

〔原著論文〕

局所平面近似による道路形状復元

金谷 健一* 渡辺 一成**

Road Shape Reconstruction by Local Flatness Approximation

Kenichi KANATANI Kazunari WATANABE

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, a least-squares curve fitting technique is proposed. An example based on real image data is also shown.

Key Words : Autonomous Land Vehicle (ALV), Road Shape Reconstruction, Visual Sensor, Image Understanding, Computer Vision

1. 序 論

近年、ALV（自動走行車）に関する研究が盛んに行われている。米国では DARPA が支援し、Maryland 大学、Carnegie-Mellon 大学などが提携した Strategic Computing プロジェクトが注目を集めている⁵⁾。その目的は、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上のガイドラインに従って走行することであるが⁴⁾、より一般的な環境で走行するためには、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^{1,10)}、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^{9,11,14~16)}。

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より、“単一の画像から”道路の3次元形状を復元する。

従来から提案されている方法として、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^{11,16)}。しかし、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。DeMenthon²⁾は Ozawa ら¹³⁾の道路モデルに基づいて2次元的情報から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¹⁷⁾は道路の基本形状をあらかじめ数種類用意し、パラメトリックなあてはめを試みている。金谷ら^{6,8)}は DeMenthon²⁾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、それを数値積分して3次元道路形状を復元するものである。しかし、離散的手法も連続的手法も、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 ら³⁾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は避けられるが、復元した道路は滑らかであるとは限らず、部分的に矛盾することもある。DeMenthon ら³⁾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 ら³⁾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」¹²⁾によって定式化する。局所平面近似を用いると、画像上の左右の道路境界間の1対1の対応が容易に決定

原稿受付 1989年10月20日

*群馬大学工学部情報工学科

**NTT株式会社情報通信処理研究所

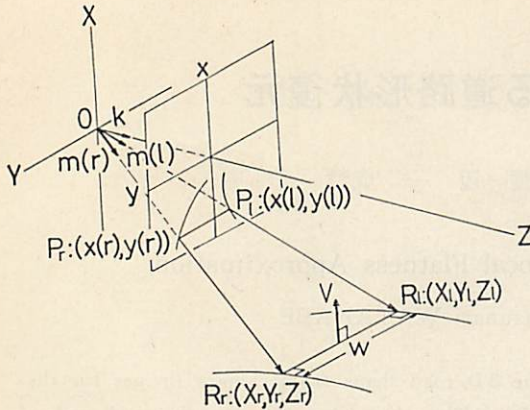


Fig. 1 Perspective projection and a road cross-segment

できる。その対応から道路の3次元形状を各点ごとに復元して、それに滑らかな曲線をあてはめる。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。レンズの中心を原点Oとし、カメラの光軸をZ軸とする(Fig. 1)。ただし、Y軸をほぼ水平にとり、レンズの中心と撮像面との距離をfとおく。本論文では、画像中の2本の道路境界にはすでにスプライン補間によりなめらかな曲線が当てはめられているとする。その道路境界をそれぞれ P_l, P_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である。

1枚の道路画像では、奥行き情報が失われているので何らかの補助的情報がなければ3次元形状が復元できない。本論文では理想的な道路を満たす、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(「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、その両端の軌跡により得られるものとする。そして、道路画像上で生成セグメントの両端の投影像となっている点を互の「対応点」と呼ぶ。

3. 対応点に基づく道路形状の3次元復元

P_l, P_r をそれぞれ左右の道路画像上の対応点とする。 $m(l), m(r)$ を視点Oから画像面上の点 P_l, P_r に向かう単位ベクトルとする(Fig. 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¹²⁾。道路の3次元形

