

デジタル絵巻のための画像モザイク手法

千葉直樹[†] 蚊野 浩[†]

分割して撮影された絵巻を貼り合わせるモザイク手法を提案する。絵巻は十数メートルの長さに及ぶため、従来の手法では精度良く貼り合わせることができなかった。そこで、これらの絵巻を精度良く貼り合わせる3つの手法を提案する。第1の手法は、事前に絵柄の高さを正規化する手法であり、第2は、3画像間での平面射影変換である。これらの手法により、透視投影歪を考慮し、かつ、絵柄の高さを一定に保つ貼り合わせ処理が可能になる。そして、第3の手法は局所的な位置合わせである。これにより紙のたわみなどによる3次元的な変形に対応する。実画像を用いた実験により、有効性を示す。

Image Mosaicing for Japanese Picture Scrolls

NAOKI CHIBA[†] and HIROSHI KANO[†]

We propose techniques in mosaicing images of Japanese picture scrolls. Previous methods cannot accurately stitch their images, because they are too wide. To solve this problem, we propose three techniques that can stitch without any seams. First, it adjusts its height of each image in advance. Second, it uses planar projective transformation among three images, not two. These techniques enable us to stitch the images, considering perspective distortion. Third, it warps images locally in addition to global geometric transformation. This technique can handle three-dimensional distortion caused by the roughness of the paper. We show the effectiveness by experiments on real images.

1. はじめに

映像や文化遺産を次世代へ残すため、デジタルアーカイブが注目されている。有形・無形の文化遺産や美術・工芸品をデジタル情報にして記録・保管して、活用しようというものである。具体的には、2次元静止画をカメラで撮影し、デジタル化する作業が進められている⁹⁾。また、仏像や彫刻などの3次元形状を持つ物体のデジタル化も注目を集めている^{4),6)}。

一方、複数の画像を貼り合わせて、視野が広く解像度の高い画像を作成する技術(画像モザイク)が活発に研究されている。古典的な応用には、航空写真などの合成があるが、最近では、一般シーンのパノラマ画像を継ぎ目なく合成し、臨場感の高い仮想環境を構築する手法が注目されている⁸⁾。これらは、実シーンを撮影した画像を接合して、水平方向360度の円筒面や球面に投影し、利用者が希望する任意の視線方向の画像を対話的に表示するシステムである。他の応用では、ビデオを用いた広域監視や画像圧縮などへの利用も期

待されている。

この画像モザイクを用いたデジタルアーカイブが、いくつか提案されている。竹内らは、ビデオカメラを用いて、平面の絵画をデジタル化する試みを示した¹⁰⁾。また、Puechらは、壁画をデジタル化する試みを示した⁷⁾。しかしながら、日本絵巻を対象とした手法は提案されていない。

日本絵巻のデジタル複製の要望は高い。絵巻は、必要な部分だけを少しずつ広げながら物語が展開していく。しかしながら、博物館での展示方法は、ある一部分を広げて展示する以外に方法がない。絵巻をデジタル化したものは、分割して撮影された写真であり、これらを継ぎ目なく貼り合わせる要望がある。

絵巻の画像モザイクは困難な問題である。絵巻は、幅十数メートルに及ぶため、複数のカメラで分割して撮影される。撮影された各画像は縮尺が異なり、透視投影歪を含む。このため、その貼り合わせ処理は容易ではない。そこで、本稿では、これらの問題点を解決し、絵巻を精度良く貼り合わせるためのモザイク手法を提案する。提案する手法は、透視投影歪を考慮し、継ぎ目のない貼り合わせ画像を合成する。また、紙のたわみなどによる3次元的な歪も考慮する。以下に本

[†] 三洋電機株式会社デジタルシステム技術開発センタービジネスユニット

Digital Systems DC, SANYO Electric Co., Ltd.

稿の構成を示す．2章で絵巻における従来の手法の問題点を示す．3章で提案する手法を示し，4章に実画像を用いた実験結果を示す．最後に考察と今後の研究課題を述べる．

2. 従来の手法

従来から画像間の幾何変換を用いて，画像モザイクを行う手法が提案されている．古典的な幾何変換には，2次元剛体変換やアフィン変換がある．最近では，多くの研究者が平面射影変換を用いている^{1),8)}．この変換は，画像間のスケールの変化に加えて，透視投影歪を考慮したより高精度な画像の貼り合わせが可能である．

しかしながら，絵巻の画像モザイクでは，これらの幾何変換を単純に用いるだけでは，精度良く合成することができない．原因は，その撮影環境にある．

2.1 絵巻の撮影環境

絵巻のように幅の広いものを分割撮影して貼り合わせるには，都合の良い撮影方法がある．たとえば，絵巻をすべて広げて，カメラを台車の上に置き，レールの上を移動しながら撮影する方法である．このようにすれば，カメラ間の移動が制限され，貼り合わせ処理が簡略化される．あるいは，広げた部分をフラットベッドスキャナで撮影すれば，画像間の幾何変換は2次元剛体変換に簡略化される．しかしながら，実際の撮影環境はこれらとは異なる．

絵巻は貴重でもろいため，それらをすべて広げることができない．そこで，絵巻は図1に示すように撮影する場所だけを広げて，カメラで撮影される．そして，次の部分を撮影するには，撮影済みの部分を巻き取る必要がある．このため，画像間には次のような変形が含まれる．

- 回転（カメラ光軸まわり）
- 縮尺の変化
- 透視投影歪

撮影の際，絵巻の別の部分を広げるために，いったん，絵巻を撮影台から外し，撮影する部分を広げた後，

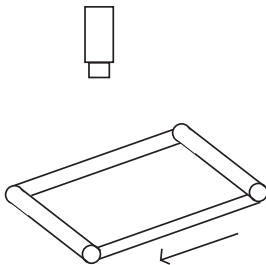


図1 撮影環境

Fig. 1 Shooting setting.

