

未校正 2 画像からの 3 次元復元のための焦点距離計算の安定化

高橋 茂雄* 中辻 敦忠† 金谷 健一*

* 岡山大学工学部情報工学科 † NEC エンジニアリング第二システムソリューション事業部

未校正 2 画像から 3 次元復元するには次の二つの問題を解決する必要がある。(i) 計算した焦点距離が虚数になることがある, (ii) 注視画像に対して復元できない。本論文では特徴点の再サンプリングと焦点距離固定によってこれを解決する。まず理論をまとめ, 次にシミュレーション実験によって, 注視画像でなければ, 実際には固定焦点距離で撮影しても, その情報を用いないほうが精度が高いという意外な事実を示す。そこで, 注視画像かどうかを判定して計算法を変える方式を提案し, シミュレーションおよび実画像実験によってその有効性を確認する。

Stabilizing the Focal Length Computation for 3-D Reconstruction from Two Uncalibrated Views

Shigeo Takahashi* Atsutada Nakatsuji† Kenichi Kanatani*

*Department of Information Technology, Okayama University, Okayama 700-8530 Japan

†System Solutions Division II, NEC Engineering, Ltd., Fuchu-shi, Tokyo 183-8502 Japan

In order to reconstruct 3-D shape from two uncalibrated views, one needs to resolve two problems: (i) the computed focal lengths can be imaginary; (ii) the computation fails for fixated images. We present a remedy for these by subsampling feature points and fixing the focal length. We first summarize theoretical backgrounds and then do simulations, which reveal a rather surprising fact that when the focal length is actually fixed, not using that knowledge leads to better results for non-fixated images. We propose a hybrid method switching the computation by judging whether or not the images are fixated. Doing simulations and real image experiments, we demonstrate the effectiveness of our method.

1. まえがき

画像からシーンや物体の 3 次元形状を復元するには少数の画像を使う方法とビデオ画像を使う方法があるが [4], その中で未校正の 2 画像を用いる方法 [9] はビデオカメラが不要であり, 最も簡便である。3 枚以上の画像を使えば精度は高まるが, 全フレームの特徴点の対応づけやフレームごとのカメラの位置やパラメータの計算に多量の処理が必要である [13]。しかし 2 画像であれば基本的な処理は 2 画像間の特徴点の対応づけと基礎行列の計算のみでよい。最近, 2 画像間の特徴点を対応づける有効な手法 [10] や高精度な基礎行列の計算法 [3, 7, 11, 12] が開発され, 2 画像からの 3 次元復元はますます実用的な方法となっている。

しかしこの方法の欠点は, すべてを 2 画像の対応のみから計算するために対応の精度に非常に敏感なことである。そのため, 基礎行列から 2 画像の撮影時のカメラの焦点距離を計算すると, 誤対応が混入したり, 対応する特徴点が厳密にシーンの同一点で

ないなどの原因で, 解がしばしば虚数になる。

さらに, 2 画像をシーン中のある点を注視するように撮影した「注視画像」からは 3 次元復元ができない [2, 8]。このため, 光軸がねじれの位置にあるようにカメラに「ひねり」を加えて撮影しなければならない。人間にとっては注視画像を撮影するのが最も自然であるから, これは実用上の障害である。

本論文ではこれらの問題点を詳細に解析するとともに, その対処法を示す。まず虚数焦点距離を避けるために特徴点の再サンプリングを行う。そして注視画像にも対処できるように焦点距離を固定する。2 画像の撮影時にズームやフォーカスを変えなければ注視画像でも焦点距離が求まることが知られている [2, 8, 14]。3 次元復元のための撮影ではズームやフォーカスを変えないのが普通であるから, これは特に実際上の制約とはならない。

ところが, 本論文ではシミュレーション実験によって, 注視画像ではない場合に実際には固定焦点距離で撮影しても, その情報を用いないほうが精度が高いという意外な事実を示す。そこで注視画像に近いかどうかを判定して計算法を変える方式を提案し, シミュレーションおよび実画像実験によってその有効

*700-8530 岡山市津島中 3-1-1, Tel. (086)254-8173

{shigeo, kanatani}@suri.it.okayama-u.ac.jp

†183-8502 東京都府中市住吉町 5-22-5, Tel. (042)360-4048
a-nakatsuji@pb.jp.nec.com

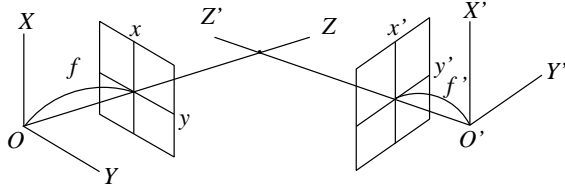


図 1: 2 画像を撮影するカメラの光軸が交わる場合に注視画像となる。

性を確認する。

2. 画像の幾何学的拘束条件

まず本論文で用いる仮定と用語と記号をまとめる。2 画像のみから 3 次元復元するには光軸点 (画像面上のレンズの光軸との交点) が既知であり, 歪み角 0, アスペクト比 1 の画像である必要がある [2, 8]。そうでない場合はあらかじめ補正を行なってあるとする。最近のカメラではフレームの中心を光軸点とし, 歪み角 0, アスペクト比 1 と仮定してもほとんど問題ないと思われる。以下, 光軸点を原点とする xy 画像座標系を仮定する。

