

未校正マルチカメラの相互投影を用いた弱校正と 物体形状の復元

杉村 良彦 佐藤 淳

名古屋工業大学 情報工学専攻

〒 466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町

yosihiko@hilbert.elcom.nitech.ac.jp, junsato@elcom.nitech.ac.jp

あらまし：マルチカメラ間の位置や姿勢の情報は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。カメラが2台存在する場合にはこれらのカメラ間の関係はエピポラ幾何で表される。一般にエピポラ幾何を安定に計算することは難しいことが知られているが、近年お互いのカメラを相互に投影し合うことでエピポラ幾何を安定に計算することができる相互投影法が提案された。そこで本論文では、相互投影法を拡張し一般の N 台のカメラ間の関係を相互投影を用いて計算する方法を提案する。相互投影法を用いることで各カメラ間のエピポラ幾何安定に求まるとともに、ある1台のカメラを基準に全てのカメラが弱校正可能であることを示す。また、提案法により対象物形状復元を行い、その有効性を示す。

キーワード：形状復元, 相互投影, マルチカメラ, キャリブレーション, エピポラ幾何

Weak Calibration of Multiple Cameras and Reconstruction of 3D Objects from Mutual Projection of Cameras

Yoshihiko Sugimura Jun Sato

Nagoya Institute of Technology

Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555, JAPAN

yosihiko@hilbert.elcom.nitech.ac.jp, junsato@elcom.nitech.ac.jp

Abstract: The relative position and orientation of multiple cameras are very important for reconstructing 3D objects and for generating arbitrary views of the scene. The relationship between these multiple cameras can be described by the epipolar geometry. Recently, it has been shown that the epipolar geometry can be computed accurately and efficiently by using the mutual projection of cameras. In this paper, we propose a method for calibrating a large amount of multiple cameras efficiently by extending the mutual projection method for two cameras. We also show that the proposed method can be applied for reconstructing 3D objects accurately.

Keywords: 3D reconstruction, mutual projection, multiple cameras, calibration, epipolar geometry

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称物の3次元形状の復元を行ったり、ロボットを目的地へ誘導する視覚誘導などの研究が行われている。さらに、複数のカメラ画像から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。このように、複数のカメラ画像を用いて3次元形状を復元したり、視覚誘導するには複数のカメラの位置や姿勢等のカメラ情報を取得する事が必要である。このような複数のカメラ間の相対的な位置や姿勢等の情報はエピポーラ幾何によって表される。そして、エピポーラ幾何は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 [3]。

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 [1, 2]。しかし、このような計算法は画像ノイズや投影条件に大きく影響を受けるため、安定に計算するのは非常に難しいことが知られている。これに対し著者らは2つのカメラを相互に投影しあうことにより、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2つのカメラ間の Fundamental 行列を安定に計算する手法 [9] や、3つのカメラ間の Trifocal Tensor を安定に計算する手法 [5]、そして4つのカメラ間の Quadrifocal Tensor を計算する手法 [8] を提案してきた。本論文では2つのカメラ間の相互投影によるエピポーラ幾何計算法 [9] を拡張し、 N 台のカメラが相互に投影されている場合の N 台のカメラ間のエピポーラ幾何を安定に求め形状復元する手法を提案する。

2 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、

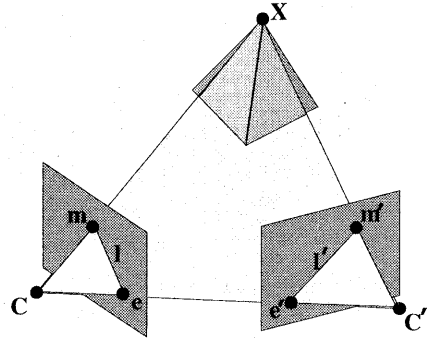


図 1: エピポーラ幾何

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。

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

ここで (\sim) は齊次座標であることを表す。このとき、Fundamental 行列 F は 3×3 の7自由度の行列である。

F 行列はそれぞれ自由度2のエピポール e, e' と自由度3のエピポーラ・ホモグラフィー H によって次のように記述することができる [7]。

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

ここで R は

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

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・ホモグラフィー H は、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1次元射影変換である。

