

## ミラー映像を用いた多視点幾何

藤山 慎史<sup>†1</sup> 坂上文彦<sup>†1</sup> 佐藤 淳<sup>†1</sup>

本稿では、カメラと複数の平面鏡の間に成り立つ多視点幾何を提案する。カメラで鏡面を撮影した場合、カメラから直接見える像と平面鏡で反射した像を同時に観測することができる。このとき、実像と鏡像の間には複数のカメラで撮影を行った場合と同様の多視点幾何が存在する。このような多視点幾何は、撮影に用いたカメラと、鏡面の向こうにある仮想カメラからなる多視点幾何として表現することができる。この多視点幾何には通常が多視点幾何拘束に加えて鏡面特有の強い幾何拘束が存在するため、通常が多視点幾何よりも少ない対応点からより安定に幾何関係が計算可能であることを示す。また、実画像およびシミュレーション画像を用いた実験により、提案した方法の有効性を示す。

### Multiple View Geometries with Planar Mirrors and Cameras

SHINJI FUJIYAMA,<sup>†1</sup> FUMIHIKO SAKAUE<sup>†1</sup> and JUN SATO<sup>†1</sup>

In this paper, we propose multiple view geometry for a camera and planar mirrors. The geometry can be described as multiple view geometry with a real camera and virtual cameras on planar mirrors. Some additional constraints can be used for computing the geometries in addition to general multilinear constraints. By using the additional constraints, we can estimate multiple view geometry from fewer points than general cases. Furthermore, the constraints provides more accurate geometry estimation. We show some experimental results which show effectiveness of our proposed method.

<sup>†1</sup> 名古屋工業大学大学院 情報工学専攻

Department of Computer Science, Nagoya Institute of Technology

### 1. はじめに

近年、多視点幾何と呼ばれる、複数のカメラ間に成り立つ特有の幾何に関する研究が盛んに行われている<sup>1),4)</sup>。通常、このような多視点幾何は、複数のカメラを対象として考えられている。ところが、我々の日常生活において、ミラー映像などカメラ以外から視覚情報を取得する機会は多く存在する。すなわち、鏡をカメラのように扱うことができれば、カメラと鏡を組み合わせることで複数のカメラから得た画像を一枚の画像から取得することも可能であると考えられる。

そのため、近年ではこのようにカメラと鏡を組み合わせて、カメラから物体までの距離を計測する方法<sup>6),7)</sup> やシーンの3次元形状を復元する方法<sup>2),5)</sup> などが提案されている。ところが、これらの研究では、鏡とカメラの幾何関係を得るために大量の対応点が必要であったり、また、カメラモデルや投影する物体の形状を限定するなど、限定された状況の下で3次元形状復元や距離計測が行われていた。これらは提案された方法が鏡を鏡として捉えておらず、単なる一台のカメラとして扱っていることに起因する。すなわち、鏡面特有の多視点幾何については詳細な検討が行われず、従来の多視点幾何の延長として研究が行われてきた。さらに、複数の鏡を使用している場合においても、基本的には2視点幾何の組み合わせとしてシーンを捉えていた<sup>3)</sup>。このため、本来必要な対応点数より多くの対応点を用いて多視点幾何の計算が行われており、計算の安定性を損なう結果となっていた。

そこで、本研究では、カメラと複数の平面鏡の間に成り立つ多視点幾何について詳細な解析を行い、ミラー映像における多視点幾何の計算に必要な最小対応点数を明らかにする。さらに、従来よりも少ない対応点からより安定に多視点幾何を計算する方法を提案する。

### 2. ミラー映像

本章では、カメラが鏡を投影しているときに得られる画像についての解析を行う。図1は鏡に物体が映っている様子をカメラで撮影した画像である。このとき、実物体上の点  $x$  と鏡に映った点  $x'$  との関係を考える。今、空間中にカメラ、物体、鏡が図2のように配置されているとする。このとき、物体やカメラの鏡面に対して面対称な関係の鏡面物体、及び仮想カメラを考えることができる。

図1の点  $x$ ,  $x'$  は、図2の点  $X$ ,  $X'$  をカメラに投影した点である。さらに、 $x'$  は仮想カメラが物体  $X$  を投影した点と一致する。このため、カメラが鏡面を投影しているとき、画像中には実カメラと仮想カメラが同一の物体を投影した複数の画像が存在すると考えるこ

