

カメラの相互投影による trifocal tensor の 計算と形状復元の安定化

杉 村 健 之[†] 佐 藤 淳[†]

複数のカメラ間の位置や姿勢の情報はカメラ画像をもとに対象物の形状を復元したり、復元結果を任意視点に再投影して複合現実映像を作成したりするうえで非常に重要である。カメラが3台存在する場合にはこれらのカメラ間の位置や姿勢の情報は一般に trifocal tensor によって表すことができる。したがって、trifocal tensor の計算は、複数の画像を用いる様々なアプリケーションにおいて非常に重要である。しかし、一般に画像から trifocal tensor を安定に計算することは難しいことが知られている。そこで本研究では、お互いのカメラを相互に投影し合うことにより trifocal tensor を安定に計算する方法を提案する。特に、1つのカメラが他の2つのカメラに投影されている場合は5点から、また、2つのカメラがそれぞれ他の2つのカメラに投影されている場合は4点から、そして、すべてのカメラが相互に投影されている場合は2点の対応点から線形に trifocal tensor を求めることができることを示す。また提案法を用いることにより、対象物の形状復元が格段に安定化することを示す。

Robust Computation of Trifocal Tensor from Mutual Projection of Cameras

TAKESHI SUGIMURA[†] and JUN SATO[†]

The computation of trifocal tensor is very important for computing camera motions and reconstructing the shape of objects. However computation of trifocal tensor is very sensitive to image noise. Thus, in this paper, we propose a robust method for computing trifocal tensor by projecting three cameras each other. Especially, we show that if a single camera is projected to the other two cameras, trifocal tensor can be computed from five image points, if two cameras are projected to the other, it can be computed from four image points, and if all cameras are projected to each other, it can be computed from just two image points linearly and reliably. We also show that by using the proposed method, we can reconstruct object shapes accurately.

1. はじめに

近年、コンピュータビジョンにおいて、複数視点の画像から3次元形状の復元を行う研究や¹⁾、指定した目的地点へ移動ロボットを誘導させる視覚誘導²⁾の研究がさかに行われている。さらには、未校正のカメラから得られる情報に関する研究が進み^{3),4)}、過去に撮られた複数の画像から建造物などの3次元形状を復元し、仮想空間や現実空間に融合する複合現実感の研究が進んでいる^{5),6)}。

以上のように複数の画像を用いて3次元形状の復元や再投影を行うためには、それぞれの画像を撮影したカメラがどの位置に、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取得することが必要不可欠である。このような複数のカメラ間の相対的な位置や姿勢などの情報はエピポラ幾何によって表される。エピポラ幾何は2枚の画像間では7自由度の fundamental 行列、3枚の画像間では18自由度の trifocal tensor、4枚の画像間では29自由度の quadrifocal tensor で記述され、画像を2枚から4枚まで増やすことによりカメラ画像間においてより多くの拘束条件が得られることが知られている⁷⁾。

これまでに fundamental 行列や trifocal tensor は画像上の複数の投影点から線形解法により求める方法が提案されている^{4),8)}。しかし、このような計算法は画像ノイズに大きく影響を受けることが知られており、安定に計算することは非常に難しい。著者らは、2つのカメラを相互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

[†] 名古屋工業大学

Nagoya Institute of Technology

を取得し, fundamental 行列をより安定に計算する方法を提案した⁹⁾. 本稿はこれを 3 つのカメラ間のエピポラ幾何に拡張し, 3 つのカメラを相互に投影し合うことで trifocal tensor を線形計算で安定に求める手法を提案する. 一般に trifocal tensor を線形に計算するには, 対象物上の最低 7 点の対応点が必要であることが知られている. これに対し, 本稿では, 1 つのカメラが他の 2 つのカメラに投影されている場合は 5 点から, 2 つのカメラがそれぞれ他の 2 つのカメラに投影されている場合は 4 点から, また, すべてのカメラが相互に投影されている場合には対象物上の 2 点の対応点から線形にかつ従来法より格段に安定に trifocal tensor を求めることができることを示す. さらに提案法を射影復元に応用することにより復元の安定性も格段に向上することを示す.

