

特徴点軌跡並行化による2次元カメラアレイ レクティフィケーション

Rectification Method for Two-dimensional Camera Array by Using Parallelizing Locus of Feature Points

学生会員 福嶋慶繁[†], 松本健太郎^{††}, 正会員 圓道知博[†],
正会員 藤井俊彰[†], 正会員 谷本正幸[†]

Norishige Fukushima[†], Matsumoto Kentaro^{††}, Tomohiro Yendo[†], Toshiaki Fujii[†] and Masayuki Tanimoto[†]

Abstract We have developed an effective rectification method that has a pixel error of less than 0.25 of a pixel for use in two-dimensional multi-camera arrays. Rectification and correction are important for free view-point imaging and multi-view coding in the field of image-based rendering (IBR). In the computer vision field, a number of rectification methods for binocular/trinocular stereo camera setups have been developed and used. However, not many multi-camera array rectifications methods have been developed.

キーワード：2次元カメラアレイ，光線空間法，レクティフィケーション，ノンメトリック キャリブレーション

1. まえがき

光線空間¹⁾やLight Field Rendering²⁾による自由視点画像合成³⁾を行うためには、カメラの個体差や設置誤差等がない、理想的な設置が望ましい。そのため従来は、カメラの内部変数や位置・姿勢を表す外部変数を求めるカメラキャリブレーション手法を用い⁴⁾、これらの測量結果からカメラを理想状態へと幾何的な変換・補正を行っていた。この手法は、計測を伴うことからメトリックキャリブレーションと呼ばれている。また、理想的な状態へ2次元画像変換することで、画像の歪みを取り除き、補正することはレクティフィケーションと呼ばれている。

それに対して、レンズディストーションの除去や⁵⁾、2眼カメラのレクティフィケーション⁶⁾などの分野において、特徴点、特徴線などの状態が画像上で理想的なものとなるように直接変換する、計測を伴わない手法が提案されている。これらの手法は、上記の手法に対してノンメトリックキャリブレーション・レクティフィケーションと呼ばれて

いる。ノンメトリックな手法の利点は、キャリブレーション時に規定の物体を写さないといけない制約がなくなる利便性に加え、2次元画像での整合性が直接最適化される点にある。

このレクティフィケーションと呼ぶ分野では、カメラが2台、3台の場合については多数の研究が行われている。例えば、メトリックな手法としては、Ayacheらが2眼、3眼の場合について古くから提案している¹⁴⁾。ノンメトリックな手法としては、2眼カメラでは、Loopらの対応点関係からなるエピポーラ幾何によりレクティフィケーションする手法⁶⁾が提案されており、3眼カメラでは、HeinrichsらがLoopらの手法¹⁵⁾を3眼の場合へと拡張している。

さて、本論文のレクティフィケーション対象は、4台以上のカメラから構成される2次元カメラアレイ配置である。このアレイを対象とした従来研究として、VaishらのPlane+Parallaxを用いた手法⁷⁾や、松本らの基準カメラをキャリブレーションする手法⁸⁾が提案されているが、前者はアフィンカメラモデルで近似するため、カメラアレイと既知パターンが完全に平行に設置された状態でなければ成立せず、ずれた場合は近似となる。そのため、精度の高いレクティフィケーションを行うためには、レクティフィケーション用のパターンを厳密に配置する必要がある。(パターンがピッチ、ヨーの角度に1度のオーダで外れてもいけない。)後者である、松本らの手法は2次元カメラアレイに限定せず、様々なカメラ配置に汎用的に用いることが可能な一方、キャリブレーションの誤差が直接レクティフィケーション

2007年9月10日受付、2007年11月26日再受付、2007年12月27日採録

†名古屋大学 大学院 工学研究科

(〒 464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町, TEL 052-789-3163)

††松下電器産業 株式会社 パナソニック AVC ネットワークス社

(〒 571-8504, 大阪府門真市松生町1番15号 TEL 06-6905-4761)

†Graduate School of Engineering Nagoya University

(Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi 464-8603, Japan)

††Panasonic AVC Networks Company

(1-15, Matsuo-cho Kodama-cho, , Osaka-hu 464-8603, Japan)

結果に影響する。そのため、カメラキャリブレーション結果のカメラ位置が理想とはかけ離れ、散在しているときには計算は破綻する。つまり、充分な精度でカメラキャリブレーションをできないときには（本稿が対象とするような細かな間隔でカメラを配置するような場合）、この手法を適応することが困難である。その他の手法として、Deng らにより細かな間隔で撮影した2次元カメラアレイの画像をレクティフィケーションする手法が提案されている。この手法はノンメトリックな手法に属し、精度の高いレクティフィケーションが可能な一方で、特殊な条件下でしか成立しない。その条件とは、「1台のカメラ」を、「機械」を用いて、「アレイ状に厳密に動かして」シーンを撮影することである。つまり、この手法を用いる限り静止画像しか撮影することができない。

本稿で提案するレクティフィケーションは、「パターンの配置位置を限定せず、厳格な設置を要求しない」「カメラキャリブレーションを必要とせず」「1台ではなく多数のカメラを用いる」方法であり、上記の手法とは異なる。加えて、特徴点の関係のみからレクティフィケーションするノンメトリックな方式をとることで、直接的に理想状態へと変換し、対応点の誤差を小さく抑えることが可能となる手法である。

