

## 局所平面近似による道路形状復元

渡辺一成 金谷健一

群馬大学工学部情報工学科

自動走行車 (ALV = Autonomous Land Vehicle) のための道路画像から道路の3次元形状を復元するアルゴリズムを示す。まず、道路エッジ間の1対1対応を仮定し、道路形状に関する知識(「道路モデル」)に基づいて局所的な3次元道路形状を復元する方法を示す。次に、「道路は局所的には平坦である」という「局所平面近似」を用いて道路エッジ間の1対1対応を決定する。このようにして各点ごとに復元した道路形状全体に、画像データの誤差の挙動を考慮した最小2乗法によって滑らかな曲線を当てはめる。最後に、実際の画像を用いて復元を行った結果を示し、復元過程で用いた仮定や近似の妥当性を考察する。

## Road Shape Reconstruction by Local Flatness Approximation

Kazunari Watanabe and Kenichi Kanatani

Department of Computer Science, Gunma University  
Kiryu, Gunma 376, Japan

A new algorithm is presented for reconstructing the 3D road shape from camera images for the purpose of navigating autonomous land vehicles (ALVs). The approximation that *the road surface is locally flat* enables us to determine a one-to-one correspondence between the two road boundaries, which together with our knowledge about the road shape (the “model” of roads) determines the 3D road shape. In order to cope with inaccuracy of image data, we propose a least-square curve fitting technique by considering error behaviors. Examples based on real image data are shown, and the role of the heuristics involved in the reconstruction is discussed.

謝辞 本研究に関する有益な討論を頂いた米国メリーランド大学の Azriel Rosenfeld 教授, Larry Davis 教授, Daniel DeMenthon 博士に感謝する。本研究の一部は矢崎科学技術振興記念財団および稲盛財団の助成金による。

### 1. 序論

近年, ALV(Autonomous Land Vehicle: 自動走行車)に関する研究が盛んに行われている. 特に米国では DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)が支援し, Maryland 大学, Carnegie-Mellon 大学などの大学と Martin-Marietta 社などの企業とが提携した Strategic Computing プロジェクトなどが注目を集めている<sup>5)</sup>. このプロジェクトの目的は, 車両自身が前方の景色をカメラで捉え, 道路を認識し, その3次元形状を計算し, その進路を決定することである. 最も容易な方式は誘導信号や路面に描いたガイドラインに従って走行することであるが<sup>4)</sup>, より一般的な環境で自動化するためには, 入力画像の領域分割, 道路および障害物の認識, 道路の境界線の検出<sup>1,11)</sup>, 3次元道路形状の計算, 障害物回避等を考慮した進路の計算, 計算通りに走行させる車両の制御などの高度な処理技術が必要となる<sup>10,12,15,16,17)</sup>.

本論文では, 3次元道路形状の計算に焦点をおく. 直接的な手段としてはステレオや距離センサーを用いる方法があるが, 本研究では道路画像の解析と道路形状に関する知識, すなわち「道路モデル」を組み合わせることににより, 単一の画像から道路の3次元形状を復元することを試みる.

従来から提案されている代表的な方法として, 道路の両側の境界線上の互いに平行な線分の対を発見し, その「消失点」を計算する手法がある<sup>12,17)</sup>. しかし, 一般にそのような局所的に平行な対を見つけることは容易ではない. DeMenthon<sup>2)</sup>は Ozawa ら<sup>14)</sup>の道路モデルに基づいて2次元的な情報から3次元道路形状を復元する方法を提案した. これは, 出発点の3次元的な位置を既知とし, 道路の3次元形状を逐次的に計算するものである. 全ら<sup>18)</sup>や小林ら<sup>6)</sup>は道路の基本形状をあらかじめ数種類用意し, パラメトリックな当てはめを試みている. 小山ら<sup>8)</sup>は DeMenthon<sup>2)</sup>の「離散的」手法に対して「連続的」手法を示した. これは3次元道路形状を記述する「微分方程式」を導き, それを「数値積分」することによって3次元道路形状を復元するものである. しかし, DeMenthon<sup>2)</sup>の「離散的」手法も小山ら<sup>8)</sup>の「連続的」手法も, 逐次的計算により誤差が蓄積し, 視点から遠く離れるほど不正確になる.

最近 DeMenthon<sup>3)</sup>は「局所平面近似」に基づき, 道路の3次元形状を各点ごとに独立に復元する方法を示した. これにより, 誤差の蓄積を避けることができる. しかし, 各点ごとに復元した道路は全体的に滑らかであるとは限らず, 他の部分の復元結果と矛盾することもある. DeMenthon<sup>3)</sup>は矛盾のない解を選ぶために動的計画法による探索を提唱しているが, そのような解が存在するとは限らない.

本論文では DeMenthon<sup>3)</sup>による局所平面近似を, 画像面上の点や直線を射影幾何学的に表す「Nベクトル」<sup>13)</sup>を用いて定式化する. これにより消失点や消失線が計算のあふれを起こすことなく計算できる. この局所平面近似を用いると, 画像から得られた左右の道路エッジ間の

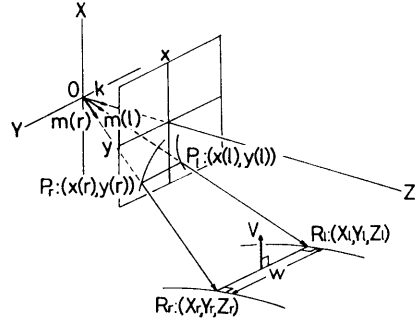


図1 対応点に基づく生成セグメントの復元

1対1の対応が容易に決定できる. そうして得られた対応から道路の3次元形状が各点ごとに復元できる. 最後に, その結果に滑らかな曲線をあてはめる. このとき道路の「無限遠点」を推定し, 解の矛盾を防ぐ. 最後に実際の道路画像に基づいた例を示す.

