

ステレオビジョンシステムを用いた紙面形状復元・補正

川原子 淳 山下 淳[†] 金子 透 三浦 憲二郎

静岡大学 工学部 機械工学科
〒432-8561 静岡県浜松市城北 3-5-1
E-mail: [†]yamashita@ieee.org

あらまし コピー機やスキャナなどによる紙面撮影では、紙面形状が歪曲している場合や折れ曲がっている場合には、歪みやぼけが生じるため十分な画質を得ることが困難である。そこで本論文では、上向きに置かれた紙面形状をステレオカメラで撮影し、形状計測結果を利用することでデジタル化に適した画像の再構築を行うことを目的とする。具体的には、紙面の3次元計測の結果を用いて形状復元を行い、紙面形状が平面となるように紙面テキストの変換を行う。また、ステレオカメラから得られる2枚の画像のうち、場所毎に解像度の高い画像を組み合わせることで高精細な画像の生成を行う。実験の結果により、提案手法の有効性を確認した。

キーワード 形状復元, 画像補正, ステレオビジョン, 書籍のデジタル化

Book Surface Reconstruction and Image Correction with a Stereo Vision System

Atsushi KAWARAGO Atsushi YAMASHITA[†] Toru KANEKO and Kenjiro T. MIURA

Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University
3-5-1 Johoku, Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432-8561 Japan
E-mail: [†]yamashita@ieee.org

Abstract In this paper, we propose a reconstruction and correction method for paper documents with curved surfaces or fold lines using a stereo vision system. Characters in images of thick book's pages acquired with an image scanner are difficult to recognize because they are deformed under the influence of curved surface. In our method, the 3D shape reconstruction of the book's surface is executed from the result of the stereoscopic measurement by putting the book upward, and a flat surface is recovered from the curved surface. The validity of the proposed method is shown through experiments.

Keyword Shape Reconstruction, Image Correction, Stereo Vision, Digitization of Paper Documents

1. 序論

資料や書籍などのドキュメントを複写するコピー機や、ドキュメントの画像情報をデジタル化するフラットベッドスキャナは、オフィス環境において広く利用されており必要不可欠な装置となっている。また、OCRソフトを用いて得られた画像中の文字認識を行い、電子文書化することも重要となっている。

基本的にこれらの装置は平面形状紙面を対象としており、紙面をガラス面に密着させて画像を取得することにより複写・デジタル化を行う。このため、見開いた状態の書籍など歪曲や折れ目がある立体形状紙面では、ガラス面に接触しない部分において明るさの低下や画像のぼけ・歪みなどの問題が生じる。紙面をガラス面に押し付けることでこの問題はある程度軽減されるが、分厚い書籍などでは完全には問題が解決しない場合が多く、希少な書籍などでは無理に押し付けると対象を痛める恐れがある。

そこで、取得した画像中の明るさの違いにより、対象の形状を推定して補正する方法が提案されている

[1]~[3]。これらの方法では、新たな装置を必要としないが、照明条件や紙質毎の表面反射特性などの基準データを予め計測して多数の基礎データを準備する必要がある。また、CCDセンサに対して平行な方向に関しては紙面形状が一定であると仮定しているため、書籍の綴じ目をCCDセンサに対して平行に配置しなければならないなどの拘束条件を必要としており、3次元的な紙面形状の歪みには対応できない。

更に別の問題として、連続して複写・デジタル化の際、紙面をガラス面に接触させる方法ではページをめくるたびに毎回所定の位置に配置し直す必要があり手間が大きくなることが挙げられる。

そこで、CCDカメラと照明装置を上方に設置し紙面を上向きに配置して撮影を行うことで、陰影情報から画像を補正する方法が提案されている[4]。この方法では、CCDカメラによる撮影のため、対象が立体形状の場合でもぼけの問題は生じにくく、対象の再配置の手間も軽減されている。しかし、上記の方法と同様に紙質に応じて反射特性の基準データを準備する必要がある

