

3次元形状の推定に基づく 歴史的資料の高精細記録

深谷正和^{†1} 川嶋稔夫^{†1}

折れや巻癖などの形状劣化がある文化財をステレオ撮影し、対象の3次元形状を計測して形状劣化を補正しながらモザイクングを行うことで、形状劣化がない高精細な画像を得る手法を提案する。プロジェクタを用いて空間コード化法と位相シフト法のパターンを対象に投影することでステレオ撮影の対応点を検出し、高密度の3次元形状計測とモザイクングを行ったのち形状劣化補正を行う。特徴点ベースのモザイクングと比べ、形状計測を行うことで形状劣化がある対象でも画像を滑らかにつなぎ合わせる事ができる。

High-resolution Imaging of Historical Documents Based on Three-dimensional Measurement

MASAKAZU FUKAYA^{†1} and TOSHIO KAWASHIMA^{†1}

This paper presents a technique for high-resolution image restoration of historical documents originally suffering from geometrical distortion such as curls and cusps using 3D shape measurement and image mosaicing. Our stereo-measurement is based on gray-code and phase-shift pattern projection. High resolution 3D images are integrated based on feature matching, and are flattened using optimization under planar shape constraint.

1. 背景と目的

歴史的な文化財をデジタル化して保存、次世代に継承するデジタルアーカイブは貴重

資料を安全に活用する為に極めて有効な手段である。デジタル化にはスキャナを用いて対象をデータ保存する手法があるが、この手法では入力エリアの大きさに依存してスキャナの筐体も大型化・重量化するため、A2版以上の大型画像の入力には困難を伴う。また、通常のフラットベッドスキャナでは貴重な文化財を破損する可能性もある。

そこで、デジタルカメラを用いて対象を非接触でデジタル化するフェイスアップスキャナが利用される。しかしデジタルカメラで撮影されたデータは解像度でスキャナに劣り、対象を高精細に記録することができない。そのために対象を分割撮影し、その画像群をつなぎ合わせることで高精細な画像を保存する手法^{1),2)}や、ビデオカメラで撮影させた映像を structure from motion によりつなぎ合わせる手法³⁾がある。ただし、これらの研究の対象は局所的な折れや巻癖のない、滑らかな紙面を対象としている。歴史的な文化財である絵画や巻物などは、保存状態によっては折れや巻癖などがついているため、これらの方法では滑らかにモザイクングできない。

一方で折れや巻癖などの形状劣化をデジタル補正する研究⁴⁾⁻⁶⁾もされている。折れや巻癖がついてしまった資料などの劣化補正は対象の3次元形状を計測して補正をする。従来の研究では市販のレンジセンサなどを使って3次元形状の計測をしている。しかし市販のレンジセンサなどは解像度が低い場合が多く高精細でデジタル化することが難しい。画像情報だけで形状劣化を補正している研究^{7),8)}もあるが撮影対象が限られてしまう。

そこで我々は、絵画資料の折れや巻癖などをプロジェクタとステレオ撮影を用いて解像度の高い画像を撮影し、3次元形状を計測してデジタル修復する。さらに分割撮影された画像をモザイクングすることで、原資料を復元し高精細に保存することを目的としている。

2. 文書の撮影保存

形状の歪みを補正するためには、折れや巻癖の箇所の高密度の3次元形状を得る必要がある。その為に今回、我々はプロジェクタとステレオ撮影を用いることによって資料の高密度な3次元形状を非接触計測する。

3次元形状はステレオ撮影で撮影された画像間の対応点情報から計測することができる。ただし計測できるのは対応点情報が得られた点だけになる。特徴点ベースの対応点検出では高密度な情報が取得できないのでプロジェクタで対象にパターンを投影することでステレオ撮影の対応点情報を高密度に取得する。パターンには空間コード化法と位相シフト法の2種類のパターン投影をする。空間コード化法ではプロジェクタの解像度がカメラの解像度に劣るために空間をコード化しきれないので、位相シフト法を併用することで密な対応点

