

カメラの相互射影によるエピポーラ幾何計算の安定化

伊藤 満 佐藤 淳

名古屋工業大学 電気情報工学科
〒 466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町
mitsuru@hilbert.elcom.nitech.ac.jp, junsato@elcom.nitech.ac.jp

あらまし：エピポーラ幾何の計算は、カメラの運動を求めるたり、対象物形状を復元したり、任意視点画像を生成する上で非常に重要である。これまでに、線形法や非線形法が提案されているが、一般にエピポーラ幾何を安定に計算することは非常に難しいことが知られている。そこで本研究では、お互いのカメラを投影し合うことにより、エピポーラ幾何を安定に計算する方法を示す。特に、双方のカメラの投影像が得られている場合には対象物上の3点の投影像から、また一方のカメラの像のみ得られている場合には5点の投影像からそれぞれ線形にしかも非常に安定にエピポーラ幾何が計算可能であることを示す。また、本手法を対象物形状の射影復元などに応用し、その有効性を示す。

キーワード：エピポーラ幾何、8点法、射影復元

Robust Computation of Epipolar Geometry from the Projections of Cameras

Mitsuru Ito Jun Sato

Nagoya Institute of Technology
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555, JAPAN
mitsuru@hilbert.elcom.nitech.ac.jp, junsato@elcom.nitech.ac.jp

Abstract: The computation of the epipolar geometry is very important for computing camera motions, for reconstructing the shape of objects and for generating images at arbitrary viewpoints. In the previous research, many linear and nonlinear methods for computing epipolar geometry have been proposed. However, in general, it is very difficult to compute the epipolar geometry robustly. Therefore, in this paper, we propose robust methods for computing the epipolar geometry by projecting two cameras each other. Especially, we show that if two cameras are projected each other, the epipolar geometry can be computed from three image points, and if only one camera is projected to the other, the epipolar geometry can be computed from five image points linearly and reliably. We also show the efficiency of these methods by applying them to the projective reconstruction of objects.

Keywords: epipolar geometry, Eight points algorithm, projective reconstruction.

1 はじめに

近年コンピュータビジョンにおいては、複数の視点から得られたカメラ画像から対象物の3次元形状の復元を行なったり [7, 13]、カメラ画像から得られる情報を元に、移動ロボットを指定した目標地点へ誘導する視覚誘導や視覚サーボ [3, 5, 6] などの研究が盛んに行なわれている。

さらに最近では、内部パラメータや外部パラメータが未知の複数のカメラからどのような情報が得られるかを明らかにする研究も進みつつあり [7, 9]、過去に撮られた複数の写真から建造物等の物体の形状を復元し、仮想空間や現実空間へ融合する複合現実感などの研究も進められている [1, 10]。

このように複数画像を用いて対象物形状を復元したり、視覚誘導を行なうためには、お互いのカメラが空間中でどのような位置にどのような姿勢で存在するかというカメラ運動の情報を得ることが必要不可欠である。このような複数カメラ間の相対的位置や姿勢などのカメラ運動の情報はエピポーラ幾何によって表される。そしてこのエピポーラ幾何は一般に7自由度の Fundamental 行列によって記述されることが知られている。

これまでに F 行列を計算する方法として、7点以上の投影点から非線形に計算する方法や [12, 2, 15]、8点以上の投影点から線形解法により求める、いわゆる 8 点法 [8, 11, 14] などが提案されている。しかし、これらの計算法による F 行列計算は画像ノイズに非常に大きな影響を受けることが知られており、 F 行列を安定に計算することは一般に非常に難しい [15]。 F 行列はエピポールとエピポーラ・ホモグラフィーによって構成されるが、この内の特に、エピポールを安定に計算することが非常に難しいことが分かっている。そこで本研究では 2 つのカメラをお互いに投影し合うことにより、それらのカメラの投影像として画像中から直接エピポールの情報を取得し、この情報を用いることによりエピポーラ幾何を安定にしかも線形計算によって求める方法を提案する。特に、双方のカメラにおいてお互いのカメラの像が得られている場合には対象物上の 3 点の特徴点から F 行列が計算でき、また一方のカメラのみが投影されている時は対象物上の 5 点の特徴点から線形に F 行列が求まることを示す。