### 2. カメラモデルと道路形状に関する知識

車両に取り付けられたカメラを基準とするXYZ座標系を考える. レンズの中心を座標原点とし, カメラの光軸をZ軸とする. レンズの中心と撮像面との距離をfとおくと, 投影の関係は座標原点Oを視点とし, 平面  $Z = f$  を画像面とする透視変換として表せる(図1). 空間中の点  $(X, Y, Z)$  が画像面上の点  $(x, y)$  に投影される時, 次の関係が成り立つ.

$$x = fX/Z, y = fY/Z. \quad (1)$$

本論文では, 画像中の2本の道路エッジにはすでにスプライン補間などでなめらかな曲線が当てはめられているものとする. その道路エッジをそれぞれ  $P_l : (x(l), y(l))$ ,  $P_r : (x(r), y(r))$  とする. ここで  $l$  と  $r$  は任意に定めた曲線に沿うパラメーターである.

1枚の道路画像では, その奥行き情報が完全に失われているので何らかの補助的情報がなければ3次元形状を復元することはできない. 本論文では理想的な道路が満たす, 次のような「道路モデル」を設定し, その知識を用いて道路の3次元形状を復元する. 道路のセンターラインは任意の形状をとる滑らかな空間曲線とする. 長さ一定で, しかもセンターラインと中点で垂直に交わり, かつ水平に保たれている線分(以下「生成セグメント」と呼ぶ)を考える. 道路は生成セグメントがセンターライン上を滑るとき, その両端の描く軌跡により得られるものとする.

### 3. 対応点に基づく道路形状の3次元復元

$P_l : (x(l), y(l))$ ,  $P_r : (x(r), y(r))$  をそれぞれ左右の道路エッジ上の対応点とする. ここで次のような単位ベクトルを定義する. ただし,  $N[\cdot]$  は単位ベクトルをつくる正規化オペレーターである.

$$\mathbf{m}(l) = N \begin{bmatrix} x(l) \\ y(l) \\ f \end{bmatrix}, \quad \mathbf{m}(r) = N \begin{bmatrix} x(r) \\ y(r) \\ f \end{bmatrix}. \quad (2)$$

これらは視点  $O$  から画像面上の点  $P_l, P_r$  に向かう単位ベクトルである (図1). このベクトルを点  $P_l$  および点  $P_r$  の「Nベクトル」と呼ぶ<sup>13)</sup>. 道路の3次元形状は、道路エッジ間の1対1対応を定めれば次のように復元できる ( $(\cdot, \cdot)$ はベクトルの内積).

【定理1】  $P_l, P_r$ をそれぞれ画像面上の左右の道路エッジの対応点とすると、それらの3次元的位置は次式により定まる.

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_l &= \frac{w |(\mathbf{V}, \mathbf{m}(r))|}{D(\mathbf{V}, \mathbf{m}(l), \mathbf{m}(r))} \mathbf{m}(l), \\ \mathbf{R}_r &= \frac{w |(\mathbf{V}, \mathbf{m}(l))|}{D(\mathbf{V}, \mathbf{m}(l), \mathbf{m}(r))} \mathbf{m}(r). \end{aligned} \quad (3)$$

ただし

$$D(\mathbf{V}, \mathbf{m}(l), \mathbf{m}(r)) = [(\mathbf{V}, \mathbf{m}(l))^2 + (\mathbf{V}, \mathbf{m}(r))^2 - 2(\mathbf{V}, \mathbf{m}(l))(\mathbf{V}, \mathbf{m}(r))(\mathbf{m}(l), \mathbf{m}(r))]^{1/2}. \quad (4)$$

であり、 $\mathbf{m}(l), \mathbf{m}(r)$ は点  $P_l, P_r$ のNベクトル、 $\mathbf{V}$ は鉛直方向の単位ベクトル、 $w$ は道路幅である.

(証明)  $\mathbf{R}_l = c_l \mathbf{m}(l), \mathbf{R}_r = c_r \mathbf{m}(r)$ とおき、 $c_l (> 0), c_r (> 0)$ を次式を満たすように決定すると(3)式を得る(図1). ( $\|\cdot\|$ はベクトルのノルムをあらわす.)

$$\|\mathbf{R}_l - \mathbf{R}_r\| = w, \quad (\mathbf{V}, \mathbf{R}_l - \mathbf{R}_r) = 0. \quad (5)$$

注意1 道路が登り坂で、画像面上の道路エッジが地平線と交わるとき左右の交点は互いに対応点にならなければならない. しかし、このとき  $(\mathbf{V}, \mathbf{m}(l)) = 0, (\mathbf{V}, \mathbf{m}(r)) = 0$ となり、(3)式は無数の解を生じる(図2). また、実際の計算では水平線付近で解が不安定になる恐れがある.

