

自然特徴点を用いたマルチカメラレクティフィケーション

松本健太郎[†] 圓道 知博[†] 藤井 俊彰[†] 谷本 正幸[†]

[†] 名古屋大学大学院工学研究科

〒464-8603 名古屋市千種区不老町

E-mail: [†]matsumoto@tanimoto.nuee.nagoya-u.ac.jp, ^{††}{yendo,fujii,tanimoto}@nuee.nagoya-u.ac.jp

あらまし 本稿では、直線配置マルチカメラで撮影された画像の新しい幾何補正手法を提案する。2眼ステレオ画像を平行化することを *rectification* と呼び、広く研究されている。カメラパラメータが既知の場合は、カメラを結ぶベースラインに画像面を平行化し、画像の向き、スケーリングを合わせることで *rectification* ができる。これに対して、カメラパラメータを用いずに、画像上の特徴点の対応から *rectification* する手法が提案されている。本稿では、この手法をマルチカメラに適用する。しかし、カメラパラメータを用いない場合、画像の水平方向にアフィン自由度が残ってしまう。ここで、自由度を制限するために、3台目のカメラを導入する。対応点の移動量とカメラ間の距離が比例するという関係を用いることで、水平方向の自由度を制限し、マルチカメラの *rectification* を行う。
キーワード レクティフィケーション、マルチカメラ、カメラキャリブレーション、自然特徴点

Multiple-Image Rectification using Feature Points

Kentaro MATSUMOTO[†], Tomohiro YENDO[†], Toshiaki FUJII[†], and Masayuki TANIMOTO[†]

[†] Graduate School of Engineering, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603 Japan

E-mail: [†]matsumoto@tanimoto.nuee.nagoya-u.ac.jp, ^{††}{yendo,fujii,tanimoto}@nuee.nagoya-u.ac.jp

Abstract This paper discusses multiple-image correction captured by linearly arranged cameras. Image rectification, which is the method to parallelize a pair of stereo images, has been widely researched. Two images can be rectified from the feature points without knowing the camera parameters. We apply this method to multiple-image correction. However, this rectification allows affine latitude for horizontal line. Thus horizontal scale of two images is not matching. Here, we use a third image to match the horizontal scale. Then we match the horizontal scale using proportional connection of camera distance and matching points distance over the three cameras.

Key words image rectification, multi-camera, camera calibration, feature points

1. はじめに

近年、マルチカメラ画像を入力とした自由視点画像生成の研究が盛んに行われている [1]~[4]。その多くは、等間隔で平行に配置された、1次元または2次元のカメラアレイ画像 [5] を入力としている。このように整列された入力画像を用いることで、高速なレンダリングが可能となる [2]。

しかし、実際はカメラを厳密に配置することは困難である。また、使用機器の都合上、理想的な画像を撮影できない場合がある。例えば、カメラを輻輳させた場合では、平行な画像は撮影できない。そこで、理想に近い画像を得るために撮影画像を変換して補正することを考える。

自由視点画像生成の入力として、(a) カメラが直線配置であり、(b) 画像面がベースラインに平行で、(c) スケーリングが統

一された、画像が適する。2眼ステレオ画像のエピポーラ線をカメラ間のベースラインに平行化することを *rectification* と呼ぶ [6], [7]。 *rectification* 手法として、推定したカメラパラメータを用いる手法 [6] と、カメラパラメータを用いずに対応点関係のみを用いる手法 [7] に大別できる。後者の場合、変換画像の u 方向 (水平方向) のスケーリング (焦点距離) が任意となる。

筆者らは以前、直線配置マルチカメラに対して、カメラパラメータ既知の2台の基準カメラを元にすべてのカメラを *rectification* する手法 [8] を提案した。この手法では基準カメラ以外のカメラは3次元位置未知の対応点を用いて *rectification* することができる。しかし、基準カメラのカメラパラメータを用いるためカメラキャリブレーションが必要である。カメラパラメータには誤差が生じるため、そのパラメータを用いることで誤差が蓄積してしまうという問題がある。

1.1 関連研究

多眼画像を rectification する手法がいくつか提案されている [8], [9]. Deng ら [9] は, 向きを固定した 1 台のカメラを平面上を移動させて画像を取得し, rectification することで Light Field [3] を構築している. その際, 画像面とカメラが移動する平面とが平行になるように, すべての画像を射影変換する. この手法では, カメラの向きが一定のため, ひとつの共通の射影変換行列で rectification することができる. また, 射影変換行列算出の際にカメラパラメータやエピソード幾何関係を用いずに, 完全に対応点関係のみから算出するという特徴がある. しかしこの手法では, 複数台のカメラがそれぞれ違う向きを向いているときなどには適用できない.

