

## Bézier 補間法を用いた空間曲線のステレオマッチング

亀井宏行 木下祿章 井上裕一 井宮淳

千葉大学 工学部 情報工学科

一般に、2眼ステレオ法では、左右画像面上での対応点の決定が重要な問題となる。本報告では、特徴となる点が存在しない3次元空間中の滑らかな曲線のステレオ計測法を提案する。まず、画像上の曲線の画素点列をBézier補間し、曲線を1つのパラメータのみで表すことにより、2次元での対応点探索問題を1次元の問題に置き換え、探索問題を単純化する。次に、このBézier補間曲線上に複数の標本点を取り、それぞれを対応点と仮決定し、空間曲線を復元する。この復元曲線を画像上に投影した像と元々の像との間に生じた誤差(画像面誤差)を評価し、この画像面誤差が減少してゆく方向に対応する標本点の移動を繰り返すことによりマッチングを完成させていく。シミュレーションにより、本手法の有効性を示す。

A method of Binocular Stereo for curved lines  
by use of Bézier Interpolation

Hiroyuki Kamei Yoshiaki Kinoshita Yuichi Inoue Atsushi Imiya

Department of Information and Computer Science,  
Faculty of Engineering, Chiba University

1-33, Yayoi-cyo, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263 Japan

The binocular stereo is very useful to determine the shape and the position of a 3-D object; it, however, becomes to be very difficult to search corresponding points between two views for curved surfaces or curved lines. In this report, a new method of binocular stereo for smoothly curved lines is proposed. A continuous curve is generated by the Bézier Interpolation on each discrete image of a curved line, the interpolated curve is represented with only one parameter  $t$  ( $0 \leq t \leq 1$ ). By relaxation matching between the parameter  $t$ 's, the correspondence between the interpolated curves is accomplished. Computer simulation has shown the effectiveness of this method.

# 1 まえがき

2方向から撮影した画像を用いて対象物体までの距離を測定する2眼ステレオ法は、非接触による物体の3次元形状を知る方法であり、スリット光やレーザ光などの特殊光源を必要とせず、汎用的な手法として利用されている。

2眼ステレオ法では左右1対の画像上での対応点を決定せねばならないが、特に、対象が曲線や曲面で構成されている物体では特徴となる点(特徴点)が存在しないので、対応点探索が非常に困難である。

本報告では、3次元空間曲線に対象を絞り、その2眼ステレオ法による新しい計測法を提案する。曲線の計測が可能となれば、滑らかな曲面上に描かれた模様などを手掛かりに、曲面の理解も可能となる。

空間曲線をステレオ計測しようとした場合、一方の画像上の曲線上の1点に対応する他方の曲線上の点を決定するには、一方の撮像系での視線を他方の撮像系で撮影した像(エピポーラ線)を計算し、それと曲線の像との交点を求めればよい。しかし、曲線の像とエピポーラ線が平行に近くなる場合は、誤差も大きくなり、標準化された画像上ではほとんど不可能となる[1]。

そこで本研究では、画像上の画素列をBézier補間法により補間して、曲線を唯一のパラメータ  $t(0 \leq t \leq 1)$  のみで表現し、この補間曲線上の標本点間で対応点を探り出してステレオマッチングを行い、曲線全体のステレオ計測を一気に行うという手法を考案した。2次元平面問題での探索問題を、1次元数直線どうしの弛緩整合法へと帰着させたものである。

