

焦点距離が未知の入力画像群に対する 3次元復元の安定化

野沢 和輝^{1,a)} 鳥居 秋彦^{1,b)} 奥富 正敏^{1,c)}

概要：本研究では焦点距離が未知の画像集合に対して、安定した3次元復元を行うためのアルゴリズムを提案する。Steweniusらが提案した6点アルゴリズムを用いることで、画像ペアからカメラ間の相対的な運動と焦点距離が推定可能である。カメラ内部校正を前提条件とするNisterらの5点アルゴリズムに比べ汎用であるものの、撮影したシーン、カメラ運動に対する幾何学的縮退条件が多く、不安定なものであった。本論文では、縮退が起きている画像ペアの検出アルゴリズムを新たに提案することで3次元復元システムの安定化を図る。これにより、近年広く用いられているBundlerなどのストラクチャーフロムモーションが必要とする焦点距離が既知という制約がなくなり、3次元復元に用いる入力画像の自由度が広がる。

キーワード：運動からの形状復元，セルフキャリブレーション，幾何学的縮退

1. はじめに

ARやロボットビジョンなどの基礎技術として、3次元計測の需要が高い。レーザーを利用した3次元距離センサなども存在するなかで、近年のデジタルカメラの高性能化や低価格化、更に計算機の性能向上により、画像のみを用いた3次元情報の取得が手軽に利用できるようになった。その中でも運動からの形状復元 (SfM: Structure from Motion) では、画像中の特徴点対応からそれらを撮影したカメラの相対的な位置・姿勢を推定することにより、三角測量の原理で特徴点の3次元座標を求めることができる。

SfMに関しては様々な研究がなされ [4][9], SnavelyらのBundler[6][7] など専門的な知識を持たずとも容易に復元を行うことができるシステムも存在する。Bundlerのようなインクリメンタル SfM では、まず2枚の画像から撮影したカメラの相対的な位置・姿勢関係 (=モーション) を推定し、初期復元を行う。その後1枚ずつ画像を追加し、その都度カメラのモーション推定と復元を行なっていく。初期復元にはNisterらの5点アルゴリズム [5] がよく用いられているが、このアルゴリズムは入力画像が校正済みであり、カメラの内部パラメータが既知であることを仮定している。Bundlerでは内部パラメータのうち、アスペクト比 $r = 1$ 、せん断係数 $s = 0$ 、そして光学中心の位置は画像中

心に一致すると近似できるとし、焦点距離はEXIFから求めることで5点アルゴリズムを利用した初期復元を行っている [1][7]。しかし、EXIFは画像によっては編集などにより欠如していたり、正しいパラメータを反映していない可能性がある。また、ビデオカメラで撮影された映像には焦点距離情報は付随していないことが多い。それらの画像群に対し復元を行う際は、内部パラメータ、少なくとも焦点距離を求めなければならない。

内部パラメータを求める手法としてチェッカーボードなどのターゲット画像を利用するキャリブレーションが古くから存在するが、入力画像を撮影したカメラが利用可能である必要があり、作業も非常に手間がかかるものである。近年の研究ではターゲット画像に依らないセルフキャリブレーションも注目されており、Gherardiらは無限遠平面を利用し、3枚以上の画像から内部パラメータを求める手法を提案している [3]。

私たちは、Steweniusらの6点アルゴリズム [8] に着目した。これは、一組の画像ペアから焦点距離とカメラモーションを推定可能な手法であるが、5点アルゴリズムに比べ縮退条件が多く不安定であるという性質をもつ。先行研究 [11] は、6点アルゴリズムの入力として不適切な画像ペアを検出することで、3次元復元の安定性を高めることを提案した。しかしながら、入力として不適切な幾何学的縮退条件に関する解析と検出手法は不完全なものであった。そこで本研究では、全ての縮退条件を網羅した幾何学的解析を行い、そのうえで縮退が生じている画像ペア検出手法を提案する (3.1節)。さらに、幾何学的縮退以外で6点アル

¹ 東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

a) nozawa@ok.ctrl.titech.ac.jp

b) torii@ctrl.titech.ac.jp

c) mxo@ctrl.titech.ac.jp

ゴリズムが不安定となるような画像ペアの検出も行い(3.2節), その後, 初期復元を行うのに適切な画像ペアを選択することで(4章), 焦点距離が未知の入力画像群からの安定な3次元復元を実現する。