以下ではまず、従来の 8 点法の計算法について簡単に振り返る。次に 8 点法で求めた F 行列の不

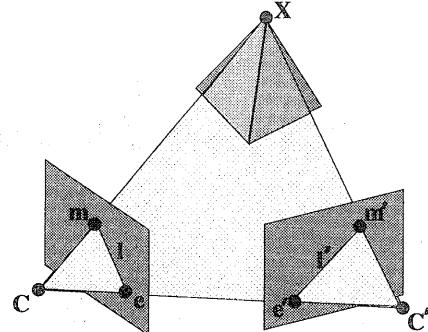


図 1: エピポーラ幾何

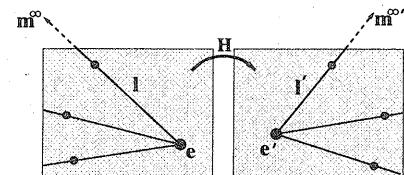


図 2: エピポーラ・ホモグラフィー

安定さについて解析し、その不安定さの主な要因がエピポールの計算にあることを示す。次に、カメラを相互投影して、その投影像としてエピポールを画像中から直接求めることにより、線形解法により安定に F 行列を計算する手法を提案する。さらに、提案法の計算安定度を従来の 8 点法と比較し、対象物形状の射影復元などに応用することにより、本稿で提案した計算法の有効性を示す。

2 エピポーラ幾何

2.1 エピポーラ幾何

よく知られているように、2 つのカメラの相対的位置や姿勢などの関係はエピポーラ幾何によって記述することができる。エピポーラ幾何ではそれぞれのカメラはエピポール e, e' として、互いの画像面に投影される。今、図 1 のように空間中の点 X がそれぞれのカメラに投影されているとし、その投影点を m, m' とする。これらにはエピポーラ方程式と呼ばれる次式で示す関係式が成り立つ。

$$\tilde{m}'^\top F \tilde{m} = 0 \quad (1)$$

ここで (\sim) は齊次座標であることを表し、 F は Fundamental 行列と呼ばれる行列であり、 3×3 の 7 自由度の行列である。

\mathbf{F} 行列はそれぞれ自由度 2 のエピポール \mathbf{e}, \mathbf{e}' と自由度 3 のエピポーラ・ホモグラフィー \mathbf{H} によって次のように記述することができる [4].

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{RH} & -\mathbf{RHe} \\ -\mathbf{e}'^T \mathbf{RH} & \mathbf{e}'^T \mathbf{RHe} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで \mathbf{R} は

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

である. エピポール \mathbf{e}, \mathbf{e}' はカメラの並進運動を表し, エピポーラ・ホモグラフィー \mathbf{H} は図 2 に示すように, 一方の画像中のエピポーラ線をもう一方の画像中のエピポーラ線に変換する 2×2 行列である.

このような \mathbf{F} 行列を計算する方法として 8 点法が広く用いられているが, これは次式を解くことにより求めるものである [15].

$$\mathbf{Mf} = \mathbf{0} \quad (4)$$

ここで \mathbf{F} 行列の i 行 j 列の要素を f_{ij} , 各投影点を $\mathbf{m}_i = [x_i, y_i]^T$, $\mathbf{m}'_i = [x'_i, y'_i]^T$ とすると,

$$\mathbf{f} = [f_{11}, \dots, f_{33}]^T$$

$$\mathbf{M} = [\mathbf{Z}_1^T, \dots, \mathbf{Z}_8^T]^T$$

$$\mathbf{Z}_i = [x_i x'_i, y_i x'_i, x'_i, x_i y'_i, y_i y'_i, y'_i, x_i, y_i, 1]$$

である.

しかし, このような 8 点法は画像ノイズに対して非常に敏感であることが知られている. 例えば図 3(d) は図 3(a) と図 3(b) の 2 枚の画像に対し, 画像ノイズを与えて射影復元を行なった結果であるが, エピポーラ幾何の計算が不安定であるため, もともと与えた形状図 3(c) と比較すると射影復元が不安定に行なわれていないことが分かる.