る。

このように、陰影情報を用いる方法では基準データを必要とするため、基礎データがなくとも紙面形状を直接的に計測できる方法が提案されている。

例えば、書籍の上端部と下端部の形状を計測した結果を用いて画像の歪みを補正する方法も提案されている[5]。この方法では、1台のカメラのみで歪みの補正を行うことが可能であるが、上端部から下端部への形状は連続的であると仮定しているため、折れや変形がある場合には対応できない。

また、レーザ光[6]やパターン光[7]などを紙面に照射してカメラで撮影し、三角測量の原理により対象形状の計測を行う方法も提案されている。しかし、レーザ光を用いる方法では、走査が必要となるため一度の撮影で紙面全体の計測ができない。パターン光を用いる方法では、計測精度はパターンの分解能に依存する。

更に、これらの方法では一方向からの撮影であるため、正確な形状計測が可能であったとしても、カメラの光軸と紙面の法線のなす角が大きい部分では画像の解像度が低いため紙面形状を平面に変換した際の画像がぼけるという問題がある。同様に、平行ステレオカメラを用いて撮影を行う場合[8]でも、高精細な画像を取得することは難しい。

そこで本論文では、輻輳ステレオカメラを用いて2方向からの画像を取得し、2画像のうち解像度の高い部分を組み合わせることで、高精細かつ歪みのない画像を生成する手法を提案する(図1)。

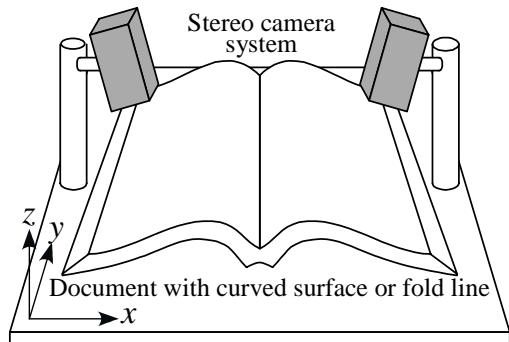


図1 システム概要

2. 補正画像生成手順

補正画像を生成する手順は以下の通りである(図2)。

まず、ステレオカメラから得られた2画像において、紙面上の特徴点間の対応関係を求め、三角測量の原理を用いて各点の3次元座標を算出する(3次元計測)。次に、NURBS曲面を用いて紙面を滑らかな曲面として再構築する(形状復元)。最後に曲面形状を考慮して取得画像の歪み補正を行い、紙面表面が平面となるような画像に変換する(画像補正)。

