

汎用デジタルカメラを用いた 2 視点からの 3 次元復元

酒井 修二^{†1} 高橋 徹^{†1} 伊藤 康一^{†1}
青木 孝文^{†1} 運天 弘樹^{†2}

本稿では、汎用デジタルカメラを用いた 2 視点からの 3 次元復元手法を提案する。物体の詳細な立体構造を求めるためには、ステレオ画像間の密な対応付けが重要である。従来の 2 眼ステレオに対する密な対応付け手法は、基線長の短いステレオ画像に適しており、基線長の長いステレオ画像の場合、ロバストな対応付けを行うことが困難であった。これに対して、本稿では、Scaled Window Phase-Only Correlation (SW-POC) に基づく対応付け手法を用いることで、ステレオ画像間の変形にロバストな対応付けを実現する。実験を通して、汎用デジタルカメラを用いた移動撮影による 2 視点の画像から高精度かつ高密度な 3 次元復元が行えることを示す。

3D Reconstruction from Two Views Using Consumer Digital Camera

SHUJI SAKAI,^{†1} TORU TAKAHASHI,^{†1} KOICHI ITO,^{†1}
TAKAFUMI AOKI^{†1} and HIROKI UNTEN^{†2}

This paper proposes a 3D reconstruction method from two views using a consumer digital camera. Dense correspondence matching between stereo images is important for reconstructing details of the object. For conventional correspondence matching techniques, which are appropriate to short-baseline stereo images, it is difficult to find accurate and dense correspondence from wide-baseline stereo images. Addressing this problem, we propose a 3D reconstruction method using a correspondence matching technique based on Scaled Window Phase-Only Correlation (SW-POC), which is robust against perspective distortion of stereo images. Through an experiment, we demonstrate that the proposed method can reconstruct high-accuracy and dense 3D shape from two images captured with a consumer digital camera.

1. あらまし

多視点画像からの 3 次元復元は、撮影された複数枚の画像から物体の表面形状を復元する技術である^{1)–5)}。一般に、多視点から撮影した画像を用いて物体の 3 次元形状を復元するためには、多数の画像が必要となる。復元に必要な視点 (画像の枚数) が多くなればなるほど、撮影に時間がかかるため、少ない枚数の画像で高精度に物体の 3 次元形状が復元可能な手法が求められている。そこで、本稿では、カメラの移動撮影により得られた少ない視点の画像から高精度かつ密に 3 次元復元を行うことを目的とする。復元に必要な視点数が減ることで、移動撮影によるステレオ画像取得の労力を軽減することが可能となる。しかしながら、視点数が少ない場合は、物体の広い範囲を計測するために、画像間の基線長を長くする必要がある。そのため、ステレオ画像間に生じる画像変形が大きくなるので、ステレオ画像間の変形にロバストかつ密な対応付けが必要となる。

一般に、基線長の変化に伴うステレオ画像間の変形にロバストな対応付け手法として、Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) に基づく手法がよく知られている⁶⁾。しかし、SIFT に基づく手法は、特徴ベースの対応付け手法であるため、対象物体によって対応点数が少なかったり、ある領域に偏っていたりする。SIFT で得られた対応点は、カメラパラメータを推定するには十分であるが、物体の詳細な立体構造を復元するには不十分である。一方で、従来の領域ベースの対応付け手法は、基線長が短いステレオ画像のように、画像間の変形が比較的小さい場合に、密な対応付けが可能である^{7)–9)}。しかし、基線長の長いステレオ画像のように、画像間の変形が大きくなると正確な対応付けが困難である。

これに対して、Scaled Window Phase-Only Correlation (SW-POC) に基づく対応付け手法を用いることで、基線長の変化にロバストな対応付けが可能である¹⁰⁾。SW-POC に基づく対応付け手法は、基線長の長いステレオ画像においてもロバストに高精度な対応付けを行うことが可能である。ただし、平行ステレオであることが前提であるため、平行化を行うためにカメラパラメータを推定する必要があり、移動撮影のようにカメラ間の移動が未知の場合は、画像間の対応付けが困難である。そこで、本稿では、SIFT に基づく Structure from Motion (SfM)^{11)–14)} とバンドルアジャストメントによるカメラパラメータ推定^{15),16)}

^{†1} 東北大学 大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

^{†2} 凸版印刷株式会社
Toppan Printing Co., Ltd.