状は、道路画像上での1対1対応が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] 道路画像上の対応点の3次元位置は次式により定まる。

$$R_l = \frac{w|(\mathbf{V}, \mathbf{m}(r))|}{D(\mathbf{V}, \mathbf{m}(l), \mathbf{m}(r))} \mathbf{m}(l),$$

$$R_r = \frac{w|(\mathbf{V}, \mathbf{m}(l))|}{D(\mathbf{V}, \mathbf{m}(l), \mathbf{m}(r))} \mathbf{m}(r). \quad (1)$$

ただし \mathbf{V} は鉛直方向の単位ベクトル、 w は道路幅であり、

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

である。

[証明] $R_l = c_l \mathbf{m}(l)$, $R_r = c_r \mathbf{m}(r)$ とおき、 $c_l (> 0)$, $c_r (> 0)$ を $\|R_l - R_r\| = w$, $(\mathbf{V}, R_l - R_r) = 0$ を満たすように決定すると(1)式を得る(Fig. 1)。(|| \cdot ||はベクトルのノルム)証明終。

4. 局所平面近似

P_l, P_r を道路画像上の対応点とし、 $m(l), m(r)$ をそれぞれのNベクトルとする。視点Oと画像面上の P_l, P_r における道路接線を通る平面を考え、 $n(l), n(r)$ をそれぞれの平面の単位法線ベクトルとする(Fig. 2)。これを道路接線の「Nベクトル」¹²⁾と呼ぶ。

ここで生成セグメントとその両端での道路接線が平面をなすという「局所平面近似」を導入する(Fig. 3)。この近似は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ら³⁾であり、小林ら⁷⁾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(| \cdot |はベクトルのスカラー三重積、 $N[\cdot]$ はベクトルの正規化)。

[定理2] 局所平面近似のもとでは、対応点 P_l, P_r は次のように関係づけられる。

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

[証明] 画像上の道路接線の交点 P_∞ のNベクトルは $N[n(l) \times n(r)]$ である(Fig. 4)。道路接線が空間中で平行であれば、 P_∞ はそれらの「消失点」であり、そのNベクトルは接線の3次元方向を表す。また地平線のNベクトルは、鉛直方向単位ベクトル \mathbf{V} である。 P_l, P_r が水平な生成セグメントの投影像であるとする、その消失点は地平線上になければならない。画像上の点 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(Fig. 4)、その消失点 Q_∞ のNベクトルは $N[\mathbf{V} \times N[m(l) \times m(r)]]$ であり、これは P_l, P_r に対応する生成セグメ

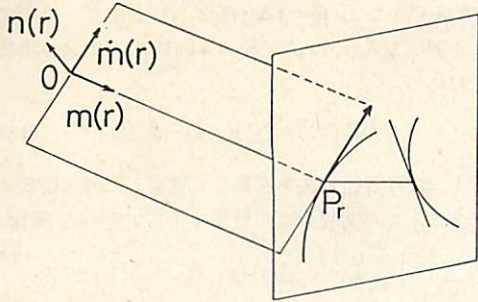


Fig. 2 The N-vectors of a point on the road boundary and the tangent line to it

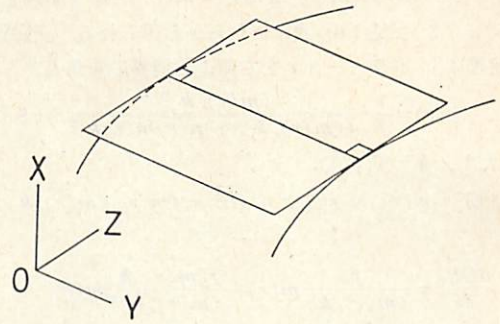


Fig. 3 Local flatness approximation

ントの3次元方向を表す. この生成セグメントと空間中の道路接線とは直交するので

$$(N[V \times N[m(l) \times m(r)]], N[n(l) \times n(r)]) = 0 \quad (4)$$

となる. これを変形すれば(3)式となる. 証明終.

[注意1] 上の証明には, 次の事実を用いた¹²⁾.

