

## ステレオ画像を用いた道路シーン中の直線の抽出と識別

田中 健一<sup>†</sup> 奥富正敏<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東京工業大学 大学院 理工学研究科 機械制御システム専攻  
〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1  
E-mail: <sup>†</sup>{tanaka,mxo}@ok.ctrl.titech.ac.jp

**あらまし** 一般道路環境中には、ガードレール、壁などといった直線状の構造物が多い。本論文では、ステレオ画像から白線や障害物に属する直線をハフ変換を利用して抽出する。さらに構造物から抽出された直線は道路平面に対して平行であるとして、それによって生じる拘束を利用することによりステレオ画像間の直線の対応付けを行なうときに探索範囲を大幅に限定することができ、安定に対応付けを行なうことができる。また対応付けの結果、直線が道路平面上に存在するかそれより上方に存在するかを区別することができる。

**キーワード** 一般道路環境、障害物検出、ステレオカメラ、ハフ変換

## Detection and Discrimination of Straight Lines in Road Environment using Stereo Images

Kenichi TANAKA<sup>†</sup> and Masatoshi OKUTOMI<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Department of Mechanical and Control Engineering  
Graduate School of Science and Engineering  
Tokyo Institute of Technology  
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550, JAPAN  
E-mail: <sup>†</sup>{tanaka,mxo}@ok.ctrl.titech.ac.jp

**Abstract** There are many straight obstacles like guardrails, walls and so on, in general road environment. In this paper, we extract lines of white lines and obstacles using Hough Transform. Since these extracted lines are thought to be parallel to the road plane, we can limit the candidates of matching lines between stereo images, and can match lines stably. Matched lines can be differentiated into lines on the road and lines above the road.

**Key words** general road environment, obstacle detection, stereo camera, Hough Transform

### 1. ま え が き

今日、車載ステレオカメラを利用した道路環境認識に対する研究が盛んに行なわれている。図1. は車両に搭載したカメラで撮影した画像の一例を示したものであるが、一般道路環境中にはガードレール、壁、フェンスなどの道路側壁や白線といった直線上の構造物が数多く存在している。

本研究は、白線と、ガードレールなどの道路側壁の3次元位置を検出し、障害物検出と走行レーン検出を行な

うことを目指すものである。

従来手法として[1][2]などは、白線や道路端を検出する手法であるがガードレールなどの障害物は考慮していないため、ガードレールが存在するシーンでは誤検出を生じてしまうおそれがある。また、これらは単眼カメラを利用している。

白線とガードレールなどの障害物を同時に検出する手法として[3]がある。この手法は消失点へ伸びるエッジ点群をステレオ3次元計測して白線とガードレールの位置

を検出するものであるがカメラと道路平面の位置関係を固定しているため車両がバウンドした場合など、仮定した道路平面と実際の道路平面にずれが生じたときに検出結果に誤差が生じてしまうと考えられる。



図1 一般道路環境

本論文では、テクスチャレスな構造物も端の部分は画像上でもしっかりとしたエッジとして表われていることが多いことを利用する。したがって、白線や道路側壁の端のエッジを直線として画像から抽出し、ステレオ3次元計測を利用してそれらの3次元位置を検出すれば車両が走行しているレーンの領域と、ガードレールの検出を行なうことができる。

白線と道路側壁を同時に検出することを考えたとき、道路側壁は障害物であるが白線は障害物ではないので、これら2つを同じものとして認識するのは問題である。ここで白線は道路平面に存在するものであり、一方、道路側壁等の障害物は一般的に道路平面の上方に存在するものである。筆者らは従来の研究[4]において車載ステレオカメラにより得られた画像を用いて道路の姿勢をフレーム毎に推定する手法を提案している。この手法を用いることにより、検出された直線が道路平面に存在するかそれより上方に存在するかを判断することができる。この情報を利用して白線と障害物の区別を行なうことができると考えられる。

また、白線やガードレールは道路平面に平行である。ここからステレオ画像間の直線の対応付けのときに、道路平面に平行な直線のみを対応付けるという拘束条件を用いることにより対応付けの候補を大幅に限定することができ、直線の対応付けを安定に行なうことができた。

