

# 未校正カメラによる2画像からの3次元復元と その信頼性評価

三島 等      金谷 健一

群馬大学工学部情報工学科

静止したシーン中で未知の運動をする未校正カメラによって撮影した2画像の対応点から3次元復元を行う。画像の誤差の統計的モデルを導入し、もはや改善の余地がないという意味の最適な復元を行うとともに、復元した形状がどの程度が信頼できるかを定量的に評価する。まず対応点に「エピ極線方程式」を当てはめて「基礎行列」を最適に計算し、それを分解して焦点距離とカメラの運動パラメータを計算する。そして対応点がエピ極線方程式を厳密に満たすように最適に補正し、それから3次元位置を復元するとともに、その共分散行列を評価する。最後にシミュレーションおよび実画像による実験を行い、その有効性を検討するとともに、不定性を除去する正規化(「ゲージ」)が不確定性の記述に与える影響を考察する。

キーワード: 動画像解析、3次元復元、基礎行列、自己校正、信頼性評価、誤差解析

## 3-D Reconstruction from Two Uncalibrated-Camera Views and Its Reliability Evaluation

Hitoshi Mishima and Kenichi Kanatani

Department of Computer Science, Gunma University, Kiryu, Gunma 376-8515 Japan

We reconstruct 3-D structure from point correspondences over two images taken by an uncalibrated camera in an unknown motion relative to a stationary scene. Introducing a statistical model of image noise, we strictly optimize the reconstruction to the extent that no further improvement is possible and evaluate the reliability of the computed shape in quantitative terms. First, we optimally compute the “fundamental matrix” by fitting the “epipolar equation” to the corresponding feature points. The computed fundamental matrix is then decomposed into the focal lengths and the camera motion parameters. The observed feature points are optimally corrected so as to satisfy the epipolar equation exactly. We compute the 3-D shape from the corrected feature points and evaluate the covariance matrices of the individual reconstructed points. Finally, we do simulation and real-image experiments to confirm the effectiveness of our system and observe the effect of “gauges” (normalization conditions for removing indeterminacy) on the description of uncertainty.

**Key words:** structure from motion, 3-D reconstruction, fundamental matrix, self-calibration, reliability evaluation, error analysis

謝辞: 本研究の一部は文部省科学研究費基盤研究C(2)(No. 11680377)によった。

\*376-8515 桐生市天神町 1-5-1, 群馬大学工学部情報工学科, Tel: (0277)30-1841, Fax: (0277)30-1801  
E-mail: mishima@ail.cs.gunma-u.ac.jp, kanatani@cs.gunma-u.ac.jp

## 1. 序論

動画像から3次元情報を抽出する方法には2通りある。一つは複数の画像の対応点から「基礎行列」[17, 22]を計算するものであり、もう一つは画像上の点の移動を瞬間速度場(オプティカルフロー)とみなして解析するものである。现阶段では両者を比較することは難しいが、本論文では2画像の対応点を用いる方法の実験的評価を行う。

2画像の対応点から3次元復元を行う研究は古くから多数の研究がある[4, 11, 20]。しかし従来はカメラが校正されていると仮定していた。それに対して近年、未校正カメラによる3次元復元(自己校正法)の研究が盛んである[17, 22]。これはカメラをあらかじめ校正する必要がないだけでなく、撮影中に自由にズームを変化させてもよいので非常に実用的である。ただし、射影的歪みを許せば3次元復元(射影復元)は比較的容易であるが、正しい形状の復元(ユークリッド復元)のためには3枚以上の画像が必要であり、複雑な処理が必要になる[16]。

しかし、もしカメラに固有なパラメータ(画像中心、アスペクト比、歪み角、等[17, 22])をあらかじめ校正しておけば、2画像の撮影時の焦点距離が計算できる[1, 3, 8, 15, 21]。本論文ではこれを利用して2画像から3次元復元を行う。本論文で目指すのは従来十分に考慮されていなかった次の2点である。

- 画像の誤差のモデルを導入し、統計的に最適な復元を行う。これは精度の理論限界を達成し、もはや改善の余地がないという意味の真に最適な復元である。
- 単に形状を復元するだけでなく、その信頼性を定量的に評価する。これにより復元形状がどの程度信頼できるかがわかる。

カメラが校正されている場合の2画像の対応点からの最適な3次元復元およびその厳密な信頼性評価はすでに金谷[5]が行っている。本論文ではそのもととなる統計的最適化理論[7]をカメラが未校正の場合に適用する。

カメラが未校正の場合には変数が増加し、それら間の関係が複雑になるので完全に厳密に評価することは困難である。本論文ではできる限り厳密な評価を行いながら現実的な近似を導入する。

本論文の復元システムは次の部分から構成される。

1. 画像上の特徴点の対応(最低8組)を検出する。
2. 得られた対応点に「エピ極線方程式」を当ては

めて「基礎行列」を統計的に最適に計算するとともに、その信頼性を評価する。

3. 計算した基礎行列を分解して焦点距離とカメラの運動パラメータを計算する。
4. 観測した特徴点がエピ極線方程式を厳密に満たすように統計的に最適に補正するとともに、補正した値の信頼性評価を行う。
5. 補正した値から3次元位置を復元し、その信頼性評価を行う。
6. 基礎行列の誤差を評価し、復元した点の共分散行列を計算する。

