

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

Correction of Distorted Document Images Using a Stereo Vision System

鈴木優輔 †, 山下淳 †, 金子透 †

Yusuke SUZUKI† Atsushi YAMASHITA† and Toru KANEKO †

†:静岡大学工学部, {f0630042,tayamas,tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

概要 本研究では、ステレオカメラで取得した文書画像に対し歪み・陰影補正を行い、高精細な画像を得る手法を提案する。分厚い書籍等を撮影する場合、紙面の湾曲により画像中に歪みや陰影が生じる。そこで、ステレオ計測により紙面形状を計測・復元し、湾曲部の歪みを補正する。その際、左右画像の合成を行い、お互いに見えにくい部分同士を補完する。その後、紙面上での光の反射を計算し、鏡面反射や陰影の補正を行う。実験結果より、提案手法の有効性が確認された。

1 序論

近年、書籍等の既存文書のデジタル化が盛んに行われている。オフィス環境等に存在する膨大な資料をデジタル化することにより、省スペース化や資料検索効率の向上が期待できる。また、古書のような貴重な資料をデジタル保存も重要な研究である [1]。

紙面データをコンピュータに取り込む手法としては、フラットベッドスキャナが広く用いられている。しかし、分厚い書籍を対象とする場合、綴じ目部分がスキャナ面に密着しないことにより、文字の歪みや陰影が生じる。上記の問題を解決するためには、紙面の3次元形状を考慮した補正が必要となる。

書籍画像の歪み・陰影を補正する手法がいくつか提案されている。画像取得方式で大別すると、スキャナベースの研究とカメラベースの研究とに分けられる。

スキャナベースの研究としては、Shape from shading を用いた手法が提案されている [2, 3]。スキャナで取得した書籍画像にはスキャナ面から紙面までの距離に応じた陰影が生じるため、陰影から距離を逆算して紙面全体の形状を推定することができ、歪み・陰影補正が可能となる。しかし、貴重な書籍を対象とする場合、紙面がスキャナ面と接触して傷む可能性が問題となる。また、ページをめくるたびに書籍をスキャナ面に設置しなおす手間もかかる。

一方、カメラベースの研究も盛んに行われている [4, 5]。カメラにより非接触的に画像を取得すると、書籍の傷みを気にする必要がなくなる。また、書籍を見開いた状態で撮影することができ、ページをめくるたびに書籍を設置しなおす手間も改善される。

カメラベースの研究において解決すべき問題として、以下の3点がある。1点目は、文字の傾き、歪みの問題である。これらはOCRの精度低下の原因となるため、紙面の3次元形状や射影変換による画像の幾何歪み等を考慮した補正が必要となる。2点目は、陰影の問題である。スキャナの場合は綴じ目部分の陰影のみが問題となっていたが、カメラの場合は照明条件の不均質性により紙面全体で陰影を考慮する必要がある。3点目は、鏡面反射の問題である。光沢のある紙面の場合、紙面上で鏡面反射が生じて観測が阻害され、画像情報が失われることがある。上記の問題全てを解決する手法が望まれる。

Shape from shading を用いたカメラベースの手法として、[6, 7] がある。取得画像の陰影から3次元形状を推定し、歪み・陰影補正を行うことが可能である。ただし、照明環境や紙面の反射特性といった多数の基準データを準備しておく必要がある。

