

対面配置の3カメラを用いた3次元形状復元

—F行列の誤差と内部パラメータの誤差—

北海道大学大学院 工学研究科 ○宮本甲次、田中文基、岸浪建史
システムテクノロジーインスティテュート 門脇聡一

要旨

3次元形状復元の1手法として、エピポラ方程式を記述しているF行列を導出し、そのF行列からカメラ内部パラメータを求め、復元する手法がある。前報[1]でF行列の高精度導出法として3台のカメラを対面に配置する方法を提案した。本研究ではF行列の誤差評価とF行列の誤差が内部パラメータ推定に与える影響を検証する。

1. はじめに

3次元形状復元の1手法として、エピポラ方程式を記述しているF行列を導出し、そのF行列からカメラ内部パラメータを求め、復元する手法がある。前報[1]では3台のカメラを対面に配置させたF行列の高精度導出法(6点法)を提案した。しかし、F行列の誤差が内部パラメータに与える影響を明確にする必要がある。そこで本研究では6点法によるF行列の導出過程とそのF行列の誤差が内部パラメータ推定に与える影響をコンピュータシミュレーションにより明らかにする。

2. 3次元形状復元の手順

本研究では3台のカメラの内部パラメータはすべて同じであるものとする。本研究における形状復元の手順を図1に示す。ここで $\tilde{m}^{(i)}$ はカメラ*i*(*i*=1,2)の画像上の点 $m^{(i)}$ の同次座標表現である。

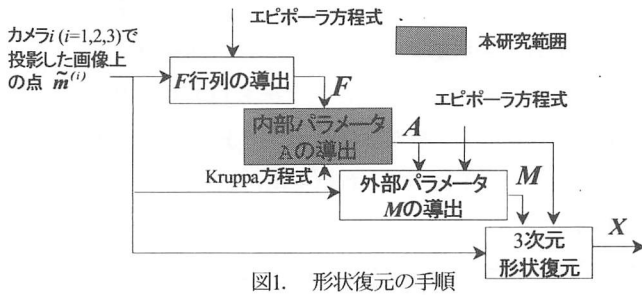


図1. 形状復元の手順

図1に示すように、カメラ内部パラメータを正確に求めるためには、F行列を精度良く求める事が重要であることがわかる。よって本研究では内部パラメータを高精度に求めるためのF行列の許容誤差を検討する。

3. 6点法によるF行列の導出法

本研究では3台のカメラを図2のように配置させる。この時、カメラ1の光学中心 C_1 を世界座標系の原点に置く。

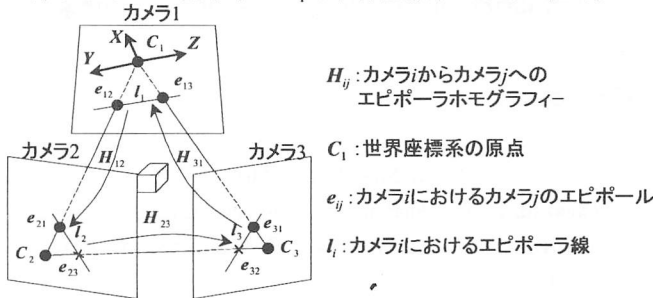


図2. 本研究のカメラ配置

F行列とは2つのカメラにおける画像上の対応点 $m=(u,v)^T$ と $m'=(u',v')^T$ の間の関係を示した7自由度の 3×3 行列で、その関係式は対応点の同次座標表現 \tilde{m}, \tilde{m}' を用いて式(1)で表される。

$$\tilde{m}^T F \tilde{m}' = 0 \quad (1)$$

また、F行列は2つのエピポール e_{12}, e_{21} とエピポラホモグラフィ H を用いて式(2)のように記述できる [2]。

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} LH & -LHe_{12} \\ -e_{21}^T LH & e_{21}^T LHe_{12} \end{bmatrix}, \text{ただし } L = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)を用いるとF行列は3点法で導出できる[2]。

本研究では図2のようにカメラ配置を設定してあるので、カメラ2⇔カメラ3とカメラ3⇔カメラ1のF行列は3点法より導出できることになる。カメラ2⇔カメラ3のF行列は前報[1]で提案した6点法から導出できる。6点法の手順を図3に示す。

