

# 視線誘導標を用いた道路構造認識

清水 彰一<sup>\*1</sup> 藤吉 弘亘<sup>\*1</sup> 酒井 裕史<sup>\*2</sup> 金出 武雄<sup>\*3</sup>  
中部大学大学院<sup>\*1</sup> 株式会社デンソー<sup>\*2</sup> カーネギーメロン大学<sup>\*3</sup>

人が自動車を運転する際、進行方向を注視し道路線形を把握し、走行、避走、停止などを行う。しかし、夜間の運転は前方を照らす前照灯の範囲は狭く視認性が悪いため、多くの危険が伴う。そこで本稿は、夜間の運転の補助として、視線誘導標から道路構造を認識する手法を提案する。円検出フィルタを用いて視線誘導標を検出し、視線誘導標の 3 次元位置を算出する。その 3 次元位置をクロソイド曲線に当てはめ、クロソイド曲線のパラメータをサポートベクタマシンに入力して 4 種類のカーブに分類する。シミュレーション実験における仮想道路画像を用いた道路構造の認識実験の結果、86.5 %の精度でカーブを分類することができた。

## Recognition of Road Contours Based on Extraction of 3D Positions of Delineators

Shoichi Shimizu<sup>\*1</sup> Hironobu Fujiyoshi<sup>\*1</sup> Hiroshi Sakai<sup>\*2</sup> Takeo Kanade<sup>\*3</sup>  
Chubu University<sup>\*1</sup> DENSO CORPORATION<sup>\*2</sup> Carnegie Mellon University<sup>\*3</sup>

Drivers of vehicles focus their gaze in the direction of movement, try to assess the contours of the road ahead, and try to avoid imminent hazards by steering or braking. However, driving at night is risky since the range illuminated by the headlights and that of visibility is poor. This paper proposes a method that assists the driver by indicating the curves of the road ahead at night. We extract delineators located on the sides of roads using a circle detection filter, and the 3D positions of the delineators are computed using stereo vision. Then, clothoid curve is applied to the delineators and the parameters of clothoid curve are obtained. The parameters are classified into four kinds of curves using support vector machine. In simulation experiments using virtual road we created, we obtained classification rate 86.5 %.

**Keyword: Road Recognition, Extraction of Delineator, Clothoid Curve, Curve Fitting**

### 1 はじめに

ドライバーの負担の軽減を目的とした自動運転システムは重要なタスクとして研究されている。

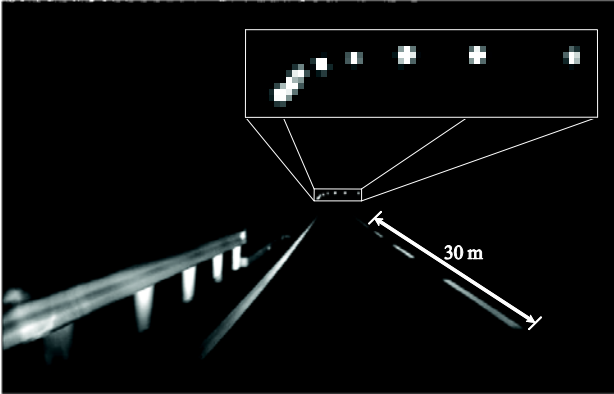
NAVLAB[1]では、カメラやレンジデータから道路や障害物を認識することによって自動運転を実現し、アメリカの西海岸から東海岸への横断を成功している。障害物の検出や白線を検出することによってレ

ーンを保持する機能や、ミリ波レーダを用いて先行車両との車間距離を適切に保ちながら車の速度を制御して走行する ACC (Adaptive Cruise Control)などが実際に車に搭載され始めている。

