

カメラの移動撮影に基づく2視点からの3次元形状計測とその性能評価

Three-dimensional Shape Measurement Using Two Snapshots From a Moving Digital Camera

三浦 衛[†], 酒井修二[†], 石井純平[†],
山尾創輔[†], 正会員 伊藤康一[†], 正会員 青木孝文[†]

Mamoru Miura[†], Shuji Sakai[†], Jumpei Ishii[†], Sosuke Yamao[†], Koichi Ito[†] and Takafumi Aoki[†]

Abstract A method is presented for measuring accurate and dense 3D shapes of an object from two views captured with a moving consumer digital camera. Since existing 3D measurement systems require special and expensive measurement equipment such as laser scanners or technical knowledge such as camera calibration, it is difficult for ordinary consumers to use existing systems practically in their daily life. An easy-to-use 3D measurement system was achieved by using a Structure from Motion algorithm based on feature matching to estimate camera parameters and area-based matching to determine an accurate and dense correspondence. Experiments demonstrated that the proposed method makes it possible to measure a 3D shape with accuracy comparable to that of a laser scanner.

キーワード: 3次元計測, Structure from Motion, 特徴ベースの対応付け, 領域ベースの対応付け

1. ま え が き

3次元計測は、対象物体の表面形状を3次的に計測する技術である。近年、計算機の技術的發展に伴い、データ容量の多い3次元情報を容易に処理することが可能となり、物体形状の3次元情報を取得する3次元計測技術は、医療や産業など、様々な分野において注目されるようになった¹⁾。

現在実用化されている3次元計測の応用では、レーザなどの投影装置を用いるシステムや、2台あるいは複数台のカメラから構成されるステレオカメラシステムが主に使われている。レーザなどの投影装置を用いる場合、計測対象に適した専用の計測装置が必要であり、システムの価格が高価になりやすい。また、計測装置が大型であるため、計測装置を持ち込んだり、設置したりする都合上、撮影環境が限定される。一方、ステレオカメラを用いる場合、計測対象に適したステレオカメラを構成したり、キャリブレーションを行ってカメラパラメータを求めたりする必要があるため、システムの利用者に専門的な知識が求められる。このように、3次元計測システムの導入は比較的困難であ

り、現在でも3次元計測の実用化は一部の応用に限定されている。

簡便な3次元計測手法として、単眼カメラを用いた移動撮影に基づくStructure from Motion (SfM) が挙げられる²⁾。SfMでは、単眼カメラで移動撮影を行い、得られた多視点画像間の対応付けを行うことで、カメラパラメータの推定と物体の3次元計測を行う。そのため、事前にカメラのキャリブレーションを行うことなく、単眼カメラを用いて対象を撮影するだけで、3次元情報を取得することができる。近年では、Scale Invariant Feature Transform (SIFT)³⁾をはじめとして、画像間の幾何学的変形や輝度変化に対して、ロバストな特徴量が提案されている。このような特徴量を用いた特徴ベースの画像対応付けによって、単眼カメラによる移動撮影においても、安定して3次元情報が取得できるようになった。しかしながら、特徴ベースの対応付けに基づくSfMでは、計測される3次元点が画像上の特徴点に限定されてしまうので、3次元計測点が少ないという問題がある。そのため、物体の大まかな形状を計測することは可能だが、詳細な形状を計測することは困難である。入力画像の枚数を増やすことで、3次元計測点を増やすことができるが、画像枚数の増加に伴って処理時間が増大してしまう。また、入力画像の枚数を増やしたとしても、テクスチャ情報が乏しい領域は、特徴点が検出されないために計測することができない。

2013年8月8日受付, 2013年10月24日再受付, 2013年11月12日採録

[†]東北大学 大学院情報科学研究科

(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05, TEL: 022-795-7169)

[†]Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

(6-6-05, Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai-shi 980-8579, Japan)

そこで本論文では、特徴ベースの対応付けに基づく SfM と領域ベースの密な対応付けを組み合わせることで、単眼カメラを用いた 2 回の撮影から高精度かつ密な 3 次元計測を行う手法を提案する。これまでに、単眼カメラを用いた移動撮影から密な 3 次元計測を行う手法として、SfM と多視点ステレオアルゴリズムを組合せた手法が提案されている²⁾⁴⁾⁵⁾。これらのアルゴリズムでは、都市などを対象とした大規模な 3 次元計測を主眼に置いており、大量の画像と計算資源、および長時間の計算機処理を必要とする。これに対し、提案手法は、少ない撮影回数と一般的な計算機による実用的な時間内の計測を目的としており、部品や建築物の外観検査や、個人向けの 3 次元計測など、比較的小規模な応用において有用であると考えられる。また、これまでに、多視点画像間における特徴ベースの対応付け精度や、ステレオ画像間における領域ベースの対応付け精度については評価が行われている⁶⁾⁷⁾ものの、これらを組合せた 3 次元計測という観点からの精度評価は不十分であった。これに対して本論文では、特徴ベースの対応付けと領域ベースの対応付けとの組合せについて総合的な評価を行うとともに、レーザを用いる 3 次元計測装置やキャリブレーション済みのステレオカメラに対して、提案手法の 3 次元計測精度を評価する。さらに、汎用のデジタルカメラと計算機を用いた簡便な 3 次元計測システムを構築することで、提案手法の有用性を示す。

2. 汎用デジタルカメラを用いた 2 視点からの 3 次元計測

一般に、ステレオ画像からの 3 次元計測では、ステレオ画像間の対応関係とステレオカメラのカメラパラメータ (3 次元座標とカメラ画像の 2 次元座標の関係を表す内部パラメータ、およびステレオカメラの位置関係を表す外部パラメータ) から、三角測量の原理に基づいて 3 次元座標を計算する⁸⁾。しかし、カメラの移動撮影によりステレオ画像を取得する場合は、ステレオカメラのカメラパラメータが未知であるため、3 次元座標の計算ができないという問題がある。

そこで、提案手法では、特徴ベースの対応付けに基づく SfM により、カメラパラメータを推定する。また、推定さ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ことで、領域ベースの密な対応付けを容易にし、物体全体の詳細な形状を計測する。具体的には、図 1 に示すように、カメラの移動撮影によって得られた 2 枚の画像をステレオ画像ペアとし、(i) カメラパラメータ推定、(ii) ステレオ平行化、(iii) 3 次元形状計測の三つの処理によって物体の 3 次元形状を計測する。以下では、(i)~(iii) の処理について詳細に述べる。