1については多くの研究があり、著者らのグループでも独自に研究を行っている。2については三島・金谷[12]が、3については金谷・松永[8]が既に発表を行っている。そこで本論文では4, 5, 6を主に記述する。そしてシミュレーションおよび実画像による実験を行い、その有効性を検討する。最後に不定性を除去する正規化(「ゲージ」[9, 10, 14])が不確定性の記述に与える影響を考察する。

## 2. エピ極線方程式と基礎行列

静止したシーンに相対的にカメラが回転行列  $\mathbf{R}$  だけ回転し、ベクトル  $\mathbf{t}$  だけ並進するとする。 $\{\mathbf{t}, \mathbf{R}\}$  を運動パラメータと呼ぶ。カメラが未校正であるとし、画像面上に任意に画像座標系をとる。第1画像の画像座標  $(u, v)$  の位置に投影されるシーンの特徴点が第2画像では画像座標  $(u', v')$  の位置に投影されるとし、これらを次のベクトルで表す。

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} u/f_0 \\ v/f_0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{x}' = \begin{pmatrix} u'/f_0 \\ v'/f_0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ただし  $f_0$  はカメラの運動前後の焦点距離の適当な近似値である。画像に誤差がなければこれらは次のエピ極線方程式を満たすことが示される[17, 22]。

$$(\mathbf{x}, \mathbf{F}\mathbf{x}') = 0 \quad (2)$$

ただし  $(\mathbf{a}, \mathbf{b})$  はベクトル  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  の内積である。 $\mathbf{F}$  はランク2の特異行列であり、基礎行列と呼ばれる[17, 22]。カメラが校正されている場合はより強い条件(分解可能条件)が課される[4, 7]。

## 3. 基礎行列の計算

3次元復元を行うには、まず2画像間の複数の対応点の組を検出し、それらにエピ極線方程式(2)を最適

に当てはめて基礎行列  $\mathbf{F}$  を計算する。式 (2) からわかるように  $\mathbf{F}$  には定数倍の不定性があるので  $\|\mathbf{F}\| = 1$  と正規化する。

我々は既に画像の誤差の統計的モデルに基いて基礎行列を最適に計算するアルゴリズムを発表している [12]。これはくりこみ法と呼ぶ手法で基礎行列  $\mathbf{F}$  を計算すると同時にその共分散テンソルを計算し、拘束条件  $\det \mathbf{F} = 0$  が満たされるようにその共分散テンソルに関する最適補正を施すものである。さらに解の精度の理論限界を導き、解がその限界を満たすことを実験的に確認している。したがって理論的にはもはや改良の余地はなく、解は真に最適である。また、その計算の C++ プログラムが公開されている<sup>1</sup>。

#### 4. 特徴点の最適補正

特徴点の位置  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{x}'$  の精度の定性的性質を表す (定数倍を除いて定まる) 正規化共分散行列を  $V_0[\mathbf{x}]$ ,  $V_0[\mathbf{x}']$  とする。特徴点をテンプレートマッチング等の画像処理によって抽出する場合は、これらは画像の濃淡値の残差から計算することができる [2, 13, 18, 19]。特徴点の精度について特別の性質がない場合、あるいは人手で選ぶ場合はデフォルト値

$$V_0[\mathbf{x}] = V_0[\mathbf{x}'] = \text{diag}(1, 1, 0) \quad (3)$$

を用る。ただし  $\text{diag}(\dots)$  は対角要素が  $\dots$  の対角行列を表す。

基礎行列  $\mathbf{F}$  が最適に計算されても、画像上で対応する  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{x}'$  は誤差のために必ずしも厳密にはエピ極線方程式 (2) を満たさない。そこで  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{x}'$  がエピ極線方程式 (2) を厳密に満たすように最適に補正する。これは次のように行う [6, 7]。

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}} &= \mathbf{x} - \frac{E(\mathbf{x}, \mathbf{x}')}{V(\mathbf{x}, \mathbf{x}')} V_0[\mathbf{x}] \mathbf{F} \mathbf{x}' \\ \hat{\mathbf{x}}' &= \mathbf{x}' - \frac{E(\mathbf{x}, \mathbf{x}')}{V(\mathbf{x}, \mathbf{x}')} V_0[\mathbf{x}'] \mathbf{F}^\top \mathbf{x} \end{aligned} \quad (4)$$

ただし次のように定義した。

$$E(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = (\mathbf{x}, \mathbf{F} \mathbf{x}')$$

$$V(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = (\mathbf{x}', \mathbf{F}^\top V_0[\mathbf{x}] \mathbf{F} \mathbf{x}') + (\mathbf{x}, \mathbf{F} V_0[\mathbf{x}'] \mathbf{F}^\top \mathbf{x}) \quad (5)$$

式 (4) をエピ極線方程式  $E(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{x}}') = 0$  が十分満たされるまで  $\mathbf{x} \leftarrow \hat{\mathbf{x}}$ ,  $\mathbf{x}' \leftarrow \hat{\mathbf{x}}'$  として反復する。これはニュートン法と同じ意味を持つ2次収束の反復であり、実際問題としては1回の反復でも十分である。