人が自動車を運転する際、進行方向を注視し道路線形を把握し、走行、避走、停止などを行う。この道路線形の把握には白線が重要な役割を担い、白線



(a) 視線誘導標



(b) 白線の見えと視線誘導標の見え

図1: 視線誘導標

の自動検出は、運転者への支援に重要な技術である。白線の検出には、モデルベースで求める手法やクロソイド曲線やスプライン曲線に当てはめる手法などが、多数提案されている[2]-[7]。しかし、これらの手法は基本的に明るい時間を想定して構築されている。夜間の運転では、前方を照らす前照灯の範囲は狭く視認性が悪いため、多くの危険を伴うことが考えられる。そこで本研究は、夜間の運転補助として、100 m 先まで視認することが可能である視線誘導標から道路構造を認識することを目的とする。本稿では、正規分布に基づいたフィルタを提案し、視線誘導標の検出を行う。提案するフィルタは、円に施した際にその特徴がより表れるように設計され、幅の違うフィルタをかけることにより、小さい視線誘導標に対しても検出が可能となる。また、クロソイド曲線のパラメータを用いた道路構造認識法も提案する。視線誘導標の3次元位置をクロソイド曲線に当てはめ、得られたパラメータをSVM(Support Vector Machine)[8]で分類することにより、道路構造を認識する。

## 2 視線誘導標

夜間においてドライバーが前照灯によって道路線形を把握できる範囲は限られている。そのため、走行基準を得ることが困難となり、安全かつ円滑な交通の確保に支障が生じる場合がある。これに対処するために道路の付属物として、図1(a)に示す視線誘導標が設置されている。視線誘導標は主にカーブに設置され、カーブ毎に設置間隔が決められている[9]。

図1(b)の例では、白線の見えからでは直線道路と

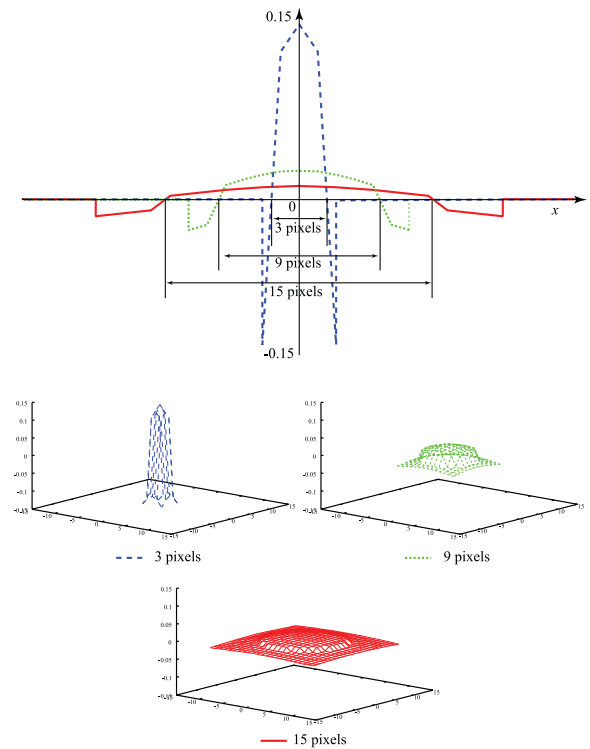


図2: 円検出フィルタ

認識されるのに対し、視線誘導標を用いると、この先に右カーブがあるということがわかる。このように、視線誘導標は夜間での遠方の視認性に優れている。

## 3 視線誘導標の検出

夜間における視線誘導標は自動車の前照灯からの光を反射するため、円形に反射する。そこで、円検出により視線誘導標の大きさと画像座標を求める。円検出には従来、Hough変換が用いられている。Hough変換では輪郭点を用いて投票することにより円の中心と半径を得ることができる。しかし、100 m 先の視線誘導標は画像上では小さく、その輪郭点の抽出は困難な場合がある。そこで、正規分布を基に、円に施した際にその特徴がより表れるようなフィルタを提案し、視線誘導標を検出する。

### 3-1 正規分布を基にした円検出フィルタ

円を検出するフィルタは、正規分布を基に作成する。正規分布の式は以下のように表される。

$$G(p, q) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{p^2 + q^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