を SW-POC に基づくステレオ画像間の密な対応付け手法と組み合わせることで、汎用デジタルカメラを用いた 2 視点からの 3 次元復元手法を提案する。提案手法を用いることで、汎用デジタルカメラの移動撮影による 2 回の撮影という簡便な撮影のみで、高精度かつ高密度な 3 次元復元を行うことが可能である。また、実験を通して、実際に汎用デジタルカメラを用いて密な点群が復元できることを示す。

2. SW-POC に基づく画像変形にロバストな高精度対応付け手法

ここでは、位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) と SW-POC に基づく対応付け手法について述べる。

2.1 位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC)

POC は、2 つの画像信号の位相成分に着目した画像マッチング手法である^{8),9)}。N 点の 2 つの 1 次元画像信号 $f(n)$ 及び $g(n)$ が与えられたとき、正規化相互パワースペクトル $R(k)$ を次式で定義する。

$$R(k) = \frac{F(k)\overline{G(k)}}{|F(k)G(k)|} = e^{j(\theta_F(k) - \theta_G(k))} \quad (1)$$

ここで、 $F(k)$ および $G(k)$ はそれぞれ $f(n)$ 及び $g(n)$ の 1 次元離散フーリエ変換 (Discrete Fourier Transform: DFT) を、 $\overline{G(k)}$ は $G(k)$ の複素共役を表す。また、 $k = -M, \dots, M$ は離散周波数 インデックスであり、 $N = 2M + 1$ である。 $f(n)$ と $g(n)$ の 1 次元 POC 関数 $r(n)$ は、正規化相互パワースペクトル $R(k)$ の 1 次元逆離散フーリエ変換 (Inverse Discrete Fourier Transform: IDFT) として以下の式で表される。

$$r(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=-M}^M R(k) W_N^{-kn} \quad (2)$$

ここで、 $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ は回転因子である。1 次元画像信号 $f(n)$ と $g(n)$ が互いに微量 δ だけ平行移動した関係にあると仮定すると、 $f(n)$ と $g(n)$ の POC 関数 $r(n)$ は次式で与えられる。

$$r(n) \simeq \frac{\alpha \sin(\pi(n + \delta))}{N \sin(\frac{\pi}{N}(n + \delta))} \simeq \alpha \frac{\sin(\pi(n + \delta))}{\pi(n + \delta)} \quad (3)$$

上式は、1 次元画像信号が δ だけ微小に平行移動した場合の POC 関数の一般形を表している。ここで、 $\alpha = 1$ である。 α は相関ピークの高さを表現するために導入されたパラメータである。画像に対して、無相関なノイズが加わると α の値が減少するため、実際には $\alpha \leq 1$

となる。このとき、POC 関数の相関ピークの高さ α は 2 つの信号の類似度の指標に、相関ピークの位置座標 δ は 2 つの信号の平行移動量に相当する。このパラメータ α と δ を推定することで、信号の類似度とサブピクセル精度の移動量を求めることができる。さらに、POC を用いた平行移動量推定手法を局所的な画像ブロックマッチングに適用し、画像ピラミッドを用いた粗密探索と組み合わせることにより、ステレオ画像間の対応付けをサブピクセル精度で行うことが可能である⁹⁾。

2.2 Scaled Window-POC (SW-POC) に基づく対応付け手法

SW-POC とは、計測する物体の形状に合わせて探索ウィンドウを拡大縮小させることで、ステレオ画像間の変形に対応した POC によるマッチング手法である。SW-POC では、平行ステレオを前提としているため、基準点と対応点の垂直座標が等しくなる。そのため、1 次元 POC による水平方向のマッチングにより対応付けを行うことが可能である。ここで、ある垂直座標上の基準点に注目すると、その対応点はすべて同じ垂直座標上に存在し、その垂直座標上の画像信号の変形は水平方向のみであると考えられる。そこで、ステレオ画像間の変形を局所的なスケール変化に近似して対応付けを行う。図 1 に示すように、探索ウィンドウを拡大縮小させることで、左右の探索ウィンドウ間に生じている画像変形を軽減させることができる¹⁷⁾。画像ピラミッドを用いた粗密探索と SW-POC を用いた局所画像ブロックマッチングを用いることで、基線長の長い画像間においても対応付けが可能となる。図 2 に、SW-POC を用いた画像ピラミッドによる対応付けの様子を示す。このとき、左カメラ画像中の探索ウィンドウの大きさを w_1 、右カメラ画像中の探索ウィンドウの大きさを w_2 とすると、 w_1 と w_2 は次式の関係で表される。

$$w_2 = s w_1 \quad (4)$$

ここで、 s は、2 つの探索ウィンドウ間の拡大縮小率である。

2.3 拡大縮小率の推定

SW-POC において、左右の探索ウィンドウの拡大縮小率 s は、物体の形状 (法線ベクトル \mathbf{n}) と物体までの距離に依存する。ある 3 次元座標上の点 $\mathbf{M} = (X, Y, Z)$ に注目したとき、その点における左右の探索ウィンドウの拡大縮小率 s は次式で表される¹⁷⁾。

