

基線長変化にロバストなステレオ画像間の高精度対応付け手法

酒井 修二^{†a)} 伊藤 康一[†] 青木 孝文[†] 運天 弘樹^{††}

A High-Accuracy Stereo Correspondence Matching Method Robust against Baseline Length

Shuji SAKAI^{†a)}, Koichi ITO[†], Takafumi AOKI[†], and Hiroki UNTEN^{††}

あらまし ステレオビジョンに基づく三次元計測において、その計測精度は (i) ステレオ画像間の対応付け精度と (ii) ステレオカメラの基線長に依存する。高精度な三次元計測を行うためには、基線長の長いステレオ画像間を高精度に対応づけることが重要である。しかし、基線長の長いステレオ画像では、ステレオ画像間の画像変形が大きくなるため、正確な対応付けが困難であった。そこで、本論文では、Scaled Window Phase-Only Correlation (SW-POC) に基づくステレオ画像間の変形にロバストな対応付け手法を提案する。提案手法では、ステレオ画像間の局所的な変形を拡大縮小に近似し、マッチングウィンドウの大きさを変化させることで、基線長の変化に対してロバストで高精度な対応付けが可能である。更に、提案手法を用いた応用として、汎用デジタルカメラを用いた移動撮影による高精度三次元計測について述べる。

キーワード ステレオビジョン、ステレオ対応付け、三次元計測、Scaled Window Matching、位相限定相関法

1. ま え が き

画像の対応付けは、画像センシング、映像信号処理、コンピュータビジョンなどの分野で重要になる基本技術である。特に、ステレオビジョンに基づく三次元計測では、対応付け精度が三次元計測精度に影響するため、ステレオ画像間の高精度な対応付けが必要である [1], [2]。ステレオビジョンに基づく三次元計測において、計測物体の大まかな形状を求める場合は、特徴ベースの疎な対応付けで十分であるが、計測物体の詳細な立体構造を求める場合、密な対応付けを行わなくてはならない。

一般に、ステレオ画像間の密な対応付け手法は、動的計画法やグラフカットなどの最適化に基づく手法と、ウィンドウマッチングに基づく手法に分類される [2], [3]。最適化に基づく手法は、画像間の対応関係

と周辺画素の関係からコスト関数を定義し、そのコスト関数を最小化することで、画像間の対応付けを行う。この手法は、物体境界やオクルージョン領域の影響に対して安定であるが、複雑な最適化を行うため計算コストが大きいという欠点がある。一方、ウィンドウマッチングに基づく手法は、対応候補点近傍から切り出した小領域のウィンドウに対して、領域ベースの画像マッチング手法を適用することで、画像間の対応付けを行う。この手法は、最適化に基づく手法に対して計算コストが少なく、特に、リアルタイム性が求められる応用に適している。

ウィンドウマッチングに基づくステレオ画像間の対応付けに用いられるマッチング手法として、SAD (Sum of Absolute Differences) や SSD (Sum of Squared Differences) などの相違度に基づく手法、及び、NCC (Normalized Cross-Correlation) や位相限定相関法 (Phase-Only Correlation : POC) などの類似度に基づく手法が挙げられる [4]~[7]。中でも、POC に基づく対応付け手法は、画像の明るさの変化にロバストであること、並びに、相関ピークの解析的なモデルに基づいた高精度な関数フィッティングが可能であることが重要な特長として挙げられ、高精度かつ安定に対応付けを行うことが可能である。また、ステレオ平行化

[†] 東北大学大学院情報科学研究科, 仙台市

Graduate School of Information Sciences, Tohoku University, 6-6-05 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai-shi, 980-8579 Japan

^{††} 凸版印刷株式会社, 東京都

Toppan Printing Co., Ltd., 1-3-3 Suido, Bunkyo-ku, Tokyo, 112-8531 Japan

a) E-mail: sakai@aoki.ecei.tohoku.ac.jp

を行い、一次元位相限定相関法（一次元 POC）を用いることで、少ない計算コストで高精度な対応付けを実現している [7].

一般に、ウィンドウマッチングに基づく対応付け手法では、ウィンドウ間の変形を平行移動のみと仮定しているため、ステレオ画像間の変形が小さくなるように、基線長の短いステレオカメラを用いることを想定している。一方で、基線長の長いステレオカメラを用いる場合、対応付け誤差が三次元計測結果に与える影響が小さくなり、三次元計測精度が向上するという利点がある [1]. また、多視点ステレオの分野では、少ない枚数の画像から物体全体を復元できるという理由から、基線長の長いステレオ画像間の対応付けの需要が高まっている [8], [9]. しかし、基線長が長くなると、ステレオカメラで撮影した左右の画像間で変形が大きくなり、正確な対応付けが困難になるという問題がある。従来の基線長が長いステレオ画像間の対応付け手法の一つとして Bradley の手法 [8] がある。Bradley の手法では、ウィンドウの拡大縮小により、ウィンドウ間に生じている画像変形を軽減することで、基線長の長いステレオ画像間の対応付けを行う。一方で、Bradley の手法では、拡大縮小率や視差を変化させながらマッチングを繰り返すため、非常に計算コストが大きく、視体積交差法などを用いて、探索の範囲を限定する必要がある。そのため、一般的なステレオ画像に対しては、探索の範囲を限定することができず、Bradley の手法を適用することが難しかった。また、サブピクセルレベルの対応付け精度と処理時間はトレードオフの関係にあり、高精度な対応付けを行うためには、更に計算量が多くなるという問題がある。

これに対して、本論文では、Scaled Window Matching (SWM) の新しいフレームワークを提案するとともに、SWM と POC を組み合わせることで基線長変化にロバストな対応付け手法である Scaled Window-POC (SW-POC) を提案する。提案するフレームワークは、Bradley の SWM と比べて、粗密戦略を用いることで計算コストを削減するとともに、物体の形状を考慮することで対応付け精度を向上させている。このフレームワークと一次元 POC に基づく対応付け手法 [7] を組み合わせた SW-POC は、基線長が短い場合でも、基線長が長い場合でも、高精度な対応付けを行うことができるため、基線長に関係なく高精度な三次元計測が可能である。性能評価実験では、従来の対応付け手法、及び、提案するフレームワークを適用し

た対応付け手法の性能を比較し、精度、ロバスト性、計算コストの観点から SW-POC が有効であることを実証する。また、提案手法を用いた応用として、カメラの移動撮影による三次元計測について述べる。

2. 一次元位相限定相関法に基づく対応付け手法

ここでは、一次元位相限定相関法（一次元 POC）に基づくステレオ画像のサブピクセル対応付け手法について述べる [7]. ステレオ画像の対応付けは、エピソード線方向の一次元の探索問題として扱うことができる [1]. 提案手法では、計算の効率化のため、エピソード線が水平座標と平行になるようにステレオ平行化を行い、水平座標方向について対応点を探索する。平行化されたステレオ画像を画像 I, J とし、画像 I 上の基準点 \mathbf{p} に対応する画像 J 上の対応点 \mathbf{q} を求める問題を以下で考える。