なお、世界座標系は図1に示すように設定する。ま

た、書籍の綴じ目や紙面の折れ目はy軸とほぼ平行となるように配置するものとする。

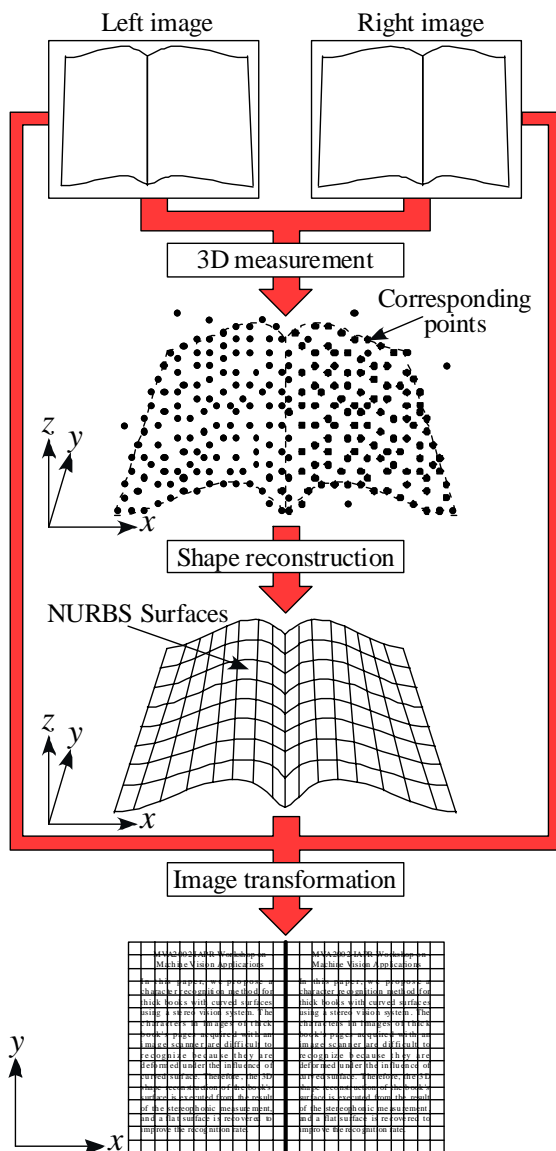


図2 処理手順

3. 3次元計測

ステレオ計測により、紙面表面の3次元座標を求め、紙面上では文字や図などのテクスチャが密に存在していることから、ほとんどの場所で2枚の画像間の対応関係を求めることが可能である。

3.1. 対応点検出

本論文では、見開いた状態の分厚い書籍や折れ曲がった紙など立体形状を有する紙面を対象としている。従って、カメラ位置や光軸方向が異なる場合、2画像間で明るさが大きく異なる場所が存在する危険性がある。そこで、明るさの変化に頑健である正規化相互相関(NCC)を用いたテンプレートマッチングにより、2

画像間の対応点検出を行う。サイズ $M \times N$ のテンプレート画像を T 、対象画像を I とすると、正規化相互相関係数 C は、(1)式で与えられる。

$$C = \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \{I(i,j) - \mu_I\} \{T(i,j) - \mu_T\}}{\sqrt{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \{I(i,j) - \mu_I\}^2 \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \{T(i,j) - \mu_T\}^2}} \quad (1)$$

$$\text{ただし, } \mu_I = \frac{1}{NM} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N I(i,j), \quad \mu_T = \frac{1}{NM} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N T(i,j)$$

正規化相互相関係数 C が最大となる位置で対応が取れているとする。ここで、NCC を用いると処理時間が大きくなるという問題がある。そこで、解像度の低い画像を用いる程度の対応関係を予め求めておくことで処理時間短縮を図る粗密探索を行う。また、計測対象が紙面であるため比較的滑らかな部分が連続していることから、2 画像間での対応関係も比較的連続しているという性質を利用し、テンプレートサイズと探索範囲を変化させて対応点検出を行う。

また、紙面のうち文字や図などが存在しない余白部や、テンプレートサイズより面積が大きいベタ塗りの部分では、対応点の誤検出が起りやすい。そこで、誤検出を防ぐと同時に処理時間短縮を図るため、これらの部分では対応点検出を行わないこととする。これらの部分ではテクスチャ（画素値）の変化が小さいことから、テンプレート内の分散の大きさを用いて、(2)式により余白部分は検出できる。なお、(2)式は NCC の計算途中で算出される値であるため、余白部検出を行うことによる処理時間の増加はない。

$$\sigma^2 = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \{I(i,j) - \mu_I\}^2 \quad (2)$$

3.2.3 3次元座標の算出

三角測量の原理を用いて、各対応点の3次元座標値を算出する。なお、レンズの収差による画像の歪みを補正するための補正係数[9]、像距離（レンズ中心と画像面間の距離）、基線長（レンズ中心間の距離）、各カメラの姿勢などは事前にキャリブレーションにより求めておく。

ここで、エピポーラ拘束や 3.1 で述べた対応点検出方法により、大部分の対応点は正しく検出できるが、完全に誤検出を抑えることは難しい。そこで、各対応点の3次元座標値を用いて、誤検出した対応点を取り除くこととする。ここでは、書籍の綴じ目や紙面の折れ目は y 軸とほぼ平行となるように配置されているため、 x 座標値がある一定の値を有する y - z 平面上におい

