

画像特徴に基づくイメージモザイク

千葉 直樹[†] 蚊野 浩[†] 美濃 導彦^{††} 安田 昌司[†]

Feature-Based Image Mosaicing

Naoki CHIBA[†], Hiroshi KANO[†], Michihiko MINOH^{††}, and Masashi YASUDA[†]

あらまし 複数の静止画像からパノラマ画像を自動合成する手法を提案する。我々の手法は従来手法よりも処理が高速で、かつ自由なカメラ運動で撮像された奥行の深いシーンでも合成可能である。これを実現するために画像特徴（小方形領域）を用いた、次の二つの特長を有する手法を提案する。第1は、階層的オプティカルフロー推定に基づいて画像特徴の対応を得た後、線形解法により変換行列を算出する高速な変換行列算出方法である。この方法により、画像間の幾何学的な変形を高速かつ正確に行うことが可能になった。第2は、シーンが単一平面で近似できない場合に、画像特徴を頂点とする三角パッチに分割し、各パッチごとに平面射影変換行列を算出することで、奥行が深いシーンへの対応を可能としたことである。ここで、平面射影変換行列を求めるためには、通常4組の対応点が必要であるが、3組の対応点から算出する手法を提案する。最後に実画像を用いた実験により、本手法の有効性を示す。

キーワード イメージモザイク、パノラマ画像、オプティカルフロー推定、平面射影変換

1. ま え が き

複数の画像をはり合わせて、視野が広く解像度の高い画像を合成する技術（イメージモザイク）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 [2], [9]。これらは、実シーンを撮像した画像を接合して、水平方向 360 度の円筒面や、半球面に投影し、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。また、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。ところが、従来手法では、カメラの動きか、あるいは撮像対象を制限しなければならない。

一方、動画解析の分野では、オプティカルフロー（画像間の見かけの速度場）推定法が活発に研究されている。最近では、3次元形状を復元するための精度の良いオプティカルフロー推定法が提案されている [3]。また、ステレオカメラキャリブレーションの研究では、

精度良くカメラ間の幾何学的関係（エピポーラ拘束条件）を獲得できるようになってきた [12]。

本論文では、従来手法の問題点を解決し、自由なカメラ運動で、任意のシーンのパノラマ画像合成が可能な手法を提案する。すなわち、カメラ運動は、水平回転（パン）・垂直回転（チルト）などの回転だけでなく、並進運動も含む。また、対象とするシーンの幾何学的性質を、屋外などの平面的な配置だけでなく、室内などの任意の奥行を含むシーンにも拡張する。

提案する手法は、まず、オプティカルフロー推定に基づいて、画像の特徴的な小領域（特徴点）を精度良く対応づける。そして、対象とするシーンが単一平面で近似できる場合には、この対応関係から画像間の変換行列を算出し、合成する。更に、シーンが単一平面で近似できない場合には、特徴点を頂点とする三角形で構成される複数の平面にシーンを分割し、各平面ごとの変換行列をエピポーラ拘束条件を用いて算出して合成する。

以下、2. で従来研究例に触れた後、3. でオプティカルフロー推定とそれをイメージモザイクへ適用する手順を示し、4. にシーンが平面で近似できない場合について述べる。そして、5. に実験結果を示し、最後に考察と今後の研究課題を述べる。

[†] 三洋電機株式会社メカトロニクス研究所, 枚方市
Mechatronics Research Center, SANYO Electric Co., Ltd.,
Hirakata-shi, 573-8534 Japan

^{††} 京都大学総合情報メディアセンター, 京都市
Center for Information and Multimedia Studies, Kyoto Uni-
versity, Kyoto-shi, 606-8501 Japan

2. 従来の研究

従来から円筒面に画像を投影してパノラマ画像合成を行う手法が提案されている [2]。これには、次の二つの問題点がある。第 1 に、カメラを三脚に固定して、カメラの動きを水平面での回転（パン）だけに制限する必要がある。第 2 に、カメラの焦点距離あるいは画角をあらかじめ知る必要がある。