2.1 カメラパラメータ推定

カメラの移動撮影によって取得された 2 枚の画像 (図 1 (a)) について、1 枚目の画像 I_1 を撮影したときのカメラ

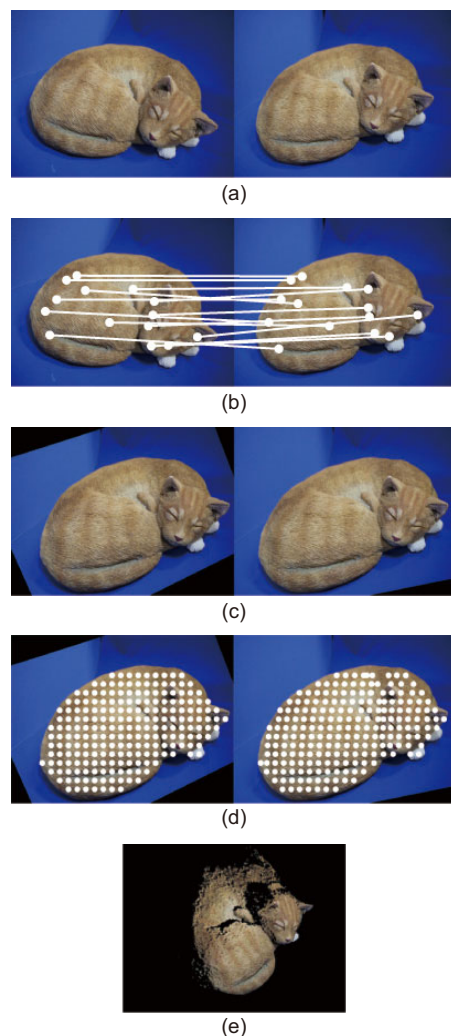


図 1 提案手法による 3 次元計測の処理過程：(a) ステレオ画像ペア、(b) 特徴ベースの対応付け、(c) ステレオ平行化、(d) 領域ベースの対応付け、(e) 3 次元座標の計算
Processing flow of the proposed system for 3D measurement: (a) stereo pair, (b) matching using SIFT, (c) stereo rectification, (d) matching based on POC and (e) calculation of 3D coordinates.

の内部パラメータ A_1 、2 枚目の画像 I_2 を撮影したときのカメラの内部パラメータ A_2 、それらカメラの位置関係 (回転行列 $R_{1 \rightarrow 2}$ および並進ベクトル $t_{1 \rightarrow 2}$) を推定する。

まず、カメラの内部パラメータ (A_1, A_2) を算出する。カメラの内部パラメータ A は、カメラの焦点距離 f [mm]、画像の解像度 $w \times h$ [ピクセル]、カメラの撮像素子の幅 D [mm] より、次式で算出する。

$$A = \begin{pmatrix} f \frac{w}{D} & 0 & \frac{w}{2} \\ 0 & f \frac{w}{D} & \frac{h}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、カメラの焦点距離 f と画像の解像度 (w, h) は、画像の Exif (Exchangeable image file format) 情報⁹⁾から取得する。また、カメラの撮像素子の幅 D は、使用するカメラに依存し、既知とする。

次に、カメラの外部パラメータ (回転行列 $R_{1 \rightarrow 2}$ 、並進ベクトル $t_{1 \rightarrow 2}$) を算出するため、特徴ベースの対応付け

を用いてステレオ画像間を対応付ける (図 1 (b)). 対応付けによって得られた対応点ペアとカメラの内部パラメータ (\mathbf{A}_1 および \mathbf{A}_2) より, RANSAC (RANdom SAmple Consensus)¹⁰⁾ と 5 点アルゴリズム¹¹⁾ を用いて $\mathbf{R}_{1 \rightarrow 2}$ および $\mathbf{t}_{1 \rightarrow 2}$ を算出する. カメラの移動撮影によって取得されるステレオ画像では, カメラの移動や焦点距離の変化により様々な画像変形が生じる. そのため, 画像の幾何学的変形にロバストな特徴ベースの手法を用いてステレオ画像間を対応付ける. 特徴ベースの対応付けでは, 画像中のエッジやコーナなどの特徴点について特徴量を記述し, 特徴量を比較することで特徴点同士の対応付けを行う. これまでにさまざまな特徴量が提案されているが, 中でも SIFT は, 画像間の幾何学的変形や輝度変化に対して, ロバストな特徴量としてコンピュータビジョンや画像処理の分野で広く用いられている⁴⁾. また, SIFT を近似計算することで, 高速化した Speeded Up Robust Features (SURF)¹²⁾ や, バイナリコードを用いた特徴量の記述を行う Binary Robust Invariant Scalable Keypoints (BRISK)¹³⁾, アフィン変換をしながら対応付けを行う Affine-SIFT (ASIFT)¹⁴⁾ などが知られている.

最後に, バンドルアジャストメントを用いてカメラパラメータの最適化を行う¹⁵⁾¹⁶⁾. カメラの内部パラメータ \mathbf{A}_1 , \mathbf{A}_2 および外部パラメータ $\mathbf{R}_{1 \rightarrow 2}$, $\mathbf{t}_{1 \rightarrow 2}$ は, (ii) ステレオ平行化, (iii) 3次元計測の処理に大きく影響する. そこで, これまでに算出されたパラメータ \mathbf{A}_1 , \mathbf{A}_2 , $\mathbf{R}_{1 \rightarrow 2}$, $\mathbf{t}_{1 \rightarrow 2}$ を初期値としてバンドルアジャストメントを適用し, これらのカメラパラメータを最適化する.