以下、本手法について詳述し、シミュレーションからその有効性を示す。

## 2 2眼ステレオ法

### 2.1 撮像系と座標系

撮像系は、中心投影を仮定し、物体の大きさは近軸光近似が成立する範囲のものとする。

図1に本研究で用いた座標系とカメラ配置を示す。まず、1台のカメラ(これを左カメラと呼ぶ)を、

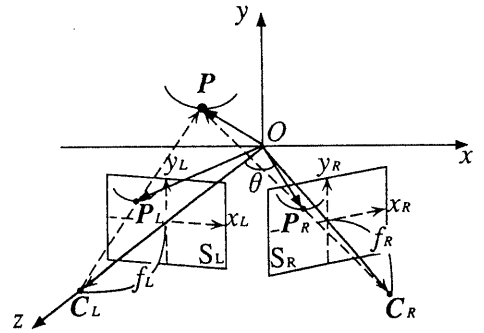


図1 撮像系と座標系

ワールド座標系  $(O-xyz)$  の  $z$  軸上に中心軸が一致するように置く。原点  $O$  からレンズ中心までの距離を  $C_L$ 、レンズ中心から画像面(フィルム面)  $S_L$  までの距離を  $f_L$  とする。画像面  $S_L$  上の座標系は、ワールド座標系の  $x$  軸に平行に  $x_L$  軸、それに直交する  $y_L$  軸をとる。

左カメラのレンズ中心の位置ベクトル  $C_L$  は、

$$C_L = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ C_L \end{pmatrix} \quad (1)$$

となる。左カメラの画像面上  $(x_L, y_L)$  にある点  $P_L$  のワールド座標系での位置ベクトル  $P_L$  は、図1から式(2)となる。

$$P_L = \begin{pmatrix} x_L \\ y_L \\ C_L - f_L \end{pmatrix} \quad (2)$$

もう1台のカメラ(これを右カメラと呼ぶ)は、 $z$  軸より  $\theta$  の角度をなす原点を通る直線上に中心軸が一致するように配置する。原点  $O$  から右カメラのレンズ中心までの距離を  $C_R$ 、レンズ中心から画像面までの距離を  $f_R$  とすると、右カメラのレンズ中心の位置ベクトル  $C_R$  は、式(3)で与えられる。

$$C_R = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ C_R \end{pmatrix} \quad (3)$$

同様にして右カメラの画像面上  $(x_R, y_R)$  にある点  $P_R$  のワールド座標系での位置ベクトル  $P_R$  は式(4)となる。

$$P_R = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_R \\ y_R \\ C_R - f_R \end{pmatrix} \quad (4)$$

## 2.2 ステレオマッチング

ワールド座標系の位置ベクトル $P$ にある点の左右カメラの像が $P_L, P_R$ であったとする。

点 $P$ は、まず左カメラの視線上に存在するので、ベクトル $C_L, P_L$ およびスカラー量 $\alpha$ を用いて式(5)のように表せる。

$$P = \alpha(P_L - C_L) + C_L \quad (5)$$

右カメラも同様に、スカラー量 $\beta$ を用いて式(6)が得られる。

$$P = \beta(P_R - C_R) + C_R \quad (6)$$

式(5),(6)より次式の方程式が得られる。

$$\alpha(P_L - C_L) + C_L = \beta(P_R - C_R) + C_R \quad (7)$$

式(7)には未知数 $\alpha, \beta$ が含まれているが、ベクトル方程式なので各成分つまり3つの方程式が得られる。その中の2式を用いて $\alpha, \beta$ は決定される。これが2眼ステレオ法の原理である。

点 $P$ の画像面上の像 $P_L, P_R$ の位置が正確に求められれば、式(7)の連立方程式は、3つの方程式のうち任意の2つの方程式の組み合わせから決定されるが、本研究では画像の標本化誤差や対応点の不一致等が存在するので、3つの方程式すべてを用いた最小2乗解を求めることとした。

## 3 対応点探索法

### 3.1 Bézier 補間法

与えられた点列 $P_i (i = 0, 1, 2, \dots, n)$ により定義される Bézier 補間曲線 $B(t)$ は、次式(8)で与えられる。

$$B(t) = \sum_{i=0}^n t^i \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} P_i \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (8)$$

ここで、

$$\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$$

点 $P_i$ のことを制御点と呼ぶ。式(8)からわかるように、Bézier 補間曲線は $t=0$ のとき $P_0$ を、 $t=1$ のとき $P_n$ を通る。図2に示すように、 $0 < t < 1$ では制御点を通ることなく、制御点付近を滑らかに通過する。