2.1 一次元位相限定相関法に基づく画像マッチング

一次元 POC は、二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 [6], [7]. N 点の二つの一次元画像信号 $f(n)$ 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、 $F(k)$ 及び $G(k)$ はそれぞれ $f(n)$ 及び $g(n)$ の一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 $g(n)$ の一次元 POC 関数 $r(n)$ は、正規化相互パワースペクトル $R(k)$ の一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。一次元画像信号 $f(n)$ と $g(n)$ が互いに微小量 δ だけ平行移動した関係にあると仮定すると、 $f(n)$ と $g(n)$ の一次元 POC 関数 $r(n)$ は次式で与えられる。

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

上式は、一次元画像信号が δ だけ微小に平行移動した場合の一次元 POC 関数の一般形を表している。ここで、 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、一次元 POC 関数の相関ピークの高さ α は二つの信号の類似度に、相関ピークの位置座標 δ は二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。

一次元 POC 関数を用いて、高精度に平行移動量の推定を行うためには、(A) 画像端での信号の不連続性を解消するための窓関数の適用、(B) エイリアシングやノイズ、ぼけ、ひずみの影響を抑制するためのスペクトル重み付け、(C) 相関ピークモデルのフィッティング、(D) 複数の一次元信号の利用が重要となる [7]。

2.2 ステレオ画像のサブピクセル対応点探索

2.1 の平行移動量推定手法を局所的なウィンドウマッチングに適用し、画像ピラミッドによる階層的探索と組み合わせることにより、ステレオ画像の対応点をサブピクセル精度で検出できる。画像ピラミッドを用いた階層的探索の様子を図 1 に示す。平行化されたステレオ画像の対応付けは、対応点 \mathbf{q} の水平座標を一次元探索する問題であるため、水平座標方向にのみ画像を縮小して行う。

対応点探索の処理手順を説明する。ここで、入力は

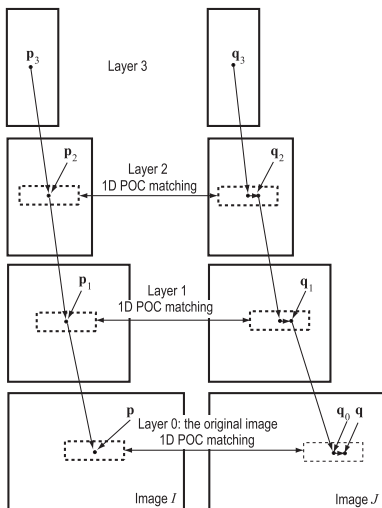


図 1 画像ピラミッドを用いた階層的探索
Fig. 1 Hierarchical search using image pyramid.

平行化されたステレオ画像ペア I, J と画像 I 上の基準点 $\mathbf{p} = (u, v)$ であり、出力は画像 J 上の対応点 $\mathbf{q} = (u', v')$ である。また、画像の平行化は垂直座標が等しくなるように行い、 $v' = v$ とする。

Step1: 画像 I, J を、それぞれ水平方向に 2^{-l} 倍だけ縮小し、階層画像 I_l, J_l ($l = 1, \dots, l_{\max}$)を生成する。

Step2: 最上位層 l_{\max} において基準点 $\mathbf{p}_{l_{\max}}$ の座標を次式で与える。

$$\mathbf{p}_{l_{\max}} = ([2^{-l_{\max}}u], v) \quad (4)$$

最上位層において、対応候補点 $\mathbf{q}_{l_{\max}}$ は基準点と同じ座標をもつものと仮定し、その座標は次式で与えられる。

$$\mathbf{q}_{l_{\max}} = (u', v') = ([2^{-l_{\max}}u], v) \quad (5)$$

次に、 $l = l_{\max} - 1$ として Step3 に移る。

Step3: 第 l 階層上の基準点 \mathbf{p}_l の座標を次式で与える。

$$\mathbf{p}_l = ([2^{-l}u], v) \quad (6)$$

次に、第 l 階層上の対応候補点 \mathbf{q}'_l を次式で与える。

$$\mathbf{q}'_l = (2u'_{l+1}, v') \quad (7)$$

Step4: 画像 I_l, J_l において、それぞれ $\mathbf{p}_l, \mathbf{q}'_l$ を中心として探索ウィンドウを設定する。そして、一次元 POC に基づく対応付け手法を用いて、ピクセル精度の位置ずれ量 δ を求める。第 l 階層における対応点 \mathbf{q}_l の座標を次式で与える。

$$\mathbf{q}_l = \mathbf{q}'_l + (\delta, 0) \quad (8)$$

Step5: $l = l - 1$ として、 $l \geq 0$ である限り、Step3 から Step5 を繰り返す。

Step6: 画像 I, J において、それぞれ \mathbf{p}, \mathbf{q}_0 を中心として探索ウィンドウを設定する。一次元 POC に基づく対応付け手法を用いて、サブピクセル精度の位置ずれ量 δ を求める。サブピクセル精度の対応点 \mathbf{q} は次式で与えられる。

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}_0 + (\delta, 0) \quad (9)$$

以上に示した Step1 から Step6 によって、基準点 \mathbf{p} の対応点 \mathbf{q} をサブピクセル精度で求めることがで

きる。

3. SW-POC に基づく対応付け手法

本章では、SWM の新しいフレームワークを提案するとともに、SWM と POC を組み合わせることで、ステレオ画像間の変形にロバストな対応付け手法である SW-POC を提案する。以下では、平行化されたステレオ画像を入力とし、片方の画像上に設定された基準点に対応するもう一方の画像上の対応点を求める問題を考える。

3.1 Scaled Window-POC (SW-POC)

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次元 POC によるマッチング手法である。ステレオ平行化後の画像では、エピポーラ線が水平座標軸と平行になる。あるエピポーラ線上の次元画像信号に注目すると、ステレオ画像における画像信号間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点探索を行う。図 2 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 [8]。この SW-POC を 2.2 で述べた対応点探索に用いることで、基線長の長いステレオ画像においても、ロバストに対応付けを行うことが可能である。なお、POC によるマッチング手法を他のウィンドウマッチング手法と置き換えることが可能である。

3.2 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。図 3 に示すように、ある三次元座標上の点 $\mathbf{M} = (X, Y, Z)$ に注目したとき、その点の左カメラ画像におけるウィンドウサイズ w_1 と右カメラ画像におけるウィンドウサイズ w_2 は、拡大縮小率 s を用いて次式で表される [8]。

$$w_2 = sw_1 \tag{10}$$

$$s = \frac{\cos \psi_1 \cos \phi_2}{\cos \psi_2 \cos \phi_1} \tag{11}$$

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及び三次元点 \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、二つのカメラ

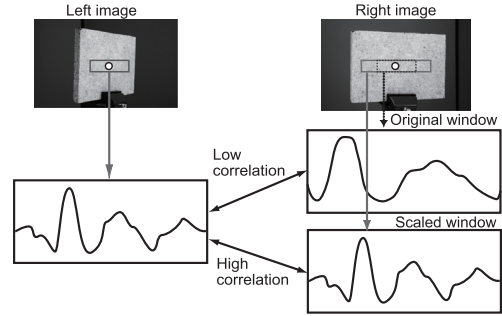


図 2 Scaled Window-POC
Fig. 2 Scaled Window-POC.