#### 4. 局所平面近似

$P_l, P_r$ を画像面上の道路エッジの対応する点とし、 $\mathbf{m}(l), \mathbf{m}(r)$ をそれぞれのNベクトルとする. 画像面上で  $P_l, P_r$ における道路エッジの接線は2次元ベクトル  $(\dot{x}(l), \dot{y}(l)), (\dot{x}(r), \dot{y}(r))$ で与えられる(図3). ただしドットは各々のパラメータに関する微分を表す. 例えば  $\dot{x}(l), \dot{y}(r)$ はそれぞれ  $dx(l)/dl, dy(r)/dr$ を表す. すでに道路エッジは滑らかなスプライン曲線で表されているので、 $(\dot{x}(l), \dot{y}(l)), (\dot{x}(r), \dot{y}(r))$ は既知である.

ここで、視点  $O$ と画像面上の道路接線を通る平面を考え、 $\mathbf{n}(l), \mathbf{n}(r)$ をそれぞれの平面の単位法線ベクトルとする(図3). これを道路接線の「Nベクトル」<sup>13)</sup>と呼ぶ.

【定理2】 点  $(x(l), y(l)), (x(r), y(r))$ における道路接線のNベクトルは次式で与えられる.

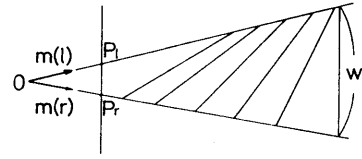


図2 生成セグメントが水平面上に存在する場合は解が一意的ではない

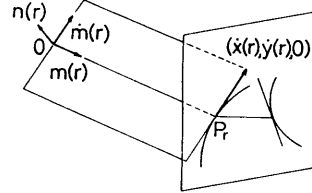


図3 道路エッジ上の点のNベクトルとその点における接線のNベクトル

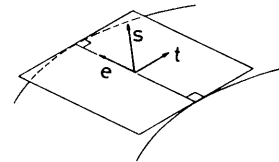


図4 局所平面近似

$$\begin{aligned} \mathbf{n}(l) &= N \begin{bmatrix} -f\dot{y}(l) \\ f\dot{x}(l) \\ x(l)\dot{y}(l) - y(l)\dot{x}(l) \end{bmatrix}, \\ \mathbf{n}(r) &= N \begin{bmatrix} -f\dot{y}(r) \\ f\dot{x}(r) \\ x(r)\dot{y}(r) - y(r)\dot{x}(r) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

(証明) ベクトル  $(x(r), y(r), f), (x(r), y(r), 0)$ はともに、視点  $O$ と点  $P_r$ での道路接線がつくる平面上に存在する. したがって単位法線ベクトル  $\mathbf{n}(r)$ は、それらの外積をとり正規化することによって求められる(図3). 単位法線ベクトル  $\mathbf{n}(l)$ も同様にして求められる.

ここで生成セグメントとその両端での道路接線がシーン中では平面をなすという「局所平面近似」を導入する(図4). この近似は勾配をもち、かつカーブしている螺旋状の道路では必ずしも正しくないが、多くの道路では十分な近似である. この局所平面近似を最初に提案したのは DeMenthon<sup>3)</sup>であり、小林ら<sup>7)</sup>の方法も本質的には同じである. 次の定理はこれをNベクトルを用いて書き直したものである.

【定理3】 局所平面近似のもとでは、対応点対  $P_l, P_r$ は次のように関係づけられる.

$$(\mathbf{V}, \mathbf{m}(r)) | \mathbf{m}(l) \mathbf{n}(l) \mathbf{n}(r) | + (\mathbf{V}, \mathbf{m}(l)) | \mathbf{m}(r) \mathbf{n}(r) \mathbf{n}(l) | = 0. \quad (7)$$

(証明) 2本の道路接線の交点  $P_\infty$  の  $N$  ベクトルは  $N[n(l) \times n(r)]$  で与えられる (図5). 2本の道路接線が空間中で平行であれば,  $P_\infty$  はそれらの「消失点」であり, その  $N$  ベクトルは空間中での接線の3次元方向を表す. したがって, 2本の道路接線の3次元的方向は  $N[n(l) \times n(r)]$  である. また地平線の  $N$  ベクトルは, 鉛直方向単位ベクトル  $V$  である. 生成セグメント  $P_l P_r$  が水平であるとする, その消失点は地平線上になければならない. 点  $P_l, P_r$  を通る直線の  $N$  ベクトルは  $N[m(l) \times m(r)]$  であるので (図5), その消失点  $Q_\infty$  の  $N$  ベクトルは  $N[V \times N[m(l) \times m(r)]]$  で与えられる. したがって生成セグメント  $P_l P_r$  の空間中での方向は  $N[V \times N[m(l) \times m(r)]]$  である. 生成セグメント  $P_l P_r$  と2本の道路接線は空間中で直交するので

$$(N[V \times N[m(l) \times m(r)]], N[n(l) \times n(r)]) = 0. \quad (8)$$

となる. ここで正規化オペレータを取り除き, 公式  $a \times (b \times c) = (a, c)b - (a, b)c$  を用いれば (7) 式を得る.

注意 2 定理3の証明には, 次のようなよく知られた事実を用いている<sup>13)</sup>.

- 画像上の2本の直線を  $l, l'$  とし, それらの  $N$  ベクトルをそれぞれ  $n, n'$  とする. このとき, これらの直線の交点の  $N$  ベクトルは  $n \times n'$  を正規化することで得られる (図6).
- 画像上の2点を  $P, P'$  とし, それらの  $N$  ベクトルをそれぞれ  $m, m'$  とする. このとき, これらの2点を通る直線の  $N$  ベクトルは  $m \times m'$  を正規化することで得られる (図6).
- 直線の消失点のベクトルは, その直線の空間中での3次元的方向を表す.
- 平面の消失線のベクトルは, その平面の空間中での法線方向を表す.