画像が正しければ, 第 1 画像の点 (x, y) が第 2 画像の点 (x', y') に対応するとき, 次のエビ極線方程式が成り立つ [4]。

$$(x, \mathbf{F}x') = 0 \quad (1)$$

ただし, ベクトル a, b の内積を (a, b) と書き, 次のように置いた。

$$x = \begin{pmatrix} x/f_0 \\ y/f_0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad x' = \begin{pmatrix} x'/f_0 \\ y'/f_0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式 (1) 中の F はランク 2 の行列であり, 基礎行列と呼ばれている [4]。式 (2) 中の f_0 は数値計算を安定にするための任意のスケール因子であり, 例えば画像の大きさ (単位は画素) にとる¹。

2 画像間の特徴点の対応 $\{x_\alpha\}, \{x'_\alpha\}, \alpha = 1, \dots, N$ が与えられれば, 誤差の統計モデルに基づいて $(x_\alpha, \mathbf{F}x'_\alpha) \approx 0, \alpha = 1, \dots, N$ となる最適な基礎行列 F を計算する方法が知られている [3, 5, 7, 9, 11]。

2 画像を撮影したカメラの光軸が交わるとき注視画像が得られる (図 1)。光軸点を画像の原点としているから, 注視画像であれば双方の画像原点は対応する。画像原点を式 (2) のようにベクトル表示した

¹実験では $f = 600$ としたが, 数値計算の問題を考えなければ $f_0 = 1$ としても構わない。

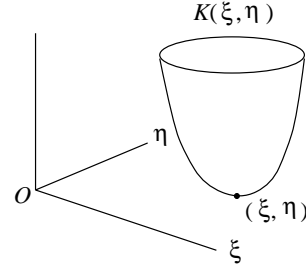


図 2: 焦点距離は $\xi\eta$ 平面上で曲面 $K(\xi, \eta)$ の最小値 0 を与える接点の位置から定まる。

ものは $k = (0, 0, 1)^\top$ であり (\top は転置を表す), k が k に対応するから, エビ極線方程式 (1) は

$$(k, \mathbf{F}k) = 0 \quad (3)$$

となる。これは $F_{33} = 0$ とも書ける。

3. 自由焦点距離の方法

計算した基礎行列 F からそれぞれの画像を撮影したカメラの焦点距離 f, f' を計算する方法をまとめる [8]。まず次のように f, f' から ξ, η に変数変換する。

$$\xi = \left(\frac{f_0}{f}\right)^2 - 1, \quad \eta = \left(\frac{f_0}{f'}\right)^2 - 1 \quad (4)$$

そして次の 4 次多項式 $K(\xi, \eta)$ (ξ, η のそれぞれについて 2 次) を定義する。

$$\begin{aligned} K(\xi, \eta) = & (\mathbf{k}, \mathbf{F}\mathbf{k})^4 \xi^2 \eta^2 + 2(\mathbf{k}, \mathbf{F}\mathbf{k})^2 \|\mathbf{F}^\top \mathbf{k}\|^2 \xi^2 \eta \\ & + 2(\mathbf{k}, \mathbf{F}\mathbf{k})^2 \|\mathbf{F}\mathbf{k}\|^2 \xi \eta^2 + \|\mathbf{F}^\top \mathbf{k}\|^4 \xi^2 \\ & + \|\mathbf{F}\mathbf{k}\|^4 \eta^2 + 4(\mathbf{k}, \mathbf{F}\mathbf{k})(\mathbf{k}, \mathbf{F}\mathbf{F}^\top \mathbf{F}\mathbf{k}) \xi \eta \\ & + 2\|\mathbf{F}\mathbf{F}^\top \mathbf{k}\|^2 \xi + 2\|\mathbf{F}^\top \mathbf{F}\mathbf{k}\|^2 \eta + \|\mathbf{F}\mathbf{F}^\top\|^2 \\ & - \frac{1}{2} \left((\mathbf{k}, \mathbf{F}\mathbf{k})^2 \xi \eta + \|\mathbf{F}^\top \mathbf{k}\|^2 \xi \right. \\ & \left. + \|\mathbf{F}\mathbf{k}\|^2 \eta + \|\mathbf{F}\|^2 \right)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

未知数 ξ, η は次の条件から定まる。

$$K = \frac{\partial K}{\partial \xi} = \frac{\partial K}{\partial \eta} = 0 \quad (6)$$

上式は 2 個の未知数 ξ, η に対する 3 個の等式であり, 条件が過剰であるように見えるが, 詳しく調べると, その 3 式は互いに代数的に従属であり, 2 個のみが独立である。幾何学的には式 (6) は関数 $K(\xi, \eta)$ が図 2 のように $\xi\eta$ 平面上に接する曲面を表し, $K(\xi, \eta)$ の最小値 0 を与える接点が解であることを意味する。

$K(\xi, \eta)$ は 4 次多項式であるから, 解はニュートン法によって数値的に簡単に求まるが, 解析的な公式

もいろいろ知られている [8] . そのうち最も便利なのは , Bougnoux [1] が導いた式を金谷・松永 [8] が変形した次式である (導出は [8]) .

$$\xi = \frac{\|Fk\|^2 - (k, FF^T Fk)\|e' \times k\|^2 / (k, Fk)}{\|e' \times k\|^2 \|F^T k\|^2 - (k, Fk)^2}$$

$$\eta = \frac{\|F^T k\|^2 - (k, FF^T Fk)\|e \times k\|^2 / (k, Fk)}{\|e \times k\|^2 \|Fk\|^2 - (k, Fk)^2} \quad (7)$$

ここに e, e' はそれぞれ $FF^T, F^T F$ の固有値 0 の単位固有ベクトルであり², それぞれの画像のエピ極点を表す (e は第 1 カメラから見た第 2 カメラのレンズ中心を指すベクトル, e' は第 2 カメラから見た第 1 カメラのレンズ中心を指すベクトルである) .