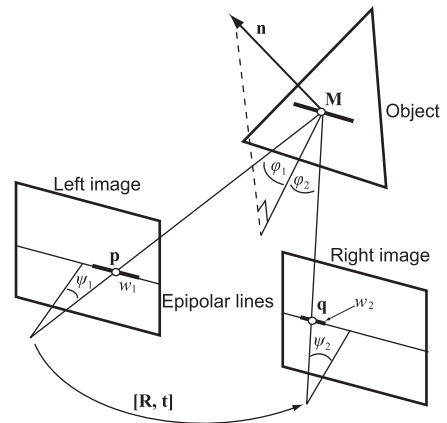


図 3 マッチングウィンドウ間の拡大縮小率
Fig. 3 Scale factor between matching windows.

の外部パラメータと三次元点 \mathbf{M} 及びその点における法線ベクトル \mathbf{n} から求められる。一般に、ステレオカメラを用いて三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 (11) 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、SW-POC では、次元 POC 関数の相関ピークの高さが二つの信号の類似度に相当することを利用して、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、最も相関ピークが高くなるとき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ので、計算コストが増加する問題がある。そこで、計算コスト削減のため、拡大縮小率の推定は、対応点探索における画像ピラミッドの最上位層 l_{\max} のみで行う。

次元 POC に基づく対応付け手法では、画像ピ

ラミッドの最上位層において基準点 $\mathbf{p}_{l_{\max}}$ と対応点 $\mathbf{q}_{l_{\max}}$ の水平座標が一致すると仮定している [7]。しかし、基線長の長いステレオ画像では、ステレオ画像間の変形が大きくなるため、この仮定が必ずしも成り立たない。そこで、SW-POC では、画像ピラミッドの最上位層において、拡大縮小率 s だけでなく、初期対応点 $\mathbf{q}_{l_{\max}}$ を $\mathbf{p}_{l_{\max}} \pm (D, 0)$ の範囲で変化させながらマッチングを行い、最も相関ピークの高い結果を、最上位層におけるマッチング結果とする。

3.3 粗密戦略を用いた計算コストの削減

3.2 の手法では、画像ピラミッドの最上位層において、拡大縮小率 s と初期対応点 $\mathbf{q}_{l_{\max}}$ を変化させるため、次元 POC を用いた対応付け手法に比べ計算コストが大きくなるという問題がある。更に、SW-POC では、拡大縮小率 s が式 (11) で与えられる値に近いほど対応付け精度が向上するのに対して、3.2 の手法では、 s を式 (11) で与えられる値に近づけるために、刻み幅 Δs を非常に小さくする必要があり、計算コストが非常に大きくなってしまふ。そこで、3.2 の手法と粗密戦略を組み合わせることで、計算コストを削減する。まず、疎な基準点群について 3.2 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三次元計測を行い、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 と初期対応点 $\mathbf{q}_{l_{\max}}$ を物体の粗い形状から計算し、この s と $\mathbf{q}_{l_{\max}}$ を用いて対応付けを行う。これにより、疎な点群の対応付けについては、次元 POC に基づく手法に比べて計算コストは大きくなるが、密な点群については、次元 POC に基づく手法と同じ計算コストで対応付けを行うことが可能である。

3.4 物体の形状を考慮した平均 POC 関数の計算

SW-POC では、左右の画像から抽出した二つの次元画像信号間の変形を拡大縮小と平行移動のみであると仮定している。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良い近似で成り立つ。しかし、実際は、信頼性の高い相関ピーク位置の推定を行うために、一組の基準点と対応点ペアについて複数のラインで次元 POC 関数を計算し、それらの次元 POC 関数を平均化する必要がある [7]。そのため、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、ウィンドウ間の画像変形を拡大縮小と平行移動のみで近似できない。

3.1 から 3.3 で述べた手法では、ある程度のスキュー

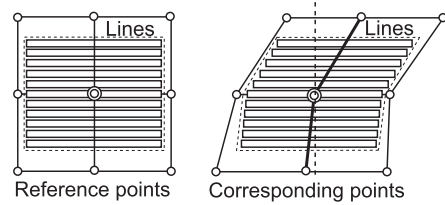


図 4 物体の形状を考慮したウィンドウ
Fig. 4 Search window fitted to the object shape.

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、対応付け誤差が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り、異なったピーク位置を有する POC 関数の平均を平行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、3.1 から 3.3 で述べた手法により一度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次元 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。このとき、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を軽減する。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。そこで、誤対応点の影響を少なくするため、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。

3.5 SW-POC に基づくステレオ画像間の対応付け手法

3.1～3.4 より、SW-POC を用いたステレオ画像間の変形にロバストな高精度対応付け手法を提案する。以下に具体的な手順を述べる。

[処理手順]

Step1: 格子状に配置された疎な基準点群を与え、3.2 に示す手法で s と $\mathbf{q}_{l_{\max}}$ を変化させながら SW-POC を用いて対応点探索 (2.2) を行う。

Step2: 三次元計測により、計測物体の粗い形状を求める。このとき、点と点の間は、ドロネー分割により求めたメッシュによって補間する。

Step3: 格子状に配置された密な基準点群を与え、Step2 で求めた物体の粗い形状を基にそれぞれの基準

点における適切な s 及び $\mathbf{q}_{l_{\max}}$ を計算する.

Step4: 密な基準点について, Step3 で求めた s と $\mathbf{q}_{l_{\max}}$ により SW-POC を用いて対応点探索 (2.2) を行う.

Step5: Step4 で求めた対応点群を用いて 3.4 の手法により対応点群を計算し直す.

4. 性能評価実験

本章では, 2 台のカメラからなるステレオビジョンシステムを構築し, 物体の三次元計測を行うことで, 提案手法の評価を行う. また, 公開データセットを用いた実験により, 一般的なステレオ画像に対する評価を行う. 比較対象は, 従来のウィンドウマッチングに基づく対応付け手法として, SAD, SSD, NCC, 一次元 POC (1D POC) に基づく対応付け手法を, 基線長の長いステレオ画像間の対応付け手法として Bradley の手法 [8] を用いる. また, SW-POC と同様に, 3.5 で提案するフレームワークに SAD, SSD, NCC を適用した SW-SAD, SW-SSD, SW-NCC も用いる. サブピクセルレベルの平行移動量推定に関して, SAD, SW-SAD は等角直線フィッティング [5] を, SSD, NCC, SW-SSD, SW-NCC はパラボラフィッティング [5] を用いる.

4.1 ステレオビジョンシステムを用いた精度評価

4.1.1 実験方法

ここでは, ステレオビジョンシステムを用いた実験により, 提案手法を評価する. 各手法における対応付けのパラメータを以下のように設定する. SAD, SSD, NCC, SW-SAD, SW-SSD, SW-NCC 及び Bradley の手法において, ウィンドウサイズは 16 ピクセル \times 15 ラインとする. 1D POC 及び SW-POC において, ウィンドウサイズは 32 ピクセル \times 15 ラインとする. 一次元 POC に基づく画像マッチングでは, ハニング窓を用いてフーリエ変換の際に生じる信号端の不連続性の影響を抑えている [7]. ハニング窓では信号長の半分が半値幅になることより, 1D POC において, 32 \times 15 ピクセルのウィンドウに含まれる情報量は, 他のマッチング手法で用いる 16 \times 15 ピクセルのウィンドウに含まれる情報量に相当する. 画像ピラミッドを用いた階層的探索について, 画像ピラミッドの階層数は 3 とする. また, 3.5 のフレームワークについて, 画像ピラミッドの最上位層における初期対応点 $\mathbf{q}_{l_{\max}}$ の探索範囲は ± 40 ピクセルとする. 更に, Bradley の手法では, 対応点の探索範囲を提案手法と同じにするため,