- ・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' とすると, これらの直線の交点のNベクトルは $n \times n'$ を正規化して得られる (Fig. 5(a)).
- ・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' とすると, これらの2点を通る直線のNベクトルは $m \times m'$ を正規化して得られる (Fig. 5(b)).
- ・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. したがって, (3)式の左辺を $F(l, r)$ とおいて, 与えられた l (または r) から $F(l, r) = 0$ となるように r (または l) を数値計算で定めることによって, 道

路画像上の対応が求まる.

計算を簡単にするため, 次の近似を導入する. 道路境界が直線ならば $\dot{n}(r) = 0$ であるが, 道路がカーブしていても, あまり強い曲がりでない限り $\dot{n}(r) \approx 0$ とみなせる. この近似のもとに次の結果を得る.

[定理3]

$$\frac{\partial F}{\partial r}(l, r) \approx \nu(r) [|Vn(r)m(r)| |m(l)n(r)m(r)| + (V, m(l)(m(r), n(l)))] \quad (5)$$

ただし

$$\nu(r) = \|\dot{m}(r)\|. \quad (6)$$

[証明] $\dot{n}(r) = 0$ であれば $\partial F(l, r)/\partial r$ は次のように書ける.

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

ベクトル $\dot{m}(r)$ は $n(r)$ と $m(r)$ の両方に直交する (Fig. 2). $m(r)$ と $n(r)$ は互いに直交する単位ベクトルなので, $n(r) \times m(r)$ 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 $\dot{m}(r) = \nu(r)n(r) \times m(r)$. したがって

$$(V, \dot{m}(r)) = \nu(r)(V, n(r) \times m(r)) = \nu(r) |Vn(r)m(r)|. \quad (7)$$

$$|\dot{m}(r)n(r)n(l)| = (\dot{m}(r) \times n(r), n(l)) = \nu(r)(m(r), n(l)). \quad (8)$$

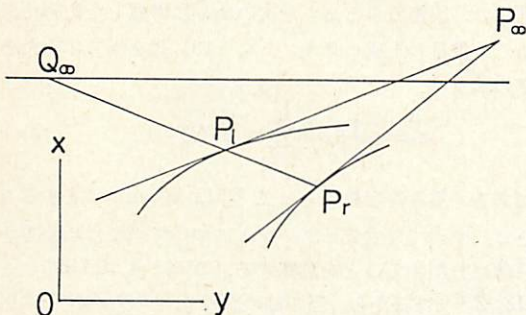


Fig. 4 Determination of the correspondence between the two road boundaries

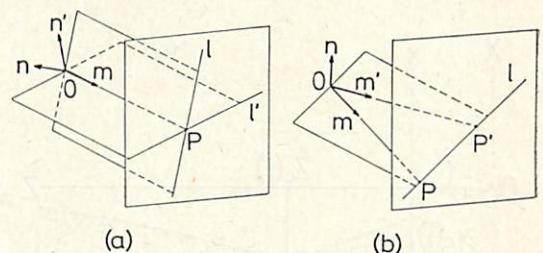


Fig. 5(a) The N-vector of the intersection of two lines, and (b) the N-vector of the line passing through two points

ただし、 $(n(r) \times m(r)) \times n(r) = m(r)$ という関係を用いた。(5)式と(6)式はこれらから得られる。証明終。
 [定理4] パラメータ r を右側道路境界の弧長とすれば

$$v(r) = \frac{1}{f} \frac{(m(r), k)^2}{\sqrt{(m(r), k)^2 + |n(r)m(r)k|^2}} \quad (9)$$

ただし、 $k = (0, 0, 1)$ 。

[証明] $m(r)$ の定義より $\vec{OP}_r = f m(r) / (m(r), k)$ だから

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{OP}_r}{dr} &= \frac{f}{(m(r), k)} m(r) - \frac{f(\dot{m}(r), k)}{(m(r), k)^2} m(r) \\ &= \frac{fv(r)}{m(r), k} n(r) \times m(r) - \frac{f|n(r)m(r)k|v(r)}{(m(r), k)^2} m(r). \end{aligned} \quad (10)$$

