

# 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<sup>†</sup>      佐藤 淳<sup>†</sup>

Robust Computation of Epipolar Geometry from Mutual Projection of Cameras

Mitsuru ITO<sup>†</sup> and Jun SATO<sup>†</sup>

あらまし エピポーラ幾何の計算は、カメラの運動を求めたり、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。そこで本論文では、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 相互射影, エピポーラ幾何, 8点法, 射影復元

## 1. ま え が き

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ったり[8], [14], 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], [6], [7]などの研究が盛んに行われている。更に最近では、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[8], [10], 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], [11]。

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な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[13]。

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[2], [13], [16], 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[9], [12], [15]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や撮影条件に大きく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[5], [16]。F行列はエピポールとエピポーラホモグラフィによって構成されるが、このうちの特に、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わかっていく。そこで本論文では二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場合には対象物上の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

<sup>†</sup> 名古屋工業大学電気情報工学科, 名古屋市

Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466-8555 Japan

計算する手法を提案する．更に，提案法の計算安定性を従来の 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，本論文で提案した  $F$  行列の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，二つのカメラの相対的な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．

$$\tilde{\mathbf{m}}^T \mathbf{F} \tilde{\mathbf{m}} = 0 \quad (1)$$

ここで  $(\sim)$  は斉次座標を表し，また  $\mathbf{F}$  は  $3 \times 3$  で自由度 7 の Fundamental 行列を表す．

$\mathbf{F}$  行列はそれぞれ自由度 2 の二つのエピポール  $e, e'$  と自由度 3 のエピポーラホモグラフィ  $\mathbf{H}$  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  $e, e'$  はカメラの並進運動を表し，エピポーラホモグラフィ  $\mathbf{H}$  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  $2 \times 2$  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 [9]．

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

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，

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

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

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

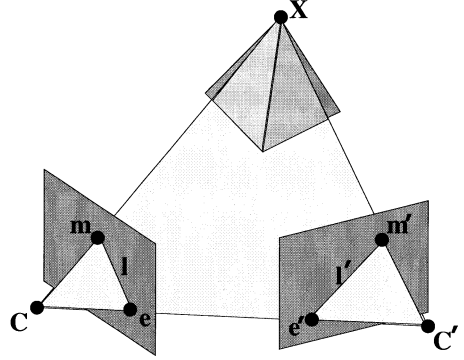


図 1 エピポーラ幾何  
Fig. 1 Epipolar geometry.

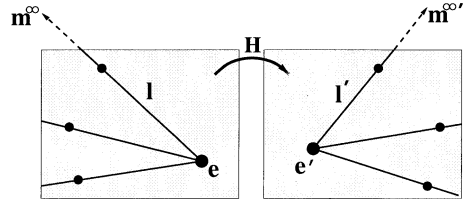


図 2 エピポーラホモグラフィ  
Fig. 2 Epipolar homography.

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．エピポーラ幾何の計算が不安定であると，これを用いた様々なアプリケーションにおいて問題が生じる．例えば射影復元においてはエピポーラ幾何を用いるため，射影復元の安定性はエピポーラ幾何計算の安定性に大きく影響を受ける．図 3 (d) は図 3 (a), (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安定に行われていないことがわかる．

### 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 1pixel の画像ノイズを印加し，これらの投影点のうちから 8 点を選んで，8 点法 [9] により  $\mathbf{F}$  行列を計算し，エピポーラホモグラフィとエピポールの計算を行った．同じ実験を 200 回繰り返し，エピポーラホモグラフィとエピポールの安定性を評価した結果を図 4 及び図 5 に示す．ただし，エピポーラホモグラフィの安定性に関しては，その大きさを直感的に理解しやすいようエ

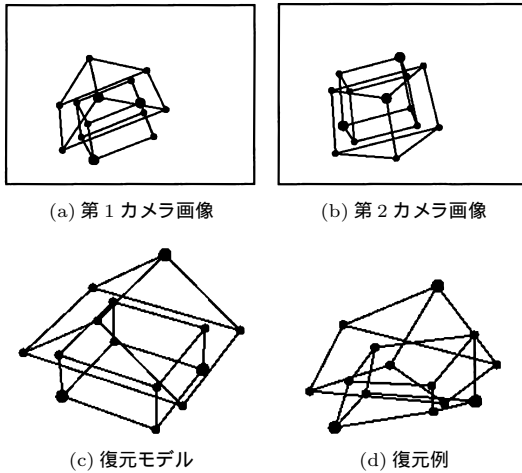
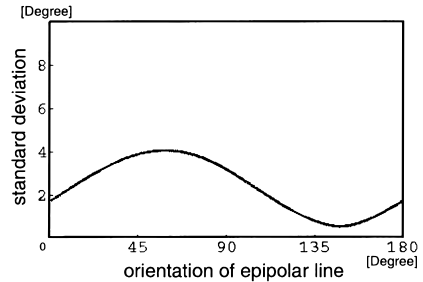