式 (7) からわかるように, 注視画像では $(k, Fk) = 0$ であるから, 注視画像では計算が破綻する . 注視画像でなければ式 (4) より焦点距離 f, f' が次のように求まる .

$$f = \frac{f_0}{\sqrt{1+\xi}}, \quad f' = \frac{f_0}{\sqrt{1+\eta}} \quad (8)$$

しかし, 基礎行列 F の精度が不足すると分母の平方根の中身 (どちらかあるいは両方) が負になることがあり, 焦点距離が虚数となる .

4. 固定焦点距離の方法

次に「2 画像の撮影時の焦点距離 f, f' が実際には等しい」という情報を用いる計算法を示す . 式 (5) において $\xi = \eta$ とすると, 解は次の条件から定まる .

$$K(\xi) = K'(\xi) = 0 \quad (9)$$

ただし $K(\xi)$ は次の 4 次多項式である .

$$K(x) = a_1 x^4 + a_2 x^3 + a_3 x^2 + a_4 x + a_5 \quad (10)$$

$$a_1 = \frac{1}{2} (k, Fk)^4$$

$$a_2 = (k, Fk)^2 (\|F^T k\|^2 + \|Fk\|^2)$$

$$a_3 = \frac{1}{2} (\|F^T k\|^2 - \|Fk\|^2)^2 + (k, Fk) (4(k, FF^T Fk) - (k, Fk) \|F\|^2)$$

$$a_4 = 2(\|FF^T k\|^2 + \|F^T Fk\|^2) - (\|F^T k\|^2 + \|Fk\|^2) \|F\|^2$$

$$a_5 = \|FF^T\|^2 - \frac{1}{2} \|F\|^4 \quad (11)$$

解 ξ は次のように解析的に求まる [8] .

² データに誤差があっても基礎行列 F は $\det F = 0$ を満たすように求めるから [12], $FF^T, F^T F$ に固有値 0 をもつ .

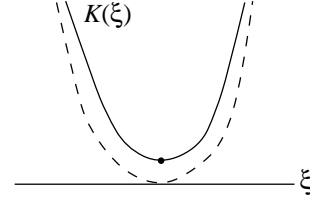


図 3: 焦点距離は曲線 $K(\xi)$ の最小値 0 を与える接点の位置から定まるが, 一般に最小値は正である .

• $a_1 \neq 0$ のとき

– $3a_2^2 - 8a_1 a_3 \neq 0$ なら 2 次方程式

$$(3a_2^2 - 8a_1 a_3)x^2 + 2(a_2 a_3 - 6a_1 a_4)x + (a_2 a_4 - 16a_1 a_5) = 0 \quad (12)$$

の解の $|K(x)|$ の小さいほうを ξ とする .

– $3a_2^2 - 8a_1 a_3 = 0$ なら

$$\xi = -\frac{a_2 a_4 - 16a_1 a_5}{2(a_2 a_3 - 6a_1 a_4)} \quad (13)$$

• $a_1 = 0$ かつ $a_2 \neq 0$ のとき

$$\xi = -\frac{a_3 a_4 - 9a_2 a_5}{2(a_3^2 - 3a_2 a_4)} \quad (14)$$

• $a_1 = a_2 = 0$ かつ $a_3 \neq 0$ のとき

$$\xi = -\frac{a_4}{2a_3} \quad (15)$$

• $a_1 = a_2 = a_3 = 0$ のとき解は存在しない .

しかし, これは計算した基礎行列 F が正しいと仮定した場合である . 式 (9) は一つの未知数 ξ に対して二つの等式を与えるので, 基礎行列 F に誤差があれば一般には両者が両立しない³ .

幾何学的には式 (9) は解が $K(\xi)$ の曲線の最小値 0 を与える ξ 軸との接点であることを意味する . しかし実際には曲線 $K(\xi)$ は図 3 のようになり, 最小値は一般に正である . これは曲線 $K(\xi)$ が図 2 の曲面 $K(\xi, \eta)$ の $\xi\eta$ 平面上の直線 $\xi = \eta$ と垂直に交わる平面による切り口だからである . 最小値が 0 となるのは曲面 $K(\xi, \eta)$ の最小値が厳密に直線 $\xi = \eta$ 上にある場合のみである .

誤差がある場合も構わず上記の解析解を計算することが考えられるが, $a_1 \sim a_3$ が零か非零かで計算が異なり, その判定のしきい値の設定が困難である .

