

ステレオ計測とNURBS曲面表現を利用した 歪曲形状書籍画像の歪み補正

Restoration of Distorted Document Images by Using Stereo Measurement and
NURBS Surface Representation

田中友†, 山下淳†, 金子透†

Yuu TANAKA†, Atushi YAMASHITA† and Toru KANEKO†

†: 静岡大学, {r5545008, tayamas, tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

概要: オフィス環境において, 資料や書籍などのドキュメントをデジタル化する装置としてフラットベッドスキャナが広く利用されている. フラットベッドスキャナは平面形状物体をデジタル化の対象としている. そのため, 見開いた書籍をフラットベッドスキャナを用いて画像化すると, 綴じ目部分で紙面が計測面に密着することが出来ず, 画像上の綴じ目部分の絵や文字に歪みが生じる. 本研究ではステレオカメラを用いて, 歪曲した形状を有するドキュメントを歪み無くデジタル化する方法を提案する.

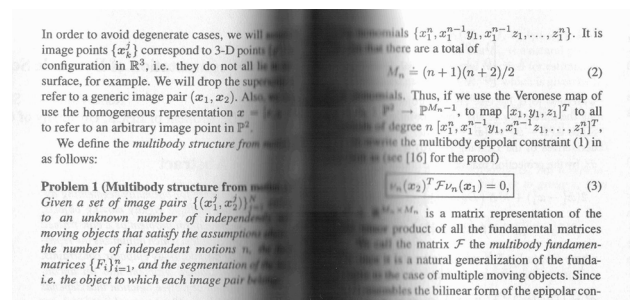
1. 序論

近年, オフィス環境などにおいて資料や文書, 書籍といったドキュメントを複写・デジタル化するための複写機やフラットベッドスキャナが広く普及し, 必要不可欠な物となっている. さらに, フラットベッドスキャナにより画像情報としてデジタル化されたドキュメントを, 文字認識ソフトを用いて電子文書化することも行われている. 複写機やフラットベッドスキャナは共に, 計測対象を計測面に密着させて計測を行い, ドキュメントを複写・デジタル化する装置である. そのため, 見開いた状態の書籍などの立体形状物体では, ガラス面に接触しない部分において歪みや明るさの低下が生じ文字認識に支障をきたすなどの問題が起きる(図1). これらを軽減するために平らに引き伸ばそうとして計測対象を計測面に押し付けても, 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い. さらに, 希少な書籍などでは, 無理に引き伸ばそうとすると対象を痛める恐れがあるため, 引き伸ばしたり押し付けたりすることは出来ない. また, 書籍を連続して複写・デジタル化する場合でも, ページをめくるたびに所定の位置に平らに引き伸ばして置き直す必要があり, 容易な作業ではない.

取得画像の歪みを補正する方法として, フラットベッドスキャナ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補正する方法が提案されている[1][2]. 具体的には, 計測面に接触している部分の画



(a) 見開いた書籍



(b) 取得画像

図1 フラットベッドスキャナによる入力例

像は明るく, 計測面から離れている部分の画像では, 計測面からの距離に応じて暗くなるという特徴を利用して対象形状の推定を行っている. これらの方法では, 形状推定のために新たな装置を必要としないが,

照明条件や対象表面の反射特性などの多くの基準データが必要である。さらに、フラットベッドスキャナにより画像を取得する為、毎回所定の位置に対象を置き直す手間が必要となる。

上記と同様に、陰影情報を用いて歪みを補正する方法において、対象を上向きに配置することにより対象を置き直す手間を軽減した方法も提案されている[3]。しかし、歪みの補正には陰影情報を用いるため、多くの基準データが必要となる。

一方では、対象の形状をアクティブステレオ法により直接的に計測することで、陰影情報を用いず取得画像の歪みを補正する方法も提案されている[4][5]。これらの方法では、多くの基準データや、ページをめくるたびに書籍を置き直す手間を必要としない。しかし、[4]の方法では小型レンジファインダのような特殊な装置が必要であり、[5]の方法では形状計測を行う画像と補正を行う画像を同時に取得することができず撮影の手間が増える。