2.2 ステレオ平行化

画像 I_1 および I_2 を平行化し, 画像 I'_1 および I'_2 を得る (図 1 (c)). ステレオ平行化とは, ステレオ画像をあたかも平行ステレオカメラで撮影された画像のように変形する処理である²⁾⁸⁾. (iii) の処理では, 物体全体の詳細な形状を計測するために, 領域ベースの対応付けを用いてステレオ画像間の対応関係を求める. 領域ベースの対応付けは, 特徴点に限らず任意の画像座標について対応付けが可能である. 一方で, 画像間に幾何的な変形が生じると正確な対応付けが困難になるという問題がある. そこで, ステレオ平行化を行うことで画像間の画像変形を軽減する. 画像 I_1 , I_2 をそれぞれ I'_1 , I'_2 に変換する射影変換行列は, 2.1 節で推定したカメラパラメータを用いて算出することができる¹⁷⁾. 平行化後のステレオ画像間では, 画像変形が水平座標方向に限定され, 垂直座標方向の拡大縮小と回転が軽減される. これにより, カメラの移動撮影で取得されたステレオ画像に, ある程度の拡大縮小や回転が生じていた場合においても, 密な 3次元計測を行うことが可能になる.

2.3 3次元形状計測

領域ベースの対応付けによってステレオ画像 I'_1 – I'_2 間の対応関係を求める (図 1 (d)). 図 1 (d) では, 画像 I'_1 において HSV 色空間を用いた閾値処理によって背景と計測領

域を分離し, 計測領域に格子状に配置した基準点に対して対応関係を求めている. ただし, 計測領域を判別する方法はこれに限らず, 例えば, 領域成長法のようなセグメンテーション手法を用いたり, ユーザに手動で計測領域を入力させたりするなど, 計測の対象や環境によって最適なものを選択する必要がある. さらに, 求めた対応関係と 2.1 節で推定されたカメラパラメータとを用いて, 3次元座標を計算する (図 1 (e)). 3次元形状計測では, 物体の詳細な形状を計測するため, 任意の点について対応付けが行える領域ベースの対応付け手法を用いる. 領域ベースの対応付け手法は, 大域的な最適化に基づく手法に比べて, 容易にサブピクセル精度の対応付けが行えるため, 対応付けの精度が計測精度に大きく影響する 3次元計測に適している²⁷⁾. 領域ベースの対応付け手法では, ステレオ画像の片方の画像上において対応付けを行う点の周囲に局所的な画像ブロックを定義し, もう一方の画像上で類似した画像ブロックを探索することで対応付けを行う. ブロックマッチングに用いられる手法として, Sum of Absolute Differences (SAD) や Sum of Squared Differences (SSD) などの相違度に基づく手法, および, Normalized Cross-Correlation (NCC) や Phase-Only Correlation (POC) などの類似度に基づく手法が知られている¹⁸⁾¹⁹⁾.

3. 性能評価実験

本節では, 提案手法の 3次元計測性能を評価する. まず, ステレオカメラで撮影された画像を用いて, カメラパラメータの推定精度および 3次元形状計測の精度を評価する. 次に, 基線長を変化させたステレオ画像で 3次元計測を行い, カメラの移動距離と計測精度の関係を調べる. さらに, 提案手法を実装したシステムを構築し, デジタル一眼レフカメラのような高価なカメラだけでなく, コンパクトデジタルカメラやスマートフォンに搭載されているカメラを用いても, 高精度な計測が可能であることを示す. 最後に, 処理時間の評価を通して, 一般的な計算機のプロセッサを用いても, 実用的な処理時間で計測が可能であることを示す.

3.1 ステレオカメラを用いた計測との比較

固定されたステレオカメラで撮影された画像を用いて, カメラパラメータの推定 (特徴ベースの対応付けに基づく SfM) の精度, および 3次元形状計測 (領域ベースの密な対応付け) の精度を評価する. 一般に, カメラパラメータの真値は不明であるため, 推定されたカメラパラメータそのものを用いて, カメラパラメータの推定手法を評価することは難しい. これに対して, 固定された 2眼ステレオカメラでは, キャリブレーションによってカメラパラメータを求めることができる. そこで, 固定された 2眼ステレオカメラで撮影した画像を用いて, 事前のキャリブレーションで求めたカメラパラメータと, SfM で推定したカメラパラメータとで 3次元計測を行い, 計測精度を比較する.

まず, 図 2 に示すシステムを用いて図 3 (a) に示すよう

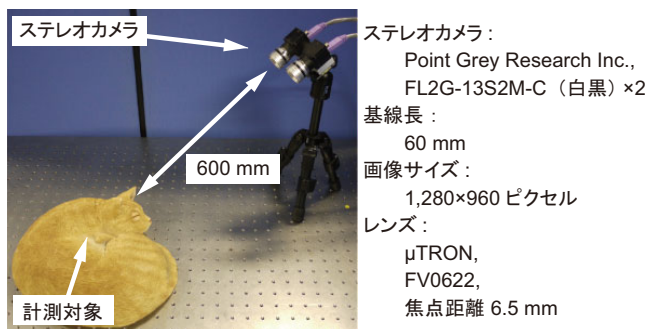


図 2 実験で用いるステレオビジョンシステム
Stereo vision system used in the experiment.

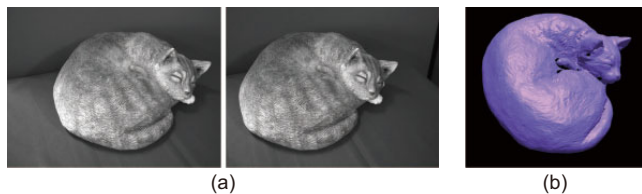


図 3 性能評価に用いるデータ: (a) ステレオ画像, (b) 真値のメッシュモデル
Data for performance evaluation: (a) stereo images and (b) ground truth 3D model.