$$s = \frac{\cos \psi_1 \cos \phi_2}{\cos \psi_2 \cos \phi_1} \quad (5)$$

ここで、 ψ_i は、カメラ i における光軸と視線のなす角を表し、カメラ i の内部パラメータと外部パラメータおよび 3 次元点 \mathbf{M} から求められる。また、 ϕ_i は、カメラ i における視線と法線ベクトル \mathbf{n} のエピポーラ平面への投影ベクトルのなす角を表し、2 つのカメラの

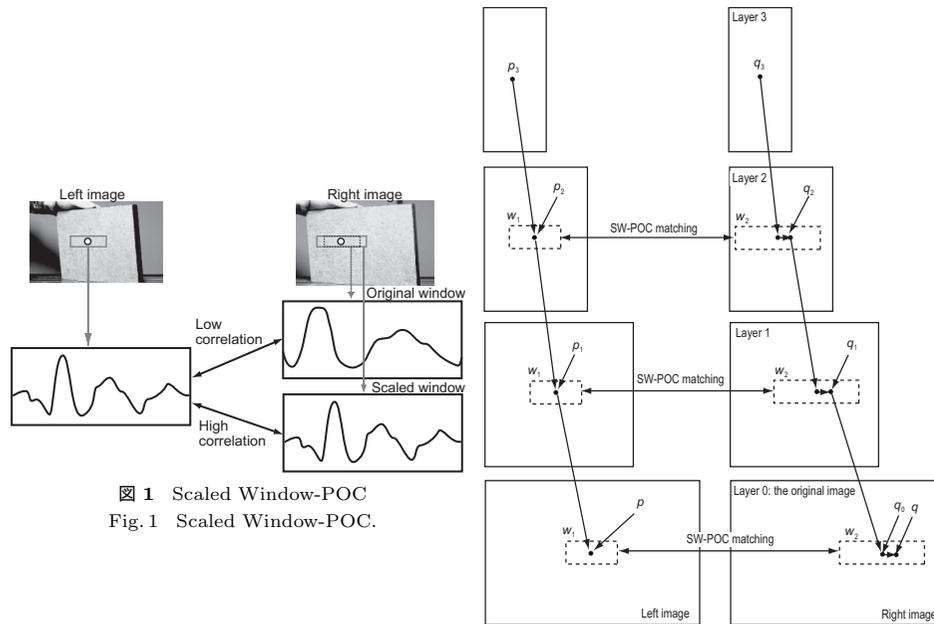


図 1 Scaled Window-POC
Fig.1 Scaled Window-POC.

図 2 SW-POC に基づく対応付け
Fig.2 Correspondence matching based on SW-POC.

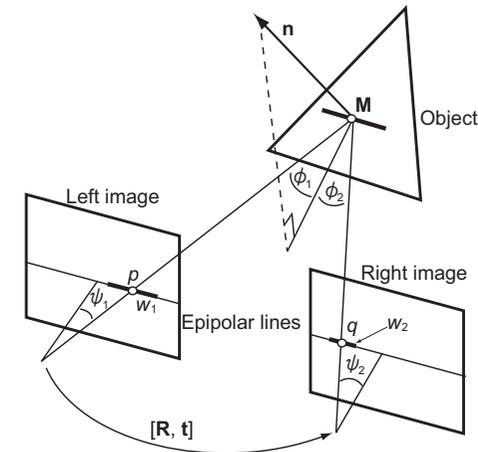


図 3 SW-POC における拡大縮小率
Fig.3 Scale factor for SW-POC.

外部パラメータと 3 次元点 M およびその点における法線ベクトル n から求められる。それぞれの変数の関係を図 3 に示す。一般に、ステレオカメラを用いて 3 次元計測を行う際に計測する物体の形状は未知であることが多い。そのため、式 (5) のように物体の形状から拡大縮小率 s を求めることはできない。そこで、以下に、拡大縮小率 s を推定するための 2 通りの手法を提案する。

2.3.1 POC 関数の相関ピークを用いた拡大縮小率推定

POC 関数の相関ピークの高さが 2 つの信号の類似度に相当することを利用し、拡大縮小率 s を推定する。 s を s_{min} から s_{max} の範囲で Δs ずつ変化させながら SW-POC を用いて探索を行い、このとき、最も相関ピークが高くなる時の対応点を真の対応点とする。これにより、物体の形状が未知の場合においても SW-POC を用いることが可能となる。一方で、この手法は、拡大縮小率の試行回数だけマッチングを繰り返す必要があるため、計算