反射光の半径を  $r$  としたとき、フィルタを以下の式で定義する。

$$F(p, q) = G(p, q) - \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

次に $r$ を変化させたときの最大の応答値が一定となるように正規化を行う。

$$\text{Filter}(p, q) = \begin{cases} \frac{F(p, q)}{m_+} & \text{if } F(p, q) > 0 \\ \frac{F(p, q)}{m_-} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$m_+$ が正の値の合計、 $m_-$ が負の値の合計である。このフィルタは半径 $r$ の円形にかけたとき、円の中心で高い応答値を得ることができ、円の周辺ではマイナスの応答値を示す。半径 $r$ を変えたフィルタを複数作成し、画像に施すことにより大きさの違う反射光の検出を行う。

図2に直径15, 9, 3 pixelのフィルタを示す。また、図3(a)のように直径15, 9, 3 pixelの円を作成し、フィルタリングした際の応答値を図3(b)に示す。図3(b)より、視線誘導標と同一サイズの幅を持つフィルタを施したとき、円の中心に最大の応答値を、その両端にはマイナスの応答値を得ることがわかる。これらの関係を用いることにより、視線誘導標の中心位置の検出と3種類の幅に識別することが可能となる。

### 3-2 反射光の中心検出

反射光の半径毎のフィルタを用いて中心を算出する手順を以下に示す。フィルタは直径15, 9, 3 pixelの3種類とし、直径15 pixelから順にフィルタを適用する。

**Step1.** 円検出フィルタを適用

**Step2.** 応答値が0以上ある点を探索

**Step3.** Step2.で求めた点から、応答値が最大値となる点を探索

**Step4.** Step3.で求めた点を中心とし、フィルタの半径内で0以上となる応答の断面図を算出し、この断面図が円形に近い場合、その点は円の中心であるとする

以上の処理を複数のフィルタを用いて画像全体に適用した結果、各フィルタで最も高い応答値を持つ位置が視線誘導標の中心となり、そのときのフィルタの大きさが視線誘導標の大きさとして検出することができる。

### 3-3 視線誘導標の3次元位置推定

算出した視線誘導標の画像座標からステレオ視を用いて3次元位置を算出する。ステレオ視で3次元位置を求めるためには、2台のカメラの対応点を取得す

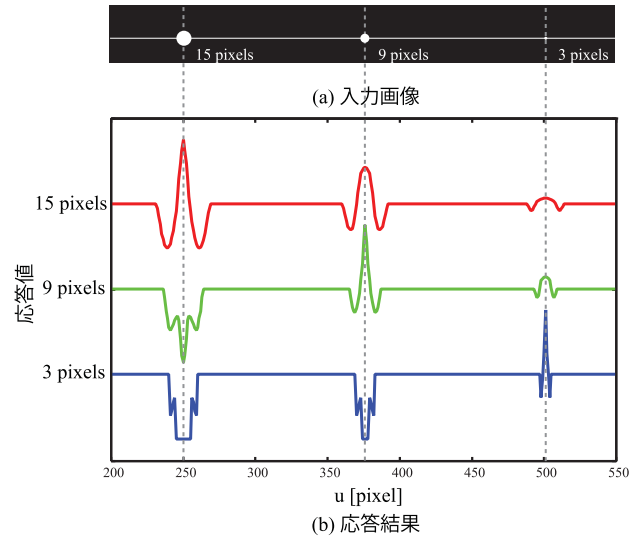


図3: それぞれのフィルタに対する応答の必要がある。この対応付けには、視線誘導標を抽出した際の直径の大きさが2台のカメラ間で同じであることと、エピソード拘束を用いる。これにより、ステレオ視で用いるカメラ間の対応点を得ることが容易となる。

## 4 道路構造の認識

本節では、3節によって求められた視線誘導標の3次元位置を用いた道路構造の認識手法について述べる。提案手法では、道路を作成するときに用いられるクロソイド曲線を視線誘導標の3次元位置に当てはめることにより道路の構造認識を行う。当てはめにより得られたクロソイド曲線のパラメータからSVM(Support Vector Machine)[8]を用いてカーブの分類を行う。本研究で対象とするカーブの種類は右カーブ、左カーブ、右カーブから左カーブ(以下右左カーブ)、左カーブから右カーブ(以下左右カーブ)の4種類とする。