³ 理想的には, 両者が両立するという条件のもとに基礎行列 F を対応点データから最適に計算し直せばよいが, これは困難な計算であり, よい方法が知られていない . そこで本論文では F は与えられたものとして計算を進める .

これを避けるために本論文では曲線 $K(\xi)$ が最小値をとる点、すなわち $K'(\xi) = 0$ の解を求める。これも解析的に求まるが、 $a_1 \sim a_3$ が零か非零かで計算が異なり、その判定が困難である。そこで ξ を次のニュートン法で数値的に求める。

$$\xi \leftarrow \xi - \frac{K'(\xi)}{K''(\xi)} \quad (16)$$

初期値は式 (15) を用いる。こうすれば各係数が零か非零かを考慮する必要がなく、実際問題では 2, 3 回の反復で収束する。 ξ が求まれば焦点距離は式 (8) より次のように定まる。

$$f = f' = \frac{f_0}{\sqrt{1+\xi}} \quad (17)$$

もちろんこの場合にも虚数焦点距離の問題は生じ得る。

5. 自由焦点距離と固定焦点距離の比較

虚数焦点距離は自由焦点距離の方法でも固定焦点距離の方法でも生じるが、実際には $f = f'$ のとき、どちらがよいのか、これをシミュレーションによって調べる。

図 4 は曲面格子のシミュレーション画像である。600 × 800 画素を想定し、焦点距離は $\bar{f} = \bar{f}' = 1000$ (画素) である。そして、両画像の中心は対応する位置から上下に間隔 d 画素だけずれている (図 4 は $d = 20$ (画素) の場合)。これを $d = 0$ (注視画像) から $d = 40$ まで増加させて実験を行なった。

図中の 117 個の格子点の x, y 座標にそれぞれ独立に期待値 0、標準偏差 σ (画素) の正規分布に従う乱数ノイズを加えた。ただし、より実際の状況を反映するように、特徴点の 10% をランダムに選んで、ノイズを 5 倍にした。そして、これから基礎行列を計算した。計算には統計的に最適な計算法の一つである三島・金谷 [12] の「くりこみ法」を用いた⁴。

図 5 は横軸に σ を取り、縦軸に毎回異なるノイズで 2000 回計算したときの虚数焦点距離が生じる割合 (%) をプロットしたものである。実線が自由焦点距離の方法、破線が固定焦点距離の方法である。

自由焦点距離の方法では、 $d = 0$ (注視画像) で虚数焦点距離の割合が σ によらずほぼ 60% である (縦軸の範囲をはみ出しているため図中に表示されていない)。しかし、注視画像から離れるにつれて虚数焦

⁴以下に C++ プログラムが公開されている。
<http://www.img.tutkie.tut.ac.jp/>

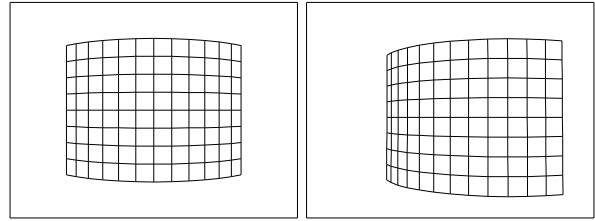


図 4: 曲面格子のシミュレーション画像 (600 × 800 画素, 焦点距離 $\bar{f} = \bar{f}' = 1000$)。画像の中心は対応する位置から上下に間隔 $d = 20$ (画素) だけずれている ($d = 0$ のときが注視画像)。

点距離の割合が次第に減少する。それに対して、固定焦点距離の方法では虚数焦点距離の割合が d の増加に対してあまり変化せず、その結果 $d = 20$ の近辺で自由焦点距離の方法との大小関係が逆転している。

6. 焦点距離の精度の比較

当然ながら、自由焦点距離と固定焦点距離の方法のどちらが焦点距離の計算の精度が高いかが問題となる。しかし、それを比較するには虚数焦点距離を回避しなければならない。

ここでは次のように再サンプリングを行なった。実数の焦点距離が求まらなければ、特徴点の一つをランダムに除去して基礎行列を計算し直し、それでもだめなら別の特徴点を除去してみる。これを一定回数⁵行なってだめなら、ランダムに 2 個の特徴点を除去し、同様に探索する。それでもだめなら 3 個の特徴点を除去し、これを実数の焦点距離が定まるまで繰り返す。

再サンプリングの方法としては、各対応のうち基礎行列 F が定義するエッジ線からのずれが小さいものを優先的に選ぶなど、前段階で計算した基礎行列 F を利用する方法がいろいろ考えられる。しかし、考えられるさまざまな方法を試みたが、上記の単純な再サンプリングより優れた方法は発見できなかった。

そこで前と同じシミュレーション画像を用いて各 σ に対して 1000 回計算し、得られた焦点距離の平均誤差 (画素) を次のように評価した。

$$E = \sqrt{\frac{1}{2000} \sum_{a=1}^{1000} \left((f_a - \bar{f})^2 + (f'_a - \bar{f}')^2 \right)} \quad (18)$$

ただし f_a, f'_a は a 回目に計算した焦点距離 f, f' の値であり、 \bar{f}, \bar{f}' はそれらの真の値 (この場合はともに 1000) である。図 6 は $d = 0 \sim 40$ に対して計算