## 5. 対応点の決定

$N$  ベクトル  $m(l), m(r), n(l), n(r)$  はすべて画像から求まるので, (7) 式によってパラメータ  $l$  と  $r$  の間の対応関係を決定することができる. 例えば, 与えられた  $l$  に対する  $r$  の値をニュートン法によって計算すればよい. そこで, (7) 式の左辺を  $F(l, r)$  とおく. 道路エッジが直線ならば  $\dot{n}(r) = 0$  であるが, 道路エッジがカーブしていたとしても, あまり強い曲がりでない限りは  $\dot{n}(r) \approx 0$  とみなすことができる. この近似のもとに次の結果を得る.

### 【定理 4】

$$\frac{\partial F}{\partial r}(l, r) \approx \nu(r) \{ |Vn(r)m(r)| |m(l)n(r)m(r)| + (V, m(l))(m(r), n(l)) \}. \quad (9)$$

ただし

$$\nu(r) = \|\dot{m}(r)\|. \quad (10)$$

(証明)  $\dot{n}(r) = 0$  であれば  $\partial F(l, r)/\partial r$  は

$$(V, \dot{m}(r)) |m(l)n(l)n(r)| + (V, m(l)) |\dot{m}(r)n(r)n(l)|$$

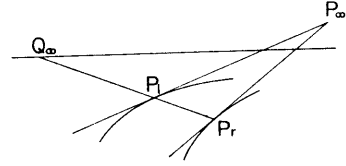


図5 局所平面近似による対応点の決定法

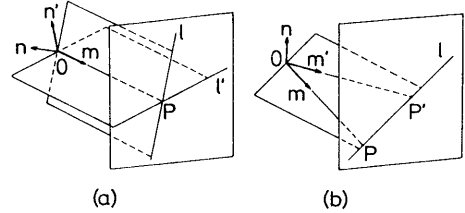


図6 2直線の交点と2点を通る直線の  $N$  ベクトル

となる. ベクトル  $\dot{m}(r)$  は  $n(r)$  と  $m(r)$  の両方に直交する (図3).  $m(r)$  と  $n(r)$  は互いに直交する単位ベクトルなので, それらのベクトル積  $n(r) \times m(r)$  は  $n(r)$  と  $m(r)$  の両方に直交する単位ベクトルである. ゆえに,

$$\dot{m}(r) = \nu(r) n(r) \times m(r). \quad (11)$$

したがって, 次の関係が成り立つ.

$$(V, \dot{m}(r)) = \nu(r) (V, n(r) \times m(r)) = \nu(r) |Vn(r)m(r)|. \quad (12)$$

$$|\dot{m}(r)n(r)n(l)| = (\dot{m}(r) \times n(r), n(l)) = \nu(r) (m(r), n(l)). \quad (13)$$

ただし,  $(n(r) \times m(r)) \times n(r) = m(r)$  という関係を用いた. (9) 式と (10) 式はこれらから得られる.

【定理 5】 パラメータ  $r$  を右側道路エッジの弧長とすれば, 次式を得る.

$$\nu(r) = \frac{1}{f} \frac{(m(r), k)^2}{\sqrt{(m(r), k)^2 + |n(r)m(r)k|^2}}. \quad (14)$$

ただし,  $k = (0, 0, 1)$ .

(証明)  $N$  ベクトル  $m(r)$  の定義から

$$\vec{O}P_r = \frac{f}{(m(r), k)} m(r). \quad (15)$$

である. (11) 式を用いると, 次のようになる.

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{O}P_r}{dr} &= \frac{f}{(m(r), k)} \dot{m}(r) - \frac{f(\dot{m}(r), k)}{(m(r), k)^2} m(r) \\ &= \frac{f\nu(r)}{(m(r), k)} n(r) \times m(r) - \frac{f|n(r)m(r)k|}{(m(r), k)^2} \nu(r) m(r). \end{aligned} \quad (16)$$

$n(r) \times m(r)$  と  $m(r)$  は互いに直交する単位ベクトルであ

るから

$$\left\| \frac{d\vec{OP}_r}{dr} \right\|^2 = \left[ \frac{f\nu(r)}{(m(r), k)} \right]^2 + \left[ \frac{f |n(r)m(r)k| \nu(r)}{(m(r), k)^2} \right]^2 \quad (17)$$

となる。  $r$  が道路エッジの弧長なら  $\|d\vec{OP}_r/dr\| = 1$  となり、(14)式を得る。

定理4, 定理5を用いれば  $m(l), m(r), n(l), n(r)$  から微分することなしに  $\partial F(l, r)/\partial r$  を計算することができる。したがって、与えられた  $l$  に対する  $r$  の値は以下のようなニュートン反復法により求めることができる。

$$r \leftarrow r - \frac{F(l, r)}{\partial F(l, r)/\partial r} \quad (18)$$

$l$  を  $r$  の関数と見なしたければ、同様の手続きを  $l$  に関して行えばよい。

## 6. 曲線当てはめによる平滑化

道路エッジ間の対応関係により、生成セグメントの3次元的位置は他の生成セグメントとは無関係に各点ごとに定まる。しかし、復元された道路は全体的に滑らかであるとは限らない。そこで、誤差の大きな生成セグメントを除去し、除去されなかったセグメントの中心に滑らかな曲線を当てはめることを考える。