2. エピポラ幾何

よく知られているように, 複数のカメラの相対的な位置や姿勢などの情報はエピポラ幾何によって記述できる. 図 1 に示すように 3 つのカメラが存在する場合, 視点 $C_i (i = 1, 2, 3)$ のカメラの画像中に視点 $C_j (j = 1, 2, 3)$ のカメラはエピポール e_{ij} としてそれぞれ相互に投影される. また, 空間中の点 X がそれぞれのカメラに投影されている場合, その投影像を, $\tilde{m}_1 = [u_1 \ v_1 \ w_1]^T$, $\tilde{m}_2 = [u_2 \ v_2 \ w_2]^T$, $\tilde{m}_3 = [u_3 \ v_3 \ w_3]^T$, 各カメラ行列を P_1, P_2, P_3 で表すと, 次の方程式が成り立つ.

$$\begin{aligned} s_1 \tilde{m}_1 &= P_1 \tilde{X} \\ s_2 \tilde{m}_2 &= P_2 \tilde{X} \\ s_3 \tilde{m}_3 &= P_3 \tilde{X} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで, s_1, s_2, s_3 は 0 以外の実数である. このとき, 投影像 m_1, m_2, m_3 間には次式で示す拘束式が成り立つ.

$$[\tilde{m}_2]_{\times} G(\tilde{m}_1) [\tilde{m}_3]_{\times} = 0_3 \quad (2)$$

ここで, 0_3 は 0 を要素とする 3×3 の行列を表し, また, $G(\tilde{m}_1)$ は, 次式で表されるような 3×3 の行列である.

$$G(\tilde{m}_1) = u_1 T_1 + v_1 T_2 + w_1 T_3 \quad (3)$$

T_1, T_2, T_3 はそれぞれ 3×3 の行列であり, これら T_1, T_2, T_3 からなる $[T_1 \ T_2 \ T_3]$ が trifocal tensor である.

trifocal tensor は全部で 18 自由度を持つが, その内訳は, 2 自由度の 6 つのエピポールと, 3 自由度の 2 つエピポラ・ホモグラフィである. エピポール

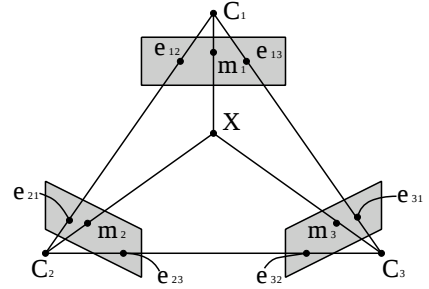


図 1 エピポラ幾何
Fig. 1 Epipolar geometry.

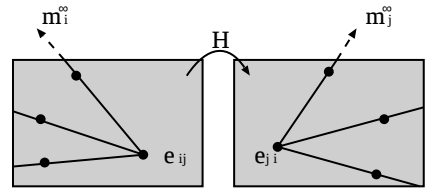


図 2 エピポラ・ホモグラフィ
Fig. 2 Epipolar homography.

$\tilde{e}_{ij}$ はカメラの並進運動を表し, エピポラ・ホモグラフィは図 2 に示すように, ある画像中のエピポラ線を他の画像中のエピポラ線に変換する 3 自由度の 1 次元射影変換であり, カメラの回転運動に対応する. 各カメラ間の 3 つのエピポラ・ホモグラフィのうち独立なものは 2 つのみであるため, trifocal tensor に含まれるエピポラ・ホモグラフィ全体の自由度は 6 となる.

$G(\tilde{m}_1)$ の i 行 j 列の要素を g_{ij} で表し, 式 (2) を展開すると次のような 4 つの独立な拘束式が得られる.

$$\begin{aligned} -w_2 w_3 g_{22} + w_2 v_3 g_{23} + v_2 w_3 g_{32} - v_2 v_3 g_{33} &= 0 \\ w_2 w_3 g_{21} - w_2 u_3 g_{23} - v_2 w_3 g_{31} + v_2 u_3 g_{33} &= 0 \\ w_2 w_3 g_{12} - w_2 v_3 g_{13} - u_2 w_3 g_{32} + u_2 v_3 g_{33} &= 0 \\ -w_2 w_3 g_{11} + w_2 u_3 g_{13} + u_2 w_3 g_{31} - u_2 u_3 g_{33} &= 0 \end{aligned}$$

trifocal tensor は未知数が 27 であり, また定数倍の不定性があるので 26 個の拘束式があれば線形に求めることができる. また, 1 組の対応点からは 4 つの拘束式が得られるから, 7 組の対応点があれば, 合計 $7 \times 4 = 28$ 個の拘束式が得られ, 線形に trifocal tensor を求めることができる⁷⁾. しかし, このような求め方は非常にノイズに弱いことが知られている.