本論文の構成としては、2章で画像から直線を抽出する方法について述べ、3章でステレオ画像間における道路平面に平行な直線の対応付けについて説明する。4章で対応のとれた直線に対する分類方法について述べ、最後に5章で実験結果を示す。

## 2. 直線抽出

直線抽出法としてハフ変換を利用し、まずステレオ画像の両方から白線やガードレールの直線を抽出する。し

かしここで直線の検出対象としている、一般道路環境を撮影した実画像では一般的に抽出したい直線状のエッジ点列とは別のエッジ点が数多く存在しているため、普通にハフ変換を行なうと誤抽出が多く発生してしまう。

そこで各画像に水平方向、垂直方向の Sobel フィルタをかけることにより各画素におけるエッジの向きを得る。ハフ変換を行なうときにエッジの向きを考慮し、直線に投票するエッジ点を直線に対して垂直方向付近のエッジ向きを持つエッジ点だけに限定する。

図2は普通のハフ変換の結果とエッジ情報を利用したハフ変換を比較したものである。普通のハフ変換を行なった左の図には、矢印で示されているように誤った直線が抽出されているにも関わらずガードレールの直線が抽出されていない。一方、右の図は先程述べた手法による結果であるが誤抽出は見られず、良好な直線の抽出結果を得ることができた。また、この方法にはハフ変換の処理時間が短縮されるというメリットもある。

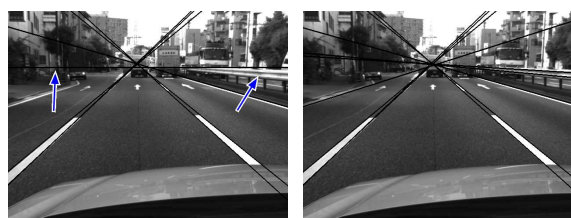


図2 直線抽出結果：ハフ変換の場合(左)、エッジ角度を利用したハフ変換の場合(右)

## 3. 直線の対応付け

一般的にステレオ画像間の直線の対応付けは基本的に全ての直線と類似度を求めて最大類似度をとる直線ペアを探索する必要がある。しかし、画像中にパターンの類似した直線が複数存在した場合、誤対応を起こしてしまう可能性がある。

ここで、本論文で検出の対象としているものは白線と道路側壁であり、どちらも道路平面に対して平行な構造物と考えられる。また、文献[4]の方法を利用して、道路平面の3次元位置はステレオ画像から推定することができる。道路平面の姿勢が分かっている、かつ、対応付けする直線が道路平面に平行であるとき、図3で示されているように基準画像上のある直線に対して、道路からの高さ  $h$  によって直線の3次元位置が決定し、同時に参照画像上における対応すべき直線も決定される。すなわち、ここで考察する状況において変化するパラメータは道路からの高さ  $h$  だけであるため参照画像上における対応する直線の対応候補が大きく限定され、結果として安定し

た対応付けを行なうことができる。

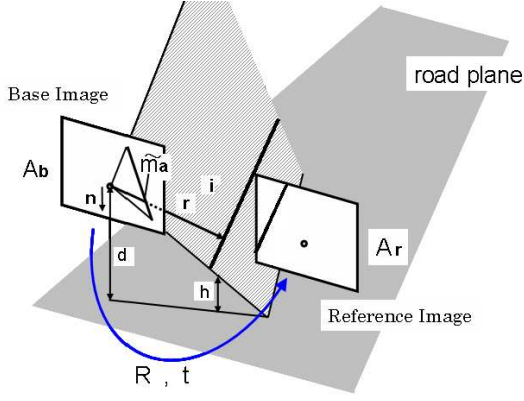


図3 ある高さ h における参照画像上の対応直線

### 3.1 参照画像上の対応直線候補の定式化

ここで、対応直線の拘束について定式化する。

基準カメラの内部パラメータ、参照カメラの内部パラメータをそれぞれ  $A_b, A_r$  とし、基準カメラ座標系から参照カメラ座標系への回転行列、並進ベクトルをそれぞれ  $R, t$  とする。道路平面の姿勢は、基準カメラ座標系における道路平面の法線ベクトル  $n$  と、基準カメラの光学中心から道路平面までの距離  $d$  の、2つのパラメータで表される。これからの議論では、これらのパラメータはすべて既知であるとする。またワールド座標系は基準カメラ座標系と同じとする。

$$\widetilde{m}_b \sim A_b \begin{bmatrix} I & 0 \end{bmatrix} \widetilde{X}_w \quad (1)$$