このような 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、これは次式の線形方程式を解くことにより求めるものである [4]。

$$Df = 0 \quad (4)$$

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

$$\begin{aligned} f &= [f_{11}, \dots, f_{33}]^T \\ D &= [Z_1^T, \dots, Z_8^T]^T \\ Z_i &= [x_i x'_i, y_i x'_i, x'_i, x_i y'_i, y_i y'_i, y'_i, x_i, y_i, 1] \end{aligned}$$

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。 \mathbf{F} 行列計算の不安定さの要因として、エピポール計算の不安定さがあげられる。

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安定に \mathbf{F} 行列全体を計算することが可能になる [9]。本論文では、この相互投影によるエピポーラ幾何計算法を一般の N 台のカメラの場合に拡張する。

3 相互投影を用いたマルチカメラの校正

3.1 2台のカメラの相互投影法

まず2台のカメラ間のエピポーラ幾何を相互投影法により求める方法 [9] について簡単に説明する。

\mathbf{F} 行列とエピポール e, e' には次の関係がある。

$$\mathbf{F}\tilde{e} = 0 \quad (5)$$

$$\mathbf{F}^T \tilde{e}' = 0 \quad (6)$$

2台のカメラが相互に投影されている場合、カメラの像としてエピポール e, e' を画像中から直接求めることができる。このようにして得られた e, e' より次に示す \mathbf{f} に関する線形拘束が得られる。

$$\mathbf{M}_1 \mathbf{f} = 0 \quad (7)$$

ここで \mathbf{M}_1 は次に示すとおりである。

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} e_u & e_v & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_u & e_v & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_u & e_v & 1 \\ e'_u & 0 & 0 & e'_v & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & e'_u & 0 & 0 & e'_v & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & e'_u & 0 & 0 & e'_v & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(7) 式には6つ式があるが、この内独立なものは5つのみである。したがって、一般の対応点3点による拘束式と組み合わせることにより、次式より \mathbf{f} が求まる。

$$\mathbf{M} \mathbf{f} = 0 \quad (8)$$

$$\mathbf{M} = \left[\mathbf{M}_1^T \quad \mathbf{Z}_1^T \quad \mathbf{Z}_2^T \quad \mathbf{Z}_3^T \right]^T$$

以上のように2つのカメラが相互投影されている場合には3点の対応点より \mathbf{F} 行列が求まる。

3.2 マルチカメラの相互投影

そこで本論文では2台のカメラ間の相互投影を用いたエピポーラ幾何計算を拡張して、 N 台のカメラを相互に投影しあうことですべてのカメラ間の校正を行う手法を提案する。

一般にカメラの台数が増えるにつれ、これらのカメラが相互に投影される確率が高くなる。しかしカメラの画角は限られているため、すべてのカメラが相互に投影されることはない。そこで本研究では、各カメラに他の2台のカメラが投影されており、このような相互投影がチェーン状に繋がっている状態を考える。例えば図2に示すように5台のカメラ C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 が存在する場合には、 $C_1 C_3$ 間、 $C_3 C_5$ 間、 $C_5 C_2$ 間、 $C_2 C_4$ 間、 $C_4 C_1$ 間でそれぞれ相互投影が起こっているとする。以下では、 N 台の各カメラに他の2台のカメラが相互投影されており、この相互投影がチェーン状に繋がっているという条件のもとですべてのカメラ間のエピポーラ幾何の計算を行い、全カメラを弱校正する方法を提案する。

3.3 相互投影によるマルチカメラの校正

簡単のため、まず5台のカメラが相互に投影されている場合について説明する。図2のように C_1, \dots, C_5 の5台のカメラが配置されているとする。このとき、 C_1 には C_3 および C_4 が投影されているとする。同様にその他のカメラにおいても、そのカメラに隣り合わない2つのカメラが投影されているとする。