3. カメラの相互投影による trifocal tensor の計算

そこで, 本稿ではカメラがお互いに投影し合っている場合に, これらの投影像をエピポールとして直接求

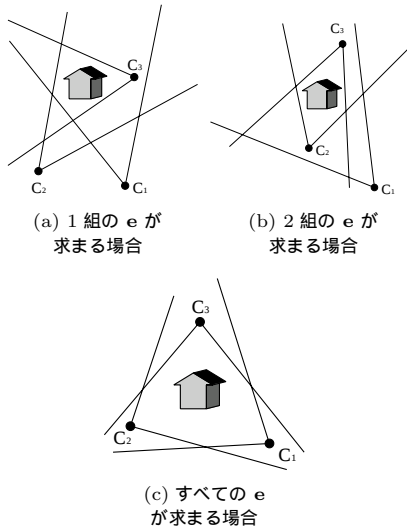


図 3 カメラの相互射影

Fig. 3 Mutual projection of cameras.

めることにより, trifocal tensor を安定に計算する手法を提案する. 3つのカメラが存在する場合には, 図3に示すようにこれらのうちの1つが他の2つのカメラに投影されている場合や, 2つのカメラがそれぞれ他の2つに投影されている場合や, 3つのカメラが互いに投影し合っている場合などがある.

1つのカメラが他の2つのカメラに投影されている場合, 2自由度のエピポールが画像中から直接2つ求めることができるので, trifocal tensor の残りの14自由度を画像中の対応点から決定すればよい. また, 2つのカメラがそれぞれ他の2つのカメラに投影されている場合は2組(4つ)のエピポールが画像中から直接求まるので, 残りの10自由度を画像中の対応点から求めればよい. そして, すべてのカメラが相互に投影されている場合は3組(6つ)のエピポールが画像中から直接求まるので, 残りの6自由度を画像中の対応点から求めればよいことが分かる. 以下では, これらの方法について詳しく述べる.

3.1 1つのカメラが投影されている場合

まず図3(a)のように視点 \$C_3\$ にあるカメラが視点 \$C_1, C_2\$ にあるカメラに投影されている場合を考える.

視点 \$C_3\$ に対する \$C_1\$ 上のエピポール \$e_{13}\$ とは, 視点 \$C_3\$ におけるどのような点 \$m_3\$ に対しても式(2)が成り立つような \$m_1\$ を表す. 同様に, 視点 \$C_3\$ に対する \$C_2\$ 上のエピポール \$e_{23}\$ はどのような \$m_3\$ においても式(2)が成り立つような \$m_2\$ を表す. したがって, どのような \$m_3\$ においても, 式(2)が成り立つことから, \$e_{13}, e_{23}\$ に関して次の方程式が成り立つこ

とが分かる.

$$[\tilde{e}_{23}]_{\times} G(\tilde{e}_{13}) = 0_3 \quad (4)$$

この式を展開すると trifocal tensor に関する6つの独立な拘束式を得ることができる.

また, 1組の対応点 \$m_1, m_2, m_3\$ には式(2)が成り立つため, 5組の対応点が存在すれば trifocal tensor に関する20個の拘束式を得ることができる. したがって, 5組の対応点と1組のエピポールから式(2), (4)より合計26個の拘束式が得られるので, これらの式を解くことにより, trifocal tensor を線形に計算することができる.

以上より, ある1つのカメラが他の2つのカメラに投影されている場合は5組の対応点から trifocal tensor を線形に決定することが可能であることが分かる.

3.2 2つのカメラが相互投影されている場合

次に, 図3(b)に示すように, さらに視点 \$C_2\$ が視点 \$C_1\$ と \$C_3\$ に投影されている場合を考える. この場合はさらに, エピポール \$e_{12}, e_{32}\$ を画像中から直接求めることが可能となる.

したがって, まず先と同様に, エピポール \$e_{13}, e_{23}\$ から式(4)より trifocal tensor に関する6つの独立な拘束式が得られる.

また, 先と同様に, エピポール \$e_{12}, e_{32}\$ とは \$m_2\$ がどんな点であっても式(2)が成り立つような \$m_1, m_3\$ を表す. したがって, 式(2)と \$e_{12}, e_{32}\$ より次式が成り立つことが分かる.

$$G(\tilde{e}_{12})[\tilde{e}_{32}]_{\times} = 0_3 \quad (5)$$

この式を展開すると trifocal tensor に関する6つの拘束式が新たに得られる. したがって, エピポール \$e_{13}, e_{23}, e_{12}, e_{32}\$ が画像から得ることができれば, 式(4), (5)からそれぞれ6個の拘束が得られる. また, 4組の対応点が存在すれば式(2)により16個の拘束が得られるため, 合計28個の trifocal tensor に関する拘束式を得ることができ, これらの式を解くことにより, trifocal tensor を線形に計算することができる.

以上より, 2つのカメラがそれぞれ他の2つのカメラに投影されている場合は4組の対応点から trifocal tensor を線形に決定することが可能であることが分かる.