^{†1} 公立はこだて未来大学
Future University-Hakodate

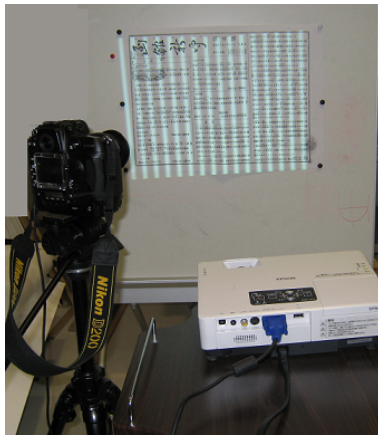


図 1 撮影



図 2 細部の表示

を検出する。1つのカメラと1つのプロジェクタでも高密度な3次元形状の計測はできるが、その場合はカメラとプロジェクタ間のキャリブレーションが必要であることに加え、プロジェクタから投影される映像のガンマ曲線の非線形性のために、カメラで撮影した輝度とPC上でのパターンの輝度に誤差が出てしまい、対応点に誤差が生じて3次元形状計測の精度も悪くなる^{9)–11)}。そこで、今回はプロジェクタから投影されたパターンをステレオ撮影することで3次元形状を計測する。撮影する際のカメラとプロジェクタは図1のように配置する。実際に使用するカメラは1台で、最初の撮影位置で撮影をしたあとカメラを移動させて違う撮影位置で撮影を行う。

対象全体が画像内に収まるように撮影された画像は、対象の大きさによっては図2のようにdpiが低く、細部まで高精細に表示することができない。この問題を解決するために対象を十分高いdpiが得られる撮影位置で分割撮影していき、その撮影された画像群をモザイクキングすることで対象を1枚の画像に高精細に保存する。通常、違う撮影位置で撮影された画像を使ってモザイクキングをすると視差が生じてしまうので、折れや巻癖などの箇所を滑らかにつなぎ合わせることは難しい。しかし今回は3次元形状を計測するので、各画像間の3次元形状を統合することでモザイクキングをすることができる。

保存する際には、そのままアーカイブするだけでなく、3次元測定をされた形状歪みを持つ資料を平面状に延伸することで原資料を復元して記録する。

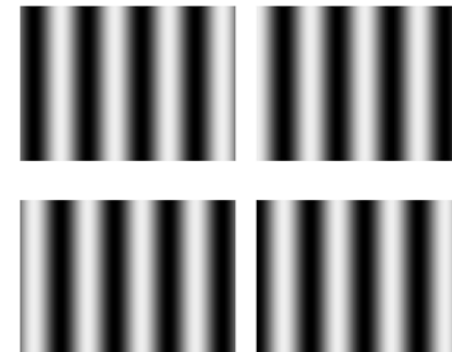


図 3 正弦波を $\pi/2$ ずつシフトさせた位相パターン

2.1 対応点検出

対応点の検出には位相シフト法¹²⁾を用いる。位相シフト法とは正弦波パターンの周期を変えながら投影することで位相を計算し、対応を求める手法である。

今回は図3のように正弦波パターンを $\pi/2$ ずつ4回シフトさせた画像をプロジェクタで対象に投影しながら撮影をして位相を求めた。撮影された4枚の画像の輝度値から次の式で位相 θ が計算できる。

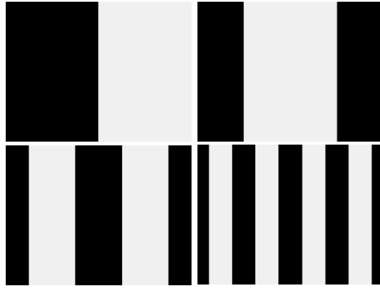


図4 グレイコード

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \frac{i_3(x, y) - i_1(x, y)}{i_0(x, y) - i_2(x, y)} \quad (1)$$

