

道路像解析における対応点の決定法

4K-4

小林 哲也

小沢 慎治

慶応義塾大学

1. はじめに

視覚誘導による車両の自動操縦を目的として、著者ら^[1]は既に道路構造令^[2]に基づいた道路の3次元モデルを示し、画像平面より得られる道路エッジからモデルのパラメータを算出する解析方法を提案した。しかし、道路エッジにモデルを当てはめる場合、正しい対応点での当てはめが困難であった。

本稿では、道路の満たす3次元的な拘束条件を用い、画像上で得られた左右のエッジの対応点を決定する方法を試みた。試行例として、設定速度に基づいた道路の設計限界^[2]においてシミュレーションを行い、良好な結果が得られたので報告する。

2. 対応点の決定方法

画像上において対応点を決定するために、道路の満たす3次元的な拘束条件をここに示す。

(1) 道路幅は一定で、これを既知とする。

(W: 道路幅の1/2)

(2) 片勾配がない道路を対象とする。すなわち、左右の道路境界上の対応点から生成される幅2Wの線形セグメントは、水平である。本稿ではこのセグメントを『道路セグメント』と呼ぶ。また、3次元の道路境界は、道路セグメントの midpoint がセンターラインに対して垂直を保ち、この上を滑らかに動くときに描かれる空間曲線である。

(3) 左右の道路境界上の対応点、すなわち、道路セグメントの端点における接線は道路セグメントと直交している。また、これら2本の接線は近似的に平行であるとする。

以下では、これらの拘束条件(1)~(3)を用いて対応点の決定方法を述べる。また、本稿で用いる座標系は図1に示したように車両に対して固定された座標系であり、車両の中心線をX-Z平面へ投影した座標系をZとし、これを道のり座標とする。

2.1 道路セグメントの設定

画像上において得られた左右の道路エッジ点列を、 $p_l(x_l(i), y_l(i))$ 、 $p_r(x_r(j), y_r(j))$ とおく。ここで任意の*i*、*j*を選び、左エッジ上の点を $p_l(x_l, y_l)$ 、右エッジ上の点を $p_r(x_r, y_r)$ とする。 p_l 、 p_r を逆射影したものは直線 Op_l 、 Op_r (O : 原点)であり、パラメータ k_l 、 k_r を用いて次式のように表わされる。(仰角: $\theta = 0^\circ$)

$$\begin{aligned} Op_l : \frac{X_L}{\left(\frac{x_l}{F}\right)} &= \frac{Y_L}{\left(\frac{y_l}{F}\right)} = Z_L = k_l \\ Op_r : \frac{X_R}{\left(\frac{x_r}{F}\right)} &= \frac{Y_R}{\left(\frac{y_r}{F}\right)} = Z_R = k_r \end{aligned} \quad (1)$$

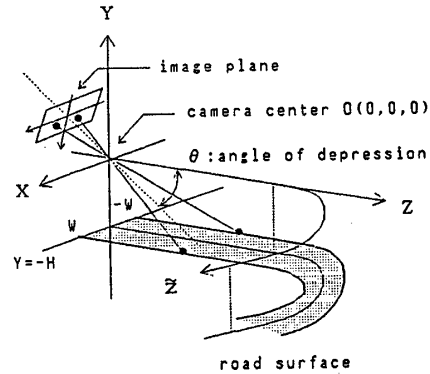


図1 座標系

拘束条件(2)より、道路セグメントは水平であるから、 $Y_L = Y_R$ の関係が成り立ち、道路セグメントの端点 $P_L(X_L, Y_L, Z_L)$ 、 $P_R(X_R, Y_R, Z_R)$ の位置はパラメータ k_i により記述される。また拘束条件(1)より、道路幅2Wは一定であるから式(2)よりパラメータを計算し、道路セグメントの端点 P_L 、 P_R の位置を設定する(図2)。

$$k_i = \frac{2W}{\sqrt{\left(\frac{x_r y_l - x_l y_r}{F y_r}\right)^2 + \left(\frac{y_l - y_r}{y_r}\right)^2}} \quad (2)$$