ては、各対応点の z 座標の変動は小さいことを利用する。

具体的には、まず x 座標値が $x_i \leq x < x_{i+1}$ となる全対応点を y - z 平面に投影し、 z 座標値の平均値と標準偏差を算出する。平均値から定められた距離内（ここでは標準偏差の2倍とした）に z 座標が含まれないものを誤検出として取り除くこととする（図3）。

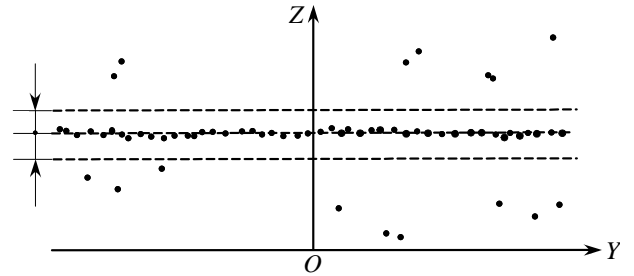


図3 誤検出した対応点の除去

x_i を変化させながら以上の処理を繰り返し行うことにより、全領域での誤検出点を除去することができる。

4. 形状復元

形状計測により求めた紙面表面上の対応点の3次元座標から対象形状を復元する。紙面形状は、伸縮が生じない形状変形により平面と等価となる曲面と考えられる。単純な多項式によって紙面の滑らかかつ複雑な形状を表現することは困難であるため、表現力の高い NURBS 曲面により形状復元を行うこととする。

ここで、書籍の綴じ目や紙面の折れ目部分などでは、曲面の傾きは連続的でない。従って、滑らかな曲面では表現できない変曲部を求め、変曲部に囲まれた部分を NURBS 曲面により表現することとする。

4.1. 変曲部の検出

変曲部を検出するため、対応点の3次元座標値を用いてその場所での傾きを求める。厳密には、曲面を復元する前に曲率(傾き)を求めることはできないため、変曲部を求めることもできない。しかし、ここで求める変曲部は、書籍の綴じ目や紙面の折れ目など明らかに方向が大きく変化する部分である。従って、変化が大きい部分を簡単かつ高速に求めることが望ましい。

そこで、書籍の綴じ目や紙面の折れ目は y 軸とほぼ平行となるように配置されていることから、 y 座標値がある一定の範囲内となる対応点同士の x - z 平面における傾きを求める。

ここでは、原画像における走査線毎に考える。 j 番目の走査線上の画素 (i, j) の実空間上での対応点の座標を $(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$ とすると、画素 (i, j) と画素 $(i+1, j)$ は画像上で隣接していることから $(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$ と $(x_{i+1,j}, y_{i+1,j}, z_{i+1,j})$ も実空間上で隣接していると考え、対

応点を順番に並べる．ここで，近隣の2点からその点の傾きを正確に算出することは，対応点の3次元座標値の誤差などによる影響のため困難となる．そのため，一定距離離れた2点から傾きを求める．画素 (i, j) の対応点 $(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$ と n 個離れた対応点 $(x_{i+n,j}, y_{i+n,j}, z_{i+n,j})$ を結んだ直線の傾きは，

$$\theta_{i,j,n} = \tan^{-1} \frac{z_{i+n,j} - z_{i,j}}{x_{i+n,j} - x_{i,j}} \quad (3)$$

で表される．さらに，同様に周囲で求めた $(2m+1)$ 個の対応点での傾きとの平均値 $\theta_{i,j}$ をその点の傾きとすることで，誤差の影響の低減を図る．

$$\theta_{i,j} = \frac{1}{2m+1} \sum_{k=i-m}^{i+m} \theta_{k,j,n} \quad (4)$$

(4)式で算出した傾きを用いて隣接対応点との傾きの差 $d\theta_{i,j} = \theta_{i+1,j} - \theta_{i,j}$ を求め， $d\theta_{i,j}$ が一定以上の大きさとなる対応点 $(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$ を変曲部候補点とする．