⁵実験では特徴点数を N とするとき $N/10$ 回を限度とした。

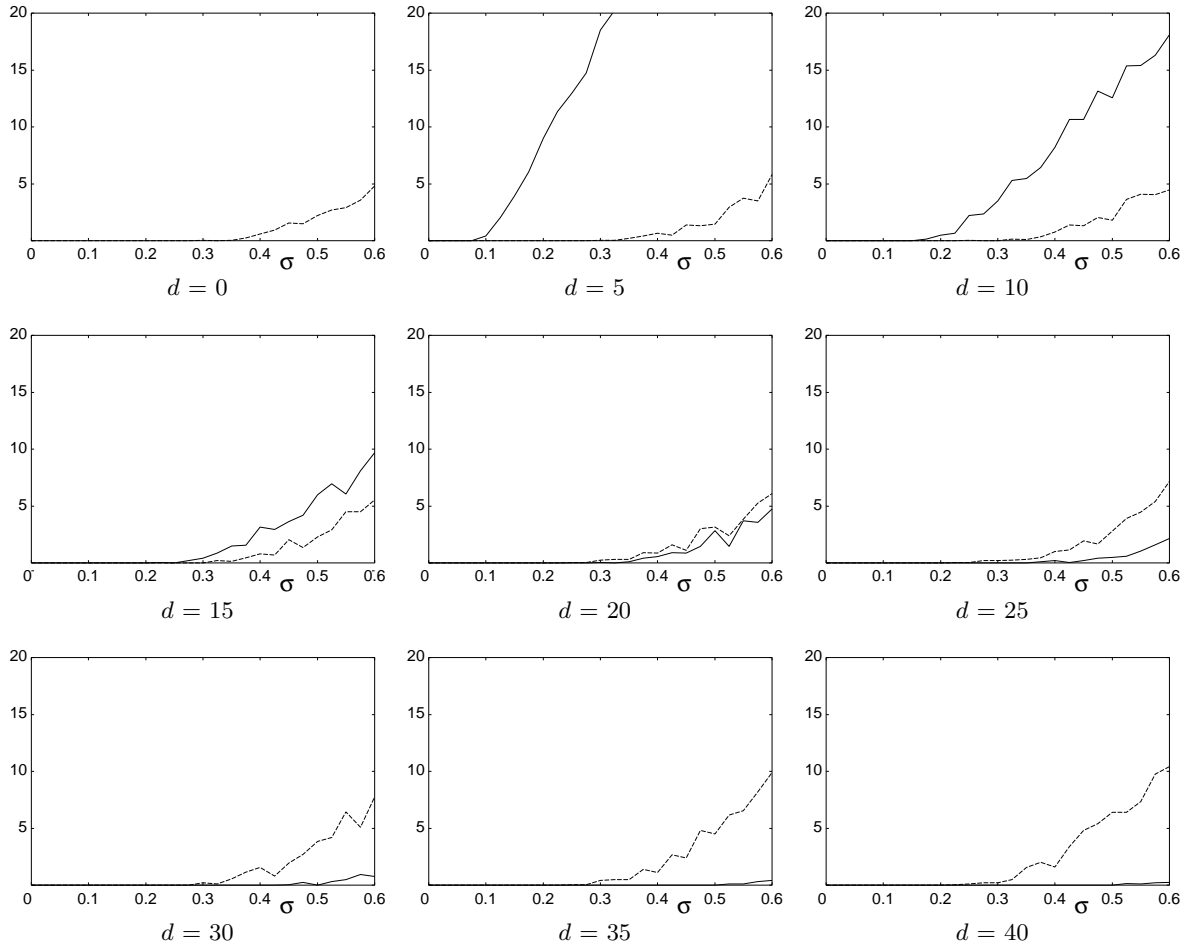


図 5: 横軸はノイズの標準偏差, 縦軸は虚数焦点距離の生じる割合 (%). 実線は自由焦点距離の方法, 破線は固定焦点距離の方法. d (単位画素) は注視画像からのずれ.

した焦点距離の誤差を図 5 と同様に表示したものである.

図 6 から, 注視画像 ($d = 0$) では自由焦点距離の方法は全く意味を成さないが, 固定焦点距離の方法ならかなりの精度で計算できることがわかる. しかし, 注視画像から離れるにつれて自由焦点距離の方法の精度が上がっている. それに対して, 固定焦点距離の方法の精度は d の増加に対してあまり変化しない. その結果, $d = 20$ の近辺で自由焦点距離の方法に比べて精度の優劣が反転している.

この理由は, 図 5 のように自由焦点距離の方法は d が小さいと虚数解の割合が大きく, 再サンプリングの回数が増え, 再サンプリングによって得られる解の精度が低いため, 平均誤差が低下したと解釈できる. しかし, d が増えると再サンプリングの頻度が減り, 精度が固定焦点距離の方法に近づき, ついに上回ったと考えられる.

なお, 焦点距離が固定され, かつ注視画像である場

合に焦点距離を計算する解析的な方法が植芝ら [15] によって提案されている. これは基礎行列 F が注視運動に対応するように, 共通の焦点距離と光軸点を解析的に求めるものである. しかし, この方法は移動前後でカメラが光軸の周りに回転している必要があり, 図 4 のように光軸周りの回転がない場合は解が不定になる. このためこの実験では彼らの方法とは比較ができない.