本稿の構成では、2章で2次元カメラアレイの理想状態が述べられる。次に3章では、提案レクティフィケーション手法が示され、4章の実験によりその有効性を検証される。最後にむすびと今後の課題が示される。

2. カメラアレイレクティフィケーション

2.1 ピンホールカメラモデル

本論文では、カメラをピンホールカメラモデルで仮定する¹⁰⁾。このカメラのレンズディストーションは除去済みであるとして考慮しない⁵⁾。

上記カメラモデルを仮定したとき、以下の線形関係で3次元点と画像中の点が結び付けられる。

$$m = K[R; T]M \quad (1)$$

同次座標で表わされた、3次元中の点 M があるカメラの画像中で写る点 m は、そのカメラの内部変数 K と位置 T 、姿勢 R といった外部変数で表される。 $(K$ は 3×3 の上三角行列、 T は 3 次元ベクトル、 R は 3×3 の直交行列、 $[R; T]$ は 4×3 の 3 次元から画像への射影行列) 本稿では、このカメラモデルに従って議論を行う。

2.2 整列状態での3次元空間中の性質

図1は、 w_c 行 h_c 列である $w_c \times h_c$ （この場合 $w_c = 3, h_c = 3$ ）のアレイ状に配置された、 $w_c \times h_c$ 台の理想的なカメラアレイを3次元図示したものである。本稿では、カメラの位置（カメラ座標）を指定してカメラを指示する必要がある時には、カメラ行 $i : i = 1, \dots, w_c$ 、カメラ列 $j : j = 1, \dots, h_c$ の添え字を示して、 $Camera_{i,j}$ のように記す。

さて、2眼ステレオカメラの平行化では、二つのカメラ

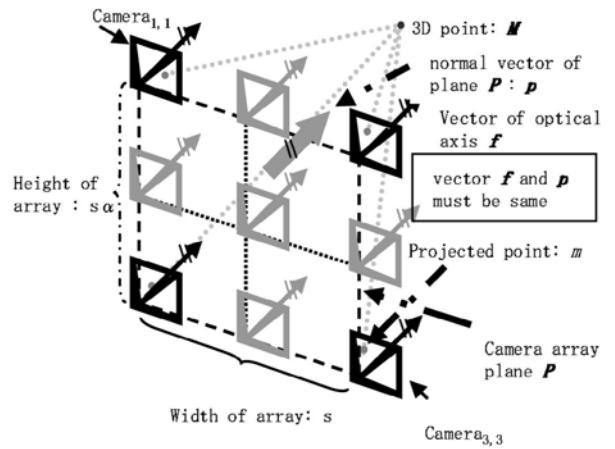


図1 3次元空間中での 3×3 カメラアレイの理想状態
Ideal condition of rectified camera array on 3-D space.

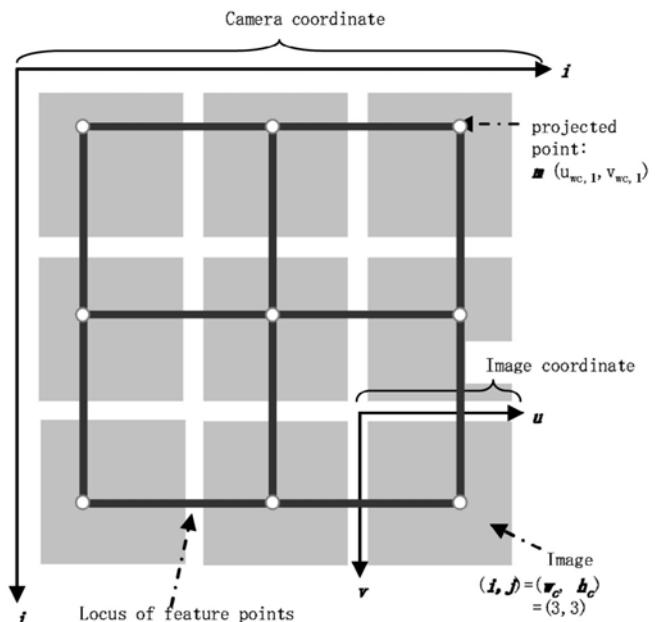


図2 2次元画像中での 3×3 カメラアレイの理想状態1
Ideal condition of rectified camera array on 2-D image 1.

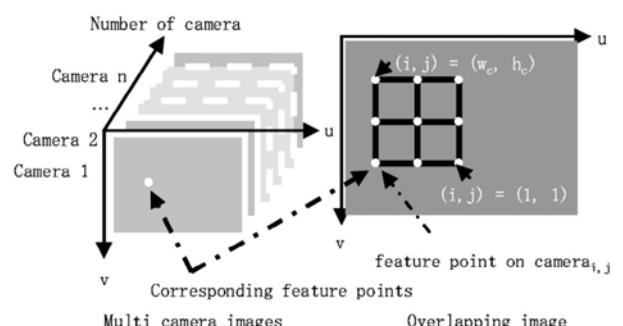


図3 2次元画像中での 3×3 カメラアレイの理想状態2
Ideal condition of rectified camera array on 2-D image 2.