(x, y) は画像の画素の座標で $i_0 \sim i_3$ は4回撮影された各画像の (x, y) における画素の輝度である。

ただし位相シフト法では1周期以上離れた位相を判別することができないので、同時に図4のグレイコードも投影して撮影し、空間コード化法¹³⁾で領域分割をして位相接続することで、ステレオ撮影された画像間の対応点を求める。

2.2 3次元形状計測

通常のカメラで撮影された画像はレンズの影響でわずかな幾何学的歪みを含んでいる。そこでZang¹⁴⁾の手法でカメラキャリブレーションをすることでカメラ固有のパラメータである内部パラメータを求め、内部パラメータを使って画像の歪み補正をし、補正後の対応点情報を使って3次元形状を計測する。2.1で求めた2つの画像間の対応点 (x, y) , (x', y') は基礎行列 \mathbf{F} を介して次の関係を満たす。

$$\begin{pmatrix} x' & y' & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = 0 \quad (2)$$

ここで $f_{11} \sim f_{33}$ は基礎行列 \mathbf{F} の要素である。基礎行列 \mathbf{F} は2つの画像の8組以上の対応点から8点アルゴリズムを使って求められる。

基礎行列が求められた後、次の式から基本行列 \mathbf{E} を求める。

$$\mathbf{E} = \mathbf{A}^T \mathbf{F} \mathbf{A} \quad (3)$$

\mathbf{A} は事前にカメラキャリブレーションで求めたカメラの内部パラメータである。基本行列 \mathbf{E} を分解するとカメラの外部パラメータである平行移動ベクトル \mathbf{t} と回転行列 \mathbf{R} が求められる。手順としては、まず $\mathbf{E}\mathbf{E}^t$ の最小の固有値を求め、その固有値に対応する固有ベクトルとして平行移動ベクトル \mathbf{t} を求める。さらに次の式のように特異値分解を行う。

$$-\mathbf{t} \times \mathbf{E} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad (4)$$

ここで $-\mathbf{t} \times \mathbf{E}$ は \mathbf{t} と \mathbf{E} の各列との外積を列とする行列を表している。回転行列 \mathbf{R} は次の式で求められる。

$$\mathbf{R} = \mathbf{U} \text{diag}(1, 1, \det(\mathbf{U}\mathbf{V}^T)) \mathbf{V}^T \quad (5)$$

平行移動ベクトル \mathbf{t} と回転行列 \mathbf{R} が求めれば透視投影行列 \mathbf{P} が得られ、次の式の解として対応点の3次元空間の位置 $\mathbf{X} = (x, y, z)^t$ が求められる。

$$\begin{pmatrix} p_{31}x - p_{11} & p_{32}x - p_{12} & p_{33}x - p_{13} \\ p_{31}y - p_{21} & p_{32}y - p_{22} & p_{33}y - p_{23} \\ p'_{31}x' - p'_{11} & p'_{32}x' - p'_{12} & p'_{33}x' - p'_{13} \\ p'_{31}y' - p'_{21} & p'_{32}y' - p'_{22} & p'_{33}y' - p'_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{14} - p_{34}x \\ p_{24} - p_{34}y \\ p'_{14} - p'_{34}x' \\ p'_{14} - p'_{34}y' \end{pmatrix} \quad (6)$$

式(6)は未知数が3に対して方程式が4あるので最小二乗法で解く。

2.3 3次元形状統合

分割撮影された画像を接合するために、各撮影位置の画像で計測された3次元形状を使う。計測された3次元形状は撮影位置ごとに座標系が異なりそのままでは統合できない。統合には各撮影位置で分割撮影された画像間の対応点が必要になる。この対応点は自動化も不可能ではないが、今回は事前に手で指定することにする。