撮影台に再び設置される．このため，画像間に回転が発生する．また，撮影台に対するカメラの配置も毎回変更されるため，縮尺も変化する．

さらに，画像の投影は，透視投影に基づくため，近い場所が大きく写り，遠い場所が小さく写る透視投影歪が発生する．もし，カメラを絵巻から十分遠い距離に配置し，焦点距離の長い望遠レンズで撮影できれば，平行投影と仮定できるため，この問題は発生しない．しかし，実際には，絵巻の長さに対して，狭い空間で撮影するため，この問題が発生する．また，カメラの光軸を絵巻に対して，鉛直に配置できれば，歪が対称になり，この問題は簡略化される．しかし，実際にはカメラの鉛直配置を正確に行うことは困難であり，非対称の透視投影歪が発生する．

最も大きな障害は，貼り合わせ処理に都合の良いように撮影し直すことが期待できないことである．絵巻は16世紀ごろに作成された古い物であるため，もろく貴重であり，撮影し直しは容易に許可されない．すなわち，貼り合わせ目的に撮影環境を整備して撮影した画像を用いるのではなく，記録を目的としてすでに撮影された画像だけを用いて，これらの変形を考慮した画像モザイク手法が望まれる．

2.2 従来手法の問題

絵巻の撮影環境で撮影された画像は，古典的な手法では，良好に画像モザイクが行えない．平行投影を仮定できないため，透視投影歪が発生する．アフィン変換では，この透視投影歪が厳密には考慮されないため，高精度な結果が期待できない．また，平面射影変換では，この透視投影歪が考慮されるものの，貼り合わされた画像は，ある視点から広角レンズで撮影した画像になり，図2のように左右の画像が歪むという問題がある．ここで，デジタル絵巻のためには，貼り合わされた画像は，絵柄の高さが一定で，最初から最後までほぼ平行である必要がある．すなわち，透視投影歪を考慮して，これを取り除いた画像を合成する必要がある．また，平面射影変換では変換の自由度が高すぎ

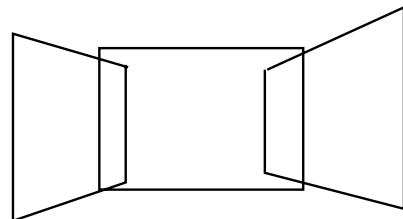


図2 平面射影変換を用いた例

Fig. 2 An example using planar projective transform.

るため、重なり部が少なく、テクスチャが少ない場合は、合成精度が悪い問題がある。このように絵巻の画像モザイクは、従来の手法では困難な問題である。そこで、これらの問題を解決する手法を次章以降で提案する。

3. 絵巻の画像モザイク

従来手法の問題を解決するために次の3つの手法を提案する。

- 絵柄の高さの正規化
- 3画像間での平面射影変換
- 局所的な位置合わせ

絵巻を撮影する際に、カメラは絵巻の正面を向くように設置されているが、実際には、若干ずれている。これにより透視投影歪が発生しており、本来平行であるはずの絵柄の上下の境界線は、撮影画像ではそうならない。また、分割撮影した画像間では、縮尺が異なっていることがある。さらに、画像はわずかながら、光軸周りに回転しており、これを無視できない。これらの問題を解決するには、既知の情報として、絵柄の高さはほぼ平行で一定であることが利用できる。この知識を用いて、各撮影画像の上下の境界線が平行でかつ全画像一定になるように事前に正規化を行う。

絵柄の高さを正規化した後、画像の貼り合わせを行う。ここで、高さが正規化されているため、画像間の幾何変換は2次元平行移動だけでよいように思われるかもしれない。しかしながら、前段階での正規化で、除去されずに残った透視投影歪のために、単純な平行移動だけでは、精度良く貼り合わせることができない。また、2画像間での平面射影変換では、その重なり部においては、良好に貼り合わせが行われるが、これを順次繰り返すと、前述したように画像の端にいくに従って、画像が歪んでしまうという問題がある。これらの問題を解決するために3画像間での平面射影変換を提案する。

さらに、絵巻は平面上に描かれているが、長年の紙の伸縮や紙のたわみなどにより3次元的に変形していることが考えられる。このため、従来の幾何変換だけでは、良好に貼り合わせることができない。これに対応するために、大域的な幾何変換に加えて、局所的な位置合わせを行う。

3.1 絵柄高さの正規化

我々は、分割撮影した画像間の縮尺の一致、および光軸周りの回転や透視投影歪の除去を行うために、各画像の絵柄高さを事前に正規化する。ここで、絵柄の上下の境界線は、ほぼ平行で一定であるという知識を

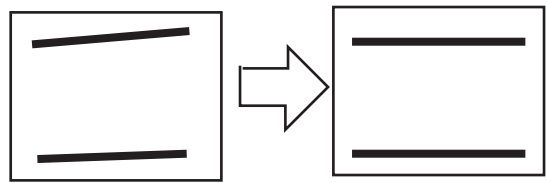


図3 絵柄高さの正規化

Fig. 3 Image height normalization.