コストが増加する問題がある。そこで、計算コストを削減するために、拡大縮小率の推定を対応点探索における画像ピラミッドの最上位層のみで行う。

2.3.2 物体の形状を用いた拡大縮小率推定

拡大縮小率 s が式 (5) で与えられる値に近いほど左右の画像信号間の変形は軽減され、対応付け精度は向上する。2.3.1 節の手法では、刻み幅 Δs を非常に小さくすることで、適切な s を用いて SW-POC によるマッチングを行うことができるが、探索を行う回数が増えるため計算コストが非常に大きくなってしまふ。そこで、2.3.1 節の方法と粗密探索を組み合わせることで、物体の形状から拡大縮小率を推定する手法を用いる。まず、疎な基準点群について 2.3.1 節の手法を用いて対応付けを行う。次に、求めた対応点を用いて 3 次元計測を行い、物体の粗い形状を求める。そして、密な基準点群について、それぞれの基準点における適切な拡大縮小率 s を式 (5) より計算し、求めた s を用いて対応付けを行う。この手法は、 Δs を小さくしても疎な点群の対応点探索回数が増えるだけで、密な点群の探索回数は変化しないので、計算コストを抑えつつ、適切な s を用いて SW-POC によるマッチングを行うことが可能である。

2.4 物体の形状を考慮した平均 POC の計算

SW-POC では、左右の画像から抽出した 2 つの 1 次元画像信号間に拡大縮小と平行移

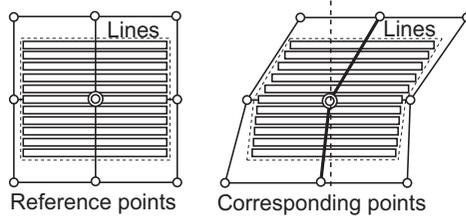


図4 物体の形状を考慮した探索ウィンドウ
Fig. 4 Search window fitted to the object surface.

動のみが含まれていると仮定している。平行化された画像において、ある垂直座標上の1ラインのみに注目すると、この仮定は、局所的により近似で成り立つ。しかし、実際に撮影した画像において、1組の1次元画像信号のみを用いると、ノイズなどの影響で高い信頼性でピークの位置を判定することが困難である。そのため、複数の1次元画像信号の組を対応点の近傍から抽出し、それらの相関計算の結果を統合することによって、信頼性の高いピーク位置の推定を行う。ただし、左右のウィンドウ間でスキューのような画像変形があると、画像変形を拡大縮小と平行移動のみで近似することができない。2.3.2節で述べた手法では、ある程度のスキューに対してもロバストに対応点を求めることができるが、スキューが大きくなることで対応付け誤差も増加することを実験的に確認している。これは、POC関数のピーク位置がラインごとに異なるため、異なったピーク位置を有するPOC関数の平均を移動量推定に用いることで、誤差が生じたためである。そこで、2.3.2節の手法を用いて対応点群を求めた後に、ラインごとのピーク位置のずれを軽減するように各ラインを平行移動させてPOC関数の平均を計算し、対応点群を計算し直すことで誤差を減少させる。この時、各ラインごとの平行移動量は、物体の形状から計算する。基準点が格子状に配置されている場合、対応点群は、物体の形状を反映する形で求まる。図4に示すように、現在注目している点の上下の対応点を直線で結び、その直線に合わせて各ラインを平行移動させることで、スキューのような画像変形に対してもロバストに高精度な対応付けを行うことが可能となる。一方で、注目点の周囲の情報を用いると、その周囲の点に誤対応があった場合、誤対応の影響により注目点の対応付け誤差が増加する。誤対応の影響を少なくするため、対応点群の更新の際に、更新後の対応点の方がPOC関数の相関ピークが高くなる場合のみ対応点を更新する。

3. 汎用デジタルカメラを用いた2視点からの3次元復元手法

ここでは、提案する汎用デジタルカメラを用いた2視点からの3次元復元手法について述べる。提案手法は(i)カメラパラメータの推定および(ii)SW-POCに基づく高精度かつ密な3次元復元の二つのステップからなる。SW-POCに基づく対応付け手法は、平行ステレオを前提としているため、通常、あらかじめカメラキャリブレーションで得られたカメラパラメータを用いてステレオ画像を平行化する必要がある¹⁸⁾。このため、各視点におけるカメラパラメータを求める必要があり、汎用デジタルカメラを用いた移動撮影のように、カメラパラメータが未知の場合は、SW-POCに基づく対応付け手法を用いることが困難である。そこで、提案手法では、まず、SIFT⁶⁾に基づく特徴ベースマッチングを用いてステレオ画像間の対応付けを行い、得られた対応点から各視点のカメラパラメータを推定する。次に、求めたカメラパラメータを用いてステレオ画像を平行化し、SW-POCに基づく対応付け手法を適用することで、高精度かつ密な3次元復元を実現する。以下では、各ステップについてそれぞれ述べる。