対応関係がある1枚目の画像の i 番目の3次元座標を X_i とし、2枚目の画像の i 番目の3次元座標を X'_i とすると次の関係式で表すことができる。

$$\mathbf{X}_i = s\mathbf{R}\mathbf{X}'_i + \mathbf{t} \quad (7)$$

s は1枚目の画像のスケールに対する2枚目の画像の相対的なスケールであり、 \mathbf{R} と \mathbf{t} は1枚目と2枚目の関係を表す回転行列と並進ベクトルである。事前に手で指定した対応関係から s と \mathbf{R} と \mathbf{t} を求めることで3次元形状を統合し、各撮影位置の画像をモザイクングする。

2.4 平面化

平面化は、2.2で得られた3次元点からドロネー三角網で三角メッシュを生成して、すべてのメッシュの奥行き方向 z が0になるように少しずつ重力を加えながら x と y を引き伸

ばしていくことで対象を平面化する。

平面化にはメッシュ間の距離の保存を拘束条件として設定した。

$$\sum_{j \in e_i} \|\hat{d}_{ij} - d_{ij}\|_2 = 0 \quad (8)$$

\hat{d}_{ij} は計測された 3 次元点から生成された三角メッシュの i 番目の頂点と i に隣接するノード j の頂点間の距離であり、 e_i は i の隣接するノード集合を表す。 d_{ij} は頂点に重力を加えて平面化した後の頂点間の距離である。 i 番目の頂点の座標を $\mathbf{X}_i = (x, y, z)$ とすると $d_{ij} = \|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j\|_2$ である。この式 (8) を満たすために、2.2 で計測された奥行き z に $z = 0$ になるように少しずつ重力方向の力を加えながら、次の式で頂点の座標 \mathbf{X}_i を更新していく。

$$\mathbf{X}_i(t+1) = \mathbf{X}_i(t) + K \sum_{j \in e_i} (\hat{d}_{ij} - d_{ij}) \frac{\mathbf{X}_i(t) - \mathbf{X}_j(t)}{d_{ij}} - (0, 0, G)^T \quad (9)$$

$\mathbf{X}_i(t)$ は t 回更新された点 i の 3 次元座標であり、 K と G は任意の定数である。計測された 3 次元点を式 (8) を満たすまで式 (9) で更新を繰り返すことで、形状歪みがある対象を平面化する。

3. 実験

3.1 3次元形状計測精度

プロジェクタとステレオ撮影による 3 次元形状の計測の精度を調べる為に、30cm × 20cm の平面ボードの 3 次元形状を計測し、得られた点群を平面にフィッティングすることで各計測点と平面との誤差を求めた。撮影にはデジタルカメラ NikonD2X、パターン投影用プ