2. 6点アルゴリズムを利用した3次元復元とその課題

6点アルゴリズムでは, Bundlerと同様に, 内部パラメータの内, アスペクト比 $r = 1$, セン断係数 $s = 0$, そして光学中心の位置は画像中心に一致すると仮定をおく。さらに, 2台のカメラの焦点距離が等しいと仮定することで問題の自由度を減らし, 2枚の画像上の6対応点の座標から焦点距離と基礎行列を求める[8]。焦点距離と基礎行列からは基本行列が得られ, 更にそれを分解することで回転行列と並進ベクトルを得ることができる(初期復元)。インクリメンタル SfM では, その後, DLT[4]によりすでに復元された点と新たな入力画像上の点との対応から次のカメラの焦点距離, モーションを求めていく追加復元を行う。最後にバンドル調整により復元された点群の各画像上での再投影誤差を最小化することで精度を向上させることができる。

ここで, すでに述べたように6点アルゴリズムには縮退条件が多いという課題が存在する。縮退が起きている画像ペアを6点アルゴリズムに入力すると, 正しい焦点距離が(縮退条件によっては基礎行列も)得られなくなる。そのような結果をもとに初期復元を始め, 追加復元を続けると, 不正確な復元を続けることになるため, 結局復元が破綻してしまう。以下に6点アルゴリズムによる推定が不可能となる縮退条件を示す。

- クリティカルモーション
 - Pure Rotation
 - Parallel Axis
 - Intersection
- 平面的なシーン

Pure Rotation はカメラが並進をしていないモーションを指す。三脚などを用い同じ点から姿勢のみを変えて撮影したような画像ペアからは焦点距離も基礎行列も求めることができない。Parallel Axis は光軸が平行になるようにカメラが移動したモーションを指す。直進する車に固定したカメラから撮影した画像ペアなどがこれに相当するが, この場合基礎行列は正しく求まるが, 焦点距離推定が不可能となる。Intersection は2台のカメラから等距離で光軸が交差するようなモーションを指す。この場合も基礎行列は正しく求まるが, 焦点距離推定が不可能となる。また, 平面的なシーンを撮影するなどして6点アルゴリズムで用いる6対応点が全て同一平面上に存在する場合は焦点距離も基礎行列も正しく求める事ができない。

さらに, 焦点距離が異なるカメラで撮影した画像ペアが入力されると6点アルゴリズムで正しい解は得られない。

また, 特徴点対応を元にした3次元復元に共通の問題として, 特徴点対応がとれない画像ペアや, ベースラインの大きさに対して極端に遠いシーンを写した画像からも精度良い復元は行えない。前者は, 共通視野がない画像ではカメラ間の関係を求める事ができないので明らかである。また, 後者は, 遠景を写した画像ペアでは各特徴点とカメラ中心を結んだ際の頂角: Apical Angle が小さくなる。Apical Angle が小さい点は, 画像上での僅かな対応点座標のずれが3次元空間上で非常に大きなずれとなって現れてしまうので, 誤差が大きくなる傾向がある[10]。従って, そのような対応点が多くなる画像も復元に用いるのは不適切であり, これら全てを隈なく検出する必要がある。

3. 6点アルゴリズムを用いた3次元復元に不適切な画像ペアの検出手法

実際に3次元復元を行う際には, まず6点アルゴリズムをRANSACと組み合わせて用い, 焦点距離と基礎行列と, それらを支持する対応点であるイン라이어セットを求める。これらの出力から, 6点アルゴリズムによる推定が正しく行われておらず, 3次元復元にとって「不適切な画像ペア」を検出するテストを行う。このテストによって, 誤推定を元にした復元が開始されることを防ぎ, より安定した3次元復元が行えるようになる。以下に, 不適切な画像ペアの検出方法について解説する。

3.1 縮退を起こしている画像ペアの検出

3.1.1 平面的なシーン, Pure Rotation を検出するテスト (Homography Test)

平面的なシーンを撮影した画像, または Pure Rotation として表されるカメラ運動で撮影された画像ペア上の対応点は, その関係をホモグラフィーにより表現することができる。そこで, 本研究では2つの Homography Test を考える。まず, 6点アルゴリズムに用いた6点が同じ平面に乗っていないかを判断する H_6 Test について考える。このテストでは, 6点アルゴリズムでのRANSAC終了後, 選ばれた6点の内4点を用いてホモグラフィーを計算する。残りの2点はそのホモグラフィーによりもう一枚の画像に射影される場合はその2点も同一平面上に存在することがわかる[2]。ただし, 実画像では平面的なシーンでもノイズなどの影響で平面からわずかに離れた場所に特徴点が観測されることがあるため, H_6 Test では検出できなくなる可能性がある。このような検出漏れを防ぐため, シーン全体が平面的かどうかを調べる H_{ALL} Test を行う。このテストではまず, RANSACによりホモグラフィーを求める。基礎行列モデル推定を行った際のイン라이어の数よりホモグラフィーによるモデル推定を行った際のイン라이어の数が大きい場合には, 平面的なシーンないし Pure Rotation の可能性が高いので不適切な入力として判断す