カメラパラメータの推定

本稿では、汎用デジタルカメラの移動撮影による簡便な3次元復元手法を目的としている。汎用デジタルカメラを用いる場合、ズームやオートフォーカス等の機能により、撮影時におけるカメラの内部パラメータが変化する可能性がある。また、移動撮影という性質上、視点位置は固定することができないため、撮影された画像からカメラの運動(外部パラメータ)を推定する必要がある。そこで、文献12)、13)と同様に、移動撮影により得られた画像と撮影時のExif(Exchangeable Image File Format)情報を用いてカメラパラメータを推定する。まず、Exif情報から、撮影時の焦点距離を取り出す。さらに、使用したカメラの撮像素子の大きさとカメラ画像の解像度から、カメラの内部パラメータAを近似的に求める。次に、移動撮影により得られた画像を利用し、カメラの運動を推定する。移動撮影により得られた画像は、図5(a)に示すように、視点変化に伴う幾何歪みを持つ。そこで、SIFT⁶⁾に基づく特徴ベースの画像対応付け手法を用いて、対応点を取得する(図5(b))。得られた対応点を用いてステレオ画像間の基礎行列Fを推定する。視点変化が大きい場合、SIFTに基づく特徴ベースの画像対応付けで誤対応が含まれることがある。本稿では、RANSAC(Random Sample Consensus)¹⁹⁾を用いてロバストに基礎行列Fを推定する。近似的に求めたカメラの内部パラメータAと基礎行列Fから、基本行列Eを算出し、Eを特異値分解することで、2視点間の回転行列Rと並進ベクトルtを得る¹⁴⁾。最

後に，上記手順で得られた内部パラメータ A および外部パラメータ R と t を初期値とし，バンドルアジャストメント^{15),16)}を用いて再投影誤差を最小化することにより，カメラパラメータを推定する．

SW-POC に基づく高精度かつ密な 3 次元復元

各視点のカメラパラメータを推定した後，平行化したステレオ画像間を SW-POC に基づく対応付けを用いて，高精度かつ密な 3 次元復元を行う．まず，図 5 (c) に示すように，推定したカメラパラメータを用いてステレオ画像の平行化¹⁸⁾を行う．次に，平行化後のステレオ画像の片方に基準点を配置し，SW-POC を用いてステレオ画像間の対応付けを行う．SW-POC に基づく対応付け手法により，図 5 (d) に示すように，サブピクセルレベルの高い精度の対応点を密に取得する．このとき，POC 関数のピークが類似度に相当することを利用し，各点における POC 関数がある閾値以下の点を誤対応点として除去する．推定したカメラパラメータを用いて取得した対応点の 3 次元座標を求めることで，2 視点から高精度かつ密に物体の形状を 3 次元復元する．

以上をまとめると，提案手法の処理手順は，以下となる．

[処理手順]

Step 1: 撮影画像に付随する Exif 情報から焦点距離を求める．得られた焦点距離と，使用したカメラの撮像素子および画像の解像度から，近似的にカメラの内部パラメータ A を算出する．

Step 2: 撮影された 2 枚のステレオ画像間を SIFT に基づく特徴ベースの画像対応付け手法を用いて対応点を取得する (図 5 (b)) ．

Step 3: RANSAC を用いて対応点群から基礎行列 F を推定する．推定した基礎行列 F と近似的に求めた内部パラメータ A から基本行列 E を求め，これを特異値分解することで，カメラの外部パラメータ (回転行列 R および並進ベクトル t) を算出する¹⁴⁾ ．

Step 4: Step 3 で求めた各視点のカメラパラメータを初期値としてバンドルアジャストメントを適用し，カメラパラメータの最適化を行う^{15),16)} ．

Step 5: Step 4 で求めたカメラパラメータを用いて 2 枚の画像のステレオ平行化を行い (図 5 (c))，SW-POC に基づく対応付け手法を用いてステレオ画像間を高精度かつ密に対応付ける (図 5 (d)) ．