他にも、1台のCCDカメラにより取得した画像のみから、歪みを補正する方法が提案されている[6]。この方法では、カメラに近い部分は画像上では大きく写り、遠いほど小さく写る性質を利用して、書籍の形状を推定して補正を行う。そのため、多くの基準データや、ページをめくるたびに書籍を置き直す手間を必要としない。しかし、書籍の上端部と下端部に折れや変形がないものに限られるなど汎用性に乏しい。

以上より、文字認識ソフトによる電子文書化が可能な高精細画像が取得でき、ドキュメントの形状や配置に制限がなく、多くの基準データや特殊な装置を必要としないシステムが望まれている。

多くの基準データや特殊な装置を必要としない画像補正法として、ステレオ計測を用いて歪みを補正する方法が提案されている[7]。この方法は、ステレオ計測を利用しているため、多くの基準データや特殊な装置を必要とせずに形状計測を行うことが可能である。さらに、対象物を上向きに配置できるためページをめくるたびに書籍を置きなおす手間を必要としない。しかし、書籍の配置については、カメラの基線の方向と書籍の綴じ目の方向がなす角が既知であるという制限があった。

そこで、本論文では[7]の方法を拡張し、カメラの基線の方向と書籍の綴じ目の方向がなす角が未知である状況に対応可能な方法を提案する。

2. 処理概要

本論文では、見開いた書籍などのドキュメントを図2に示すようなステレオカメラを用いて撮影し、取得画像に生じる歪みを補正することで鮮明なデジタル画像を得ることを目的とする。

本研究ではドキュメントを配置する面上に世界座標系の原点をおく。対象を配置する面に対して垂直な方向に Z 軸をとり、カメラの基線と平行に X 軸をとる(図2)。

提案手法は以下の手順から成る。

- ①ステレオ画像を取得する。その後、画像からドキュメント部分を抽出する。ドキュメント部分は、あらかじめ撮影しておいた背景画像との差分をとることで抽出する。
- ②ステレオ計測を行い対象表面の3次元座標値を算出する。
- ③曲面の式に対象表面の3次元座標値をフィッティングし曲面を生成する。
- ④生成された曲面を元に、取得画像に対して歪み補正を行い、対象表面が平面となるような画像に変換する。

以上の手順により歪みを補正した画像を得る。

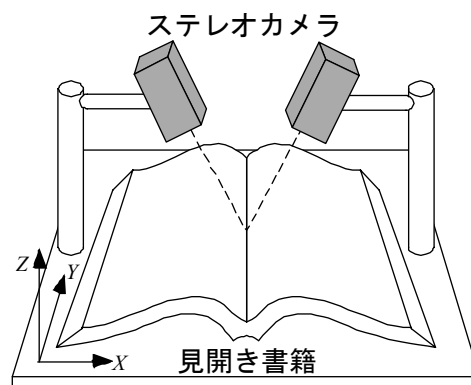


図2 装置概略

3. ステレオ計測

ステレオ計測では左右の画像間の対応点を検出することにより、その点の3次元座標値を算出することができる。

本論文では歪曲形状を有する書籍を対象としており、取得画像には明るさの変化や歪みが含まれている。そこで、明るさの変化に強いとされる正規化相互相関によるテンプレートマッチングを用いて対応点を

検出する。また、対応点は正規化相互相関の相関値の2次近似によりサブピクセル精度で求める。

また、正規化相互相関によるテンプレートマッチングでは、テンプレート内の明るさの変化が乏しい部分で誤検出を起こしやすい。そこで、テンプレート内の明るさの分散が小さい部分については、対応点検出を行わない。

なお、ステレオ計測においては一般的にオクルージョンが問題となるが、本論文で扱う状況では対象表面の高低差が小さいため、オクルージョンは発生しないという利点を有する。

4. 曲面生成

ステレオ計測により求めた対象表面上の点の3次元座標値から曲面を生成する。対象表面の形状を復元するためには、形状を何らかの数理モデルとして表現する必要がある。そこで本論文では、NURBS曲面による近似を用いることにより、対象表面の復元を行う。

しかし、綴じ目や折れ目といった変曲部では滑らかな曲面にはならないため、あらかじめ変曲部を検出しておく必要がある。変曲部は対象表面の傾きの変化を調べることで検出する。