る。RANSAC を行うためコストは大きくなってしまいますが、 H_6 Test と比べて平面的なシーンをより確実に検知することができる。 H_{ALL} Test を行う前に H_6 Test を行い、その時点で不適切な画像ペアだと検出された場合は直ちに次のペアのテストに移ることで、より効率的に平面的なシーン、Pure Rotation を検出することができる。 検出精度に焦点を当てた場合、 H_6 Test は冗長なものとなるので、今回明示的な実験の比較を省略する。

3.1.2 Parallel Axis を検出するテスト (Rotation Test)

回転行列をもとに、光軸が並行かどうかを判断する方法を以下に示す。 まず、光軸が並行な場合における基礎行列、基本行列の性質を考える。 光軸が平行なとき、回転行列 R 、並進ベクトル t は以下ようになる。

$$R = \begin{pmatrix} \cos \omega & \sin \omega & 0 \\ -\sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad t = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 ω はカメラの光軸周りの回転角である。 内部パラメータ行列 K_t が $diag(f_t, f_t, 1)$ であることから、基礎行列は以下ようになる。

$$F_t = K_t^T [t]_{\times} R K_t \quad (2)$$

つぎに、正しい基礎行列 F_t が得られたとき、これと推定された焦点距離 f_{est} から並進ベクトルと回転行列を求めることを考える。 推定内部パラメータ行列 $K_{est} = diag(f_{est}, f_{est}, 1)$ を用いて正しい基礎行列 F_t を基本行列化する、

$$E_{est} = K_{est}^{-T} F_t K_{est}^{-1} = K_{est}^{-T} K_t^T [t]_{\times} R K_t K_{est}^{-1} \quad (3)$$

となる。 これを、並進を表す歪対称行列と回転を表す回転行列に分解すると以下ようになる。

$$E_{est} = [t]_{\times} R \quad \left\{ \begin{array}{l} [t]_{\times} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{f_{est}^2}{f_t^2} t_z & \frac{f_{est}}{f_t} t_y \\ \frac{f_{est}^2}{f_t^2} t_z & 0 & -\frac{f_{est}}{f_t} t_x \\ -\frac{f_{est}}{f_t} t_y & \frac{f_{est}}{f_t} t_x & 0 \end{pmatrix} \\ R = \begin{pmatrix} \cos \omega & \sin \omega & 0 \\ -\sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{array} \right. \quad (4)$$

ここで、回転行列の部分は推定焦点距離 f_{est} に依存しないことがわかる。 クリティカルモーションの Parallel Axis の場合、焦点距離推定に失敗しても基礎行列は正しく求めることができるので、回転行列も正しく求めることができる。 回転行列が正しく求まると、2台のカメラの光軸がなす角 $\gamma = \angle(k, Rk)$ (k は、 z 軸方向単位ベクトル) も正しく求めることができ、Parallel Axis を検出することができる。

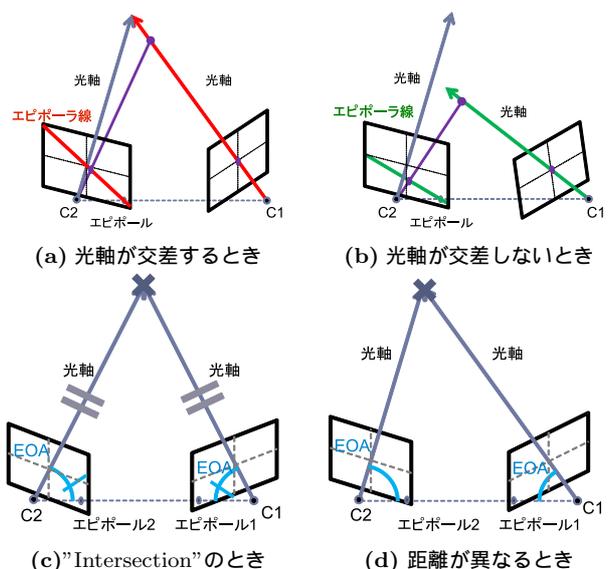


図 1 Optical Axis Test

3.1.3 Intersection を検出するテスト (Optical Axis Test)

Intersection は、(i) 「光軸が交差する」 かつ (ii) 「交差点までの距離が等しい」 モーションであると定義できる。 以下、それぞれの場合で光軸上に存在する点についてのエピポーラ幾何を考えることにより、これを検出する方法を解説する。

