3カメラ間の射影幾何を用いた View Morphing

View Morphing Based on Projective Geometry between Three Cameras

木村 誠^{†,††}, 正会員 斎藤 英雄^{†††}

Makoto Kimura^{†,††} and Hideo Saito^{†††}

あらまし 本論文は、2カメラ間の射影幾何のみに基づいた画像合成法“View Morphing”を拡張し、完全なキャリブレーションを使わずに、3枚の画像から歪みのない画像合成を行ったものである。

キーワード：多視点映像、射影幾何、画像合成、Image Based Rendering

1. ま え が き

コンピュータ・ビジョンの分野において、実画像に基づいて、任意の場所からシーンを撮影したかのような画像を合成するシステムが従来より研究¹⁾⁶⁾⁷⁾⁹⁾されている。そのような画像合成のみを目的としている場合、画像中の対応点からもっともらしい画像を合成する⁴⁾⁶⁾⁹⁾ことが可能である。筆者らは射影幾何⁵⁾⁸⁾の概念に着目し、弱キャリブレーションと呼ばれる簡易なキャリブレーションからカメラ間のエピポーラ幾何のみを同定し、エピポーラ拘束と画像の輝度情報から対応点の探索を行い、求まった対応点の内挿により画像を合成する手法を提案²⁾⁹⁾してきた。

2カメラを用いた画像合成において、前述のような内挿による合成画像に不自然な歪みが発生する可能性がSeitzによって指摘³⁾されている。Seitzは、この問題を解決するために、カメラ間の射影幾何を利用した“view morphing”³⁾と呼ばれるモーフィング手法を提案している。しかしながら、Seitzの提案したview morphingでは、カメラの数が二つであるということに依存した処理を用いており、仮想視点の位置は2カメラの中間の直線上に限定されていた。一方、筆者らの従来²⁾の研究では、

仮想視点は3カメラで囲まれた三角形の内部に任意に設定可能であったが、射影幾何的に正確な画像合成を行っているわけではなかった。そこで本論文では、Seitz手法を拡張することにより、3カメラからview morphingを行う手法を提案する。

2. 提 案 手 法

本論文では3画像を入力としており、各カメラ同士のFundamental Matrix⁵⁾⁸⁾および各画像中の対応点は予め求まっているものとする。

Seitzは2画像を用いて、内挿の前後にカメラ間の射影幾何を考慮した処理を適用する画像合成法“view morphing”³⁾を提案した。以下に述べる提案手法はview morphingを3カメラへ拡張したものである。Seitz手法では、仮想カメラの位置は2カメラの中間に限定されていた。本論文の3画像への拡張により、仮想カメラの位置は3カメラで囲まれる三角形内で2次元の自由度を持つことが可能となる。

2.1 Pre-Warp

カメラモデルの画像平面全体を3カメラの焦点に平行な仮想平面へ射影することにより、仮想的な並行カメラの撮像画像を得る。この処理は、平面から平面への射影であるので、理論上はhomography⁸⁾によって実現され、Pre-Warpと呼ばれる。

Seitz手法では、2画像を入力としていたため、2カメラの焦点に並行な仮想平面への射影は、単純にエピポーラ線の平行化処理によって実現されていた。本論文では、3カメラを用いているが、Pre-Warp後の画像において、3通りの画像ペアのエピポーラ線が、それぞれ平行化されることはSeitz手法と同様である。しかしながら、3画像のPre-Warpにおいては、別のカメラ組のエピポーラ線がどのような角度で交わるかということと、また、ある組のエピポーラ線同士の間隔と別組のエピポーラ線同

2003年5月30日受付、2003年7月31日再受付、2003年9月4日採録
†独立行政法人 産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センター

(〒135-0064 江東区青海 2-41-6, TEL 03-3599-8201)

††CREST, 科学技術振興事業団

(〒604-0847 京都市中京区烏丸小路上路秋野々町 535 日土地京都ビル 8F, TEL 075-213-4315)

†††慶應義塾大学 情報工学科

(〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)

†Digital Human Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

(2-41-6, Aomi Koto-ku Tokyo 135-0064, Japan)

††CREST, Japan Science and Technology Corporation

(Nittochikyouto Bldg. 8F, 535 Akinonochou Oshikouji-Agaru Karasuma Nakagyou-ku Kouyoi 604-0847, Japan)

†††Department of Information and Computer Science, Keio Univ.