これに対して, 筆者らは以前, キャリブレーション済みの 2 台の基準カメラを用いて, すべてのカメラを rectification する手法 [8] を提案した. この手法では, まず, キャリブレーション済みの基準カメラ 2 台を rectification する. つづいて対応点の移動量がカメラ間隔に比例するという関係を用いて, その他のカメラに対応点が射影されるべき点を算出する. そして, 撮影画像と射影されるべき点の対応点関係から射影変換行列を求める. 求めた射影変換行列で射影変換することですべての画像を rectification する. この手法で良好な結果が得られたが, 基準カメラはキャリブレーションが必要であるという問題がある.

1.2 概要

本稿では, キャリブレーション不要で, 自然特徴点の対応のみを用いる直線配置マルチカメラの rectification 手法を考える. しかし, カメラパラメータを用いない 2 眼画像 rectification では, u 方向のスケーリングが任意となるため, 自由視点画像生成には適さない. そこで, 平行化され v 方向 (垂直方向) のスケーリングが統一された 3 眼画像に対して, u 方向のスケーリングを統一する手法を提案する. そして rectification 後の 3 眼画像を基準画像としてその他のカメラを射影変換することで, 自由視点画像に適した画像に補正する手法を提案する.

以下, 第 2 章で本研究の要素技術を解説し, 第 3 章で 3 眼画像 rectification, 第 4 章で多眼画像 rectification について提案する. 第 5 章では提案法を用いたシミュレーション実験と結果を述べ, 提案法を有用性を示し, 第 6 章で結論を述べる.

2. 要素技術

2.1 ピンホールカメラモデル

$\vec{M} = [X, Y, Z, 1]^T$ を世界座標での点とし, $\vec{m} = [u, v, 1]^T$ をその点が射影行列 P で画像に射影される点とする. ピンホールカメラモデル (図 1) では \vec{M} と \vec{m} は次式で関係付けられる.

$$\vec{m} \simeq P\vec{M} \quad (1)$$

ここで, \simeq は定数倍の不定性を表す. また, 3×4 行列である P は射影行列と呼ばれる. 射影行列 P は次式で表される.

$$P = K \begin{bmatrix} R & -Rt \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで, 3×3 行列 R はカメラの回転を表し, 3 次元ベクトル

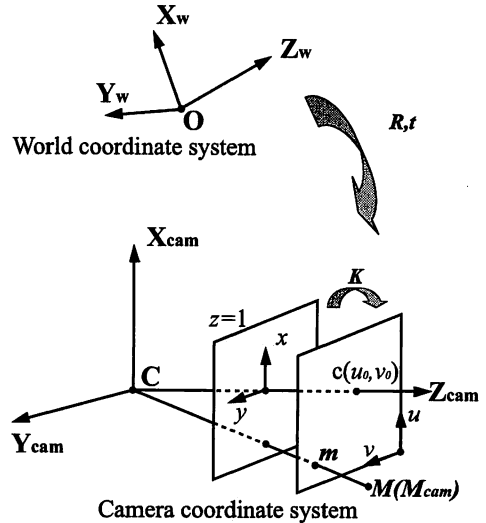


図 1 Pinhole camera model

ル t はカメラの位置を表す. これらは, カメラ座標系と世界座標系を関係付ける外部パラメータと呼ばれる. また, K はカメラ座標系から画像座標系へ変換する内部パラメータと呼ばれる. 内部パラメータ K は焦点距離 f_u, f_v , セン断パラメータ γ , 画像中心 (u_0, v_0) で構成される上三角行列であり, 次式で与えられる.

$$K = \begin{bmatrix} f_u & \gamma & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

なお, 本研究では, レンズ歪みは考慮していない.