Step 6: SW-POC により求めた対応点群とカメラパラメータから 3 次元復元を行う．

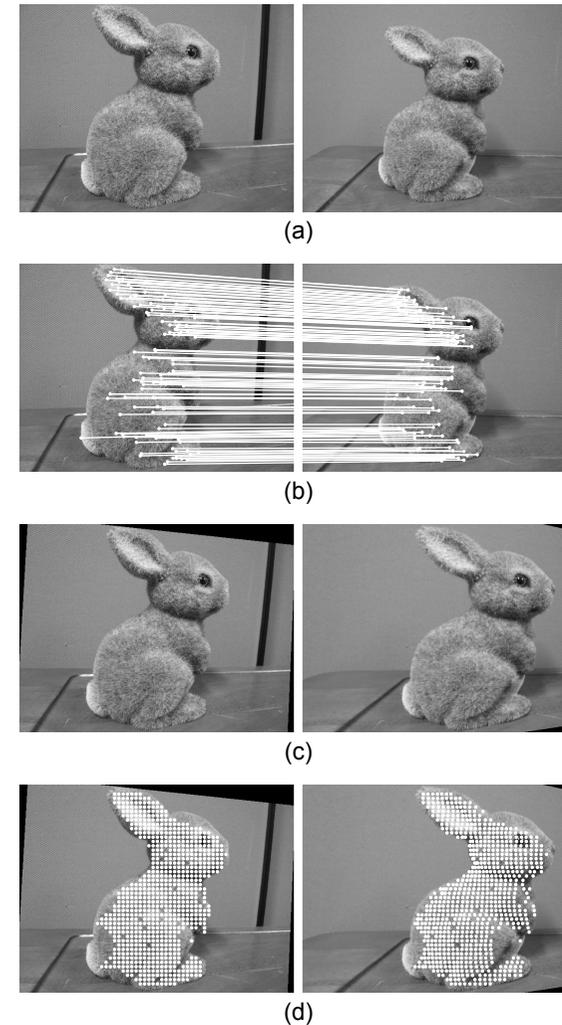


図 5 提案手法の概要:(a) ステレオ画像 (b) SIFT に基づく特徴ベースの対応付け結果 (c) 平行化後のステレオ画像 (d) SW-POC に基づく対応付け結果

Fig. 5 Overview of the proposed method: (a) stereo image, (b) result of SIFT-based feature point matching, (c) stereo image after rectification, and (d) corresponding points obtained by SW-POC based correspondence search.



図 6 実験で使用した汎用デジタルカメラの仕様

Fig. 6 Specifications of a consumer digital camera used in the experiment.



図 7 汎用デジタルカメラを用いた写真撮影

Fig. 7 Photo shoot with a consumer digital camera.

4. 実 験

ここでは、実際に汎用デジタルカメラを用いて物体の 3 次元形状を復元した実験について述べる．具体的には、汎用のデジタルカメラを用いて位置を変えながら 2 回撮影を行い、提案手法を用いて 3 次元復元を行う．使用したカメラとその仕様を図 6 に、撮影の様子を図 7 にそれぞれ示す．実験で使用したデジタルカメラで撮影される画像は、 $4,000 \times 3,000$ ピクセルであるが、 $2,000 \times 1,500$ ピクセルに縮小して使用した．また、SW-POC に基づく対応付けは、すべてのピクセルではなく、3 ピクセル間隔の格子状に配置された点について行った．実験に用いた SW-POC に基づく対応付け手法の各パラメータは以下である．左カメラ画像中の探索ウィンドウの大きさ w_1 は 32 ピクセルで固定とし、画像ピラミッドの階層数は 3 階層とする．POC 関数の相関ピークを用いた拡大縮小率推定は、50 ピクセル間隔の格子状に配置された点について、 $s_{min} = 0.5$ から $s_{max} = 2.0$ まで $\Delta s = 0.125$ 刻みで 12 回の試行を行う．その後、3 ピクセル間隔の格子状に配置された点について、物体の形状を用いた拡大縮小率推定を行う．また、3 次元復元では、誤対応除去のため、POC 関数のピーク値が閾値 0.6 を超える点のみ復元する．