誤差の大きなセグメントを除去するためには、除去の基準を与えなければならない。そのために、互いに直交する3つの単位ベクトル  $\{t, e, s\}$  を考える(図4)。ただし、 $t$  は道路の進行方向を表す単位ベクトル、 $e$  は生成セグメントの3次元的方向を表す単位ベクトル、 $s$  は道路面の単位法線ベクトルである。 $\{t, e, s\}$  を道路の「動標構」と呼ぶ。

### 【定理 6】

$$t = N[n(l) \times n(r)], \quad e = N[V \times t], \quad s = N[t \times e]. \quad (19)$$

(証明)  $N[n(l) \times n(r)]$  は道路接線の消失点を示す  $N$  ベクトルであり、それは道路接線の3次元的方向、すなわち道路の進行方向でもある(注意2参照)。また、生成セグメントは水平であり、両端で道路接線に直交する。したがって、ベクトル  $e$  は鉛直方向単位ベクトル  $V$  と道路進行方向  $t$  の両方に直交しなければならない。また、道路面の法線ベクトル  $s$  は道路進行方向  $t$  と生成セグメント方向  $e$  の両方に直交しなければならない。これらより(19)式を得る。

3つのベクトル  $\{t, e, s\}$  は生成セグメントごとに独立して決定できるので、これらを基準となるベクトルと比較して、誤差の大きなセグメントを除去することができる。基準となるベクトルとしては無限遠におけるものを考える。まず、検出された道路エッジから直線をのばして消失点  $P_{\infty}(x_{\infty}, y_{\infty})$  を推定する(図7)。その消失点  $P_{\infty}$  の  $N$  ベクトルを  $m_{\infty}$  とすると、無限遠点での動標構  $\{t_{\infty}, e_{\infty}, s_{\infty}\}$  は、

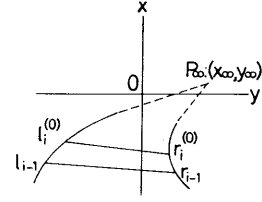


図7 道路の消失点の推定

$$t_{\infty} = m_{\infty}, \quad e_{\infty} = N[V \times m_{\infty}], \quad s_{\infty} = [m_{\infty} \times e_{\infty}]. \quad (20)$$

となる。そこで次のような生成セグメントは除去する。

$$|(t, t_{\infty})| < \cos \theta_t, \quad |(e, e_{\infty})| < \cos \theta_e, \quad |(s, s_{\infty})| < \cos \theta_s. \quad (21)$$

ただし、 $\theta_t, \theta_e, \theta_s$  はあらかじめ設定した許容角度である。

除去されなかった生成セグメントの3次元的位置は定理1により計算できる。そこで、 $i$  番目の生成セグメントの中心を

$$R_c(i) = (X_c(i), Y_c(i), Z_c(i)) \quad (22)$$

とする。この点の画像座標  $(x_c(i), y_c(i))$  は、

$$x_c(i) = fX_c(i)/Z_c(i), \quad y_c(i) = fY_c(i)/Z_c(i). \quad (23)$$

となる。そこで、データ対  $\{(1/Z_c(i), x_c(i))\}, i = 0, 1, 2, \dots$  に次のような関数を当てはめる。

$$1/Z_c(x_c) = \sum_{k=1}^N a_k (x_c - x_{\infty})^k. \quad (24)$$

ただし  $x_{\infty}$  は推定した消失点  $P_{\infty}$  の  $x$  座標である。この関数を次のような最小2乗法で定める(図8)。

$$\sum_i W_i \left[ \frac{1}{Z_c(i)} - \sum_{k=1}^N a_k (x_c(i) - x_{\infty})^k \right]^2 \rightarrow \min. \quad (25)$$

ここで  $W_i$  は  $i$  番目のデータ対に対する重みであるが、以下では定数にとる。係数  $a_k, k = 1, 2, \dots, N$  は上式を微分して得られる連立1次方程式を解くことで容易に計算することができる。

この当てはめの結果の  $i$  番目の生成セグメントの奥行き  $\hat{Z}_c(i)$  は

$$\hat{Z}_c(i) = 1 / \sum_{k=1}^N a_k (x_c(i) - x_{\infty})^k. \quad (26)$$

となる。したがって、 $i$  番目の生成セグメントの端点は次のようになる ( $w$  は道路幅である)。

$$\frac{\hat{Z}_c(i)}{Z_c(i)} R_c(i) \pm \frac{w}{2} e_i. \quad (27)$$

注意3 当てはめるべき関数としては何通りも考えられる。最も普通と考えられるのは、データ対  $\{(Z_c(i), X_c(i))\}$ ,

$i = 0, 1, 2, \dots$  に対する  $Z_c = Z_c(X_c)$  の形の関数の当てはめである。しかし、与えられた  $(x_c(i), y_c(i))$  に対して、(23) 式を満たす  $(X_c(i), Y_c(i), Z_c(i))$  を決定するのに非線形方程式を解かなければならない。  $Z_c$  を  $x_c$  の関数と見なすことによって、これを避けることができる。