図3 従来の8点法による射影復元  
Fig. 3 Projective reconstruction from eight points algorithm.

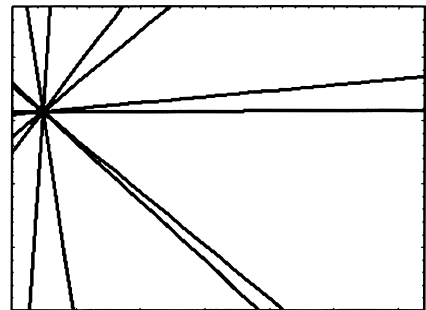
エピポーラ線の安定性として示すことにする。

エピポーラホモグラフィ  $H$  の安定性の評価は、前述の画像ノイズを印加して求めたエピポーラホモグラフィ  $H$  により第1画像中のエピポーラ線を第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とにより行った。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  $H$  により変換した第2画像中におけるエピポーラ線の角度のばらつき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  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  の傾きをもつ四つのエピポーラ線を  $H$  により変換したときの第2画像中のエピポーラ線の不確定領域を表している。図中の点はエポポールであり、エポポール上を通る4組の2直線は、それぞれ  $H$  により変換されたエピポーラ線に対する  $2\sigma$  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比較的小さく、エピポーラホモグラフィに含まれる誤差はそれほど大きくないと考えられる。

次に、エポポールを先に述べたような画像ノイズを印加して求めた。その結果を図5に示す。図中の楕円は求めたエポポールの  $2\sigma$  の不確定領域を表している。エポポールは計算時に用いる投影点によってばらつきが異なるが、一般に図5に示すように大きなばらつきを生じる。これらの結果から従来法では、特に、エポポールを安定に求めることが非常に難しいということ



(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 8点法によるエピポーラホモグラフィの安定性  
Fig. 4 Stability of epipolar homography from eight points algorithm.

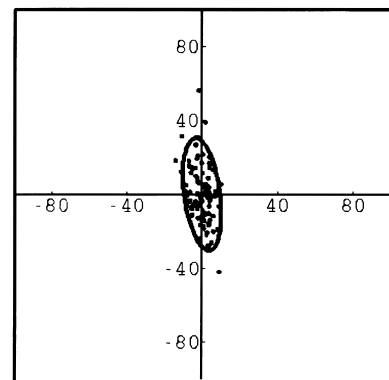


図5 8点法によるエポポールの安定性  
Fig. 5 Stability of epipole from eight points algorithm.

がわかる。

そこで、本論文ではカメラを相互に投影することにより画像中からエポポールを直接求めることを考える。図6に示すように通常使用するカメラではお互いのカメラ間の距離が数メートル離れるとカメラの像は画像上で数ピクセル程度になる。したがってカメラの像を

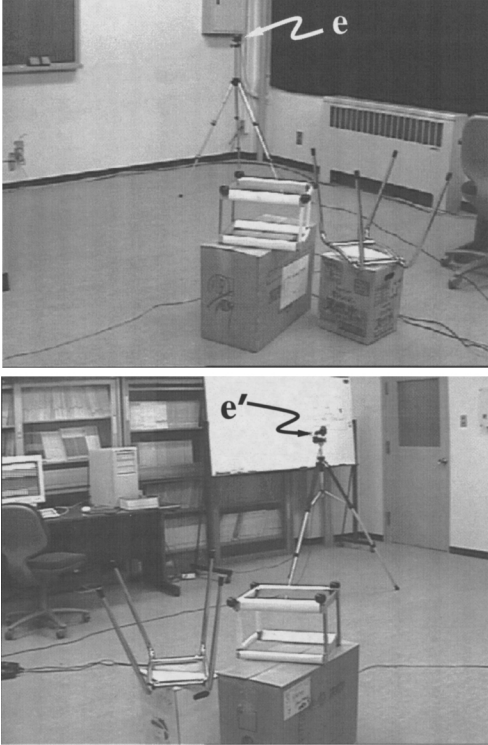


図6 相互射影  
Fig. 6 Mutual projection.