(i) 光軸が交差する場合

光軸が画像中心を通るという仮定の下、「画像1、すなわちカメラ1で撮影した画像の中心に投影された点」に関するエピポーラ幾何を考える (図 1(a),(b)). Intersection の場合でも基礎行列は正しく求まるので、それぞれの画像中心の点に対応するエピポーラ線も正しく求めることができる。 このとき、画像2上のエピポーラ線はカメラ1の光軸を投影したものと等しくなり画像中心を通る。 これは反対の画像に関しても同様である。

(ii) 交差点までの距離が等しい場合

光軸が交差し、交差点までの距離が等しいときのエピポーラ幾何を考える (図 1(c),(d)). このとき、エピポールと光軸がなす角を "Epipole-Optical axis Angle (以下、EOA)" と呼ぶことにする。 交差点と各カメラ中心とを結ぶと二等辺三角形となることから、この2つの EOA は等しくなることがわかる。 焦点距離推定が正しく行われないと EOA も変化してしまうが、両方のカメラに同じ焦点距離が推定されるので EOA の差はやはり 0 になる。 よって、EOA の差が小さい場合は双方のカメラ中心から等距離の点で光軸が交差する可能性があるといえる。

Intersection テストでは、「エピポーラ線と画像中心との距離」と「EOA の差」がそれぞれ閾値以下となるような画像ペアは Intersection に近く不適切な入力として検出する。

3.2 その他不適切な画像ペアの検出

3.2.1 焦点距離が異なるカメラで撮影された画像ペアを検出するテスト (SVT)

焦点距離が異なる画像の入力は6点アルゴリズムでは想定していないため、正しいモーション推定が行えなくなる。これを検出するために、基本行列の2つの非ゼロの特異値が等しくなるという性質（以下、性質Aと呼ぶ）を利用する。焦点距離が等しいカメラで縮退を起こさないよう撮影された画像ペアから6点アルゴリズムとRANSACにより正しい焦点距離 f_{6pt} と基礎行列 F_{6pt} 、及びそれらを支持するイン라이어セット inl_{6pt} が求められたことを考える。なお、6点アルゴリズムでは性質Aも利用して計算を行っているため、 f_{6pt} と F_{6pt} から計算される基本行列 E_{6pt} は必ずこれを満たす。さらに、 inl_{6pt} を利用して線形な手法である8点アルゴリズムで基礎行列 F_{8pt} を求めると、これは F_{6pt} と一致するはずである。よって、 F_{8pt} と f_{6pt} を利用して得られる基本行列も性質Aを満たす。

対して、焦点距離が異なるカメラで撮影された画像ペアから6点アルゴリズムとRANSACにより焦点距離 f'_{6pt} と基礎行列 F'_{6pt} 、そしてイン라이어セット inl'_{6pt} を計算することを考える。この場合、正しい焦点距離、基礎行列は得られない。また、 inl'_{6pt} を利用して8点アルゴリズムを行うと基礎行列 F'_{8pt} が得られる。イン라이어セットの中に特徴点の誤対応が存在しない場合は正しい基礎行列が計算され、そうでない場合は誤った基礎行列が推定されるが、いずれにせよそれを正しくない焦点距離 f'_{6pt} を利用して基本行列化した場合、性質Aを満たすことは保障されない。

このテストでは、上記のように求めた基本行列の非ゼロの特異値の比 (Singular Value Ratio = $\sigma_1/\sigma_2, \sigma_1 < \sigma_2, \sigma_i$ は特異値) を調べ、これが小さい場合は正しい焦点距離、基礎行列推定が行われていないので、不適切な画像ペアだったと検出を行う。

3.2.2 対応点が少ない画像ペアを検出するテスト (Matching Test)

そもそも2枚の画像に共通して写っている対象が存在しないとカメラの位置関係や姿勢を推定することはできない。そのため、同じ対象を撮影していないような画像ペアを検出し、初期復元の入力として用いないようにする必要がある。Matching Test ではモデル推定を行った際、そのモデルを支持するイン라이어の数が閾値より少ない画像ペアは不適切な入力として検出する。

3.2.3 Apical Angle が小さい画像ペアを検出するテスト (DAA Test[10])

6点アルゴリズムで正しい計算が行われ、焦点距離、モーション推定が正しく行われた上で復元を行うことを考える。ノイズ等の影響により、画像上での対応点の座標は本来投影された位置よりもわずかにずれる。2台のカメラ中心と3次元空間上の点とを結んだときにできる頂角を Apical