次に使用する座標系について述べ、その後クロソイド曲線と3次関数により視線誘導標モデルを定義し、最後に道路構造を認識する手法について述べる。

### 4-1 座標系の定義

図4に本手法における座標系の定義を示す。

**世界座標系** 世界座標系は時刻変化に影響しない一定の原点を持ち、 $x_w, y_w, h_w$ とする。

**車両座標系** 車両座標系は時刻毎に変化し、車両の向いている方向を $y$ 軸とし、 $x_v, y_v, h_v$ とする。世界座標系から車両座標系への変換は回転行列 $R_{wv}$ 、平行移動ベクトル $T_{wv}$ を用いる。この回転行列と平行移動ベクトルは、ego-motion やジャイロなどを使用することにより求められる。

**カメラ座標系** カメラ座標系は時刻毎に変化し、カ

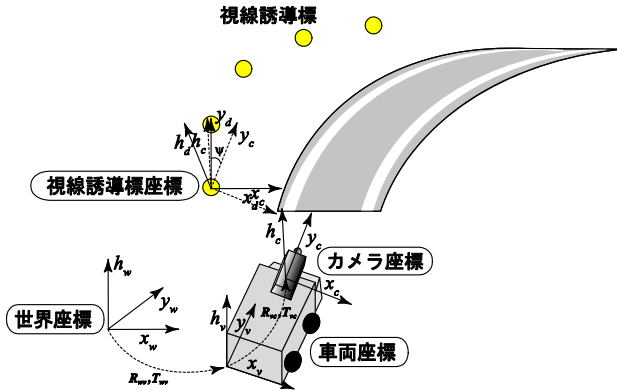


図4: 各座標系の定義

カメラの光線を  $y$  軸とし,  $x_c, y_c, h_c$  とする. 車両座標系とカメラ座標系はキャリブレーションを行うことにより, 回転行列  $R_{vc}$ , 平行移動ベクトル  $T_{vc}$  が求められる. 座標系の変換が可能となる.

**視線誘導標座標系** 視線誘導標座標系は時刻毎に変化し, 視線誘導標に沿う  $y$  軸をとる座標系であり,  $x_d, y_d, h_d$  とする.

#### 4-2 視線誘導標モデルの定義

視線誘導標は以下の式で定義する.

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}(s), \quad \mathbf{y} = \mathbf{y}(s), \quad \mathbf{h} = \mathbf{h}(s) \quad (4)$$

$s$  は媒介変数である. このとき,

$$\begin{cases} \mathbf{x}(s) := \mathbf{x}_0 + \mathbf{x}_1 \frac{s^2}{2} + \mathbf{x}_2 \frac{s^3}{6} \\ \mathbf{y}(s) := \mathbf{s} \end{cases} \quad (5)$$

$\mathbf{x}_1$ :  $x$  軸の曲率,  $\mathbf{x}_2$ :  $x$  軸の曲率の変化率

と定義し, クロソイド曲線に従うとする. また,  $\mathbf{h}(s)$  を3次関数と近似できるものとする.

$$\mathbf{h}(s) := \mathbf{h}_0 + \mathbf{h}_1 s + \mathbf{h}_2 \frac{s^2}{2} + \mathbf{h}_3 \frac{s^3}{6} \quad (6)$$

本研究では視線誘導標の3次元位置が得られたときに,  $\mathbf{x}(s), \mathbf{y}(s), \mathbf{h}(s)$  を求めることを考える問題である.

#### 4-3 手法の流れ

提案手法で得られるデータは視線誘導標の3次元座標であるので, その3次元位置をクロソイド曲線と3次関数に当てはめる. 得られたパラメータより道路の構造認識を行う. 以下にその手法について述べる.

##### Step1 視線誘導標座標系に変換

媒介変数  $s$  は,  $\mathbf{y}(s) = \mathbf{s}$  という関係があり, ユークリッド距離で表現される. 視線誘導標が直線の場合は, ユークリッド距離と  $y_c(i)$  が同等であるため問題がない. しかし, 曲がっている場合には, ユークリッド距離と  $y_c(i)$  との間にずれが生じるため問題がある. そこで, クロソイド曲線を当てはめる際に, 図4のよ