に猫の置物を撮影し、3次元計測を行う。次に、コニカミノルタ社の3次元スキャナ VIVID910 を用いて取得した3次元メッシュモデル(図3(b))を真値とし、計測した点群と3次元メッシュモデルとの間でICP (Iterative Closest Point) を用いた位置合わせ²⁰⁾を行う。ここで、計測した点群にはスケールの不定性が存在するため、ICPを用いた位置合わせでは、回転、並進だけでなく、スケールも推定する。最後に、位置合わせした点群とメッシュモデルとの距離を誤差とし、誤対応率および誤差の二乗平均平方根(Root Mean Square: RMS)を用いて評価を行う。ここで、3次元計測した点のうち、3次元メッシュモデルとの距離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、誤対応点が占める割合を誤対応率とする。なお、本実験の条件では、1ピクセルの誤差が約2.5mmの誤差に相当する。誤差のRMSについては、誤対応点を除いた計測点のみを用いて計算する。

カメラパラメータは、あらかじめチェッカーパターンを撮影し、Zhangらのキャリブレーション手法¹⁷⁾²¹⁾によって求める(以下CALIBと記述する)か、特徴ベースの対応付け(BRISK, SURF, SIFT, ASIFT)に基づくSfMを用いて推定する。BRISKは、Leuteneggerらが公開しているソースコード²²⁾を用いて実装し、キーポイント検出の閾値を60とする。SURFに基づく対応付けは、OpenCV²³⁾を用いて実装し、Fast-Hessian Detectorの閾値を500とする。SIFTに基づく対応付けは、Loweが公開しているデモプログラム²⁴⁾を用いて実装する。ASIFTは、Morelらが公開しているソースコード²⁵⁾を用いて実装する。5点アルゴリズムとバンドルアジャストメントについては、Bundler²⁶⁾

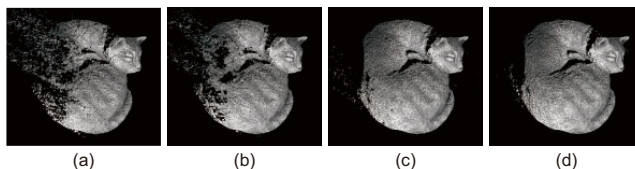


図 5 3次元計測結果: (a) SAD, (b) SSD, (c) NCC, (d) POC (カメラパラメータはSIFTに基づくSfMを用いて推定)
3D measurement results: (a) SAD, (b) SSD, (c) NCC and (d) POC. (Camera parameters are estimated by SIFT-based SfM)

を用いて実装する。

領域ベースの対応付けについては、SAD, SSD, NCC, POCに基づく手法をそれぞれ用いる。それぞれの手法では、画像ピラミッドによる階層的探索²⁷⁾を用いており、画像ピラミッドの階層数を4とする。探索ウィンドウのサイズは、SAD, SSD, NCCに基づく手法では16ピクセル×15ライン、POCに基づく手法では32ピクセル×15ラインとする。POCに基づく画像マッチングでは、ハニング窓を用いることで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。ハニング窓では信号長の半分が半値幅になることより、POCに基づく手法において32×15ピクセルのウィンドウに含まれる情報量は、他の対応付け手法で用いる16×15ピクセルのウィンドウに含まれる情報量に相当する。サブピクセルレベルの平行移動量推定に関して、SADに基づく手法では等角直線フィッティング¹⁸⁾を用いる。SSD, NCCに基づく手法ではパラボラフィッティング¹⁸⁾を用いる。なお、計測領域を手動で設定し、計測領域に3ピクセル間隔で格子状に配置した基準点に対して領域ベースの対応付けを行う。

計測における誤対応率および誤差のRMSを図4に示す。図4では、計測対象をさまざまな方向から14回撮影したそれぞれのステレオペアごとに、カメラパラメータの推定方法および領域ベースの対応付けのそれぞれについて、すべての手法の組合せを用いて計測および評価を行い、算出された誤対応率および誤差のRMSをプロットしている。さらに、手法の組合せごとに、誤対応率および誤差のRMSについて、それぞれの平均を中心、それぞれの標準偏差を半径とした楕円を示している。これら平均および標準偏差を表1および表2に示す。以下では特に断りのない限り、平均を用いて議論する。

まず、領域ベースの対応付けの評価結果について考察する。カメラパラメータの推定方法に関わらず、SADやSSDに基づく手法と比べ、NCCやPOCに基づく手法は誤対応率が低い。図5は、それぞれの手法を用いて計測を行った結果であるが、SADやSSDに基づく手法では、誤対応が発生している領域が多いことがわかる。これは、SADやSSDに基づく手法では、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の影響を受け易いためである。これに対して、NCCやPOCに基づく手法では、これらの影響