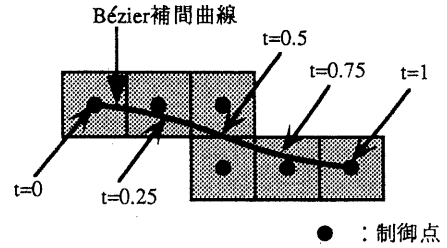


図2 Bézier 補間曲線

本研究では、空間曲線の画像上の像を構成する画素列を制御点として、画像を Bézier 補間する。ここで画素列には、標本化に伴う誤差等が含まれているので、必ず制御点を通過するという補間法よりは、Bézier 補間法のように制御点を通過しない補間法の方が有利と考えられる。

ステレオ法では、2枚の画像上の対応点を決定しなければならない。Bézier 補間曲線は、 $t (0 \leq t \leq 1)$ という1つのパラメータのみで曲線を記述することができるので、1枚の画像上の点の、他方の画像上の対応点を探索する場合、 $t$ という1次元の数直線上での探索となり、2次元平面内での探索を1次元問題として取り扱うことができる利点もある。

### 3.2 アルゴリズム

Bézier 補間曲線を用いた対応点の探索アルゴリズムを示す。但し、両端点については、あらかじめ対応はわかっているものとする。

step1) 左右の入力画像より Bézier 補間曲線を生成する。この時、制御点数が少ない方の画像を基準画像、他方を副画像とする。これは、短い方の曲線上の点は、すべて長い方の画像には撮影されていると考えてのことである。

以下、左画像を基準画像として話を進める。

step2) 左右の Bézier 補間曲線 (以下、曲線 $B_L, B_R$ とする) 上に、同じ数だけ標本点を用意する。初期値として標本点を等間隔に刻む。以降の処理では、基準画像の標本点はそのまま固定し、副画像の標本点を移動させるので、その準備として、

副画像の第 $k$ 番目の標本点のパラメータ:  $t_k$   
( $0 \leq t_k \leq 1, k = 0, 1, 2, \dots, M$ )

とし、標本点数を $M+1$  ( $M \geq 1$ )個とすれば、第 $k$  ( $k = 0, 1, \dots, M$ )番目の標本点は、

$$B_L\left(\frac{k}{M}\right), \quad B_R(t_k) \quad (\text{初期値として、} t_k = \frac{k}{M})$$

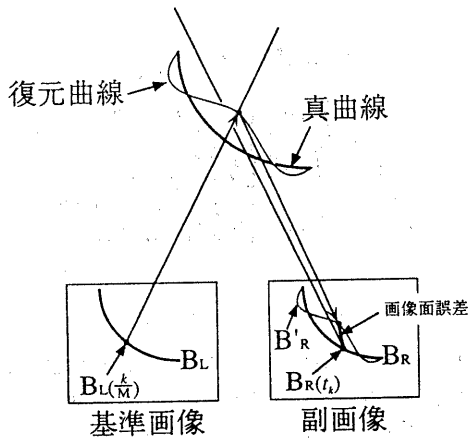


図3 画像面誤差

で表される。

step3) 曲線  $B_L, B_R$  において、第  $k$  番目の標本点どうしが対応していると考え (対応点の仮決定)、空間曲線の復元を行う。この際、式 (7) における解を用いて、式 (5) より復元点を求める。

step4) 復元曲線を画像面上に再投影した曲線を  $B'_L, B'_R$  とする。これらと曲線  $B_L, B_R$  を比較する。基準画像 (今の場合、左画像) においては、式 (5) より、曲線  $B_L$  と  $B'_L$  は一致する。また、副画像 (今の場合、右画像) において、曲線  $B_R$  上の第  $k$  番目の標本点  $B_R(t_k)$  を復元し、その点を投影した時の画像面上の点を  $B'_R(t_k)$  とすると、画像面上での復元誤差距離、

$$\epsilon_k^2 = |B_R(t_k) - B'_R(t_k)|^2 \quad (9)$$

がわかる。これを画像面誤差と定義する (図3参照)。さらに、すべての標本点において得られた画像面誤差の和を総画像面誤差  $\epsilon_s$  と定義する。

$$\epsilon_s = \sum_{k=0}^M \epsilon_k^2 \quad (10)$$

step5) すべての標本点についての画像面誤差の中で最大値を与える標本点が最も対応度の悪いものと見なし、この点を中心に標本点の移動を行う (標本点の移動法については3.3節で述べる)。標本点の移動方向としては、画像面誤差の最大値および総画像面誤差が減少する方向に行う。