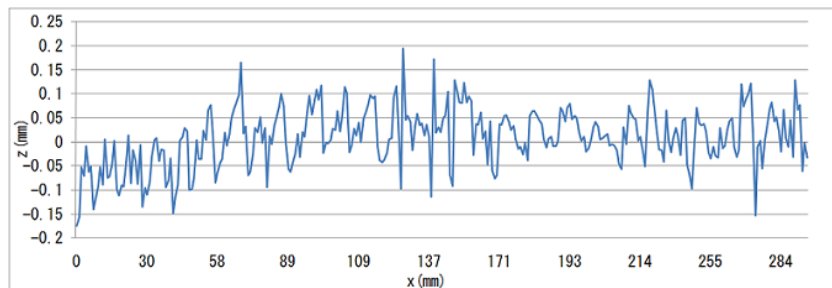


図 5 平面ボードの計測結果

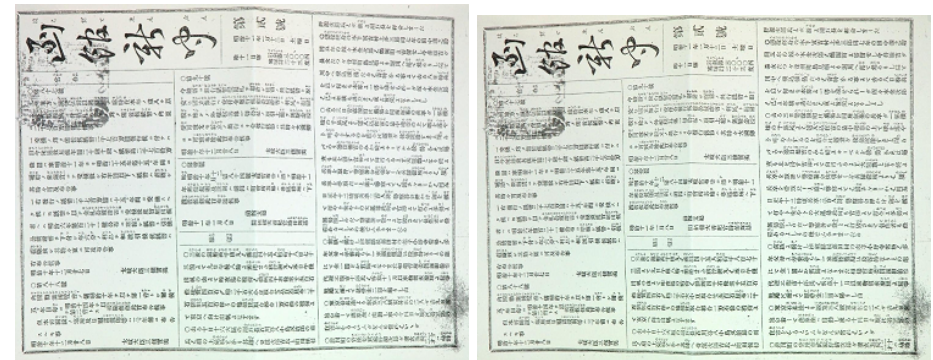


図 6 入力画像 (左:撮影位置左 右:撮影位置右)

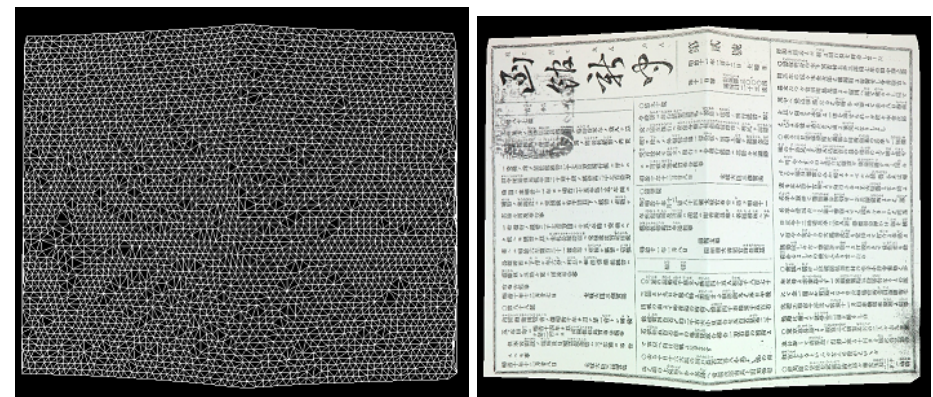


図 7 計測結果 (左:計測された点のメッシュ 右:テクスチャマッピング)

ロジェクタはエプソン EMP-1715 を使用した。

計測された 3 次元データのある断面に沿った奥行き変位を図 5 に示す。RMS 値を計算したところ $50 \mu\text{m}$ であった。30cm の範囲内の誤差は $50 \mu\text{m}$ 程度であると推察される。

次に、実際に折れを有する対象で撮影を行い 3 次元計測をした。図 6 がステレオ撮影された入力画像であり、計測された復元結果を図 7 に示す。対応点が高密度で検出できているので、形状も高密度で計測できている。折れ部分に対しても図 8 から形状が計測できている

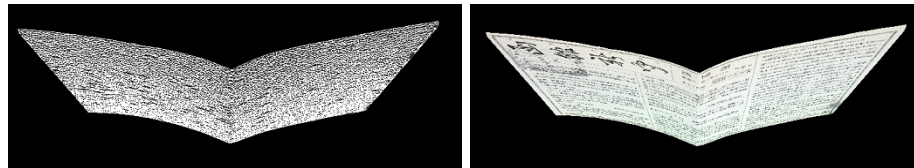


図8 計測結果 (左:計測された点のメッシュ 右:テキストチャマッピング)