の光軸が同方向かつ、ステレオカメラのベースラインと直交する軸となり、その内部変数が同一となる。それに対して、本稿の目的とするカメラアレイレクティフィケーション

ンは、 n 台すべてが上記を満たし、加えて、全カメラの光軸の向く方向ベクトル f が全カメラの焦点が乗るアレイ平面 P の法線ベクトル p に水平でならなくてはならない。つまり、各カメラの内部変数 $K_{i,j}$ がすべて同一で、すべてのカメラの姿勢 $R_{i,j}$ の方向ベクトルがカメラアレイ平面の法線ベクトル p と一致した状態である。

2.3 多視点画像の表記方法

本稿中では、2次元のアレイ状に配列されたカメラの2次元画像群である、4次元の多視点画像情報を紙面に記述するときに二つの方式で記述する。一つは、図2のように、各画像を各カメラの位置に合わせて、敷き詰めて並べる方式である。もう一方は、図3のように、各画像の画像座標が一致するように重ね合わせ、各画像の特徴点やその特徴点軌跡を表示する方式である。前者は、画像座標が実際とは異なる点や、スケールが異なる点により、細かな関係を把握しづらい一方、多視点画像すべてを表示できる。後者は、どこか一つの表示画像のみに限られるが、画像座標は正確と同じとなり、各画像の特徴点やその特徴点軌跡の対応関係を把握しやすい。そのため本稿では適時都合の良い形式で記述する。

2.4 整列状態での2次元画像上の性質

3次元空間中の条件を満たしたカメラアレイで取得された画像群中の対応点は以下の性質を取る。ある3次元点 M が写る、 i 行 j 列目のカメラの画像座標 $(u_{i,j}, v_{i,j})$ において、同じカメラ行内では、対応点はすべて同じ画像座標 v 行で等しくなり、また同じカメラ列内では、対応点はすべて同じ画像座標 u 列に存在する(図2)。

$$\begin{aligned} u_{i,1} &= u_{i,2} = \dots = u_{i,h_c} \\ v_{1,j} &= v_{2,j} = \dots = v_{w_c,j} \end{aligned} \quad (2)$$

さらに、このカメラアレイが完全に格子状に並べられているとすれば、その格子の縦横比が $\alpha : 1$ (縦:横)としたとき、隣接する対応点同士の間隔 d は等しくなり、

$$d = u_{1,j} - u_{2,j} = u_{2,j} - u_{3,j} = \dots = u_{w_c-1,j} - u_{w_c,j}$$

$$d\alpha = v_{i,1} - v_{i,2} = v_{i,2} - v_{i,3} = \dots = v_{i,h_c-1} - v_{i,h_c} \quad (3)$$

となり、式(4)のように、対応する点がカメラ番号とその間隔 d により順にアクセス可能な状態となる。

$$(u_{i,j}, v_{i,j}) = (u_{1,1} - id, v_{1,1} - jd\alpha) \quad (4)$$

本手法では、この状態に直接変換するようにレクティフィケーションを行う。

3. 提案レクティフィケーション手法

本論文のレクティフィケーション手法は、2段階のプロセスを経て達成される。まず、すべてのカメラの内部変数と、姿勢を同一のものへ変換することで個体差をキャンセルする。次に、同一の方向を向くすべてのカメラの光軸を

カメラの焦点が並ぶ平面(図1中の平面 P)と直交する軸に変換する。これらの工程を3次元空間上ではなく、取得された特徴点の状態から直接演算する。

3.1 内部変数と姿勢の均一化

3.1章、3.2章のプロセスは、カメラの配置位置には非依存な、2台のカメラで成り立つ関係であるため、添え字を置き換えることで表記を簡略化する。カメラ座標 (i_1, j_1) 、カメラ座標 (i_2, j_2) の2台のカメラを指示するために $(i_1, j_1) \rightarrow a, (i_2, j_2) \rightarrow b$ (ただし a, b は異なるカメラ)、と表記する。

3次元空間中の平面 Π 上の点 M が2台のカメラ a, b に写る点を m_a, m_b とすると、その射影関係は式(5)による 3×3 のホモグラフィ H_{ab} 行列で表される。

$$m_a = H_{ab}m_b \quad (5)$$

この行列 H_{ab} は平面 Π と各カメラの相対関係により式(6)のように分解される¹⁰⁾。

$$H_{ab} = K_a(R_{ab} + \frac{tn^T}{l})K_b^{-1} \quad (6)$$

ここで、 R_{ab} は a, b のカメラの姿勢を R_a, R_b としたときのカメラ a に対する b の相対姿勢 $R_{ab} = R_a R_b^{-1}$ 、 t は並進、 K_a, K_b は2台のカメラの内部変数、 l が平面までの距離、 n が平面の法線ベクトルを表している(図4)。式(6)は、まずカメラ b に内部変数 K_b の逆行列を掛けることで正規化し、次に、平面と各カメラの関係を用いて座標変換をし、最後にカメラ a の内部変数を持つ画像面へ射影することで、 $a \rightarrow b$ への射影することを意味する。

ここで、平面 Π が無限遠にあると仮定したとき、平面までの距離が $l \rightarrow \infty$ となるため、式(6)の並進の項が消え、カメラの内部変数と相対的な姿勢だけの関係のみを表すようになる。つまり、無限遠平面のホモグラフィ

$$H_{ab}^\infty = K_a R_{ab} K_b^{-1} \quad (7)$$

となる。この時式(6)、(7)より、無限遠平面に対し並進の項が無視できる点から、二つのカメラの焦点は一致している状態ともみなせる。

式(7)に左から順に K_b, R_b を掛けて式を変形すると

$$K_a R_a = H_{ab}^\infty K_b R_b \quad (8)$$

となる。これは、 H_{ab}^∞ をカメラ b の姿勢、内部変数の行列積に掛けることで、カメラ a のものと同一となることを示している。つまり、無限遠のホモグラフィさえ得ることが可能であれば、カメラの内部変数と姿勢の状態を暗に含んだ状態で、それらのパラメータを直接、均一にそろえることが可能となる。

3.2 消失点と無限遠点

3.1章の無限遠平面のホモグラフィ H_{ab}^∞ を求めるためには、無限遠に存在する物体の対応点をとる必要がある。この無限遠平面とは、運動視差がない、遠方にある平面であ



図 5 無限遠対応点
Infinity correspondence points.