そのままエピポールとして扱えば、エピポールの誤差は数ピクセル程度に抑えられるので非常に安定にエピポールを求めることが可能である。このようにして  $F$  行列の要素の一部をあらかじめ精度良く求めれば、より少ない投影点から安定に  $F$  行列全体を計算することが可能になると考えられる。なお、図 4, 5 は様々なカメラ配置で評価した場合の標準的な結果である。

### 3. カメラの相互射影による $F$ 行列計算

以上の考えに基づき、本章では、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二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一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

まずはじめに、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、カメラが互いの画像に投影されているので、その投影像として二つのエピポール  $e, e'$  を画像中から直接求めることが可能である。したがって、 $F$  行列の残りの要素であるエピポーラホモグラフィ  $H$  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 点が二つのカ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  $l_i, l'_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 上の無限遠点を  $m_i^\infty, m_i^{\infty'}$  とすると、 $m_i^\infty, m_i^{\infty'}$  は齊次座標を用いて次式のように表される [4]。

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

これらには式 (1) 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。

$$f_{11}u_iu'_i + f_{12}v_iu'_i + f_{21}u_iv'_i + f_{22}v_iv'_i = 0 \quad (6)$$

ホモグラフィ  $H$  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いるので 3 自由度である。式 (6) を三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。

$$\begin{bmatrix} u_1u'_1 & v_1u'_1 & u_1v'_1 & v_1v'_1 \\ u_2u'_2 & v_2u'_2 & u_2v'_2 & v_2v'_2 \\ u_3u'_3 & v_3u'_3 & u_3v'_3 & v_3v'_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{12} \\ f_{21} \\ f_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式 (8) 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  $H$  を決定することができる。

このようにして求めた  $H$  と  $e, e'$  より式 (2) 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可能である。

#### 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，その投影像としてエピポール  $e = [e_u, e_v]^T$  を画像中から直接求めることが可能である．エピポール  $e$  と  $F$  行列には

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

という関係式が成り立つので，この式を展開することにより，次式で表される  $F$  行列に関する三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  $m_i = [x_i, y_i]$ ， $m'_i = [x'_i, y'_i]$  には式 (1) のエピポーラ方程式が成り立つ．したがって，投影点 5 点からは次式に示す  $F$  行列に関する五つの拘束式を得ることができる．

$$\tilde{m}_i^T F \tilde{m}_i = 0 \quad (i = 1, \dots, 5) \quad (11)$$

式 (10) 及び式 (11) より合計八つの拘束式が得られるので，次式を解くことにより  $F$  行列を線形に計算することができる．

$$Mf = 0 \quad (12)$$

ここで  $M$  及び  $f$  は次に示すとおりである．

$$M = \begin{bmatrix} e_u & e_v & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_u & e_v & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_u & e_v & 1 \\ x_1x'_1 & y_1x'_1 & x'_1 & x_1y'_1 & y_1y'_1 & y'_1 & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_5x'_5 & y_5x'_5 & x'_5 & x_5y'_5 & y_5y'_5 & y'_5 & x_5 & y_5 & 1 \end{bmatrix}$$

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

以上より，この場合には投影点 5 点から  $F$  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  $e'$  が直接求まるので，

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

より三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  $F$  行列を線形に決定することができる．

表 1 従来法と提案法の比較

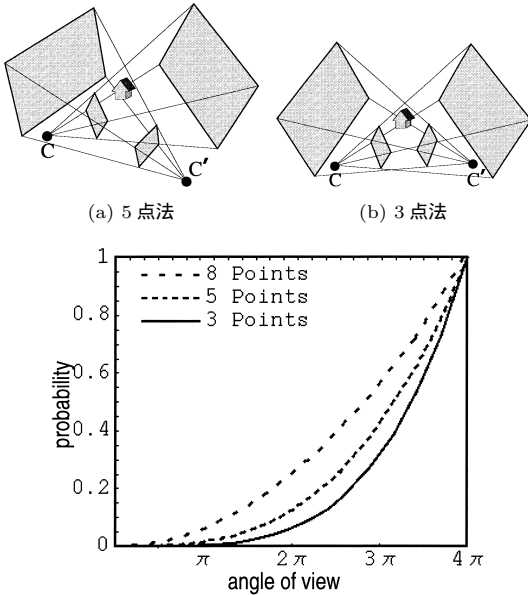
Table 1 Comparison of existing method and proposed methods.