2.2 \mathbf{F} 行列の不安定さの解析

そこで, 次に \mathbf{F} 行列の計算の不安定さの要因を考える. 図 3(a), (b) の各投影点に標準偏差 1 pixel の画像ノイズを印加し, それらの投影点を用いて \mathbf{F} 行列を計算し, エピポーラ・ホモグラフィーとエピポールの計算を行なった. 同じ実験を 200 回繰り返し, エピポーラ・ホモグラフィーとエピポールの安定度を評価した結果を図 4 及び図 5 に示す.

エピポーラ・ホモグラフィー \mathbf{H} の安定度の評価は, 第 1 画像中のエピポーラ線を, 前述の画像ノイ

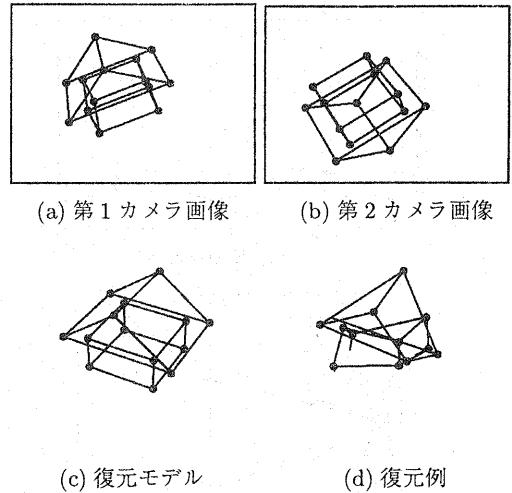
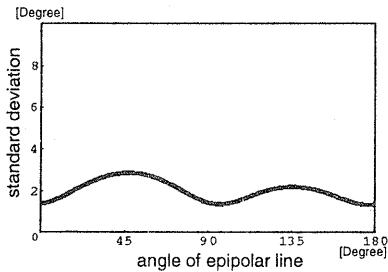


図 3: 従来の 8 点法による射影復元

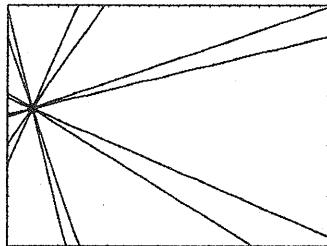
ズを印加して求めたエピポーラ・ホモグラフィー \mathbf{H} により第 2 画像中のエピポーラ線に変換し, その第 2 画像中におけるばらつきを求めるこことにより行なった. その結果を図 4 に示す. 図 4(a)において横軸は第 1 画像中のエピポーラ線がなす角度を表し, 縦軸は \mathbf{H} により変換した第 2 画像中におけるエピポーラ線の標準偏差を表している. 図 4(b) は例として第 1 画像中で $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ の傾きを持つ 4 つのエピポーラ線を \mathbf{H} により変換したときの結果を表している. 図中の点はエピポールであり, エピポール上を通る 4 組の 2 直線は, それぞれ \mathbf{H} により変換されたエピポーラ線に対する 2σ の不確定領域を表している. これらの図より, エピポーラ線のばらつきは小さく, エピポーラ・ホモグラフィーに含まれる誤差は小さいと考えられる.

一方, エピポールを先に述べたような画像ノイズを印加して求めてみると, 図 5 に示すように, 大きく変動することが分かる. 図中の楕円は求めたエピポールの 2σ の不確定領域を表している. この結果から従来法では, 特に, エピポールを安定に求めることが非常に難しいということが分かる.