3.3 3つのカメラが相互投影されている場合

次に, 図3(c)のように, さらに視点 \$C_1\$ も他の2つのカメラに投影されて, すべてのエピポールが求まっている場合を考える. この場合はさらにエピポール \$e_{21}, e_{31}\$ を画像から直接求めることが可能となる.

まず, 先と同様に \$e_{13}, e_{23}, e_{12}, e_{32}\$ と式(4), (5)

表 1 従来法と提案法の比較

Table 1 Comparison of existing methods and proposed methods.

画像中の エピボール	求める 自由度	必要な 拘束式	線形計算に 必要な対応点
0	18	26	7
1	14	20	5
2	10	14	4
3	6	6	2

より, trifocal tensor に関する合計 12 個の拘束式が得られる。ここで, 式 (2) を次のように変形する。

$$u_1[\tilde{\mathbf{m}}_2] \times \mathbf{T}_1[\tilde{\mathbf{m}}_3] \times v_1[\tilde{\mathbf{m}}_2] \times \mathbf{T}_2[\tilde{\mathbf{m}}_3] \times \\ + w_1[\tilde{\mathbf{m}}_2] \times \mathbf{T}_3[\tilde{\mathbf{m}}_3] \times \mathbf{0}_3 \quad (6)$$

先と同様に, エピボール $\mathbf{e}_{21}, \mathbf{e}_{31}$ とは $\mathbf{m}_1$ がどんな点であっても式 (2) が成り立つような $\mathbf{m}_2, \mathbf{m}_3$ を表す。すなわちどのような u_1, v_1, w_1 であっても式 (6) が成り立つ。したがって, 式 (6) と $\mathbf{e}_{21}, \mathbf{e}_{31}$ より次式が成り立つことが分かる。

$$[\tilde{\mathbf{e}}_{21}] \times \mathbf{T}_i[\tilde{\mathbf{e}}_{31}] \times \mathbf{0}_3 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (7)$$

この式を展開すると trifocal tensor に関する 12 個の拘束式が新たに得られる。しかし, 式 (4), (5) と合わせて考えた場合には, この 12 個のうちの 8 個のみが独立となる。したがって, すべてのエピボールが画像から得ることができれば, 式 (4), (5), (7) から合計 20 個の拘束が得られる。

また, 通常, 式 (2) より 1 組の対応点からは 4 個の拘束が得られるが, これらのうちの 1 つは式 (7) とは独立ではないので, この場合には 1 組の対応点からは 3 個の拘束しか得られない。したがって, 2 組の対応点が存在すれば式 (2) より 6 個の拘束が得られ, 合計 26 個の trifocal tensor に関する拘束式を得ることができる。したがって, これらの式を解くことにより, trifocal tensor を線形に計算することができる。

以上より, すべてのカメラが相互に投影されている場合は 2 組の対応点から trifocal tensor を線形に決定することが可能であることが分かる。

3.4 提案法のまとめ

本稿での提案法と従来法との比較を表 1 にまとめる。従来法では 18 自由度の trifocal tensor を線形計算によって求めるためには, 最低 26 個の拘束式を得るために 7 点の対応点が必要であった。これに対し, 今回提案した方法では, 1 つのカメラが他の 2 つのカメラに投影されている場合は, 残りの 14 自由度を計算するためには 20 個の拘束式, すなわち対応点 5 組のみを必要とし, また, 2 つのカメラがそれぞれ他の 2 つのカメラに投影されている場合は, 残り 10 自由度を計算するために 14 個の拘束式, すなわち対応

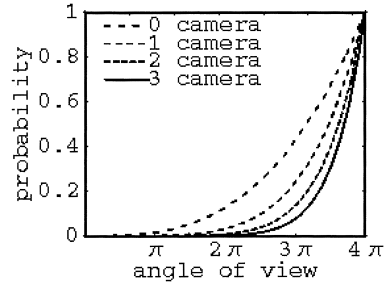


図 4 相互射影の存在確率

Fig. 4 Probability of mutual projection.