<sup>1</sup><http://www.ail.cs.gunma-u.ac.jp/~kanatani/j>

補正後の  $\hat{\mathbf{x}}$ ,  $\hat{\mathbf{x}}'$  はエピ極線方程式を満たすので、その (正規化) 共分散行列も自由度が拘束され、ランクが低下する。そこで次の (正規化) 事後共分散行列に置きかえる [6, 7]。

$$\begin{aligned} V_0[\hat{\mathbf{x}}] &= V_0[\mathbf{x}] - \frac{(V_0[\mathbf{x}] \mathbf{F} \mathbf{x}') (V_0[\mathbf{x}] \mathbf{F} \mathbf{x}')^\top}{V(\mathbf{x}, \mathbf{x}')} \\ V_0[\hat{\mathbf{x}}'] &= V_0[\mathbf{x}'] - \frac{(V_0[\mathbf{x}'] \mathbf{F}^\top \mathbf{x}) (V_0[\mathbf{x}'] \mathbf{F}^\top \mathbf{x})^\top}{V(\mathbf{x}, \mathbf{x}')} \end{aligned} \quad (6)$$

特徴点の位置  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{x}'$  の誤差は独立とみなしているが、それらをエピ極線方程式が満たされるように補正すると、補正後の  $\hat{\mathbf{x}}$ ,  $\hat{\mathbf{x}}'$  はもはや独立ではない。それらの (正規化) 相関行列は次のようになる [6, 7]。

$$V_0[\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{x}}'] = - \frac{(V_0[\mathbf{x}] \mathbf{F} \mathbf{x}') (V_0[\mathbf{x}'] \mathbf{F}^\top \mathbf{x})^\top}{V(\mathbf{x}, \mathbf{x}')} \quad (7)$$

#### 5. 基礎行列の分解

基礎行列  $\mathbf{F}$  には定数倍の不定性があるから並進  $\mathbf{t}$  の絶対値が不定である。さらに拘束  $\det \mathbf{F} = 0$  を満たさなければならないから  $\mathbf{F}$  には7個の自由度しかない。並進  $\mathbf{t}$  の絶対値が不定であるから運動パラメータ  $\{\mathbf{t}, \mathbf{R}\}$  に5自由度がある。したがって、カメラの運動が任意であれば最大2個のカメラのパラメータしか計算できない。

その2パラメータとして現実的な選択は2画像の撮影時の焦点距離  $f$ ,  $f'$  である。なぜならその他のパラメータ (画像中心、アスペクト比、歪み角、等 [17, 22]) はカメラに固有であり、あらかじめ校正しておくことができるのに対して、焦点距離 (ズーム) は撮影のたびに変わることが多いからである<sup>2</sup>。

画像中心 (カメラの光軸に相当する点) を原点とし、アスペクト比 (画素の縦横比) が1、歪み角 (画素の縦横の並びの角度) が  $90^\circ$  となるように補正されているとき、基礎行列  $\mathbf{F}$  から焦点距離  $f$ ,  $f'$  を計算する方法は既にいろいろ提案されている。Hartley [3] は基礎行列  $\mathbf{F}$  に特異値分解を施し、4次元連立1次方程式を解くことによって焦点距離  $f$ ,  $f'$  を求める手順を示した。Newsamら [15] はこれらを洗練し、 $\mathbf{F}$  の特異値分解と3次元連立1次方程式に帰着させるとともに、解が求まらない退化の条件を明らかにした。一方、Bougnoux [1] は「Kruppaの方程式」 [17, 22] を利用して  $f$  を基礎行列  $\mathbf{F}$  と「エピ極点」による式として表した。植芝・富田 [21] も  $f, f'$  を基礎行列  $\mathbf{F}$

<sup>2</sup>市販のカメラではズーム機構の精度不足のため、ズームを変えると画像中心もやや変化するといわれている。しかし、実際の応用ではこれを無視しても問題ないことが多い。

とエビ極点によって計算する方法を導き、退化の条件を解析している。金谷・松永 [8] はカメラが校正されている場合の「基本行列」の満たすべき「分解可能条件」[4, 7] を用いて  $f, f'$  を  $\mathbf{F}$  のみの式として表し、退化の条件を解析している。本論文では金谷・松永 [8] の式を用いる。

## 6. 焦点距離の変換

基礎行列を分解して焦点距離  $f, f'$  が得られれば、 $\hat{x}, \hat{x}'$  は次のように変換される。

$$\hat{x} \leftarrow \text{diag}\left(\frac{f_0}{f}, \frac{f_0}{f}, 1\right)\hat{x}, \quad \hat{x}' \leftarrow \text{diag}\left(\frac{f_0}{f'}, \frac{f_0}{f'}, 1\right)\hat{x}' \quad (8)$$

これは式 (1) の焦点距離の近似値  $f_0$  を真の値  $f, f'$  に取り換えるものである。この結果、 $\hat{x}, \hat{x}'$  はそれぞれ運動前後のカメラのレンズ中心から見たその点の視線方向と解釈される。

$\hat{x}, \hat{x}'$  を変換すると、それらの (正規化事後) 共分散行列と (正規化) 相関行列も次のように変換される。

$$V_0[\hat{x}] \leftarrow \frac{f_0^2}{f^2} V_0[\hat{x}], \quad V_0[\hat{x}'] \leftarrow \frac{f_0^2}{f'^2} V_0[\hat{x}']$$

$$V_0[\hat{x}, \hat{x}'] \leftarrow \frac{f_0^2}{ff'} V_0[\hat{x}, \hat{x}'] \quad (9)$$