Angle と呼ぶが、これが小さいと対応点の位置のずれに対して空間上での復元誤差が大きくなる。よって、Apical Angle が小さい点は精度良い復元が期待できないので検出し、除外する必要がある。Apical Angle は回転行列と焦点距離が既知であれば画像上の全ての対応点について求めることができるが、そのヒストグラムをつくったときのピークを Dominant Apical Angle (DAA) と呼び、これが極端に小さくなるような画像ペアは復元に不適切なペアであるとして検出する [10]。ただし、Apical Angle が小さいシーンというのは Pure Rotation に近いモーションであるので縮退を起こしている可能性がある。その場合モーション推定が正しく行われないので回転行列も誤推定されてしまい、このテストでは検出できない。よって、このテストの他に Pure Rotation を検出するテストを行うことで、Apical Angle が小さい画像ペアをすべて検出できるようになる。

4. 3次元復元に最適な画像ペア決定のための採択基準

入力画像の数が十分に多い場合、前項で述べた検出手法をパスし、「復元に適する」と考えられる画像ペアが複数存在することが予想される。しかし、それらの画像ペアからの復元精度は一定ではなく、ノイズの影響を始め様々な要因により左右される。本研究では、複数存在する復元に適する画像ペアの中から、より高精度な復元が行えるようなペアを決定するための採択基準としてスコア付けを行う。今回は、鳥居らが提案したスコア付け [11] をそのまま利用した (式5)。

$$score = \frac{q_1 + q_2 + q_3}{3}, \text{ where } \begin{cases} q_1 = 1 - \frac{1-s}{1-0.98} \\ q_2 = \frac{|m|}{500} \\ q_3 = 1 - \frac{|m^H|}{|m|} \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 s は Singular Value Ratio、 $|m|$ は F_{8pt} を支持するイン라이어の数、そして $|m^H|$ は H_{ALL} テスト時のホモグラフィーを支持するイン라이어の数である。このスコア付けは、特徴点对応が多く取れるペアで、平面的なシーンでなく、基本行列の特異値比が1に近いほどよいモデル推定ができているという考えによるものであるが、これは Matching Test や Homography Test, SVT と同じ指標を利用している。

5. 実験

提案手法の効果を確かめるため、2つの実験を行った。仮想データを用いた実験で各縮退条件他、不適切な画像ペアが検出可能であることを示し、実画像実験で Bundler に比べ安定性が向上したことを示す。