式(1)はワールド座標系で表された3次元空間上の点  $\widetilde{X}_w$  とそれに対応する基準画像上の点  $\widetilde{m}_b$  の関係を表すものである。 $\sim$ は定数倍の不定性を残して左右の式が等しいことを表している。

基準画像上にパラメータ  $\rho, \theta$  で表される直線があるとき、この直線は以下の式で表現される。

$$\begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ -\rho \end{bmatrix} = 0 \Leftrightarrow \widetilde{m}_b^T l_b = 0 \quad (2)$$

式(1), 式(2)を連立すると

$$\widetilde{m}_b^T l_b \sim \{ \widetilde{X}_w^T \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} A_b^T \} \cdot l_b = 0 \quad (3)$$

となり式(4)を得る。

$$\widetilde{X}_w^T \begin{bmatrix} A_b^T l_b \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

式(4)は直線が3次元空間上で存在する平面を表しているものである。

ところで一般的に、法線ベクトルが  $n = (n_1, n_2, n_3)^T$  で点  $t = (t_1, t_2, t_3)^T$  を通る平面は、式(5)で表される。

$$\widetilde{X}_w^T \begin{bmatrix} n \\ -t^T n \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

よって式(4)の平面は、法線ベクトルが  $A_b^T l_b$  であり、原点を通るものであることが分かる。

3次元空間での直線を、媒介変数  $k$  を用いて式(6)の形で表現する。

$$L = r + ki \quad (6)$$

基準ベクトル  $r$  は、 $r$  と  $n$  の内積が  $d-h$  となるという条件を用いて基準画像上の直線の上の点  $\widetilde{m}_a$  と式(1)から計算することができ、式(7)で表すことができる。

$$r = (d-h)n^T n \left( (A_b^{-1} \widetilde{m}_a)^T n \right)^{-1} A_b^{-1} \widetilde{m}_a \quad (7)$$

方向ベクトル  $i$  は、直線が「道路平面」と「直線が存在する平面」の両方に対して平行なので2つの平面の法線ベクトルの外積で表され、式(8)となる。

$$i = n \times (A_b^T l_b) \quad (8)$$

式(6)(7)(8)から、基準画像上の直線パラメータと道路からの高さ  $h$  から3次元空間での直線の位置を計算できる。さらにこの直線上の点  $L$  が参照画像上に投影される式は式(9)で表される。

$$\begin{aligned} \widetilde{m}_r &\sim A_r \begin{bmatrix} R & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ 1 \end{bmatrix} \\ &\sim A_r (Rr + t) + k A_r R i \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)から、定数倍の不定性を考慮して  $k$  を消去する。

$$\begin{aligned} u_r l'_1 + v_r l'_2 + l'_3 &= 0 \\ \Rightarrow \widetilde{m}_r^T l' &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

ただし  $l' = A_r (Rr + t) \times A_r R i$  である。

これと、求める参照画像上の直線の式  $\widetilde{m}_r^T l_r = 0$  を比較すると、定数  $\lambda$  を用いて式(11)の関係で表せる。

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_r \\ \sin\theta_r \\ -\rho_r \end{bmatrix} = l_r = \lambda l' \quad (11)$$

$\sin^2\theta_r + \cos^2\theta_r = 1$  の条件から  $\lambda$  を求め、 $h$  を消去す

ることにより参照画像において対応する直線がもつパラメータを限定する式は式 (12) で表される。

$$s_1 \cos \theta_2 + s_2 \sin \theta_2 = s_3 \rho_2 \Leftrightarrow \mathbf{s}^T \mathbf{l}_r = 0 \quad (12)$$