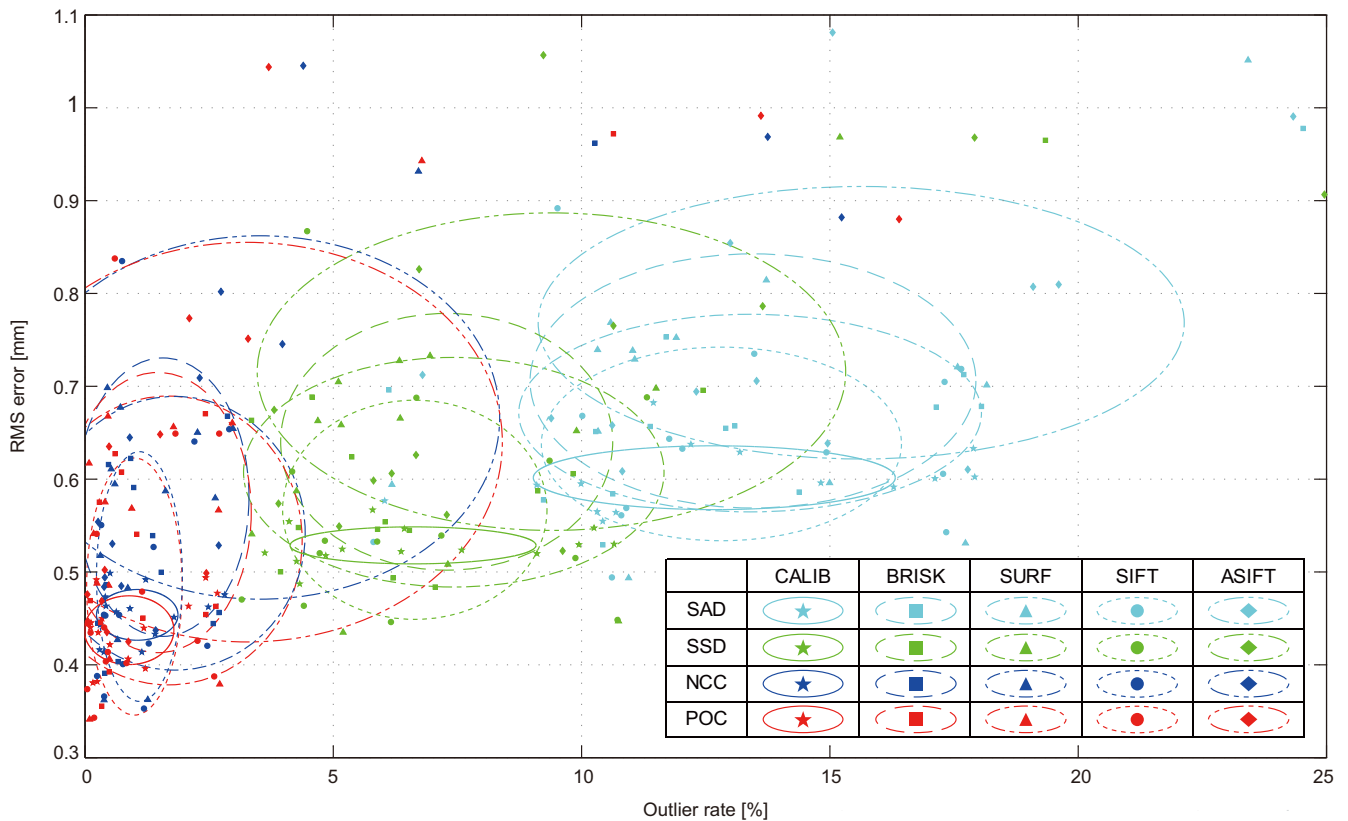


図 4 3次元計測における誤対応率および誤差のRMS (カメラパラメータ推定手法の違いはマーカーおよび線の種類、領域ベースの対応付け手法の違いは色によって示す)
 Outlier rates and RMS errors of 3D measurement. (Difference of camera parameter estimation is presented by types of marker and line. Difference of area-based matching method is presented by color)

表 1 3次元計測における誤対応率 (14回の試行における平均 ± 標準偏差) [%]
 Outlier rates of 3D measurement (mean ± standard deviation of 14 trials) [%]

	CALIB	BRISK	SURF	SIFT	ASIFT
SAD	12.7 (±3.6)	13.4 (±4.7)	13.4 (±4.5)	12.8 (±3.6)	15.6 (±6.5)
SSD	6.6 (±2.5)	7.4 (±4.2)	7.3 (±3.4)	6.6 (±2.7)	9.4 (±5.9)
NCC	1.1 (±0.8)	1.8 (±2.6)	1.6 (±1.7)	1.1 (±0.9)	3.6 (±4.8)
POC	0.9 (±0.9)	1.7 (±2.7)	1.5 (±1.9)	1.0 (±1.0)	3.3 (±5.1)

表 2 3次元計測におけるRMS誤差 (14回の試行における平均 ± 標準偏差) [mm]
 RMS errors of 3D measurement (mean ± standard deviation of 14 trials) [mm]

	CALIB	BRISK	SURF	SIFT	ASIFT
SAD	0.602 (±0.034)	0.671 (±0.107)	0.706 (±0.137)	0.638 (±0.103)	0.768 (±0.147)
SSD	0.529 (±0.020)	0.607 (±0.124)	0.642 (±0.137)	0.567 (±0.118)	0.716 (±0.171)
NCC	0.454 (±0.027)	0.542 (±0.148)	0.581 (±0.149)	0.494 (±0.136)	0.665 (±0.197)
POC	0.437 (±0.037)	0.533 (±0.156)	0.564 (±0.151)	0.484 (±0.139)	0.641 (±0.214)

に対してロバストに対応付けができています。また、NCCに基づく手法に比べ、POCに基づく手法では誤差のRMSが低い。NCCに基づく手法では、パラボラフィッティングを用いて離散点の間を補間することでサブピクセル精度の対応付けを行う。一方で、POCに基づく手法では、相関ピークの解析的なモデルを離散点にフィッティングすることでサブピクセル精度で対応付けを行うため、より正確に平行移動量を推定することが可能である。

次に、カメラパラメータの推定方法の評価結果について考察する。領域ベースの対応付け手法に関わらず、SIFTに基づくSfMを用いてカメラパラメータを推定する場合は、特徴ベースの対応付け (BRISK, SURF, SIFT, ASIFT) に基

づくSfMの中で誤対応率および誤差のRMSが最も低い。また、SIFTに基づくSfMでは、キャリブレーションによってカメラパラメータを求める場合 (CALIB) と比べると、誤対応率は同程度である。しかしながら誤差のRMSに関しては、平均が低く、標準偏差が大きい。これは、キャリブレーションにおいて、さまざまな位置や向きを持ったチェッカーパターンを撮影することで画像全体にわたるコーナ点の対応関係を得ることができているのに対し、SIFTに基づくSfMでは、対応関係を得ることができる特徴点の位置が画像中で偏ってしまうことがあるためだと考えられる。

以上より、提案手法では、SIFTに基づくSfMによるカメラパラメータの推定と、POCに基づく対応付けによる3

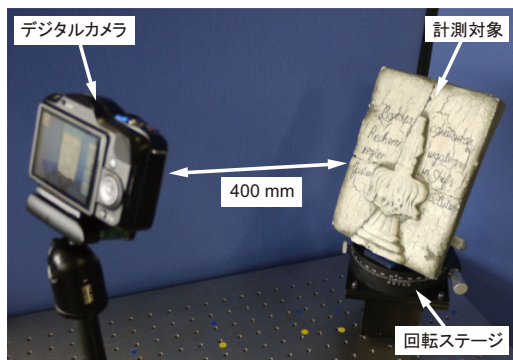


図 6 基線長を変化させた場合の評価
Evaluation with variable baseline cases.

