エピポーラ平面上に曲線を配置することによる ステレオ画像計測*

—エピポーラ幾何による基礎理論—

清水 毅** 小谷信司*** 渡邊寛望*** 丹沢 勉*** 古屋信幸**

Three Dimensional Measurement as Optimization of Parameters of a Curve on Epipolar Plane by Stereo Camera
- A Basic Theory Based on Epipolar Geometry -

Tsuyoshi SHIMIZU, Shinji KOTANI, Hiromi WATANABE, Tsutomu TANZAWA and Nobuyuki FURUYA

This paper describes a method to solve the binocular stereo correspondance problem on an epipolar plane. In porposed method, a parametric curve is on the epipolar plane which is calculated using world coordinates of lens centers and a image point. And a coordinate frame is set up on the epipoar plane(shn), and a transformation matrix between the world coordinate system and the coordinate frame (shn) is calculated. Coordinates of the parametric curve is transformed from the coordinate frame (shn) to the world coordinate system. The parametric curve is projected to two cameras, and these projected lines have correspondance area on the images. Pixel values in area around these correspondance line on each images are compared to calcurate errors. And an error-function is defined the errors. Parameters of the curve are optimized to let the error function be smaller. The laid parametric curve is a polynominal and the polytope method is used as optimizing method. Pixel values of epipolar line on each two images are fitted each other on the images. A board shape object and a column shape object are used as experimentation. And the shape of the parametric curve is shown as a result.

Key words: stereo camera, epipolar geometry, shape reconstruction, curve fitting, correspondance problem

1. は じ め に

人間の視覚機能を機械の視覚センサーとして実現したいという要求から、計算機への視覚機能の実装は古くから研究されてきた¹⁾。特に2台のカメラを用いたステレオカメラによる測定は、受動的手法であり様々な応用が可能であるため、多くの研究が行われてきた。現在では、移動体の視覚や写真測量システムなど実用化が進んでいる。

ステレオカメラによる物体形状の復元あるいは視差推定は、一般的には、画像間での対応点を決定することにより実現される。この対応点の決定には、画像間の局所的なパターンの類似度を計算し、対応づけを実行する方法が多く用いられている。現在では、画像処理ライブラリ²⁾にも実装されている。しかしながら、対応点を決定する際に、対応付けには原理的に曖昧さが存在し、誤った対応となることも多い。そのため、滑らかさの拘束やローカルサポートの利用、あるいは高次特徴を使うなどの工夫がされてきた。これらの手法については、文献3)に詳しい。

一方で、対応の興味を対象側へ置くことで対応を決定する方法として微分両眼視法がある。安藤^{4)~6)}は、基準平面を物体側に配置し、奥行きと輝度の微分恒等式を解くことにより基準平面からの奥行きを求めている。しかしながら、基準平面からの奥行きは、非常に狭い範囲に限定されるため、カメラの輻輳角を変化させ基準平面を移動させる必要があった。この問題に対し、五十嵐⁷⁾は、ソフト的に基準平面を移動させることでこの問題を解決している。さらに宮本^{8)~9)}は、基準平面を局所的に傾斜平面として扱うことで、さらに精度の良い測定を可能とした。

また、近年では、画像を領域分割後に局所領域毎の対応をとり、対応が良好でない領域を修正するといったハイブリッドな手法が提案されている^{10)~11)}。Haiらは、対象の局所領域が平面で近似できると仮定し、視差を一次式で近似することで求めた対応を修正している¹⁰⁾。さらに、串田らは、視差が設定した基準を超える場合に、この点を取り除くことで精度の向上を試みている¹¹⁾。しかしながら、いずれの手法も初期の段階で画像の対応点を決定する手法であるため、初期の段階で大きく誤った対応を得てしまうと性能を発揮できない可能性がある。