以上により，走査線 j を変化させながら処理を繰り返し行うことで，全領域での変曲部候補点を求めることができる．

最後に，これらの変曲部候補点が一定個数以上直線上に並んだ場所（線分）を変曲部とする．

4.2. NURBS 曲面の生成

NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) 曲面は，スプライン曲面の1種である．詳細な説明は省略するが，制御点 Q_{ij} ，制御点での重み，ノットを与えることにより曲面を生成することができる（図4）．また，制御点により大まかな形状を与え，ノットや各制御点での重みを変更することにより，曲面の端点を制御点に一致させることや詳細な形状を変化させることができる．

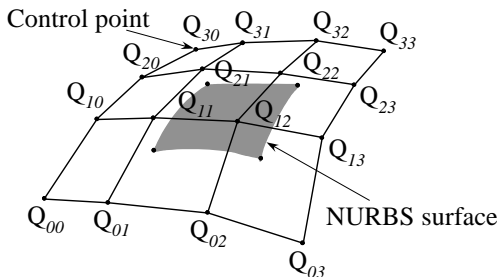


図4 NURBS 曲面

変曲部の検出により，同一曲面上に存在する対応点が判別できるため，これらの対応点から NURBS 曲面を求める．具体的には，制御点の座標を対応点の3次元座標値を用いて決定する．まず，変曲部で囲まれた

ある曲面 k において， x - y 平面上に $x_{i,k} - L \leq x \leq x_{i,k} + L$ かつ $y_{j,k} - L \leq y \leq y_{j,k} + L$ の範囲の格子状の領域を作成する．同一曲面上の各格子領域において，格子内の対応点の3次元座標値から z 座標値の平均値 $z_{i,j,k}$ を算出し，各格子の中心点 $(x_{i,k}, y_{j,k}, z_{i,j,k})$ を曲面 k の制御点とする． k を変動させて以上の処理をすべての曲面に対して行うことで，紙面形状を復元することができる．

5. 画像補正

NURBS 曲面を用いて復元した紙面形状をもとに，取得画像から歪みを補正した画像を生成する．2台のカメラから得られる画像のうち，紙面の部分毎に解像度が高い画像を求めて合成を行う．更に，紙面形状が平面となるように紙面のテクスチャの変換を行う．

5.1. 合成画像の選定

2台のカメラの方向が異なる場合，紙面表面に対してカメラが正面になるような位置から撮影した画像の方がより高解像度となる（図5）．つまり，カメラの光軸方向ベクトルと NURBS 曲面により復元した紙面形状の法線ベクトルとの角度が小さい方の画像を選択することにより高解像度の補正画像を作成できる．

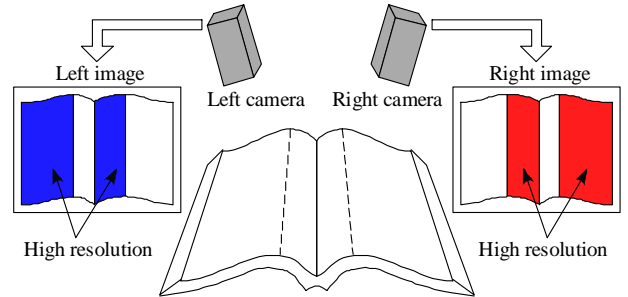


図5 合成画像の選定

5.2. 補正画像の生成

NURBS 曲面が平面となるように引き伸ばすことで，取得画像の歪みの補正を行う．ここでも， $y = y_i$ （一定）となる x - z 平面において考える（図6）．

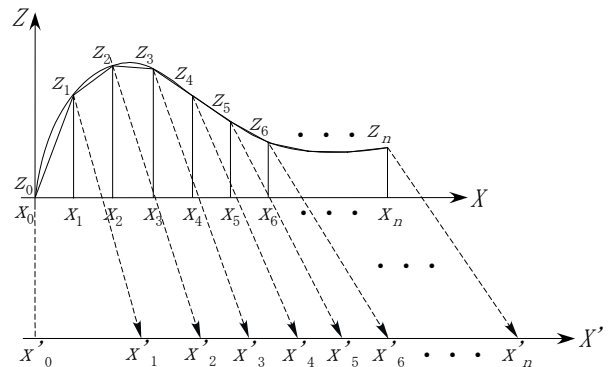


図6 歪曲補正

NURBS 曲面 (x - z 平面では曲線) 上での座標 (x_j, y_i, z_j)