次元形状計測の組合せが最も高精度に3次元計測を行うことができる。また、この組合せでは、キャリブレーションされたステレオカメラと比べ、サブミリレベルでの計測精度は低く、計測ごとにばらつきが大きいものの、大まかな形状を捉えるという観点からは同程度の3次元計測が可能である。

3.2 基線長を変化させた場合の評価

カメラの移動距離(基線長)を変化させた場合の3次元計測精度を評価し、提案手法が許容できる移動距離を調べる。計測対象は、インテリア用のデコレーションタイルとする。対象の形状に依存する画像変形の影響を抑え、基線長の変化による計測精度を評価するためには、平板に近い計測対象が適している。使用するデジタルカメラは Panasonic LUMIX DMC-GF3 であり、撮影された画像を 1,280 × 960 画素に縮小して計測処理を行う。評価に用いる画像は、図 6 に示すように撮影する。まず、計測対象をカメラと正対する向きで回転ステージに載せ、画像を撮影する。このとき撮影された画像を基準画像(0°)とする。次に、回転ステージを 5° から 40° まで 5° ずつ回転させながら画像を撮影し、撮影したそれぞれの画像と基準画像とをステレオペアとして 3次元計測を行う。青地の背景下で撮影を行い、HSV 色空間における閾値処理によって計測領域を抽出する。計測領域に 3 ピクセル間隔で配置した格子状の基準点に対して 3次元計測を行う。計測では、3.1 節で最も高精度であった SIFT に基づく SfM と POC に基づく対応付けの組合せを用いる。最後に、計測した点群を 3.1 節と同様に真値のメッシュモデルとの位置合わせを行い、誤差のヒストグラムを用いて評価する。

計測結果を図 7、計測誤差のヒストグラムを図 8 に示す。図 8 のヒストグラムでは、誤差の小さい点の割合が多く、誤差の大きい点の割合が少ないほど、高精度に計測できていることを示す。すなわち、誤差 0 mm の頻度が高く、かつ、サイドローブの値が低くなるような急峻なピークを示していれば、計測誤差が小さいことを示している。回転ステージの角度を 5° から 15° まで増加させると、誤差 0 mm の頻度が高くなるとともに、サイドローブの値が低くなる。これは、基線長が長くなることで、対応付け誤差が 3次元

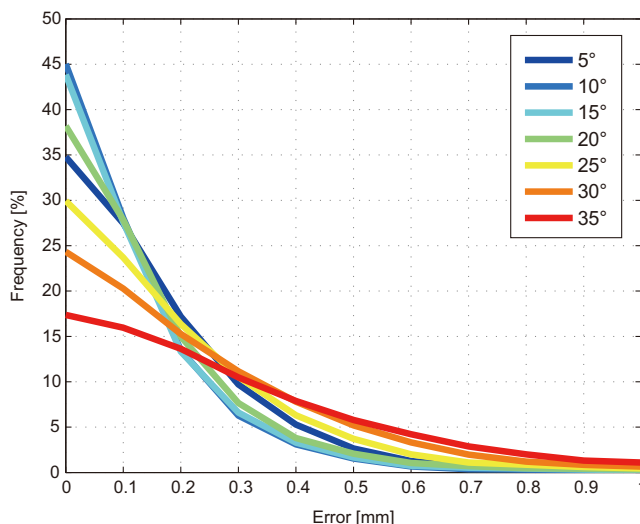


図 8 基線長を変化させた場合の計測誤差のヒストグラム
Histogram of measurement errors with variable baseline cases.

計測結果に与える影響が小さくなっているためである。一方で、回転ステージの角度が 20° 以上になると、誤差 0 mm の頻度が低くなり、サイドローブの値が高くなる。これは、図 7 からわかるように、ステレオ画像間の変形が大きくなり、計測された点の誤差が大きくなるからである。以上の結果より、カメラの輻輳角が 10° ~ 15° のときに、最も高精度な計測が可能であることを示している。

3.3 汎用デジタルカメラを用いた計測

提案手法を実装したシステムを開発し、デジタルカメラおよび計測対象を変えた場合の 3次元計測精度を評価する。システムは、汎用のデジタルカメラと計算機で構成される(図 9 (a))。カメラから計算機への画像の転送は、Eye-Fi カード²⁸⁾を用いる。Eye-Fi カードは Wi-Fi 通信機能を搭載したメモリーカードであり、カメラで撮影した画像を計算機内の任意のディレクトリに転送する。計算機では、転送先のディレクトリを監視し、画像が 2 枚転送された時点で 2 節に述べたアルゴリズムを用いて 3次元計測を行う。計測結果は、Point Cloud Library (PCL)²⁹⁾を用いて表示され、ユーザは任意の視点から計測結果を確認したり、点群データとして保存したりすることができる。また、タブレット端末やスマートフォンのように、カメラと汎用プロセッサの両方を搭載した機器を用いることで、より小型で携行性の高いシステムの構築が可能である(図 9 (b), (c))。

使用するデジタルカメラおよび計測対象を変えた場合の 3次元計測結果を図 10 に示す。計測では、3.1 節で最も高精度であった SIFT に基づく SfM と POC に基づく対応付けの組合せを用いている。HSV 色空間における閾値処理によって自動的に計測領域を抽出する。計測処理におけるパラメータ、および誤対応率や誤差の RMS の評価方法は、3.1 節に述べたものと同様である。使用するデジタルカメラは、Panasonic LUMIX DMC-GF3 (デジタル

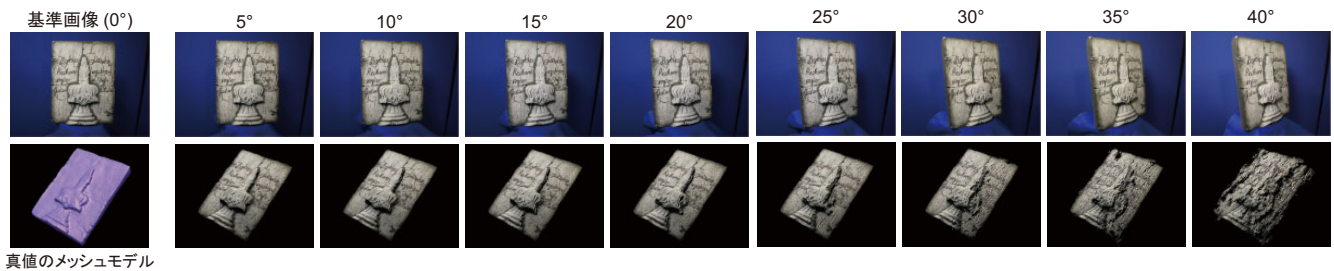


図 7 基線長を変化させた場合の3次元計測結果
Measurement results with variable baseline cases.



図 9 計測システムの構成例：(a) 汎用デジタルカメラと計算機, (b) スマートフォン, (c) タブレット端末
Example of measurement system: (a) Consumer digital camera and computer, (b) Smartphone, (c) Tablet computer.