そこで, 本研究ではカメラを相互に投影することにより画像中からエピポールを直接求めることを考える. この場合には非常に精度良くエピポールを求めることが可能である. 従って, \mathbf{F} 行列の要素の一部をあらかじめ精度良く求めることができるので, より少ない投影点から, かつ安定に \mathbf{F} 行



(a) エピポーラ線のばらつき



(b) エピポーラ線の不確定領域

図 4: エピポーラ・ホモグラフィの安定度

列全体を計算することが可能になると考えられる。

3 カメラの相互射影による F 行列計算

本節では、お互いのカメラが相互に投影し合う場合と、どちらか一方のカメラのみがもう一方のカメラに投影されている場合に F 行列を安定にかつ線形に求める方法を提案する。前者では 2 自由度のエピポールを画像中から直接 2 つ求めることができるので、F 行列の残りの 3 自由度を投影点 3 点から決定することが可能となる。この方法を 3 点法と呼ぶことにする。後者ではエピポールを 1 つ求めることができるので、投影点 5 点から F 行列を決定することが可能となる。この方法を 5 点法と呼ぶことにする。以下に、今回提案する 3 点法と 5 点法について述べる。

3.1 3 点法

まず初めに、図 6 のように双方のカメラが投影されている場合について考える。この場合、カメラがお互いの画像に投影されているので、その投影像として 2 つのエピポール e, e' を画像中から直接求めることができる。従って、F 行列の残りの要素であるエピポーラ・ホモグラフィー H さえ計算することができれば、F 行列を決定することが可能である。

今、図 2 に示すように空間中の 3 点が 2 つのカ

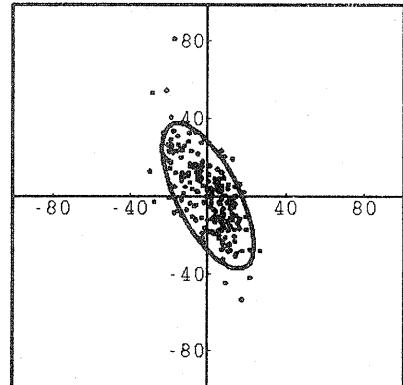


図 5: エピポールの安定度

メラによってそれぞれ投影されているとし、その投影点を通るエピポーラ線 $\tilde{l}_i, \tilde{l}'_i (i = 1, 2, 3)$ 上の無限遠点を $\tilde{m}_i^\infty, \tilde{m}'_i^\infty$ とすると、 $\tilde{m}_i^\infty, \tilde{m}'_i^\infty$ は次式のように表される。

$$\tilde{m}_i^\infty = \begin{bmatrix} u_i \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \tilde{m}'_i^\infty = \begin{bmatrix} u'_i \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

これらには (1) 式のエピポーラ方程式が成り立つので、これを展開すると次式が得られる。

$$f_{11}u_iu'_i + f_{12}u'_i + f_{21}u_i + f_{22} = 0 \quad (6)$$

ホモグラフィー H は

$$H = \begin{bmatrix} -f_{21} & -f_{22} \\ f_{11} & f_{12} \end{bmatrix} \quad (7)$$

と表せ、定数倍の不定性を含んでるので 3 自由度である。(6) 式を 3 つの投影点に関して導き、 f_{ij} に関してまとめると次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} u_1u'_1 & u'_1 & u_1 & 1 \\ u_2u'_2 & u'_2 & u_2 & 1 \\ u_3u'_3 & u'_3 & u_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{12} \\ f_{21} \\ f_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

(8) 式を f_{ij} に関して解くことによりエピポーラ・ホモグラフィー H を決定することができる。

このようにして求めた H と e, e' より (2) 式を用いて F 行列を求めることができる。すなわち、この場合には投影点 3 点から F 行列を線形に計算することができる。