と手前の座標 (x_{j-1}, y_i, z_{j-1}) との曲面にそった距離について考えると、2 点間が十分に近い場合には、直線距離と近似することができる。

従って、曲面（曲線）を平面（直線）として引き伸ばした場合の新たな座標値を $(x'_j, y_i, 0)$ とすると、

$$x'_j = \sum_{k=1}^j \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (z_k - z_{k-1})^2} \quad (5)$$

となる。

最後に、補正画像上の各位置 $(x'_j, y_i, 0)$ に対応する画素値を、5.1 で求めた解像度の高い方の原画像から探して求める。ここで、対応点 (x_j, y_i, z_j) が、解像度の高い方の原画像において画素 (u, v) に対応しているとすると、 $(x'_j, y_i, 0)$ の画素値は原画像の画素 (u, v) の画素値となる。

なお、最終的に生成されるテクスチャの連続性を考慮し、 $y_i \leq y < y_{i+1}$ となる範囲においては、 y_i と同じ表面形状であるとして、補正画像を生成する。

最終的に、 y_i の i を変動させて全領域について以上の処理を行うことで、歪みが補正された画像を生成することができる。

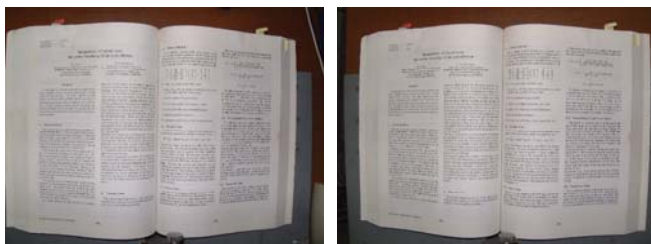
6. 実験

提案手法の有効性を検証するために、見開いた状態の書籍や折れ曲がった紙面に対して、形状計測、形状復元、画像補正を行った。また、画質を定量的に評価するために、原画像と補正画像について文字認識実験を行った。

実験では、1 度の撮影で 2400×1800 画素の画像を取得することができるデジタルカメラを用いた。また、見開いた状態の A4 サイズ書籍（A4 用紙 2 枚分）が画像中に入るように撮影を行った。