## 7. 運動パラメータの計算

焦点距離  $f, f'$  が定めれば基本行列が次のように定まる [8, 17, 22]。

$$\mathbf{E} = \text{diag}\left(1, 1, \frac{f_0}{f}\right) \mathbf{F} \text{diag}\left(1, 1, \frac{f_0}{f'}\right) \quad (10)$$

これから運動パラメータ  $\{t, \mathbf{R}\}$  が次のように定まる [4, 7]。

- $\mathbf{E}\mathbf{E}^\top$  の最小固有値に対する単位固有ベクトルを  $t$  とする。
- 次のように  $-t \times \mathbf{E}$  の特異値分解を行う。

$$-t \times \mathbf{E} = \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{U}^\top \quad (11)$$

- 回転行列  $\mathbf{R}$  を次のように定める。

$$\mathbf{R} = \mathbf{V} \text{diag}(1, 1, \det \mathbf{V}\mathbf{U}^\top) \mathbf{U}^\top \quad (12)$$

上記ステップ 2 の  $t \times \mathbf{E}$  は  $t$  と  $\mathbf{E}$  の各列とのベクトル積を列とする行列である。式 (11) において  $\mathbf{V}, \mathbf{U}$  は直交行列であり、 $\mathbf{\Lambda}$  は非負の対角要素 (特異値) を大きさの順に並べた対角行列である。

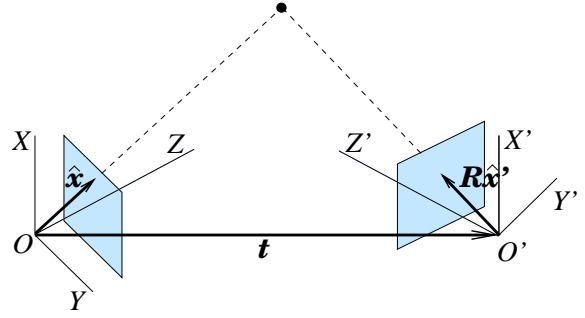


図 1: カメラ位置と奥行きの関係。

上記ステップ 1 で求める単位固有ベクトル  $t$  は符号の不定性がある。これは補正した全特徴点  $\hat{x}_\alpha, \hat{x}'_\alpha, \alpha = 1, \dots, N$  を用いて次の不等式を満たすように定める [4, 7]。

$$\sum_{\alpha=1}^N |t, \hat{x}_\alpha, \mathbf{E}\hat{x}'_\alpha| > 0 \quad (13)$$

ただし  $|a, b, c|$  はベクトル  $a, b, c$  のスカラー三重積である。

## 8. 奥行きの計算

第1, 第2画像のカメラ座標系の原点 (レンズの中心) から光軸に平行に測った奥行き距離をそれぞれ  $Z, Z'$  とする。第2画像のカメラ座標系は第1画像のカメラ座標系に相対的に  $\mathbf{R}$  だけ回転しているから、ベクトル  $\hat{x}'$  は第1画像のカメラ座標系から見ると  $\mathbf{R}\hat{x}$  である。したがって次の関係が成り立つ (図 1)。

$$Z\hat{x} = t + Z'\mathbf{R}\hat{x}' \quad (14)$$

両辺と  $\mathbf{R}\hat{x}'$  とのベクトル積をとると  $Z'$  が消去され、両辺と  $\hat{x}$  とのベクトル積をとると  $Z$  が消去される。整理すると次の式を得る。

$$Z = (t \times \mathbf{R}\hat{x}', n), \quad Z' = (t \times \hat{x}, n) \quad (15)$$

ただし次のように置いた。

$$n = \frac{\hat{x} \times \mathbf{R}\hat{x}'}{\|\hat{x} \times \mathbf{R}\hat{x}'\|^2} \quad (16)$$

ここで符号の選択を行う。式 (13) は  $Z, Z'$  が同符号となる条件であり、 $Z > 0, Z' > 0$  あるいは  $Z < 0, Z' < 0$  となる。これは基礎行列  $\mathbf{F}$  が定数倍を除いて定まるので符号が不定であり、したがって基本行列  $\mathbf{E}$  の符号も不定となるためである。数学的にはシーンがカメラの前方にあっても後方にあっても同じ透視変換の式となることに対応している。そこで  $\hat{x}_\alpha, \hat{x}'_\alpha, \alpha =$

1, ..., N に対して奥行き距離  $Z_\alpha, Z'_\alpha$  を計算し、

$$\sum_{\alpha=1}^N (\text{sgn}[Z_\alpha] + \text{sgn}[Z'_\alpha]) < 0 \quad (17)$$

であれば  $Z_\alpha, Z'_\alpha$  および  $t$  の符号を換える。ただし  $\text{sgn}[\cdot]$  は符号関数であり、 $x > 0, x = 0, x < 0$  に応じて  $\text{sgn}[x]$  は 1, 0, -1 をとる。符号関数を用いるのは、単に  $\sum_{\alpha=1}^N (Z_\alpha + Z'_\alpha)$  を計算すると無限遠方にある点の奥行きが誤差のために  $-\infty$  に近い値になることがあり、正しい符号が選ばれない可能性があるためである [4, 7]。