用いる。各画像を正規化する変換は、変換行列を N とすると、次式で表すことができる。

$$I' = NI \quad (1)$$

ここで、 I は原画像、 I' は正規化後の画像を示す。以降で、この幾何変換を算出する方法を述べる。

まず、絵柄の上下の境界線を抽出する。これらは画像処理により自動的に抽出することも考えられるが、グラフィカルユーザインタフェースを用意して、手動で指定する。その理由は、画像処理では失敗することがあるからである。線分の数は各画像でただかか2本であるので、手動の方が確実かつ迅速に処理できる。用意するユーザインタフェースは、画像上にドローツールで直線を描くように境界線に線分を描くものである。

指定された線分から幾何変換行列を算出し、幾何変換を行う。図3に幾何変換の概念を示す。この幾何変換はカメラの透視投影により歪んでいる画像の上下の線分を平行にするような平面射影変換である。この変換行列の算出には、画像間で4組の対応点が必要であるが、ここでは線分の端点を用いる。2本の線分の変換前後の4端点の座標から変換行列を算出する。

ここで、変換後の線分の端点の位置は、以下の条件を満たす必要がある。

- 回転が除去されること
- 2線分が平行であること
- 線分間の距離を指定できること

まず、光軸周りの回転を除去するため、回転補正を行う。ここで、この処理を行う理由は、この処理なしで次の平行化処理を行うと平行四辺形状の横ずれが発生してしまうためである。補正を行う回転行列を変換前の線分の傾きから計算する。各線分の傾き角は端点の座標から容易に計算できる。この傾き角から回転を除去する幾何変換を算出するが、傾き角は2本の線分のいずれか、あるいは両方の平均のどれを用いてもよい。なぜなら、これらの差は後の平行化処理や3画像間の平面射影変換処理で吸収できるからである。実際には、我々は下側の線分の傾き角を用いる。

算出した傾き角から、線分を水平にする回転行列を考慮することで、光軸周りの回転を除去する回転行列 R を計算できる。この変換は、次式で表すことができる。

$$I' = RI \quad (2)$$

ここで、 I は原画像、 I' は回転を除去した画像を示す。なお、回転行列 R は画像に鉛直な軸周りの回転を行う行列であり、回転角を θ とすると、次式で表される。

$$R = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

次に上下の 2 線分を平行化する変換行列を算出する。線分を平行化するため、各線分の端点の垂直座標を同一にする変換を考える。これは、変換後の端点の垂直座標を、変換前の垂直座標値の平均値に設定することで実現できる。具体的な手順を図 4 を用いて説明する。実線が変換前の線分、破線を変換後の線分とすると、左の端点の変換後の座標 $p = (u, v)$ は、変換前の線分の 2 端点の垂直座標値 v_1, v_2 を用いて、次式で表すことができる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 \\ (v_1 + v_2)/2.0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

2 線分の各端点、すなわち、4 点について変換前後の座標値が求まるので、この平行化を行う幾何変換も平面射影変換で実現できる。この変換行列を P とすると、平行化のための変換は次式で表すことができる。

$$I'' = PI' \quad (5)$$

ここで、 I' は原画像から回転を除去した画像、 I'' は平行化後の画像を示す。

最後に、絵巻を実寸法で印刷するために縮尺を調整する。これは、上下の 2 線分間の距離を指定することで実現する。入力画像の解像度、印刷機の解像度、および絵柄高さの実測データから絵柄高さの画素数を算出できる。絵柄高さを、指定した画素数にするための変換は、単純な相似変換なので、容易に計算できる。具体的には、この変換の縮尺 r は、変換前の線分間の距離 d と、指定された変換後の距離 d' から $r = d'/d$



図 4 平行化処理における端点の座標

Fig. 4 End-point coordinates for parallelization.

で計算できる。相似変換行列 S はこれを要素に持ち、その変換は次式で表すことができる。

$$I''' = SI'' \quad (6)$$

ここで、 I'' は平行化処理された画像、 I''' は相似変換後の画像を示す。なお、相似変換 S は、画像の回転、拡大縮小、および平行移動からなる変換で、同次座標を用いると次式で表される³⁾。

$$S = \begin{pmatrix} r \cos \theta & -r \sin \theta & t_v \\ r \sin \theta & r \cos \theta & t_h \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

ここで、 r は拡大・縮小を示す係数、 θ は回転角、および t_v, t_h は平行移動量を示す。今の場合、回転角および平行移動量が 0 の拡大・縮小だけの相似変換になる。