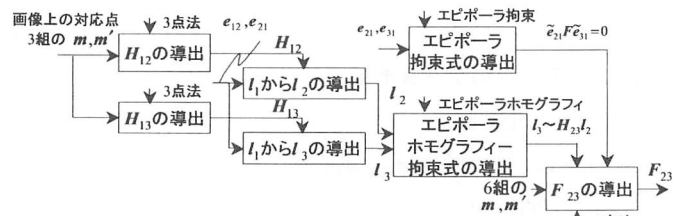


図3. 6点法の手順

4. F行列を用いた内部パラメータの導出

4.1 内部パラメータ

内部パラメータとは物理座標 $x=(x,y)^T$ から画像座標 $m=(u,v)^T$ への変換を表す自由度5の行列Aのことでそれぞれの同次座標表現 \tilde{x}, \tilde{m} を用いて式(3)で表される。

$$\tilde{m} = A\tilde{x} \quad \text{ただし } A = \begin{bmatrix} a_u & s & u_0 \\ 0 & a_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

内部パラメータの導出は図4の手順で行う。

以下にそれぞれの手順の詳細を述べる。

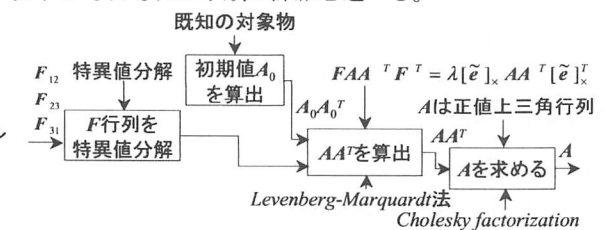


図4. 内部パラメータの導出

4.2 特異値分解

一般的に F 行列はランクが2であるが、3,6点法で求めた F 行列はランク2という条件を満たしているとは限らないため、 F 行列を式(4)のように特異値分解する。

$$F = UDV^T \quad (4)$$

U, V : 3×3 直交行列, D : 3×3 対角行列

ここで、 D の対角成分のうち大きさが最小のものを0にすることで、 F 行列に最も近いランク2の行列を求めることができる。

4.3 Kruppa 方程式の解法

内部パラメータ A を求めるために先に求めた F 行列を用いて式(5)のような Kruppa 方程式を解く。

$$\begin{cases} F_{12}AA^TF_{12}^T = \lambda[\tilde{e}]_x, AA^T[\tilde{e}]_x^T \\ F_{23}AA^TF_{23}^T = \lambda[\tilde{e}]_x, AA^T[\tilde{e}]_x^T \\ F_{31}AA^TF_{31}^T = \lambda[\tilde{e}]_x, AA^T[\tilde{e}]_x^T \end{cases} \quad (5)$$

式(5)は内部パラメータ A の成分に関する2次方程式である。式(5)を解くためには適切な初期値を与える必要がある。本研究では、あらかじめオフラインで内部パラメータを測定することにより式(5)の初期値を与えることにする。その初期値を用いて Kruppa 方程式(5)を Levenberg-Marquardt 法で解いて AA^T を算出する。最後に AA^T に対して Cholesky-Factorization を用いて A を求める。

5. コンピュータシミュレーションによる精度評価

5.1 パラメータ設定

シミュレーションする際の各パラメータは以下のように設定した。ただし R_i と t_i はそれぞれカメラ $i(i=1,2,3)$ における回転行列と並進ベクトルである。

$$\text{内部パラメータ } A = \begin{bmatrix} 1 & 0.4 & 2 \\ 0 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{カメラ 1 } R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, t_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{カメラ 2 } R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.382683 & -0.92388 \\ 0 & -0.92388 & -0.382683 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, t_2 = \begin{bmatrix} 15 \\ 30 \\ 100 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{カメラ 3 } R_3 = \begin{bmatrix} 0 & -0.92388 & 0.382683 \\ 0 & -0.382683 & -0.92388 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, t_3 = \begin{bmatrix} 50 \\ 30 \\ 80 \end{bmatrix} \quad (9)$$