(3-14-1 Hiyoshi Kouhoku-ku Yokohama 223-8522, Japan)

士の間隔がどのような比率になるかについて配慮する必要がある。

別カメラ組のエピポーラ線同士の成す角度は、実際のカメラの配置に依存する。図 1, 2 に示すように、各カメラ間のエピポーラ線により構成される三角形は、3次元空間内で三つのカメラ焦点が成す三角形と相似になる。以降、このカメラ焦点が成す三角形を“Focal Triangle”と呼ぶ。

本論文では“3カメラの内部パラメータは同一であり、カメラ光軸は画像平面と画像の中心で直交している”という仮定をする。図 3 に示すように、Focal Triangle の各頂点の角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ は、画像平面上のエピポールの座標とカメラの焦点距離から求めることが可能である。また、Focal Triangle は三角形であるので、3頂点の角度の合計は π にならなければならない。本論文では、3カメラの焦点距離が共通の値であると仮定しているの、焦点距離を f とすると、上記の条件を満たす f は一意に決まる。よって、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ が求まるため、Pre-Warp 後の画像中で各カメラ組のエピポーラ線が成す角度も決定される。

求まった焦点距離 f を用いることにより、ある画像組間で二つのエピポーラ線が与えられた時、エピポーラ平面の成す角度を求めることができる。そこで、例えば図 4(a), (b) のように、Pre-Warp の基準となるエピポーラ線を画像内に任意に与えると、それらエピポーラ線を与えるためのエピポーラ平面同士の成す角度 ϕ_a, ϕ_b が決定される。Pre-Warp 後の画像平面 (仮想平面) と焦点の位置関係が決まれば、図 4(c) に示す Pre-Warp 後のエピポーラ線同士の距離 d_a と d_b の比を ϕ_a と ϕ_b から求めることが可能である。前述のように仮想平面は3焦点に平行であり、すなわち、Focal Triangle に平行である。よって、図 3 の Focal Triangle から明らかなように、カメラに対する仮想平面の傾きは一意である。つまり、焦点と仮想平面の距離が決まれば d_a と d_b を決定可能である。本論文では、Pre-Warp 後の焦点距離として先に求めた入力カメラの焦点距離 f を用いて d_a, d_b を求めたが、焦点距離を変化させても Pre-Warp 後の画像全体のスケールが変化するだけで d_a と d_b の比に影響はないので、この焦点距離は任意の値を用いることができる。

このようにして求まった条件に基づいて、Pre-Warp 前後の対応点を任意に4点獲得し、Pre-Warp に用いる homography を求め、Pre-Warp を実現する。

2.2 仮想平面内での内挿画像生成

前節の処理により、三つの変形画像が得られた。本論文では、入力画像間の対応点は予め求まっているものとしている。したがって、変形画像同士の対応点もすでに求まっている。それらの対応点について、3画像中の座標値と画素値それぞれを重み付け平均することにより、内挿画像を合成する。

図 1 Pre-Warp: カメラ焦点に平行な平面への画像全体の射影
Pre-Warp: Projection of image plane onto a plane, which is parallel to focal points.

図 2 Focal Triangle: 3カメラの焦点を頂点とする三角形
Focal Triangle: The vertices are focal points.

図 3 Focal Triangle の形状はカメラ内部パラメータとエピポールによって求めることができる
The shape of Focal Triangle can be obtained from intrinsic camera parameters of cameras and epipoles.

図 4 平行化されたエピポーラ線同士の間隔はエピポーラ平面同士の角度から決定される
Distance of rectified epipolar lines can be obtained from angles between epipolar planes.

2.3 Post-Warp

前節で得られた内挿画像は、光学的には、あるカメラ焦点と画像平面による撮影画像を表している。しかし、その焦点と画像平面の位置関係は現実には存在し得ないようなカメラを示している。そこで、実在し得るようなカメラモデルによる撮影画像へと再変形する必要がある。この処理について Seitz 手法は手動で解決を行っているが、本論文では自動解決を試みた。

第 2.1 節の Pre-Warp は、三つのカメラについて、実在の画像平面から別の平面への射影を homography で実現したものである。そして、その共通の平面と実在の各画像平面の関係は、個別の homography によって記述されている。homography は四つの対応点から求めることができるため、本論文では、Pre-Warp で用いた各 homography について、その homography による射影前後の 4 対応点を求めておき、それらの対応関係を適切に内挿することにより、Post-Warp に必要な homography を求めた。対応点の内挿処理を用いた homography 合成を適用しても、実在のカメラで撮影し得るような画像が合成される理論的な保証はないが、我々の経験上はもっともらしい画像合成を行うことができている。