7. 複合法

前節の結果より, 画像が注視画像に近いときは固定焦点距離の方法を用い, 注視画像でないときは自由焦点距離の方法に切り替えれば常に高い精度が維持できると期待される. 3 節に述べたように, 注視画像である必要十分条件は $F_{33} = 0$ であるから, $|F_{33}|$ があるしきい値より小さいときに注視画像であると判定すればよい. 本論文では次の方法を採用する.

基礎行列 F が与えられたとき, 第 2 画像の原点に

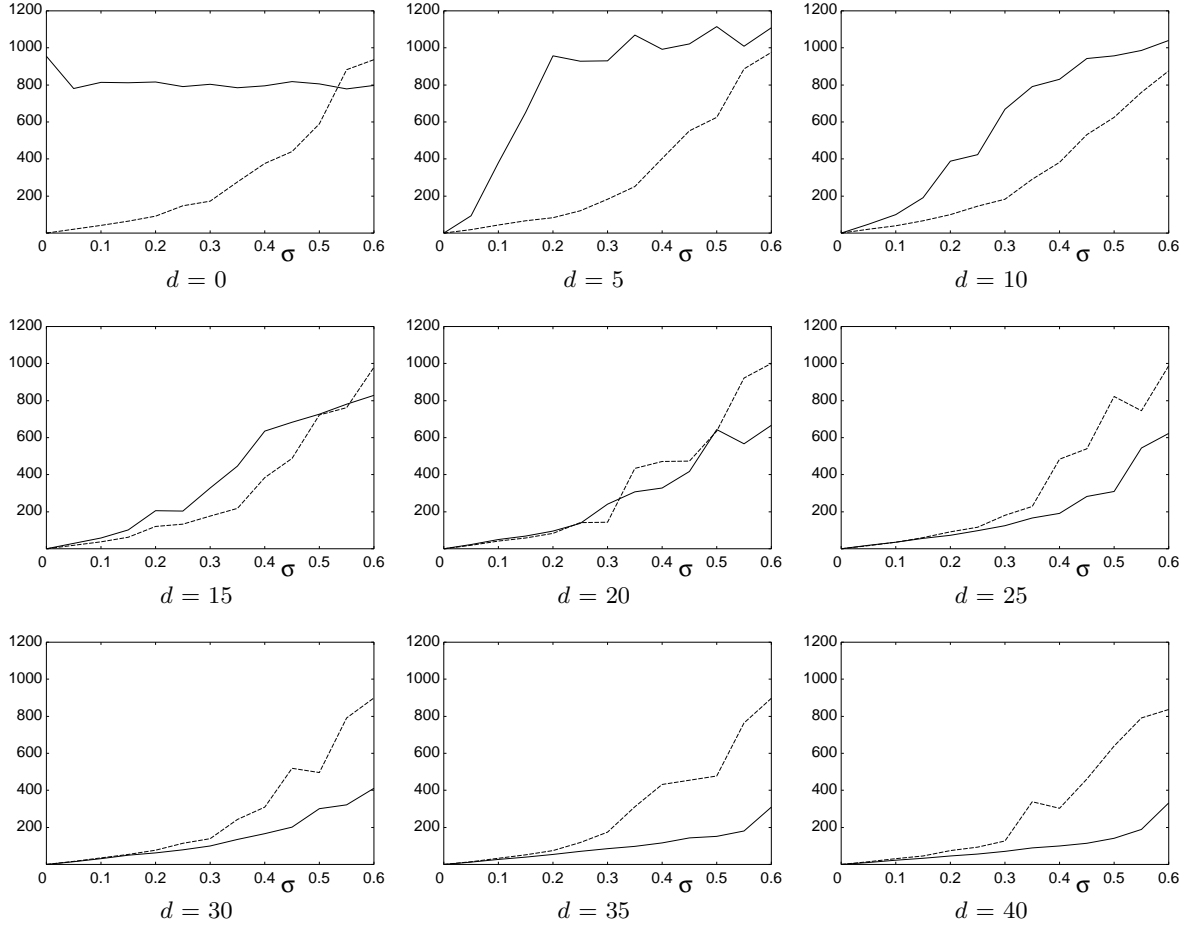


図 6: 横軸はノイズの標準偏差, 縦軸は計算した焦点距離の平均誤差 (画素). 実線は自由焦点距離の方法, 破線は固定焦点距離の方法. d (単位画素) は注視画像からのずれ.

対応する第 1 画像上のエピ極線は $(x, Fk) = 0$, すなわち

$$F_{13}x + F_{23}y + F_{33}f_0 = 0 \quad (19)$$

である. 注視画像であればこれは第 1 画像の原点を通らなければならない. このエピ極線の原点からの距離 h' (単位は画素) は次のように書ける.

$$h = \frac{|F_{33}|f_0}{\sqrt{F_{13}^2 + F_{23}^2}} \quad (20)$$

同様に第 1 画像の原点に対応する第 2 画像上のエピ極線は $(k, Fx) = 0$, すなわち

$$F_{31}x' + F_{32}y' + F_{33}f_0 = 0 \quad (21)$$

であり, その原点からの距離 h は次のように書ける.

$$h' = \frac{|F_{33}|f_0}{\sqrt{F_{31}^2 + F_{32}^2}} \quad (22)$$

そこで, しきい値 h_c (画素) を定め, $h < h_c$ かつ $h' < h_c$ のとき注視運動と判定する.