最近では、平面射影変換を用いて、これらの制限を解決する試みがある。平面射影変換は、対象となるシーンの幾何学的性質が 3 次元空間中の平面であれば、カメラ運動は、3 自由度の回転と 3 自由度の並進運動を含み、更にカメラ間のズームも考慮することができる。あるいは、カメラ運動を投影中心周りの 3 自由度の回転だけに限れば、対象となるシーンの幾何学的性質は平面だけでなく任意の奥行をもったシーンも扱うことができる。

Szeliski らは、画像間のオプティカルフローとその平面射影変換行列を、非線形最適化手法を用いて同時に求める方法を示した [8]。Zoghlami らは、各画像でそれぞれの特徴点を抽出し、全数探索によりそれら特徴点間の対応付けを行い、その結果から最適な平面射影変換行列を求めた [13]。これらの手法の問題点は、まず演算量が多いことである。そして、非線形解法を使う Szeliski らの方法は局所解に陥りやすい。また、シーンを平面と仮定しない手法もいくつか提案されている [4], [8]。しかしながら、多くのパラメータで反復非線形最適化法を利用するため、演算量が多く、安定に解が求まらないという問題がある。

これらの問題点を引き起こす原因は、画像間の特徴点の対応を使用せず、各画素の対応と変換行列とを同時に算出しようとする点にある。本論文では、画像特徴を用いて、これらの問題を解決する。

3. 特徴点の対応付けとイメージモザイク

3.1 オプティカルフロー推定

従来から動画における運動物体の見かけの速度場（オプティカルフロー）を推定する手法が多数提案されているが、局所こう配法である Lucas-Kanade 法 [6] は最も優れた手法の一つである [1]。その理由は、処理が高速、実装が容易、結果が信頼度をもつことである。

Lucas-Kanade 法を含むこう配法の問題点は、大きな動きに対応できないことである。そのため、我々は、

ピラミッド階層構造に数段階の解像度の異なる画像を作成する。また、十分な模様（テクスチャ）を含まない領域では精度が悪い。そのため、フロー推定結果の信頼度に応じてフロー場をしきい値処理し、膨張処理により結果を補完する手法 [3] を採用する。

3.2 相関を用いた重なり部の抽出

静止画像のように画像間の重なり部が少ない場合には、直接前述のオプティカルフロー推定を用いて特徴点を対応づけることは、困難である。なぜなら、この配型のオプティカルフロー推定では、良好な初期値が必要だからである。そこで、特徴点の対応付けに先立って、重なり部を抽出する。

重なり部の抽出には、正規化相互相関を用いる。画像 I_1, I_2 の重なり部 w において、式 (1) を用いて正規化相互相関係数 C を求める。画像間の移動量 d を可能な範囲で変化させ、 C が最も大きい移動量 d から、重なり部を抽出する。この重なり部の抽出は、特徴点の対応付けを行う前の粗い位置合せであるから、低解像度の画像を用いて高速化を図る。図 1 に原画像、図 2 に重なり部の抽出例を示す。

$$C(d) = \frac{\sum (I_1(x) - \bar{I}_1)(I_2(x+d) - \bar{I}_2)}{(\sigma_1\sigma_2)^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

ここで、 \bar{I} は、重なり部の平均画素、 σ は、重なり部



図 1 原画像
Fig. 1 Original images.

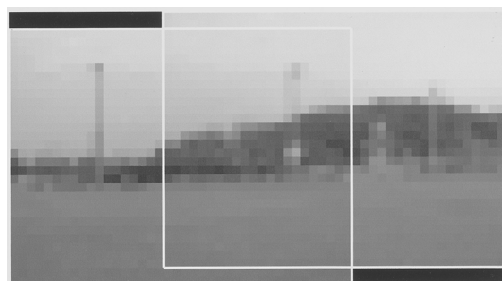


図 2 重なり部の抽出結果
Fig. 2 Overlap extraction.