汎用デジタルカメラで撮影された画像を図 8 (a), (b) に示す．図 8 (c) に SIFT に基

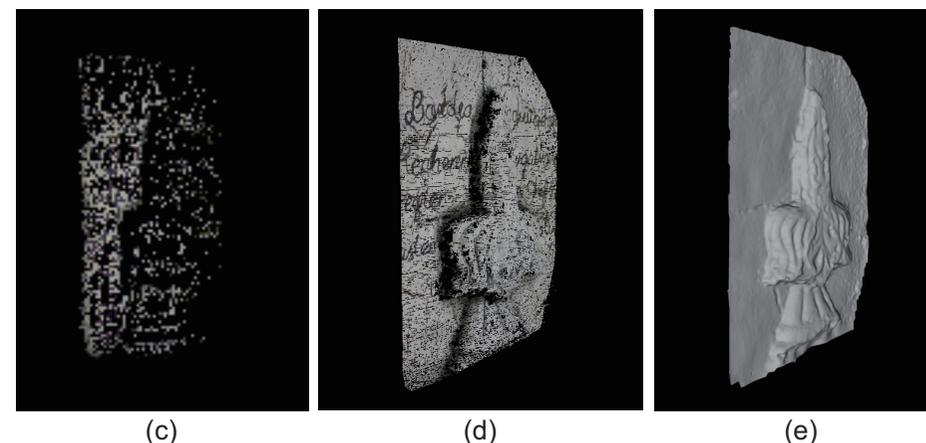
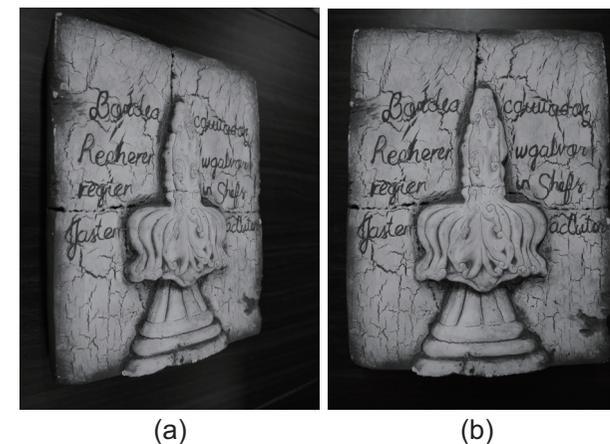


図 8 3 次元復元の結果: (a) 左画像 (b) 右画像 (c) SIFT による 3 次元復元点群 (d) SW-POC による 3 次元復元点群 (e) (d) のメッシュモデル

Fig. 8 Reconstruction results: (a) left image, (b) right image, (c) reconstructed 3D points using SIFT, (d) reconstructed 3D points using SW-POC, and (e) mesh model of (d).

表 1 実験に用いた計算機の仕様

Table 1 Specifications of a computer used in the experiment.

CPU	Intel(R) Core(TM)2 Extreme CPU X9650 3.00GHz
Memory	3GB
OS	Vine Linux 4.2
MATLAB version	7.2.0.294 (R2006a)

表 2 処理時間 [sec]

Table 2 Processing time [sec].

SIFT	151.02
Bundle Adjustment	0.48
Rectification of stereo pairs	16.55
SW-POC	828.51
3D reconstruction	395.87
Total time	1,392.43

づく対応付けにより得られた 3 次元復元点群を、図 8 (d) に SW-POC に基づく対応付けにより得られた 3 次元復元点群を示す。それぞれの 3 次元点群の点数は、SIFT に基づく手法から得られた点が 3,243 点、SW-POC に基づく手法から得られた点が 124,667 点であった。図 8 (c) と図 8 (d) を比較すると、SIFT に基づく対応付けにより得られた 3 次元復元点群は、点数が少なく、物体の立体構造を表すには不十分である。一方で、SW-POC に基づく対応付けにより得られた 3 次元復元点群は、点数も多く、物体の立体構造を目視で確認することができる。また、図 8 (a), (b) のように、基線長が長く、画像間の変形が大きいステレオ画像間においても、SW-POC に基づく対応付け手法は、高精度かつ密な対応付けを行えていることが確認できる。このように、提案手法を用いることで、基線長が自由度を持つ移動撮影の場合においても、画像変形にロバストな対応付けが可能であり、汎用デジタルカメラを用いた 2 回の撮影という非常に簡便な撮影方法でも密な 3 次元点群を復元することが可能である。さらに、各点について近傍の点群から法線ベクトルを計算し、Poisson Surface Reconstruction²⁰⁾ を用いてメッシュモデルを生成した結果を図 8 (e) に示す。図 8 (e) より、提案手法を用いて物体の詳細な立体形状が復元できていることが確認できる。

また、本実験において、3 次元復元までに要した処理時間についてまとめる。提案手法の実装には、MATLAB のコードを用い、一部 C 言語のコードから生成した MEX ファイルを使用した。本実験で用いた計算機の仕様を表 1 に、処理時間の内訳を表 2 に示す。表 2 より、処理時間の多くは SW-POC に基づく対応付けと 3 次元復元であることがわかる。これは、対象物体の詳細な立体構造を得るために、対応点数を非常に多くしたためである。将来的には、GPGPU (General-Purpose Computing on Graphics Processing Units) などを用いて処理の高速化を行う予定である。

