

白線と視線誘導標の3次元位置を用いた道路構造の認識

Recognition of Road Contours Based on Extraction of 3D Positions of White Road Lines and Delineators

清水 彰一† 藤吉 弘亘† 岩堀 祐之† 酒井 裕史‡ 金出 武雄§
Shoichi Shimizu Hironobu Fujiyoshi Yuji Iwahori Hiroshi Sakai Takeo Kanade

1. まえがき

近年 ITS(Intelligent Transport Systems) は、盛んに研究され、国内外で様々なシステムが提案されている。その一つに安全運転の支援があり、事故等を未然に防ぐ方法の開発が行われている。この支援をするために、障害物の検出や白線を検出することによりレーンを保持する機能、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) などが提案されている。自動車を自動運転させる研究として NAVLAB[1] があり、多彩なセンサを用いることにより自動運転を可能としている。また、道路構造を求め手法 [2, 3] や運転制御を行う手法 [4]、自車両位置を求める手法 [5] では、白線の情報から算出する手法が多く提案されている。また、人が自動車を運転する際、進行方向を注視し道路線形等を把握し、走行、避走、停止などを行う。この道路線形等の把握に白線は重要な役割を担い、白線を検出することにより、運転者への支援が可能となることが考えられる。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ことにより求める手法などが、多数提案されている [6]~[11]。しかし、これらの手法は日中を対象としている場合が多く、夜間での運用は支障をきたす恐れがある。夜間は、前方を照らす前照灯の範囲は狭く視認性が悪いので、運転者は多くの危険を伴うことが考えられる。そこで我々は、夜間の運転の補助として、前照灯の照らすことが可能である車両から近い領域を白線から、遠方の領域は 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の形状を認識し、運転者へ道路の成り立ちを提示する運転支援のシステムを提案する。

2. 視線誘導標

視線誘導標は、車道の側方に沿って道路線形等を明示し、運転者の視線誘導を行う施設をいう。自動車が夜間走行する場合には、その前照灯によって進行方向を照らして道路線形等を把握し、走行、避走、停止などを行う。しかし、前照灯によって明確に把握できる範囲は限られている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設置される道路の付属物として、道路照明



図 1: 視線誘導標

施設があるが、設置・維持に多額の費用を要するため、ある交通量以上の道路を対象に設置しているのが実態である。また、前照灯からの光の再帰反射を利用したものとして区画線があるが、反射光量が少なく、十分な視線誘導効果を期待できない場合がある。このようなことから、費用、効果等を考慮した夜間における視線誘導方策として視線誘導標が有効と考えられる。図 1 に視線誘導標の例を示す。

3. 道路構造の推定

3.1. 道路構造モデル

白線と視線誘導標から道路の形状を求めるために、道路の構造を考慮した手法が適切であると考えられる。そこで、道路を構成する要素の一つであるクロソイド曲線にそれぞれの 3 次元位置を当てはめることにより、道路の形状を知る手法を提案する。

3.2. 座標系の定義

図 2 に本システムにおける座標系の定義を示す。本システムでは、ステレオ視などにより、視線誘導標が求められているものとする。

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。

カメラ座標系 カメラ座標系は時刻毎に変化し、カメラの光線を y 軸とし、 x_c, y_c, h_c とする。回転行列 R 、平行移動ベクトル T を用いることにより、世界座標系へと変換される。

白線座標系 白線座標系は時刻毎に変化し、白線に沿う y 軸をとる座標系であり、 x_l, y_l, h_l とする。この座標系は各白線につき存在する。

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。

3.3. 白線と視線誘導標モデルの定義

白線と視線誘導標は以下の式で表されるとする。

$$x = x(s), \quad y = y(s), \quad h = h(s) \quad (1)$$

† 中部大学
‡ 株式会社デンソー
§ カーネギーメロン大学

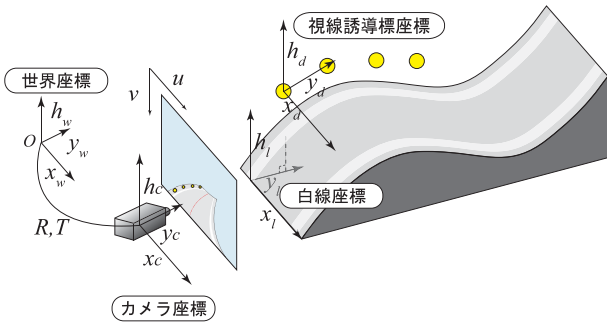


図 2: 座標系の定義

s は媒介変数である．このとき，

$$\begin{cases} x(s) := x_0 + x_1 \frac{s^2}{2} + x_2 \frac{s^3}{6} \\ y(s) := s \end{cases} \quad (2)$$