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

$$\left\| \frac{d\vec{OP}_r}{dr} \right\|^2 = \left[\frac{fv(r)}{(m(r), k)} \right]^2 + \left[\frac{f|n(r)m(r)k|v(r)}{(m(r), k)^2} \right]^2 \quad (11)$$

r が弧長なら $\|d\vec{OP}_r/dr\| = 1$ となり、(9)式を得る。証明終。

定理3、定理4を用いれば $m(l), m(r), n(l), n(r)$ から微分することなしに $\partial F(l, r) / \partial r$ が計算できる。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で求まる。

$$r \leftarrow r - \frac{F(l, r)}{\partial F(l, r) / \partial r} \quad (12)$$

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

道路画像上の対応関係により、各々の生成セグメントの3次元位置は他の生成セグメントとは無関係に定まる。しかし、復元された道路は滑らかであるとは限らない。そこで、生成セグメントの中点に滑らかな曲線を当てはめる。

復元した i 番目の生成セグメントの中点を $R_c(i) = (X_c(i), Y_c(i), Z_c(i))$ とする。この点の投影像の座標

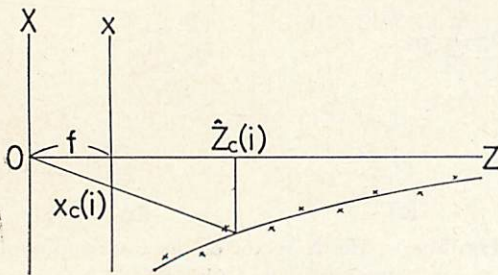


Fig. 6 Smooth curve fitting

(上方が正)は $x_c(i) = f X_c(i) / Z_c(i)$ 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。

$$1/Z_c(x_c) = \sum_{k=1}^N a_k (x_c - x_\infty)^k \quad (13)$$

ただし x_∞ は道路画像を延長して推定した消失点の x 座標である。この関数を次の最小2乗法で定める (Fig. 6)。

$$\sum_i W_i \left[\frac{1}{Z_c(i)} - \sum_{k=1}^N a_k (x_c(i) - x_\infty)^k \right]^2 \rightarrow \min. \quad (14)$$

W_i は i 番目のデータ対に対する重みであり、定数とする。係数 $a_k, k = 1, 2, \dots, N$ は上式を微分して得られる連立1次方程式を解いて定まる。

この当てはめの結果の i 番目の生成セグメントの中点の Z 座標 $\hat{Z}_c(i)$ は次のようになる。

$$\hat{Z}_c(i) = 1 / \sum_{k=1}^N a_k (x_c(i) - x_\infty)^k \quad (15)$$

したがって、 i 番目の生成セグメントの端点は $(\hat{Z}_c(i) / Z_c(i)) R_c(i) \pm (w/2) e_i$ となる (w は道路幅)。

[注意2] 当てはめの関数として最も普通なのは、 $\{(Z_c(i), X_c(i))\}, i = 0, 1, 2, \dots$ 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、画像座標 $x_c(i)$ から $(X_c(i), Y_c(i), Z_c(i))$ を決め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 の関数と見なせば、これが避けられる。

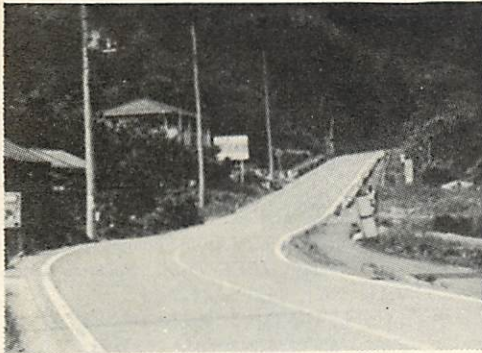
[注意3] 式(13)で Z_c ではなく逆数 $1/Z_c$ を用いたのは、道路勾配が一定なら(13)式の右辺が1次式となるためである。実際、道路面が $X_c = pZ_c - h$ (p は勾配、 h は道路から視点までの高さ)であれば、(13)式は $1/Z_c = -(x_c - x_\infty) / fh$ となる ($x_\infty = fp$ と置く)。