5. ま と め

本稿では汎用デジタルカメラを用いた 2 視点からの 3 次元復元手法を提案した。提案手法を用いることで、汎用デジタルカメラによる 2 回の撮影という非常に簡便な撮影方法で高精度かつ高密度な 3 次元点群が復元できることを示した。

今後の課題として、多視点画像からの 3 次元復元への応用を検討している。提案手法を用いることで、2 視点という非常に少ない視点数からでも高精度な点群を密に復元できるため、多視点画像を用いる場合においても、少ない枚数の画像から物体の全周囲を復元することができると考えられる。また、GPGPU などを利用して処理を高速化することで、汎用デジタルカメラで撮影した多視点画像から短時間で物体の 3 次元形状を復元するシステムを検討する予定である。

参 考 文 献

- 1) Seitz, S.M., Curless, B., Diebel, J., Scharstein, D. and Szeliski, R.: A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms, *Proc. Int'l Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.519-528 (2006).
- 2) Goesele, M., Snavely, N., Curless, B., Hoppe, H. and Seitz, S.M.: Multi-View Stereo for Community Photo Collections, *IEEE Int. Conf. Computer Vision*, pp. 1-8 (2007).
- 3) Goesele, M., Ackermann, J., Fuhrmann, S., Klowy, R., Langguth, F., Mücke, P. and Ritz, M.: Scene Reconstruction from Community Photo Collections, *IEEE Computer*, Vol.43, pp.48-53 (2010).
- 4) Furukawa, Y. and Ponce, J.: Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis, *IEEE Int'l Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.1-8 (2007).
- 5) Agarwal, S., Furukawa, Y., Snavely, N., Curless, B., Seitz, S.M. and Szeliski, R.: Reconstructing Rome, *IEEE Computer*, Vol.43, pp.40-47 (2010).
- 6) Lowe, D.G.: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, *Int. J. of Comput. Vision*, Vol.60, pp.91-110 (2004).
- 7) 奥富正敏 (編) : デジタル画像処理, CG-ARTS 協会 (2004).
- 8) Takita, K., Muquit, M.A., Aoki, T. and Higuchi, T.: A Sub-Pixel Correspondence Search Technique for Computer Vision Applications, *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E87-A, No.8, pp.1913-1923 (2004).
- 9) 柴原琢磨, 沼徳仁, 長嶋聖, 青木孝文, 中島寛, 小林孝次: 一次元位相限定相関法に基づくステレオ画像の高精度サブピクセル対応付け手法, 電気情報通信学会論文誌 D, Vol.J91-D, No.9, pp.2343-2356 (2008).

- 10) 酒井修二, 高橋徹, 伊藤康一, 青木孝文: 位相限定相関法を用いた3次元計測の高精度化と性能評価, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.34, No.34, pp.43-46 (2010).
- 11) Brown, M. and Lowe, D.G.: Unsupervised 3D Object Recognition and Reconstruction in Unordered Datasets, *Proc. 5th Int. Conf. 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp.56-63 (2005).
- 12) Snavely, N., Seitz, S.M. and Szeliski, R.: Photo tourism: Exploring photo collections in 3D, *SIGGRAPH Conference Proceedings*, New York, NY, USA, ACM Press, pp.835-846 (2006).
- 13) Snavely, N., Seitz, S.M. and Szeliski, R.: Modeling the World from Internet Photo Collections, *Int. J. Comput. Vision*, Vol.80, pp.189-210 (2008).
- 14) Hartley, R. and Zisserman, A.: *Multiple View Geometry*, Cambridge University Press (2004).
- 15) 岡谷貴之: バンドルアジャストメント, 情報処理学会 研究報告 CVIM 167, No.37, pp.1-16 (2009).
- 16) Lourakis, M. I.A. and Argyros, A.A.: SBA: A Software Package for Generic Sparse Bundle Adjustment, *ACM Trans. Math. Software*, Vol.36, No.1, pp.1-30 (2009).
- 17) Bradley, D., Boubekur, T. and Heidrich, W.: Accurate Multi-View Reconstruction Using Robust Binocular Stereo and Surface Meshing, *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.1-8 (2008).
- 18) 徐剛, 辻三郎: 3次元ビジョン, 共立出版 (1998).
- 19) Fishler, M.A. and Boles, R.C.: Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, *Communications of the ACM*, Vol.24, No.6, pp.381-395 (1981).
- 20) Kazhdan, M., Bolitho, M. and Hoppe, H.: Poisson Surface Reconstruction, *Proc. Symp. Geometry Processing* (2006).