画像ピラミッドの最上層における ± 40 ピクセルに相当する ± 160 ピクセルとする. また, Bradley の手法において, サブピクセルレベルの対応付けは, 文献 [8] のとおり 1/10 ピクセルの分解能で行う. SW-SAD, SW-SSD, SW-NCC, SW-POC 及び Bradley の手法について, 拡大縮小率は 1/2, 1/ $\sqrt{2}$, 1, $\sqrt{2}$, 2 倍の五つとする. ここで, Bradley の手法について, 拡大縮小率は, 本来 1/ $\sqrt{2}$, 1, $\sqrt{2}$ としているが [8], 本章の実験においては, それ以上の画像変形が生じることがあり, 三つの拡大縮小率では不十分であったので, 提案手法と同じ五つの拡大縮小率についてマッチングを行った. 以上のパラメータ設定は, 実験的に決められたものであるが, その他の一般的な画像に対しても十分に有効である. ただし, 計測対象のテクスチャが少ない場合や画像解像度が高い場合は, ウィンドウサイズを大きくする必要がある.

実験で用いたステレオビジョンシステムを図 5 に示す. 撮影される画像サイズは 1,280 \times 960 ピクセルである. 計測物体は, 形状が既知である平板と球を用いる. この平板と球は, 細かいテクスチャを有しており, 本実験で比較する全ての手法で誤対応が発生しにくい物体である. 計測物体をカメラから約 600 mm の距離に配置し, 2 台のカメラ間の基線長を変化させながら撮影を行う. このとき, 2 台のカメラのうち, 左カメラを固定し, 右カメラのみを移動させ, 基線長が 50 mm から 600 mm の間で変化するようにする. 実際に撮影された画像を図 6 に示す. このステレオ画像について, それぞれの基線長で左右の画像を平行化し, 左カメラ画像における計測対象上に配置された基準点に対して対応付けを行う. 本実験では, 基準点を計測対象上の 10 ピクセル間隔の格子状に配置した. SW-SAD, SW-SSD, SW-NCC, SW-POC では, 3.5 で述べたように疎な基準点と密な基準点でそれぞれ対応付けを行う. そこで, 疎な基準点は 30 ピクセル間隔の格子

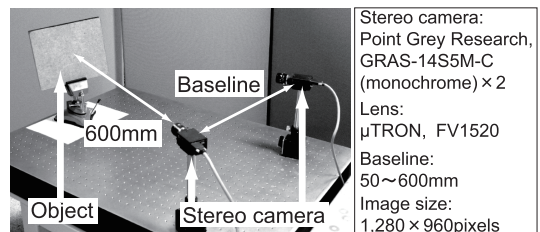


図 5 実験で用いたステレオビジョンシステム

Fig. 5 A stereo vision system used in the experiment.

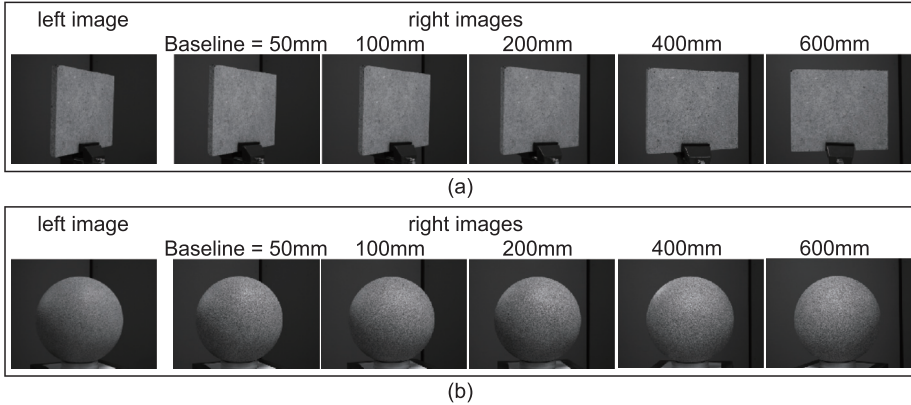


図 6 撮影されたステレオ画像 (a) 平板, (b) 球
Fig.6 Stereo images: (a) plane and (b) sphere.

表 1 平板の誤対応率 [%]
Table 1 Outlier rates [%] for 3D measurement of plane.

Baseline [mm]	50	100	150	200	300	400	500	600
SAD	30.29	29.66	25.45	23.87	52.49	48.85	66.68	76.57
SSD	15.01	20.22	19.40	23.68	53.84	46.85	69.73	78.61
NCC	0.08	1.54	6.22	17.99	50.66	57.29	77.02	95.33
1D POC	1.69	11.94	18.28	34.04	93.67	92.75	92.46	91.51
SW-SAD	60.96	41.68	24.80	15.14	6.00	1.56	23.74	19.64
SW-SSD	39.08	27.35	14.42	8.50	3.77	1.20	23.78	20.11
SW-NCC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SW-POC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Bradley	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.47	13.67

表 2 球の誤対応率 [%]
Table 2 Outlier rates [%] for 3D measurement of sphere.

Baseline [mm]	50	100	150	200	300	400	500	600
SAD	14.68	13.08	21.18	47.11	94.42	94.89	96.37	96.61
SSD	7.74	8.06	18.77	47.03	93.03	93.68	96.19	96.64
NCC	0.04	0.79	17.48	96.54	97.46	98.35	98.48	98.69
1D POC	0.00	0.98	43.03	98.89	98.76	99.05	99.32	98.93
SW-SAD	2.02	6.68	8.60	11.66	16.09	23.29	28.39	34.07
SW-SSD	0.58	3.43	4.59	8.84	13.19	20.06	26.04	33.58
SW-NCC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	13.16	31.25
SW-POC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	13.32	36.21
Bradley	0.00	0.00	0.00	0.18	6.04	18.63	35.06	57.76

状に、密な基準点は 10 ピクセル間隔の格子状に配置した。密な基準点の 3 倍から 5 倍の間隔で疎な基準点を配置すれば、十分な精度の計測結果が得られることを実験的に確認している。ただし、疎な基準点の間隔を更に広げることで、計算コストを削減することができるが、物体境界やオクルージョンの影響を受けやすくなることに注意されたい。

4.1.2 実験結果

まず、基線長の変化に対するロバスト性について評価する。それぞれの基線長において、提案手法及び従

来手法でステレオ画像間を対応付け、三次元計測を行う。この三次元計測結果に対して、平板または球の方程式を当てはめ、各三次元点における当てはめ誤差を算出する。このとき、当てはめ誤差がステレオ画像上で 1 ピクセル以上である点を誤対応点とし、計測点のうち誤対応点が占める割合を誤対応率とする。

平板の計測における誤対応率を表 1 に、球の計測における誤対応率を表 2 に示す。また、基線長 50 mm と 300 mm のときの平板の三次元点群を図 7 に、球の三次元点群を図 8 に示す。ウィンドウの拡大縮小を行