表 3 カメラパラメータ推定の処理時間 [秒]
Computation time of camera parameter estimation [s].

BRISK	SURF	SIFT	ASIFT
1.36	2.81	14.19	185.77

一眼レフカメラ), Canon IXY 30S (コンパクトデジタルカメラ), Google Nexus One (スマートフォン)である。また、計測対象として、猫の置物、デコレーションタイル、犬の置物を撮影している。図 10 (a)~(c) より、デジタル一眼レフカメラのように高性能なデジタルカメラだけでなく、スマートフォンに搭載されているカメラを用いても、3次元スキャナに対して1 mm以下の誤差で3次元計測が可能である。さらに、図 10 (a), (d), (e) より、さまざまな計測対象に対して同様に3次元計測が可能である。

また、一般物体を対象に、システムを用いて3次元計測を行った結果を図 11 に示す。それぞれの物体について、特徴ベースの対応付けに基づく SfM のみでは計測が困難な、比較的テクスチャの乏しい領域も計測できていることが確認できる。

3.4 処理時間

特徴ベースの対応付けに基づくカメラパラメータの推定、および領域ベースの対応付けに基づく3次元計測処理のそれぞれについて、処理時間を計測した結果を表 3 および表 4 に示す。ただし、処理時間は、Intel Core2 Extreme X9650 (3.00 GHz) を用いて計測している。表 3 および表 4 より、3.1 節で最も高精度だった組合せ (SIFT に基づく SfM と POC に基づく対応付け) を用いた場合の処理時間は、約 20 秒であることがわかる。

4. む す び

本論文では、汎用デジタルカメラを用いた2回の撮影

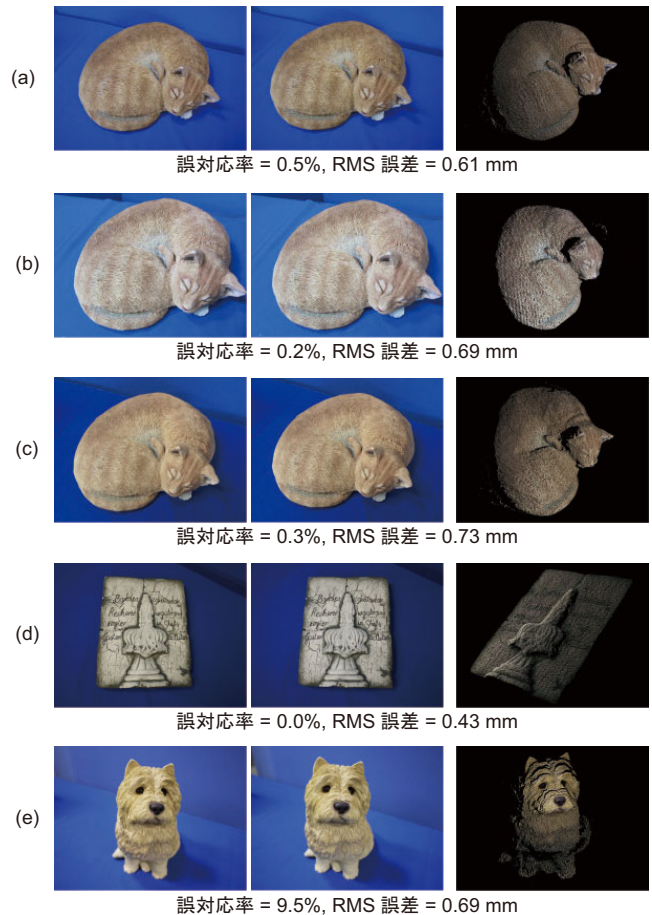


図 10 3次元計測結果：(a) Panasonic LUMIX DMC-GF3, (b) Canon IXY 30S, (c) Google Nexus One, (d) LUMIX DMC-GF3, デコレーションタイル, (e) LUMIX DMC-GF3, 犬の置物

Results of 3D measurement: (a) Panasonic LUMIX DMC-GF3, (b) Canon IXY 30S, (c) Google Nexus One, (d) LUMIX DMC-GF3 with an interior tile and (e) LUMIX DMC-GF3 with a dog curving.

表 4 3次元計測の処理時間 (43,698 点の計測) [秒]
Computation time of dense correspondence matching (43,698 points) [s].

SAD	SSD	NCC	POC
0.84	0.86	2.12	2.78

から、高精度な3次元計測を行う手法を提案した。特徴ベースの対応付けと領域ベースの対応付けとの組合せについて総合的な評価を行うとともに、コンパクトデジタルカメラのような比較的安価な撮影装置を用いて、システムの利



図 11 一般物体の 3 次元計測結果: (a) バスケットボール, (b) 積み木, (c) 金属部品
3D measurement results of generic objects: (a) basketball, (b) building blocks and (c) metal component.

ユーザーに高度な知識や技能を求めることなく、3次元スキャナに対してサブミリ精度での3次元計測が可能であることを示した。また、計測処理においては、大規模な演算資源や特殊な演算装置が不要であり、一般的な計算機のプロセッサを用いて20秒程度で計測が可能であることを示した。提案手法では、2視点のみから3次元計測を行っているが、3枚以上の画像から複数のステレオペアを作り、それぞれペアからの3次元計測結果を同一の座標系に統合することにより、多視点からの3次元計測に拡張することは容易である。さらに、近年の計算機では、複数のコアを持つプロセッサやGPU (Graphics Processing Unit) が並列プロセッサとして利用可能である。GPUを用いた並列処理によって、SIFTに基づく対応付けを10倍高速化すること³⁰⁾が、POCに基づく対応付けが20倍高速化すること³¹⁾が可能であると報告されている。これらの実装を用いることで計測処理が高速化できれば、ビデオカメラなどを用いた動画からのリアルタイムな3次元計測が可能である。