### 9. 3次元復元の信頼性評価 1

奥行き  $Z$  の推定値  $\hat{Z}$  が定まれば、その3次元位置  $\hat{\mathbf{r}}$  が第1カメラ座標系に関して次のように定まる。

$$\hat{\mathbf{r}} = \hat{Z}\hat{\mathbf{x}} \quad (18)$$

この誤差は第1近似において

$$\Delta\hat{\mathbf{r}} = \hat{Z}\Delta\mathbf{x} + \Delta\hat{Z}\hat{\mathbf{x}} \quad (19)$$

である。その正規化共分散行列は次のように書ける。

$$V_0[\hat{\mathbf{r}}] = \hat{Z}^2 V_0[\hat{\mathbf{x}}] + 2\hat{Z}S[V_0[\hat{Z}, \hat{\mathbf{x}}]\hat{\mathbf{x}}^\top] + V_0[\hat{Z}]\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}^\top \quad (20)$$

$S[\cdot]$  は対称化作用素である ( $S[\mathbf{A}] = (\mathbf{A} + \mathbf{A}^\top)/2$ )。  $\hat{\mathbf{x}}$  の (正規化事後) 共分散行列  $V_0[\hat{\mathbf{x}}]$  は式 (9) の第1式で与えられる。  $\hat{Z}$  の正規化分散  $V_0[\hat{Z}]$  と  $\hat{Z}, \hat{\mathbf{x}}$  の正規化相関ベクトル  $V_0[\hat{Z}, \hat{\mathbf{x}}]$  は式 (15) より次のようになる。

$$V_0[\hat{Z}] = \frac{1}{\|\hat{\mathbf{x}} \times \mathbf{R}\hat{\mathbf{x}}'\|^2} \left( \hat{Z}^2 (\mathbf{m}, V_0[\hat{\mathbf{x}}]\mathbf{m}) - 2\hat{Z}\hat{Z}' (\mathbf{m}, V_0[\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{x}}']\mathbf{R}^\top \mathbf{m}) + \hat{Z}'^2 (\mathbf{m}, \mathbf{R}V_0[\hat{\mathbf{x}}']\mathbf{R}^\top \mathbf{m}) \right) \quad (21)$$

$$V_0[\hat{Z}, \hat{\mathbf{x}}] = -\frac{(\hat{Z}V_0[\hat{\mathbf{x}}] - \hat{Z}'V_0[\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{x}}']\mathbf{R}^\top)\mathbf{m}}{(\mathbf{m}, \hat{\mathbf{x}})} \quad (22)$$

ただし次のように置いた。

$$\mathbf{m} = N[\mathbf{t} \times \hat{\mathbf{x}}] \times \mathbf{R}\hat{\mathbf{x}}' \quad (23)$$

$N[\cdot]$  は単位ベクトルへの正規化作用素である ( $N[\mathbf{a}] = \mathbf{a}/\|\mathbf{a}\|$ )。

### 10. 3次元復元の信頼性評価 2

前節までの解析では基礎行列  $\mathbf{F}$  を正しいと仮定した。すなわち、 $\mathbf{F}$  に基づいて式 (4) の最適補正を行

い、 $\mathbf{F}$  の分解によって得られた  $f, f'$  によって式 (8) の変換を行い、 $\mathbf{F}$  から計算した運動パラメータ  $\{t, \mathbf{R}\}$  を用いて式 (15) により奥行きを計算した。そして画像上の特徴点の位置  $\mathbf{x}, \mathbf{x}'$  に含まれる誤差の復元位置  $\hat{\mathbf{r}}$  に及ぼす影響を評価したのが式 (20) の正規化共分散行列  $V_0[\hat{\mathbf{r}}]$  である。

“正規化” というのは誤差の絶対量  $\epsilon$  (これをノイズレベルと呼ぶ) を 1 とするという意味であり、 $\epsilon$  の推定値  $\hat{\epsilon}$  は基礎行列  $\mathbf{F}$  をくりこみ法で計算する過程から自動的に計算される [12]。したがって絶対的な共分散行列  $V[\hat{\mathbf{r}}]$  は  $\hat{\epsilon}^2 V_0[\hat{\mathbf{r}}]$  となる。

しかし、基礎行列  $\mathbf{F}$  も誤差のあるデータから計算した以上、これにも誤差が含まれている。実際、その精度を評価する共分散テンソルを計算することができる [12]。しかし、それから  $f, f', \{t, \mathbf{R}\}$  の誤差とそれらの間の相関に厳密な解析的評価を与えることは極めて困難である。そこで次のような近似的評価を行う。

くりこみ法による基礎行列の計算からは最適な値  $\hat{\mathbf{F}}$  だけでなく、その標準偏位  $\mathbf{F}^{(+)}$  および  $\mathbf{F}^{(-)}$  が計算できる。これらはパラメータ空間で  $\hat{\mathbf{F}}$  の誤差が最も生じやすい両方向に標準偏差だけずれた値を示すものであり、精度の理論限界に対応するものである。したがって、例えば  $\mathbf{F}^{(+)}$  と  $\mathbf{F}^{(-)}$  が有効数字 3 桁で一致していれば、解  $\hat{\mathbf{F}}$  にほぼ有効数字 3 桁の精度があることが保証され、これ以上の精度が不可能であるという意味で解の信頼性が定量的に評価される [7, 12]。