これらの変換はすべて線形変換であるので、まとめて以下のように表すことができる。

$$I''' = SPRI \quad (8)$$

したがって、式 (1) の正規化のための変換行列 N は次式のように幾何変換の組合せとなる。

$$N = SPR \quad (9)$$

以上より、変換された画像は、回転が除去され、絵柄の境界線が平行化され、さらに実寸法での印刷を考慮した縮尺に正規化された画像となる。

3.2 3 画像間での平面射影変換

正規化された画像を貼り合わせるために、画像の幾何変換を行う。ここでは、この幾何変換係数の算出方法を述べる。各画像は正規化されているが、平行移動などの単純な幾何変換では、重なり部において 2 重になり精度が十分でない。これは、透視投影歪が完全に除去されていないためである。図 5 を用いてこれを説明する。正方形を正対したカメラで撮影した場合、透視投影歪のない正射影ならば、図 5 (a) のように撮影されるはずである。しかしながら、カメラが右側から左を向くように撮影した場合、図 5 (b) のような透視投影歪が含まれる。同様にカメラが下側から上を向くように撮影した場合、図 5 (c) のような透視投影歪が

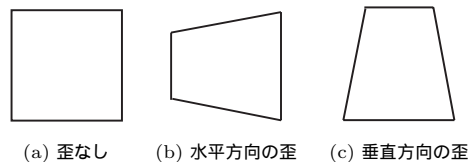


図 5 透視投影歪

Fig. 5 Perspective distortion.

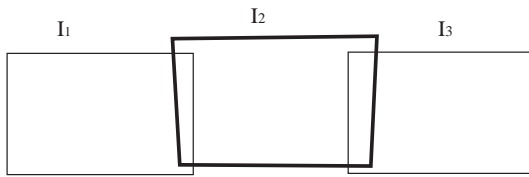


図 6 3 画像間での平面射影変換

Fig. 6 Planar projective transform among three images.

含まれる．実際の撮影ではこれら両者の歪が混合されて含まれる．前節に示した正規化処理では，図 5 (b) のような水平方向の歪だけが除去されるため，垂直方向の歪が残っている．

平面射影変換を 2 画像ごとに繰り返し用いる従来の手法では，この透視投影歪が考慮されるものの，それらは除去されないため，絵柄の高さが変わる問題がある．この方法では，ある画像（中央の画像）を基準画像として，他の画像をこの画像の座標系に合うように変換される．たとえば，この基準画像が図 5 (c) のような歪を含んでいる場合，他の各画像も上側が下側よりも縮小される変換になる．さらに，2 画像間の重なり部が少ない場合，幾何変換係数の算出に誤差が含まれやすく，幾何変換係数算出処理は逐次的に行われるために，この誤差が蓄積される．これらが原因で画像の高さが一定に保たれない．これらの問題を解決するために，3 画像間の平面射影変換を提案する．

図 6 はこの概念を示す．左右の 2 画像 I_1 ， I_3 に接続する真中の画像 I_2 を幾何変換する．このとき，画像の左右方向の透視投影歪は，前段の正規化で取り除かれているが，画像の上下方向の透視投影歪が残っている．そこで，図 6 に示すように画像を平面射影変換する．重要な点は，単に隣の画像に合わせて，それを順次繰り返すのではなく，左右両側の画像に合うように真中の画像を平面射影変換する点である．先の例のカメラ配置での変換は，小さく写った上側を下側に比べて拡大する処理になる．これは，着目している画像の変換の自由度が隣接する両側の画像により制限されることで，安定化される効果がある．

平面射影変換の算出には，最低限 4 組の対応点が必要である．このため，画像 I_1 と I_2 の重なり領域で 2 組，画像 I_2 と I_3 の間で 2 組対応する点が求められたい．それ以上多い場合は，最小二乗的に算出する．

具体的な処理手順を以下に示す．また，処理フローを図 7 に示す．

- (1) 2 次元平行移動で粗い位置合わせ
- (2) 重なり領域で特徴点の対応づけ
- (3) 特徴点の対応から変換行列算出

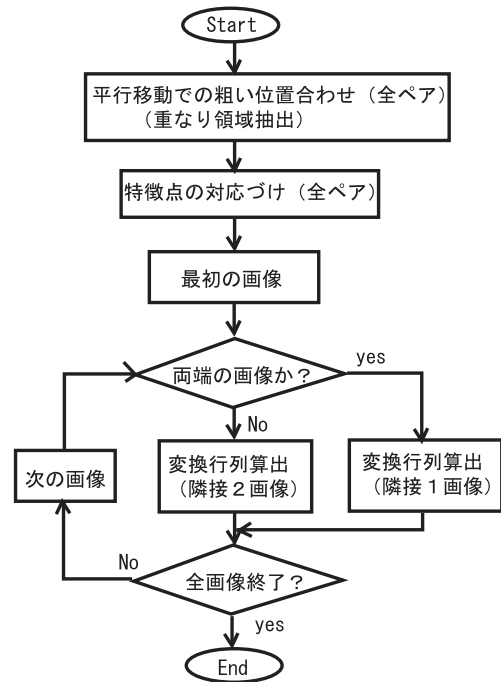


図 7 処理の流れ

Fig. 7 Processing flow chart.