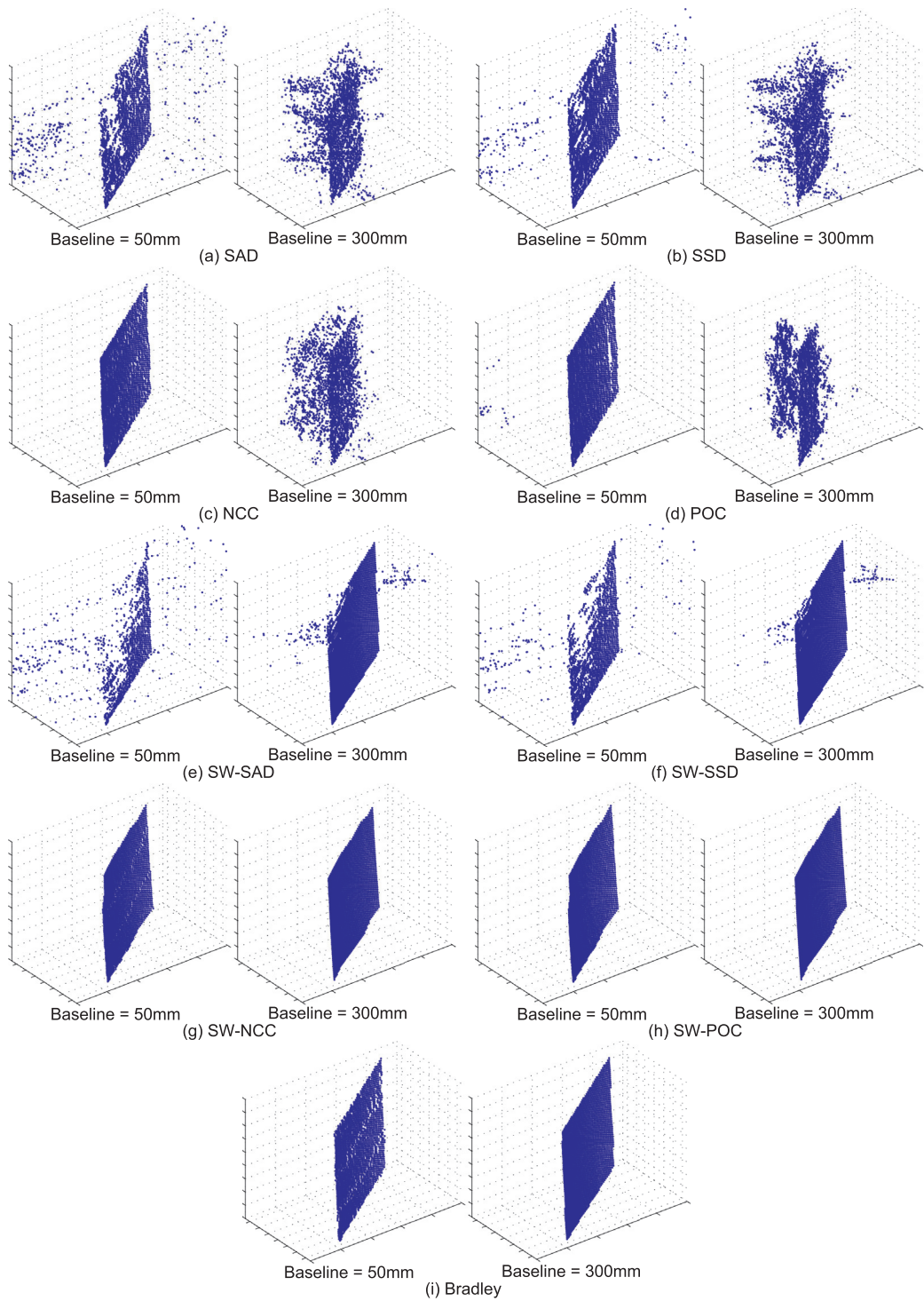


図 7 平板の三次元計測結果
 Fig. 7 3D measurement points of plane.

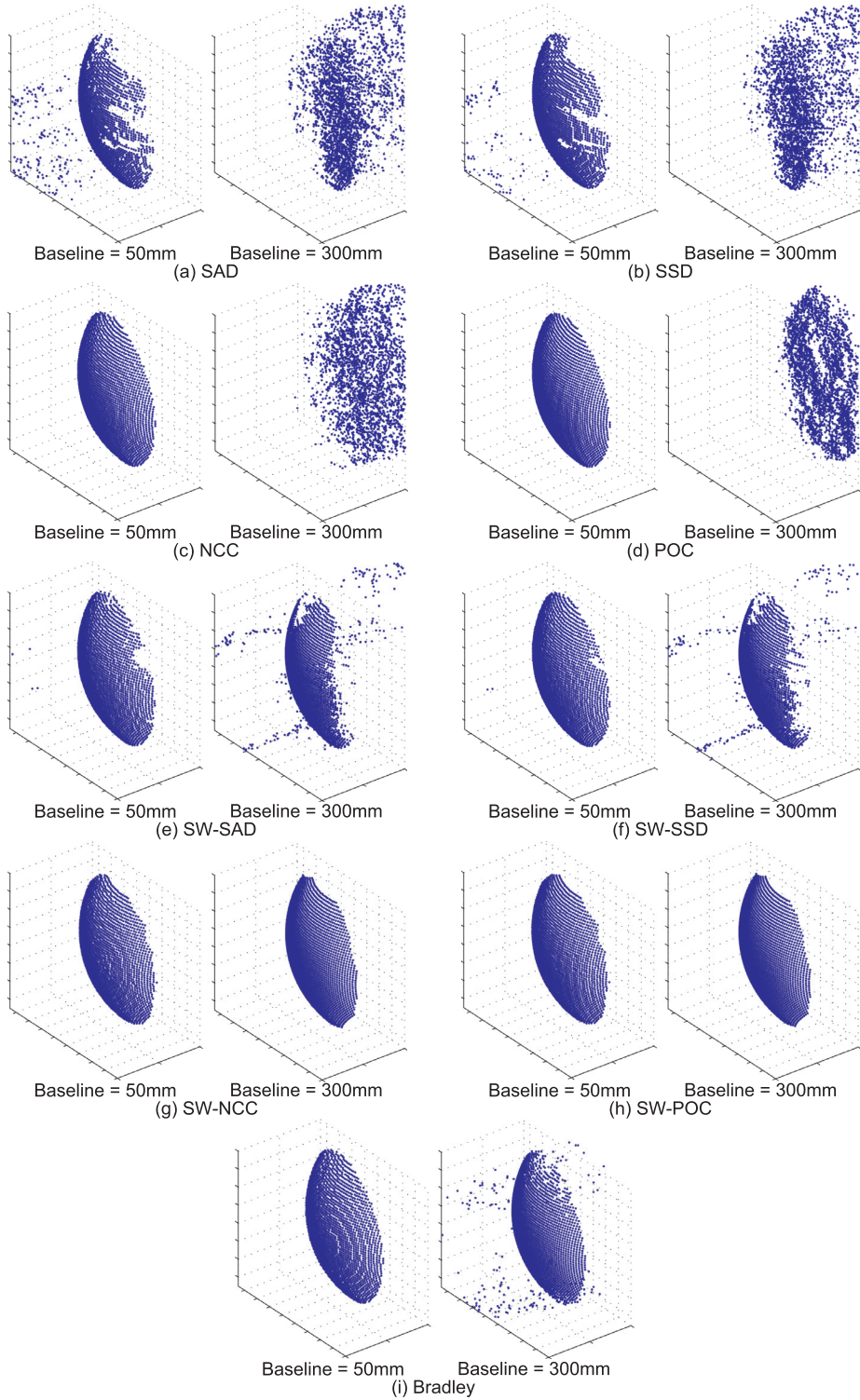


図 8 球の三次元計測結果
Fig. 8 3D measurement points of sphere.