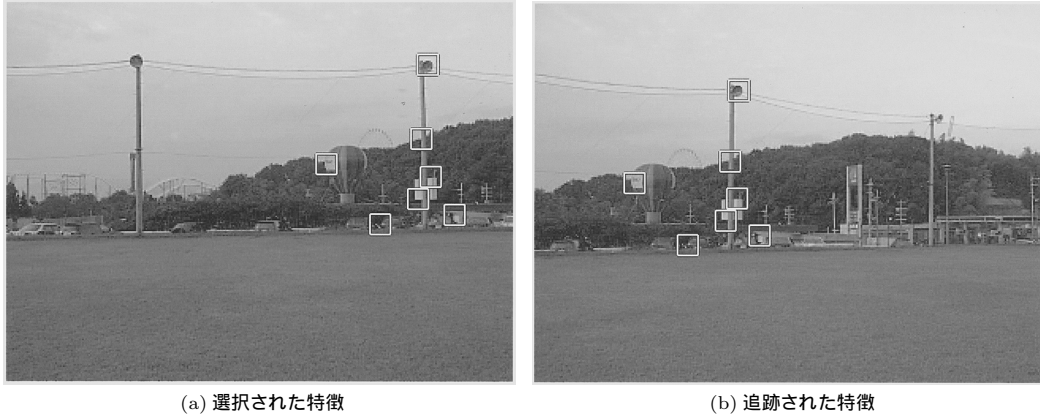


図3 特徴追跡の例

Fig. 3 Feature matching result.

の画素値の分散を示す．

3.3 特徴点の対応付け

抽出された2枚の画像の重なり部に対して、前述したオプティカルフロー推定法により特徴点を対応づける．まず、Tomasiらの方法[11]によって、第1画像の重なり部分から、対応付けに有効な特徴点（小方形領域）を選択する．この手法は、物体の角などの特徴的な領域を自動で選択するもので、画像の1次微分成分が大きく、かつ垂直成分と水平成分に相関がないものを選択する．

次に、高速化のために画像を適当なサイズ（ 13×13 程度）のパッチ（方形領域）に分割し、パッチごとにフローベクトルをサブピクセル精度で求める．第2画像での特徴点の位置は、必ずしもパッチの位置に一致しないので、4近傍のパッチのフローベクトルから双線形補間により計算し、対応点とする．ここで、各特徴点間の正規化相互相関係数に基づいて、誤対応を削除する．図3に追跡結果を示す．

3.4 平面射影変換行列の算出

対象としているシーンが遠景や、近くても建物や壁、黒板など平面的な場合には、それらを単一平面と仮定することができる．図4のように3次元空間中の点 M を、ある視点 C_1 とその位置からカメラを回転(R)及び並進(T)させた視点 C_2 から観察したとき、すべての観測した点が3次元空間中である平面上にあるならば、これらの各画像面での座標 m_1, m_2 の関係は、線形であることが射影幾何学において知られており、式(2)で表される[5]．

すなわち、画像座標を同次座標で表した第1画像の点 $m_1 = (x_1, y_1, 1)^t$ は、第2画像上で対応する点 $m_2 = (x_2, y_2, 1)^t$ をもち、それらの間の関係は、次式で定義され、homographyと呼ばれる．

$$m_2 \sim Hm_1 \quad \text{or} \quad \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} h_0 & h_1 & h_2 \\ h_3 & h_4 & h_5 \\ h_6 & h_7 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで \sim は射影的に等しいことを示し、スケール因子が残る．また、以下のように書き換えることができる．

$$\begin{cases} x_2 = \frac{h_0x_1 + h_1y_1 + h_2}{h_6x_1 + h_7y_1 + 1} \\ y_2 = \frac{h_3x_1 + h_4y_1 + h_5}{h_6x_1 + h_7y_1 + 1} \end{cases} \quad (3)$$