[注意4] 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_∞ とは異なる方向に漸近してしまう。

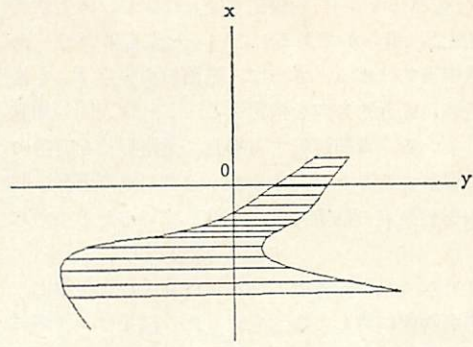
[注意5] (14)式の最小2乗法の重み W_i を定数にした理由は、誤差のふるまいを次のように考慮したためである。 i 番目の生成セグメントに(13)式を当てはめたときの誤差は

$$\epsilon_i = \frac{1}{Z_c(i)} - \sum_{k=1}^N a_k (x_c(i) - x_\infty)^k \quad (16)$$

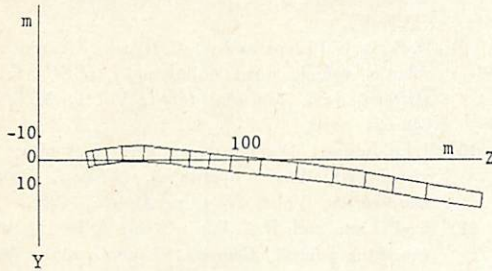
である。重みを定数にとって $\sum_{i=1}^N (\epsilon_i)^2 \rightarrow \min.$ とすることは、すべての生成セグメントについて当てはめ誤差を平等に分配することを意味する。このとき $\Delta(1/Z_c) \approx -\Delta Z_c / Z_c^2$ であるから、当てはめ誤差 $\epsilon_i \approx \Delta(1/Z_c(i))$ の引き起こす $Z_c(i)$ の復元誤差は $\Delta Z_c(i) \approx -Z_c(i)^2 \epsilon_i$ となる。一方、 i 番目の生成セグメントが画像面に平行と距



(a)



(b)



(c)

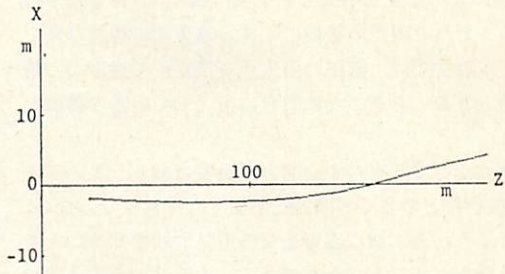


Fig. 7 An example of road shape reconstruction

離 $Z_c(i)$ のところにあれば、画像面上でその投影像の長さは $\delta_i \approx fw/Z_c(i)$ となる (w は実際の道路幅). 画像面上で測った道路幅 δ_i は数画素の誤差を含んでいると考えられる. 道路幅 δ_i の誤差が $\Delta\delta_i$ であれば, $Z_c(i)$ の復元の誤差 $\Delta Z_c(i)$ との関係が $\Delta\delta_i \approx -fw\Delta Z_c(i)/Z_c(i)^2$ となる. 以上より $\Delta\delta_i \approx fw\varepsilon_i$ 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はほぼ同等であると考えられる. したがって, 各 i に対して ε_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, それをもとに復元した結果を示す. 道路境界は路面の両端の白線の像を追跡して検出し, それにスプライン補間を施す. 本論文では道路境界検出部分と, スプライン補間部分は省略する. 復元は次のような手順により進めた.