これらの手法に対して、筆者らは、オブジェクトベース的な対応点の決定法を提案している¹²⁾。その方法は、エピポーラ平面にパラメトリックな曲線を配置することで、曲線のパラメータの最適化により対応点を決定するという方法である。しかしながら、カメラモデルは、光学的に平行にアライメントされていることを仮定し、また、曲線が SUPERCONIC 関数という限定された条件に留まっていた。そこで、本稿ではエピポーラ幾何とあわせ、より一般化したモデルについて考察した。一般的には、対応点決定時にエピポーラ拘束を適用する場合、一方のカメラから伸びる光線上に存在する対応点を他方のカメラ画像から探索することで探索領域を限定する。これに対し、提案手法では、探索領域を広げる代わりに、エピポーラ平面上に配置される曲線により対応点の探索を拘束する。本手法では、曲線の表現可能な形状が対応の曖昧さを回避する拘束となり、対応点を大域的に決定できる特徴がある。また、あらかじめ対象が既知である場合には、曲線モデルを決定できるため、対話的手法などへの応用が可能である。

以下で、測定原理、平板および円柱形状の物体を用いた実験について述べる。

* 原稿受付 平成24年7月2日
** 正会員 山梨大学大学院(山梨県甲府市武田4-3-11)
*** 非会員 山梨大学大学院(山梨県甲府市武田4-3-11)

Fig. 1 Flow chart of the shape reconstruction on the epipolar plane

2. 測定原理

2.1 提案手法の概要

ここでは、まず、提案手法の概略について述べる。図1に提案手法の処理の流れを示す。まず、2台のカメラについてキャリブレーションを行い、両カメラ間の回転・並進ベクトルを求める。次に両カメラのレンズ中心座標を求め、2.2節で説明する手法により世界座標のエピポーラ平面を求める。さらに、2台のカメラのレンズ中心間の中心に shn 座標系を設定し、世界座標と shn 座標系との間の座標変換を求めておく。その後、エピポーラ平面上に配置された曲線の座標を計算し、2台のカメラに射影された対応領域から誤差関数を計算する。この手続きを誤差関数が収束するまで繰り返し、エピポーラ平面上に対象の形状を得る。

2.2 エピポーラ平面の世界座標での方程式

エピポーラ平面の世界座標における方程式は、2台のカメラのレンズ中心の世界座標と、注目している画像点の世界座標により計算される。

いま、2台のカメラにて世界座標系上の点 M を撮影しているものとする。この時の幾何学的な関係を図2に示す。 $O_w - X_w Y_w Z_w$ は世界座標系を示し、 $C_1 - X_{C1} Y_{C1} Z_{C1}$ 、 $C_2 - X_{C2} Y_{C2} Z_{C2}$ は、それぞれ、カメラ1およびカメラ2の座標系を表している。また、 C_1 、 C_2 は、カメラ1、カメラ2のレンズ中心とし、世界座標系上の点 M は、それぞれのカメラ射影行列 P_1 、 P_2 により画像面上の点 m_1 、 m_2 へ射影されているものとする。さらに、 e_1 、 e_2 は、エピポールを表し、エピポーラ平面上に配置される曲線は D とする。

いま、カメラキャリブレーションにより、カメラ1及びカメラ2の射影行列 P_1 、 P_2 が既知であるとする。このとき、射影行列はカメラ内部行列及び、カメラ外部変数（回転行列、並進ベクトル）を含み、それぞれ A_i 、 R_i 、 t_i ($i = 1, 2$) とする。

まず、カメラ1およびカメラ2のレンズ中心の世界座標を求め、それぞれ、 C_{1w} 、 C_{2w} とすると、

$$\begin{cases} C_{1w} = -R_1^T t_1 \\ C_{2w} = -R_2^T t_2 \end{cases} \quad (1)$$