すると3.1節で述べた相互投影法により、カメラの投影像を利用しながらカメラ C_1 とカメラ C_3 の間のエピポーラ幾何が計算できる。同様にして C_3 と C_5 間、 C_5 と C_2 間、 C_2 と C_4 間、 C_4 と C_1 間においても、相互投影法によりエピポーラ幾何を計算することが出来る。以上のことはそのまま N 台のカメラに拡張して考えることができる。すなわち、 N 台のカメラが存在する状態においてどのカメラにおいてもその他の2台のカメラが投影されており、かつこの相互投影がチェーン状につながっている場合、以上に述べた方法を繰り返して行く事により、全てのカメラ間の \mathbf{F} 行列を求めることができる。

2台のカメラ C_i, C_j 間の基礎行列 \mathbf{F}_{ij} が求まると、 i 番目のカメラ C_i のカメラ座標を基準とした i 番目と j 番目のカメラのカメラ行列 $\mathbf{P}_{ii}, \mathbf{P}_{ij}$ が

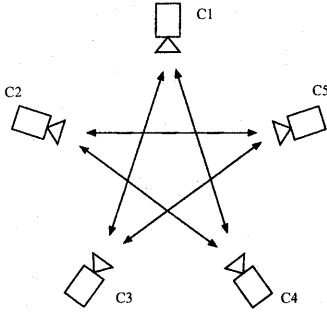


図 2: カメラ配置

それぞれ以下のように求まる [6]。

$$\mathbf{P}_{ii} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_{ij} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ij} & \mathbf{e}_{ji} \end{bmatrix} \quad (10)$$

ここで、 \mathbf{P}_{ij} はカメラ C_i を基準としたカメラ C_j のカメラ行列であり、 \mathbf{M}_{ij} は次に示す 3×3 行列である。

$$\mathbf{M}_{ij} = [\mathbf{e}_{ji}] \times \mathbf{F}_{ij} \quad (11)$$

これより、カメラ C_1 とカメラ C_3 間の \mathbf{F}_{13} 行列を用いて、カメラ C_1 を基準としたカメラ C_1 のカメラ行列 \mathbf{P}_{11} とカメラ C_3 のカメラ行列 \mathbf{P}_{13} をそれぞれ次のように求めることができる。

$$\mathbf{P}_{11} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{P}_{13} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{13} & \mathbf{e}_{31} \end{bmatrix} \quad (13)$$

同様にして、カメラ C_3 とカメラ C_5 間の \mathbf{F}_{35} 行列を用いて、カメラ C_3 を基準としたカメラ C_3 のカメラ行列 \mathbf{P}_{33} とカメラ C_5 のカメラ行列 \mathbf{P}_{35} がそれぞれ次のように計算できる。

$$\mathbf{P}_{33} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{P}_{35} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{35} & \mathbf{e}_{53} \end{bmatrix} \quad (15)$$

同様にして他の 2 台のカメラ間でもカメラ行列を求める事ができる。

しかしこのようにして求めたカメラ行列は一方のカメラを基準としたもう一方のカメラのカメラ行列であり、全体としてひとつの基準座標に統一されていない。そこで、次にカメラ C_1 を基準としたカメラ行列に統一する方法を示す。上記の方

法でカメラ C_3 のカメラ行列は 2 通り求まっている。すなわち、カメラ C_1 を基準とした \mathbf{P}_{13} とカメラ C_3 を基準とした \mathbf{P}_{33} である。そこで以下のようにこれらのカメラ行列を変換する射影変換行列 \mathbf{H}_{13} を考える。

$$\mathbf{P}_{13} = \mathbf{P}_{33} \mathbf{H}_{13} \quad (16)$$

このような射影変換行列 \mathbf{H}_{13} が求めれば、カメラ C_1 を基準としたカメラ C_5 のカメラ行列 \mathbf{P}_{15} は \mathbf{P}_{35} より以下のように求めることができる。