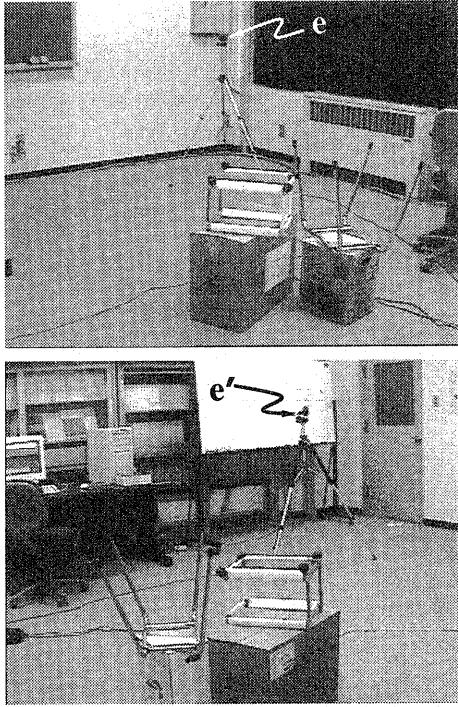


図 6: 相互投影

3.2 5点法

次に、どちらか一方のカメラのみがもう一方のカメラに投影されている場合について考える。例えば、第2カメラの像が第1カメラに投影されている場合、その投影像はエピポール $\mathbf{e} = [e_u, e_v]^T$ として、画像中から直接求めることが可能である。エピポール \mathbf{e} と \mathbf{F} 行列には

$$\mathbf{F}\tilde{\mathbf{e}} = \mathbf{0} \quad (9)$$

という関係式が成り立つのので、この式を展開することにより、次式で表される \mathbf{F} 行列に関する3つの拘束式を得ることができる。

$$f_{k1}e_u + f_{k2}e_v + f_{k3} = 0 \quad (k = 1, 2, 3) \quad (10)$$

また、1組の対応点 $\mathbf{m}_i = [x_i, y_i]$, $\mathbf{m}'_i = [x'_i, y'_i]$ には(1)式のエピポーラ方程式が成り立つ。従って、投影点5点からは次式に示す \mathbf{F} 行列に関する5つの拘束式を得ることができる。

$$\tilde{\mathbf{m}}_i'^T \mathbf{F} \tilde{\mathbf{m}}_i = 0 \quad (i = 1, \dots, 5) \quad (11)$$

(10)式及び(11)式より合計8つの拘束式が得られるので、次式を解くことにより \mathbf{F} 行列を線形に

表 1: 従来法と提案法の比較

	画像中の エピポール数	計算すべき 自由度	線形法に必要な 最小投影点数
8点法	0	7	8
5点法	1	5	5
3点法	2	3	3

計算することができる。

$$\mathbf{M}\mathbf{f} = \mathbf{0} \quad (12)$$

ここで \mathbf{M} 及び \mathbf{f} は次に示す通りである。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} e_u & e_v & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_u & e_v & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_u & e_v \\ x_1x_1' & y_1x_1' & x_1' & x_1y_1' & y_1y_1' & y_1' & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_5x_5' & y_5x_5' & x_5' & x_5y_5' & y_5y_5' & y_5' & x_5 & y_5 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{f} = [f_{11}, \dots, f_{33}]^T$$

以上より、この場合には投影点5点から \mathbf{F} 行列を線形に決定することが可能であることがわかる。

また、第1カメラの像が第2カメラに投影されている場合にも、画像中からエピポール \mathbf{e}' が直接求まるので、

$$\mathbf{F}^T \tilde{\mathbf{e}}' = \mathbf{0} \quad (13)$$

より3つの拘束式を得ることができ、先と同様に投影点5点から \mathbf{F} 行列を線形に決定することができる。

3.3 提案法のまとめ

本研究で提案した手法と従来の8点法との比較を表1にまとめる。従来の8点法のように、7自由度の \mathbf{F} 行列を線形計算によって求めるためには、少なくとも8点の投影点が必要であった。これは1点余分な投影点が必要であり、無駄な計算を行なっているということである。しかし、今回提案した3点法では、2自由度のエピポールを画像中から直接2つ求めるため、 \mathbf{F} 行列の残りの3自由度を決定するのに投影点3点という必要最小限の点数で行うことができる。また、5点法においても、 \mathbf{F} 行列の残りの5自由度を決定するのに投影点5点というこれもまた最小限の点数で \mathbf{F} 行列を決定することが可能である。つまり、今回提案した3点法、