原画像の例を図 7 に、これら 2 枚の画像を用いて 3 次元計測を行い誤検出を除去した結果を図 8 に示す。

3 次元計測結果において、黒色領域は検出した対応点、書籍表面の空白領域は検出された余白部である。また、書籍の綴じ目の部分が変曲部として検出された。



(a) 左画像 (b) 右画像

図 7 歪曲書籍の原画像

次に、NURBS 曲面で形状復元を行った結果を図 9

に示す。曲線形状は対応点とほぼ一致しており、どちらの原画像を用いて合成を行えば良いかの判定も正確に行われている。

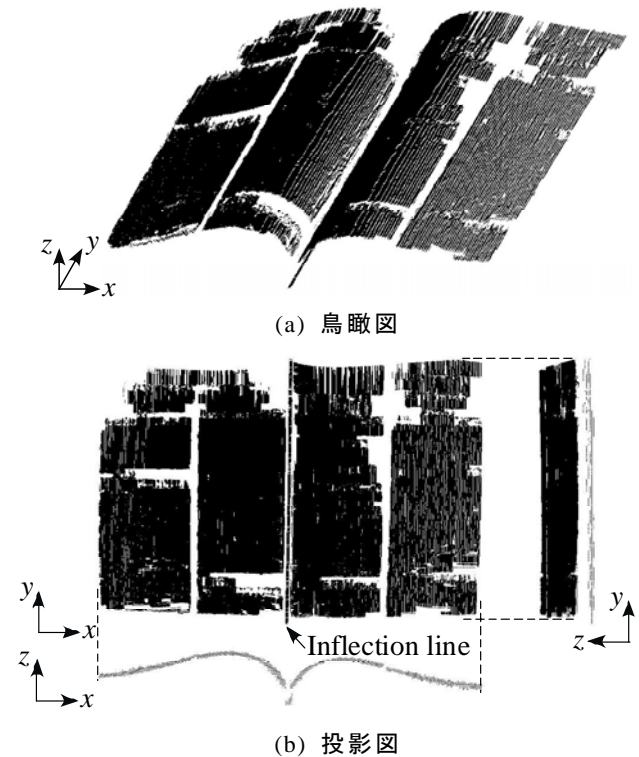


図 8 歪曲書籍の 3 次元計測結果

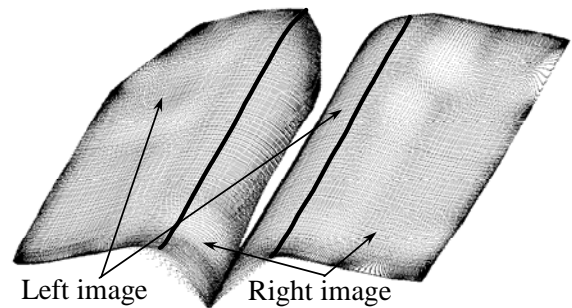


図 9 歪曲書籍の形状復元結果

また、折れ曲がった紙面を同様に計測して形状復元を行った結果を図 10 に示す。

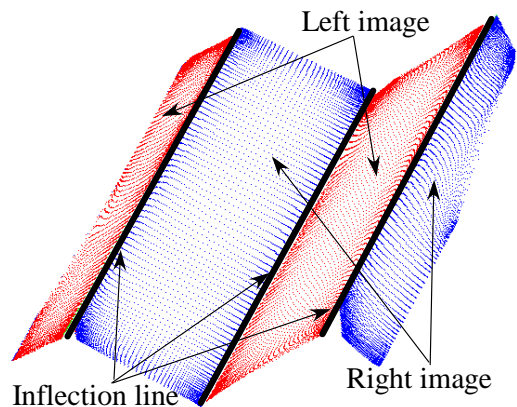
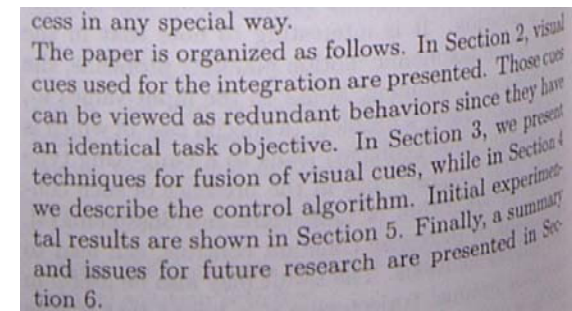


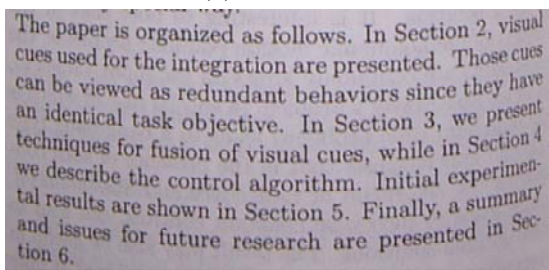
図 10 折れ曲がった紙面の形状復元結果

以上の結果により、歪曲や折れ曲がりがある紙面を高精度に復元できることが示された。

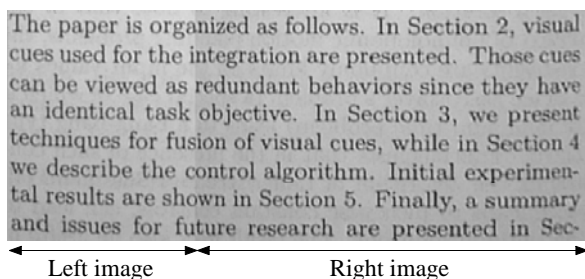
また、歪曲を補正した画像を図 11 に示す。(a)は左原画像、(b)は右原画像、(c)は場所に依じて高精細な原画像を合成するとともに歪みを補正した画像である。合成部分のテキストも連続的かつ自然に繋がっており、歪みもほぼ補正されていることが確認できる。