また、紙面形状をレーザレンジファインダで直接計測して歪みを補正する手法も提案されている [8]。ただし、この手法では陰影の問題が考慮されていな

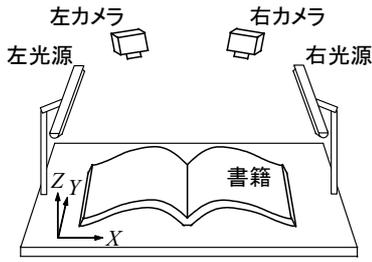


図 1: 装置の概略

い。更に、レーザとカメラという 2 種類の装置が必要であるため、カメラだけで画像取得と計測の両方を行うことができる手法と比較すると効率が良くない。

陰影情報やレーザを用いない手法も提案されている [9–12]。これらの手法では、紙面を円筒面といった曲面でモデル化した後、歪みを補正する。しかし、[12] 以外の手法では陰影の問題が考慮されていない。また、これまで挙げた手法に共通の問題として、鏡面反射の問題への対応がなされていないことがある。更に、上記手法は全て 1 視点だけで撮影しているため、縦じ目のように紙面がカメラに対して傾いている領域では取得画像が低解像度になる。元画像がそもそも低解像度で文字が潰れてしまっている場合は、歪みを補正しても良好な結果は得られない。

上記の問題を解決するには、撮影視点を増やす必要がある。そこで、ステレオカメラを用いる手法 [13,14] や、動画像によるビデオモザイクを行う手法 [15] が提案されている。[13, 14] ではステレオ計測により、[15] では動画像からの Structure from motion により紙面形状を計測し、歪み補正を行う。しかしこれらの手法も、陰影や鏡面反射についての考慮が不十分という問題が残されている。

上記の通り様々な従来手法が提案されているが、歪み・陰影・鏡面反射・撮影視点数といった問題全てに対応した手法は提案されていない。そこで本研究では、上記の問題全てに対応することを目的とする。ステレオカメラを用い、紙面の幾何学的歪みと、陰影や鏡面反射といった光学的歪みの両方を補正する。

装置の概略を図 1 に示す。見開いた書籍の上方にステレオカメラを、左右に光源を配置する。光源はオンオフを任意に切り替えることができる。条件として、カメラと光源の位置・姿勢は既知とする。また、紙面の反射特性については、紙面上の全領域において一定であるとする。座標系は図 1 のように、書

籍の配置面を X - Y 平面、高さ方向を Z 軸とする。

2 幾何学的歪みの補正

2.1 3次元形状計測

本研究では、正規化相互相関によるテンプレートマッチングを用いたステレオ計測により紙面形状を計測する。その際輻輳ステレオで撮影を行い、左右カメラでの見え方に差をつける。これにより、片方の画像では大きく歪んでいる部分でも、もう片方の画像では歪みが小さくなるため、紙面全体について良好なテクスチャを得ることができる。

2.2 形状復元

2.2.1 変局部の検出

本研究では紙面形状を NURBS 曲面近似して復元するが、その前に縦じ目等の変局部をあらかじめ検出しておく。検出した変局部を端点としその間を NURBS 曲面近似することにより、滑らかな曲面を生成する。

変局部は、ステレオ計測結果から紙面の傾き変化を調べて検出する。変局部では紙面の傾き変化が大きくなるため、この部分を変局部として検出する。

変局部検出後、検出した点群を X - Y 平面上に投影して Hough 変換による直線検出を行い、書籍の縦じ目や折れ目を検出する。

2.2.2 NURBS 曲面による近似

NURBS 曲面は B スプライン基底関数の線形結合として表現できる。曲面の方程式は、 $Q_{ij}(0 \leq i \leq m-1, 0 \leq j \leq n-1)$ を制御点とするパラメータ u, v の関数 $P(u, v)$ として、式 (1) で表される。

$$P(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} w_{ij} B_{i,K}(u) B_{j,K}(v) Q_{ij}}{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} w_{ij} B_{i,K}(u) B_{j,K}(v)} \quad (1)$$

上式において、 $B_{i(j),K}$ は次数 K の B スプライン基底関数、 w は制御点の重みである。各制御点に対して B スプライン基底関数を求め、その値を係数として制御点を足し合わせて、NURBS 曲面を生成する [16]。

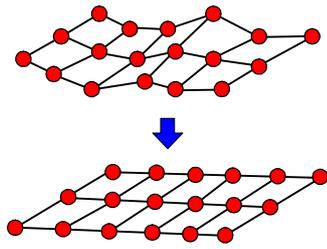


図 2: 物理シミュレーションによる引き伸ばし

制御点はステレオ計測結果の 3 次元座標値をもとに決定する。X-Y 平面上に格子状の領域を作成し、各格子内に存在する紙面の Z 座標値の平均値を制御点の Z 座標値とする。X, Y 座標値については各格子の中心座標値を用いる。