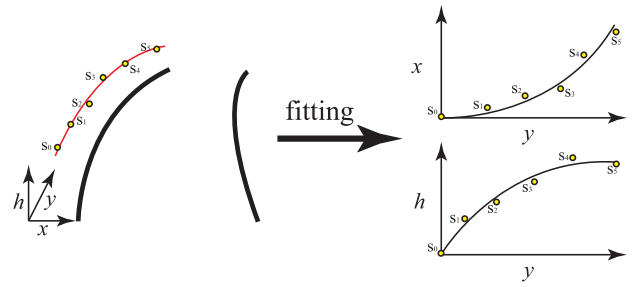


図5: 視線誘導標の3次元位置のフィッティングにより視線誘導標に沿う軸に変換する必要がある. カメラ座標系から視線誘導標座標系への回転角  $\psi$  を得ることにより  $s$  軸の近似を行う. このとき, 各3次元座標は以下の式で変換される.

$$\mathbf{X}' = \mathbf{X}_c \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \mathbf{T}_{cd} \quad (7)$$

$\mathbf{X}' = [x' \ y' \ h']$  は座標変換後の3次元位置,  $\mathbf{X}_c = [x_c \ y_c \ h_c]$  はカメラ座標の3次元位置である. このとき,  $\psi, \mathbf{T}_{cd}$  は以下のように求める.

$$\psi = \arctan\left(\frac{x_c(0)}{y_c(0)}\right), \quad \mathbf{T}_{cd} = [x_c(0) \ y_c(0) \ z_c(0)] \quad (8)$$

##### Step2 各パラメータの算出

図5に示すように求めた3次元位置を用いて, クロソイド曲線と, 3次関数に当てはめる.

##### (a) 媒介変数 $s$ の算出

式(5)における媒介変数  $s$  は視線誘導標座標系におけるユークリッド距離とし, 以下のよう求める.

$$\begin{aligned} s_0 &= \|\mathbf{X}'(0)\| \\ \Delta s_{i,i-1} &= \|\mathbf{X}'(i) - \mathbf{X}'(i-1)\| \\ s_i &= s_{i-1} + \Delta s_{i,i-1} \quad (i=1,2,3,\dots,n) \end{aligned} \quad (9)$$

##### (b) クロソイド曲線による当てはめ

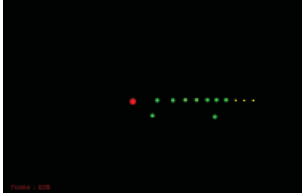
視線誘導標の3次元位置にLM(Levenberg-Marquardt)法を用いてクロソイド曲線を当てはめる. しかし, 検出した視線誘導標にはアウトライアが存在するためRANSAC[10]を用いて, クロソイド曲線のパラメータを推定する. この当てはめより, カーブの性質を決定するクロソイド曲線のパラメータ  $\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$  を得ることができる.

##### (c) 3次関数による当てはめ

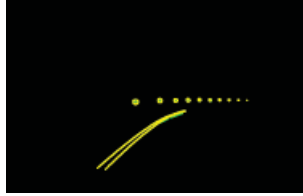
(b)と同様に, 視線誘導標の3次元位置にLM法とRANSACを用いて3次関数を当てはめる. この当てはめより, 道路の起伏を決定する3次関数のパラメータ  $\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \mathbf{h}_3$  を得ることができる.



(a) 入力画像



(b) 提案手法



(c) Hough 変換

図6: 視線誘導標の検出例

表 1: 視線誘導標の検出精度 [%]

フィルタのサイズ	正解	誤検出
15	99.2	7.6
9	92.1	29.3
3	98.6	3.7
平均	95.4	18.5

### Step3 カーブの分類

Step2においてクロソイド曲線のパラメータが推定される。各パラメータ $x_0$ は曲線の初期位置である。 $x_1$ は一次曲率であるため、このパラメータは近距離領域での曲がり方に影響を与える。一方、 $x_2$ は二次曲率であるため、遠距離領域での曲がり方に影響を与える。したがって、カーブの種類毎にクロソイド曲線のパラメータ $x_1$ と $x_2$ を学習しておいたSVMを入力し、4種類のカーブに分類する。