なお、この関係は、カメラ運動を回転だけに限った場合は、任意の奥行をもつシーンに対して成り立つ[7]．

特徴点の対応から、平面射影変換行列を算出する．平面射影変換行列 H の未知パラメータ数は8個であり、一組の対応点は2個の式を与える．したがって、4組以上の対応点があれば、最小2乗法によりこの行列を求めることができる．

3.5 平面射影変換を用いたパノラマ画像合成

平面射影変換を用いると、仮想的に撮像面を拡大することで、視野を広くすることができる．図4の点線で示した部分は、視点 C_1 からは観察できないが、視点 C_2 から観察可能な部分である．これらの領域は、視点 C_1 の画像を基準画像とした場合、前節で示した手法を用いて行列を算出し、第2画像から変換して

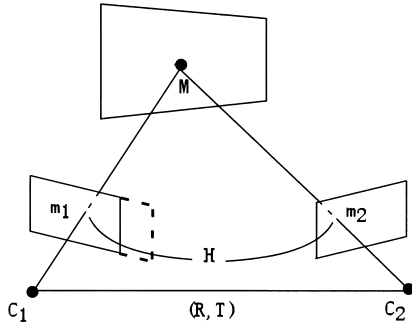


図4 平面射影変換

Fig. 4 Planar projective transformation.

得ることができる．このように視点 C_1 の撮像面を広くすることは、短焦点のカメラで撮像したことに相当する．

基準画像と変換画像が重なる領域では、両画像の画素値の調合処理を行う．重なり部の画素値は、単純に両画像の平均値を使うと、画像間の明るさの違いのために継目ができてしまう．そこで、この継目を目立たなくするために、我々は、重なり部の境界からの距離に応じて、各画像の画素値の重みを決定し、両画像の画素値を調合する．なお、重みは、境界に近い方の画像を大きくする．

画像が3枚以上の場合は、基準画像に近い画像から順に変換し、繰返的に合成を行う．なお、基準画像の選択は、3.2に示した粗い位置合せの結果から、中央の画像を基準画像とする．変換行列は、まず連続する2枚の画像間で算出し、次に基準画像への変換行列を算出する．画像 N が基準画像0と重なり部をもたない場合でも、次式のように、途中の画像 $(1, 2, \dots, N-1)$ の変換行列を利用して求める．

$$H_{0N} = H_{01}H_{12}\dots H_{N-1N} \quad (4)$$

4. 複数平面を用いた変換

室内などの任意の奥行をもつシーンを、回転だけでなく並進も含む自由なカメラ運動で撮像した場合、重なり部において、画像が2重になる．図9左にその例を示す．これを解決するために、本論文では、画像特徴の対応関係を用いて、シーンを特徴点を頂点とする三角パッチに分割し、各パッチごとに平面射影変換行列を算出する方法を提案する．なお、三角パッチ分割には Delaunay の方法を用いる．この方法は、点の集合から Voronoi 図に基づいて、凸な三角形分割を行う

一般的な手法である [5] ．

4.1 三角パッチごとの変換行列算出

シーンを三角パッチに分割すると、各パッチごとの対応関係だけでは平面射影変換行列を求めることができない．なぜなら、三角形の頂点は3点しかないのに対し、平面射影変換行列の自由度は8であるため、4組の対応点の組が必要だからである．しかし、対応点間のグローバルな関係を表すエピソード拘束を用いることで、変換行列を求めることができる．

2画像間のエピソード拘束条件は、基礎行列 F と対応点 m_1, m_2 を用いて以下の式で表される．

$$m_2^T F m_1 = 0 \quad (5)$$

まず、この基礎行列 F を、対応付けられた特徴点対から獲得する．従来は、キャリブレーションされていないカメラ間の対応点から、その基礎行列を算出する手法は、ノイズに敏感であるとされてきた．しかしながら、最近では、ロバスト推定を用いて、精度良く算出する手法が提案されており、これを用いる [12] ．