x_1 : x 軸の曲率,

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， $h(s)$ を 3 次関数と近似できるものとする．

$$h(s) := h_0 + h_1 s + h_2 \frac{s^2}{2} + h_3 \frac{s^3}{6} \quad (3)$$

3.4. 問題

本システムでは白線と視線誘導標の 3 次元位置が得られたときに，白線と視線誘導標の $x(s)$, $y(s)$, $h(s)$ を求めることを考える問題である．

3.5. パラメータの推定

本システムで得られるデータは白線と視線誘導標の 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解析を行う．以下にその手法について述べる．

Step1 白線座標系と視線誘導座標系に変換

媒介変数 s は， $y(s) = s$ という関係があり，ユークリッド距離で表現される．白線や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 (図 3 参照)．そこで，クロソイド曲線を当てはめる際に，より対象物に沿う軸に変換する必要がある．カメラ座標系からそれぞれの座標系への回転角 ψ 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．

$$\mathbf{X}' = \mathbf{X}_c \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \mathbf{T}_c \quad (4)$$

$\mathbf{X}' = [x' \ y' \ h']$ 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

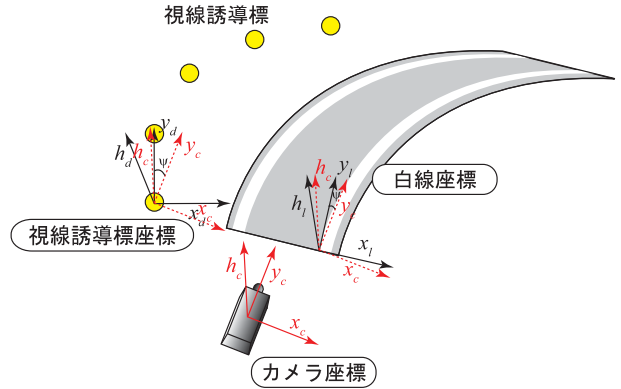


図 3: 軸の変換

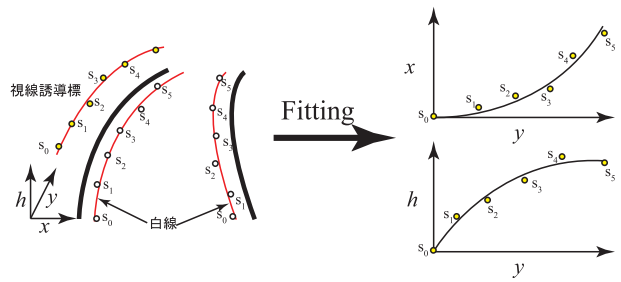


図 4: 中心を曲線に当てはめる

き， ψ , \mathbf{T}_c は以下のように求める．

$$\psi = \text{atan}(x_c(0)/y_c(0)), \quad \mathbf{T}_c = [x_c(0) \ y_c(0) \ h_c(0)]$$

Step2 各パラメータの算出

(a) 媒介変数 s の算出

式 (2) における媒介変数 s は白線座標系と視線誘導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．

$$s_0 = \|\mathbf{X}'(0)\| \quad (5)$$

$$\Delta s_{i,i-1} = \|\mathbf{X}'(i) - \mathbf{X}'(i-1)\| \quad (6)$$

$$s_i = s_{i-1} + \Delta s_{i,i-1} \quad (i = 1, 2, 3 \dots n)$$

(b) クロソイド曲線による当てはめ

白線と視線誘導標の 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．この当てはめ結果により，パラメータ x_0 , x_1 , x_2 が求められる．

(c) 3 次関数による当てはめ

白線と視線誘導標に LM 法を用いて 3 次関数を当てはめる．この当てはめ結果により，パラメータ h_1 , h_2 , h_3 が求められる．

Step3 道路構造の推定

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 x 軸の曲率であるため，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．また x_2 は x 軸の曲率の変化率であるため，遠距離領域での曲がり方に影響を与える．したがって，これらのパラメータより道路のカーブの検

知を行う。

Step4 カメラ座標系へ変換

Step1 において、座標系は回転が加えられているため、カメラ座標系へ変換する。

$$X_c = X' \begin{bmatrix} \cos(-\psi) & \sin(-\psi) & 0 \\ -\sin(-\psi) & \cos(-\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - T_c \quad (7)$$