5.2 F 行列の精度評価

6点法で求めた F 行列 F_{23} の推定精度を評価するために計算機で実装した。真の F 行列 F_0 と計算で求めた F 行列 F を比較するために式(10)の Δ_F を評価した。ただし $\|X\|$ は行列 X のノルムを表す。

$$\Delta_F = \frac{\|F_0 - F\|}{\|F\|} \quad (10)$$

画像ノイズとして画像点に正規乱数(平均0,分散 σ)を加え、 σ を変化させて評価を行った。その結果を図5に示す。図5より画像ノイズの分散が10pixelの場合、 F 行列は0.01の誤差を持つことがわかる。

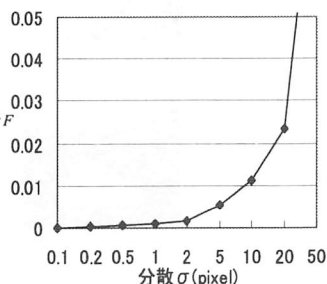


図5. F 行列の精度評価

5.3 内部パラメータの精度評価

内部パラメータを高精度に求めるためには、 F 行列を高精度に求める必要がある。そこでどの程度 F 行列が正確なら内部パラメータが高精度に求まるかを検証する。本研究では、①真の F 行列に直接誤差を与える、②Kruppa 方程式(5)の初期値を変化させる、という2つの手法から内部パラメータの精度評価を行う。

5.3.1 F 行列に直接誤差を与えた場合

真の F 行列 F に対して F 行列の要素 (i,j) に式(11) Δ_A のような誤差 x_{ij} (正規乱数: 平均1, 分散 v_j) を加えた F 行列 \hat{F}_{ij} を入力として Kruppa 方程式(5)を解いて内部パラメータを求める。

$$\frac{|F_{ij} - \hat{F}_{ij}|}{|F_{ij}|} = x_{ij} \quad (11)$$

真の内部パラメータ A_0 と誤差の入った F 行列で求めた内部パラメータ A を比較するために式(12)を評価した。その結果を図6に示す。図5,6より画像ノイズの分散が10pixelの時、内部パラメータは0.2の誤差を持つことがわかる。

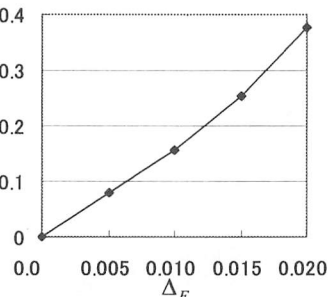


図6. F 行列に誤差を入れた場合の A の精度評価

$$\Delta_A = \frac{\|A_0 - A\|}{\|A_0\|} \quad (12)$$

5.3.2 初期値を変化させた場合

5.3.1 の初期値は真の値であるが、ここでは真の値に近い初期値を与えて Kruppa 方程式(5)を解いて内部パラメータを求める。5個の真の初期値 $k_i(i=1, \dots, 5)$ それぞれに実数 s_i (正規乱数: 平均1, 分散 v_a) を与え、式(13)から求めた初期値 \hat{k}_i を用いて Kruppa 方程式(5)を解く。

$$\hat{k}_i = k_i + s_i \quad (i=1, \dots, 5) \quad (13)$$

そして真の内部パラメータ A_0 と誤差の入った初期値を用いて求めた内部パラメータ A を比較するために式(12)を評価した。その結果を図7に示す。図7より F 行列に誤差が入った場合においても、真の値から分散1.5程度ずれた初期値からでも内部パラメータが求められることがわかる。

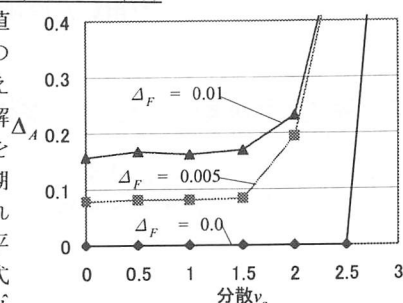


図7. 初期値を変化させた場合の A の精度評価

6. おわりに

本研究では3台のカメラを用いた6点法による F 行列の導出過程とその F 行列の誤差が内部パラメータ推定に与える影響をコンピュータシミュレーションにより明らかにした。

<参考文献>

- [1]宮本甲次,田中文基,岸浪建史,門脇聡一 3枚の画像を用いたエピポール推定に基づく復元精度の検討 精密工学会春季大会 2001
- [2]伊藤満,佐藤淳 カメラの相互射影によるエピポーラ幾何計算の安定化 電子情報通信学会情報・システムソサイエティ大会 2000