次に、基礎行列と3組の対応点を用いて、平面射影変換行列を算出する．式(2)を式(5)に代入すると、以下の式を得る．

$$m_1^T H^T F m_1 = 0 \quad (6)$$

式(6)は、ベクトル m_1 を変換したものが、そのベクトル自身に直交することを示すので、行列 $H^T F$ は、ベクトル m_1 の外積である．ベクトル m_1 と任意のベクトル $a = (a_1, a_2, a_3)$ との外積は、 a を要素とする式(7)に示す非対称行列を使って書くことができる．

$$H^t F = \begin{pmatrix} 0 & a_1 & -a_2 \\ -a_1 & 0 & a_3 \\ a_2 & -a_3 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

式(7)の行列の要素の関係から、対角要素3個と、対称要素対 $(a_1, -a_1), (a_2, -a_2), (a_3, -a_3)$ の加算が、それぞれ0である必要があるので、 H の係数に関する6個の方程式が得られる．そして、式(2)からは、3組の対応点を用いて6個の方程式が得られ、合計12個の方程式が得られる．未知数は8個であるので、これらを連立させた最小2乗法により、平面射影変換行列を算出することができる．

4.2 シーン分割の判定

シーンを複数の平面で分割するかどうかは、単一の変換行列で合成した場合の誤差から判定する．まず、

シーンを分割せずに平面射影変換行列 H を算出する。次にこの変換行列 H を用いて、すべての特徴点 p を変換して、対応する点 p' の座標を算出する。ここで、観察された特徴点の座標と変換された座標の平均距離 D を次の式で計算する。

$$D = \frac{1}{N} \sum_i (p'_i - p_i)^2 \quad (8)$$

ただし、 N は特徴点の個数である。単一の平面射影変換行列だけで正しく変換できる場合には、距離 D が小さいはずであるので、 D があらかじめ定めたしきい値よりも大きければ、上述した手法を用いてシーンを複数の平面に分割する。

4.3 三角パッチを用いたパノラマ画像合成

合成の手順は、まず、2 画像間のすべての特徴点対応を用いて、平面射影変換行列 H を算出する。そして、シーンを三角パッチで分割し、各パッチごとの平面射影変換行列 H_t を算出する。次に、画像を変換する際、重なり部に対しては、パッチごとの変換行列 H_t を用いる。一方、重なり部以外は、変換行列 H を用いる。

5. 実 験

以上述べた手法を実画像を用いて実験した。画像は、



図5 遠景
Fig.5 Far scene.

デジタルスチルカメラを使用し、三脚を使用せずに手で把持して撮像した。

5.1 単一平面の例

図5に遠景の合成結果を示す。継ぎ目なく良好に合成が行われている。2枚の画像間の処理時間は、Pentium II(300 MHz)を用いて、重なり部の抽出に2秒、特徴点の対応付けと変換行列算出に4秒、画像の変換(warping)に3秒、そして画素値の調合に2秒の合計約11秒であった。なお、画像の解像度は 640×480 であり、重なり領域抽出に用いた低解像度の画像サイズは、 40×30 である。また、オプティカルフロー推定には、4段階の解像度の異なるピラミッド階層を用いた。

図6に従来の円筒面に投影する手法との比較を示す。この例では、画像間で光軸周りの回転が生じ、かつ透視投影ひずみが生じているが、本手法により正しく合成されている。一方、円筒面に投影してパノラマ合成を行う手法では、2重になっており、精度が悪い。その原因は、カメラ運動がパン以外の運動を含んでいるからである。なお、比較を容易にするため、双方とも画素値の調合を施していない。

図7に渓谷の例を示す。これは、本手法ではカメラの運動がパンだけに制限されないことを示す。この例では、カメラ運動にパンとチルトの両方が含まれているが、正しく合成されている。

以上の画像はカラーであるが、変換行列算出には、高速化のためにRGBの成分の中で、G成分だけを用いた。その理由は、人間の目がG成分に最も敏感であるといわれるためである。

5.2 複数平面

図9に、シーンが任意の奥行を含み、かつカメラ運動が回転だけでなく並進を含む場合に、シーンを三角パッチに分割して合成した例を示す。また、図8は分



図6 時計台(左図は平面射影変換, 右図は円筒面投影)
Fig.6 Clock tower. (left: planar projective transform, right: cylindrical projection)



図7 溪 谷
Fig. 7 Canal.