以上の処理により、道路構造の認識を行う。

## 5 実験

### 5-1 視線誘導標の検出実験

車載カメラから夜間の視線誘導標を撮影し、視線誘導標の反射光を検出する。視線誘導標の検出実験では、従来法の円形Hough変換と提案手法の比較を行う。シーケンスは右カーブ左カーブを含む300フレームを車載カメラで撮影し、このとき画像中に出現する視線誘導標の総数は2,298である。

図6(a)の入力画像に対し、本手法と円形Hough変換で円を抽出した結果を図6(b)(c)に示す。それぞれ検出に用いたフィルタの直径は15, 9, 3 pixelの3種類である。提案手法は、手前から遠方の視線誘導標まで検出可能であることがわかる。一方、従来手法である円形Hough変換では、白線部分の輪郭の影響を受け誤検出が多い。

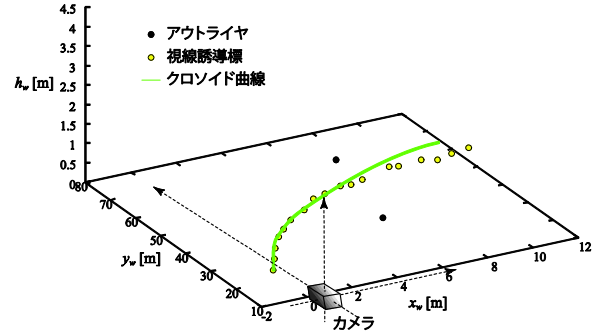
次に、提案手法の検出精度を評価するために、正解率、誤検出率を算出する。検出した円の正解数を



左カメラ

右カメラ

(a) 入力画像



(b) 当てはめ例

図7: クロソイド曲線を当てはめた例

C, 誤検出した数をfp, 未検出の数をfnとして以下の式で正解率, 誤検出率を計算する。

$$\text{正解率} = \frac{C}{C + fn} \times 100, \quad \text{誤検出率} = \frac{fp}{C + fp} \times 100 \quad (10)$$

表1に視線誘導標の検出精度を示す。視線誘導標の検出率の平均は95.4%と高い精度を得ることができた。9 pixelの未検出の原因は、カーブ時に視線誘導標同士が重なるためである。また、誤検出の原因は、破線が遠方にある場合に視線誘導標の形状と酷似しているためである。このような誤検出は、クロソイド曲線を当てはめる際にRANSACを用いることで、アウトライアとして除去を行う。

### 5-2 視線誘導標による道路構造認識

#### 車載カメラを用いた実験

図7(a)に車載カメラ(ベースライン約40 cm)から視線誘導標を撮影した画像を示す。この画像から視線誘導標を検出し、3次元位置を求め、クロソイド曲線を当てはめた例を図7(b)に示す。図7(b)より、この道路は前方20 m先より右にカーブしていることがわかる。

夜間に車載カメラで撮影した画像を用いた実験では、車から視線誘導標までの距離の真値やカーブの曲率などを正確に知ることができないため評価が難しい。そこで、シミュレーション空間上に仮想道路を作成することにより評価を行う。