点 4 組のみを, そしてすべてのカメラがそれぞれ相互に投影されている場合は, 残り 6 自由度を計算するために 6 個の拘束式, すなわち対応点 2 組のみを必要とする。

次に, このような相互投影の条件が満たされる確率について考える。従来法では, 3 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 θ で表すと, 1 つのカメラにある対象物が存在する確率は $\theta/4\pi$ である。したがって, 3 つのカメラの視野領域に同一対象物が存在する確率は $(\theta/4\pi)^3$ であることが分かる。これに対し, さらに図 3(a) のように 1 つのカメラが他の 2 つのカメラに投影されている確率は $(\theta/4\pi)^5$ となる。また, 2 つのカメラがそれぞれ他の 2 つのカメラに投影されている確率は $(\theta/4\pi)^7$, そして, すべてのカメラが相互に投影されている場合の確率は $(\theta/4\pi)^9$ となる。これをグラフ化すると, 図 4 のようになる。図 4 では各手法を, それを用いるのに必要な他の 2 つのカメラに投影されているカメラの数で表している。図 4 より明らかなように視野領域の小さなカメラでは提案法における存在確率は従来法に比べて小さく, カメラ位置, 姿勢が大きく制限される。これに対しカメラを回転させて平面射影変換により Mosaicing することで広角化したり, 視野領域の大きい全方位カメラを使用したりすれば図 4 に見るように, 提案法であっても存在確率が大きくなり, 従来法と遜色ない確率で使用可能となる。

4. 射影復元

trifocal tensor が求まると, 求めた trifocal tensor を用いて対象物の形状を復元することができる。ここではその方法について述べる。

式 (1) のような投影式が成り立つ場合, 3 つのカメラ行列はそれぞれ次式のように trifocal tensor とエピボールより求めることができる。

$$\mathbf{P}_1 = [\mathbf{I} \ \mathbf{0}] \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_2 = [[\mathbf{T}_1 \ \mathbf{T}_2 \ \mathbf{T}_3] \tilde{\mathbf{e}}_{31} \ \tilde{\mathbf{e}}_{21}] \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_3 = [(\tilde{\mathbf{e}}_{31} \tilde{\mathbf{e}}_{31}^\top - \mathbf{I})[\mathbf{T}_1^\top \ \mathbf{T}_2^\top \ \mathbf{T}_3^\top] \tilde{\mathbf{e}}_{21} \ \tilde{\mathbf{e}}_{31}] \quad (10)$$

このようにして求めたカメラ行列と式 (1) より $\tilde{\mathbf{X}}$ に関する次のような線形方程式が得られる．ただし， $\mathbf{p}_{ij}$ は $\mathbf{P}_i$ の j 行目の行ベクトルを示す．

$$\begin{bmatrix} u_i \mathbf{p}_{i3} - w_i \mathbf{p}_{i1} \\ v_i \mathbf{p}_{i3} - w_i \mathbf{p}_{i2} \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{0} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (11)$$

このように，1 つの視点の画像からは $\tilde{\mathbf{X}}$ に関する拘束式が 2 つ得られる．ここで， $\tilde{\mathbf{X}}$ は未知数 4 であるが，定数倍の不定性があるため最低 3 つの拘束式が得られれば $\tilde{\mathbf{X}}$ を求めることが可能となる．したがって，復元を行いたい点が最低 2 つの視点に投影されていれば 3 つ以上の拘束式が得られ，射影的な不定性を残して 3 次元空間中の点を復元することが可能となる．

以上のように，射影復元を行う場合にはカメラ行列が trifocal tensor より求まるため，提案法により trifocal tensor を安定に計算することができれば，射影復元も安定化できると考えられる．

5. 実 験

以上，述べた理論を用いてシミュレーション実験および実画像により trifocal tensor の計算の安定性評価，形状復元実験を行い，本稿で提案した手法の有効性を示す．なお，実画像を用いた実験においてはカメラの投影像の中央の点を手動で選びエピポールとしている．また，trifocal tensor を求めるときには画像の正規化を行い計算を安定化している⁷⁾．

5.1 trifocal tensor の安定性評価

まず，trifocal tensor の計算精度をシミュレーション実験により評価する．図 5 (a), (b), (c) に本シミュレーション実験で用いた 3 つのカメラ画像を示す．画像中の白丸は各エピポールである．

各投影点に標準偏差 1pixel の画像ノイズを印加して従来の 7 点による線形法と提案法により trifocal tensor の計算を 100 回行い，真の trifocal tensor との差を評価した．その結果を図 6 に示す．横軸はそれぞれの手法を表し，縦軸は求めた trifocal tensor の各要素の平均二乗誤差を表す．このとき，trifocal tensor には定数倍の不定性が存在するため，各要素の二乗和が 1 となるように正規化して評価した．図 6 より，従来法による結果では非常に誤差が大きく，安定に trifocal tensor が計算できていないのに対して，提案法による