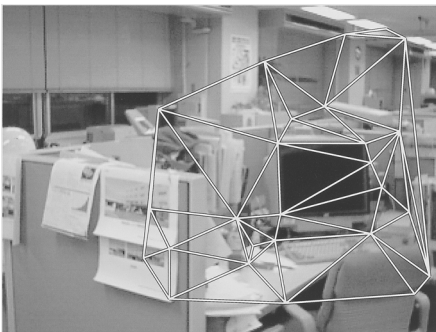


図8 三角パッチによる分割
Fig. 8 Triangulation.

割に利用した三角パッチを示す．なお，重なり部における画素値の誤差の平均は，単一平面を用いたときに比べて16%減少し，シーンの分割が有効であることを示す．

ここで，三角パッチの中には，必ずしも実際の平面に対応しないものがある．なぜなら，三角パッチの頂点が同一平面上にあっても，その内部のシーンが平面である保証がないからである．三角パッチが平面に対応する場合は，画像間の変換行列が正しく求まるので両画像の画素値を調合しても幾何学的ひずみはない．一方，そうでない場合には，変換行列が正しくないため，両画像の画素値を調合すると画像が2重になる．

そこで，三角パッチが平面に対応しない場合は別の後処理を施した．まず，三角形の内部が実際の平面に対応するどうかを，変換した画像と原画像との正規化相互相関係数を計算して判定した．係数が，しきい値（実験では0.85）以上に異なる場合には平面に対応しないと判定した．その場合には，両画像の画素値を調合するよりも，どちらか一方の画像を用いた．こうすることで，幾何学的なひずみを目立たなくすることができる．

5.3 従来手法との比較

我々の手法を，画像特徴を用いない従来手法と比較した．従来手法には，Szeliskiらによる非線形最小化法を用いた．この手法は，式(9)で示される原画像の画素値 I と変換後の画素値 I' との誤差の2乗和 E を，最小化する変換行列を求める．

$$E = \sum_i [I'(x'_i, y'_i) - I(x_i, y_i)]^2 \quad (9)$$

最小化には，Levenberg-Marquardt法と呼ばれる反復的非線形最小化法を用いている．

しかしながら，Szeliskiらの方法には，二つの問題点がある．第1は，計算量が多い点である．これは，繰り返し変換を行うためである．第2は，局所解に陥る可能性が高く，正しいパラメータが求まらないことがある．したがって，Szeliskiの方法では良好な初期値を与えることが特に重要である．



図9 任意の奥行をもつシーンの例 (左は単一平面を利用, 右は複数平面に分割)
Fig. 9 Arbitrary depth scene. (left: single, right: multiple)

表1 従来手法との処理時間比較 (単位: 秒)
Table 1 Processing time comparison. (seconds)

実験画像	本手法	Szeliski	枚数	サイズ
時計台	4	16	2	640 × 480
遠景	10	74	3	640 × 480
渓谷	24	91	3	1024 × 768

表2 重なり抽出処理の精度
Table 2 The accuracy of overlap extraction.