5.1 仮想データを用いた実験

テストの有効性を確かめるため、これまでに挙げた6点

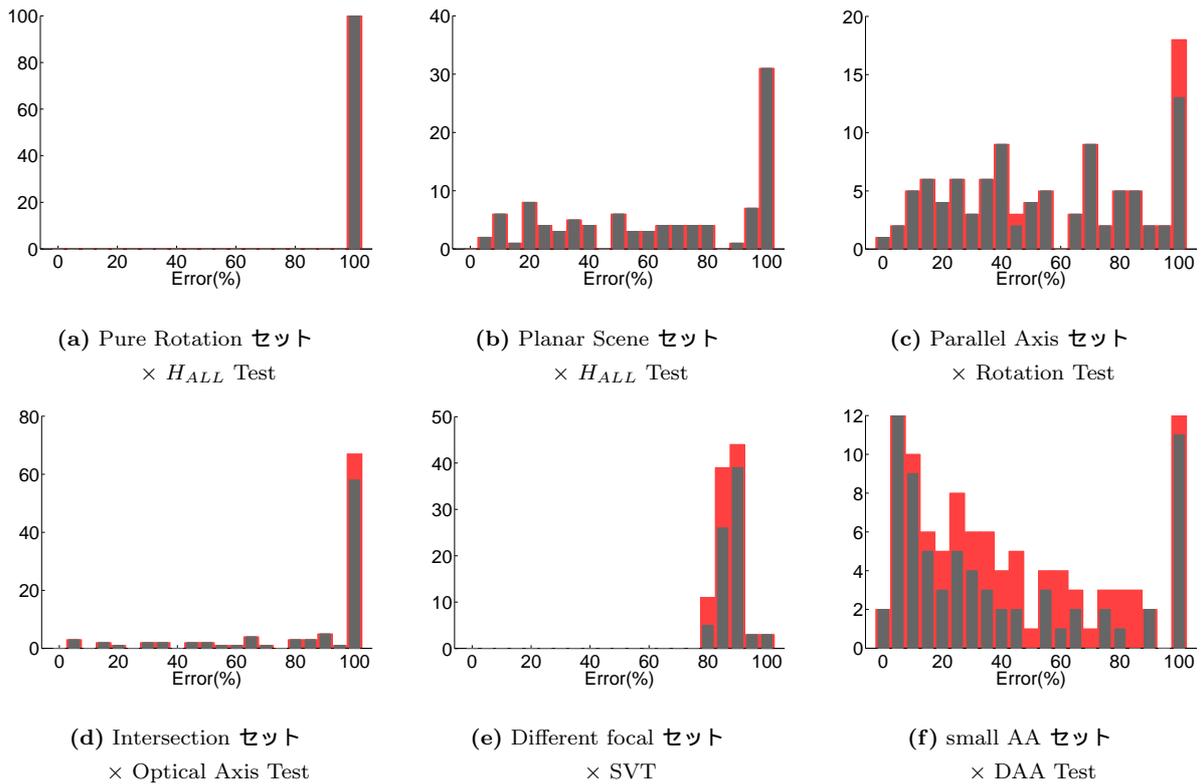


図 2 不適切な入力セットにおける復元誤差の分布と、それらに対し各テストを行った結果

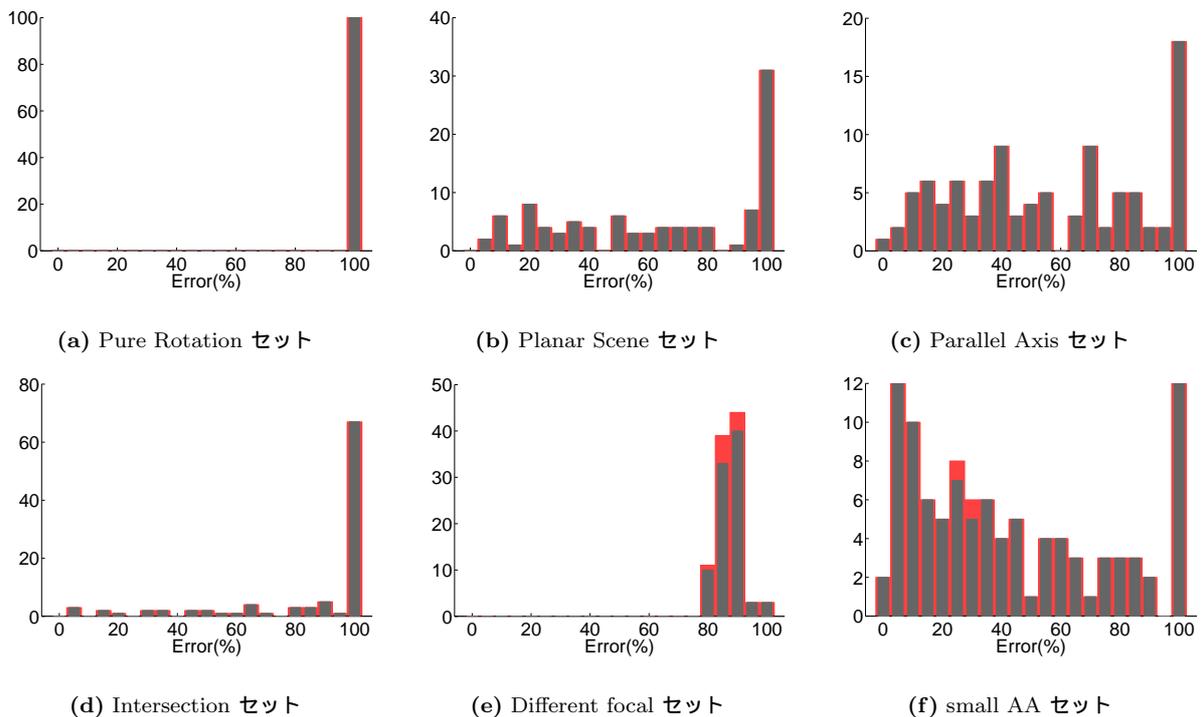


図 3 不適切な入力セットにおける復元誤差の分布と、それらに対し全テストを行った結果

アルゴリズムを用いた 3 次元復元に不適切な条件で仮想的に撮影を行った画像セットを用意し、それぞれのセットに対応するテストを実施、検出できるかを調べた。以下に今回用意した 7 種の画像ペアセットを示す。

- Random (Non-Degenerate) セット: 適切な入力

ペアで構成されるセット

不適切な入力ペアが存在しないように設計。

- ベースライン: 3 ~ 6[m]
- 光軸のなす角: 15 ~ 30[deg]
- 光軸間の距離: > 1[m]