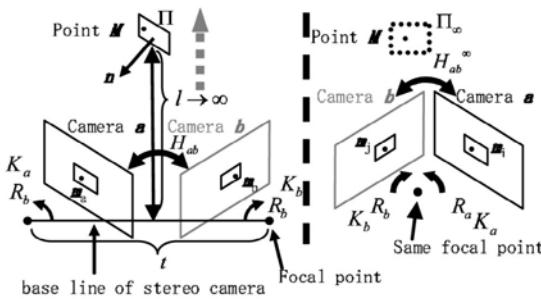


図 4 ホモグラフィ H_{ab} と各画像、平面 II の関係
Relation among image, plane and H .

り、パノラマモザイキング¹¹⁾に広く用いられている。図 5 中では、遠くの風景が視差がほぼ零となり、無限遠と仮定することが可能である。この無限遠平面 Π^∞ 上の対応関係が求まれば、所望のホモグラフィを導くことができる。しかし、この遠方風景がレクティフィケーション時に常に存在するわけではなく、室内等では、無限遠点を直接得ることが比較的難しい場合もある。そこで本稿では、平面パターンによる消失点により代用可能な方法も示す。

消失点とは、3次元空間中で平行な2直線をピントホールカメラに射影したときの交点であり、その交点は無限遠にあるとみなせる。図 6 は格子パターンから消失点を得る例である。誤差のない環境下では、画像中の格子パターンを抽出できれば、直線群の交点として直ちに消失点は線形に演算可能である。しかしながら、実際はノイズ環境下での特徴点抽出となるため、実際には、格子点（すべての点間の距離が均一な点）にはなりえない。そこで本稿では、抽出した特徴点列に最も近い格子を求める。この手順を図 7 に示す。実際に取得した特徴点を p_f 、理想的な格子（単純にすべての点間の距離が一定になるように与えた点列）を p_g として、 p_g が p_f に写るホモグラフィ H_g を誤差が最小となるように、非線形最適化手法である、Levenberg-Marquardt(LM) 法により最適化する¹⁰⁾。

$$p_f = H_g p_g \quad (9)$$

上記で求めた格子点列 $H_g p_g$ からは単純な直線群の交点と

して消失点が得られ、各カメラ i に写る消失点が無限遠点 p_i^∞ として利用可能となる。^{*}

次に、各カメラの方向と内部変数を均一化するため、これらの消失点ないし無限遠点を用いて、無限遠でのホモグラフィを計算する。あるカメラを基準カメラ a として^{**}、カメラ b をそのカメラ a のパラメータにそろえる対象としたとき、無限遠平面で射影するホモグラフィ H_{ab}^∞ は、対応点が 4 点以上あれば、

$$p_a^\infty = H_{ab}^\infty p_b^\infty \quad (10)$$

となり、式(10)を満たす H_{ab}^∞ を最小2乗的に求めることができる。この式(10)の行列において、カメラ b をすべてのカメラ i, j として、それぞれのカメラごとに H_{ab}^∞ を計算する ($a = const. b \in camera_{i,j}, 1 \leq i \leq w_c, 1 \leq j \leq h_c$)。ここで、基準カメラとなるカメラ a はどのカメラを選択してもよく、またカメラ b はカメラ座標を示せば、 (i, j) のカメラをさすため、

$$H_{ab}^\infty =: H_{i,j}^\infty \quad (11)$$

として記述する。 a の情報は不必要的ため省略した。

このとき、風景などから直接無限遠点を自動的に抽出した場合には、すべて正対応である対応点を抽出することは困難である。また、格子パターンから消失点を得る場合も間接的にしか得られないため、真値からの誤差が大きくなりアウトライアになる場合がある。そこで、ここでのホモグラフィ演算はアウトライア除去のため、投票による LMedS 法 (Least MEDian Square)¹⁶⁾ を用いてホモグラフィを求めた。

3.3 平面とカメラの直文化

無限遠平面での射影の式(11)を各カメラに適用した段階で、カメラの内部変数、姿勢は同一の状態であり、このときの点の射影を、エピポーラ幾何では、pure translation と呼ぶ¹⁰⁾。pure translation 状態でかつ、カメラの並進が

* p_g からなる直線の外積として導出する、もしくは格子の無限遠での交点 $(1, 0, 0)^T$ ないし $(0, 1, 0)^T$ に逆行列 H_g^{-1} を掛ければ導出可能。