2.3 曲面の引き伸ばし

本研究では NURBS 曲面で復元した紙面形状を 4 角形メッシュでモデリングした後、物理シミュレーションを用いて曲面の引き伸ばしを行う (図 2)。初期形状のメッシュ各頂点に力 (重力, 引き伸ばし力) を加えることにより、紙面が平らに変形させる。

紙面の変形を計算するために、 N 個のメッシュ頂点それぞれでニュートンの運動方程式を考える。メッシュ頂点の位置ベクトルを r_i 、質量を m_i 、微小時間を h とする。ニュートンの運動方程式を Verlet の方法を用いて差分化すると、時刻 t におけるメッシュ頂点 $i (i=1 \sim N)$ について、次の式が得られる。

$$r_i(t+h) = 2r_i(t) - r_i(t-h) + \frac{h^2}{m_i} F_i(t) \quad (2)$$

$F_i(t)$ は、時刻 t においてメッシュ頂点 i が受ける力であり、以下の式で与えられる。

$$F_i(t) = k(r_i(t) - r_i(t-h)) + F_G + (F_T)_i \quad (3)$$

k はメッシュ頂点間の弾性定数、 F_G は重力 (Z 軸方向)、 $(F_T)_i$ は引き伸ばし力 (X - Y 平面に平行、メッシュ中心点から遠ざかる方向) である。それぞれ、適切な任意の定数値を与えておく。

式 (2)、(3) を用いて微小時間 h 毎にメッシュ頂点位置 r_i を更新し、紙面の変形を計算していく。そして、全頂点の Z 座標値がある一定値から許容幅 T 内に収束したら変形計算を終了する。その後、変形後の座標位置に変形前の座標位置の画素値を線形補間して当てはめていき、歪み補正画像を生成する。

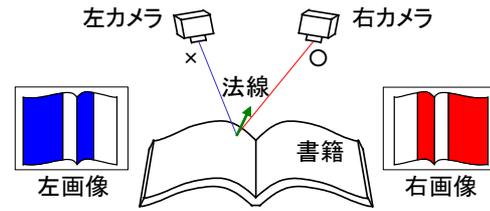


図 3: ステレオ画像合成

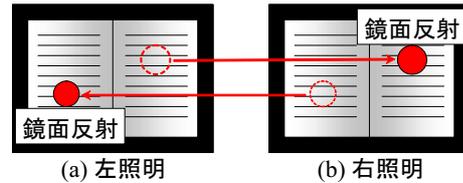


図 4: 鏡面反射領域の補完

2.4 ステレオ画像合成

引き伸ばし処理の際、メッシュ毎に紙面の初期法線方向を算出し、左右カメラ視線と紙面法線との角度差を計算しておく。この角度差が小さいほど紙面が正面方向から撮影されており、高精細なテクスチャが得られている。そこで、左右から角度差が小さい方を場所毎に判定し、左右画像の合成を行う (図 3)。

3 光学的歪みの補正

3.1 鏡面反射除去

光沢のある紙面の場合、紙面上で鏡面反射が生じる場合がある。紙面上の点 $P(x, y, z)$ から鏡面反射方向へ向かうベクトルと、点 P から視線方向へ向かうベクトルとがなす角度を ψ とする。このとき Phong の反射モデルにより、点 P における鏡面反射光のうち、反射方向から角度 ψ をなす方向への鏡面反射光強度 $I_h(x, y, z)$ は、式 (4) で表すことができる。

$$I_h(x, y, z) = I_{in}(x, y, z) k_d \cos^n \psi \quad (4)$$

上式において、 $I_{in}(x, y, z)$ は点 P への入射光強度、 k_s は紙面の鏡面反射率、 n はハイライト特性を表す係数である。 k_s 、 n は紙面の材質により決定される。