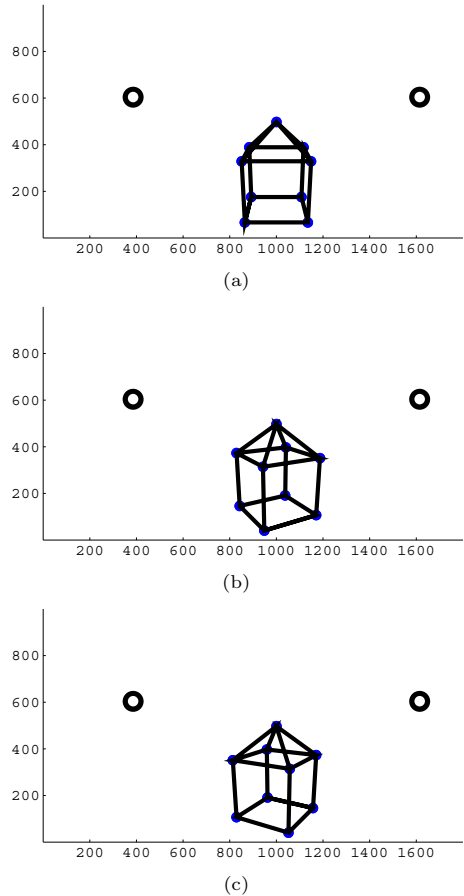


図 5 シミュレーション実験用画像

Fig. 5 Synthetic images used for some experiments.

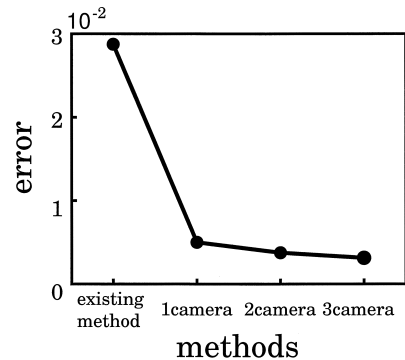


図 6 Trifocal tensor 計算の安定性

Fig. 6 Stability of trifocal tensor.

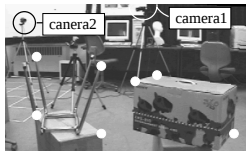
結果は従来法と比較すると格段に誤差が小さく，非常に安定に trifocal tensor を計算できていることが分かる．



(a) 第 1 カメラの画像



(b) 第 2 カメラの画像



(c) 第 3 カメラの画像

図 7 実画像による投影像

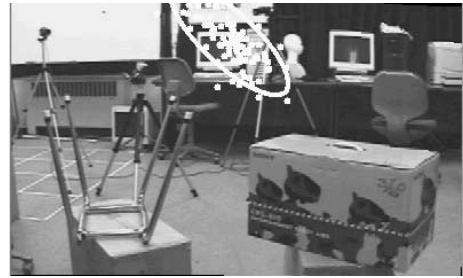
Fig. 7 Panoramic images used for some experiments.

5.2 エピポールとエピポーラ・ホモグラフィーの安定性

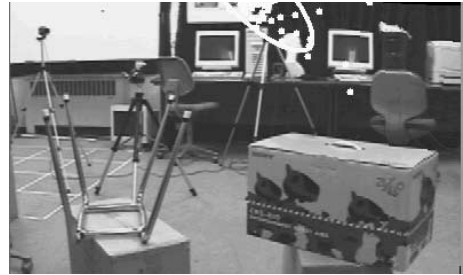
次に実画像を用いた実験により, trifocal tensor の要素であるエピポールとエピポーラ・ホモグラフィーの安定性の評価を行った. 実験に用いた 3 つのカメラの画像を図 7 (a), (b), (c) に示す. これらの画像はカメラが相互に投影されるようカメラを回転し, 平面射影変換により Mosaicing することで広角化したものである. 提案法ではこれらの画像中に写っているカメラをエピポールとして用いた. また, 図中の白丸の点は trifocal tensor の計算に用いた対応点を示す.

初めにエピポールの安定性について示す. まず, 図 7 (a), (b), (c) より従来法によって求めたエピポール e_{31} の安定性を図 8 (a) に示す. これに対して, 1 組のエピポールを用いた提案法と 2 組のエピポールを用いた提案法によりそれぞれ trifocal tensor を計算して求めたエピポール e_{31} の安定性を図 8 (b), (c) に示す. これらの図中の点は, 先と同様に標準偏差 1pixel の画像ノイズを印加して求めたエピポールを表し, 楕円はこれらの結果より求めた 2σ の不確定領域を表している. 図 8 (a), (b), (c) より, 提案法で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分かる.

次に, エピポーラ・ホモグラフィーの安定性評価を行った. エピポーラ・ホモグラフィーの安定性は直感的に理解しにくいので, ここではエピポーラ線の安定性として評価した. その結果を図 9 (a), (b) に示す. (a) は従来法の結果であり, (b) はすべてのカメラが相



(a) 従来法



(b) 1 組の e 使用



(c) 2 組の e 使用

図 8 エピポールの安定性

Fig. 8 Stability of epipoles.