** すべてのカメラにおいて、姿勢、内部変数がそろっていることが目的であるから、 (i, j) のカメラのうちのどれかに合わせればよく、基準カメラとしてどのカメラを選んでもよい。

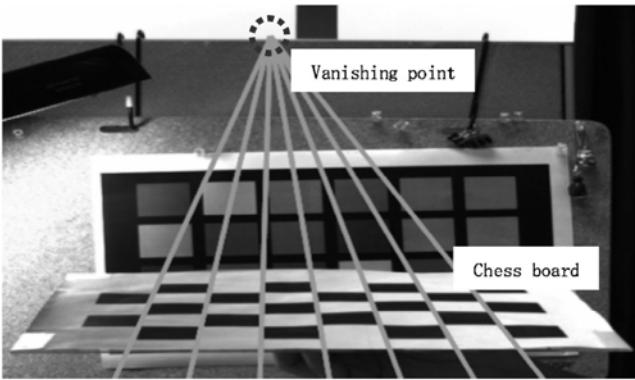


図 6 格子パタンからの消失点
Vanishing point from chess board.

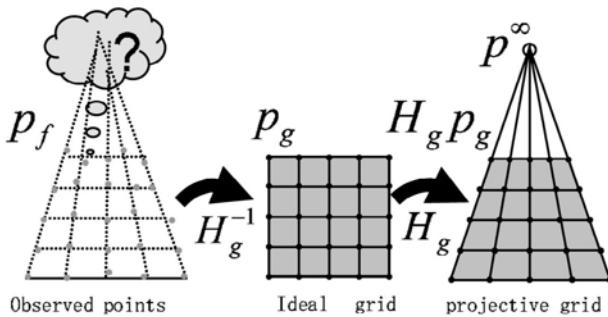


図 7 消失点の最適化
Optimization method for vanishing point.

平面で表されるとき（今回想定するカメラアレイは2次元平面），すべてのカメラのすべてのエピポーラ線が一致するという特性がある（図8）。具体例を示すため，無限遠平面上に乗らない特徴点，つまり，有限の距離にある点が n_{\max} 個あり，各カメラ(i,j)上で対応するn個目の特徴点を $p_{i,j}^n = (u_{i,j}^n, v_{i,j}^n)$ とする。そのとき，n番目の特徴点において，iを固定して，すべての列jを走査した特徴点列 $\{p_{i,1}^n, p_{i,2}^n, \dots, p_{i,h_c}^n\}$ ，またjを固定して，すべての行iを走査特徴点列 $\{p_{1,j}^n, p_{2,j}^n, \dots, p_{w_c,j}^n\}$ は各自直線上に乗る。加えてこの縦・横の直線は，どのn番目の特徴点においても1点に交わる。

このすべての縦・横のエピポーラ線の交わる点をエピポールと呼ぶ。このとき，図8のように，エピポールを作る特徴点の軌跡は格子を射影した形となり，その軌跡が交わる点がエピポールとなる。この点列から，エピポールを求める問題は，3.2章の格子パタンを映したものから消失点を求める問題とまったく同じとなるため，同様の方法にてエピポールを計算可能である。^{*}ただし，特徴点軌跡は取得した特徴点の数だけ得られ，ノイズ環境下では，各軌跡に対応するエピポールは一致しない。そのため，各水平，垂直方向のエピポールは各軌跡で得られたエピポールの重心を用いる。

この状態であるとき，本節では，すべてのカメラに対し

^{*} 格子パタン上の点から求める点と，内部・姿勢の変数がそろったカメラから得られたある3次元点の対応点列から求める点で異なるが幾何学には同じものであり計算の過程は同じになる。

て，共通の射影行列をかけることでレクティフィケーションを行う。本節の処理の段階では，ただ一つのすべてのカメラ間の対応点，つまり特徴点軌跡があればよい。

各エピポーラ線が平行となるとき，エピポールは無限遠に位置するようになる。水平方向のエピポールを $e_u = (e_{u0}, e_{u1}, 1)^T$ とし，無限遠に飛ばしたエピポールを $e'_u = (1, 0, 0)^T$ また，垂直方向のエピポールを $e_v = (e_{v0}, e_{v1}, 1)^T$ とし，無限遠に飛ばしたエピポールを $e'_v = (0, 1, 0)^T$ とすると，各エピポールを無限遠へと射影する行列 P は，

$$e'_w = Pe_w, w \in u, v \quad (12)$$

を満たす。式(12)において，拡大縮小および，平行移動を許した，射影成分のみを考慮した各エピポールを無限遠に射影する射影行列を P^* とすると，

$$[e'_u e'_v] = P^*[e_u e_v] \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & p_1 & 0 \\ p_2 & 1 & 0 \\ p_3 & p_4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{u0} & e_{v0} \\ e_{u1} & e_{v1} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

となり，式(14)の未知数 p_1, p_2, p_3, p_4 は二つのエピポールの座標により線形に求まる。

この状態では，すでにすべての特徴点が水平・垂直に平行となる。しかし，軌跡の縦横比は自由であり，またミラーリングを許している。まず，ミラーリングを修正する行列 A を定める。

$$A = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & n & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