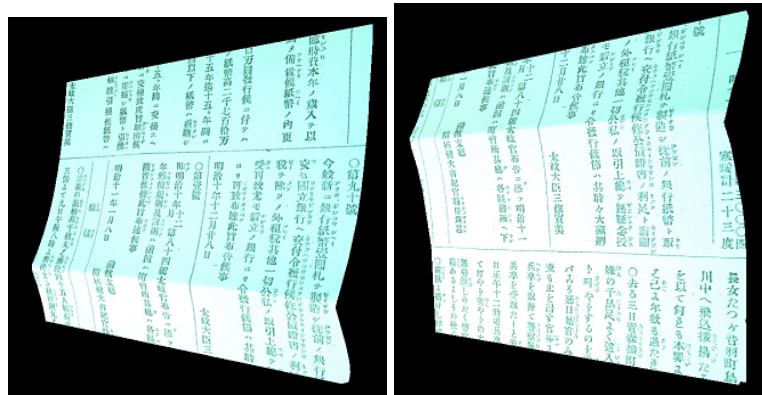


図9 左:上部部の分割撮影 右:下部部の分割撮影

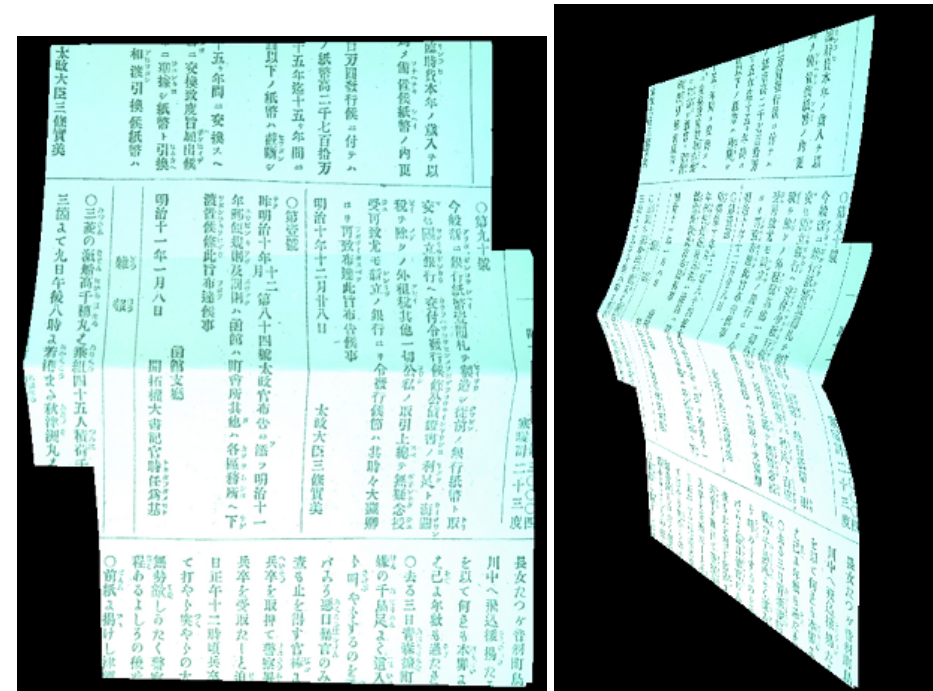


図10 モザイク画像

のがわかる。

3.2 モザイクング

対象の一部を上方部と下方部で分割撮影した画像の3次元測定結果を図9に示す。この2つの画像間に数点~数十点の対応点を手動で与えてモザイクングした結果が図10である。3次元形状を統合することによって、違う撮影位置で撮られた画像の継ぎ目がシームレスに表示されているのがわかる。

3.3 平面化

平面化には3.1で計測された結果を式(9)で延伸した結果が図11である。平面化の処理を加えることで、形状歪みがある対象が延伸されているのがわかる。実物の平面状態と延伸結果の縦横比は同じ比率であった。今回、平面化は計測点が高密度すぎると処理に時間がかかってしまったり、ノイズや誤差などの影響で(8)の拘束条件を満たさない場合もあったた

め、点を単純に間引いてメッシュを減らして実験を行った。

4. まとめ

資料の形状劣化を補正するために、プロジェクタとステレオ撮影を用いて対象の高密度な3次元形状の計測した。また、対象の3次元形状を取得したことによって従来の方法ではモザイクングが難しかった折れや巻癖があってもモザイクングを行うことができ、画像を高精度に保存することができた。そして、計測された3次元形状を使って平面化をすることで劣化状態の無い原資料の復元も行った。