表 3 平板の三次元計測誤差の RMS [mm]
Table 3 RMS errors [mm] for 3D measurement of plane.

Baseline [mm]	50	100	150	200	300	400	500	600
SW-NCC	0.2468	0.1761	0.1520	0.1405	0.1205	0.1186	0.1163	0.1141
SW-POC	0.2010	0.1601	0.1343	0.1320	0.1130	0.1117	0.1096	0.1085
Bradley	0.4513	0.3864	0.1889	0.1889	0.1271	0.1385	0.1519	0.1555

表 4 球の三次元計測誤差の RMS [mm]
Table 4 RMS errors [mm] for 3D measurement of sphere.

Baseline [mm]	50	100	150	200	300	400	500	600
SW-NCC	0.2618	0.1367	0.0947	0.0903	0.0794	0.0892	0.0947	0.0899
SW-POC	0.2203	0.1119	0.0727	0.0688	0.0564	0.0588	0.0713	0.0716
Bradley	0.3479	0.1998	0.1526	0.1455	0.1404	0.1211	0.1111	0.1139

わない SAD, SSD, NCC, 1D POC は、基線長の拡大に伴い、誤対応率が増加していることが確認できる。これは、基線長の拡大により、ステレオ画像間の変形が大きくなり、ウィンドウ間の画像変形を平行移動のみに近似できなくなったためである。また、SW-SAD, SW-SSD は、基線長の長い場合の誤対応率が改善されているが、いずれの基線長においても誤対応が発生していることが確認できる。これは、SW-SAD や SW-SSD は、左右のカメラ画像の明るさの違いや、物体表面の反射特性などに影響を受けやすいためであると考えられる。これに対して、SW-NCC, SW-POC 及び Bradley の手法は、基線長が長いステレオ画像においても、誤対応が少ないことが確認できる。特に、SW-NCC, SW-POC は、基線長が 300 mm 以下の場合に全ての基準点について対応付けが行っている。ただし、基線長 400 mm 以上の球については、ステレオ画像間の変形が非常に大きくなり、提案手法を用いた場合においても誤対応率が増加している。また、提案手法では Bradley の手法に比べて基線長が長いときの誤対応率が小さいことが分かる。特に、球の結果では、それが顕著に現れている。球のような計測物体では、基線長が長くなるとステレオ画像間に様々な種類の変形が生じる。Bradley の手法では、ウィンドウ間にスキューが生じた場合、画像変形を拡大縮小に近似できなくなり、誤対応が発生する。これに対し、提案手法でよりロバストに計測できている要因として、画像ピラミッドの上位層でスキューが軽減されること、及び、

3.4 で述べたように物体の形状を考慮して平均 POC を計算していることが考えられる。
次に、サブピクセルレベルの対応付け精度について評価する。上記の実験のように、計測された三次元点群に対して、平板または球の方程式を当てはめる。ほ

とんどの誤対応点は 1 ピクセル以上の大きな誤差であったため、誤差が 1 ピクセル以上の点を誤対応点として除去する。この誤対応点が除去された三次元点群に対して、方程式の当てはめ誤差の Root Mean Square (RMS) で評価する。このとき、比較する手法は、表 1 及び表 2 において誤対応率の小さかった SW-NCC, SW-POC と Bradley の手法とする。

表 3 に平板の三次元計測誤差を、表 4 に球の三次元計測誤差を示す。いずれの手法においても基線長が長くなるにつれて三次元計測誤差が減少していることが確認できる。これは、基線長の拡大により、対応付け誤差が三次元計測結果に与える影響が小さくなったためであると考えられる。ただし、球の計測結果については、基線長が長くなりすぎると、対応付け誤差が大きくなり、その結果、三次元計測誤差も増加している。三つの手法を比較すると、どちらの計測物体についても、SW-POC の三次元計測誤差が小さいことが確認できる。球において基線長が長い場合は、ステレオ画像間にスキューのような画像変形が生じる。提案するフレームワークを用いている SW-NCC 及び SW-POC では、スキューに対してもウィンドウ間の画像変形を軽減しているため、Bradley の手法に比べ計測誤差が小さい。また、基線長が短い場合は、対応付け誤差が三次元計測結果に与える影響が大きくなるため、図 7 及び図 8 から確認できるように、それぞれの手法の対応付け精度の差が顕著に現れている。サブピクセル精度で対応づけるために、SW-NCC ではパラボラフィッティングを、Bradley の手法では双線形補間を用いている。これに対して、SW-POC では、相関ピークの解析的なモデルを用いて関数フィッティングを行っているため、正確な平行移動量推定が可能である。サブピクセルレベルの平行移動量が高精

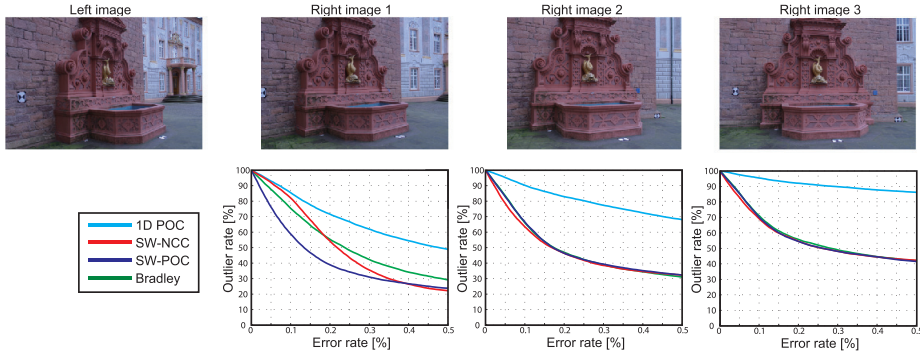


図9 Fountain-P11を用いた実験結果（上段：実験に用いた画像，下段：誤対応率）
 Fig.9 Experimental results using Fountain-P11 (first row: images used in the experiment, second row: outlier rate).

度に推定可能であるため、SW-POCは、基線長が短い場合も、基線長が長い場合も、高精度な対応付けが可能である。

以上より、提案手法はBradleyの手法に比べ、基線長の変化に対するロバスト性、及び対応付け精度の観点から優れているといえる。また、様々なマッチング手法の中でも、特に、SW-POCが高精度な対応付けが可能である。

4.2 公開データセットを用いた精度評価

一般的なステレオ画像を用いて、1D POC, SW-NCC, SW-POC及びBradleyの性能を定量的に評価する。ここでは、ステレオ画像と3Dレーザスキャナで計測した真値が公開されているデータセット(Fountain-P11)を用いる[10]。各手法のパラメータは4.1.1と同じである。ただし、ウィンドウサイズは、1D POC及びSW-POCで 64×31 ピクセル、その他の手法で 32×31 ピクセルとする。また、画像の解像度を $1,536 \times 1,024$ ピクセルに縮小して実験を行う。

実験に使用した画像を図9の上段に示す。まず、左画像上に10ピクセル間隔で格子状に配置した基準点に対して、右画像上の対応点を求める。次に、それぞれの手法で求めた対応点ペアから三次元計測を行い、真値のメッシュモデルと比較する。三次元計測精度は、計測点と真値の誤差である誤差率を用いて評価する。

$$\text{誤差率} = \frac{|Z_{\text{計測値}} - Z_{\text{真値}}|}{Z_{\text{真値}}} \quad (12)$$