抽出手法	正規化相互相関	SSD
正解率 (%)	94.5	81.0

表1に処理時間の比較を示す。本手法は、従来よりも4倍から7倍高速である。なお、処理時間は、SGI Indigo 2 (195 MHz) 上で、抽出された重なり画像から変換パラメータ算出までを計測した。Szeliskiらの方法では、局所解に陥いるのを避けるために、解像度の異なるピラミッド画像を4段階作成した。また、各階層での最大繰返し回数を10回とした。

5.4 重なり抽出処理の精度

3.2に示した重なり抽出方法の性能を評価した。実験画像には、デジタルスチルカメラを手で把持して撮像した実画像200組を用いた。なお、画像サイズは240 × 320から1024 × 768までであり、高速化のため40 × 30の低解像度画像を作成して、重なり部を抽出した。

表2に実験結果を示す。各画像組の重なり部が、正しく抽出されたかどうかを、人間が見て判断した。用いた抽出手法は、正規化相互相関に基づく手法に加え、画素値の誤差の2乗和 (SSD: Sum of Squared Difference) を評価値とする手法を試した。

SSDが失敗し、正規化相互相関が成功するデータの多くは、画像間の明暗の差異が大きかった。ただし、

正規化相互相関では、その計算量が多いため、処理時間が1.5秒 (SSD) から約0.5秒長くなり、約2秒になる (Pentium II 300 MHz, サイズ: 640 × 480)。

6. 考 察

我々が提案する画像特徴の対応に基づく手法の利点は、従来手法よりも処理が高速かつ正確な点である。平面射影変換を用いる従来手法は、特徴を用いるものとそうでないものの2種類に分類されるが、特徴を用いずに画像全体を使うSzeliskiの手法と比べて、我々の手法は処理が4倍から7倍速い。特徴点を用いる従来手法は、対応付けを手動で行うものと自動で行うものがある。自動で対応づける方法には、あらかじめ各画像で個別に特徴点を抽出し、総当り的に対応づける方法 [13] があるが、我々の手法はこの手法に比べてはるかに高速である。この手法は、特徴点の数が増えるとその処理時間は級数的に増え、画像によっては15分以上処理時間がかかると報告されている。自動で特徴点を対応づける手法には、テンプレート画像をラスタ走査するテンプレートマッチング法が古典的であるが、処理時間が長く、かつ誤対応が多い。これに対して、我々の手法は、局所こう配型オプティカルフロー推定法に基づくので高速で、かつ誤対応も少ない。

我々の手法は、シーンの幾何学的な性質に左右されないが、従来手法と同様にシーンのテクスチャの有無に左右される。画像特徴に基づく我々の手法は、テクスチャが少ない画像では、特徴点の対応が見つけれなかったり、画像によっては、誤対応が避けられない。また、我々は、静的なシーンをカメラを移動させながら撮像することを想定しているが、実際には人や車など移動物体がある。これらの移動物体を正しく追跡した場合には、正しい変換行列が算出できない。し

かしながら，単一平面を仮定できる場合には，ロバスト推定を利用し，誤追跡結果を取り除くことが考えられる [10]．一方，複数平面を利用する場合には，誤対応を手動で修正する必要がある．

また，我々のシステムでは，重なり抽出手法として 2 次元平行移動モデルを採用している．そのため，カメラの極端な光軸周りの回転に対して，Zoglami らの方法 [13] と比べて弱い．しかしながら，低解像度の画像を用いているため， ± 10 度ぐらいの回転には対応できている．更に大きな回転に対応させるために，重なり抽出方法を，光軸周りの回転に対応させることは容易であるが，処理時間との兼ね合いになる．

7. む す び

本論文では，画像特徴に基づいて，パノラマ画像を合成するイメージモザイク手法を提案した．我々の手法の特長は，画像の撮像方法や撮像シーンに制限がなく，手で把持したカメラで撮像した画像を用いることが可能な点である．まず，画像間の変換行列を求める際に，オプティカルフロー推定による特徴点対応付け手法が有効であることを，実画像を用いた実験により示した．また，提案した手法は，線形解法を用いるので従来よりも，計算量が少ない．更に，奥行の深いシーンを合成する際に，画像特徴を用いることで，シーンを複数の三角パッチに分割し，3 組の対応点とカメラ間のエピポラ拘束条件を示す基礎行列から平面射影変換行列を獲得する手法を示した．