注意 4 式 (24) で  $Z_c$  そのままではなく逆数  $1/Z_c$  を用いた理由は、もし道路が一定勾配を持つならば (24) 式の右辺が 1 次式となるためである。実際、道路面が

$$X_c = pZ_c - h. \quad (28)$$

( $p$  は勾配,  $h$  は道路から視点までの高さ) であれば、(24) 式は次のようになる ( $x_\infty = fp$  と置く)。

$$\frac{1}{Z_c} = -\frac{1}{fh}(x_c - x_\infty). \quad (29)$$

特に道路が水平 ( $X_c = -h$ ) であれば  $1/Z_c = -x_c/fh$  となる。

注意 5 当てはめる関数として、 $x_c$  自身ではなく  $x_c - x_\infty$  の多項式を用いたのは  $Z_c(x_\infty) = \infty$  を強制するためである。これが満たされなければ、復元した道路が推定した消失点  $P_\infty$  とは異なる方向に漸近してしまう。

注意 6 (25) 式の最小 2 乗法の重み  $W_i$  を定数にした理由は、誤差のふるまいを次のように考慮したためである。  $i$  番目の生成セグメントに (24) 式を当てはめたときの誤差は

$$\epsilon_i = \frac{1}{Z_c(i)} - \sum_{k=1}^N a_k (x_c(i) - x_\infty)^k. \quad (30)$$

である。重みを定数にとって  $\sum_{i=1}^N (\epsilon_i)^2 \rightarrow \min.$  とすることは、すべての生成セグメントについて当てはめ誤差を平等に分配することを意味する。このとき  $\Delta(1/Z_c) \approx -\Delta Z_c / Z_c^2$  であるから、当てはめ誤差  $\epsilon_i \approx \Delta(1/Z_c(i))$  の引き起こす奥行き  $Z_c(i)$  の復元誤差  $\Delta Z_c(i)$  は

$$\Delta Z_c(i) \approx -Z_c(i)^2 \epsilon_i. \quad (31)$$

となる。一方、 $i$  番目の生成セグメントが奥行き  $Z_c(i)$  のところにあれば、画像面上でその生成セグメントの長さは  $\delta_i \approx fw/Z_c(i)$  となる ( $w$  は実際の道路幅)。画像面上で測った道路幅  $\delta_i$  は数画素の誤差を含んでいると考えられる。道路幅  $\delta_i$  の誤差が  $\Delta \delta_i$  であれば、奥行き  $Z_c(i)$  の復元に次の誤差  $\Delta Z_c(i)$  が生じる。

$$\Delta \delta_i \approx -fw \Delta Z_c(i) / Z_c(i)^2. \quad (32)$$

(31) 式と (32) 式から  $\Delta \delta_i \approx fw \epsilon_i$  となる。道路幅の誤差  $\Delta \delta_i$  は画像処理の結果生じるので、その大きさは道路像全体でほぼ同等であると考えられる。したがって、各  $i$  に対して  $\delta_i$  を平等に分配するのが適当である。

## 7. 実験結果

群馬大学付近で実際の道路をビデオテープに撮り、そ

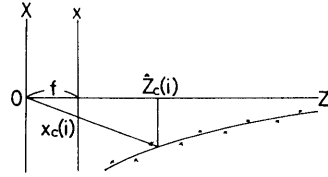


図 8 曲線の当てはめ

れをもとに復元した結果を示す。道路エッジは路面の両端に描かれた白線を追跡することにより検出し、それにスプライン補間を施す。本論文では道路エッジ検出部分と、スプライン補間部分は省略する<sup>9)</sup>。復元は次のようなステップにより進めた。

1. スプライン曲線を直線で延長して、道路の消失点  $P_\infty$  を推定する (図 7)。2 本の道路エッジに対して、その弧長  $0 \leq l \leq L, 0 \leq r \leq R$  をスプライン曲線のパラメータとする。出発点を 0 とし、それぞれ  $L, R$  を推定した消失点  $P_\infty$  までの長さとする。
2. 道路エッジ間の対応をニュートン法により求める。  $i$  番目の生成セグメントに対する反復の初期値  $l_i^{(0)}, r_i^{(0)}$  は次式によって定める。

$$\frac{L - l_i^{(0)}}{L - l_{i-1}} = \frac{R - r_i^{(0)}}{R - r_{i-1}}. \quad (33)$$

ただし、 $l_{i-1}$  と  $r_{i-1}$  は前のステップで得られた  $(i-1)$  番目の生成セグメントのパラメータである (最初のステップでは  $l_{-1} = 0, r_{-1} = 0$  とおく)。

- 3.

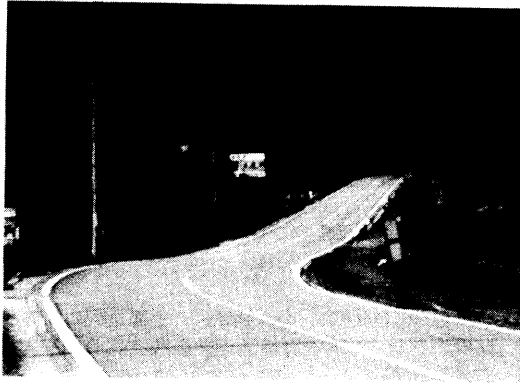
$$F(l_i^{(0)}, r_i^{(0)}) \frac{\partial F(l_i^{(0)}, r)}{\partial r} \Big|_{r=r_i^{(0)}} > 0. \quad (34)$$

であれば  $l_i = l_i^{(0)}$  に対し、対応する  $r_i$  をニュートン法により決定する。そうでなければ  $r_i = r_i^{(0)}$  に対し、対応する  $l_i$  をニュートン法により決定する。すなわち、新しい生成セグメントは前のステップでの生成セグメントと重ならないように、常に遠方に探索する。