2.2 2次元射影変換

2台のカメラに映る, 3次元空間中で, ひとつの平面上にある点の集合は, ひとつの行列で対応付けられる (図 2). その関係は射影変換と呼ばれ, 式 (4) で表現される.

$$m_2 \simeq Hm_1 \quad (4)$$

ここで, m_1, m_2 は各カメラの画像座標を $m_1 = (u_1 \ v_1 \ 1)^T, m_2 = (u_2 \ v_2 \ 1)^T$ と同時座標で表現したものである. 行列 H は Homography (射影変換行列) と呼ばれる 3×3 行列である.

射影変換行列 H は, 2台のカメラ間の回転行列 R , 並進ベクトル t および各カメラの内部パラメータ K_1, K_2 により求められる (式 (5)).

$$H = K_2 \left(R + \frac{tn^T}{r} \right) K_1^{-1} \quad (5)$$

式 (5) において r はカメラ 1 の光学中心 C_1 からの基準平面の距離, n は基準平面の単位法線ベクトルを表す. $t \neq 0$ のときは基準平面上にない点は, 基準平面と実際の奥行きとの違いにより, 正しい点に射影されない. 逆に $t = 0$ のときは基準平面上以外の点もすべて正しい点に射影される.

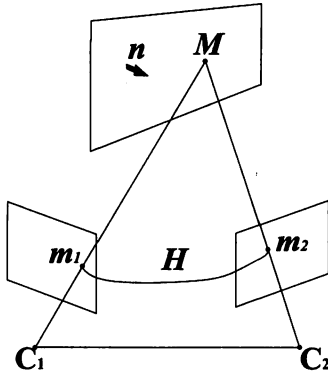


図 2 Homography

本研究では撮影画像から理想画像に変換する射影変換行列を求め射影変換で幾何補正する。

2.3 2眼画像 rectification

2眼画像をカメラのベースラインに平行化し、エピポーラ線を一致させることを rectification という (図3)。2眼画像をそれぞれ適切な射影変換行列で射影変換することで rectification することができる。本節では、カメラパラメータを用いる手法と、カメラパラメータを用いない手法をそれぞれ簡単に説明する。

2.3.1 カメラパラメータ既知

はじめに、カメラパラメータを用いる手法を説明する。カメラパラメータが既知であるときは、以下の手順で変換する。

- (1) 各カメラの内部パラメータで画像を正規化
- (2) カメラ間の並進ベクトルと平行になるように画像を3次元的に回転
- (3) 任意の内部パラメータを与え変換

この場合、画像を正規化するので、変換後の内部パラメータを任意に与えることができる。そのため、その後の処理に適した内部パラメータを与えることができる。例えば、View Interpolation [10] を行う場合、 u 方向のスケーリングを統一した画像が適する。

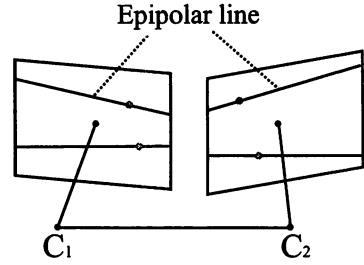
この手法ではカメラパラメータを用いるため、カメラキャリブレーションが必要である。その際に生じる誤差が蓄積してしまう恐れがある。

2.3.2 カメラパラメータ未知

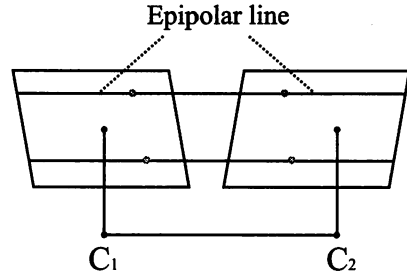
次に、カメラパラメータを用いない2眼画像 rectification 手法 [7] を簡単に説明する。この手法では、射影変換行列を、以下の3つの変換行列に分けて算出する。