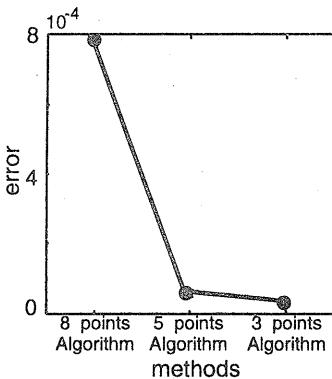


図 7: F 行列計算の安定性

5 点法はいずれも線形解法でありながら無駄のない
計算法であることがわかる。

4 実験

以上述べた理論を用いて、シミュレーション実験による F 行列計算の安定性評価、及び実画像による形状復元実験などを行い、本稿で提案した手法が非常に有効であることを示す。

4.1 F 行列の安定性評価

まず初めに、画像ノイズを印加した場合に従来の 8 点法と提案した 3 点法、5 点法による F 行列計算を行ない、それぞれの F 行列の誤差の比較を行なった。

図 3(a) 及び (b) の各投影点に標準偏差 1 pixel の画像ノイズを印加してそれぞれの手法で F 行列を計算し、真の F 行列との差を評価した。その結果を図 7 に示す。横軸はそれぞれ提案した 3 点法、5 点法、及び従来の 8 点法を表し、縦軸は求めた F 行列とノイズのない場合の F 行列の各要素の二乗誤差である。このとき、 F 行列は定数倍の不定性を含むため、 F 行列の各要素の二乗和が 1 になるように正規化して評価した。図 7 より、従来の 8 点法による結果では非常に誤差が大きく、安定に F 行列が計算できていないのに対して、提案法による結果は 8 点法と比較すると格段に誤差が小さく、非常に安定に F 行列が計算できていることが分かる。

4.2 各手法における F 行列の要素の安定性

次に F 行列の要素であるエピポールとエピポール・ホモグラフィーの安定性の評価を行なった。

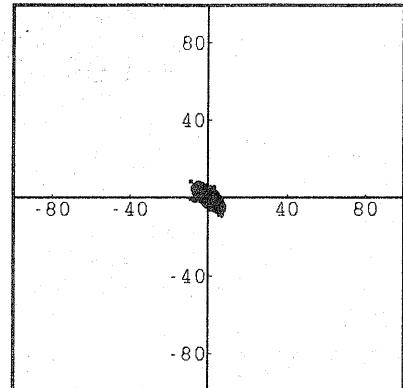


図 8: 5 点法のエピポール計算の安定性

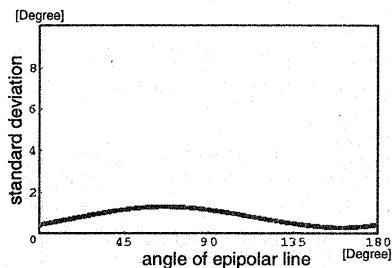
まず、エピポールの安定性について示す。従来の 8 点法によって求めたエピポールの安定性は図 5 に示した通りである。これに対して、提案した 5 点法において、画像上にはない、もう一つのエピポールを計算した時の安定性を図 8 に示す。これら 2 つの図を比較すると、提案法においてはエピポール計算の安定度が格段に向上していることが分かる。

次にエピポーラ・ホモグラフィーの安定性の評価の結果を図 9 に示す。図 9 は 2.3 節における 8 点法の安定性の評価と同条件の下で、3 点法について評価した結果である。この結果と図 4 を比較すると、エピポーラ・ホモグラフィーの計算においても従来の 8 点法による計算よりも、提案法による計算の方が安定度が高いことが分かる。

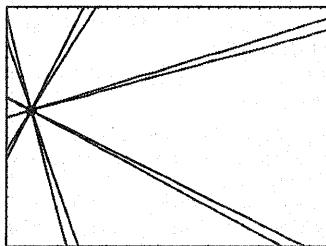
4.3 実画像による射影復元

次に、提案法を射影復元に応用することにより、提案法の有効性を示す。射影復元はまず、画像中から特徴点を抽出し、 F 行列を求め、それを用いて復元を行なうのが一般的な方法である。これまでの研究から、射影復元を安定に行なうことは非常に困難であるということが知られているが、これは復元過程中の F 行列計算を安定に行なうことが非常に難しいことによるものである。よって今回の提案法を用いて、 F 行列計算を安定化することにより、射影復元をより安定に行なうことが可能になると考えられる。