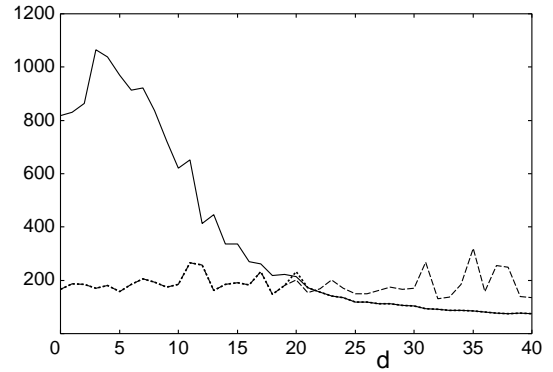


図 7: 横軸は注視画像からの隔たりの距離 d (画素), 縦軸は標準偏差 $\sigma = 0.3$ (画素) のノイズに対する焦点距離の平均誤差 (画素). 実線は自由焦点距離の方法, 破線は固定焦点距離の方法, 点線は複合法.

これ以外の判定法として, 計算した基礎行列の信頼性を評価する共分散テンソルを用いる統計的仮説検定, 幾何学的 AIC や幾何学的 MDL を用いるモデル選択 [6] などいろいろな方法を試みたが, その評価規準を厳密に計算することが困難であり, 近似値や

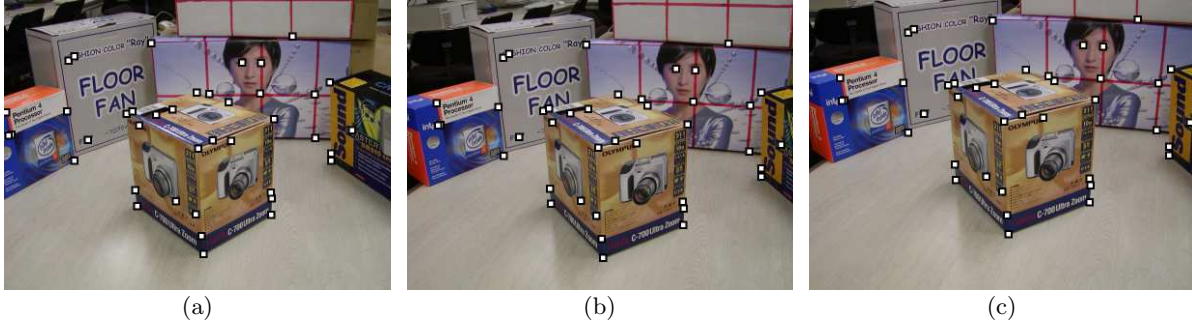


図 8: 入力画像と特徴点 . (a), (b) は注視画像 . (c) は (b) の光軸方向を変えたもの .

推定値を用いると結果がその近似の程度に左右される . その結果 , 何らかのしきい値で調節する必要がある . これらを考慮すると上記の判定法が最も妥当であるという結論に達した .

本論文ではしきい値を $h_c = 20$ とした . これは図 5, 6 で $d = 20$ (画素) の近辺で自由焦点距離の方法と固定焦点距離の方法の優劣が逆転していること , およびカメラを手に持って意識的に注視画像が得られるように撮影しても光軸点の 20 画素の程度のずれは避けられないことを考慮したものである .

図 7 は図 4 に基づくシミュレーション実験の結果である . ノイズの標準偏差は $\sigma = 0.3$ (画素) に固定し , d を 0 (注視画像) から連続的に増やして横軸に取っている . 縦軸は式 (18) の焦点距離の平均誤差 E (画素) であり , 実線は自由焦点距離の方法 , 破線は固定焦点距離の方法 , 点線は前述の判定のよってそれらを切り替える複合法の結果である .

これを見ると , 複合法ではしきい値 h_c として設定した 20 画素付近を境目として固定焦点距離の方法から自由焦点距離の方法に自動的に切り替わっていることがわかる . そして d の値にかかわらず常に精度の高い方法が選ばれている .

8. 実画像実験

図 8 の (a), (b) は注視画像となるようにズームやフォーカスを固定して撮影した画像であり , (c) は (b) の光軸方向を多少変えたものである . これらから画像中に示す 40 個の特徴点を選んだ⁶ . 画像対 (a), (b) および (a), (c) に対して注視画像かどうかを判定すると h, h' が表 1 のようになり , それぞれ注視画像 , 非注視画像と判定された .

⁶対応点を自動的に検出し , 自動的に対応づけるアルゴリズムも適用できるが [10] , 本論文では自動対応づけの精度や誤対応の存在ではなく , 自由焦点距離の方法と固定焦点距離の方法の比較を検討しているので , 課題を絞るために特徴点を手動で選んだ .

表 1: 図 8 の画像対 (a), (b) , および (a), (c) に対する注視判定と焦点距離の計算 (単位は画素) .