- (1) エピポールを無限遠点に透視変換
- (2) エピポーラ線が一致するように相似変換
- (3) 画像の歪みが小さくなるように u 方向にアフィン変換を満たすそれぞれの変換行列を求め、順に掛け合わせることで射影変換行列を得る。それぞれの交換行列の詳細な算出方法は文献 [7] を参照されたい。この手法の利点として、以下の2点があげられる。

- カメラパラメータを必要としない



(a) Before rectification



(b) After rectification

図 3 2-Image rectification

- 独自の基準で画像の歪みを最小化
- しかし、この手法は歪みを最小化することを目的としているため、水平方向のスケーリングおよびせん断成分は一致しない。

3. 3眼画像 rectification

本研究では、自然特徴点からの rectification を目的とするため、2.3.2 節のカメラパラメータを用いない rectification を応用する。以下、3眼画像のスケーリングを一致させるための理論を説明し、新しい3眼 rectification 手法を提案する。

3.1 直線配置平行3眼画像

直線配置の3台のカメラに対して2.3.2 節の2眼 rectification を施した後を考える。このとき v 方向のスケーリング f_v およびシフト量 v_0 が一致しているが、 u 方向のスケーリング f_u および、せん断成分 γ 、シフト量 u_0 は任意となる。各カメラの内部パラメータ $K_i (i = 1, 2, 3)$ は以下の式で表される。

$$K_i = \begin{bmatrix} f_{ui} & \gamma_i & u_{0i} \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

この条件の下、対応点関係を考える。

各カメラ上の点 p_i の空間への投影は次式で表現できる。

$$z_i = \frac{u_i - u_{0i}}{f_{ui}} (x_i - x_{0i}) \quad (7)$$

ただし、 u_{0i} は

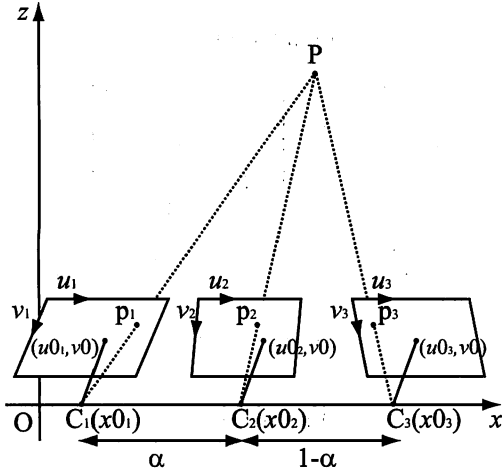


図4 3-View relationships of corresponding points

$$u0'_i = \gamma_i(v - v0) + u0_i \quad (8)$$

である。対応点 p_1, p_2, p_3 は空間中の1点で交わるので、

$$\begin{aligned} \frac{u_2 - u0'_2}{f_{u2}}(x0_3 - x0_1) \\ = \frac{u_1 - u0'_1}{f_{u1}}(x0_3 - x0_2) + \frac{u_3 - u0'_3}{f_{u3}}(x0_2 - x0_1) \end{aligned} \quad (9)$$

カメラ2がカメラ1とカメラ3を比 α で分ける位置にあるとき、式(9)は以下の式に変形できる。

$$\frac{u_2 - u0'_2}{f_{u2}} = (1 - \alpha) \frac{u_1 - u0'_1}{f_{u1}} + \alpha \frac{u_3 - u0'_3}{f_{u3}} \quad (10)$$

ここで、対応点の移動量がカメラ間隔に比例するという以下の式を条件として加える。

$$u_2 = (1 - \alpha)u_1 + \alpha u_3 \quad (11)$$

式(8)(10)(11)に対し n 個の対応点を与えて連立させると、

$$\begin{bmatrix} (1 - \alpha)u_{1(1)} & \alpha u_{3(1)} & v_{(1)} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (1 - \alpha)u_{1(n)} & \alpha u_{3(n)} & v_{(n)} & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x} = \mathbf{0}, \quad (12)$$