また、設定した道路セグメントの単位セグメントベクトルSを次式のように定義する。

$$S = \frac{P_R - P_L}{\|P_R - P_L\|} = \frac{(X_R - X_L, 0, Z_R - Z_L)}{\sqrt{(X_R - X_L)^2 + (Z_R - Z_L)^2}} \quad (3)$$

2.2 道路の接線ベクトル

先に示したように道路セグメントの端点 P_L 、 P_R における接線は近似的に平行である。従って、画像上において p_l 及び p_r における接線 L_l 、 L_r から得られる無限遠点の座標より、道路セグメントの接線ベクトルを求めることができる。

$$\begin{aligned} L_l : y &= a_l x + b_l \\ L_r : y &= a_r x + b_r \end{aligned} \quad (4)$$

計算された無限遠点の座標を (x_∞, y_∞) とすれば、単位接線ベクトルTは次式のように与えられる。

$$T = \frac{(x_\infty, y_\infty, F)}{\sqrt{x_\infty^2 + y_\infty^2 + F^2}} \quad (5)$$

2.3 対応点の決定

左右のエッジ上の点 p_l 、 p_r の組合せが、道路セグメントの両端点を画像平面上に射影したものであれば、この組合せについて2.1、2.2にて求めたS及びTは、拘束条件(3)より式(6)を満たす。

$$S \cdot T \approx 0 \quad (6)$$

従って左エッジ上の点 $p_l(x_l(i_0), y_l(i_0))$ を固定とし、右エッジ上の点 $p_r(x_r(j), y_r(j))$ ($j = 0, 1, \dots, n-1$)に対して $S(i_0, j)$ 、 $T(i_0, j)$

を計算し、 $S(i_0, j)$ と $T(i_0, j)$ の内積の絶対値を最小とするような点 p_r が画像上における対応点である。

$$\min_{0 \leq j \leq n-1} |S(i_0, j) \cdot T(i_0, j)| \quad (7)$$

画像上において一組の対応点 p_l, p_r を決定することにより、式(2)から一つの道路セグメントを生成することができる。さらに、左エッジ上の点全てについて同様の操作を行えば、道路の3次元形状が復元できる。

3. 接線ベクトルの補正

拘束条件(3)より、2. 2において画像上から求めた道路セグメントの単位接線ベクトル T は、近似的な値である。本稿では片勾配のない道路を対象としているので、道路形状が水平・縦断方向に共に変化がある場合、道路セグメントの端点 P_L, P_R における真の接線はねじれの位置にある。本章では2. 3において決定された道路セグメントの真の単位接線ベクトル T_L, T_R を求める方法について述べる。左右のエッジ上の点 p_l, p_r における接線(式(4))を逆射影したものは平面 M_L, M_R を構成する(図3)。

$$\begin{aligned} M_L: a_l F X - F Y + b_l Z &= 0 \\ M_R: a_r F X - F Y + b_r Z &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

また、 M_L, M_R の単位法線ベクトル N_L, N_R は、

$$N_L = \frac{(a_l F, -F, b_l)}{\sqrt{(a_l F)^2 + F^2 + b_l^2}} \quad N_R = \frac{(a_r F, -F, b_r)}{\sqrt{(a_r F)^2 + F^2 + b_r^2}} \quad (9)$$

T_L, T_R は平面 M_L, M_R 上にあり、道路セグメントに直交している。よって、法線ベクトルが S で P_L, P_R を通る平面と M_L, M_R の交線の方法線ベクトルを求めればよい。これらは、 S とのベクトル積によって表わされる。

$$\begin{aligned} T_L &= S \times N_L \\ T_R &= S \times N_R \end{aligned} \quad (10)$$