【文 献】

- 1) 吉澤徹: “最新光三次元計測”, 朝倉書店 (2006)
- 2) R. Szeliski: “Computer Vision: Algorithms and Applications”, Springer (2010)
- 3) D. G. Lowe: “Distinctive image features from scale-invariant keypoints”, *Int'l J. Computer Vision*, **60**, 2, pp. 91–110 (2004)
- 4) S. M. Seitz, B. Curless, J. Diebel, D. Scharstein and R. Szeliski: “A comparison and evaluation of multi-views stereo reconstruction algorithms”, *Proc. Int'l Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 519–528 (2006)
- 5) Y. Furukawa, B. Curless, S. M. Seitz and R. Szeliski: “Towards internet-scale multi-view stereo”, *Proc. Int'l Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1434–1441 (2010)
- 6) K. Mikolajczyk and C. Schmid: “A performance evaluation of local descriptors”, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **27**, 10, pp. 1615–1630 (2005)
- 7) D. Scharstein and R. Szeliski: “A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms”, *Int'l J. Computer Vision*, **47**, 1, pp. 7–42 (2002)
- 8) 徐, 辻: “3次元ビジョン”, 共立出版 (1998)
- 9) 一般社団法人カメラ映像機器工業会: “Exif2.3 metadata for XMP”. http://www.cipa.jp/english/hyoujunksa/kikaku/pdf/DC-010-2012_E.pdf

- 10) M. A. Fischler and R. C. Bolles: “Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography”, *Commun. ACM*, **24**, 6, pp. 381–395 (1981)
- 11) D. Nister: “An efficient solution to the five-point relative pose problem”, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **26**, 6, pp. 756–770 (2004)
- 12) H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars and L. Van Gool: “Speeded-up robust features (SURF)”, *Computer Vision and Image Understanding*, **110**, 3, pp. 346–359 (2008)
- 13) S. Leutenegger, M. Chli and R. Y. Siegwart: “BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints”, *Proc. Int'l. Conf. Computer Vision*, pp. 2548–2555 (2011)
- 14) J. M. Morel and G. Yu: “ASIFT: A new framework for fully affine invariant image comparison”, *SIAM J. Imaging Sciences*, **2**, 2, pp. 438–469 (2009)
- 15) 岡谷: “バンドルアジャストメント”, *研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア*, **167**, 37, pp. 1–16 (2009)
- 16) M. I. A. Lourakis and A. A. Argyros: “SBA: A software package for generic sparse bundle adjustment”, *ACM Trans. Mathematical Software*, **36**, 1, pp. 1–30 (2009)
- 17) J. Bouguet: “Camera Calibration Toolbox for Matlab”. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/
- 18) 清水, 奥富: “画像のマッチングにおけるサブピクセル推定の意味と性質”, *信学論*, **J85-DII**, 12, pp. 1791–1800 (2002)
- 19) K. Takita, M. A. Muquit, T. Aoki and T. Higuchi: “A sub-pixel correspondence search technique for computer vision applications”, *IEICE Trans. Fundamentals*, **E87-A**, 8, pp. 1913–1923 (2004)
- 20) Z. Timo, J. Schmidt and H. Niemann: “Point set registration with integrated scale estimation”, *Proc. Int'l Conf. Pattern Recognition and Image Processing*, pp. 116–119 (2005)
- 21) Z. Zhang: “Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations”, *Proc. Int'l Conf. Computer Vision*, **1**, pp. 666–673 (1999)
- 22) S. Leutenegger: “BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints”. <http://www.asl.ethz.ch/people/lestefan/personal/BRISK>
- 23) “Open Computer Vision Library”. <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/>
- 24) D. Lowe: “Demo Software: SIFT Keypoint Detector”. <http://www.cs.ubc.ca/~lowe/keypoints/>
- 25) J. M. Morel and G. Yu: “SIFT and ASIFT – online demo: try if your images match!”. <http://www.cmap.polytechnique.fr/~yu/research/ASIFT/demo.html>
- 26) N. Snavely: “Bundler: Structure from Motion (SfM) for Unordered Image Collections”. <http://phototour.cs.washington.edu/bundler/>
- 27) 柴原, 沼, 長嶋, 青木, 中島, 小林: “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*, **J91-D**, 9, pp. 2343–2356 (2008)
- 28) アイファイジャパン株式会社: “Eye-Fi カード”. <http://www.eyefi.co.jp/>
- 29) “Point cloud library”. <http://pointclouds.org/>
- 30) S. N. Sinha, J. M. Frahm, M. Pollefeys and Y. Genc: “Feature tracking and matching in video using programmable graphics hardware”, *Machine Vision and Applications*, **22**, 1, pp. 207–217 (2011)
- 31) M. Miura, K. Fudano, K. Ito, T. Aoki, H. Takizawa and H. Kobayashi: “GPU implementation of phase-based stereo correspondence and its application”, *Proc. Int'l Conf. Image Processing*, pp. 1697–1700 (2012)



みうら まる
三浦 衛 2010年、東北大学工学部電気情報物
理工学科卒業。2012年、同大学院情報科学研究科修士
課程修了。現在、同大学院情報科学研究科博士課程在学
中。画像処理に関する研究に従事。



さかい しゅうじ
酒井 修二 2010年、東北大学工学部電気情報物
理工学科卒業。2012年、同大学院情報科学研究科修士
課程修了。現在、同大学院情報科学研究科博士課程在学
中。画像処理に関する研究に従事。



いし い じゅんぺい
石井 純平 2011年、東北大学工学部情報知能シ
ステム総合学科卒業。2013年、同大学院情報科学研究
科修士課程修了。同年、東北電力株式会社に入社。現在
に至る。



やまお そうすけ
山尾 創輔 2013年、東北大学工学部情報知能シ
ステム総合学科卒業。現在、同大学院情報科学研究科
修士課程在学中。画像処理に関する研究に従事。



いとう こういち
伊藤 康一 2000年、東北大学工学部電子工学科
卒業。2005年、同大学院情報科学研究科博士課程修
了。同年同大学院情報科学研究科助手、2007年、同助
教。2004-2005年、日本学術振興会特別研究員。現在に
至る。画像処理およびバイオメトリクスに関する研究に
従事。博士(情報科学)。正会員。



あおき たかふみ
青木 孝文 1988年、東北大学工学部電子工学科
卒業。1992年、同大学院工学研究科博士課程修了。同
年同大学・工・助手、1994年、同大学院情報科学研究
科助手、1996年、同助教授、2002年、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。博士(工学)。
正会員。