	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

### 3.3 提案法のまとめ

本論文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 点法では，7 自由度の  $F$  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，無駄な計算を行っていることになる．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二つ求めるため， $F$  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， $F$  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  $F$  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 点法と 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．しかし，提案法ではそれぞれのカメラにおいてもう一方のカメラが観測できなければならないという制約条件が付く．そこで次に従来のステレオ法と比較して，提案法がどれほどの確率で利用できるかについて考える．

従来のステレオ法では，二つのカメラにおいて同一の対象物が観測できればよかった．今，カメラの視野領域を立体角  $\theta$  で表すと，一つのカメラにある対象物が存在する確率は  $\frac{\theta}{4\pi}$  である．したがってステレオカメラにおいて双方のカメラの視野領域に同一対象物が存在する確率は  $(\frac{\theta}{4\pi})^2$  であることがわかる．これが一般のステレオカメラにおいて同一対象物が二つのカメラで観測できる確率である．これに対し，5 点法では図 7 (a) に示すように，従来のステレオ法の条件に加えて更に一方のカメラがもう一方のカメラの視野領域に入っている必要がある．したがってこのような条件を満たす確率は  $(\frac{\theta}{4\pi})^3$  である．また，3 点法では図 7 (b) に示すようにもう一方のカメラも相手のカメラの視野領域に入っている必要があるため，この条件を満たす確率は  $(\frac{\theta}{4\pi})^4$  である．これが 3 点法や 5 点法において対象物と同時にもう一方のカメラが観測できる確率である．これらをグラフ化すると図 7 (c) のよ



(c) 8点法, 5点法, 3点法が成り立つ確率

図7 相互射影の成り立つ確率

Fig. 7 Probability of mutual projections.

うになる．図 7(c) より明らかなように視野領域の小さなカメラでは 3 点法や 5 点法の成り立つ確率は従来のステレオ法に比べて小さく，カメラ位置，姿勢が大きく制限される．これに対し視野領域の大きい全方位カメラなどを使用すれば図 7(c) に見るように 3 点法や 5 点法の成り立つ確率は大きくなり，従来のステレオ法と遜色ない確率で使用可能となる．

#### 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，本論文で提案した手法の有効性を示す．

##### 4.1 F 行列の安定性評価

まずはじめに，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 行列計算を行い，それぞれの F 行列の誤差の比較を行った．

図 3(a) 及び (b) の各投影点に標準偏差 1pixel の画像ノイズを印加し，これらのうちから 8 点，5 点，3 点を選んでそれぞれ 8 点法，5 点法，3 点法で 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 8 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

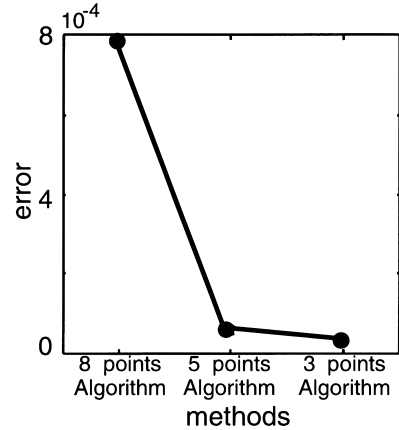


図8 F 行列計算の安定性

Fig. 8 Stability of fundamental matrix.

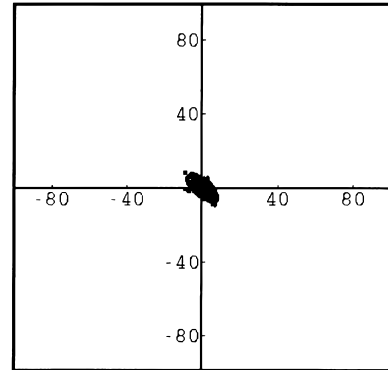


図9 5点法によるエピポール計算の安定性

Fig. 9 Stability of epipole from five points algorithm.