これを利用して、 $\mathbf{F}^{(\pm)}$  から対応する  $f^{(\pm)}, f'^{(\pm)}, \{t^{(\pm)}, \mathbf{R}^{(\pm)}\}$  を計算し、これから同様に計算した3次元復元位置を  $\mathbf{r}^{(\pm)}$  とする。そして、基礎行列の誤差の影響を2点  $\mathbf{r}^{(+)}, \mathbf{r}^{(-)}$  を結ぶ線分で近似する。これは  $(\mathbf{r}^{(+)} - \hat{\mathbf{r}})(\mathbf{r}^{(+)} - \hat{\mathbf{r}})^\top$  を共分散行列とみなすことに相当する。したがって実際には  $\mathbf{r}^{(+)}$  のみ計算すればよい。

式 (20) は画像上の各特徴点の位置  $\mathbf{x}, \mathbf{x}'$  の誤差がその点の復元位置  $\hat{\mathbf{r}}$  に及ぼす影響を記述するものであり、その関係は直接的である。しかし基礎行列  $\mathbf{F}$  はすべての特徴点にエッジ極線方程式を最適に当てはめて計算しているので、個々の特徴点の誤差との相関は小さいと期待される。そこで最終的な3次元復元の共分散行列は二つの要因の和で近似して次のように評価する。

$$V[\hat{\mathbf{r}}] = \hat{\epsilon}^2 V_0[\hat{\mathbf{r}}] + (\mathbf{r}^{(+)} - \hat{\mathbf{r}})(\mathbf{r}^{(+)} - \hat{\mathbf{r}})^\top \quad (24)$$

誤差の分布を正規分布で近似すると、復元した点  $\hat{\mathbf{r}}$  を中心とし各方向に標準偏差以下の点は次の楕円体の内

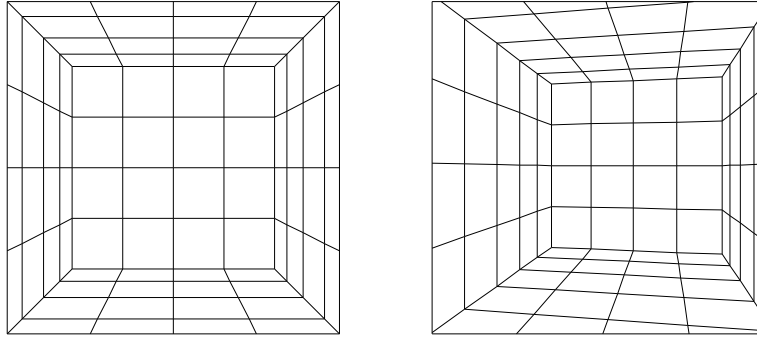


図 2: 3次元環境のシミュレーション画像

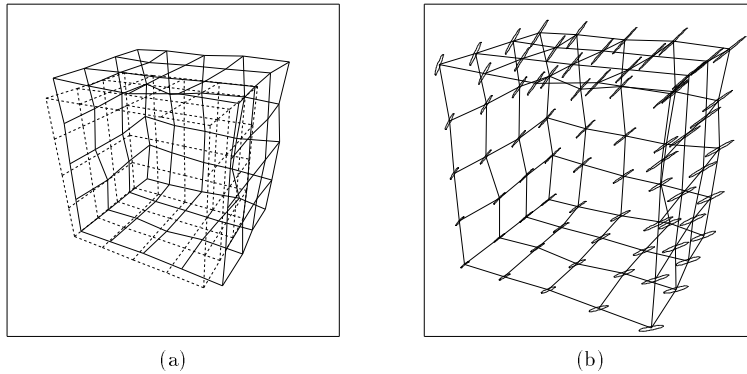


図 3: (a) 復元した形状 (実線) と真の形状 (破線)。 (b) 格子点の標準領域。

部 (標準領域) となる [7]。

$$(\mathbf{r} - \hat{\mathbf{r}}, V[\hat{\mathbf{r}}]^{-1}(\mathbf{r} - \hat{\mathbf{r}})) = 1 \quad (25)$$

## 11. シミュレーション実験

図 2 は移動するカメラで焦点距離を変えながら撮影した格子パタンからなる環境モデルのシミュレーション画像である (512×512 画素)。この二つの画像中の格子点の  $x, y$  座標に独立に期待値 0、標準偏差 3 (画素) の正規乱数を独立に加えて、これを対応点として式 (3) のデフォルト誤差モデルを用いて 3次元復元を行った。

図 3(a) は復元した形状 (実線) に真の形状 (点線) を  $\|\mathbf{t}\| = 1$  となるようにスケールを合わせて重ね、斜め上からながめたものである。図 3(b) は復元した格子点を中心とし、式 (25) で定義される標準領域を 3 倍に拡大して表示したものである。これらは楕円体であるが、非常に細長く、線分に近い形をしている。これは誤差がカメラ位置から見える変化方向に比べて奥行き方向に大きいことを意味している。また、カメラから遠い点ほど誤差が大きくなっている。図 3(a) と比較すると、真の位置とのずれを近似的に表していることがわかる。

## 12. 実画像実験

図 4 は室内シーンの実画像である。これから図中にマークした特徴点を選び、式 (3) のデフォルト誤差モデルを用いて 3次元復元を行った。図 5 は復元した特徴点を横からながめたものである。復元した各点を中心にして式 (25) で定義される標準領域を表示し、シーン中の一部はワイヤフレーム表示をしている。