本実験では、図 10(a), (b) のような 2 枚のステレオ画像から従来の 8 点法と 3 点法を用いて射影復元を行ない、それぞれの復元精度を比較した。カメラが相互に投影されているので、画像中からエ



(a) エピポーラ線のばらつき



(b) エピポーラ線の不確定領域

図 9: エピポーラ・ホモグラフィの安定度

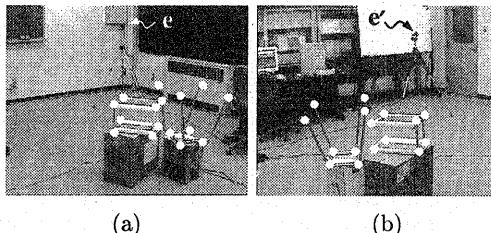
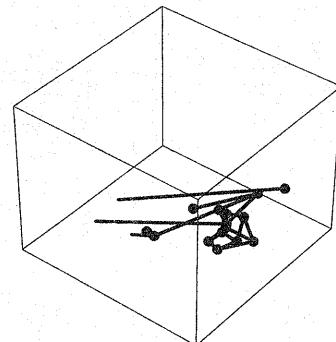
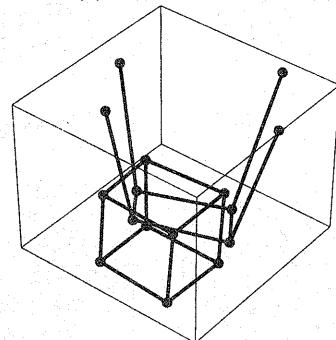


図 10: 射影復元に使用したステレオ画像

ピポールを直接求めることが可能である。3点法による復元では、カメラの投影像から直接求めた2つのエピポールと、画像中の特徴点3点を用いて F 行列を求めて復元を行なった。一方、8点法による復元では、カメラの投影像を用いずに、従来通り特徴点8点から F 行列を求めて復元を行なった。その結果が図11である。図11(a)は8点法を用いて復元を行なったときの結果であり、図11(b)は3点法を用いて復元を行なった結果である。8点法による復元は、形が大きく歪み、安定に復元できていないのに対して、3点法による復元では非常に安定して形状復元できていることが分かる。



(a) 8点法による復元



(b) 3点法による復元

図 11: 復元結果

4.4 射影復元における F 行列計算の定量的評価

次に、提案法による射影復元の安定度を定量的に評価する。図12(c)のような家の形をしたモデルを2つのカメラにそれぞれ投影したものが図12(a), (b)である。(a), (b)中に示した白丸はカメラが投影されている位置、つまりエピポールを示している。これらの画像中の各投影点とカメラの投影像に対しそれぞれ標準偏差1pixelの画像ノイズを印加して射影復元を100回繰り返して行なった。その復元結果を図12(d)～(f)に示す。図12(f)は従来の8点法による射影復元の結果であり、図12(d)は3点法、図12(e)は5点法による射影復元の結果である。図中の楕円は各点の復元結果に対する 3σ の不確定領域を表している。8点法では各点の不確定領域が大きく、安定に復元することが困難であることが分かる。これに対して、5点法では不確定領域がかなり小さくなっていること、非常に安定に復元できていることが分かる。そして、3点法ではさらに安定して復元することが可能であることを示す。