以上 step3)~step5) を終了条件 (終了条件については3.4節で述べる) が満たされるまで繰り返す。以上の処理の流れ図を図4に示す。

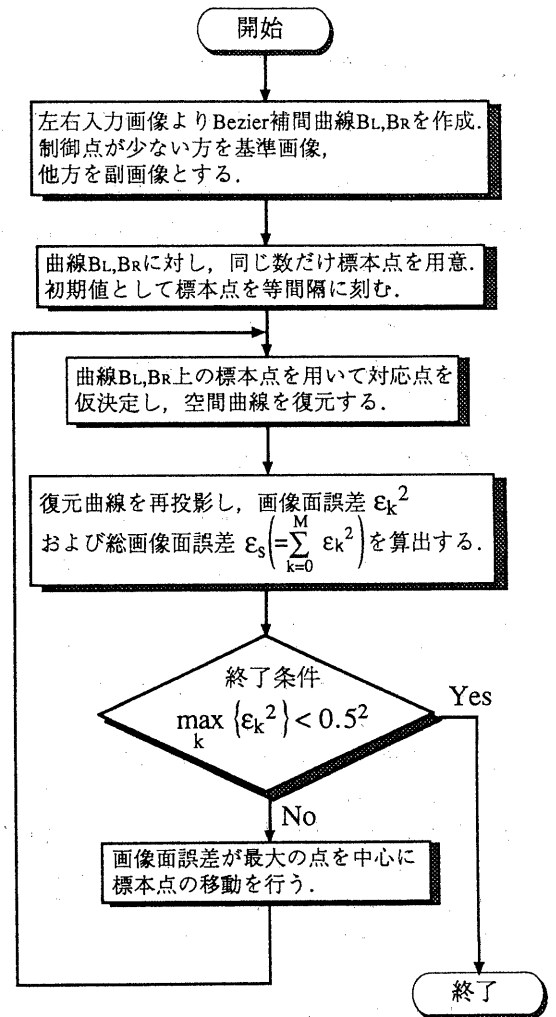


図4 処理の流れ図

### 3.3 標本点の移動

標本点の移動については、局所的に最大画像面誤差を与える標本点のみについての移動を行うことは好ましくない。

それは、1つの標本点を移動したとき、移動量によっては隣の標本点と追突する、あるいは追い越してしまうという事態が生じるからである。また、最大画像面誤差を与える標本点の付近は、誤対応点である可能性が高いので、周りの点も同時に移動させることとする。その際、周りの点の移動量は図5に示すように、「最大画像面誤差を与える標本点に近い程大きく、遠い程小さく」する。これらを式 (11) において実現する。

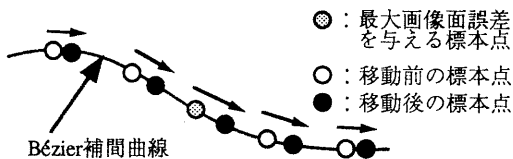


図5 標本点の移動

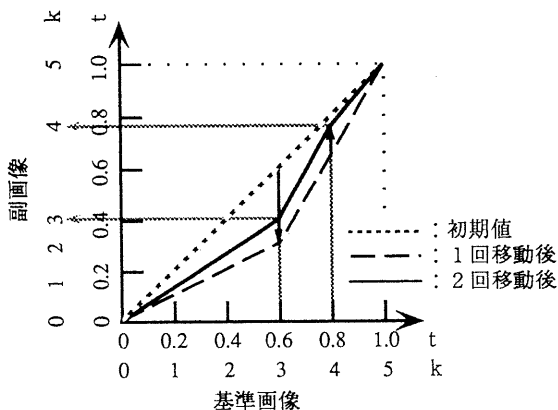


図6 対応点の決定

Bézier 補間曲線上の標本点数:  $M + 1$

副画像の第  $k$  番目の標本点のパラメータ:  $t_k$

$$(0 \leq t_k \leq 1, k = 0, 1, 2, \dots, M)$$

最大画像面誤差を与える標本点の  $k$  の値:  $err$

移動量:  $w$  ( $t = 0$  から  $t = 1$  に向かう方向を正)