とおける。ただし

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \frac{1}{f_{u2}} - \frac{1}{f_{u1}} \\ \frac{1}{f_{u2}} - \frac{1}{f_{u3}} \\ (1 - \alpha) \frac{\gamma_1}{f_{u1}} + \alpha \frac{\gamma_3}{f_{u3}} - \frac{\gamma_2}{f_{u2}} \\ (1 - \alpha) \frac{u_{10} - \gamma_1 v_0}{f_{u1}} + \alpha \frac{u_{30} - \gamma_3 v_0}{f_{u3}} - \frac{u_{20} - \gamma_2 v_0}{f_{u2}} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

とおく。ここで式(12)を $\mathbf{Ax} = \mathbf{0}$ とすると、 $\text{rank} \mathbf{A} = 4$ のとき、 $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ となる。このとき、

$$f_{u1} = f_{u2} = f_{u3}, \quad (14)$$

$$u0_2 = (1 - \alpha)u0_1 + \alpha u0_3, \quad (15)$$

$$\gamma_2 = (1 - \alpha)\gamma_1 + \alpha\gamma_3, \quad (16)$$

となり、 u 方向のスケーリングが一致する。

つまり、 $\text{rank} \mathbf{A} = 4$ となる4点以上の対応点が、式(11)を満たすとき、 u 方向のスケーリングが統一されていることになる。また、画像中心 $u0$ およびせん断成分 γ の自由度を制限している。

3.2 3眼画像 rectification

前節では式(11)を満たす4点以上の対応点が存在すれば、スケーリングが一致していることを示した。本節では、この関係を用いて、 u 方向のスケーリングが一致していない画像のスケーリングを一致させることを考える。

前節と同様、2眼 rectification を行い平行化した3眼画像を考える。カメラ間隔 α で直線に配置された3枚の画像の対応点が、以下の式を満たすように、それぞれアフィン変換することでスケーリングを統一する。

$$u'_2 = (1 - \alpha)u'_1 + \alpha u'_3 \quad (17)$$

$i = 1, 2, 3$ として、アフィン変換を

$$u'_i = a_i u_i + b_i v_i + c_i \quad (18)$$

と置き、式(17)を満たす $(a_i, b_i, c_i) (i = 1, 2, 3)$ を求める。ここで、 v_i はカメラ間で共通なので、 $v_i = v$ とする。カメラ1のスケーリングを基準とし $a_1 = 1$ とすると式(17)は、

$$a_2 u_2 + b_2 v + c_2 = (1 - \alpha)(u_1 + b_1 v + c_1) + \alpha(a_3 u_3 + b_3 v + c_3), \quad (19)$$

となる。 n 個の対応点を用いて式を連立させると、

$$\begin{bmatrix} u_{2(1)} & -\alpha u_{3(1)} & v_{(1)} & 1 & -(1 - \alpha)u_{1(1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{2(n)} & -\alpha u_{3(n)} & v_{(n)} & 1 & -(1 - \alpha)u_{1(n)} \end{bmatrix} \mathbf{y} = \mathbf{0}, \quad (20)$$

と置ける。ただし、

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} a_2 & a_3 & b_2 - (1 - \alpha)b_1 - \alpha b_3 & c_2 - (1 - \alpha)c_1 - \alpha c_3 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

とおく。式(20)を $\mathbf{By} = \mathbf{0}$ とすると、 $\text{rank} \mathbf{B} = 4$ のとき \mathbf{y} は一意に求まる。また、 $\text{rank} \mathbf{B} > 4$ のときは \mathbf{y} は $\mathbf{B}^T \mathbf{B}$ の最小固有値に対する固有ベクトルとして最小二乗解が得られる。このようにして求めた \mathbf{y} により a_2, a_3 は決定できる。しかし、 b_1, b_2, b_3 、及び c_1, c_2, c_3 はそれぞれ2自由度残るので、何らかの拘束をかけて b_1, b_2, b_3 及び c_1, c_2, c_3 を決定する。

4. 多眼画像 rectification

4.1 提案アルゴリズム

以下のアルゴリズムを用いて、多眼画像の rectification を行う。

- (1) すべてのカメラでの点の対応付け
- (2) 3.2節の手法で3台の基準カメラの rectification
- (3) その他のカメラの対応点の変換先を決定
- (4) すべてのカメラの射影変換行列の推定
- (5) 射影変換