ただし， $m, n \in \{1, -1\}$ 。 m, n はフリップがおきないように設定した。

最後に，拡大縮小，平行移動に関して自由度が残るが，本論文では，上記自由度を下記のように行列 S を定めることで制限した。射影後の画像を囲む四角形のうち，長い辺の長さが入力解像度と等しくなるように s 倍拡大・縮小し，描画範囲内に収まるように平行移動($\text{shift}_u, \text{shift}_v$)させた。また，所望の状態はカメラアレイの縦横比 α と軌跡の縦横比は等しく，設置したときの理想的なカメラの比 α 値を代入することで拡大の縦横比を定めた，

$$S = \begin{bmatrix} s & 0 & \text{shift}_u \\ 0 & s\alpha & \text{shift}_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

最終的に乗算する行列は

$$P = SAP^* \quad (17)$$

であり，この行列を共通にすべてのカメラに適応する。

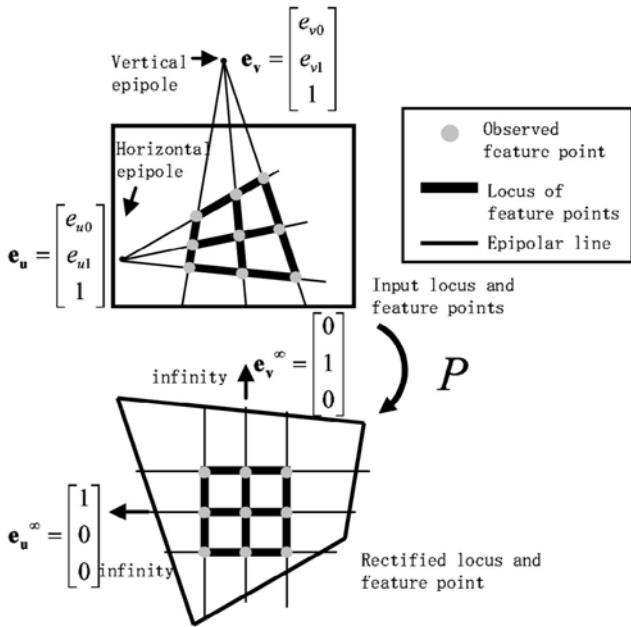


図 8 H^∞ により整列された特徴点軌跡

The Image of Correspondence Point Orbit in the case of array aligned by H^∞ .

つまり、すべてのカメラ (i,j) に対する固有のレクティフィケーション行列 $H_{i,j}$ は、

$$H_{i,j} = PH_{i,j}^\infty \quad (18)$$

となり、最終的に、式 (18) の行列で各画像を射影することでレクティフィケーションが完了する。

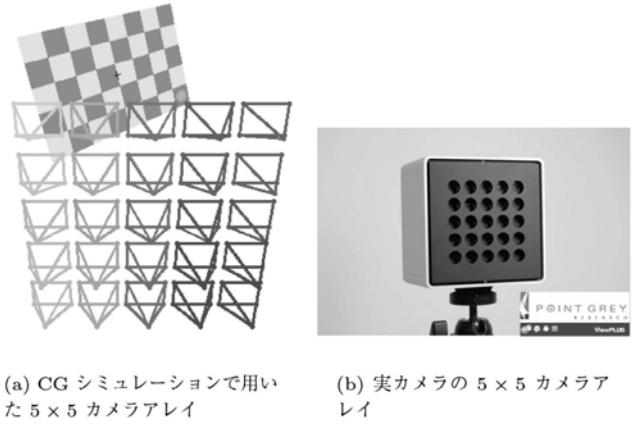
4. 実験および結果

4.1 実験環境

本手法を、CG によるシミュレーション実験および実写実験により評価した。CG および実写両方とも、解像度 640×480 、画角 36.8 度を持つカメラで、 $5 \times 5 (i_{\max} \times j_{\max})$ の 2 次元カメラアレイを設置し、各カメラの間隔は縦横とともに 1cm である。図 9(a) は用いたシミュレーション環境であり、また、図 9(b) は実写実験で使用したカメラアレイである。各実験では、格子パターンから計算した消失点により無限遠平面の射影を求める方法と、直接風景などから取得可能な無限遠点を用いる二つの方式で実験を行った。

CG による実験では、1m 離れた場所に $35\text{cm} \times 20\text{cm}$ の格子を写したシーンを想定して実験を行った。各カメラの姿勢は、 ± 2 度の範囲で、ピッチ・ヨー・ロールの各軸でランダムに設置し、また内部の焦点距離を ± 50 pixel の範囲でランダムに設置した。観測される特徴点の誤差はガウスノイズを仮定し、それぞれ u, v 軸方向へ標準偏差 σ_u, σ_v で付加した。また、無限遠点を得るためのパタンは 7×4 の格子を 20 枚撮影した ($7 \times 4 \times 20 = n_{\max}$ 点)。

実写実験でも、CG の場合と同じ、無限遠点を得るためにパタンは 7×4 の格子を 1 m 先に設置し、角度を動かしながら 20 枚撮影した。ただし、実カメラの場合は、レンズ



(a) CG シミュレーションで用い
た 5×5 カメラアレイ

(b) 実カメラの 5×5 カメラア
レイ

図 9 実験環境
Experimental environment.