として、

$$t_k := \begin{cases} t_k + \frac{t_k w}{t_{err}} & (0 \leq k \leq err) \\ t_k + \frac{(1 - t_k) w}{1 - t_{err}} & (err \leq k \leq M) \end{cases} \quad (11)$$

によりパラメータ  $t_k$  を変化させる。図6にこの一例を示す。

この処理を繰り返すことにより、基準画像の標本点に対して、副画像の標本点を隣り合う標本点との順番を入れ換えずに移動させることができる。

### 3.4 標本点移動の終了条件

仮に、Bézier 補間曲線が真の投影曲線(アナログ曲線)を表すことができているならば、必ず各標本点に対する画像面誤差は0に収束するはずであり、そこまで標本点の移動を繰り返さなければならない。し

かし、実際には Bézier 補間曲線と真の投影曲線との間には誤差が存在し、対応点は正確には求まらない。そこで終了条件は、最大画像面誤差が標本化誤差範囲内におさまったとき、すなわち、

$$\max_k \{e_k^2\} < 0.5^2 \quad (12)$$

とする(単位は画素の大きさを1とする)。

## 4 シミュレーション

### 4.1 条件設定および対象データ

図1において、

$$C_L = C_R = 1000$$

$$f_L = f_R = 400$$

$$\theta = 20^\circ$$

とした。長さの単位は、画面上の1画素の長さを1とした。2種類の対象データの外観を図7に示す。

対象1:  $xy$ 平面上の渦巻き図形

対象2: 半径90の円筒表面上の渦巻き図形

ともに、点Aをワールド座標系の原点に置き、対象2については点Aと円筒の中心軸を通る面が  $yz$  平面に一致するようにした。

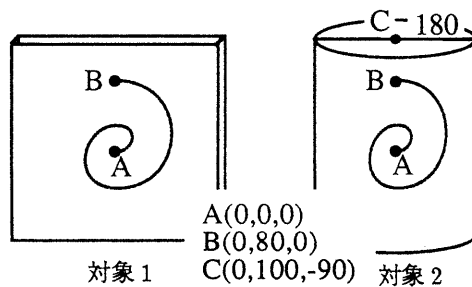


図7 対象データ

### 4.2 結果

#### 4.2.1 対象1の計測結果

図8が左右画像面で得られた画像である。左右画像面の画素数は左画像が169、右画像が165であるので、画素数が少ない右画像を基準画像とする。また、標本点数は画素数よりも多くとり、201個とした。