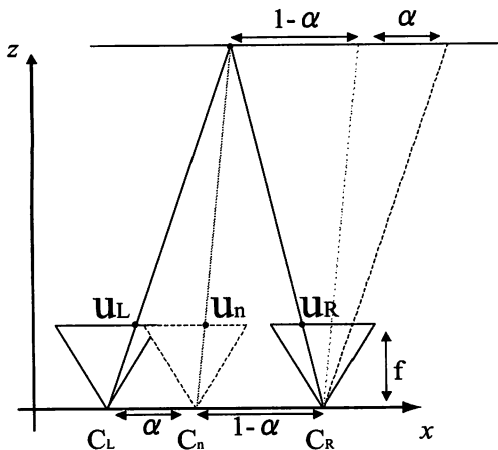


図5 Positions of the corresponding points

4.2 特徴点の対応付け

任意の特徴点を対応付ける。本手法では、対応点の3次元座標は不要である。そのため、対応点には自然な特徴点を用いることが可能である。文献[11]等の手法を用いて画像の特徴点を対応付ければ、スタジアムなどの大規模シーンなどで、参照物体を設置する手間を省くことができる。

4.3 対応点の変換先

rectification後の基準カメラのうちの2眼を元に、その他のカメラ上に対応点が射影されるべき点を考える。スケールが等しいカメラが直線上に平行に配置されているとき、対応点の移動量(視差)はカメラ間隔に比例させることができる。また、カメラがx軸方向に配置されている場合、各カメラで対応点のv座標は一定となる。この性質を利用して、基準カメラ上の対応点が各カメラに映るべき点を計算する。図5でカメラC_nは左右の基準カメラを比alphaで分ける位置にある。このとき、カメラC_n上でのu座標u_nは、基準カメラC_L, C_R上の対応点u_L, u_Rを比alphaで分ける点となる。以上より、(u_n, v_n)は式(22)より求められる。

$$\begin{aligned} u_n &= (1 - \alpha)u_L + \alpha u_R \\ v_n &= v_L = v_R \end{aligned} \quad (22)$$

このようにして、すべての対応点の射影先を求め射影変換行列の推定に用いる。

4.4 射影変換行列の推定

撮影画像から理想画像に変換する射影変換行列を求める。射影変換行列Hは画像上の4点以上の対応から求められる。射影変換は、対応点が3次元空間上の1平面上にある場合、または変換前後のカメラ間に並進移動がない場合のみ成立する。本手法では、カメラ位置の誤差は小さいものとして、3次元空間上での任意の対応点を用いて、最小二乗法で射影変換行列を推定する。様々な奥行き点を用いることで、1平面上の点のみから求める射影変換行列に対して、シーン全体で最適な射影変換行列を求めることができる。

画像上の、あるn番目の点が射影変換前後の画像上にそれぞれ

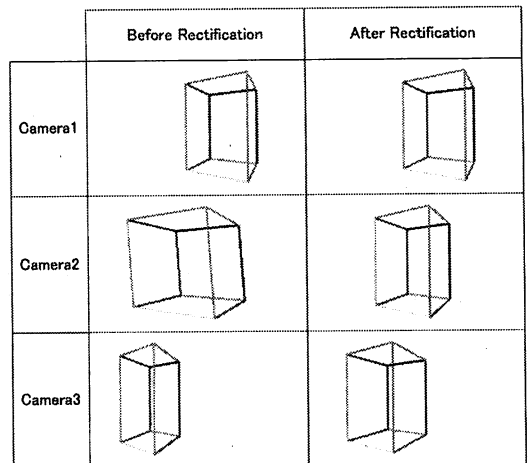


図6 Correction results

$m_{(n)} = (u_{(n)} \ v_{(n)} \ 1)^T$, $m'_{(n)} = (u'_{(n)} \ v'_{(n)} \ 1)^T$ と投影されたとする。このとき $m_{(n)}$ を $m'_{(n)}$ へ変換する射影変換行列は4点以上の点から最小二乗解により求めることができる。最小二乗解により求まる射影変換行列Hは次式の評価関数Cを最小にする行列となる。ただし、Hは式(4)によってmとm'を関係付ける。

$$C = \sum_i \{(u'_i - u_i)^2 + (v'_i - v_i)^2\} \quad (23)$$

5. シミュレーション実験

本手法を検証するためシミュレーション実験を行った。4.1節のアルゴリズムのうち、3眼画像rectificationでのスケール統一に関してシミュレーションを行った。