$$\mathbf{P}_{15} = \mathbf{P}_{35} \mathbf{H}_{13} \quad (17)$$

そこで \mathbf{H}_{13} の計算法について考える。まず、 \mathbf{P}_{13} 及び \mathbf{P}_{33} が得られているのでこれらを用いて (16) 式より \mathbf{H}_{13} に関する拘束が得られる。カメラ行列 \mathbf{P}_{ij} は 11 自由度なので (16) 式は \mathbf{H}_{13} に関して 11 の拘束を与える。一方 (12) 式 (13) 式よりカメラ行列が得られると、これらより画像に投影された点をカメラ C_1 を基準に射影復元することができる。この復元結果を \mathbf{X}_1 とする。さらにこの点が C_5 にも投影されている場合には (14) 式と (15) 式より求めたカメラ行列よりカメラ C_3 を基準にこの点を射影復元することができる。この結果を \mathbf{X}_3 とすると、 \mathbf{X}_1 と \mathbf{X}_3 の間には次の関係がある。

$$\mathbf{H}_{13} \tilde{\mathbf{X}}_3 = \lambda \tilde{\mathbf{X}}_1 \quad (18)$$

この式からは \mathbf{H}_{13} に関して 1 つの独立な拘束が得られるので、空間中に 4 つの対応点があれば (18) 式より \mathbf{H}_{13} に関して 4 つの拘束が得られる。これを (17) 式による拘束と結合させることにより 15 の拘束が得られ、15 自由度の \mathbf{H}_{13} を計算することができる。

次に、 C_3 を基準としたカメラ行列 \mathbf{P}_{35} をカメラ C_1 を基準としたカメラ行列 \mathbf{P}_{15} に変換する行列 \mathbf{H}_{15} を計算する方法を示す。カメラ行列 \mathbf{P}_{35} と C_5 を基準とした \mathbf{P}_{55} の間には次のような関係がある。

$$\mathbf{P}_{35} \mathbf{H}_{13} = \mathbf{P}_{55} \mathbf{H}_{15} \quad (19)$$

\mathbf{H}_{13} は先に得られているため、(19) 式より \mathbf{H}_{15} に関して 11 の拘束が得られる。また、この射影変換行列 \mathbf{H}_{15} と射影復元結果には以下の関係が成り立つので、1 つの点がカメラ C_1, C_2, C_3, C_5 に共通に映っていれば、 \mathbf{H}_{15} に関して 1 つの拘束を得られる。

$$\mathbf{H}_{15} \tilde{\mathbf{X}}_5 = \lambda \tilde{\mathbf{X}}_1 \quad (20)$$

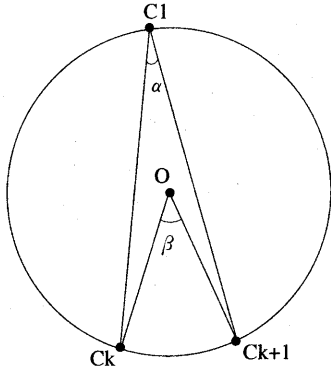


図 3: 視野角

ここで \mathbf{X}_5 は C_5, C_2 による復元結果である。従って 4 点が共通に投影されていれば、(19),(20) 式より \mathbf{H}_{15} に関して 15 の拘束が得られ、 \mathbf{H}_{15} を計算することができる。このようにして得られた \mathbf{H}_{15} よりカメラ C_1 を基準にしたカメラ C_2 のカメラ行列 \mathbf{P}_{12} は以下のように計算できる。

$$\mathbf{P}_{12} = \mathbf{P}_{52}\mathbf{H}_{15} \quad (21)$$

以下、同様の方法を繰り返すことにより、カメラ C_1 を基準とした各カメラのカメラ行列 $\mathbf{P}_{11}, \mathbf{P}_{12}, \mathbf{P}_{13}, \mathbf{P}_{14}, \mathbf{P}_{15}$ を計算することができる。このようにして全てのカメラがある基準座標をもとに弱校正できれば、通常の復元法により、シーン中の物体の 3 次元形状を復元することができる。