ここで，上記各処理ステップの詳細を述べる．2 次元平行移動での粗い位置合わせは，2 画像ごとに処理を行う．一方の画像を指定した範囲で移動させて，2 画像間での重なり領域における正規化相互相関係数が最大となる位置を算出する．テクスチャが少ないために失敗する場合は，マウス操作によるユーザインタフェースを用いて人手で修正する．

平行移動により抽出される重なり領域において，特徴点を抽出し，もう一方の画像で対応づける．これには，勾配型フロー推定を用いた手法¹⁾を採用して自動で行う．これは，まず，特徴点を Tomasi-Kanade の方法により，画像の一次微分を考慮して自動で選択する．そして，画像をパッチ分割し，パッチごとにフロー推定を行う．フロー推定には，局所勾配型フロー推定である Lucas-Kanade 法⁵⁾を用いる．ここで，画像は解像度ピラミッドを作成し，粗密解析を行うことで，大きな動きに対応する．算出された疎なフロー場を線形補間することで，選択された特徴点の対応点を推定する．

特徴が少ない画像の場合は，グラフィカルインタフェースにより，手動で追加し，対応づける．このとき，指定された対応点の座標を初期値として，正規化相互相関を用いた領域ベースのマッチングにより，周辺を探索し最終座標とする．これにより，手動での対

応づけは大まかな位置でよい．また，最終座標は周辺画素での相関係数を用いてサブピクセル精度で算出する．なお，各画像は正規化された後でも，粗い位置合わせしか行われないうえ，隣接する画像間で対応する特徴点の垂直座標は画像間で若干異なる．このため，特徴点の対応は，水平方向だけでなく通常の 2 次元的な特徴点探索を行う．

特徴点の対応から変換行列を算出する．そして，この処理を各画像に対して順次行う．ここで，3 画像間での変換特有の問題が生じる．変換行列の算出はペアごとではなく，3 画像ごとに行う部分が問題になる．両隣の画像を固定した状態で，画像を変換する係数を算出しても，次の変換処理で隣の画像が変形される問題である．

そこで，この問題を次のように解決する．通常，ペアごとの貼り合わせのための幾何変換計算は，1 つの画像に着目し，もう 1 つの画像をそれに合わせるための変換行列を算出する．すなわち，目標とする変換後の特徴点の座標は，もう 1 つの画像の対応点の座標そのものである．

これに対して，3 画像間での平面射影変換では，着目している画像の特徴点と，隣接する画像の対応点の midpoint を，目標とする変換後の特徴点の座標に設定する．具体的には，図 6 の画像 I_2 に着目しているとすると，画像 I_1 との重なり領域の特徴点は，画像 I_1 の特徴点の座標と画像 I_2 での特徴点の座標との midpoint に変換する．これは，図 8 に示すように破線 X 印が画像 I_1 の特徴点，および実線の X 印が画像 I_2 の対応する点とすると，目標とする変換後の座標は円で表された点となる．画像 I_3 との間でも同様にする．同時に画像 I_1 に着目している場合は，画像 I_2 との重なり領域の特徴点は，対応する画像 I_2 の特徴点との midpoint に変換するように設定する．こうすることで，隣接画像

は着目画像に，同時に着目画像は隣接画像に，双方向から合わせ込むような変換を実現することができる．対応点の midpoint を目標点とする処理により，2 画像ごとの平面射影変換のような基準画像の設定を不要にする効果がある．すなわち，各画像が隣接する 2 画像に合うように変形され，隣接する 2 画像は，着目している画像の変形の度合いを制限することになる．

また，貼り合わされた画像の両端に配置される画像では特別の処理を行う．両端の画像では他の画像との重なり領域が片側しかない．このため，その領域内の特徴点対応だけを用いた幾何変換の推定は，特徴点の配置が偏るため精度が低くなるという問題がある．これに対して，重なりを持たない側の画像のコーナー座標を動かない点として，2 点追加することで，変換行列を安定に算出する．

以上により算出された変換行列を用いた幾何変換は以下のように表される．

$$I_g = HI_n \quad (10)$$

ここで， I_g は変換後の画像， I_n は変換前の正規化された画像， H は平面射影変換行列を示す．なお，平面射影変換行列 H は画像の座標を同次座標で表すとき，定数 a, b, c, d, e, f, g, h を用いて次式で表される³⁾

$$H = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

3.3 局所的な位置合わせ

絵巻は，16 世紀ごろに作成されたため，経年劣化により紙が伸縮する．また，絵巻はもろいため，撮影時に完全に平面にすることができない．このため，紙のたわみなど 3 次元的な歪みが発生する．しかしながら，前述した幾何変換（平面射影変換）では，平面を仮定しているため，良好に貼り合わせを行うことができない．そこで，我々は，大局的な幾何変換に加えて，局所的な位置合わせを提案する．

前節で説明した平面射影変換による変形を初期値として，画像間のずれを局所的に位置合わせする．この際，パッチに分割してパッチごとに移動量を算出するのではなく，各画素ごとに密なフロー推定を行い算出する．フロー推定には処理が高速な Lucas-Kanade 法⁵⁾を用いる．この結果を用いると，画素 p_i は，前節の手法で算出された平面射影変換 H と画素単位で算出された移動量 d_i を用いて次式のように変換される．

$$p'_i = Hp_i + d_i \quad (12)$$

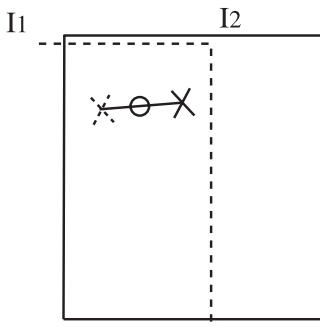


図 8 3 画像間の平面射影変換のための特徴点対応

Fig. 8 Feature correspondence for planar projective transform using three images.