となる。一方、カメラ1の正規化画像座標 $\tilde{x}_1$ は、画像座標系に

Fig. 2 Epipolar geometry

Fig. 3 A parametric curve on an epipolar plane

おける点 m_1 、内部行列 A_1 を用いて、

$$\tilde{x}_1 = A_1^{-1} \tilde{m}_1 \quad (2)$$

と表すことができる。ただし、 $\tilde{\cdot}$ は同次座標（斉次座標）を表す。正規化画像座標は、焦点距離が1の正規化カメラにより撮影された画像であり、 $\tilde{x}_1$ はカメラ1のカメラ座標系上で $Z_{c1} = 1$ と解釈できる。よって、点 m_1 の世界座標 m_{1w} は、

$$m_{1w} = R_1^T (\tilde{x}_1 - t_1) \quad (3)$$

と表すことができるので、エピポーラ平面の法線ベクトルを n_e とすると

$$n_e = \frac{(C_{2w} - C_{1w}) \times (m_{1w} - C_{1w})}{|(C_{2w} - C_{1w}) \times (m_{1w} - C_{1w})|} \quad (4)$$

と求めることができる。

以上より、エピポーラ平面は、法線が n_e で、点 C_{1w} あるいは点 C_{2w} を通る平面として計算できる。

2.3 エピポーラ平面上に配置された曲線の世界座標

エピポーラ平面上に配置された曲線の世界座標は、世界座標系とエピポーラ平面上に設定された座標系との座標変換により得ることができる。

いま、エピポーラ平面上に曲線 D を配置するため、新たに O_s を原点とした $O_s - shn$ 座標系を導入する。図3にエピポーラ平面におけるステレオカメラモデルを示す。エピポーラ平面には、曲線 D が配置され、曲線 D 上の任意の点 M_s はカメラ1及びカメラ2により画像面に m_{1s} 、 m_{2s} と射影されている。また、設定された $O_s - shn$ 座標系と世界座標系との回転行列を R_s 、並進ベクトルを t_s とする。

まず、 O_s を $\overline{C_1 C_2}$ の中心に配置する。次に、 s 軸を、 $\overline{C_1 C_2}$ と平行にとり、 n 軸をエピポーラ平面の法線 n_e と平行にとれば、

Fig. 4 The domain of a parametric curve on an epipolar plane

h 軸は s 軸と n 軸の双方に垂直になるように設定され、これにより、 O_s を原点とした s 軸、 h 軸、 n 軸がエピポーラ平面上に新たに設定できる。 $O_s - shn$ 座標系が設定された後は、世界座標との座標変換が可能となる。

次に点 M_s の世界座標系における座標 M_w を考える。 $O_s - shn$ 座標系と世界座標系との回転行列および並進ベクトルが R_s 、 t_s であるため、 M_s と M_w の座標変換を

$$M_s = R_s M_w + t_s \quad (5)$$

と表すことができる。よって、点 M_s の世界座標 M_w は、

$$M_w = R_s^{-1} (M_s - t_s) \quad (6)$$

と表すことができる。

いま、エピポーラ平面上に配置する曲線 D を

$$h = g(s) \quad (7)$$

とおくと、エピポーラ平面上の曲線 D 上の任意の点 M_s の $O_s - shn$ 座標系での座標は、

$$M_s = \begin{bmatrix} s \\ g(s) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

と表すことができる。よって式 (6) を用いれば、エピポーラ平面上の曲線 D の方程式の世界座標が計算できる。

2.4 対応する画像点の誤差

M_s の世界座標 M_w は、前節の手法により計算できるため、射影行列 P_1 、 P_2 が既知であるとき、カメラ 1、カメラ 2 には、それぞれ m_1 、 m_2 に射影される。すなわち、

$$\begin{cases} \lambda_1 \tilde{m}_1 = P_1 \tilde{M}_w \\ \lambda_2 \tilde{m}_2 = P_2 \tilde{M}_w \end{cases} \quad (9)$$