- **Pure Rotation セット**: Pure Rotation で撮影したセット
 - カメラ中心を固定.
 - 光軸のなす角: $0 \sim 40$ [deg]
- **Parallel Axis セット**: Parallel Axis で撮影したセット
 - 光軸同士が並行.
 - ベースライン: $3 \sim 6$ [m]
- **Intersection セット**: Intersection で撮影したセット
 - 光軸がカメラから等距離で交差.
 - カメラから交差点までの距離: $6 \sim 14$ [m]
 - 光軸同士がなす角: $0 \sim 30$ [deg]
- **Different focal セット**: 焦点距離が異なる画像で撮影したセット
 - 焦点距離: $25, 50, 150$ [mm] のカメラを組み合わせペア画像を撮影
- **Small AA セット**: Apical Angle が小さくなるようなセット
 - 焦点距離: 150 mm
 - 撮影対象: 遠くのシーン
- **Planar Scene セット**: 平面上のシーンを撮影したセット
 - 撮影対象: 平面上のシーン
- **撮影対象**
 - 特に記載がない場合: カメラから 10 [m] 先を中心に $30 \times 30 \times 5$ [m] の空間内にランダムに発生させた点群
 - 遠くのシーン: カメラから 50 [m] 先を中心に $30 \times 30 \times 5$ [m] の空間内にランダムに発生させた点群
 - 平面上のシーン: カメラから 10 [m] 先を中心に、 30×30 [m] の平面上にランダムに発生させた点群

特に記載がない場合はそれぞれ 50 [mm] (焦点距離 35 [mm] 換算) のカメラを用いた. 画像サイズは 2288×1520 [pix] で, 画像上の点の座標に $\sigma = 3$ [pix] のガウシアンノイズを与えた. なお, Random セットは 400 ペア, その他はそれぞれ 100 ペアの画像で構成される. また, 本実験は CPU: Intel Core i7-860 2.6GHz, メモリ: 8GB, OS: Ubuntu 10.04 の PC 上で Matlab を用いて行った.

5.1.1 結果

復元に不適切なデータセットを用いた復元誤差のヒストグラムを図 2 に赤色で示した. また, それらの内, テストにより不適切な画像ペアだと検出することができたものを灰色で上書きした. つまり, 理想的には不適切な入力からの復元が全て灰色のヒストグラムで覆われることが望ましい. 復元結果はスケールの不定性を持つので, 相似変換して大きさを合わせた後, 撮影した点の 3 次元座標と比較することで誤差を求める. なお, 復元された点と撮影された点の距離 (ずれ) を, カメラから撮影した点までの距離で正規化したものを誤差として定義した. 不適切な画像ペアセット

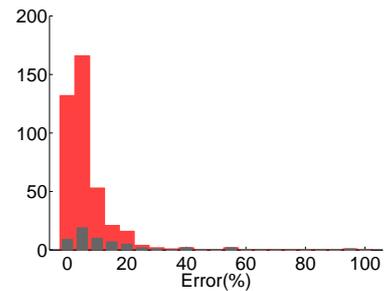


図 4 Random セット × 全てのテスト

からの復元は, 失敗してしまい誤差が大きくなってしまふ場合が多く, 不安定であることがわかる.

H_{all} Test では Pure Rotation や平面的なシーンを確実に検出することができている. また, Parallel Axis セットや Intersection セット, Different focal セットはそれぞれ Rotation Test, Optical Axis Test, SVT 単体でよく検出できている. ただし, small AA セットに対して行った DAA Test は検出漏れが多い. これは, Pure Rotation に近いモーションであるため 6 点アルゴリズムによる推定が失敗し, Apical Angle を得るのに必要な回転行列が正しく求められなかったためだと考えられる. この場合は Homography Test で検出できることが期待できる.

また, 図 3, 図 4 に, 不適切な入力セット, および縮退を起こさないように設計した入力セット (Random セット) に対し全てのテストを組み合わせで行った結果を示す. 組み合わせることでより確実に不適切な入力ペアは検出できているのに対し, 比較的誤差が少なく復元できている Random セットの誤検知は少ないことがわかる.

5.2 実画像を用いた実験

築地本願寺 (図 5(a)) を撮影した 1600×1200 [pix] のサイズの画像 20 枚を入力として 3 次元復元を行った. これらの画像は Canon IXY DIGITAL 930 IS を用い, 焦点距離を変えつつ撮影を行った. また, Bundler はバイナリ形式で提供されていたものを, CPU: Intel U2300 1.2GHz, メモリ: 4GB, OS: Windows 7 の PC 上で利用した.

まず, EXIF が添付された状態の画像を元に復元を行った結果が図 5(b) である. 次に, それらの画像から EXIF を消去したのに対し Bundler により復元を行った結果を図 5(c) に示した. 一方で, 提案手法により選択された画像ペアから 6 点アルゴリズムによって得られた焦点距離情報を用いて初期復元を行い, 追加復元とバンドルアジャストメントを Bundler を利用して行った結果が図 5(d) である. また, 定量的な結果を表 1 にまとめた. Bundler は利用可能な焦点距離情報がない場合, Matching Test をパスしたペアの中で, (H_{ALL} Test 時のホモグラフィイン라이어の数)/(基礎行列推定時のイン라이어の数) が最も少ない

