に対応する色の恒常性に対応する処理として、抽出された候補点の色情報とカメラに映る周囲の画像の色情報から白線候補点の色の抽出を行う.人間は、色照明下においても、 色光の相対的な反射率から白であると認識する。

この点を考慮し、走行している場所の状況によって色を 判断するしきい値を相対的に変化させることで同様の処 理を実現する.

a) R. G. B輝度値分布からの RGB 分布の軸推定

人間の赤、緑、青の色光の相対的な反射率を認識していることを模倣する. そのために、画像を構成する RGB 輝度値を R, G, B をそれぞれ RGB 空間座標の分布に配置し、RGB 分布の軸を推定する. 軸の推定には、固有値、固有ベクトルを用いる.

式(2)に示すように、画像の位置座標(m, n)における画素の RGB 成分からなる画素値ベクトルを p[m, n]とし、平均値 ベクトルを μ_p とする。画像の全画素数を N_p とし、それぞれの定義式を式(2)、(3)に示す。

$$\mathbf{p}[m,n] = \begin{pmatrix} p_R[m,n] \\ p_G[m,n] \\ p_B[m,n] \end{pmatrix}$$
 (2)

$$\mu_{p} = \frac{1}{N_{p} - 1} \sum_{i=1}^{N_{p}} \mathbf{p}[m, n]$$
(3)

つぎに、変換軸の長さを 1 として、式(4)に示す行列 \mathbf{R}_{p} に対する固有値問題を解き、 $\mathbf{R}\mathbf{G}\mathbf{B}$ 分布の軸 \mathbf{u}_{p} を求める.

$$\mathbf{R}_{p} = \frac{1}{N_{p} - 1} \sum_{i=1}^{N_{p}} (\mathbf{p}[m, n] - \boldsymbol{\mu}_{p}) (\mathbf{p}[m, n] - \boldsymbol{\mu}_{p})^{T}$$
(4)

$$\mathbf{R}_{p}\mathbf{u}_{p} = \lambda_{p}\mathbf{u}_{p} \tag{5}$$

全方位カメラの画像は、全方位で撮影できるため、たとえ日向や影が混在している状況でも、方向に関係なく、RGB 空間座標分布から得られる固有ベクトルは色の偏りがなければ R 値、G 値、B 値ともに 0 から 255 にかけての

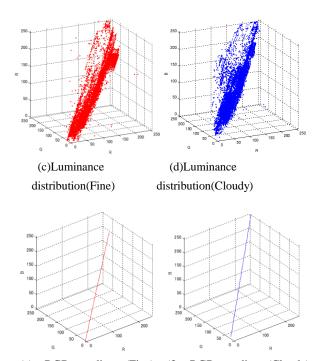
固有ベクトルが算出することができる.

Fig.8 に画像と、それぞれの画像の RGB 分布の軸の算出結 果を示す.屋外環境の画像では、経験的に RGB 空間座標分 布より固有ベクトル(RGB 分布の軸)を算出すると R=0, G=0, B=0 の黒から R=255, G=255, B=255 の白に向かって 分布する.





(a)10:00AM,Fine&Shadow (b)3:00PM, Cloudy&Shadow



(e) RGB coordinate (Fine) (f) RGB coordinate(Cloudy) Fig.8. Calculated RGB coordinate

b) 色の恒常性を考慮した RGB 輝度分布の正規化

Fig.9 に RGB 分布の軸を用いた白線候補点の抽出例を 示す. 照明光の色の影響を除去するため、RGB 空間座標 分布を調べ、RGB分布の軸を求める. 理想的なRGB分布 の軸とのズレから元来の白色がどの座標に分布している のかを調べ、白色の閾値を変化させる.

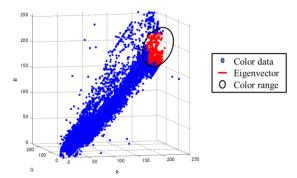


Fig.9. Ambient color distribution and white lane color distribution under RGB coordinate

RGB 空間座標と白線候補点の色情報を比較し、RGB 分 布の軸の法線距離が遠い候補点を除去する. この方法で は影であっても RGB の比率が変わらず、停止線が完全な 白色でない状態でも白線を認識することができる. 今回, RGB 空間座標の範囲を上位 20%, 軸からの法線距離を 20 以内とした.

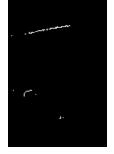
(3) 形状変化に対応した白線の認識

(P4)に対応する形の恒常性に対応するため、白線検出に は、高速で安定して直線検出できる Hough 変換を用いて 検出する.