	注視判定		自由		固定
	h	h'	f	f'	$f = f'$
(a), (b)	1.01	1.03	436	443	811
(a), (c)	52.01	54.23	929	906	855

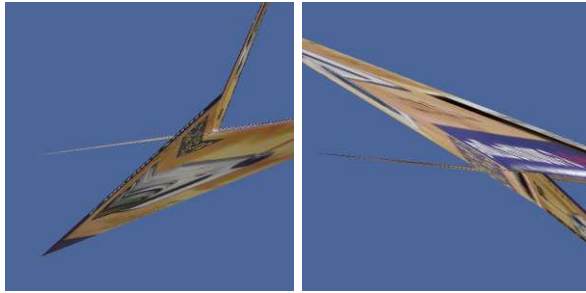
表 1 にはそれぞれの画像対から計算した焦点距離 f, f' も示す (「自由」は自由焦点距離の方法 , 「固定」は固定焦点距離の方法を意味する) . カメラを参照板を使って校正したところ , 焦点距離は $f = f' \approx 1000$ であった . 注視画像 (a), (b) から自由焦点距離の方法で計算した値はそれと大きく離れている . それに対して固定焦点距離の方法では比較的妥当な値が得られている . 一方 , 非注視画像 (a), (c) ではどちらの方法でも妥当な値が得られているが , 自由焦点距離の方法のほうがより正しい値となっている .

これらの確認のために注視画像 (a), (b) から 3 次元復元を行い , 中央に写っている箱の形状を別の方向から眺めたものが図 9 である . 上段は自由焦点距離の方法であり , ほとんど意味のない形状である . 下段は固定焦点距離の方法であり , 左が正面から見たもの (入力画像上の左側の面に相当) , 右が上面から見たものである . 精度は高くないが , 妥当な形状が復元されている .

図 10 は非注視画像 (a), (c) の場合である . 上段が自由焦点距離の方法 , 下段が固定焦点距離の方法であり , 左が正面図 , 右が上面図である . どちらもほぼ妥当な形状であるが , やはり自由焦点距離の方法のほうがより正しい形状となっている .

9. まとめ

本論文では 2 画像から 3 次元復元を行なう場合の
 ● 特徴点位置の精度不足のために焦点距離が虚数



自由焦点距離の方法



固定焦点距離の方法

図 9: 注視画像からの 3 次元復元 .

になることがある ,

- 2 画像を物体を注視するように撮影すると 3 次元復元ができない ,

という問題を解析し,特徴点の再サンプリングによって虚数焦点距離を回避し,焦点距離を固定して注視画像にも対処できるようにした .

まず理論的な基礎をまとめ,次にシミュレーション実験を行い,注視画像でなければ実際には固定焦点距離で撮影しても,その情報を用いないほうが精度が高いという意外な事実を発見した .そこで注視画像に近いかどうかを判定して計算法を変える方式を提案し,シミュレーションおよび実画像実験によってその有効性を確認した .

謝辞: 本研究の一部は文部科学省科学研究費基盤研究 C(2) (No. 15500113), テレコム先端技術センター, 柏森情報科学財団の助成によった . 本研究に関する有益なコメントを頂いた産業技術研究所の植芝俊夫氏に感謝します .

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] M. J. Brooks, L. de Agapito, D. Q. Huynh and L. Baumela, Towards robust metric reconstruction via a dynamic uncalibrated stereo head, *Image Vision Comput.*, **16**-14 (1998), 989-1002.
- [3] W. Chojnacki, M. J. Brooks, A. van den Hengel and D. Gawley, On the fitting of surfaces to data with covariances, *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, **22**-11 (2000), 1294-1303.



自由焦点距離の方法



固定焦点距離の方法

図 10: 非注視画像からの 3 次元復元 .

- [4] Hartley, R. and Zisserman, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K. (2000).
- [5] K. Kanatani, *Statistical Optimization for Geometric Computation: Theory and Practice*, Elsevier, Amsterdam, 1996.
- [6] 金谷健一, 幾何学的当てはめにおけるモデル選択, 電子情報通信学会論文誌 A, **J84-A-11** (2001-11), 1385-1393.
- [7] 金谷健一, くりこみ法その後: 波紋と発展, 情報処理学会研究報告, 2003-CVIM-139-9 (2003-7).
- [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, 情報処理学会研究報告, 2000-CVIM-120-7 (2000-1), 49-56.
- [9] 金谷健一, 三島等, 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, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, **42-SIG 6** (2001-6), 1-8.
- [10] 金澤靖, 金谷健一, 大域的な整合性を保証するロバストな画像の対応づけ情報処理学会研究報告, 2002-CVIM-136-23 (2003-1), 171-178.
- [11] Y. Leedan and P. Meer, Heteroscedastic regression in computer vision: Problems with bilinear constraint, *Int. J. Comput. Vision.*, **37**-2 (2000), 127-150.
- [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, 情報処理学会研究報告, 99-CVIM-118-10 (1999-9), 67-74.
- [13] Pollefeys, M., Koch, R. and Van Gool, L.: Self-calibration and metric reconstruction in spite of varying and unknown internal camera parameters, *Int. J. Comput. Vision.*, **32**-1 (1999), 7-26.
- [14] 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 3 次元復元, 情報処理学会研究報告, 99-CVIM-119-1 (1999-11), 1-8.
- [15] 植芝俊夫, 富田文明: 注視運動下での 2 枚の画像からのセルフキャリブレーション, 画像の認識・理解シンポジウム講演論文集, Vol. 1, July 2000, pp.415-420.