ここで、 λ_1 、 λ_2 は定数である。このとき、 m_1 、 m_2 はカメラ 1 とカメラ 2 における画像の対応点となるため、 m_1 、 m_2 の画素値を I_1 、 I_2 で表せば、対応点の誤差は、

$$e = \frac{I_1(m_1) - I_2(m_2)}{255} \quad (10)$$

となる。

2.5 評価関数

式 (8) において曲線方程式を決めることで、式 (10) により対応点の誤差が決定されるが、非線形であるため解析的に求めることは困難である。そこで、エピポーラ平面上の曲線 D の定義域を決定後、 D を標本化し、標本点をカメラへ射影することで誤差を求める。また、分割された曲線は、カメラ 1、カメラ 2 において

Fig. 5 How to define error function

対応する領域の大きさが異なる。そこで、対応する領域の大きさが等しくなるように評価関数を求める。

まず、エピポーラ平面上の曲線 D の定義域について考える。図 4 にエピポーラ平面における可視領域を示す。エピポーラ平面上では、画像面とレンズの焦点距離から、斜線部分が可視部分となる。このとき、カメラ 1 およびカメラ 2 の画角を構成するエピポーラ平面上の直線を l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 とする。また、 $h = H$ と直線 l_i ($i = 1, 2, 3, 4$) との交点をそれぞれ CP_i ($i = 1, 2, 3, 4$) とする。 CP_i を求めた後に CP_i を s 座標についてソートし、小さい方から順に CP_i ($i = I, II, III, IV$) と割り当て、 CP_{II} 、 CP_{III} の s 座標を定義域とする。点 CP_{II} 及び CP_{III} の s 座標を s_{II} 、 s_{III} とすれば、定義域は、 $s_{II} \leq s \leq s_{III}$ である。

いま、定義域 $[s_{II}, s_{III}]$ を N 分割すれば、曲線 D も同様に N 分割される。このとき曲線 D 上の点を M_{si} ($i = 1, 2, \dots, N$) とすると $\overline{M_{si} M_{s(i+1)}}$ はひとつの辺を構成することになる。ただし、これらの辺はそれぞれ分割された点で接続されている。すなわち、辺 $\overline{M_{s(i-1)} M_{si}}$ と辺 $\overline{M_{si} M_{s(i+1)}}$ とは点 M_{si} で接続されることになる。その様子を図 5 に示す。辺 $\overline{M_{si} M_{s(i+1)}}$ は、式 (9) により左右画像にそれぞれ、線分 $\overline{m_{1i} m_{1(i+1)}}$ 、 $\overline{m_{2i} m_{2(i+1)}}$ として射影される。本研究では、射影された線分に幅 b を持たせ、局所領域ごとの誤差を求める。当然 $\overline{m_{1i} m_{1(i+1)}}$ 、 $\overline{m_{2i} m_{2(i+1)}}$ はその長さが異なる。そこで、まず、比較する線分の画素数が一致するように、短い方の線分を補間し、長い方の画素数にそろえる。その後、両線分の対応する点 m_{i1} 、 m_{i2} の周囲 $b \times b$ を式 (10) を用いて誤差 e_i を計算する。さらに、 e_i を線分に沿って求め、誤差関数を以下のように設定する。ただし、 N は分割した線分の個数であり、 A は比較する領域である。

$$E = \frac{1}{2} \sum_N \sum_A e_i^2 \quad (11)$$

上式は、左右対応領域の差の二乗和を表しているが、対象物体によっては、正確に対応していても、物体表面の反射率、空気の影響等で輝度分布が異なることもある。そのような場合には、特微量をもとにした誤差関数を設定する、あるいは相関係数を計算する等、評価関数の見直しが必要であるが、本研究では、提案手法の確認のしるしを、評価関数は、最も簡単な輝度値の差の二乗和とした。

3. 配置する曲線と曲線形状の最適化

配置する曲線は、基底関数の選び方により数多く考えられるが、本研究では、 K 次多項式を採用した。すなわち、

$$g(s) = a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_k s^k + a_K s^K \quad (12)$$

Fig. 6 Images and pixel values of the experimental object (calibration board)