(a) 左原画像



(b) 右原画像



(c) 補正画像

図 11 歪曲書籍の画像補正結果

また、歪み補正の有効性を定量的に確認するため、市販の OCR ソフトを用い、図 11 に示した画像に対して標準的な設定で文字認識を行った結果を表 1 に示す。(a)は左原画像を用いた結果、(b)は右原画像を用いた結果、(c)は補正画像を用いた結果である。原画像では綴じ目付近での認識率が低下していることに対して、補正画像ではほぼ 100%に近い認識率となった。

以上の結果より、高画質な補正画像を生成可能であることが定量的にも確認された。

7. 結論

本論文では、ステレオカメラを用いて分厚い書籍や折れ曲がった紙面などの撮影を行い、歪みを補正した

表 1 歪曲書籍の文字認識結果

認識画像	認識範囲	認識率
(a) 左原画像	全体	77.9%
	綴じ目付近	39.2%
(b) 右原画像	全体	82.6%
	綴じ目付近	52.7%
(c) 補正画像	全体	99.7%
	綴じ目付近	98.6%

画像を生成する手法を提案した。立体形状紙面に対応するため、輻輳ステレオカメラによる 3 次元計測結果を利用して NURBS 曲面による形状復元を行い、形状情報を用いて高精細かつ歪みのない画像を生成した。実験結果より、本手法の有効性を確認した。

今後の課題としては、任意方向の書籍の綴じ込みや折れ曲がりへの対応などが挙げられる。

なお、本研究の一部は、財団法人浜松科学技術研究振興会の援助を受けて行われた。

文 献

- [1] 和田 俊和, 浮田 浩行, 松山 隆司: “イメージキャナを用いた書籍表面の 3 次元形状復元(I)ー近接照明下での Shape from Shadingー”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J77-D-II, No.6, pp.1059-1067, 1994.
- [2] 和田 俊和, 浮田 浩行, 松山 隆司: “イメージキャナを用いた書籍表面の 3 次元形状復元(II)ー相互反射を考慮した近接光源下の Shape from Shadingー”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J78-D-II, No.2, pp.311-320, 1995.
- [3] 浮田 浩行, 小西 克信, 和田 俊和, 松山 隆司: “固有空間法を用いた陰影情報からの書籍表面の 3 次元形状復元”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J83-D-II, No.12, pp.2610-2621, 2000.
- [4] Seong Ik Cho, Hideo Saito and Ozawa Shinji: “Shape Recovery of Book Surface Using Two Shade Images Under Perspective Condition”, 電気学会論文誌 C, Vol.117-C, No.10, pp.1384-1390, 1997.
- [5] 包 躍, 吉開 敬治: “画像処理を用いた書籍の歪み補正”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.26, No.54, pp.13-16, 2002.
- [6] 天野 敏之, 安部 勉, 伊與田 哲男, 西川 修, 佐藤 幸男: “次世代ドキュメント撮影装置「アイスキャナ」の試作”, 第 7 回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.379-384, 2001.
- [7] 佐藤 康弘, 長谷川 雄史, 北澤 智文, 青木 伸, 北口 貴史: “デジタルカメラを用いた 2D/3D デスクトップ画像入力システムの開発”, 第 8 回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.185-190, 2002.
- [8] 川原子 淳, 山下 淳, 金子 透, 三浦 憲二郎: “ステレオビジョンシステムによる表面湾曲書籍の文字認識”, 映像情報メディア学会誌, Vol.56, No.5, pp.858-862, 2002.
- [9] Juyang Weng, Paul Cohen and Marc Herniou: “Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.14, No.10, pp.965-980, 1992.