ここで、 $Z_{\text{計測値}}$ は計測点の奥行、 $Z_{\text{真値}}$ は真値の奥行である。誤差率のしきい値を変化させたときの誤対応率の関係を図9の下段に示す。1D POCは、基線長

が長くなると誤対応率が増加しているのに対して、その他の手法は、誤対応率があまり増加していない。また、基線長の最も短い右画像1の結果より、SW-POCが他の手法に比べて高精度に三次元計測できていることが確認できる。基線長の短いステレオ画像では、対応付け誤差が三次元計測誤差に与える影響が大きくなるため、高精度な対応付けが求められる。SW-NCC及びSW-POCは、3.5で述べたフレームワークにおいて粗密戦略を用いているため、撮影対象やカメラ位置によって、物体境界やオクルージョンの付近で対応点が高精度に得られない場合がある。そのような場合でも、Bradleyの手法よりも低い同程度の誤対応率であり、複数視点の対応付け結果を利用することで対応することが可能である。以上より、SW-POCは、対応付け精度が非常に高く、基線長が長い場合だけでなく、基線長が短い場合についても有効であると考えられる。Bradleyの手法は、異なる基線長で撮影された複数枚の画像に対し、それぞれの画像ペアを対応付け、結果を統合することで三次元モデルを生成するMulti-View Stereoへの応用を想定している。このような応用においても、SW-POCで得られた対応付け結果を用いることで、より高精度で正確な三次元モデルの生成が可能となる。

4.3 計算コストに関する評価

ここでは、1点の対応付けに必要な計算コストの比較を行う。つまり、画像I上の基準点pに対応する画像J上の対応点qを1点だけ、サブピクセル精度で求める場合の計算コストを考える。ここで、SW-SAD, SW-SSD, SW-NCC, SW-POCは、粗密戦略における疎な点と密な点で計算コストが異なるため、平均の計算コストを考える。一次元POC関数の

表 5 1 点の対応付けに必要な計算コスト
Table 5 Computational costs for finding one corresponding point.

	# of additions	# of multiplications	# of divisions	# of square roots	Computational cost
SAD	30,656	0	0	0	91,968
SSD	30,656	15,360	0	0	168,768
NCC	117,056	49,024	960	960	607,808
1D POC	70,784	61,056	3,840	1,920	552,192
SW-SAD	54,500	0	0	0	163,500
SW-SSD	54,500	27,307	0	0	300,035
SW-NCC	208,100	87,154	1,707	1,707	1,080,554
SW-POC	125,838	108,544	6,827	3,413	981,674
Bradley	3,109,300	1,302,200	25,500	25,500	16,144,900

計算には Fast Fourier Transform (FFT) を用いる。また, SAD, SSD, NCC の計算は, 最も単純な実装とする^(注1)。

表 5 にそれぞれの手法で必要となる加算, 乗算, 除算, 平方根の演算回数と計算コストを示す。ここで, 計算コストとは, 加算, 乗算, 除算, 平方根の演算回数の重みつき和であり, 重みをそれぞれ 3, 5, 6, 6 とした。なお, この重みは, 一般に広く用いられているプロセッサのアーキテクチャ (Intel® Core™ Microarchitecture) の該当命令である FADD, FMUL, FDIV Double Precision, FSQRT のレイテンシに基づいて決定した [11]。表 5 から, Bradley の手法では, 探索範囲を ± 160 ピクセルに限定した場合においても, 計算コストが大きいことが分かる。実際には, Bradley の手法において, 探索範囲は視体積交差法により決定される。本実験に使用されたステレオ画像のようにシルエットが定義されていない場合, 画像全体の探索を行うため, 更に計算コストが大きくなると考えられる。これに対して, 提案手法では, 画像ピラミッドを用いた階層的探索と粗密戦略を適用することで, マッチングの回数を削減しているため, Bradley の手法に比べ計算コストが小さくなっている。3.5 のフレームワークを適用した, SW-NCC と SW-POC を比較すると, SW-POC の方が計算コストが小さい。NCC の計算は, 階層的探索の 1 階層当りの計算について, 加算と乗算の回数が信号長 N に対して $O(N^2)$ である。一方で, POC の計算は, FFT が計算コストの多くを占め, 加算と乗算の回数が信号長 N に対して $O(N \log N)$ であり, NCC よりも計算コストが小さい。

5. カメラの移動撮影による三次元計測

本章では, SW-POC の応用として, カメラの移動撮影による三次元計測 [12] について述べる。カメラの移動撮影による三次元計測では, 1 台の単眼カメラを

用いて計測物体を異なった視点から撮影することでステレオ画像を取得する。このとき, ステレオ画像間の基線長はカメラの移動量によって変化するため, 必ずしも基線長は短いとは限らない。カメラの移動撮影による三次元計測では, 基線長の変化に対してロバストな対応付け手法が必要であるので, SW-POC が有効である。しかし, SW-POC は平行ステレオを仮定しているため, 一般的なステレオ画像に適用するためには, ステレオ平行化を行うためのカメラパラメータが必要となる。一方で, カメラの移動撮影では, 事前にカメラキャリブレーションを行うことが困難であり, 撮影された画像からカメラパラメータを推定しなくてはならない。そこで, Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) に基づく Structure from Motion (SfM) によりカメラパラメータを推定する [13]~[15]。これにより, カメラの移動撮影により得られた画像に対して, SW-POC を適用することが可能となる。

5.1 SW-POC を用いたカメラの移動撮影による三次元計測

SW-POC を用いたカメラの移動撮影による三次元計測手法の処理手順を以下に示す。

[処理手順]

Step 1: カメラの移動撮影により, 計測対象を異なる視点から撮影したステレオ画像を取得する。

Step 2: 撮影されたステレオ画像間を 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付けを行う。

Step 3: 得られた対応関係から基礎行列 \mathbf{F} を求め, カメラパラメータを推定する。

Step 4: Step 3 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, SW-POC を

(注1): FFT を用いることで NCC の計算を高速化することができるが, 信号端が循環することを仮定するため, 一般的な NCC と計算結果が異なることに注意されたい。

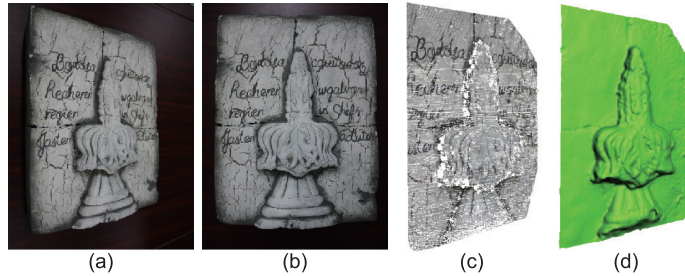


図 10 タイルの計測結果：(a) 左画像，(b) 右画像，(c) 三次元点群，(d) メッシュモデル
 Fig. 10 Measurement results of a tile: (a) left image, (b) right image, (c) 3D point cloud and (d) mesh model.