これを見る限りでは物体の形状が奥行き方向に非常に不確定であるように見える。しかし、これはカメラの並進の計算の不確定さが原因であり、形状自体にそれほど不確定さがあるわけではない。これを見るために多面体物体を取り出し、物体の重心を原点に移動し、各頂点までの距離の平方平均二乗が 1 となるようにスケールして同様に表示したものが図 6(a) である。図 6(b) は 3 頂点を選び、一つを原点とり、もう一つが  $(1, 0, 0)$  に、残りが  $XY$  面上に来るようにスケールと回転を施したものである。

このように復元形状は同一でも、どのような正規化を用いるかによってその信頼性評価は変化する。これを体系的に記述するゲージ理論 [9, 10, 14] によると、不確定性の記述は一般に正規化に依存し、絶対的な意味は持たず、絶対的な意味を持つのはゲージ変換に不変なゲージ不変量のみである。代表的なゲージ不変量

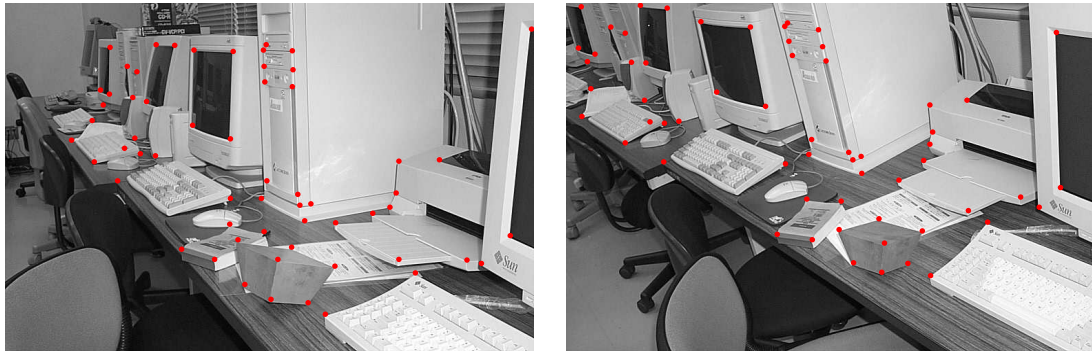


図 4: 室内シーンの実画像

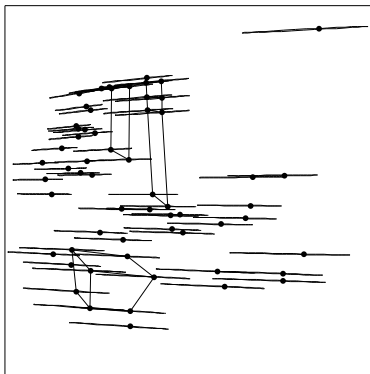


図 5: 復元した形状とその標準領域。

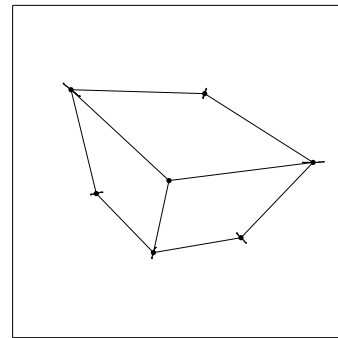
は2辺の長さの比およびなす角である。表1は図6の物体のある2辺の長さの比となす角の標準偏差を式(24)の共分散行列から計算したものと実測値とを示したものである。このような記述のみが正規化に不変であり、絶対的な意味を持っている。

### 13. 実画像実験 2

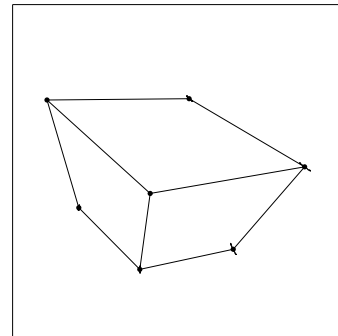
図7は屋外で撮影した乗用車の画像である。これから図中にマークした特徴点を選び、デフォルト誤差モデルを用いて3次元復元を行った。図8(a), (b)は復元した特徴点から乗用車のワイヤフレームモデルを作り、テクスチャマッピングを施したものを異なる方向からながめたものである。形状がほぼ正しく表現されていることがわかる。

### 14. まとめ

本論文では静止したシーン中で未知の運動をする未校正カメラによって観測した2画像の対応点から3次元復元を行った。これは画像の誤差の統計的モデルを導入し、もはや改善の余地がないという意味の最適な復元である。まずすべての対応点の組に「エピ極線方程式」を当てはめて「基礎行列」を最適に計算し、次



(a)



(b)

図 6: (a) 重心と平均寸法の正規化による標準領域。(b) 3点の正規化による標準偏位。

にそれを分解して焦点距離とカメラの運動パラメータを計算した。そして、エピ極線方程式を厳密に満たすように特徴点を最適に補正し、それから3次元位置を復元するとともに、その共分散行列を評価した。最後にシミュレーションおよび実画像による実験を行い、その有効性を検討するとともに、不定性を除去する正規化(「ゲージ」)が不確定性の記述に与える影響を考察した。