画像サイズ320x200pixelで、v方向のスケールを $f_v = 300$ 、平行移動成分 $v_0 = 100$ と統一し、u方向のスケールを $f_{u1} = 200, f_{u2} = 300, f_{u3} = 150$ 、せん断成分を $\gamma_1 = 0.0, \gamma_2 = 20.0, \gamma_3 = 0.0$ 、シフト量を $u_{01} = 160, u_{02} = 150, u_{03} = 120$ とした。カメラの向きはすべて平行で、カメラ位置は $t_1 = 0, t_2 = 100, t_3 = 200$ とした。

3次元空間で立方体を表す8点を各カメラに投影し、その対応点関係から、式(20)を用いて式(18)のアフィン変換係数を求めた。その際カメラ1を基準とし、 $a_1 = 1, b_1 = 0, c_1 = 0$ とした。また、 $b_3 = c_3 = 0$ とした。

その結果、アフィン変換後のスケール f_u は $f_{u1} = f_{u2} = f_{u3} = 200$ となり、すべて一致することが確認できた。また、変換前後の画像を図6に示す。図6はカメラ1, 2, 3の画像を縦にならべたものであり、左が補正前、右が補正後の画像を示す。変換後画像では対応点の移動量がカメラ間隔に比例しており、自由視点画像生成に適した画像に補正できた。

6. まとめ

本稿では、カメラパラメータを用いずに画像間の対応点関係のみから行うマルチカメラrectification手法を提案した。自然

特徴点を用いた2眼画像 rectification では対応できない, u 方向(水平方向)のスケーリングの統一を, カメラ台数を3台にすることで実現した. そして, そのカメラを基準カメラとすることで, すべてのカメラを rectification する方法を示した. 今後はカメラ位置, 対応点などの誤差に対する安定性の評価および実写画像での実験を行う予定である.

文 献

- [1] P.N.Banchang, T. Fujii, M. tanimoto, "Experimental System of free viewpoint television", In Proceedings of the IS&T/SPIE Electronic Imaging 2003, vol.5006, pp.554-563, 2003.
- [2] 福岡慶繁, 圓道知博, 藤井俊彰, 谷本正幸, "光線に基づく実時間自由視点画像生成システム", 3次元画像コンファレンス 2005, 2-3, pp.25-28, 2005.
- [3] M. Levoy and P. Hanrahan, "Light Field Rendering", ACM SIGGRAPH '96, pp.31-42, 1996.
- [4] 松山隆司, "3次元ビデオ映像", 3次元画像コンファレンス 2004, pp.151-156, 2004.
- [5] 藤井俊彰, 森健策, 武田一哉, 間瀬健二, 谷本正幸, 末永康仁, "多元多点計測装置の開発—カメラアレイとマイクロフォンアレイ—", 電子情報通信学会 2006 年総合大会, D-11-66, p.67, 2006.
- [6] O. Faugeras, "Three-Dimensional Computer Vision", The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 1993.
- [7] C. Loop and Z. Zhang, "Computing rectifying homographies for stereo vision", In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, vol.2, pp.125-131, 1999.
- [8] 松本健太郎, 圓道知博, 藤井俊彰, 谷本正幸, "FTVのための多眼画像の rectification", 3次元画像コンファレンス 2006, P-19, pp.171-174, 2006.
- [9] K. Deng, L. Wang, Z. Lin, T.Feng, and Z. Deng, "Correction and rectification of light fields", Computers & Graphics, vol.27, no.2, pp.169-177, 2003.
- [10] S.E.Chen and L.Williams, "View Interpolation for Image Synthesis", ACM SIGGRAPH '93, pp.279-288, 1993.
- [11] David G. Lowe, "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints", International Journal of Computer Vision, vol.60, no.2, pp.91-110, 2004.