Step5 世界座標系へ変換

クロソイド曲線のパラメータ (x_1, x_2) 、3 次関数のパラメータ (h_1, h_2, h_3) の変化が収束した場合、カメラ座標系から世界座標系への変換を行う。変換には、ego-motion やジャイロなどから得られる回転行列 R と平行移動ベクトル T を用いる。 $X_w = [x_w \ y_w \ h_w]$ は世界座標系の 3 次元位置とする。

$$X_w = RX_c^T + T \quad (8)$$

4. 実験

シミュレーション空間として実際に得られた自車両走行データより道路を作成し、白線と視線誘導標を設置する。図 5(a) に作成した道路と視線誘導標の配置を示す。シミュレーション空間上の白線と視線誘導標の 3 次元位置は既知であるとし、白線は 30 m、視線誘導標は 100 m 先の情報を用いる。この 3 次元位置を用いてクロソイド曲線を当てはめることにより、道路の構造の推定を行う。また、本実験では高さ h は一定とし、 x, y 座標のみを対象とする。

図 5(b) に道路構造を推定した結果を矢印として表示した出力画像を示す。下側が白線で道路構造を推定した結果であり、上側が視線誘導標で道路構造を推定した結果である。道路と視線誘導標の作成時の真値を用いることによりカーブの方向を求め、白線と視線誘導標の推定結果の正誤を算出した結果、白線の正解認識率は 85.6 % であり、視線誘導標の正解認識率は 79.4 % であった。白線の認識率が低下する原因は、閾値により直線とカーブの区別をしているため、その境目で認識率の低下が発生している (図 6 参照)。視線誘導標はカーブに設置してあるため、このような認識率の低下は見られなかった。しかし、視線誘導標でのカーブの曲がり方の検知精度は白線の精度より低い。この原因は、3 点以上の視線誘導標を用いてクロソイド曲線を当てはめているため、使用するデータ数が少ないときに精度が落ちる。白線では近距離の曲がり方を視線誘導標では遠距離の曲がり方を捕らえていることがわかる。通常的手法では白線情報のみを用いてカーブの曲がり方を検知するため、フレーム 100, 400 の場合のように遠方ではカーブしているにもかかわらず、直線を示している。しかし、視線誘導標の結果も