ディストーションが生じるために、Zhang のキャリブレーション手法⁴⁾により歪み係数は既知として、たる型歪みの除去を行った。ただし、このときに同時に出てくるカメラの位置、内部変数の情報はまったく用いていない。

4.2 誤差関数

レクティフィケーション誤差を、実際の射影された各特徴点の u, v 軸に対する標準偏差で定義し評価を行う。図 10 中にある、ある特徴点軌跡において、 i カメラ行、 j カメラ列目に入る n 個目の特徴点の画像座標を $(u_{i,j}^n, v_{i,j}^n)$ として、 j 行目の平均 u 座標を $\bar{u}_{ave,j}^n$ i 行目の平均 v 座標を $\bar{v}_{i,ave}^n$ とし、各値の画像中 u 軸の誤差を E_u, v 軸の誤差を E_v として、各々の平均的な格子からの距離を誤差とする。また E_u, E_v の 2 乗和の平方根を距離 E とする。

$$E_u = \sqrt{\frac{1}{n_{\max} \times i_{\max} \times j_{\max}} \sum_n \sum_j \sum_i (\bar{u}_{ave,j}^n - u_{i,j}^n)^2} \quad (19)$$

$$E_v = \sqrt{\frac{1}{n_{\max} \times i_{\max} \times j_{\max}} \sum_n \sum_j \sum_i (\bar{v}_{i,ave}^n - v_{i,j}^n)^2} \quad (20)$$

$$E = \sqrt{E_u^2 + E_v^2} \quad (21)$$

4.3 結果

まず CG によるシミュレーション実験結果を示す。図 11 は観測される格子パターンの特徴点に標準偏差 $\sigma_u = \sigma_v = \sigma$ のノイズを加えたときの u, v 軸エラー距離 E を示しており、理論値、無限遠点を用いた本手法、格子パターンによる消失点を用いた本手法についてそれぞれプロットした結果である。理論値はシミュレーション時の理想的なパラメータを既知として入力した。また無限遠点による実験は、無限遠点に対して誤差を直接与えた。

Plenoptic Sampling¹²⁾ を考慮すると、誤差は u, v の各軸で、 ± 0.5 pixel の範囲内に収めたい。そのため、図 11 中では、 E は $\sqrt{2} \times 0.5$ pixel 以内の誤差に収めることとすると、既知パタンを使う場合、標準偏差が 0.3pixel 以内に

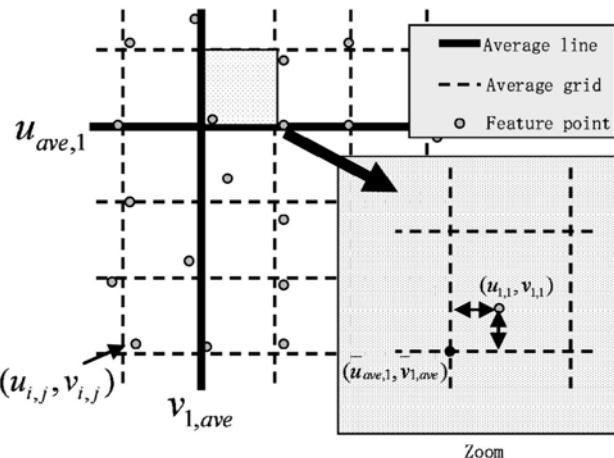


図 10 レクティフィケーションの誤差関数
Error function of rectification.

収めればよく、直接無限遠点を得る場合には、0.55pixelで充分であることがわかる。これは、消失点演算などにより間接的に得る点に比べて、無限遠点を直接得たほうが無限遠点の真値からの誤差が小さかったためと考えられる。

次に実写による実験画像をレクティフィケーションした結果を示す。図 12, 13 は、その実写実験の結果画像である。図 12 は、2.3 節中の図 3 の方式で示したものであり、 $(i, j) = (1, 5)$ のカメラ画像を表示し、また、他のカメラの特徴点、およびその軌跡をその上に描画したものである。描画されている特徴点は、格子パターンの左上内側のはじめのコーナである。図中、左がレクティフィケーション前、右がレクティフィケーション後の画像であるが、平面パターン上の左上の乱雑であった特徴点軌跡が処理前後で、格子状へと変換されていることがわかる。また、図 13 は、2.3 節中の図 2 の方式でレクティフィケーション済みの全多視点画像とその軌跡を表示したものである。図 13 中では、描かれている軌跡以外の特徴点もおおむねレクティフィケーションされていることがわかる。

次に、この実写実験の数値的な誤差の値を示す。まず、入力画像そのままの誤差である式(19)の値は 21.52 pixel であった。また、20 枚の格子パターンから消失点を用いてレクティフィケーションしたところ、誤差は、0.91 pixel であった。最後に実際に写る背景映像の対応を SIFT(Scale Invariant Feature Transform)¹³⁾ でとり^{*}、無限遠での対応としたとき、0.25 pixel となり、充分な結果であった。

5. む す び

本稿では、光線空間等で用いられる、マルチカメラを用いた2次元カメラアレイで取得される画像をすべて平行化するレクティフィケーション方法を提案した。最低、点の無限遠点と1点の有限距離の点の対応関係から、ノンメト

* SIFT とは、特徴点とその点の特徴量の抽出方法である。その特徴量は画像の拡大縮小・アフィン回転にロバストであるため、画像間の自動対応付けが可能となる。ただし、アウトライアの混入は避けられないため、統計的な手法である LMedS 法¹⁶⁾ 等を組合せて用いる。

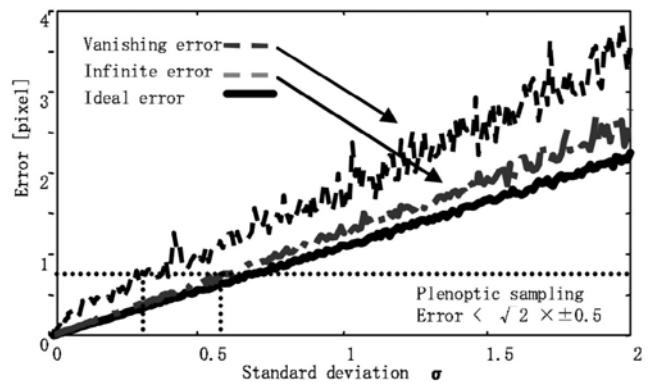


図 11 理想状態と提案手法の標準偏差と誤差の関係
The relation between errors of pixels and variance of noise by ideal and proposed method.