互に投影されている場合の結果である. それぞれの画像中の白塗りの部分は, 第 1 画像中で 0° , 60° , 120° の傾きを持つ 3 つのエピポーラ線を, 求めたエピポーラ・ホモグラフィーを用いて第 3 画像中のエピポーラ線へ変換した場合の 2σ の不確定領域を表している. これらの結果より, エピポーラ・ホモグラフィーの計算においても, 従来法よりも提案法の方が安定性が高いことが分かる.

5.3 実画像による射影復元

次に, 射影復元について示す. 一般に射影復元の安定性はカメラ運動の計算精度に大きく依存するため, 提案法を用いることにより, より安定に射影復元できることが予想できる. 本実験では図 7 (a), (b), (c) の 3 つの視点の画像を用いて, 従来法と提案法によりそれぞれ trifocal tensor を計算し, 図 7 (a) 左下の箱の射影復元を行った. その復元結果を再投影した結果を



(a) 従来法

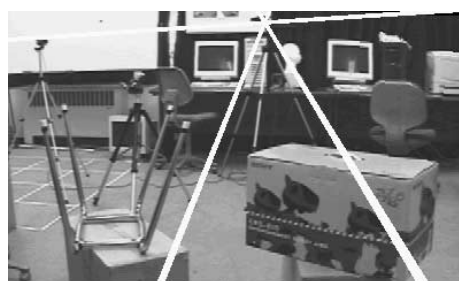
(b) すべての e 使用

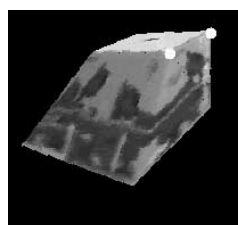
図 9 エピポーラ・ホモグラフィの安定性

Fig. 9 Stability of epipolar homography.

図 10 (a)~(d) に示す．一般に射影復元には 3 次元射影変換の不定性が存在するが，これに対し正しい画像基底を与えて再投影すると画像中では不定性がなくなり復元の精度を比較することが可能となる．図中の 2 点は用いた 5 つの基底のうちの 2 つの像を示す．残りの 3 つの基底は 3 つのカメラの視点とした．これらの図より，従来法による復元では，形が大きく歪み，安定に復元できていないのに対し，1 組のエピポールを用いる提案法での復元では非常に安定に形状復元できており，2 組，3 組のエピポールを用いることによりさらに安定に復元できていることが分かる．

5.4 射影復元の安定性

次にシミュレーション実験により，提案法による射影復元の安定性を定量的に評価する．今，図 5 のように 3 つのカメラによってそれぞれ対象物が投影されているとする．これらの画像中の各投影点とエピポールにそれぞれ標準偏差 1pixel の画像ノイズを印加して射影復元を 100 回繰り返し行った．その復元結果を図 11 (a)~(d) に示す．図 11 (a) は従来法を，また (b) は 1 組のエピポールを画像から直接求めた場合を，(c) は 2 組のエピポールを画像から直接求めた場合を，そして (d) はすべてのエピポールを画像から直接求めた場合の射影復元の結果である．図中の楕円体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．従来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，エ



(a) 従来法

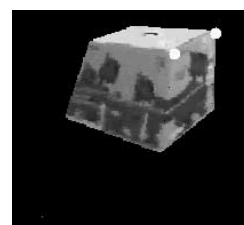
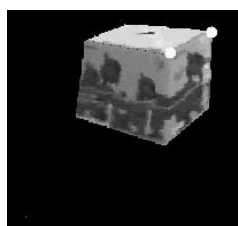
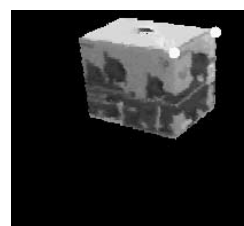
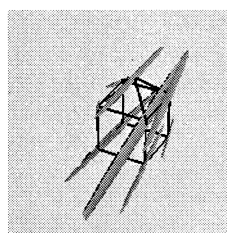
(b) 1 組の e 使用(c) 2 組の e 使用(d) すべての e 使用

図 10 射影復元の結果

Fig. 10 Results of projective reconstruction.