図9に対象1の真値および復元結果を示す。同図(a)は復元結果を3次的に表示したもの、また

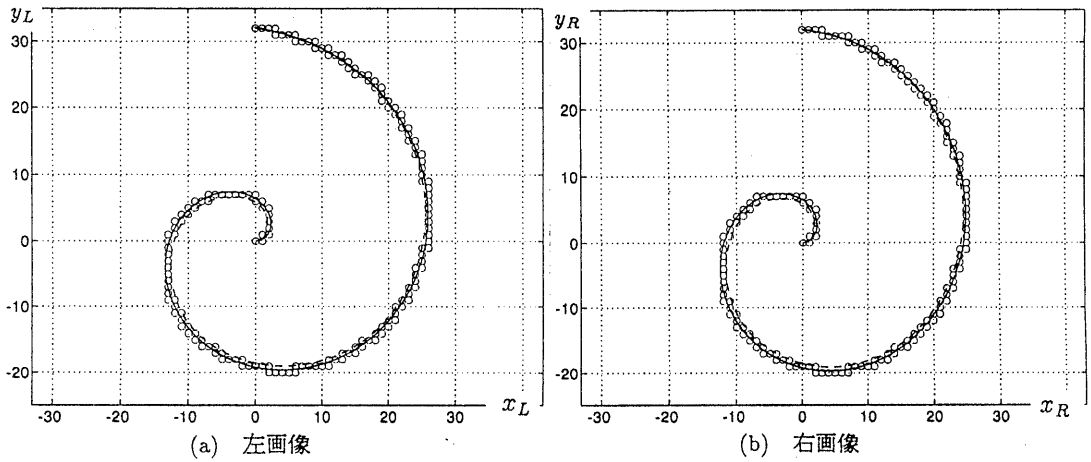


図8 左右画像面 (対象1)

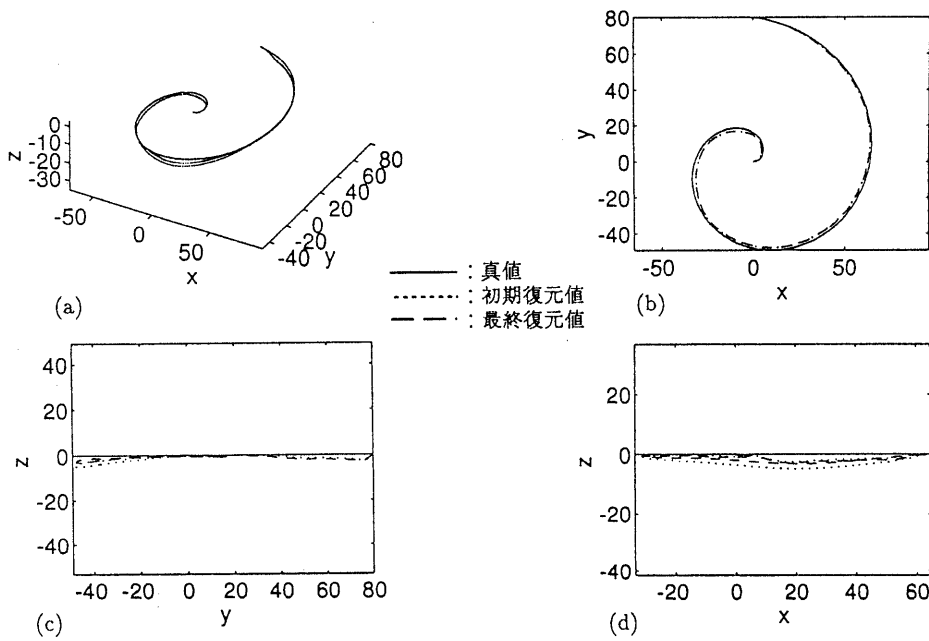


図9 真値および復元結果 (対象1)

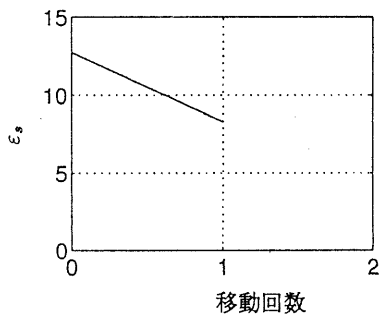


図10 総画像面誤差の変化 (対象1)

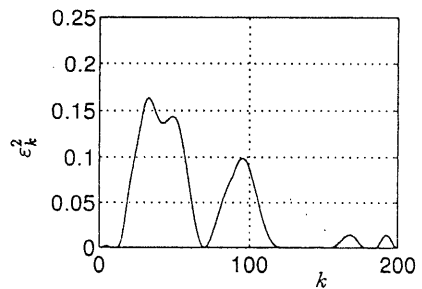


図11 終了時の画像面誤差 (対象1)