式 (4) では ψ が大きくなるにつれて I_h が減少する。そこである閾値角度 ψ_0 を定め、 $\psi < \psi_0$ となる領域を I_h が十分に大きい鏡面反射領域として検出する。

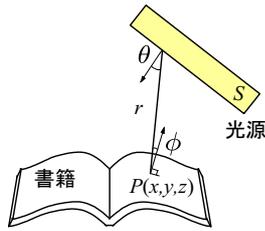


図 5: 反射のモデル化

鏡面反射領域は、照明方向変化画像の合成により補完する(図4)。照明方向を左・右と切り替えることにより、鏡面反射位置を変化させる。これにより、片方の画像中で失われているテクスチャ情報を、もう片方の画像を用いて補完することが可能となる。

3.2 陰影補正

3.2.1 環境光の除外

陰影補正は、紙面上での光の反射を計算することにより行う。その際、環境光の影響を考慮すると計算が複雑化するため、始めに環境光の影響を除外する。

環境光の除外には画像の差分を利用する。環境光のみが存在する条件下で取得した画像と、環境光と光源とが存在する条件下で取得した画像との差分を取ることで、環境光による反射成分を除外する。

3.2.2 反射のモデル化

次に、紙面上での光の反射をモデル化する(図5)。拡散反射のみを考えた場合、紙面上の点 $P(x, y, z)$ における反射光強度 $I(x, y, z)$ は、式(5)で表される。

$$I(x, y, z) = k_d I_q \iint_S \frac{\cos \theta}{r^2} \cos \phi ds \quad (5)$$

式(5)において、 k_d は紙面の拡散反射率、 I_q は光源光の強度、 S は光源の面積、 θ は光源に垂直な方向と光線方向とのなす角、 r は光源と点 P との距離、 ϕ は紙面法線と光線方向とのなす角である。 k_d, I_q を一定とすると、反射光強度は光源からの距離 r の2乗に反比例し、受光面角度 θ の余弦に比例する。この反射光強度値の変動により陰影が生じる。

光源光が紙面自身により遮られ、影領域が生じることがある。そこで、光源光の光線追跡を行い、任意点 P に向かう光線が紙面により遮られるとき、点 P

を影領域と判定する。影になると判定された光線については、式(5)による反射光強度の値を0とする。

3.2.3 画像補正

紙面上での反射光強度を式(5)により計算し、それに基づき陰影補正を行う。まず、書籍画像の各画素 (i, j) 毎に反射光強度 $I(x, y, z)$ を計算する。 (i, j) と (x, y, z) の関係については、ステレオ計測時に画像 (i, j) の視差から3次元座標値 (x, y, z) を計算しているため、既知である。次に、反射光強度 $I(i, j)$ の最大値 I_{max} を求め、各画素 (i, j) 毎に反射光強度の比 $I(i, j)/I_{max}$ を計算して陰影の度合いを求める。その後、陰影を補正するために、各画素の画素値 $C(i, j)$ をそれぞれ $I_{max}/I(i, j)$ 倍に補正する。これにより、書籍中で反射光強度が小さい場所、すなわち陰影部分を明るく補正することができる。

4 実験

市販のデジタルカメラを用い、左照明と右照明、2種類のステレオ画像対を取得した(図6)。撮影は、光の強さに線形なデータをとるためにRAW形式で行った。光源には線光源を2つ用いた。

ステレオ計測結果からNURBS曲面により紙面形状を復元した後、物理シミュレーションによる曲面の引き伸ばしを行った。形状復元および歪み補正結果を図7、図8に示す。紙面を平面に引き伸ばすことで、曲面上の歪んだ文字列を直線状に補正できている。また、左右画像の高解像度領域同士を合成することにより、縦じり目付近も綺麗に補正されている。



(a) 左画像(左照明)



(b) 右画像(左照明)



(c) 左画像(右照明)



(d) 右画像(右照明)

図 6: 書籍ステレオ画像(1936 × 1296pixels)