4. 1. 変曲部の検出

対象表面には変曲部が存在しており、そのままNURBS曲面による近似を行うと変曲部も滑らかな曲面として復元されてしまう。このため、あらかじめ変曲部を検出しておく必要がある。

変曲部では図3に示すように傾きの変化 θ の絶対値が大きくなる。そこで、対象表面の傾きの変化 θ を算出し、傾きの変化 θ の絶対値が大きい部分を変曲部とする。変曲部の検出が目的であるため、傾きの変化 θ は簡単な方法を用いて算出する。

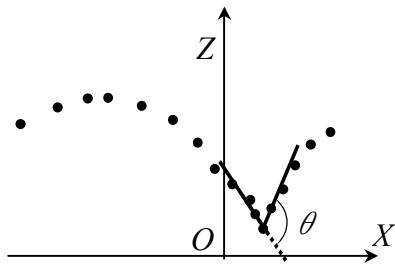


図3 変曲部の検出

ステレオ計測の結果、画像上の位置 (u,v) での3次

元座標値が (x,y,z) であったとする。この時、対象表面の傾きの変化 θ は (u,v) の近傍の2点 (u',v) 、 (u'',v) の3次元座標値 (x',y',z') 、 (x'',y'',z'') から式(1)を用いて算出できる。

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{z'-z}{x'-x}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{z-z''}{x-x''}\right) \quad (1)$$

ここで $x'' < x < x'$ である。

しかし、近傍の2点から対象表面の傾きの変化 θ を正確に算出することは、対応点の3次元座標値の誤差による影響のため困難である。このため、本研究では (u,v) から n 離れた点 $(u+n,v)$ と m 離れた点 $(u-m,v)$ を用いて対象表面の傾きの変化 θ を求める。さらに、計算に用いる (u,v) 、 $(u+n,v)$ 、 $(u-m,v)$ の点の3次元座標値を、各々の点の近傍の3次元座標値の平均値とすることで誤差の影響の低減を図る。

変曲部の検出後、書籍の綴じ目を検出する。 θ が正となる変曲部は綴じ目である可能性がある。そこで、 θ が正となる変曲部の点群を X - Y 平面上に投影したのに対してHough変換による直線検出を行い、綴じ目を検出する。Hough変換を用いることで綴じ目以外の点が検出結果に与える影響を抑えることができる。

綴じ目検出後、綴じ目の Z 座標値が一定となるような回転を行い、綴じ目の法線と Z 軸が平行になるように揃える。この処理は、後の画像補正処理を容易にするために行う。詳しくは、5章にて述べる。

まず、 Z - Y 平面上に綴じ目を投影し、最小二乗法を用いて綴じ目の直線を得る。次に、得られた直線が $Z=\text{const.}$ となるような X 軸回りの回転角 ϕ を求め、計測結果に回転を加える。

4. 2. 表面形状のNURBS曲面表現

対象形状をNURBS曲面により近似することで3次元形状を復元する。NURBS曲面を生成するためには、Bスプライン基底関数の次数、制御点とその重み、ノットベクトルを決定する必要がある。

Bスプライン基底関数の次数は通常3次程度が使われている。そのため、本論文でもBスプライン基底関数の次数は3次とする。

制御点是对应点の3次元座標値をもとに決定する。まず、 X - Y 平面上に格子状の領域を作成する。各格子領域において、格子内に存在する対象表面の Z 座標値の平均値を算出し、これを、その格子における Z 座標値とする。各格子の X 、 Y 座標値は、格子の

中心の座標値を用いる。そして、各格子で算出された X, Y, Z 座標値を制御点とする。制御点の重みは、変曲部を格子内に含む制御点では 10, それ以外では 1 とする。

ノットベクトルは最初と最後の制御点が曲面の両端と一致するように決定する。その為、ノットベクトルの両端に多重ノットを用いる。

5. 画像補正

NURBS 曲面により近似した書籍形状をもとに、取得画像から歪みを補正した画像(補正画像)を生成する。本研究では、NURBS 曲面を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。NURBS 曲面を平面に引き伸ばす際の伸張率を算出し、この伸張率をもとに取得画像を引き伸ばすことで、歪みが補正された補正画像を生成する。