として、式 (11) を最適化する場合、非線形の最適化となるため初期値の影響を強く受けてしまう。そこで、まず式 (12) において、 $K = 0$ とし、バイアスパラメータ a_0 のみを求める。すなわち、図 4 において、最も対象を近似できる H_0 を決定する。次に $a_0 = H_0$ とし、 $|a_k| \leq 1$ ($k = 1, 2, \dots$) となるよう乱数により初期化し、 a_k の初期値とする。評価関数の最適化は、収束は遅いが、関数の形に仮定のいらない滑降シンプレックス法 (ポリトープ法)¹⁴⁾ を用いた。

4. 実験

実験は、まず最も基本的な形状である直線形状を復元できるかどうか平板にて行い、その後、円柱形状の物体を用いて行った。

4.1 実験装置

実験には Mintron 社製 CCD カメラ (MTV-73X11HN, 40 万画素) を 2 台、レンズは CANON 製 PHF12 (焦点距離 12mm, F1.4) を用いた。また、画像処理ボードはインターフェイス社の PCI-5533 を使用した。画像サイズは 640×480 である。

4.2 対象断面が直線形状の場合

まず、2 台のカメラをキャリブレーションし、内部・外部パラメータを求めた。キャリブレーションは、Zhang¹³⁾ の手法により複数回行い、最尤法により 2 カメラ間の姿勢パラメータを決定した。

次に、キャリブレーションボードをカメラの前面ほぼ 1.5m に配置して撮影した後、実験を求めた。撮影した画像を図 6 に示す。図 6(a) および (b) は左右カメラで撮影したそれぞれの画像であり、エピポーラ線が黒線で示されている。A および B はボードの両端位置である。図 6(c) は、各画像のエピポーラ線上の画素値である。画素値は視差によりずれが発生している。

はじめに、配置する曲線を式 (12) において $K = 1$ とし、誤差関数の最適化を行った。曲線の分割数は $N = 200$ とした。また、誤差関数で用いる b は 15 とした。さらに、比較のために、動的計画法およびブロックマッチング法によりエピポーラ線上の対応点を計算した。ブロックマッチング法は OpenCV ライブラリを用い、窓サイズは 33×33 とした。

結果を図 7、図 8、図 9 に示す。それぞれの図において横軸は左画像のエピポーラ線上の画像座標、縦軸はエピポーラ線上の画素値であり、画素値が一致していることが分かる。また、ボードの両端 A および B は、ほぼ対応が取れている。この時、対応する点に関する画素値の相関を求めたところ、それぞれ、提案手法が 0.89、動的計画法が 0.99、ブロックマッチング法が 0.90 であった。このことから、提案手法では、動的計画法およびブロックマッチング法と同様の結果が得られていると言える。

さらに、曲線の分割数を $N = 100, 300$ と変えて実験を

Fig. 7 Pixel values after optimization on an epipolar line (proposed method)

Fig. 8 Pixel values after correspondence on an epipolar line using dynamic programming method

Fig. 9 Pixel values after correspondence on an epipolar line using block matching method

行った。このとき、提案手法における対応点の画素値の相関を求めたところ、それぞれ 0.74, 0.89 であった。このことから、 $N = 200$ と $N = 300$ での差はなかった。また、 $N = 100$ の場合は、曲線分割数が粗いと考えられる。このことは、曲線の分割数を多くすることにより、より良い対応が得られるが、分割数を多くしすぎても効果がないことを示唆している。

次に、エピポーラ平面上に得られた曲線形状を図 10 に示す。

横軸は s 、縦軸は h であり、 A, B は図 6 におけるボードの両端位置 A, B を示している。また、円で囲んだ部分の詳細図から、曲線 D がエビポーラ平面上で分割されている様子が分かる。動的計画法の場合、図 8 の様に対象とする点どうしの対応を全て取ることから、誤った対応となっている箇所が複数あることがわかる。また、ブロックマッチング法も同様に誤った対応となる箇所がある。さらにブロックマッチング法では、窓サイズや最小視差等のパラメータが適切でない場合、誤った対応が増加することは良く知られている。