とノイズのない場合の F 行列の各要素の 2 乗誤差である．このとき，F 行列には定数倍の不定性が存在するため，F 行列の各要素の 2 乗和が 1 になるように正規化して評価した．図 8 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わかる．

##### 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ラホモグラフィーの安定性の評価を行った．

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

たときの安定性を図 9 に示す．これら二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性が格段に向上していることがわかる．

次にエピポーラホモグラフィの安定性の評価の結果を図 10 に示す．図 10 は 2.3 における 8 点法の安定性の評価と同条件のもとで，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性が高いことがわかる．

#### 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，これは復元過程中的 F 行列計算を安定に行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うことが可能になると考えられる．

本実験では，図 11 (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 点法を用いて円で囲んだ対象物の射影復元を行い，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二つのエピポールと，画像中の特徴点 3 点を用いて F 行列を求めて復元を行った．一方，8 点法による復元では，

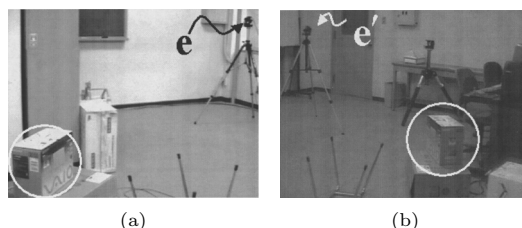
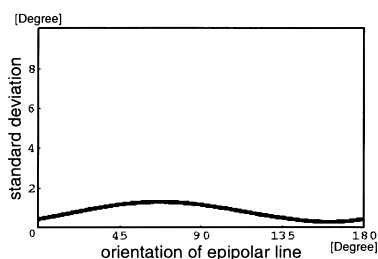
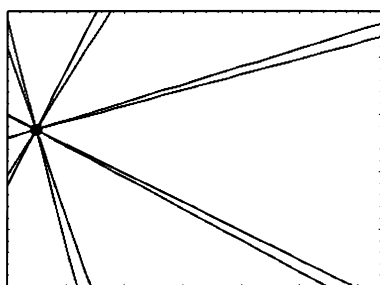


図 11 射影復元に用いたステレオ画像  
Fig. 11 Stereo images used for projective reconstruction.

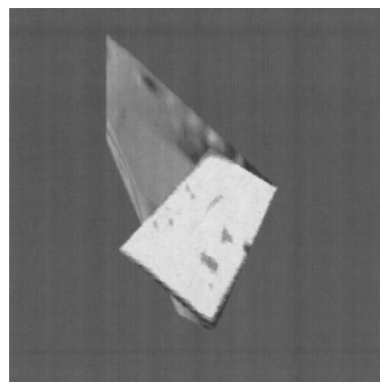


(a) エピポーラ線のばらつき

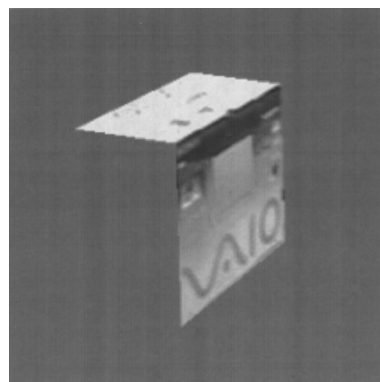


(b) エピポーラ線の不確定領域

図 10 3 点法によるエピポーラホモグラフィの安定性  
Fig. 10 Stability of epipolar homography from three points algorithm.



(a) 8 点法による復元



(b) 3 点法による復元

図 12 射影復元の結果  
Fig. 12 Results of projective reconstruction.

カメラの投影像を用いずに、従来どおり特徴点 8 点から  $F$  行列を求めて復元を行った。その結果が図 12 である。図 12 (a) は 8 点法を用いて復元を行ったときの結果であり、図 12 (b) は 3 点法を用いて復元を行った結果である。8 点法による復元は、形が大きくひずみ、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わかる。

#### 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性を定量的に評価する。図 13 (c) のような家の形をしたモデルを二つのカメラにそれぞれ投影したものが図 13 (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。図中の三つの黒丸は射影復元時に用いた射影基底である。射影復元時にはこれらのほかに二つのカメラの視点 (エピポール) を射影基底として用いた。つまり、空間中の 3 点と二つのカメラの視点の合わせて 5 点を射影基