今後は，他の画像特徴（線特徴）を用いた高精度化と，はり合わされた画像から任意の異なる視点の画像を合成し，更に臨場感のある仮想現実環境の構築の研究を進めたい．

文 献

- [1] J. Baron, D. Fleet, and S. Beauchemin "Performance of optical flow techniques," Int. J. Computer Vision, vol.12, no.1, pp.43-77, 1994.
- [2] S.E. Chen, "QuickTime VR—an image-based approach to virtual environment navigation," SIGGRAPH '95, pp.29-38, 1995.
- [3] 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," 信学論 (D-II), vol.J81-D-II, no.8, pp.1744-1751, Aug. 1998.
- [4] R. Kumar, P. Anandan, and K. Hanna, "Direct recovery of shape from multiple views: a parallax based approach," Proc. ICPR, pp.685-688, 1994.
- [5] O. Faugeras, Three-dimensional computer vision: A geometric viewpoint, MIT Press, 1993.
- [6] B. Lucas and T. Kanade, "An iterative image reg-

istration technique with an application to stereo vision," In Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-81), pp.674-679, 1981.

- [7] R. Szeliski, "Video mosaics for virtual environment," IEEE Comput. Graphics & Appl., pp.22-30, March 1996.
- [8] R. Szeliski, "Image mosaicing for tele-reality applications," CRL Technical Report 94/2, Digital Equipment Corporation, 1994.
- [9] R. Szeliski and H.Y. Shum, "Creating full view panoramic image mosaics and environment maps," SIGGRAPH '97, pp.251-258, 1997.
- [10] H.S. Sawhney and S. Ayer, "Compact representations of videos through dominant and multiple motion estimation," IEEE PAMI, pp.814-830, 1996.
- [11] C. Tomasi and T. Kanade, "Shape and motion from image streams: A factorization method—part 3 detection and tracking of point features," CMU-CS-91-132, Carnegie Mellon University, 1991.
- [12] Z. Zhang, "Determining the epipolar geometry and its uncertainty: A review," Int. J. Computer Vision, vol.27, no.2, pp.161-195, 1998.
- [13] I. Zoglami, O. Faugeras, and R. Deriche, "Using geometric corners to build a 2D mosaic from a set of images," CVPR 97, pp.420-425.

(平成 11 年 2 月 25 日受付, 6 月 21 日再受付)



千葉 直樹 (正員)

昭 63 神戸大・工・機械卒．同年三洋電機 株 入社．平 7～9 米国カーネギーメロン大学計算機科学科客員研究員．平 10 京大大学院博士後期課程入学．現在，メカトロニクス研究所主任研究員．情報処理学会，電気学会，IEEE CS 各会員．



蚊野 浩 (正員)

昭 59 京大・工・大学院修士課程情報工学専攻了．同年三洋電機 株 入社．平 5 年～7 年カーネギーメロン大学計算機科学科客員研究員．現在，メカトロニクス研究所ヒューマンサイエンス室室長．工博．情報処理学会，ロボット学会各会員，平 10 年日本ロボット学会論文賞受賞．



美濃 導彦 (正員)

昭 58 京大大学院博士課程了。同年工学部助手，昭 62～63 マサチューセッツ州立大学客員研究員，平 1 京大工学部附属高度情報開発実験施設助教授，平 7 同教授，平 9 京大総合情報メディアセンター教授。画像処理，人工知能，知的コミュニケーション関係の研究に従事。工博。IEEE，ACM，情報処理学会，画像電子学会，日本ロボット学会各会員。



安田 昌司

昭 55 京大・工・大学院修士課程了。同年三洋電機 株 入社。現在，メカトロニクス研究所部長。工博。日本機械学会，日本ファジィ学会，システム制御情報学会，IEEE 各会員。