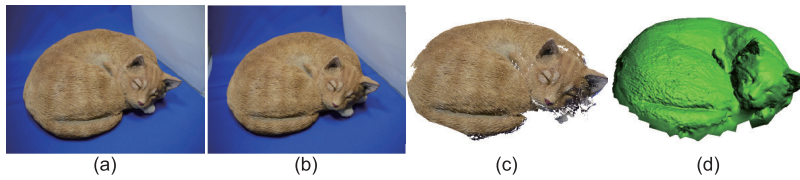


図 11 猫の置物の計測結果：(a) 左画像，(b) 右画像，(c) 三次元点群，(d) メッシュモデル
 Fig. 11 Measurement results of a cat figurine: (a) left image, (b) right image, (c) 3D point cloud and (d) mesh model.

用いてステレオ画像間を高精度かつ密に対応づける。

Step 5： SW-POC により求めた対応点群とカメラパラメータから三次元計測を行う。

更に，上記手法により得られた三次元計測点群に対して，各点の法線ベクトルを周囲の点から求め，Poisson Surface Reconstruction [16] を適用することにより，計測対象のメッシュモデルを生成することが可能である。

5.2 計測結果

実際に，単眼のデジタルカメラを用いて 2 枚の画像を撮影し，5.1 の手法により三次元計測を行う。デジタルカメラは Panasonic LUMIX GF1 を使用し，撮影された画像は $1,280 \times 960$ ピクセルに縮小して処理を行った。また，計測対象として，インテリア用のデコレーションタイルと猫の置物を用いた。それぞれの計測対象について，撮影された画像，三次元計測点群，点群から生成したメッシュモデルを図 10 及び図 11 に示す。カメラの移動撮影による三次元計測では，大きさの不定性があり絶対的な大きさの計測はできないが，図 10 及び図 11 のように，物体の表面形状の計測が可能である。計測結果から，タイルや猫のように複雑な形状の物に対しても，SW-POC に基づく対応付け手法を用いることで，高精度な対応付けが行えていることが確認できる。特に，図 10 (a), (b) のよ

うに，基線長が長いステレオ画像に対して，SW-POC は有効である。また，図 11 (a), (b) のように，対応付け誤差が計測結果に影響しやすい基線長が短いステレオ画像においても，SW-POC は，高精度に対応付けが行えるため，高精度な三次元計測が可能である。

6. むすび

本論文では，SWM の新しいフレームワークを提案するとともに，SWM と POC を組み合わせた SW-POC を提案した。SW-POC は，マッチングウィンドウの拡大縮小により画像変形を軽減することで，基線長変化に対してロバストに高精度な対応付けが可能である。実験を通して，提案手法を用いることで，ロバストかつ高精度な三次元計測が行えることを示した。また，従来手法と比べて，高精度な対応付けができること，及び，計算コストが少ないことを示した。更に，ロバスト性，精度，計算コストの観点から，様々なウィンドウマッチング手法の中で，SW-POC が総合的に優れていることを確認した。また，SW-POC を用いた応用として，カメラの移動撮影による三次元計測を行った。提案手法を用いて，カメラの移動撮影により取得したステレオ画像間を高精度に対応づけることで，高精度な三次元計測が可能である。

文 献

- [1] 徐 剛, 辻 三郎, 3 次元ビジョン, 共立出版, 1998.
- [2] R. Szeliski, *Computer Vision: Algorithms and Applications*, Springer-Verlag New York, 2010.
- [3] D. Scharstein and R. Szeliski, "A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms," *Int. J. Comput. Vis.*, vol.47, no.1-3, pp.7-42, 2002.
- [4] 奥富正敏 (編), デジタル画像処理, CG-ARTS 協会, 2004.
- [5] M. Shimizu and M. Okutomi, "Sub-pixel estimation error cancellation on area-based matching," *Int. J. Comput. Vis.*, vol.63, no.3, pp.207-224, 2005.
- [6] K. Takita, M.A. Muquit, T. Aoki, and T. Higuchi, "A sub-pixel correspondence search technique for computer vision applications," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E87-A, no.8, pp.1913-1923, Aug. 2004.
- [7] 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," 信学論 (D), vol.J91-D, no.9, pp.2343-2356, Sept. 2008.
- [8] D. Bradley, T. Boubekeur, and W. Heidrich, "Accurate multi-view reconstruction using robust binocular stereo and surface meshing," *Proc. Int'l Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.1-8, 2008.
- [9] E. Tola, V. Lepetit, and P. Fua, "DAISY: An efficient dense descriptor applied to wide-baseline stereo," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol.32, no.5, pp.815-830, May 2010.
- [10] C. Strecha, W. von Hansen, L.V. Gool, P. Fua, and U. Thoennessen, "On benchmarking camera calibration and multi-view stereo for high resolution imagery," *Proc. Int'l Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.1-8, June 2008. <http://cvlab.epfl.ch/data/>
- [11] "Intel 64 and IA-32 architectures optimization reference manual". <http://www.intel.com/products/processor/manuals/>
- [12] 酒井修二, 高橋 徹, 伊藤康一, 青木孝文, 運天弘樹, "汎用デジタルカメラを用いた 2 視点からの 3 次元復元," 情報研報コンピュータビジョンとイメージメディア, vol.176, no.4, pp.1-8, March 2011.
- [13] D.G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *Int. J. Comput. Vis.*, vol.60, no.2, pp.91-110, Nov. 2004.
- [14] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple View Geometry*, Cambridge University Press, 2004.
- [15] M.I.A. Lourakis and A.A. Argyros, "SBA: A software package for generic sparse bundle adjustment," *ACM Trans. Math. Software*, vol.36, no.1, pp.1-30, 2009.
- [16] M. Kazhdan, M. Bolitho, and H. Hoppe, "Poisson surface reconstruction," *Proc. Symp. Geometry Processing*, pp.61-70, 2006.

(平成 23 年 10 月 9 日受付, 24 年 2 月 20 日再受付)



酒井 修二

2010 東北大・工・情報卒. 2012 同大大学院情報科学研究科修士課程了. 現在, 同大学院博士課程在学中. 画像処理に関する研究に従事.



伊藤 康一 (正員)

2000 東北大・工・電子卒. 2005 同大大学院情報科学研究科博士課程了. 同年同大学院情報科学研究科助手, 2007 同助教. 2004-2005 日本学術振興会特別研究員, 現在に至る. 画像処理及びバイオメトリクスに関する研究に従事. IEEE, 情報処理学会各会員. 博士 (情報科学).



青木 孝文 (正員)

1988 東北大・工・電子卒. 1992 同大大学院工学研究科博士課程了. 同年同大学・工・助手, 1994 同大学院情報科学研究科助手, 1996 同助教, 2002 同教授, 現在に至る. 超高速デジタル計算の理論, 画像センシング, 映像信号処理, バイオメトリクス, VLSI 設計技術, 分子コンピューティングに関する研究に従事. 英国電気学会フレミング賞及びマウントバッテン賞ほかを受賞. IEEE, 計測自動制御学会, 情報処理学会各会員. 博士 (工学).



運天 弘樹 (正員)

1999 東京大学大学院工学系研究科修士課程了. 同年 (株) NTT データ入社. 2001 同社退社. 2005 東京大学大学院情報理工学研究科博士課程了. 同年凸版印刷 (株) 入社, 現在に至る. バーチャルリアリティーコンテンツのための三次元計測に関する研究に従事. IEEE 会員. 博士 (情報理工学).