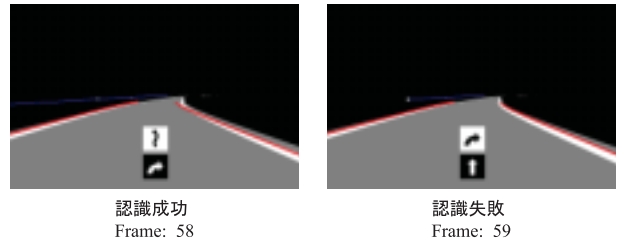


図 6: 誤認識例

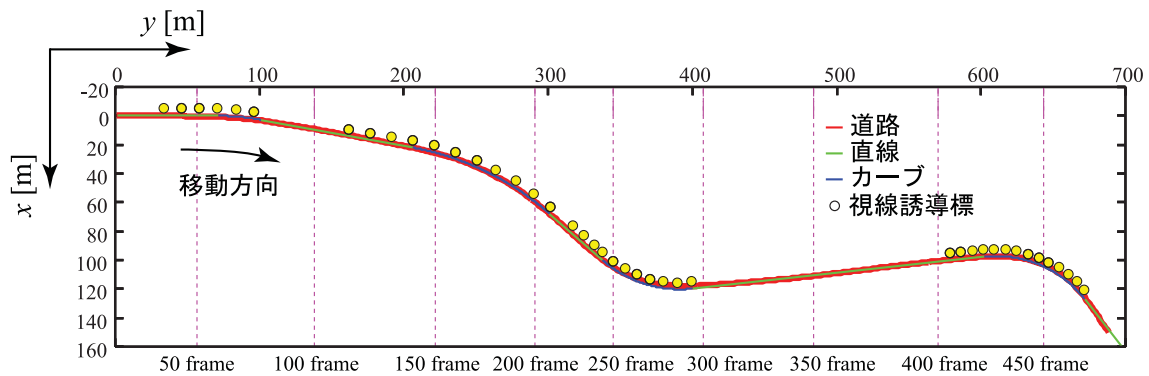
踏まえることにより、本手法では遠方においてカーブがあることが検知できている。

5. おわりに

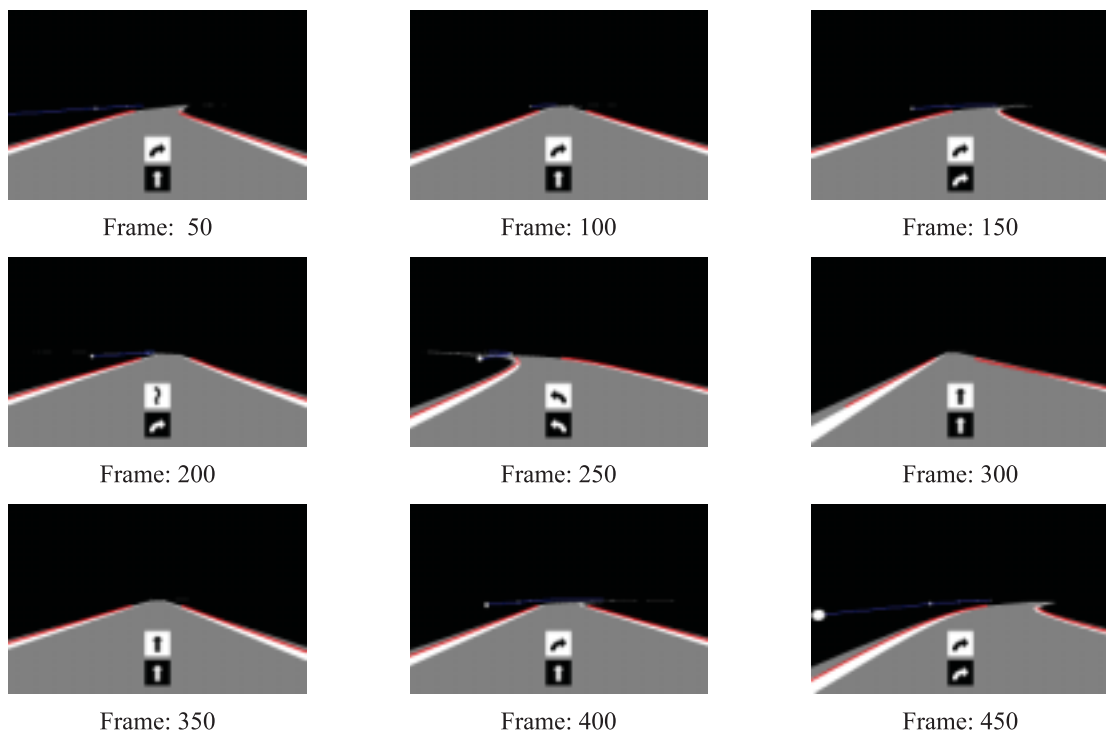
夜間の運転支援として白線と視線誘導標の 3 次元位置を用いて、クロソイド曲線にフィッティングすることにより、道路構造の推定し、運転者へ道路の成り立ちを提示するシステムを提案した。本システムでは、近距離のカーブの検知には白線情報を、遠距離のカーブの検知には視線誘導標を用いることにより、夜間時に道路の構造を遠方まで知ることができる。シミュレーション実験では、自車両走行データから道路を構築し、その道路に白線と視線誘導標を設置することにより評価を行った。この実験における推定結果より、夜間での運転補助に適用できると考えられる。今後の課題として、実際の道路のデータを用いた評価実験を行う予定である。

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.
- [2] R. Aufrère, R. Chapuis and F. Chause: "A model-driven approach for real-time road recognition", Machine Vision and Applications (2001) 13: pp. 95-107, 2001.
- [3] Nedeveschi, R., Schmidt, T. Graf, R. Danescu, D. Frentiu, T. Marita, F. Oniga, C. Pocol: "3D Lane Detection System Based on Stereovision", IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, pp. 161-166. 2004.
- [4] D. Pomerleau: "RALPH: Rapidly Adapting Lateral Position Handler", Proc. of 1995 Symposium on Intelligent Vehicles, pp. 506-511, 1995.
- [5] 足立淳, 佐藤淳: "未校正カメラによる自車両位置推定", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J89-D, No. 1, pp. 74-83, 2006.



(a) 自車両データを用いた仮想道路作成



(b) 道路構造を推定した例 (上側: 視線誘導標 下側: 白線)

図 5: 仮想道路と道路構造の推定結果

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

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

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.