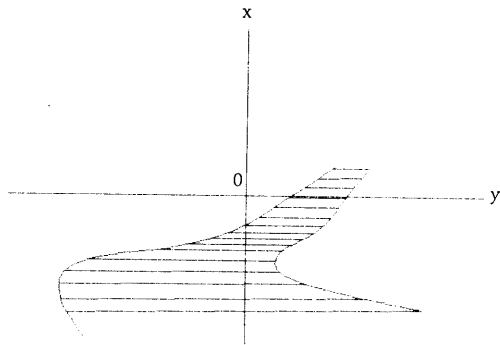
(一定回の反復で収束しなかったら、無視して次のステップに進む。)

4. (19) 式により動標構  $\{t, e, s\}$  を各生成セグメントごとに計算し、(21) 式を満たすものは取り除く。残った生成セグメントについて定理 1 を用いて 3 次元位置を計算し、その中点に関するデータ対  $(Z_c(i), x_c(i))$  を計算する。  $Z_c(i)$  は  $x_c(i)$  に関して単調増加でなければならないので  $\dots < Z_c(i^* - 1) < Z_c(i^*) > \dots > Z_c(j^*) < Z_c(j^* + 1) < \dots$  のようなことがおこれば、  $Z_c(j^*) - cw < Z_c(i) < Z_c(i^*) + cw$  の範囲にある生成セグメントは取り除くことにする ( $w$  は道路幅,  $c$  は 1 ~ 2 の適当な定数)。
5. 残った生成セグメントに対し、(24) 式の形のなめらかな曲線を最小 2 乗法により当てはめる。

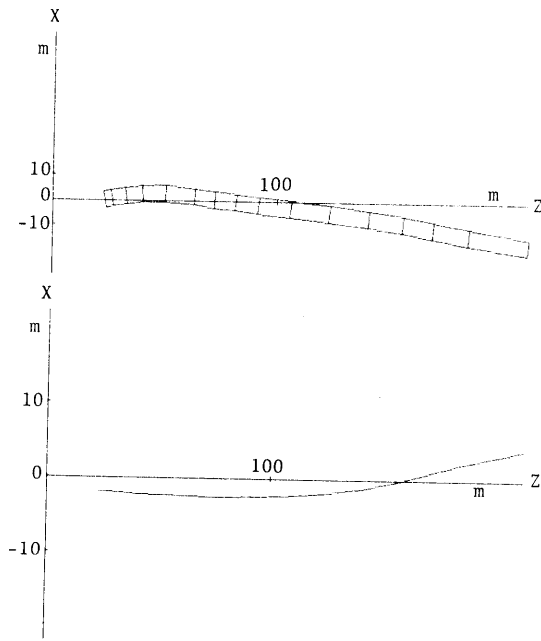
図 9 (a) に原画像、(b) に道路エッジのスプライン補



(a)

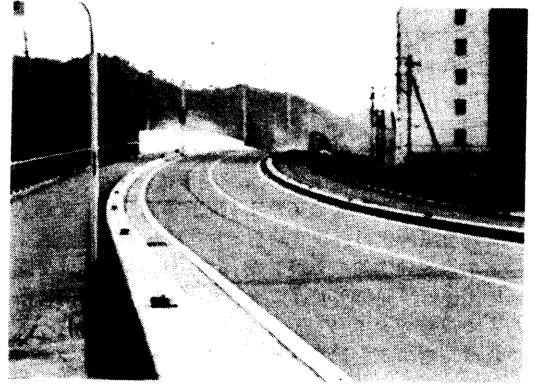


(b)

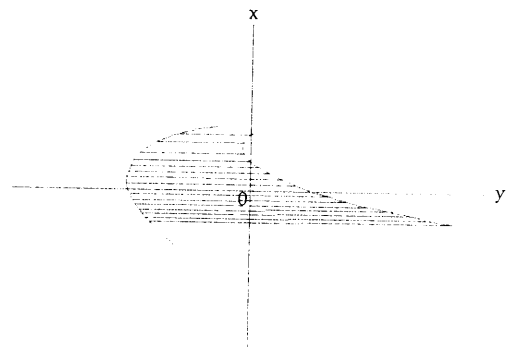


(c)

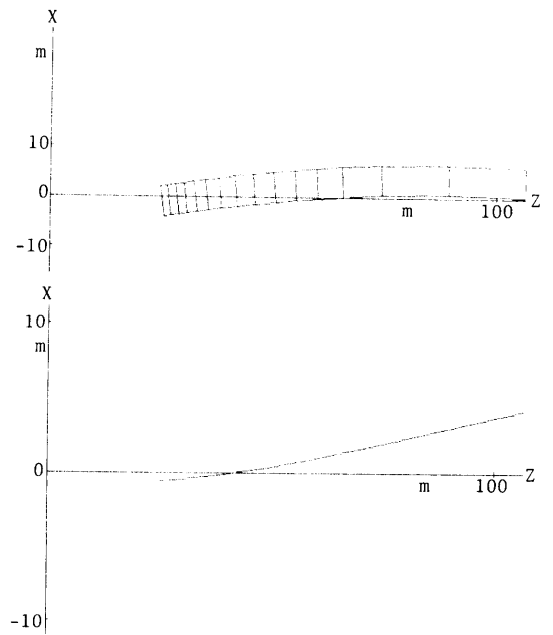
図9 道路形状の復元例1



(a)



(b)



(c)