1. スプライン曲線を直線で延長して, 道路の消失点 P_0 を推定する.
2. 道路画像上の対応を定理 2~4 に基いたニュートン法で求める. 新しい対応点対は前のステップでの対応点対と重ならないように, 常に上方に探索する. (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.)

3. 得られた対応点対から定理 1 により 3 次元位置を計算し, その中点の位置から $(Z_c(i), x_c(i))$ 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 $\dots < Z_c(i^*-1) < Z_c(i^*) > \dots > Z_c(j^*) < Z_c(j^*+1) < \dots$ のようなことがあれば, $Z_c(j^*) - cw < Z_c(i) < Z_c(i^*) + cw$ の範囲にある生成セグメントは取り除く (w は道路幅, c は 1~2 の適当な定数).
4. 残った生成セグメントに (13) 式の曲線を $N=5$ として最小 2 乗法で当てはめる.

Fig. 7(a) に原画像, Fig. 7(b) に道路エッジのスプライン補間および対応点対, Fig. 7(c) に復元結果 (右が上からみた図, 左が横からみた図) 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」¹²⁾ を用いて表現した (定理 2). 道路画像上の対応関係は, 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 3, 4). 対応が求まれば, 3 次元形状は容易に求まる (定理 1).

このとき, 画像データの誤差の影響が問題となる. 誤差の影響を除くには, 画像データよりも道路に関する

“知識”（「道路モデル」）を優先させればよい。本方法では、「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る。さらに、道路の消失点 P_0 を推定して道路の漸近的方向を指定する。これは人間の知覚と類似している。人間運転する場合、道路形状を非常に遠くまで理解することができるが、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る。

本論文では、誤差を考慮にいれた計算手法を提案し、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る。金谷ら^{6,9)}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、遠方での精度は良くない。本論文では、道路の消失点を推定して遠方での精度を向上させ、各点ごとに独立に復元して誤差の蓄積を避けた。

実際の走行では車のすぐ前方が重要であり、カメラの姿勢、振動などの多くの問題を解決しなければならない。しかし、それとは別に遠方までの道路形状を知ること、走行計画を立てる上で重要である。本論文の方法は“知識”に基いているため、道路幅が一定でないなど、状況が知識と異なれば復元結果は正しくない（一方、仮定したモデルと合致すれば復元の精度は画像による測量と同じである）。したがって、本方法は「計測手段」ではなく「仮説生成機構」とみなすべきものであり、車は走行しながらそれを「検証」、「修正」していくことになる。

本研究の一部は文部省科学研究費一般研究 C (No. 02805043) によった。

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 and L. S. Davis: "Reconstruction of a road by local image matches and global 3D optimization", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automation*, May 1990, Cincinnati, OH, pp. 1337-1341.
- 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. J 69-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) K. Kanatani and K. Watanabe: "Reconstruction of 3-D road geometry from images for autonomous land vehicles", *IEEE Trans. Robotics Automation*, Vol.6, No.1, 1990, pp. 127-132.
- 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. J 72-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) 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.
- 10) J. LeMoigne: "Domain-dependent reasoning for visual navigation of roadways", *IEEE J. Robotics Automation*, Vol.4, No.4, pp. 419-427, 1988.
- 11) S. -P. Liou and R. C. Jain: "Road following using vanishing points", *Comput. Vision Graphics Image Process.*, Vol.39, pp. 116-130, 1987.
- 12) 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).
- 13) S. Ozawa and A. Rosenfeld: "Synthesis of a road images as seen from a vehicle", *Pattern Recognition*, Vol.19, 123-145, 1986.
- 14) 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.
- 15) M. A. Turk, D. G. Morgenthaler, K. D. Gremban and M. Marra: "VITS—A vision system for autonomous land vehicle navigation", *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol.10, No.3, pp. 342-361, 1988.
- 16) 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.
- 17) 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. J 71-D, No.9, pp. 1709-1711, 1988-07.