表 1: 辺の長さの比となす角度の信頼性。

	計算値	実測値	理論的標準偏差
比	1.014	1.000	0.003
角度(deg)	96.5	90.0	2.4



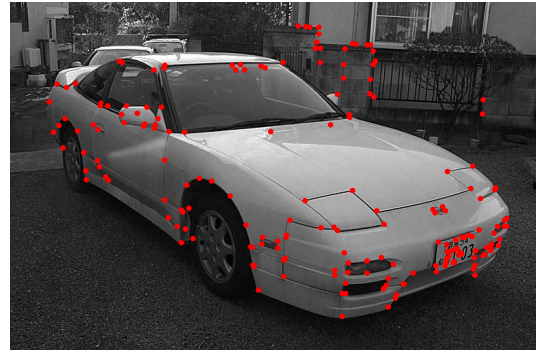
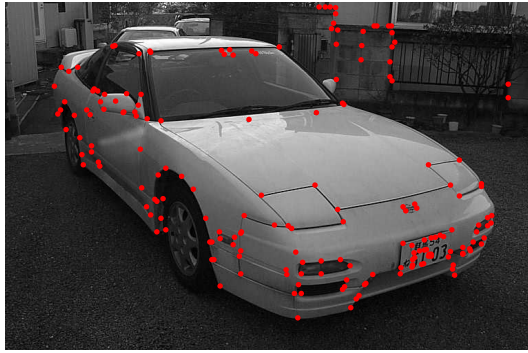


図 7: 屋外の乗用車の実画像



(a)



(b)

図 8: 復元した乗用車の3次元形状。

## 参考文献

- [1] S. Bougnoux, From projective to Euclidean space under any practical situation, a criticism of self calibration, *Proc. 6th Int. Conf. Comput. Vision.*, January 1998, Bombay, India, pp. 790–796.
- [2] W. Förstner, Reliability analysis of parameter estimation in linear models with applications to mensuration problems in computer vision, *Comput. Vision Graphics Image Process.*, **40** (1987), 273–310.
- [3] R. I. Hartley, Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras, *Proc. 2nd Euro. Conf. Comput. Vision*, May 1992, Santa Margherita Ligure, Italy, pp. 579–587.
- [4] K. Kanatani, *Geometric Computation for Machine Vision*, Oxford University Press, Oxford, 1993.
- [5] K. Kanatani, Renormalization for motion analysis: Statistically optimal algorithm, *IEICE Trans. Inf. & Sys.*, **E77-D-11** (1994), 1233–1239.
- [6] 金谷健一, 幾何学的補正問題の最適計算と精度の理論限界, 情報処理学会論文誌, **37-3** (1996), 363–370.
- [7] K. Kanatani, *Statistical Optimization for Geometric Computation: Theory and Practice*, Elsevier, Amsterdam, 1996.
- [8] 金谷健一, 松永力, 基礎行列の分解: 焦点距離の直接的表現, 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, 2000-CVIM-120-7 (2000-1), 49–56.
- [9] 金谷健一, D. D. Morris, 動画像からの3次元復元におけるゲージとゲージ変換, 電子情報通信学会パターン認識とメディア理解研究会, PRMU99-93 (1999-10), 39–46.
- [10] K. Kanatani and D. D. Morris, Gauges and gauge transformations in 3D reconstruction from a sequence of images, *Proc. 4th Asian Conf. Computer Vision*, January 2000, Taipei, Taiwan, pp. 1046–1051.
- [11] H. C. Longuet-Higgins, A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections, *Nature*, **293-10** (1981), 133–135.
- [12] 三島等, 金谷健一, 基礎行列の最適計算とその信頼性評価, 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, 99-CVIM-118-10 (1999-9), 67–74.
- [13] D. D. Morris and T. Kanade, A unified factorization algorithm for points, line segments and planes with uncertainty models, *Proc. Int. Conf. Comput. Vision*, January 1998, Bombay, India, pp. 696–702.
- [14] D. D. Morris, K. Kanatani and T. Kanade, Uncertainty modeling for optimal structure from motion, *IEEE Workshop on Vision Algorithms: Theory and Practice*, September 1999, Corfu, Greece, pp. 33–40.
- [15] G. N. Newsam, D. Q. Huynh, M. J. Brooks and H.-P. Pan, Recovering unknown focal lengths in self-calibration: An essentially linear algorithm and degenerate configurations, *Int. Arch. Photogram. Remote Sensing*, **31-B3-III**, July 1996, Vienna, Austria, pp. 575–580.
- [16] M. Pollefeys, R. Koch and L. Van Gool, Self-calibration and metric reconstruction in spite of varying and unknown internal camera parameters, *Int. J. Comput. Vision*, **32-1** (1999), 7–26.
- [17] 佐藤淳, 「コンピュータビジョン — 視覚の幾何学 —」, コロナ社, 1999.
- [18] J. Shi and C. Tomasi, Good features to track, *Proc. IEEE Conf. Comput. Vision Patt. Recogn.*, June 1994, Seattle, WA, pp. 593–600.
- [19] A. Singh, An estimation-theoretic framework for image-flow computation, *Proc. 3rd Int. Conf. Comput. Vision*, December, 1990, Osaka, Japan, pp. 168–177.
- [20] R. Y. Tsai and T. S. Huang, Uniqueness and estimation of three-dimensional motion parameters of rigid objects with curved surfaces, *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, **6-1** (1984), 13–27.
- [21] 植芝俊夫, 富田文明, 焦点距離が未知のステレオカメラによる三次元復元, 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, 99-CVIM-119-1 (1999-11), pp. 1–8.
- [22] 徐剛, 辻三郎, 「3次元ビジョン」, 共立出版, 1998.