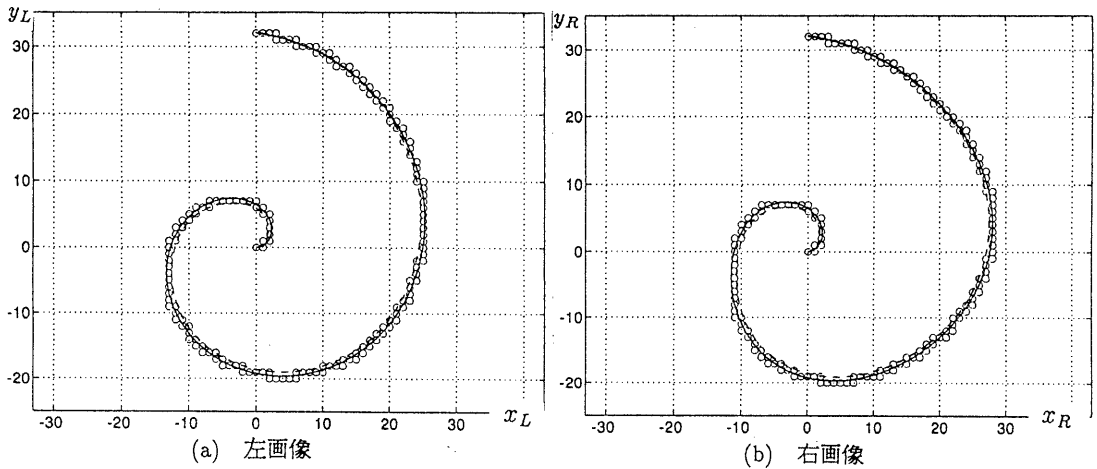


図12 左右画像面 (対象2)

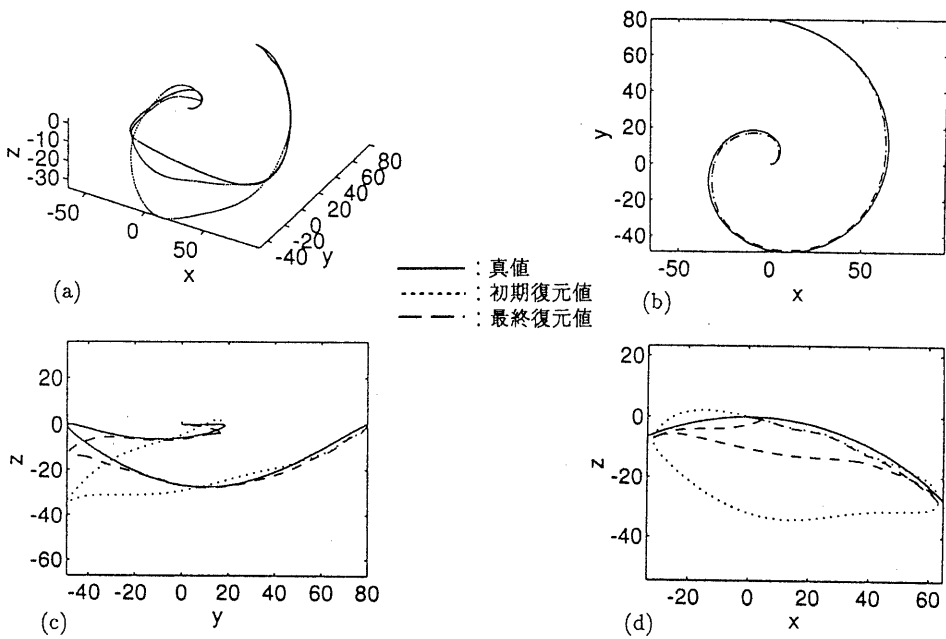


図13 真値および復元結果 (対象2)

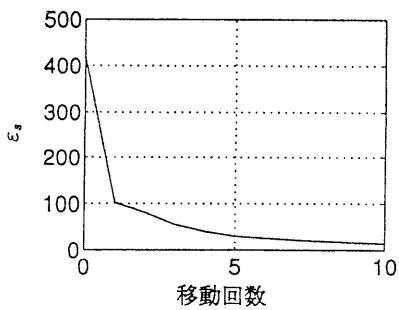


図14 絵画像面誤差の変化 (対象2)