曲面を引き伸ばす際には、曲面上の直線の見え方を考慮して曲面を引き伸ばす方向を決める必要がある。しかし、本論文では綴じ目を検出した際に綴じ目が $Z=\text{const.}$ となるように回転を加えている。この場合、 X 軸に平行な曲面上の直線の見え方は曲面形状によらず $Y=\text{const.}$ となる。そのため、曲面は X 軸に沿って引き伸ばせばよい。

5. 1. 補正画像の生成

曲面上の長さを算出する。書籍表面の 3 次元形状は、NURBS 曲面により近似されている。実際には、書籍表面は多くの点の集合として表現されており、曲面の長さを算出するためには、点群間の距離を求める必要がある。 $Y=\text{const.}$ での曲線を点群間の距離を保ったまま、 $Z=Z_0$ にすることで直線にする(図 4)。 X - Z 平面における点群間の距離 L_i は、座標値を (x_i, z_i) , (x_{i+1}, z_{i+1}) とすると式(2)により求める。

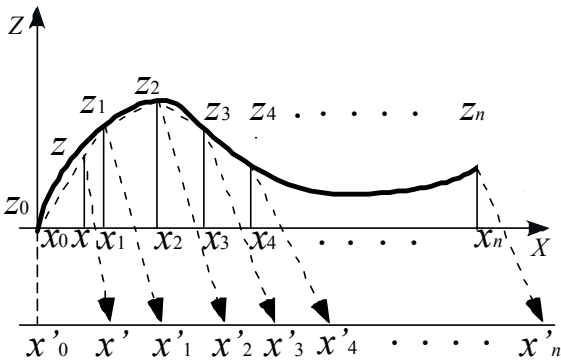


図 4 歪み補正

$$L_i = \sqrt{(z_{i+1} - z_i)^2 + (x_{i+1} - x_i)^2} \quad (2)$$

次に、曲面を引き伸ばした場合の位置 x'_n を求める。引き伸ばす前の位置が x_n である点の引き伸ばし後の位置 x'_n は、式(3)により求めることができる。

$$x'_n = \sum_{i=0}^{n-1} L_i = \sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{(z_{i+1} - z_i)^2 + (x_{i+1} - x_i)^2} \quad (3)$$

この位置 x'_n に、引き伸ばす前の取得画像の画素値を当てはめることで、引き伸ばした画像を得ることができる。

これを Y の値を変えて順次行うことで歪みが補正された補正画像を生成することができる。

引き伸ばした結果、 x'_{i-1} と x'_i の間が大きく開いてしまい補正画像に孔ができることがある。そのため、 $x'_{i-1} < x' < x'_i$ である x' の画像 (u, v) との対応を求める必要がある。 x' の画像 (u, v) との対応は式(4), (5), (6), (7)により求めることができる。

$$x = \frac{(x_i - x_{i-1})(x' - x'_{i-1})}{x'_i - x'_{i-1}} + x_{i-1} \quad (4)$$

$$z = \frac{(z_i - z_{i-1})(x' - x'_{i-1})}{x'_i - x'_{i-1}} + z_{i-1} \quad (5)$$

$$u = \frac{fx}{z \cos \phi - Y \sin \phi} \quad (6)$$

$$v = \frac{f(z \sin \phi + Y \cos \phi)}{z \cos \phi - Y \sin \phi} \quad (7)$$

ここで f はカメラの像距離(カメラのレンズ中心と撮像面の距離)、 ϕ は綴じ目を検出した後に行った回転の X 軸回りの回転角である。

6. 実験

本手法の有効性を検証するため、見開いた状態の書籍に対して、形状計測・形状復元・画像補正を行った。

実験では市販のデジタルカメラを用いて撮影を行った。取得した画像のサイズは 2048×1536 画素であり、カメラの基線長は 137.8mm である。また、対応点検出には横 $11 \times$ 縦 51 画素のテンプレートを用い、対象表面の傾きの変化 θ の絶対値が 120 度以上ある箇所を変曲部とした。

図 5 に今回の実験に使用したステレオ画像を示す。

(a)に左カメラで取得した画像, (b)に右カメラで取得した画像を示す.