底とした。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 200 回繰り返して行った。その復元結果を図 13 (d) ~ (f) に示す。図 13 (f) は従来の 8 点法による射影復元の結果であり、図 13 (d) は 3 点法、図 13 (e) は 5 点法による射影復元の結果である。図中の楕円体は各点の復元結果の不確定領域を表している。楕円体の中心は復元結果の中心を、大きさは  $3\sigma$  の範囲を表す。分布の偏りは小さいのでこれらの楕円体は復元結果の不確定領域と考えてよい。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わかる。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おり、非常に安定に復元できていることがわかる。そして、3 点法では更に安定に復元することが可能であることがわかる。以上より本論文において提案した 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. む す び

本論文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。

今後はカメラが三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。また、カメラの相互射影を行うことはカメラ位置を大きく制限してしまうという問題が生じる。これに対しては全方位カメラなどを用いることにより解決していく。

謝辞 本研究に対しいろいろと御助言くだ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。

## 文 献

- [1] 大田友一, 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”, 画像の認識・理解シンポジウム, vol.1, pp.1-6, 1998.
- [2] 三島 等, 金谷健一, “基礎行列の最適計算とその信頼性評価”, 情処学 CVIM 研報, pp.67-74, 1999.
- [3] 佐藤岳晴, 佐藤 淳, “未校正カメラによる未校正ロボットの視覚サーボ”, 信学論 (D-II), vol.J83-D-II, no.4, pp.1110-1118, April 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.

図 13 射影復元における定量的評価

Fig. 13 Quantitative evaluation of projective reconstruction.



- [5] G. Csurka, C. Zeller, Z. Zhang, and O.D. Faugeras, "Characterizing the uncertainty of the fundamental matrix," *Computer Vision and Image Understanding*, vol.68, no.1, pp.18–37, 1997.
- [6] K. Deguchi and T. Noguchi, "Visual servoing using eigenspace method and dynamic calculation of interaction matrices," *13th International Conference on Pattern Recognition*, vol.1, pp.302–306, Vienna, Austria, Aug. 1996.
- [7] B. Espiau, F. Chaumette, and P. Rives, "New approach to visual servoing in robotics," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol.8, no.3, pp.313–326, 1992.
- [8] O.D. Faugeras, "What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig?," *Proc. 2nd European Conference on Computer Vision*, ed. G. Sandini, pp.563–578, Springer-Verlag, Santa Margherita, Italy, 1992.
- [9] R.I. Hartley, "In defense of the eight-point algorithm," *IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell.*, vol.19, no.6, pp.580–593, 1997.
- [10] R.I. Hartley, R. Gupta, and T. Chang, "Stereo from uncalibrated cameras," *Proc. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.761–764, 1992.
- [11] K.N. Kutulakos and J. Vallino, "Affine object representation for calibration-free augmented reality," *Proc. IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pp.25–36, 1996.
- [12] H.C. Longuet-Higgins, "A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections," *Nature*, vol.293, pp.133–135, 1981.
- [13] Q.T. Luong and O.D. Faugeras, "The fundamental matrix: Theory, algorithm and stability analysis," *International Journal of Computer Vision*, vol.17, no.1, pp.43–76, 1996.
- [14] C.A. Rothwell, G. Csurka, and O. Faugeras, "A comparison of projective reconstruction methods for pairs of views," *Technical Report N2538, INRIA*, 1995.
- [15] R.Y. Tsai and T.S. Huang, "Uniqueness and estimation of three-dimensional motion parameters of a rigid objects with curved surfaces," *IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell.*, vol.6, no.1, pp.13–27, 1984.
- [16] Z. Zhang, "Determining the epipolar geometry and its uncertainty: A review," *International Journal of Computer Vision*, vol.27, no.2, pp.161–195, 1998.

(平成13年3月28日受付, 8月3日再受付)



伊藤 満 (学生員)

平12名工大・電気情報卒。現在、同大学院修士課程在学中。コンピュータビジョンの研究に従事。



佐藤 淳 (正員)

昭59名工大・工卒。平8ケンブリッジ大学院博士課程了。同年ケンブリッジ大・工・助手。平10名工大・工・助教授。この間に、ATR人間情報通信研究所客員研究員など。コンピュータビジョン、視覚誘導、視覚的ユーザインタフェースの研究に従事。博士(PhD)。著書に「コンピュータビジョンー視覚の幾何学ー」(コロナ社)など。BMVC'94最優秀科学論文賞, BMVC'97最優秀科学論文賞, 第5回画像センシングシンポジウム論文賞など受賞。情報処理学会, British Machine Vision Association 各会員。