これに対し、提案手法では曲線の表現力が拘束となり誤対応を取りにくいことがわかる。これは、提案手法の長所でもあり短所でもある。しかしながら、提案手法、動的計画法、ブロックマッチング法のいずれも同様の結果が得られていることから、提案手法においてもエビポーラ平面上の形状が求まっていると考えられる。

このときの評価関数の収束過程を図 11 に示す。横軸は収束繰り返し回数、縦軸は評価関数値である。誤差の振動は、滑降シンプレックス法がシンプレックス頂点を変化させることによるが、20 回程度で収束していることが分かる。

次に配置する曲線の次数を変えて実験を行った。その結果を図 12 に示す。式 (12) において、 $K = 1, 2, 3$ として実験を行ったが、2 次及び 3 次ではごく小さい値に収束した。このことから、曲線の方程式に 2 次、3 次を選んだ場合でも直線成分の係数が求まっていると考えられる。しかしながら、 $K = 4$ 以上のときには、 $K = 1, 2, 3$ の時とは異なり、大きく逸脱した形状となってしまう。これは、最適化アルゴリズムの性能にも関係しているが、局所解に陥ってしまっている、もしくは、過学習が影響していると考えられる。今後は、曲線パラメータの重み付け、定義域の分割方法、あるいは、曲線の次数を自動的に決定できるような手法を考える必要がある。

4.3 対象断面が円柱形状の場合

次に、断面形状が円（楕円）形状の物体について実験を行った。図 13 に対象物体を示す。対象には直径が $\phi 300\text{mm}$ のオイル缶を用いた。図 13(a) および (b) はそれぞれ左画像、右画像を示しており、エビポーラ線は黒線で表示されている。対象物体にはオクルージョンが生じ、対象の両端 A, B および A', B' は一致していないが、直線 AB と直線 $A'B'$ には共通領域が存在している。また、図 13(c) はエビポーラ線上の画素値分布を示している。図 13(a) および (b) における A, B, A', B' は図 13(c) では、それぞれ図のような位置になっている。

提案手法および動的計画法、ブロックマッチング法で対応点を求めたときの結果を図 14、図 15、図 16 に示す。それぞれ、横軸はエビポーラ線上の画像座標、縦軸はエビポーラ線上の画素値を示している。図 14 から提案手法では、全体的に対応が取れていることが分かる。また、画素値分布の共通する領域で対応が取れていることが分かる。動的計画法においては、図 15 から、与えられたデータ全ての対応が取れていることがわかる。さらに図 16 では画素値分布の変化の大きい両端部ではほぼ対応が取れていることがわかる。しかしながら、両端部以外では良好な対応とは言えない結果となった。3つの手法では、提案手法、動的計画法は、オクルージョンの生じている場合でも2つの画像にある共通領域の対応が取れる結果となった。

これらの結果からエビポーラ平面上に復元した断面形状を図 17 に示す。また、比較のために、動的計画法およびブロックマッチング法で得られた断面形状に最小二乗法によって曲線を当てはめた結果も同時に示している。提案手法の条件は、 $K = 2, N = 200$

Fig. 10 Curve shape on s - h coordinate systems

Fig. 11 Error value in optimization

Fig. 12 Experimental results of changing K

(c) Pixel values on an epipolar line of left and right images

Fig. 13 Pixel values on an epipolar line

である。また、動的計画法およびブロックマッチング法で得られた断面形状に曲線を当てはめた条件も同様に二次曲線とした。

動的計画法については、対応点探索の能力が高く、全ての点の対応をとってしまうために波打つような形状となっている。また、ブロックマッチング法については、物体形状と言うよりむしろ奥行き平面として求まっている。両手法に対して、提案手法では、曲線の表現力が拘束となり、断面形状の特徴が得られていることが分かる。