3.4 相互投影の必要条件

以上の通り、各カメラに他の 2 台のカメラが相互投影されており、このような相互投影がチェーン状につながっている場合には、相互投影情報を用いて全てのカメラを完全に校正することができる。そこで本節ではこのように N 台のカメラのそれぞれに他の 2 台のカメラが投影されるための必要条件について考える。

今図 3 のようにカメラ $C_k (k = 1, \dots, N)$ を正 N 角形の頂点に配置し、正 N 角形の外接円の中心を O とする。この時、角 β は以下ようになる。

$$\beta = \frac{2\pi}{N} \quad (22)$$

また正 N 角形は円に内接しているため角 α と角 β の関係から角 α が次のように求まる。

$$\alpha = \frac{\beta}{2} = \frac{\pi}{N} \quad (23)$$

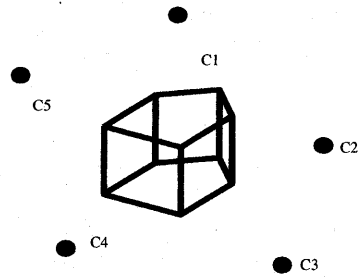


図 4: カメラ配置

よって、 N 台のカメラを正 N 角形の頂点に配置したとすると、カメラの視野角が π/N 以上であれば各カメラに他の 2 台のカメラを投影することが出来る。

カメラを正 N 角形に配置しない場合には、いずれかのカメラにおいてより大きな視野角を必要とするため、 π/N が N 台のカメラ全てにおいて相互投影を得るために最低限必要な視野角であることがわかる。

4 実験

本節では前節で述べた理論を用いてシミュレーション実験によるカメラ位置の計算、形状復元の安定性評価、および実画像による形状復元を行い、本論文で提案した手法の有効性を示す。

4.1 相互投影によるカメラ視点の計算および物体形状の復元

本実験では図 4 のように 5 つカメラ $C_i (i = 1, \dots, 5)$ が配置されており 5 台のカメラのほぼ中央部分に対象物が存在する。それぞれのカメラには相対する方向の 2 台のカメラと対象物が投影されている。

これら 5 台のカメラで得られた画像を図 5 (a) ~ (e) に示す。それぞれの画像中で黒丸は相対する 2 台のカメラの像を表わし、白丸は提案法で用いる 4 つの基底点の像を表わす。

まず、画像ノイズを印加した場合に提案法によるカメラ視点の計算および物体形状の復元を行い、相互投影を用いた場合と従来の 8 点法 [1] を用いた場合との比較を行った。図 5 の各投影点に標準偏差 1pixel の画像ノイズを印加してそれぞれの手

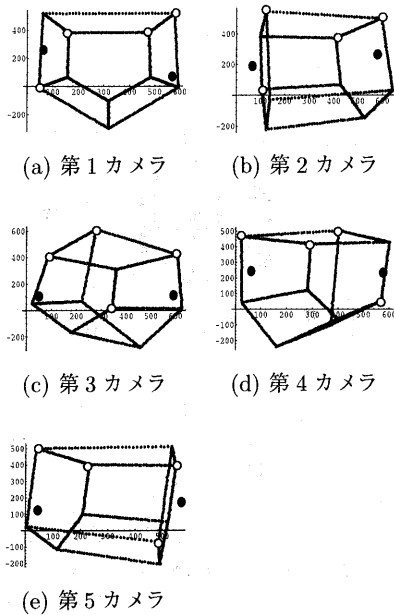


図 5: カメラ画像

法でカメラ視点の計算を 100 回行った。カメラ視点の計算結果を図 6 に示す。

カメラ視点、物体形状の復元結果には射影変換の不定性が残っているが、この結果に対して物体上の 5 点に正しい基底座標を与えてユークリッド復元に変換し、計算結果の安定性を評価した。この時に基準とした 5 つの射影基底点を図 6 に白丸で示す。図 6 中の楕円体はカメラ視点の復元結果に対する 3σ の不確定領域を表している。図 6 (a) は従来法を、また (b) は提案法を用いて計算した結果である。従来の 8 点法では求めたカメラ視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、提案法では非常に安定にカメラ視点が求まっていることがわかる。