ここで、フロー推定には aperture problem と呼ばれる問題がある．テクスチャが少ない場所や線形な濃淡変化の部分では、正確に求まらないという問題である．そこで、我々はフロー推定結果の信頼度に基づいて修正する方法²⁾を採用する．これは、各フロー推定の信頼度を、元の画像のテクスチャの有無と結果の残差から算出し、信頼度が低い結果は、しきい値処理して利用せず、代わりに周辺の結果を用いて補完する方法である．

画素の移動は、一方の画像の画素を他方の画像の画素に一方向的に合わせるのではなく、重なり部の端からの距離に応じて、移動量の重みづけを行う．すなわち、重なり部の中央付近では、両側の画像の画素の中心に双方の画像の画素を移動する．一方、重なり部の左画像に近い端付近では、左画像の画素はあまり動かさず、右画像の画素の移動量を多くする．右側はこの逆にする．つまり、双方の画像の画素の移動量を重なり部において平滑化を行うことで、後の色合わせ処理のブレンディング処理と合わせて、継ぎ目が滑らかになるようにする．

3.4 色合わせ

画像間で色が異なるため、後処理として色合わせが必要である．我々は、一般に利用される次の2つの色合わせを行う．

- ブレンディング
- 画像のカラー変換

ブレンディングは、重なり部において画素値を決定する際に、どちらの画像に近いかの距離に応じて重みづけをして画素値を決定する方法である．これは、画素値の変化をスムーズにする効果があり、色の継ぎ目が目立たなくなる．画像のカラー変換は、重なり部の情報を用いて画像全体の色を合わせる方法である．画像間のカラー変換は、各色チャンネルごとに次式で示す1次変換で行うことができる．

$$I' = aI + b \quad (13)$$

ここで、 I は変換前の画像の画素値、 I' は変換後の画素値、 a 、 b は係数である．これらの係数は、重なり部における画素単位での対応組の画素値のペアを用いて、最小二乗的に算出する．なお、我々は色合わせ処理において、まず各画像をカラー変換して全体の色調を統一した後、さらにブレンディング処理によって重なり部での色を画素ごとに一致させる．

以上により算出された幾何変換係数、画素単位のフローベクトルデータ、および画像間のカラー変換係数を用いて、画像の貼り合わせ処理を行う．

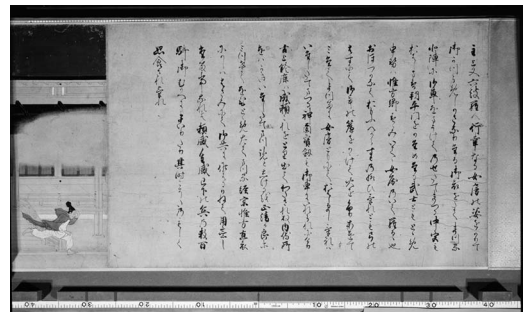


図 9 原画像
Fig. 9 Raw image.

4. 実験

実際の画像を用いて提案手法の有効性を検証した．画像は、撮影されたポジフィルムを産業用フィルムスキャナを用いてデジタル化された．各画像のサイズは、 $10,630 \times 6,378$ 画素であり、13 枚に分割されて撮影されている．図 9 に原画像の例を示す．

提案した手法を用いて、画像を貼り合わせた例を図 10 に示す．合成画像のサイズは、 $114,608 \times 5,085$ 画素である．これは、300 DPI でほぼ実寸で印刷することができる解像度である．画像の全域にわたって、精度良く貼り合わせが行われており、印刷したものを詳細に見ても、継ぎ目を確認することはできない．また、絵柄の高さは一定に保たれている．なお、不要な部分は手動でトリミングされている．

従来の手法の中で最も有効である 2 画像ごとの逐次的平面射影変換との比較を行った．図 11 に結果を示す．用いた画像は 7 枚である．2 画像ごとの平面射影変換を用いた方法では、絵巻の上下が高さが一定ではなく、左右の端では広がり、歪が発生している．また、重なり領域が少なく、テクスチャが少ない部分（中央の牛車左付近）の精度が良くない．対して、提案手法では平行が保たれており、全箇所精度良く貼り合わせられている．この実験では、紙面で効果を見せるために画像枚数は 7 枚であるが図 10 にもあるように長い絵巻でも良好にほぼ平行性が保たれている．3 画像間での平面射影変換では、前段の正規化処理のような上下の境界線の平行性を保つ配慮をしていないが、非常に長い絵巻の場合でも十分に満足できる平行性が保たれている．これは、従来の 2 画像ごとの逐次的な平面射影変換では、誤差が蓄積するのに対して、提案手法では、各着目画像の変形が両側の画像に拘束されるような効果があるためと考えられる．

次に局所的な位置合わせ手法の有効性を評価した．



図 10 貼り合わせ画像

Fig. 10 Constructed image mosaic.