しかし高密度に計測するという事はデータ数が多くなり、平面化処理の時間がかかってしまったり、ノイズや誤差の影響で平面化の拘束条件を満たさないことがあった。このことから3次元計測点の中でも折れ目や巻癖の箇所は残しつつ、平面である箇所の情



図 11 左:入力画像 右:平面化後

報を減らす必要があることがわかった。

今後は計測点の単純化を行うことで平面化の最適化を行ない、折れや巻癖から生じる陰影などを、3次元形状を基に陰影を補正する必要もある。そして大型の文化財を分割撮影することで300dpi以上の画像の記録を実現したいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 中居友弘, 黄瀬浩一, 岩村雅一: 特徴点の局所的配置に基づく文書画像モザイクングの実験的検討, *PRMU*, Vol.108(432), pp.157-162 (2009).
- 2) 鈴木優輔, 山下淳, 金子透: ステレオビジョンシステムによる歪曲形状文書画像の歪み補正, *ViEW2007*, pp.353-358 (2007).
- 3) 佐藤智和, 池谷彰彦, 池田聖, 神原誠之, 中島昇, 横矢直和: 動画像からの3次元復元による湾曲した紙面のビデオモザイクング, *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol.88, No.8, pp.1490-1498 (2005).
- 4) M.Sun, R.Yang, L.Yun, G.London, B.Seales and M.Bown.: Geometric and Photometric Restoration of Distorted Documents, *Proceedings of the Tenth IEEE International Conference on Computer Vision*, Vol.2, pp.1117-1123 (2005).

- 5) L.Zhang, Y.Zhang and C.Tan.: An Improved Physically-Based Method for Geometric Restoration of Distorted Document Images, *Proceedings of the Tenth IEEE International Conference on Computer Vision*, Vol.30, No.4, pp.728-734 (2008).
- 6) KB.Chu, L.Zhang, Y.Zhang and CL.Tan: A Fast and Stable Approach for Restoration of Warped Document Images, *Proceedings of the Eighth International Conference on Document Analysis and Recognition*, pp.384-388 (2005).
- 7) MS.Brown and D.Tsoi: Correcting common distortions in camera-imaged library materials, *Proceedings of the 3rd ACM/IEEE-CS joint conference on Digital libraries*, pp.367-368 (2003).
- 8) J.Liang, D.DeMenthon and D.Doermann: Geometric rectification of camera-captured document images, *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, Vol.30, pp.591-605 (2008).
- 9) S.Zhang and PS.Huang: Novel method for structured light system calibration, *Optical Engineering*, Vol.45, pp.1-8 (2006).
- 10) S.Zhang and PS.Huang: Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector, *APPLIED OPTICS*, Vol.46, pp.36-43 (2007).
- 11) 戸塚聡, 古川亮, 川崎洋: プロジェクタ・カメラシステムのレスポンス関数を用いた位相シフト法によるアクティブ・ステレオの精度向上, *MIRU2009 論文集*, pp.1594-1599 (2009).
- 12) 三高良介, 濱田長生: 位相シフト法による高速高精度3次元計測技術, *松下電工技報*, pp.10-15 (2002).
- 13) 川崎洋, 大沢裕, 古川亮: 空間コード化法を用いた未校正ステレオシステムによる密な3次元形状復元, *MIRU2005 予稿集*, pp.1268-1275 (2005).
- 14) Z.Zhang: A Flexible New Technique for Camera Calibration, *Technical Report MSR-TR-98-71* (1998).
- 15) デジタル画像処理編集委員会: デジタル画像処理, 財団法人画像情報教育振興協会 (2004).
- 16) 徐剛: 写真から作る3次元CG, 近代科学社 (2001).