(a) 従来法

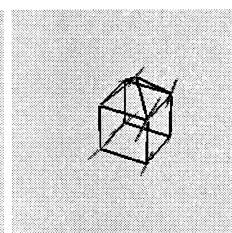
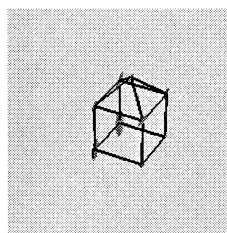
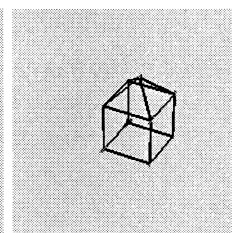
(b) 1 組の e 使用(c) 2 組の e 使用(d) すべての e 使用

図 11 射影復元の安定性

Fig. 11 Stability of projective reconstruction.

ポールを直接画像から求めた場合は非常に安定に復元できていることが分かる．

6. ま と め

本稿ではカメラを相互投影することにより trifocal tensor をより安定に計算する手法を提案した．1 つのカメラが他の 2 つのカメラに投影されている場合は 5 点から，2 つのカメラがそれぞれ他の 2 つのカメラに投影されている場合は 4 点から，また，すべてのカメラが相互に投影されている場合には対象物上の 2 点

の対応点から線形に trifocal tensor を計算可能であることを示した．一般に従来法によりエピボール計算を行った場合には数十 pixel の誤差が生ずる．これに対しカメラの投影像を直接エピボールとして得た場合には，その誤差はせいぜい数 pixel であるため trifocal tensor の計算安定度が格段に向上する．実際に提案法を用いて trifocal tensor の計算を行い，射影復元に応用して提案法の有効性を示した．このようにカメラの相互投影を行う場合には，カメラ位置が大きく制限されてしまうが，本稿で示したようにカメラを回転させたり，全方位カメラなどを用いたりすることにより問題は解決することができる．また，近年では大量のカメラを用いて対象物を復元する研究がさかに行われているが，このような場合には向かい合ったカメラがお互いに投影される状況が頻繁に起こるため本稿の手法が非常に有用であると考えられる．相互投影を用いて trifocal tensor を求める場合，本稿のように直接 trifocal tensor を求める代わりに，文献 9) の方法でまず 3 つのカメラ間の 3 つの fundamental 行列を個別に求め，その 3 つの fundamental 行列から trifocal tensor を計算する方法も考えられる．しかし，これら 3 つの fundamental 行列は独立ではなく，3 つの 7 自由度の fundamental 行列の合計の自由度が 21 であるのに対して，trifocal tensor の自由度は 18 であることから，trifocal tensor ではより強い拘束が成り立っている．したがって，本稿のように trifocal tensor を直接求めた方がより計算が安定化する．

今後はカメラが 4 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 日頃ご指導いただいている名古屋工業大学佐藤幸男教授に感謝する．

参 考 文 献

- 1) Rothwell, C., Csürka, G. and Faugeras, O.: A Comparison of Projective Reconstruction Methods for Pairs of Views, Technical Report N2538, INRIA (1995).
- 2) 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, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J83-D-II, No.4, pp.1110-1118 (2000).
- 3) Faugeras, O.: What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig?, *Proc. 2nd European Conference on Computer Vision*, Sandini, G. (Ed.), pp.563-578, Springer-Verlag (1992).
- 4) Hartley, R., Gupta, R. and Chang, T.: Stereo from uncalibrated cameras, *Proc. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.761-764 (1992).
- 5) 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).
- 6) Kutulakos, K. and Vallino, J.: Affine Object Representation for Calibration-Free Augmented Reality, *Proc. IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pp.25-36 (1996).
- 7) Hartley, R. and Zisserman, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press (2000).
- 8) Longuet-Higgins, H.: A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections, *Nature*, Vol.293, pp.133-135 (1981).
- 9) 伊藤 満, 佐藤 淳: カメラの相互射影によるエピボール幾何計算の安定化, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J85-D-II, No.3, pp.416-424 (2002).

(平成 14 年 3 月 1 日受付)

(平成 14 年 9 月 12 日採録)

(担当編集委員 長尾 健司)



杉村 健之

昭和 53 年生．平成 13 年名古屋工業大学電気情報工学科卒業．現在同大学大学院博士前期課程在学中．コンピュータビジョンの研究に従事．



佐藤 淳 (正会員)

昭和 59 年名古屋工業大学工学部卒業．平成 8 年ケンブリッジ大学大学院博士課程修了．同年ケンブリッジ大学工学部助手．平成 10 年名古屋工業大学工学部助教授．この間に，ART 人間情報通信研究所客員研究員等．コンピュータビジョン，幾何学的不変量，視覚誘導，視覚ユーザインタフェースの研究に従事．博士 (Ph.D.). 著書に「コンピュータビジョン—視覚の幾何学」(コロナ社)等．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等各受賞．電子情報通信学会会員．