(a) 2 画像ごとの平面射影変換を用いた結果



(b) 提案手法を用いた結果

図 11 平面射影変換と提案手法との比較

Fig. 11 Comparison between the mosaic with a conventional planar projection and that with our method.



(a) 局所位置合わせなし



(b) 局所位置合わせあり

図 12 精度比較 (左顔)

Fig. 12 Comparison (Left face).

図 12 に貼り合わせ精度の比較を示す．図 12 (a) では，局所的な位置合わせ処理をしていないため，位置ずれが発生し，画像が 2 重になっている．一方，図 12 (b) では，良好に貼り合わせが行われているのが分かる．ま



(a) 局所位置合わせなし



(b) 局所位置合わせあり

図 13 精度比較 (帽子)

Fig. 13 Comparison (Hat).

表 1 定量的誤差比較

Table 1 Comparison of pixel value differences.

局所位置合わせなし	20.2
局所位置合わせ	16.9
局所位置合わせ + 色合わせ	5.4

た，図 13 に別の例を示す．同様に図 13 (a) では，位置ずれが発生しているが，図 13 (b) では，精度良く貼り合わされているのが分かる．

また，合成精度の比較を定量的に行った．誤差として，重なり領域 w における画素値の差の絶対値の平均 E を用いる．

$$E = \frac{\sum_w |I' - I|}{W} \tag{14}$$

ここで， W は，重なり領域 w の画素数である．また，画素値はカラーであるため，RGB の各チャネルの差の絶対値の平均値を用いる．局所位置合わせなしの結果と提案手法の比較結果を表 1 に示す．表より，提案手法では誤差が約 1/4 になり，良好に貼り合わせが行われたことを確認した．

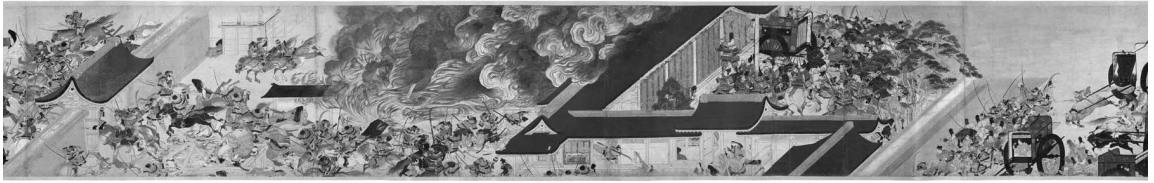


図 14 他の絵巻の合成例(一部)

Fig. 14 Another example of mosaics shown in part.

図 14 に他の絵巻の処理例を示す．同様に良好な貼り合わせが行われている．なお，紙面の都合上，結果の一部を切り出して表示している．

5. 考 察

透視投影歪が無視できない撮影環境において分割撮影された絵巻の画像から，継ぎ目のない画像モザイクの生成を行うことができた．提案手法の最大の利点はすでに撮影された画像だけを用いる点である．絵巻は古く貴重で，もろい遺産のため，貼り合わせ処理に都合の良い撮影方法で撮影し直すことが容易でない．このため，すでに撮影された画像は，近い距離からカメラで分割して撮影されているため，透視投影歪が無視できない．提案手法はこれを考慮した手法である．

従来の幾何変換のうち，透視投影歪を考慮する平面射影変換では，透視投影歪を考慮するもののそれらを取り除くことができないために，絵柄の高さが変化するという問題があった．また，紙のたわみがある部分では合成精度が十分でないという問題があった．

これらの問題に対して，我々は 3 つの手法の提案を行った．第 1 は，絵柄高さの正規化である．そして，第 2 は 3 画像間での平面射影変換である．これら 2 つの手法によって，透視投影歪を考慮し，かつ，絵柄高さを一定にする，精度の良い貼り合わせ処理が可能となった．

第 3 の手法は，大域的幾何変換に局所的位置合わせを組み合わせたものである．大域的幾何変換では，紙のたわみなどにより位置ずれが残る部分に対して，画素ごとのフローを推定することにより，精度の良い貼り合わせが可能となった．この手法では，画像間でオクルージョンが発生しない限り，どのような 3 次元の変形が発生しても対応することが可能になる．

3 画像間の平面射影変換をせずに，正規化画像を平行移動した結果に対して局所的な位置合わせ処理を行うことも考えられる．しかしながら，局所的な位置合わせ処理では，勾配型のフロー推定を利用しているため，良好な初期値が必要である．このため，3 画像間の平面射影変換により少しでも位置ずれが少なくすること

が有効である．フロー推定に領域ベースのマッチングを用いたとしても，繰返しパターンでの誤対応を避けるために必要である．

提案した手法は，処理ステップによっては自動ではなく，手動の操作を含む．絵柄の境界線を抽出する処理を完全自動化するのは容易ではないが，手動でも大きな負担ではない．画像間の特徴点対応は，完全な自動化は不可能と考えるが，自動化率を向上できる余地はある．現在は，この部分で処理速度の速い勾配型フロー推定を用いているが，正規化相互相関に基づく領域ベースのマッチングを採用することで自動化率の向上が期待できる．なぜなら，この手法は画像間の明るさの相違に影響を受けにくいからである．反面，処理時間が長くなる問題がある．