図 6 に取得画像のステレオ計測結果を示す. 書籍表面が歪曲していることがわかる. また, 計測値と実測値は, おおよそ一致した.

図 7 に綴じ目部分検出結果を示す. (a)に左画像の原画の一部を拡大したものを示し, (b)に左画像の綴じ目検出結果の一部を拡大したものを示す. (b)の白い部分が綴じ目と判断された部分である. 画像上の綴じ目と部分と検出結果が一致していることがわかる. このことから綴じ目部分の検出結果は良好といえる.

図 8 に提案手法による画像修正結果を示す. (a)に左画像の一部を拡大した図, (b)に左画像のドキュメントの配置のみを補正した図, (c)に提案手法によりドキュメント配置と歪みを補正した図を示す. (b), (c)の画像の右端に綴じ目がある. (b)の画像を見ると, 綴じ目部分に近づくにつれて文字列が歪んでいくのがわかる. (c)の画像を見ると綴じ目に近づいても文字列が歪まず, 書籍の歪曲形状による歪みが補正されていることがわかる.

7. 結論

本論文において, 書籍などの立体形状を有するドキュメントをデジタル化する方法を提案した. 綴じ目部分を検出することによりドキュメント配置を検出し, 立形状物体に対応するため, ステレオ形状計測と NURBS 曲面表現を利用して形状復元を行った.

実験では, ドキュメント配置の検出に成功した. また, 歪曲形状により生じる画像上の歪みの補正にも成功した. 以上のことより, 本手法が書籍等の歪曲形状を有するドキュメントの電子化に対して有効であることが示された.

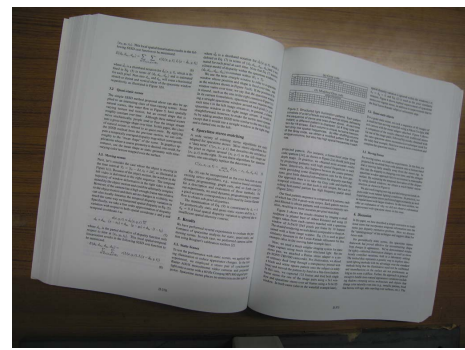
今後は左右の取得画像の鮮明な部分を合成することで高精細な画像を再構築する方法について検討する.

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.

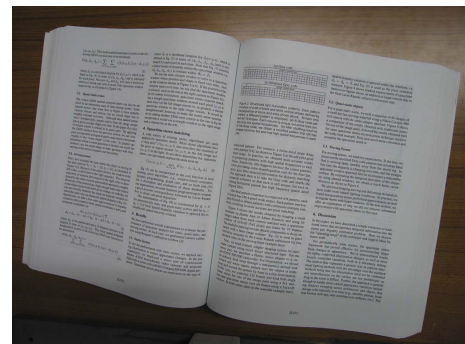
参考文献

- [1] 和田俊和, 浮田浩行, 松山隆司: “イメージス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.

- [2] Hiroyuki Ukida, Katsunobu Konisho, Toshikazu Wada and



(a) 左画像



(b) 右画像

図 5 ステレオ画像

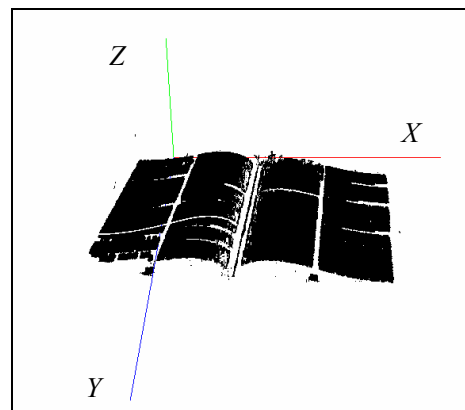


図 6 計測結果

Takashi Matsuyama: “Recovering Shape of Unfolded Book Surface from a Scanner Image using Eigenspace Method”, Proceedings of IAPR Workshop on Machine Vision Applications, pp.463-466, 2000.

- [3] 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.