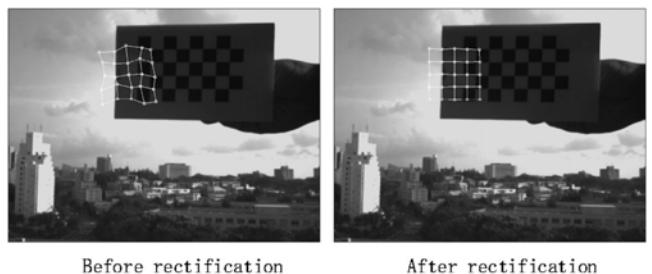


図 12 レクティフィケーション前・後の特徴点軌跡
Images of before rectification and after rectification.

リックな手法により、レクティフィケーションを可能とした。つまり、カメラの位置、方向等を測量するカメラキャリブレーションを必要としない手法である。実写実験により、実写画像のレクティフィケーション誤差が 0.25pixel となり、実用的な方法であることを示した。本手法は、無限遠点が直接取得可能であれば、既知パターンなどを必要とせず、自然特徴点だからも可能となる。

提案手法の問題点は、無限遠平面を求めるときの消失点がノイズに非常に影響されやすい点や、無限遠、有限距離と2段階に分離した結果、各プロセス間で誤差が蓄積した点である。今後の課題として、上記の無限遠状態を経由しないような、有限距離のみで成立する関係を今後検討する予定である。

本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発制度・国際技術獲得型研究開発(063106001)「自由視点映像伝送方式に関する国際標準技術の研究」および、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(A)(18206044)「光線画像工学創成の基礎研究」により行われた。

[文 献]

- 1) 藤井 俊彰, 金子 正秀, 原島 博 : “光線群による3次元空間情報の表現とその応用”, テレビ誌, 50, 9, pp. 1312 – 1318 (1996)
- 2) M. Levoy, P. Hanrahan : “Light Field Rendering”, Proc. ACM SIGGRAPH '96, pp. 31–42 (1996)
- 3) N. Fukushima, T. Yendo, T. Fujii and M. Tanimoto : “Free Viewpoint Image Generation Using MultiPass Dynamic Programming”, Proc. SPIE SD&A XIV, 6490, pp. 460–470 (2007)
- 4) Z. Zhang : “A Flexible New Technique for Camera Calibration”, IEEE Trans. PAMI, 22, 11, pp. 1330–1334 (2000)
- 5) R. Swaminathan, SK Nayar : “Nonmetric calibration of wide-



図 13 レクティフィケーションされた全多視点画像とその対応点軌跡
Rectified all images and correspondence point.

- angle lenses and polycameras" IEEE Trans. PAMI, **22**, 10, pp. 1172–1178 (2000)
- 6) C. Loop and Z. Zhang: "Computing rectifying homographies for stereo vision" Proc. IEEE Conf. CVPR1999, **1**, pp. 125–131 (1999)
 - 7) V. Vaish, at el.: "Using plane + parallax for calibrating dense camera arrays" proc. CVPR 2004, **1**, pp. l-2 – l-9 (2004)
 - 8) 松本健太郎, 圓道知博, 藤井俊彰, 谷本正幸: "3 次元画像処理のためのマルチカメラ画像の幾何補正" Proc. of The 10th Image Media Processing Symposium, pp. 89–90 (2005)
 - 9) K. Deng, L. Wang, Z. Lin, T. Feng, and Z. Deng: "Correction and rectification of light fields" In Computers & Graphics, **27**(2), pp. 169–177 (2003)
 - 10) R. Hartley and A. Zisserman: "Multiple View Geometry in Computer Vision Second Edition" Cambridge University Press, Cambridge, UK (2003)
 - 11) R. Szeliski : "Video mosaics for virtual environments" IEEE Computer Graphics and Applications, pp. 22–30 (1996)
 - 12) JX Chai, X Tong, SC Chan, HY Shum : "Plenoptic sampling", Proc. SIGGRAPH' 00, pp.307–318 (2000)
 - 13) David G. Lowe : "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," International Journal of Computer Vision, **60**, 2, pp. 91–110 (2004)
 - 14) N. Ayache, C. Hansen, "Rectification of images for binocular and trinocular stereovision" 9th International Conference Pattern Recognition 1988, **1**, pp. 11–16 (1988)
 - 15) M. Heinrichs, and O. Rodehorst "Trinocular rectification for various camera setups" Proc. Photogrammetric Computer Vision'06, pp. 43–48 (2006)
 - 16) P.J. Rousseeuw, "Least Median of Squares Regression" J. American Stat. Assoc., **79**, pp. 871–880 (1984)