今回は，レンズ歪みが見られないためにその校正を行わなかった．しかしながら，撮影条件によっては，レンズ歪みの校正が必要になると思われる．これには，画像中の直線を用いる方法や画像間の重なり領域の点対応から計算する手法が提案されており，それらが利用できる．

また，今回は実寸での印刷による複製作成を主たる応用としたため取り組まなかったが，デジタル絵巻をコンピュータ画面で表示するための専用ブラウザの開発が必要である．画像データは非常に解像度が高いためデータ量が多い．これらを高速に描画する方法が望まれる．

提案した画像モザイク手法は，絵巻以外にも屏風絵やふすま絵あるいは壁画などにも応用できる可能性がある．絵巻に固有の条件は，絵柄高さが一定であることである．3 画像間での平面射影変換の利用や，局所的な位置合わせ手法は，絵巻に限らず，他への拡張も可能であると考えられる．

6. おわりに

分割して撮影された絵巻の画像を貼り合わせるための画像モザイク手法を提案した．絵巻は十数メートルの長さに及ぶため，従来の手法では精度良く貼り合わせることができなかった．提案手法は次の 3 つの手法

から構成される。

- 絵柄高さの正規化
- 3 画像間の平面射影変換
- 局所的位置合わせ

第 1 の絵柄高さの正規化手法と第 2 の 3 画像間の平面射影変換手法により、透視投影歪を考慮し、かつ、絵柄高さが一定に継ぎ目なく貼り合わせることが可能になった。また、第 3 の手法の局所的位置合わせにより、紙のたわみなどによる 3 次元的な変形があっても高精度に貼り合わせることができた。これらの手法を用いて貼り合わされた画像は印刷にも十分な精度であり、継ぎ目のない印刷が可能な長尺印刷機により、実物大の複製の製作が可能となった。実際の印刷物は文科系の歴史的資料の専門家により、貼り合わせ品質の評価をいただいた。今後は、絵巻以外のふすま絵や屏風絵などにも拡張したい。

謝辞 貴重な画像の提供をいただいた東京国立博物館、ポストン美術館、およびトッパン・フォームズ株式会社の関係各位に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 千葉ほか：画像特徴に基づくイメージモザイクング，電子情報通信学会信学論 (D-II)，Vol.J82-D-II，No.10，pp.1581-1589 (1999).
- 2) 千葉直樹，金出武雄：途切れや近接配置にロバストな線特徴追跡，電子情報通信学会論文誌 (D-II)，Vol.J81-D-II，No.8，pp.1744-1751 (1998).
- 3) Faugeras, O.: *Three-Dimensional Computer Vision*, The MIT Press (1993).
- 4) Levoy, M.: The Digital Michelangelo Project, *Proc. 2nd Internat. Conf. on 3-D digital Imaging and Modeling*, pp.2-11 (1999).
- 5) Lucas, B. and Kanade, T.: An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision, *7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-81)*, pp.674-679 (1981).
- 6) Nishino, K. and Ikeuchi, K.: Robust Simultaneous Registration of Multiple Range Images, *Proc. Asian Conf. on Computer Vision*, pp.454-461 (2002).
- 7) Puech, W. and Bors, A.G.: Mosaicing of Paintings on Curved Surfaces, *Proc. Workshops on Applications of Computer Vision*, pp.44-49 (1996).
- 8) Szeliski, R.: Video mosaics for virtual environment, *IEEE Computer Graphics and Applications*, pp.22-30 (March 1996).
- 9) 高見沢明雄：美術，工芸品を遺すために，映像情報メディア学会誌，Vol.55，No.1，pp.50-54 (2001).
- 10) 竹内ほか：ズームイン・ズームアウトを繰り返すビデオ画像シーケンスを用いた平面静止画の領域適応高精細デジタル化，電子情報学会論文誌 (D-II)，Vol.J83-D-II，No.12，pp.2675-2685 (2000).

(平成 14 年 9 月 2 日受付)

(平成 15 年 3 月 28 日採録)

(担当編集委員 久野 義徳)



千葉 直樹 (正会員)

昭和 40 年生。昭和 63 年神戸大学工学部機械工学科卒業。同年三洋電機(株)入社。平成 7 年から平成 9 年まで米国カーネギーメロン大学計算機科学科訪問研究員。平成 13 年京都大学大学院情報学研究科知能情報学専攻博士後期課程修了。マシンビジョン，コンピュータビジョンの研究に従事。平成 11 年画像センシングシンポジウム論文賞受賞。電子情報通信学会，IEEE-CS，ACM 各会員。



蚊野 浩 (正会員)

昭和 35 年生。昭和 59 年京都大学大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了。同年三洋電機(株)入社。平成 5 年から平成 7 年まで米国カーネギーメロン大学計算機科学科訪問研究員。現在，デジタルシステム研究所ヒューマンインターフェイス研究部部長。平成 10 年日本ロボット学会論文賞受賞。電子情報通信学会，日本ロボット学会各会員。