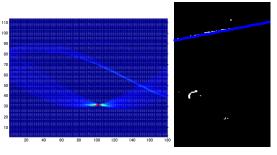
Fig.10 に Fig.8 (a)を Hough 変換処理した例を示す. 比較 のために、Fig.10(a)に地平面画像、Fig.10(b)に提案する方 法により得られた白線 2 値画像, Fig.10(c)に Hough 空間マ ップ, Fig.10(d)に検出された直線を示す.

提案する方法は,影などがある状態でも安定して白線検 出ができる.





(a) 10:00AM, Fine&Shadow (b) Reflectance correction



(c) Hough space map

(d) Detected line

Fig.10. Example of Hough transform

5. 実験

本研究で提案するシステムの有用性の検証を行うために、つくばチャレンジのコースで、公園内における停止線の検出を行った。Fig.11 に実験で使用した車両を示す。この車両は電動車いすをベースとしたもので、車両の背面にコンピュータ、上部に CCD カメラと双曲面レンズを組み合わせた全方位カメラが搭載されている。全方位カメラから地平面画像への変換は、5cm/pixel となるようにした。また、表 2 に使用した CCD カメラ(EVI-370)の仕様を示す。PC への接続はキャプチャーカード(GV-USB2)を用いた。

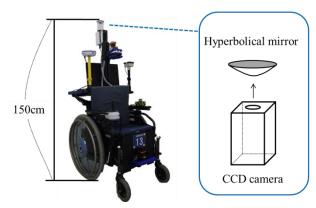


Fig.11. Mobile robot

Table 2. Specifications of CCD camera

Models	EVI-370
Image sensor	1/3"Hyper HAD CCD
Picture Elements	768(H) ×494(V)
S/N Ratio	Min. 48dB
Video Signal	NTSC
Focus	Auto
Iris	Auto

Fig. 12 に全方位カメラからの取得画像を示す.停止線 Area は、2ヶ所あるため、Area1,Area2 で表し、同じ地点で曇天,晴天の場合の合計4パターンの画像を用い確認を行う。Area1 の曇天時の停止線の画像を Fig.12(a)に、晴天時を Fig.12(b)に示す。

Area2 の曇天時を Fig.12(c)に, 晴天時を Fig.12(d)に示す.





(a) (Area 1,Cloudy&Shadow) (b)





(c) (Area 2, Cloudy)

(d) (Area 2,Fine&Shadow)

Fig.12 Captured image from Omni-directional camera

(1) 光影の影響に対応した実験

Fig.13 にそれぞれの地平面変換後の画像を示す. (c)の画像には、曇天のため影は確認できないが、 (a),(b),(d)の画像には、移動ロボット自身または、人、木々による影が確認できる. また、曇天、晴天などの影響による地平面の色味が異なることも確認できる.





(a) (Area 1,Cloudy&Shadow) (b)









(d) (Area 2,Fine&Shadow)

Fig.13. Ground plane converted images

Fig.14 にエッジ検出を施した画像を示す. どの Area, 曇天, 晴天に関わらず, 白線の部分はうまくできている. 色の濃い影のある Fig.14(b), (c)では, いくつか影が, エッジとして検出してしまっている.

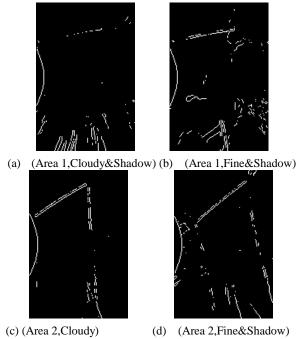
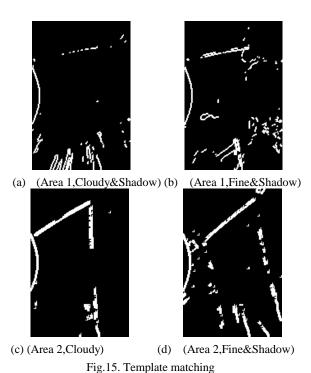


Fig.14. Edge detection

Fig.15 にテンプレートマッチングによる白線強調の結果を示す.どの画像でもエッジ検出と比較し白線幅は太く強調されている.



(2) 色の恒常性による RGB の相対的な反射率補正の実験

Fig.16 に RGB 空間座標から白線候補点の抽出を行った 結果を示す.