3. 実験

以下に、実験を示す。すべての実験において、入力カメラ間の Fundamental Matrix や画像合成に用いる画像中の対応点は別途求めたものを用いた。

まず図 5 に、平面物体を合成した CG を入力としたシミュレーション実験を示す。2 カメラの中間に仮想カメラを設定し、対応点座標の内挿と view morphing によってそれぞれ画像合成を行った。内挿による合成画像では、平面が歪んだように見えるが、view morphing においては直線性が保存され、不自然さが大幅に軽減されていることが明らかである。

次に、図 6 の書籍を撮影した 640×480 画素の実画像 3 枚を入力とした実験を示す。本手法では、3 カメラに対する重み係数で仮想カメラ位置を指定するので、仮想カメラは 3 カメラで構成される三角形の内部に任意に配置可能である。まず、仮想カメラの位置のわかり易さを考慮し、仮想カメラ位置をカメラ間を結ぶ直線上で移動させた。図 7 に示す単純内挿画像では、仮想カメラの移動につれて書籍の大きさが不自然に変化しているが、図 8 ではそのような不自然さが無い。また、図 9 に示す単純内挿画像では、書籍の形状に不自然な歪みが生じているが、図 10 では歪みが生じていないことがわかる。本手法における処理では、直線性が維持されるため、書籍表面のテクスチャや輪郭などの直線性を保つことにより、見た目の上での不自然さが大幅に軽減されている。

次に、仮想カメラを 3 カメラの中央に指定して画像合成を行った。従来²⁾の単純内挿による合成画像では、図

11-(a) に示すように、前述の実験結果と同様の不自然な歪みが生じているが、図 11-(b) の本手法による合成画像では書籍の表面が平面らしく合成されている。

なお、Seitz 手法や本手法はカメラ焦点と画像平面を想定して画像合成を行っているため、“もっともらしい”画像を合成することができるが、それらのカメラパラメータは実際の値とは異なるため、実カメラと同じ画像の合成を保証するものではない。その比較のため、仮想視点位置に実際にカメラを設定した場合の画像を図 12 に示す。図 12-(a) は図 5 の仮想視点と同じ位置のカメラに基づいて生成した CG である。また、図 12-(b) に、図 11 で設定した仮想視点の付近に目分量で設置した実カメラによる撮影画像を示す。これらの画像を比較すると、提案手法が実カメラと同じ画像を合成しているわけではないが、単純内挿による手法に比べ、画質が大幅に改善されていることがわかる。

4. 結論

複数画像間の対応点内挿による画像合成は正確ではなく、入力画像によっては合成画像中に不自然な歪みなどが含まれる。そのような歪みは、合成画像中の直線性を失わせ、あるいは画像内の物体の大きさに不自然な変化を与えるので、合成画像の品質に直接影響する問題であると言える。本論文は、2 画像間での画像合成法 view morphing を拡張し、3 画像を入力とした view morphing を実現したものである。

このような画像合成においても 3D レンダリングと同等の正確さを得るには至っていない。しかしながら、通常に対応点内挿で発生し得る不自然な歪みは、view morphing によって大幅に改善することができた。この理由として、通常のモーフィングにおける歪みの多くは、合成画像中における直線性の喪失が原因であることが挙げられる。view morphing の内部では、homography による射影と仮想的な平行カメラ間の対応点内挿を行う。この各処理において直線性は失われないため、したがって、view morphing は直線性を失わない画像合成法であり、それ故に不自然な歪みを大幅に軽減することができたと言える。

本論文では、内部パラメータの推定を行っているが、理論上、内部パラメータと Fundamental Matrix を用いることにより、3 次元復元を行うことが可能である。しかし、本論文で用いた“3 カメラの内部パラメータは同一であり、カメラ光軸は画像平面と画像の中心で直交している”という仮定は正確ではなく、求めた内部パラメータは非常に多くの誤差を含んでいることが予想される。筆者らは、この推定結果は 3 次元復元を行うには不十分な精度であると考えている。この点について具体的な検証を行うこと、および視点の自由度をより高めることを今後の課題とする。