次に図 5 の各投影点に標準偏差 2pixel の画像ノイズを印加してそれぞれの手法で物体形状の復元を 100 回行った。物体形状の復元結果を図 7 に示す。

先と同様に図中の白丸の 5 点に正しい射影基底座標を与えて評価を行った。図中の楕円体は対象物上の各点の 3σ の不確定領域を表す。(a) は従来法による復元を、また (b) は提案法による復元を表す。対象物上に基底点を取っているためそれほ

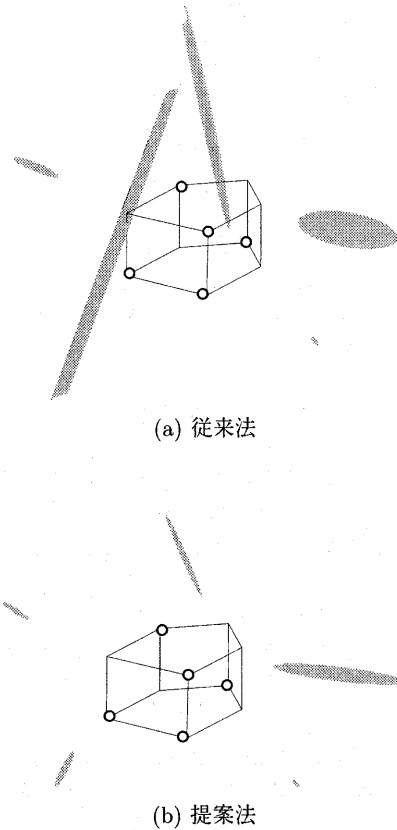
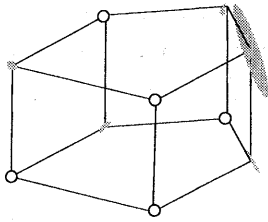


図 6: カメラ視点の計算結果

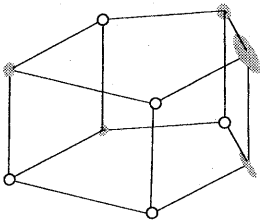
ど大きな差が見られないが、やはり従来法よりも提案法の方がより安定な結果が得られていることがわかる。

4.2 実画像による射影復元

次に、実画像を用いた射影復元について示す。本実験では図 8 に示すように 5 台のカメラを配置し、これらのカメラから得られる画像を用いて、従来法と提案法を用いて射影復元を行い、それぞれの復元精度を比較した。図 9 に 5 台のカメラより得られた画像を示す。これらの画像では、対象物(画像中央の箱)と共に相対する 2 台のカメラ(画像中、左上と右上)が相互投影されていることがわかる。また、図中の黒丸は対応点を表す。従来法では画像中の 8 組の対応点から、提案法では画像中の 3 組の対応点と 1 組のエピポールから Fundamental 行列を計算し復元を行った。尚、提案法で用いたエピ



(a) 従来法



(b) 提案法

図 7: 物体形状の復元結果

ポールは画像中のカメラ像の中心を手動で指定することにより得た。このようにして復元を行った結果を図 10 に示す。尚、図 10 では白丸で示す点を射影基底とし、これらの点を基準にその他の点の復元安定性を表示している。図 10 より従来法の復元では形が大きくゆがみ、安定に形状復元できていないのに対し、提案法による復元では非常に安定に形状復元できていることがわかる。

5 まとめ

本論文ではカメラの位置や姿勢の情報が分からないマルチカメラを相互投影法を用いることで校正し、3次元物体を復元する手法を提案した。この手法ではマルチカメラの相互投影より計算した2台のカメラ間のエピポーラ幾何と、それぞれのカメラ対での射影復元の結果より、全てのカメラを射影的な不定性を除いて校正できることを示した。