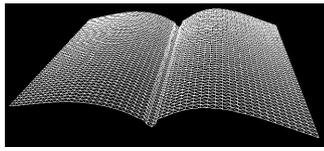
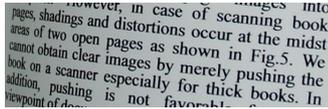
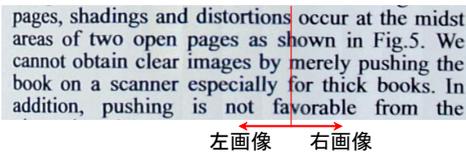


図 7: 紙面形状復元結果 1



(a) 補正前



(b) 補正後

図 8: 歪み補正結果 1

次に、鏡面反射の除去結果を図 9 に示す。(a) の画像は、上が左照明、下が右照明の画像である。照明方向変化に伴い鏡面反射位置も変化している。これらの画像を合成することにより失われたテキスト情報を補完し、(b) の結果が得られる。

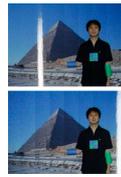
最終結果を図 10 に示す。各種処理により文字の歪み、鏡面反射、陰影が補正されている。

別のドキュメントに対しても同様の実験を行った。折りたたみ文書のステレオ画像対を図 11 に、形状復元および歪み補正の結果を図 12、図 13 に示す。上の結果と同様、歪んだ文字列を補正することができている。実験結果より本手法の有効性が確認できた。

結果の評価のために、市販の OCR ソフトを用いた文字認識実験を行った。結果を表 1 に示す。(a),(b) はそれぞれ補正前後の実験画像、(c) は書籍を物理的に平らな状態に変形させて取得した画像である。補正処理により認識率が著しく向上しており、平面状態の文字認識率とほぼ等しくなっている。以上の結

表 1: 文字認識実験結果

画像	文字認識率
(a) 補正前	63.6%
(b) 補正後	97.3%
(c) 平面状態	98.4%



(a) 照明方向変化画像



(b) 除去結果

図 9: 鏡面反射除去結果



図 10: 最終結果

果からも、本手法の有効性が確認できる。

5 結論

本研究では、ステレオカメラを用いた文書画像の歪み補正手法を提案した。ステレオ計測結果に基づき、文字の傾きや歪みといった幾何学的歪みを補正した。その際、ステレオ画像合成処理により低解像度領域を補完し、より高精細な画像を作成した。また、紙面上での光の反射を計算することにより、陰影や鏡面反射といった光学的歪みの補正も行った。

今後の課題として、歪み補正の更なる高精度化や、処理の高速化が挙げられる。

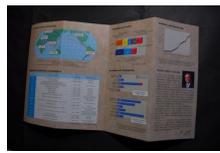
謝辞 本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金若手研究 (B)17700182 の援助を受けた。

参考文献

- [1] 櫻村雅章：歴史的に貴重な本のデジタルアーカイブ、O plus E, vol.27, no.10, pp.1134-1141, 2005.
- [2] T.Wada, H.Ukida and T.Matsuyama: Shape from Shading with Interreflections Under a Proximal Light Source, International Journal of Computer Vision, vol.24, no.2, pp.125-135, 1997.



(a) 左画像



(b) 右画像

図 11: 折りたたみ文書ステレオ画像

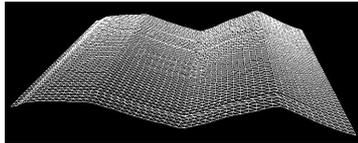
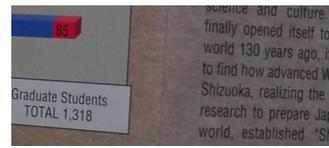
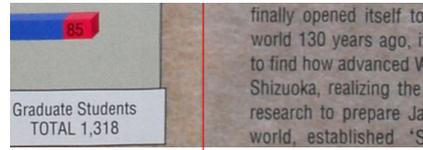