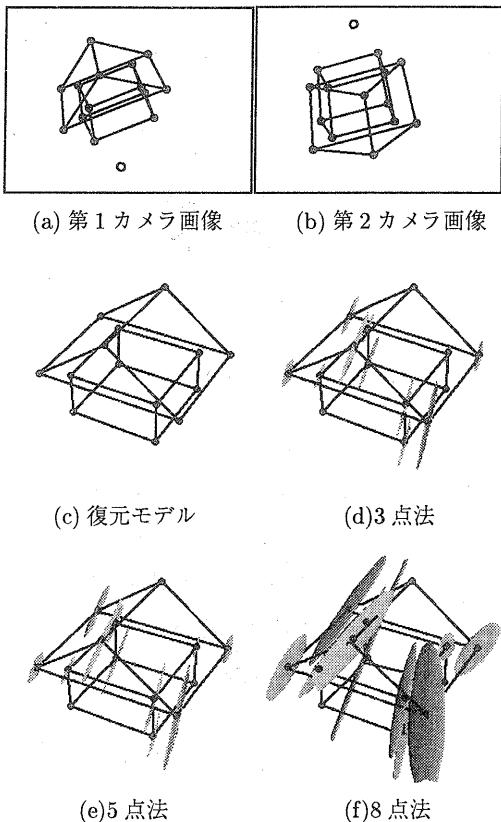


図 12: 射影復元による定量的評価

がわかる。以上より本稿において提案した 3 点法及び 5 点法が非常に有効な F 行列計算法であることがわかる。

5まとめ

本研究ではカメラを相互投影することによりエピポーラ幾何計算をより安定に行なう方法を提案した。特に、双方のカメラが投影されている場合には投影点 3 点から F 行列が線形に計算可能であり、どちらか一方のカメラのみが投影されている場合には投影点 5 点から F 行列が線形に計算可能であることを示した。実際に提案法を用いて F 行列の計算を行ない、射影復元に応用することにより、提案法の有効性を示した。

今後はカメラが 3 つ以上の場合において、カメラ間の相対関係を相互射影により安定に計算する方法を考えていく。

謝辞

本研究に対し色々と御助言下さった名古屋工業大学の佐藤幸男教授に対し謝意を表します。

参考文献

- [1] 大田友一 and 田村秀行. 複合現実感の要素技術としてのコンピュータビジョン. In 画像の認識・理解シンポジウム, volume 1, pages 1–6, 1998.
- [2] 三島等 and 金谷健一. 基礎行列の最適計算とその信頼性評価. In 情報処理学会研究報告, CVIM, pages 67–74, 1999.
- [3] 佐藤岳晴 and 佐藤淳. 未校正カメラによる未校正ロボットの視覚サポート. 電子情報通信学会論文誌, J83-D-II(4), 2000.
- [4] 佐藤淳. コンピュータビジョン—視覚の幾何学—. コロナ社, 1999.
- [5] K. Deguchi and T. Noguchi. Visual servoing using eigenspace method and dynamic calculation of interaction matrices. In 13th International Conference on Pattern Recognition, volume 1, pages 302–306, Vienna, Austria, August 1996.
- [6] B. Espiau, F. Chaumette, and P. Rives. New approach to visual servoing in robotics. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 8(3):313–326, 1992.
- [7] O.D. Faugeras. What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig? In G. Sandini, editor, *Proc. 2nd European Conference on Computer Vision*, pages 563–578, Santa Margherita, Italy, 1992. Springer-Verlag.
- [8] R.I. Hartley. In defense of the eight-point algorithm. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19(6):580–593, 1997.
- [9] R.I. Hartley, R. Gupta, and T. Chang. Stereo from uncalibrated cameras. In *Proc. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 761–764, 1992.
- [10] K.N. Kutulakos and Vallino J. Affine object representation for calibration-free augmented reality. In *Proc. IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pages 25–36, 1996.
- [11] H.C. Longuet-Higgins. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. *Nature*, 293:133–135, 1981.
- [12] Q.T. Luong and O.D. Faugeras. The fundamental matrix: Theory, algorithm and stability analysis. *International Journal of Computer Vision*, 17(1):43–76, 1996.
- [13] C.A. Rothwell, G. Csurka, and O. Faugeras. A comparison of projective reconstruction methods for pairs of views. Technical Report N2538, INRIA, 1995.
- [14] R.Y. Tsai and T.S. Huang. Uniqueness and estimation of three-dimensional motion parameters of a rigid objects with curved surfaces. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 6(1):13–27, 1984.
- [15] Z. Zhang. Determining the epipolar geometry and its uncertainty: A review. *International Journal of Computer Vision*, 27(2):161–195, 1998.