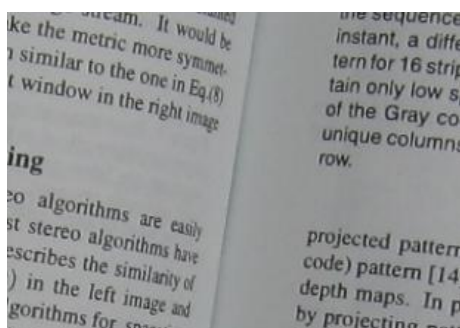
- [4] 天野敏之, 安部勉, 西川修, 伊與田哲男, 佐藤幸男: “アイスキヤナによる湾曲ドキュメント撮影”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J86-D-II, No.3, pp.409-417, 2003.
- [5] 佐藤康弘, 長谷川雄史, 北澤智文, 青木伸, 北口貴史: “デジタルカメラを用いた 2D/3D デスクトップ画像入力システムの開発”, 第 8 回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.185-190, 2002.
- [6] 包躍, 吉開敬治: “画像処理を用いた書籍の歪み補正”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.26, No.54, pp.13-16, 2002.
- [7] Atsushi Yamashita, Atsushi Kwarago, Toru Kaneko and Kenjiro T.Miura: “Shape Reconstruction and Image Restoration for Non-Flat Surfaces of Documents with a Stereo Vision System”, Proceedings of 17th International Conference on Pattern Recognition, Vol.1, pp.482-485, 2004.

田中友: 静岡大学理工学研究科博士課程に在籍. ステレオビジョンを用いた画像補正技術の研究に従事.

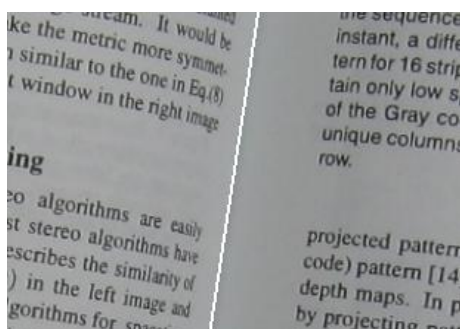
山下淳: 静岡大学工学部機械工学科助手. コンピュータビジョン, ロボットの知能化に関する研究に従事.

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/>

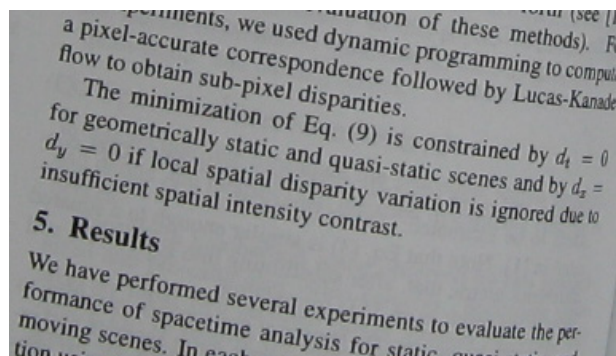


(a) 原画拡大図

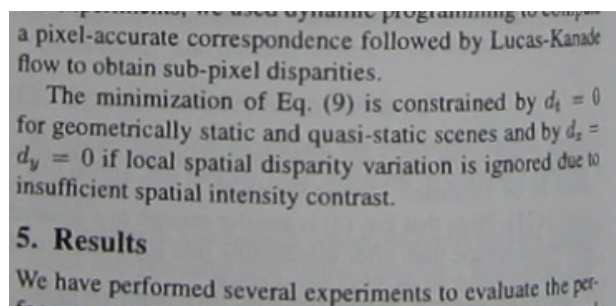


(b) 検出結果拡大図

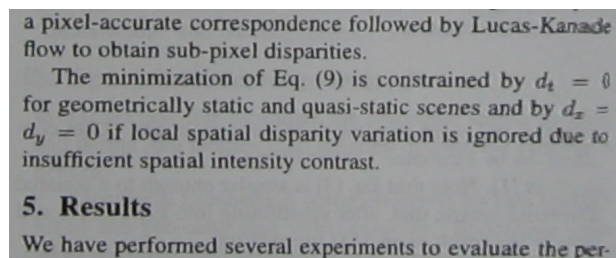
図 7 縦じ目検出結果



(a) 元画像拡大図



(b) ドキュメント配置補正図



(c) 補正結果

図 8 歪み補正結果