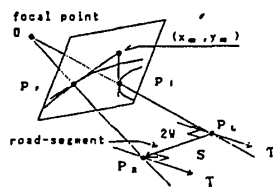


図2 道路セグメント

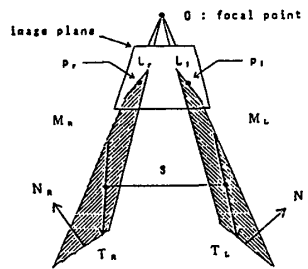


図3 接線ベクトルの補正

4. 計算機シミュレーション

本稿では、画像処理による実画像からのエッジ抽出を省くため、道路のセンターラインの水平方向・縦断方向の円弧の半径をそれぞれ R_h, R_v と定めて、前述の道路構造令^[2]に基づいた道路の3次元モデルを生成した。さらにこれを画像平面上に射影したイメージを用いて実験を行なった。ただし、カメラ・レンズの焦点距離 F 、カメラの高さ H 、仰角 θ 、道路幅 $2W$ はそれぞれ次の通りである。

$$F = 12.0\text{mm}, \quad H = 1.70\text{m}, \quad \theta = 0.0^\circ, \quad 2W = 4.0\text{m}$$

このようにして、 $R_h=150.0\text{m}$ (左曲がり) $R_v=1000.0\text{m}$ (凹型曲線)の組合せから構成される道路境界を画像平面上に射影した例を図4に示す。また、左エッジ上の点を $i = i_0$ に固定し、これに対し右エ

ッジ上の点($j = 0, 1, \dots, n-1$)について計算した内積 $S(i_0, j) \cdot T(i_0, j)$ の値を図5に示す。その結果、内積の値が0である右エッジ上の点 $p_r(i_0)$ を固定した $p_l(i_0)$ の対応点として選ぶことができる。

道路構造令^[2]では走行の安全性を図るために、設定速度に対して設計可能な最小の R_h および R_v の組合せを設定している。この関係を表1に示した。実験はこれら10通りの組合せについて行い、道路エッジが視野に入る範囲においては1画素の精度で左右エッジの対応づけが完全にできることを確認した。

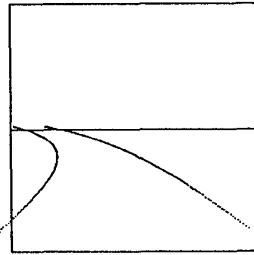


図4 道路エッジ

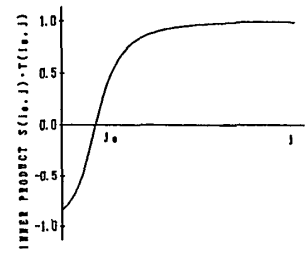


図5 $S(i_0, j) \cdot T(i_0, j)$ の算出結果

表1 設定速度に基づく道路の設計限界

設定速度 (km/h)	R_h (m)	縦断曲線の曲線形	R_v (m)
120	710 ~	凹型曲線	4000
	570	凸型曲線	11000
100	460 ~	凹型曲線	3000
	380	凸型曲線	6500
80	280 ~	凹型曲線	2000
	230	凸型曲線	3000
60	150 ~	凹型曲線	1000
	120	凸型曲線	1400
50	100 ~	凹型曲線	700
	80	凸型曲線	800

5. まとめ

道路が3次元的に満たす拘束条件を用いることにより、画像上において左右の道路エッジの対応点を決定する方法について述べた。今後の課題として、本手法を実画像に応用するために、道路画像からエッジ抽出を行い、エッジ上の点における接線を求めることが挙げられる。

参考文献

- (1) 全, 桜井, 小林, 小沢: "車両から見た道路像の解析", 信学論(D), J71-D, 9, pp.1709-1717 (昭63-09)
- (2) 星 塾 和ほか: "道路構造令の解説と運用", 社団法人日本道路協会, (昭58).