図 5 CG によるシミュレーション: (a) 入力画像; (b) 対応点の単純内挿による合成画像; (c) view morphing による合成画像; (d) 入力画像

Simulation by CG images: (a) input image; (b) synthesized image by interpolation of matching points; (c) synthesized image by view morphing; (d) input image

図 6 入力画像: (a) 上カメラ; (b) 右カメラ; (c) 左カメラによる撮影画像
Input images: (a) upper camera; (b) right camera; (c) left camera

図 7 単純内挿による合成画像 (左カメラ～右カメラ): 仮想カメラが動くにつれて書籍の大きさが不自然に変化している
Synthesized images by interpolation method (left camera to right camera): The size of the book appears unnaturally.

図 8 本手法による合成画像 (左カメラ～右カメラ): 書籍の大きさに不自然な変化がない
Synthesized images by the proposed method (left camera to right camera): The size of the book looks naturally.

図 9 単純内挿による合成画像 (上カメラ～右カメラ): 書籍の形状が不自然に歪んでいる
Synthesized images by interpolation method (upper camera to right camera): The shape of the book is distorted.

図 10 本手法による合成画像 (上カメラ～右カメラ): 書籍の形状に歪みがない
Synthesized images by the proposed method (upper camera to right camera): The shape of the book looks naturally.

図 11 図 6 における 3 カメラの中心に仮想視点を設定した合成画像: (a) 単純内挿による合成画像; (b) 本手法による合成画像
Synthesized images from Fig. 6 with the virtual camera set in the center of 3 cameras: (a) synthesized image by interpolation of matching points; (b) synthesized image by proposed method

図 12 想定した仮想視点位置に実際にカメラを設定した場合の画像: (a) 図 5 で設定した仮想視点と同じ位置のカメラ;
(b) 図 11 で設定した仮想視点と同じ位置のカメラ
Real images with the camera set between input cameras: (a) the viewpoint is similar to Fig. 5; (b) the viewpoint is similar to Fig. 11

〔文 献〕

- 1) Buehler, C., Matusik, W., Gortler, S., and McMillan, L., "Creating and Rendering Image-based Visual Hulls", MIT Laboratory for Computer Science Technical Report, MIT-LCS-TR-780 (June 1999)
- 2) Kimura, M., and Saito, H., "3D Reconstruction Based on Epipolar Geometry", IEICE Transactions on Information and Systems, E84-D, 12, pp.1690-1697 (Dec. 2001)
- 3) Seitz, S.M. and Dyer, C.R., "View morphing", Proceedings of SIGGRAPH '96, pp. 21-30 (1996)
- 4) Wolberg, G., "Image Morphing: A Survey", Visual Computer, 14, pp.360-372 (1998)
- 5) Zhang, Z., "Determining the epipolar geometry and its uncertainty: a review", Research Report 2927, INRIA Sophia-Antipolis, France (Jul. 1996)
- 6) 稲本奈徳, 斎藤英雄, "サッカーシーンにおける多視点映像からの中間映像生成", 信学技報, PRMU2000-151, pp.87-94 (2001)
- 7) 北原格, 石川寛亨, 渡辺真生, 大田友一, "大規模空間の多視点映像を用いた運動視差の再現可能な自由視点映像の生成・提示方式", 画電学誌, 31, 4 (2002)
- 8) 徐剛, 辻三朗, "3次元ビジョン", ISBN 4-320-08522-1, 共立出版 (1998)
- 9) 矢口悟志, 木村誠, 斎藤英雄, 金出武雄, "未校正多視点カメラシステムを用いた任意視点画像生成", 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究会論文誌, 42, SIG06-003, pp.9-21 (2001)

木村 誠 1995 年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。2002 年同大学大学院博士課程修了。工学博士。コンピュータビジョン, および画像処理の分野にて研究に従事。1998 年から 1999 年まで米国カーネギーメロン大学に留学。

斎藤 英雄 1987 年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。1992 年同大学大学院博士課程修了卒業。同年同大学助手, 専任講師を経て 2001 年助教授。コンピュータビジョン, 画像処理等に関する研究に従事。1997 年から 1999 年まで, 日本学術振興会海外特別研究員として米国カーネギーメロン大学に留学。2000 年より, 科学技術振興事業団さがけ 21(「情報と知」領域) 研究員兼任。工学博士。正会員。