ベクトル  $\mathbf{s}$  は、結局式 (13) で表される。

$$\mathbf{s} = \left( \left[ \mathbf{A}_2 \mathbf{R} \{ \mathbf{n} \times (\mathbf{A}_1^T \mathbf{l}_1) \} \right] \times \left[ \mathbf{A}_2 \mathbf{R} \mathbf{A}_1^{-1} \widetilde{\mathbf{m}}_a \right] \right) \times \left( \left[ \mathbf{A}_2 \mathbf{R} \{ \mathbf{n} \times (\mathbf{A}_1^T \mathbf{l}_1) \} \right] \times \mathbf{A}_2 \mathbf{t} \right) \quad (13)$$

式 (12) で表されているようにパラメータ探索曲線は一般的に正弦曲線のかたちをしている。

### 3.2 直線の対応付け方法

パラメータ探索曲線を計算することによりパラメータ空間における探索範囲が大きく減少した。

基準画像から抽出された直線パラメータから 1 つを取りだし、それに対するパラメータ探索曲線を参照画像のパラメータ空間に描く。対応するパラメータはこのパラメータ探索曲線上にあるはずなので曲線上でそのパラメータを探索すれば対応するパラメータを見つけることができる。ただし、画像から抽出した直線パラメータに対して直線の対応付けを実際に行なう場合、対応すべきパラメータがパラメータ探索曲線からずれることがある。原因としては

1. 内部パラメータ、外部パラメータ、道路平面の姿勢パラメータが真値に対して誤差を持っている場合。
2. 基準画像または参照画像の直線に対して少しずれた直線が抽出された場合。

が挙げられる。

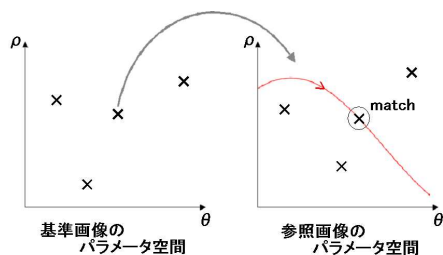


図 4 対応直線パラメータの探索

このようなケースは実画像に対しては充分考えられることなので、パラメータ探索曲線上を探索していく場合は曲線とその周囲も含めて探索する必要がある。

## 4. 3次元空間における直線の位置決定と分類

基準画像の直線  $\widetilde{\mathbf{m}}_b^T \mathbf{l}_b = 0$  と参照画像の直線  $\widetilde{\mathbf{m}}_r^T \mathbf{l}_r = 0$  が対応したとき図 5 のように 3 次元空間上の直線を決定できる。

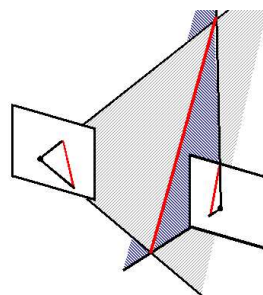


図 5 3次元空間上の直線の決定

図に表される 2 つの平面はそれぞれ式 (14) で表される。

$$\begin{aligned} \widetilde{\mathbf{X}}_w^T \begin{bmatrix} \mathbf{A}_b^T \mathbf{l}_b \\ 0 \end{bmatrix} &= 0 \\ \widetilde{\mathbf{X}}_w^T \begin{bmatrix} \mathbf{R}^T \\ \mathbf{t}^T \end{bmatrix} \mathbf{A}_r^T \mathbf{l}_r &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

ここから、3次元空間上の直線を媒介変数表示で表わすとしたとき基準ベクトルは式 (14) と  $Z=0$  を条件に求められる。また、直線方向ベクトルは 2 平面の法線ベクトルの外積として式 (15) で求められる。

$$(\mathbf{A}_b^T \mathbf{l}_b) \times (\mathbf{R}^T \mathbf{A}_r^T \mathbf{l}_r) \quad (15)$$