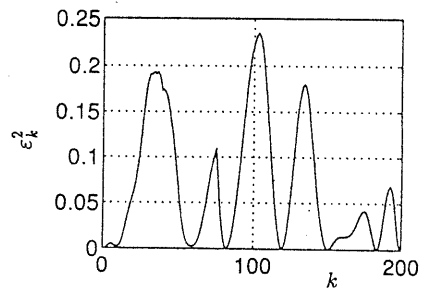


図15 終了時の画像面誤差 (対象2)

同図(b)~(d)は同図(a)をそれぞれ $xy$ 平面、 $yz$ 平面、 $xz$ 平面に平行投影したものである。

図10に標本点の移動回数と総画像面誤差 $\varepsilon_s$ との関係を示す。

図11に終了時の画像面誤差を示す。

#### 4.2.2 対象2の計測結果

図12から図15に、対象1と同様の結果を示した。

図12において画素数は左画像が166、右画像が167であるので、左画像を基準画像とした。また、標本点数は201とした。

#### 4.3 考察

図8と図12より渦巻き図形の補間曲線は原曲線(アナログ投影曲線)よりも内側に入る傾向のあることがわかる。画素列から生成されたBézier補間曲線と原曲線の間には、高々1画素程度の誤差が生じたが、画像の分解能を上げることができれば、さらに原曲線に近づくと考えられる。

図9と図10および図13と図14から、総画像面誤差が減少するように標本点の移動を繰り返すことにより、3次元空間中の復元曲線が真値に近づく様子がわかる。

次に、対象1と対象2の復元結果を比べる。 $xy$ 平面に投影したグラフ(図9(b), 図13(b))について見ると、各画像面で補間曲線が内側にずれてしまう傾向があるため、復元値についても同様に内側にずれる傾向が見られる。さらに、 $yz$ グラフ、 $xz$ グラフは、それぞれ奥行き方向の復元誤差を表している。対象1の結果に比べて対象2の奥行き方向の精度が、渦巻きの方付近でかなり悪くなっていることがわかる。この原因の1つとして、ステレオ計測による誤差の異方性が考えられる[2]。もともと、標本化画像を用いたステレオ計測は、奥行き方向の精度が良くない。これは標本化の影響により空間中の1点を2つのカメラで見た時の視線が交わらないため、復元点が正確に求められないことによる。

今回の手法では画素点を直接使った復元はしていないので、直接的には標本化誤差による影響は受けない。その代わりに補間曲線に含まれる原曲線との誤差があるため、やはり奥行き方向の精度に問題が残る。画素点列の補間精度が結果に直接的に返ってくる。

図11と図15から、画像面誤差はある程度連続した領域ごとに現われることがわかる。例えば図15を見ると、 $k = 35, 103, 134$ 付近に3つの大きな山がある。これらの部分では曲線 $B_L, B_R$ からは正しい復元値が得られていないと考えられる。これは、式(5)から求める復元点へのベクトルと式(6)から求める復元点へのベクトルが交わらず、その2つのベクトル間の距離が他の部分に比べて大きくなってしまったためである。この付近の標本点をうまく動かすことができれば、誤差の低減速度の向上につながる事が予想できる。

## 5 むすび

本報告では、2つの画像上の画素列をBézier補間し、この補間曲線上の標本点間で対応を探り出してステレオマッチングを行う方法を提案した。本手法により、渦巻き図形のような特徴点のない曲線においても対応点探索ができる。そして、画像面誤差を減少させる方向に標本点を移動させることで、3次元空間中で復元曲線が真値に近づくことが確認された。

今後の問題としては、補間曲線の精度向上、復元値がより速く真値に収束するための標本点移動法の改良などが上げられる。

謝辞: 本研究の一部は、大川情報通信基金の援助を受けた。

## 参考文献

- [1] 三上慎一郎, 亀井宏行, 井上洋一: “補間法を用いた空間曲線のステレオ計測” 1992年電子情報通信学会春期大会, FD - 416, p.7-158(1992.3.24)
- [2] S.D. Bolstem and T.S. Huang: “Error analysis in stereo determination of 3-D point positions”, IEEE Trans. PAMI- 9 - 6, pp.752-765(1987)