図10 道路形状の復元例2

間および左右の対応づけにより得られた生成セグメント, (c)に復元結果(上段が上からみた図, 下段が下からみた図)を示す。図10にはもう一つの例を示す。

## 8. 結論

単一道路画像から3次元道路形状を復元するアルゴリズムを示した。本論文では「局所平面近似」を導入し, これを画像上の点や直線を示す「Nベクトル」<sup>13)</sup>を用いて射影幾何学的に表現した(定理3)。道路エッジ間の対応関係は, 局所平面近似を表す方程式を数値的に解くことで決定できる(定理4,5)。道路エッジ間の対応が求まれば, その3次元形状は容易に求めることができる(定理1)。

このとき, 画像データの誤差の影響が問題となる。一般に道路形状の復元では, 画像データよりも道路に関する「知識」(「道路モデル」)を優先させる必要がある。本方法では, このために「道路面は滑らかである」という知識を用いて, 滑らかな曲線当てはめを行った。さらに, 道路の消失点  $P_\infty$  を推定することによって道路の漸近的方向を指定した。これは人間の知覚と類似しているともいえる。人間が車を運転する場合, 運転手は道路形状を非常に遠くまで理解することができるが, これは道路の遠方部分に関する情報を消失点の推定によって補っているからであろう。

本論文では, さらに誤差を考慮にいたれたさまざまな計算手法を定式化し, 実際の道路画像に対して復元を行った。結果はノイズに強く, 遠く離れた場所でもかなり正確に復元されている。小山ら<sup>8)</sup>による「連続的」手法もノイズに強く, 計算も効率的である。しかし誤差の蓄積により, 遠方での精度は良いとは言えない。本論文では, 道路の消失点を推定することで遠方での精度を向上させ, 各点ごとに独立に形状を復元することにより誤差の蓄積を避けた。

実際の自動走行では車のすぐ前方が重要であるが, 遠方までの道路形状を知ることもいろいろな場合で重要になる。例えば, 十分遠方までの道路形状を「仮説」とし, 走行しながらそれを「検証」, 「修正」していくことは, 各時刻ごとに車の直前を計測しながら進行するより効率的であると考えられる。そのような場合に本方法は有力であろう。

## 参考文献

1. L.S.Davis, T.R.Kushner, J.LeMoigne and A.M.Waxman: "Road boundary detection for autonomous vehicle navigation," *Optical Engineering*, Vol. 25, pp. 409-414, 1986.
2. D.DeMenthon: "A zero-bank algorithm for inverse perspective of a road from a single image," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automation*, March-April 1987, Raleigh, NC, pp. 1444-1449.
3. D.DeMenthon: *Reconstruction of a Road by Matching Edge Points in the Road Image*, Technical Report CAR-TR-368, Center for Automation Research, University of Maryland, June 1988.
4. 石川繁樹, 瀧波栄作, 小沢慎治: "白線認識を利用した無人搬送車における視覚誘導の一方式", 電子通信学会論文誌D, Vol. J69-D, No. 4, pp. 580-590, 1986-04.
5. 金出武雄: "米国における自律移動ロボット研究の動向", 日本ロボット学会誌, Vol. 5, No. 5, pp. 44-51, 1987-05.
6. 小林哲也, 全炳東, 小沢慎治: "平面近似による道路像の解析", 電子情報通信学会論文誌D-II, Vol. J72-D-II, No. 4, pp. 659-662, 1989-04.
7. 小林哲也, 小沢慎治: "道路像解析における対応点の決定法", 電子情報通信学会論文誌D-II, Vol. J72-D-II, No. 5, pp. 827-830, 1989-05.
8. 小山千鶴子, 渡辺一成, 金谷健一: "ALVのための道路の3次元形状復元", 情報処理学会研究報告, CV-88-55 (1988-07).
9. 小山千鶴子: "画像による道路形状認識", 群馬大学工学部情報工学科修士論文, 1989-03.
10. D.Kuan, G.Phipps and A.-C.Hsueh: "Autonomous robotic vehicle road following," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 10, No. 5, pp. 648-654, 1988.
11. J.LeMoigne: "Domain-dependent reasoning for visual navigation of roadways," *IEEE J. Robotics Automation*, Vol. 4, No. 4, pp. 419-427, 1988.
12. S.-P.Liou and R.C.Jain: "Road following using vanishing points," *Comput. Vision Graphics Image Process.*, Vol. 39, pp. 116-130, 1987.
13. 小野寺康浩, 金谷健一: "計算射影幾何学", 情報処理学会研究報告, CV-89-61 (1989-07).
14. S.Ozawa and A.Rosenfeld: "Synthesis of a road images as seen from a vehicle," *Pattern Recognition*, Vol. 19, 123-145, 1986.
15. C.Thorp, M.H.Hebert, T.Kanade and S.A.Shafer: "Vision and navigation of the Carnegie-Mellon Navlab," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 10, No. 3, pp. 362-373, 1988.
16. M.A.Turk, D.G.Morgenthaler, K.D.Greman and M.Marra: "VITS-A vision system for autonomous land vehicle navigation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 19, No. 3, pp. 342-361, 1988.
17. A.M.Waxman, J.LeMoigne, L.S.Davis, B.Srinivasan, T.Kushner, E.Liang and T.Siddalingaiah: "A visual navigation system for autonomous land vehicles," *IEEE J. Robotics Automation*, Vol. 3, No. 2, pp. 124-141, 1987.
18. 全炳東, 桜井勝巳, 小林哲也, 小沢慎治: "車両からみた道路像の解析", 電子情報通信学会論文誌D, Vol. J71-D, No. 9, pp. 1709-1711, 1988-07.