得られた結果に曲線を当てはめた場合においては、動的計画法の場合、波打つ形状が災いし、得られた曲線はほぼ直線となってしまった。しかしながら、AB間を抽出し曲線当てはめを行った場合には、断面形状を良く表す結果となった。また、ブロックマッチング法では、得られている結果が良くないために、その後の曲線当てはめにおいても断面形状の復元は行えなかった。提案手法の結果は、動的計画法においてAB間を抽出して曲線を当てはめた場合とブロックマッチング法の結果に当てはめを行った結果の中間の結果となった。

5. おわりに

本研究をまとめると、

- (1) エピポーラ平面上に配置された曲線の最適化による形状復元方法について、エピポーラ幾何を利用した理論を述べた。
- (2) 配置する曲線を多項式とし、チェックボードを対象とした実験をおこなった結果、2枚の画像間の画素値の一致が行えることを示した。その能力は、動的計画法、ブロックマッチング法と同様の能力をもつことを示した。
- (3) 円柱形状の対象を用いて実験した結果、曲線形状が拘束となり誤対応を少なくできることを示した。

今後の課題としては、曲線のもつ表現力を超える対象の場合についての形状復元方法である。

参考文献

- 1) e.g)W. E. L. Grimson: A Computer Implementation of a Theory of Human Stereo Vision, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, **292**, 1058(1981)217.
- 2) e.g)G. Bradski, A. Kaehler, 松田 晃一訳: 詳解 OpenCV — コンピュータビジョンライブラリを使った画像処理・認識, オーム社 (2009).
- 3) 松山 隆司, 久野 義徳, 井宮 淳: コンピュータビジョン-技術評論と将来展望, 新技術コミュニケーションズ (初版第2刷), (1999)125.
- 4) 安藤 繁: ステレオ画像の微分恒等式を用いた形状再現システム, 計測自動制御学会論文集, **23**, 4(1987)319.
- 5) 安藤 繁: 両眼強度差を検出する微分両眼立体視法とその光沢知覚への応用, 計測自動制御学会論文集, **23**, 6(1987)619.
- 6) 安藤 繁, 田部井 俊幸: 動的な3次元累積合成機構を有する微分両眼視法計測自動制御学会論文集, **24**, 6(1988)628.
- 7) 五十嵐 悟, 洪川 勝久, 金田 守昭: 微分両眼視法による3次元形状測定-測定範囲の拡大と測定精度の改善, 精密工学会誌, **58**, 7(1993)1167.
- 8) 宮本 敦, 近藤 司, 金子 俊一, 五十嵐 悟: 左右対応領域形状の推定を伴う投影微分両眼視法の提案, 精密工学会誌, **64**, 9(1998)1390.
- 9) 宮本 敦, 近藤 司, 金子 俊一, 五十嵐 悟: 投影型時空間微分両眼視法による3次元運動推定, 電子情報通信学会論文誌. D-II, **J84-D-II**, 10(2001)2234.
- 10) H. Tao and H. S. Sawhney: Global Matching Criterion and Color Segmentation Based Stereo, IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, (2000)246.
- 11) 串田 聡, 坂本 忠明, 浜本 隆之: 階層化領域分割と平面フィッティングを用いた視差推定, 信学技報, CS2011-73, IE2011-97(2011).
- 12) 清水 毅, 小尾 誠, 遠山 茂樹, 古屋 信幸: エピポーラ平面上に配置された SUPERCONIC による立体形状復元精密工学会誌論文集, **70**, 7(2004)936.
- 13) Z. Zhang: A flexible new technique for camera calibration, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence **22**, 11(2000)1330.

Fig. 14 Pixel values after optimization on an epipolar line (proposed method)

Fig. 15 Pixel values after correspondence on an epipolar line using dynamic programming method

Fig. 16 Pixel values after correspondence on an epipolar line using block matching method

Fig. 17 Experimental results of another object

- 14) 丹慶 勝市ら訳: Numerical Recipes in C (in Japanese), 技術評論社 (初版第10刷)2001(295).