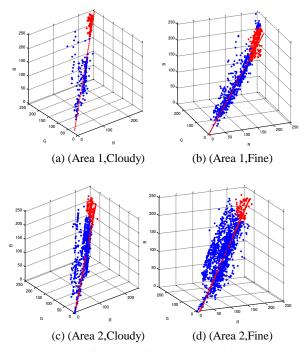


Fig.16. Confirmation of white line candidate points

Fig.17 に、白線候補点の抽出結果を示す. エッジ検出、 テンプレートマッチングで検出された、白線でない点は、 ほぼ完全に除去され、提案する処理により白線候補点が完 全な白色でない状態でも、白線として抽出できている.

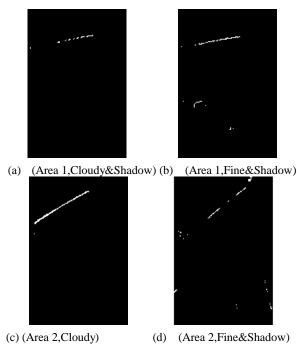


Fig.17. Reflectance correction at the time of cloudy sky

(3) 形状変化に対応した実験

Fig.18 に形状変化に頑強な Hough 変換を適用し停止線の検出を行った結果を示す. いずれの条件においても停止線を検出することができた.





(Area 1, Cloudy & Shadow) (b)

(Area 1,Fine&Shadow)





(c) (Area 2, Cloudy)

(Area 2,Fine&Shadow)

Fig. 18. Experimental results of Hough transform

(4) 色の恒常性を考慮した場合と、しない場合の違い

Fig.19 に、Fig.15 の画像を用い色の恒常性を考慮しない、 一定しきい値による白線候補点の抽出を行った結果を示 す. 白線候補抽出のためのしきい値は、RGB ともに 215 以上とし, 処理した.





(a) (Area 1, Cloudy & Shadow) (b) (Area 1, Fine & Shadow)



(c) (Area 2, Cloudy)

(d) (Area 2,Fine&Shadow)

Fig.19. Extraction of white line candidate points without color constancy (Cloudy)

Fig.19(a),(c)では, 色の恒常性を考慮した場合と同様に白 線候補点の抽出ができたが、Fig.19(b),(d)の場合には、白 線候補点が大きく途切れ,抽出がうまくいかなかった. これは、晴天時のRGB空間座標のR軸方向へ大きく傾い ていることから白線の白成分が元来の白から赤に偏りが 生じたからだと考えられる.

6. おわりに

本研究では人間の視覚認知特性に合わせた白線検出法 の一提案を行った. 輝度差を主に用いて白線検出するこ とで影による誤検出を減少させた. RGB 空間座標から固 有ベクトルを算出し白色成分の変動を推定した. 以上の知 覚恒常性を考慮した処理により, 照明光の変化による白 線成分の誤抽出を減らすことができた.

今後の展望として,本研究では白線にしか適用できない ため,他色の線や,物体の検出もできるよう改善を行う.

参考文献

- Kenjiro YAMAMOTO, Tsuyoshi OKUBO, Yukihiko ONO and Yoshitaka HARA, "Examples of Activities in the Background of the Field Test "Tsukuba Challenge" and Autonomuos Mobile Technologies to Finish the Test," Information Processing Society of Japan, Vol. 52(9), pp. 1166-1172, 2011. (In Japanese)
- K. Edward H., "Adelson: Perceptual Organization and the Judgment of Brightness Reprint Series," vol. 262, pp. 2042-2044, 1993.
- B. A. Wandell., "Foundations of Vision," Sinauer, 1995.
- J. K. Bowmaker and H. J. Dartnall., "Visual pigments of rods and cones in a human retina," The Journal of physiology 298.1, pp. 501-511, 1980.
- Land E. H., "The retinex theory of color vision," J Opt 5) Soc Am 61, pp. 1-11, 1977.
- Woodworth, R. S. and Schlosberg, R., "Experimental 6) Psychology," Holt, Rinehard and Winston, 1954.
- 7) L. T. Maloney, "Physics-based approaches to modeling surface color perception," Color vision: From genes to perception, pp. 387-416, 1999.
- K. Devlin, "A review of tone reproduction techniques," Technical Report, CSTR-02-005, Department of Computer Science, University of Bristol, 2002.
- Charles Poynton, "Color FAQ Frequently Asked Questions Color,
 - $http://www.poynton.com/notes/colour_and_gamma/Color$ FAQ.html, 2006.
- 10) Kazuyuki Kobayashi, Kajiro Watanabe, Tomoyuki "A Lane Detection Ohkubo, Yosuke Kurihara, Algorithm for Personal Vehicles, "Electrical Engineering in Japan, 177(4), pp. 23-32, 2011.