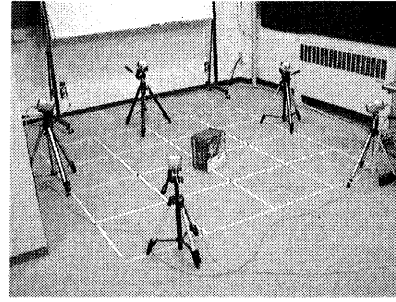
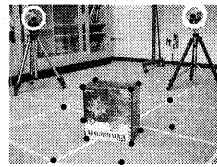
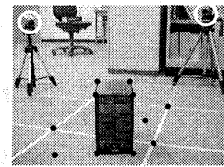


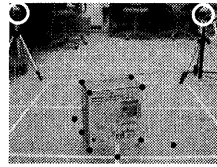
図 8: 実画像実験におけるカメラ配置



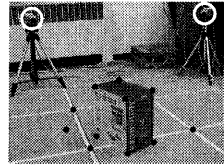
(a) 第1カメラ



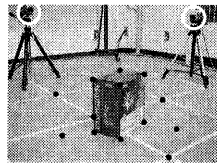
(b) 第2カメラ



(c) 第3カメラ



(d) 第4カメラ

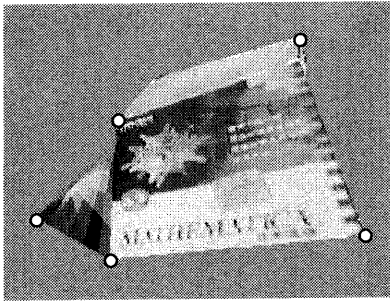


(e) 第5カメラ

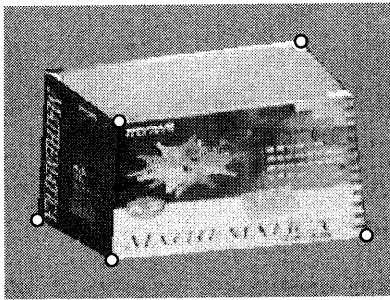
図 9: 5 台のカメラの実画像

提案法では全てのカメラ間で4点が共通に投影されていればよい。また従来法と比べて非常に安定に校正と復元が可能である。実際に提案法を用いてカメラの視点を計算し、物体の形状を復元して提案法の有効性を示した。

今後の課題としては、1つの画像中に投影されるカメラの台数が増えた場合に対応して Trifocal Tensor や Quadrifocal Tensor を用いた手法に拡張していくことが考えられる。



(a) 従来法



(b) 提案法

図 10: 実画像における物体形状の復元結果

謝辞

日頃ご指導頂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] R.I. Hartley. In defense of the eight-point algorithm. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19(6):580-593, 1997.
- [2] H.C. Longuet-Higgins. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. *Nature*, 293:133-135, 1981.
- [3] R.Hartley and A.Zisserman. *Multiple View Geometry in computer vision*. Cambridge University Press, 2000.
- [4] Z. Zhang. Determining the epipolar geometry and its uncertainty: A review. *International Journal of Computer Vision*, 27(2):161-195, 1998.
- [5] 杉村 健之 and 佐藤 淳. 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. 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, Vol.43, No. SIG 11 (CVIM 5).
- [6] 徐 剛. コンピュータビジョン 技術評論と将来展望, pages 80-96. 新技術コミュニケーションズ, 1998.
- [7] 佐藤 淳. コンピュータビジョン—視覚の幾何学—. コロナ社, 1999.

- [8] 佐藤 淳. カメラの相互投影を用いたマルチカメラの弱校正. 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 講演論文集 (III):83-84, 2002.
- [9] 伊藤 満 and 佐藤 淳. カメラの相互射影によるエピポラ幾何計算と射影復元の安定化. 電子情報通信学会論文誌, J85-D-II(3):416-424, 2002.