図 12: 紙面形状復元結果 2

- [3] C.L.Tan, L.Zhang, Z.Zhang and T.Xia: Restoring Warped Document Images through 3D Shape Modeling, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.28, no.2, pp.195-208, 2006.
- [4] 黄瀬浩一, 大町真一郎, 内田誠一, 岩村雅一: カメラを用いた文字認識・文書画像解析の現状と課題, 信学技報, vol.104, no.742, pp.85-90, 2005.
- [5] J.Liang, D.Doermann and H.Li: Camera-Based Analysis of Text and Documents: a Survey, International Journal on Document Analysis and Recognition, vol.7, no.2-3, 2005.
- [6] S.I.Cho, H.Saito and S.Ozawa: Shape Recovery of Book Surface Using Two Shade Images Under Perspective Condition, 電学論 C, vol.117-C, no.10, pp.1384-1390, 1997.
- [7] F.Courteille, A.Crouzil, J.D.Durou and P.Gurdjos: Towards Shape from Shading Under Realistic Photographic Conditions, Proc. 17th International Conference on Pattern Recognition, vol.2, pp.277-280, 2004.
- [8] 天野敏之, 安部勉, 西川修, 伊與田哲男, 佐藤幸男: アイスキャナによる湾曲ドキュメント撮影, 信学論 (D-II), vol.J86-D-II, no.3, pp.409-417, 2003.
- [9] M.Pilu: Undoing Paper Curl Distortion Using Applicable Surfaces, Proc. 8th IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.67-72, 2001.
- [10] H.Cao, X.Ding and C.Liu: A Cylindrical Surface Model to Rectify the Bound Document Image, Proc. 9th IEEE International Conference on Computer Vision, pp.228-233, 2003.
- [11] M.S.Brown and W.B.Seales: Image Restoration of Arbitrarily Warped Documents, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.26, no.10, pp.1295-1306, 2004.
- [12] M.S.Brown and Y.C.Tsoi: Geometric and Shading Correction for Images of Printed Materials Using Boundary, IEEE Trans. Image Processing, vol.15, no.6, pp.1544-1554, 2006.

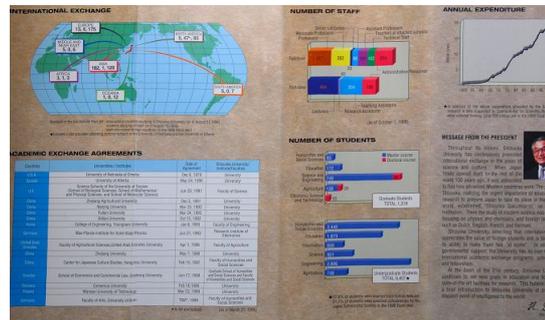


(a) 補正前



左画像 右画像

(b) 補正後



(c) 補正後 (全体)

図 13: 歪み補正結果 2

- [13] A.Ulges, C.H.Lampert and T.Breuel: Document Capture Using Stereo Vision, Proc. 2004 ACM Symposium on Document Engineering, pp.198-200, 2004.
- [14] A.Yamashita, A.Kawarago, T.Kaneko and K.T.Miura: Shape Reconstruction and Image Restoration for Non-Flat Surfaces of Documents with a Stereo Vision System, Proc. 17th International Conference on Pattern Recognition, vol.1, pp.482-485, 2004.
- [15] T.Sato, A.Iketani, S.Ikeda, M.Kanbara, N.Nakajima and N.Yokoya: Mobile Video Mosaicing System for Flat and Curved Documents, Proc. 1st International Workshop on Mobile Vision, pp.78-92, 2006.
- [16] L.Piegl and W.Tiller: The NURBS Book 2nd Edition, Springer-Verlag, New York, 1997.

鈴木優輔: 静岡大学大学院工学研究科修士課程に在籍。ステレオビジョンを用いた書籍画像補正技術の研究に従事。
 山下淳: 静岡大学工学部機械工学科助教。コンピュータビジョン, ロボットの知能化に関する研究に従事。
 金子透: 静岡大学工学部機械工学科教授。画像処理, コンピュータビジョンの研究に従事。
<http://sensor.eng.shizuoka.ac.jp>