画像ペアから初期復元を行う。また、画像サイズに応じた固定値を焦点距離の初期値として初期復元を行い、最終的にバンドルアジャストメントにより最適化を行っている。Bundlerのみを利用した場合、EXIFが存在しないと撮影位置を推定できた画像の枚数や復元点数、復元の質が大幅に低下していることがわかる。一方、初期復元ペアとその焦点距離を提案手法により求めることで、焦点距離が未知の入力画像群に対しても安定した復元が行えている。

6. おわりに

本研究では6点アルゴリズムを用いた焦点距離が未知の入力画像群に対する3次元復元を扱った。6点アルゴリズムによる推定が不安定になる入力画像ペアを検出するテストを提案し、それ以外の画像ペアから初期復元を行うことで安定化を図った。これにより、Bundlerでは復元が失敗してしまうEXIFの欠如した画像群からも安定な3次元復元が行えることを示した。この成果から、焦点距離が未知の画像群、例えばビデオ映像を利用した復元などへの応用が期待できる。

今後の課題として、仮想データを利用したテストの閾値の最適化と、テストをパスした画像ペア群の中から初期復元に用いるペアを選択する際に用いるスコアの提案が挙げられる。今回のテストの閾値は経験から人為的に定めたものであったが、より多くのカメラや撮影シーンを考慮した実験を行い閾値を最適化することで、不適切な画像をより確実に検出できるようになる可能性がある。また、今回は先行論文に習いRANSACを用いて2次元及び3次元モデルを求めた時のインライアの数と基本行列の特異値の比のみをスコアに組み込んだが、光軸同士がなす角など他のテストで用いたパラメータもスコアに組み込むことも考えられる。また、共通視野の広さなどもスコアに組み込むことで、より精度よく復元が行える画像ペアを選択できると期待できる。

参考文献

- [1] S. Agarwal, N. Snavely, I. Simon, S. M. Seitz, and R. Szeliski. Building rome in a day. In *Proc. IEEE 12th Int Computer Vision Conf*, pp. 72–79, 2009.
- [2] O. Chum, T. Werner, and J. Matas. Two-view geometry estimation unaffected by a dominant plane. In *Proc. IEEE Computer Society Conf. Computer Vision and Pattern Recognition CVPR 2005*, Vol. 1, pp. 772–779, 2005.
- [3] R. Gherardi and A. Fusiello. Practical autocalibration. *Computer Vision–ECCV 2010*, pp. 790–801, 2010.
- [4] R. I. Hartley and A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, ISBN: 0521623049, 2000.
- [5] D. Nistér. An efficient solution to the five-point relative pose problem. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, Vol. 26, No. 6, pp. 756–770, 2004.

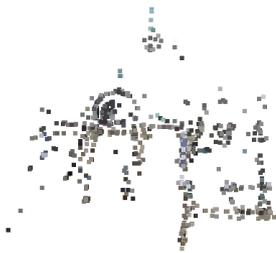
- [6] N. Snavely, S.M. Seitz, and R. Szeliski. Photo tourism: exploring photo collections in 3d. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 25, pp. 835–846. ACM, 2006.
- [7] N. Snavely, S.M. Seitz, and R. Szeliski. Modeling the world from internet photo collections. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 80, No. 2, pp. 189–210, 2008.
- [8] H. Stewenius, D. Nister, F. Kahl, and F. Schaffalitzky. A minimal solution for relative pose with unknown focal length. In *Proc. IEEE Computer Society Conf. Computer Vision and Pattern Recognition CVPR 2005*, Vol. 2, pp. 789–794, 2005.
- [9] R. Szeliski. *Computer vision: algorithms and applications*. Springer-Verlag New York Inc, 2010.
- [10] A. Torii, M. Havlena, T. Pajdla, and B. Leibe. Measuring camera translation by the dominant apical angle. In *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition CVPR 2008*, pp. 1–7, 2008.
- [11] A. Torii, Z. Kukulova, M. Bujnak, and T. Pajdla. The six point algorithm revisited. In *Proceedings of the 2010 international conference on Computer vision-Volume part II*, pp. 184–193. Springer-Verlag, 2010.



(a) 築地本願寺



(b) Bundler による復元結果
 (EXIF あり)



(c) Bundler による復元結果
 (EXIF なし)



(d) 提案手法+Bundler による復元結果
 (EXIF なし)

図 5 各手法での復元結果の比較

表 1 復元結果

	撮影位置推定ができた画像数	復元点数	初期復元に利用したペアの焦点距離 (EXIF から求めた焦点距離)
Bundler (EXIF あり)	19	2889	1110 (1110) 1703 (1703)
Bundler (EXIF なし)	13	751	532 (1110) 532 (1703)
Bundler + 提案手法 (EXIF なし)	19	2857	1197 (1110) 1197 (1110)