#### シミュレーション実験

シミュレーション空間上に仮想道路画像を生成し、道路の構造認識を行う。表2にカーブの分類率を示す。右カーブ, 左カーブは約85%と高い精度で分類でき



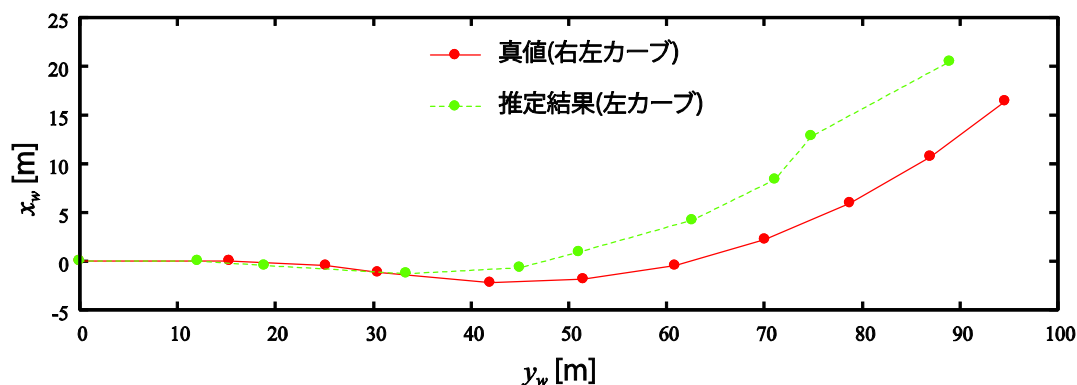


図 8: 誤分類例

ていることがわかる。また、右左カーブ、左右カーブは約77%で分類することができている。しかし、表2から誤分類があることもわかる。右カーブを左カーブ、左カーブを右カーブと誤分類している多くは、分類境界付近で発生する。緩やかなカーブのとき、分類境界付近にクロソイド曲線のパラメータが推定されることが多い。そして、分類境界付近に分布されるパラメータは誤分類しやすい傾向がある。しかし、分類境界は学習時のデータに依存して変化し、必ず発生するため、防ぐことが難しい問題である。次に、図8に右左カーブを左カーブと誤分類している例を示す。この図8のように近距離のカーブ情報が少なく、遠距離のカーブ情報が多い場合に、遠距離のカーブの影響を大きく受けるため、遠距離のカーブである左カーブとして分類される。これらの問題を解決するために、クロソイド曲線のパラメータだけではなく、画像中の視線誘導標の位置情報を用いることにより、改善することを検討している。

## 6 おわりに

本稿では、夜間の運転支援として視線誘導標の3次元位置を算出し、クロソイド曲線に当てはめ、道路構造を認識する手法を提案した。シミュレーション実験では、自車両走行データから道路を構築し、その道路に視線誘導標を設置することにより評価を行い、86%の分類率を得た。以上より、夜間での運転補助に適用できると考えられる。

今後の課題として、カーブの分類だけでなく、クロソイド曲線のパラメータからカーブの曲がり具合の提示を行う予定である。

## 参考文献

[1] C. Thorpe, M. Hebert, T. Kanade, and S. Shafer: "Vision and Navigation for the Carnegie-Mellon Navlab", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 10, No. 3, May, 1988, pp. 362 - 373.

表2: カーブの分類率 [%]

	右	左	右左	左右	正解数	[%]
右カーブ	251	20	7	5	251	88.6
左カーブ	18	255	0	24	255	85.8
右左カーブ	0	4	17	1	17	77.2
左右カーブ	4	1	0	17	17	77.2
平均					540	86.5

[2] C.J. Taylor, Jitendra Malik and Joseph Weber: "A Real-Time Approach to Stereopsis and Lane-Finding", Intelligent Vehicles 1996, pp 207-212.

[3] A. Takahashi and Y. Ninomiya: "Model-Based Lane Recognition", Proceeding of the 1996 IEEE intelligent vehicles symposium, pp. 201-206, 1996.

[4] M. Bertozzi and A. Broggi: "GOLD: a Parallel Real-Time Stereo Vision System for Generic Obstacle and Lane Detection", IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 7, No. 1, pp. 62-81, 1998.

[5] D. Khosla: "Accurate Estimation of Forward Path Geometry Using Two-Clothoid Road Model", Intelligent Vehicle Symposium, 2002. IEEE Vol. 1, Issue, 17-21, pp. 154-159, 2002.

[6] Y. Wang, D. Shen and E. K. Teoh: "Lane Detection Using Catmull-Rom Spline", Proc. of Intelligent Vehicles Symposium, Vol. 1, pp. 51-57, 1998.

[7] J. Goldbeck and B. Huertgen: "Lane Detection and Tracking by Video Sensors", Proc. of IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, pp. 74-79, 1999.

[8] Nello Cristianini (原著), John Shawe-Taylor (原著), 大北 剛 (翻訳): "サポートベクターマシン入門", 共立出版, 2005.

[9] 社団法人 日本道路協会: "視線誘導標設置基準・同解説", 1984.

[10] M. A. Fischler and R. C. Bolles: "Random Sample Consensus: a Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography", Commun. ACM, no.24, vol.6, pp.381-395, June 1981.