よって直線の 3 次元位置を求めることができた。すると直線の道路からの高さの平均値を求めることができるので、その値が 0cm 付近ならば道路平面に属していると考えられ、高さがそれ以上になる場合は障害物に属する直線であると考えられるので直線の分類を行なうことができる。

## 5. 処理結果

最後にこれまで述べた手法に基づいて行なった処理を実画像に対して行なった結果を示す。

まず、実画像から直線を抽出した結果の例として図 6 図 7 を示す。

次に、直線位置を推定して求めた高さが道路平面から 10cm 以下のものとそれ以上のものとに分類した。分類した結果を式 (8), (9) に示す。



図 6 直線抽出結果 1

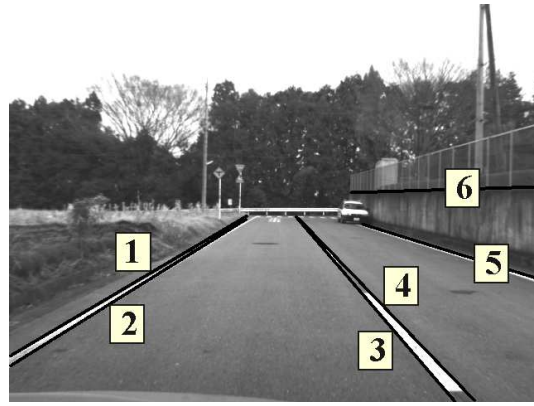


図 9 直線分類結果 2



図 7 直線抽出結果 2

図 8 の 3、4 番の直線と図 9 の 6 番の直線が高さが 10cm 以上となり障害物に属する直線として分類され、それ以外の直線は道路平面に属するものとして分類された。画像からその分類が正しいことが分かる。

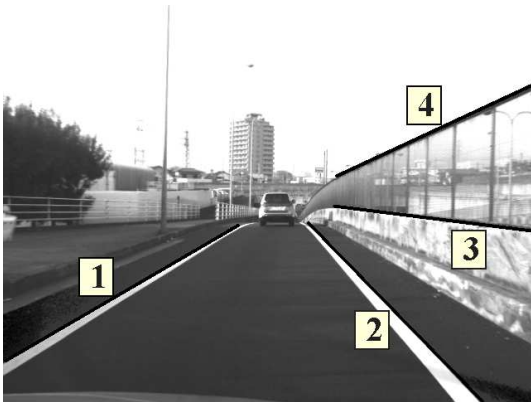


図 8 直線分類結果 1

ら白線や道路側壁などの一般道路環境に存在する直線状の構造物に属する直線の 3 次元位置を検出し、道路平面に存在するものとそれより上方に存在するものを区別した。画像から直線を抽出する方法としてハフ変換を利用した。そのときに、エッジ方向の情報を用いることによりエッジの多い実画像に対しても安定的に直線抽出を行なえるようになった。

筆者らの従来の研究によりステレオ画像から道路平面の姿勢を推定することが可能である。ステレオ画像間の対応付けを行なう直線を、道路平面に平行なものに限定することにより生じる拘束を取り入れ、対応直線の探索範囲を大幅に減少させることができ、結果として直線の対応付けを安定に行なうことができた。

## 文 献

- [1] Dean Pomerleau, RALPH : Rapidly Adapting Lateral Position Handler, IEEE Symposium on Intelligent Vehicles, pp.506-511,1995
- [2] Yue Wang ,Dinggang Shen and Eam Khwang Teoh, Lane Detection Using Catmull-Rom Spline, IEEE International Conference on Intelligent Vehicles, pp51-57,1998
- [3] 古川 賢司,岡田 隆三,谷口 恭弘,服部 寛,小野口 一則,ステレオ視による走行レーンの検出,第 8 回画像センシングシンポジウム, pp.85-88,2002
- [4] 関 晃仁,奥富 正敏,ステレオ動画像を利用した平面抽出による障害物検出,情報処理学会論文誌, Vol.2004, No.45, pp.1-10 (2004)

## 6. ま と め

本論文では、車載ステレオカメラから得られた画像か