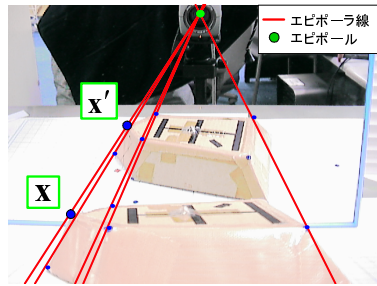


図 1 投影画像  
Fig. 1 Camera image

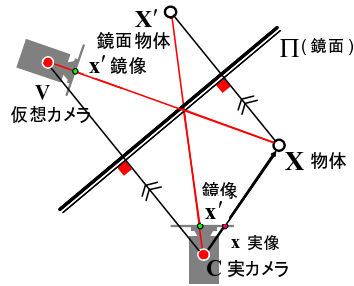


図 2 物体の配置図  
Fig. 2 Experimental environment

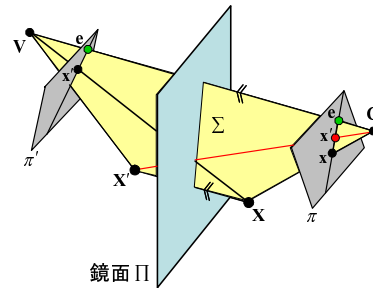


図 3 ミラー映像における 2 視点幾何  
Fig. 3 Two view geometry among a camera and a mirror

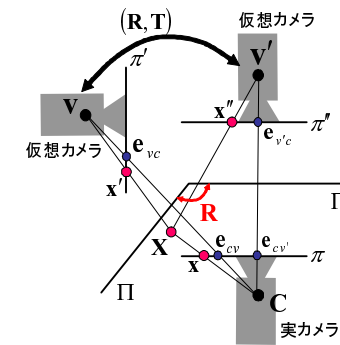


図 4 ミラー映像における 3 視点幾何  
Fig. 4 Three view geometry among a camera and two mirrors

とができる．よって，カメラと鏡との間に成り立つ幾何関係を実カメラと仮想カメラによる多視点幾何として捉えることができる．

### 3. ミラー映像における 2 視点幾何

まずはじめに，カメラと 1 枚の平面鏡の間に成り立つ 2 視点幾何について考える．今，図 3 に示すようにカメラ C と平面鏡  $\Pi$  が存在し，3 次元空間中の点 X がカメラ C，仮想カメラ V にそれぞれ点 x, x' として投影されているとする．すると， $x = [x^1, x^2, x^3]^T$  と， $x' = [x'^1, x'^2, x'^3]^T$  の間には，以下の bilinear 拘束が成り立つ．

$$x^i x'^j \mathcal{F}_{ji} = 0 \quad (1)$$

ここで， $\mathcal{F}_{ji}$  は  $3 \times 3$  の bifocal tensor である．鏡面によって反射して得られた像 x' は第 2 章で述べたように仮想カメラによる投影像と一致するため，x と x' はエピポーラ平面  $\Sigma$

と実カメラの画像平面  $\pi$  が交差してできる直線上の点であることが分かる．従って，これらを結ぶ直線はエピポーラ線となる．また，エピポールは実物体 X と鏡面物体 X' を結ぶ平行線の交点である無限遠点が画像平面  $\pi, \pi'$  に投影された消失点と見なすことができる．従って，実カメラと仮想カメラの 2 台のカメラ間の関係は並進運動する 2 台のカメラ間の関係と一致し，自己エピポーラの性質を持つ<sup>4)</sup>．このとき，画像点 x, x' の間には式 (2) に示す bilinear 拘束が成り立つ．

$$x^i x'^j \varepsilon_{ijk} e^k = 0 \quad (2)$$

ただし， $e = [e^1, e^2, e^3]^T$  はエピポールであり， $\varepsilon_{ijk}$  は  $\{i, j, k\}$  から  $\{1, 2, 3\}$  への置換が偶置換であれば 1，奇置換であれば -1，それ以外では 0 を取る tensor である．ミラー映像における bifocal tensor は e で表されるため，2 自由度しか持たない．従って，式 (2) に示す関係より，1 組の対応点から e に関する拘束式が 1 本得られる．このため，ミラー映像における 2 視点幾何は，2 組の対応点から計算することができる．

### 4. ミラー映像における 3 視点幾何

次に，1 台のカメラと 2 枚の平面鏡の間に成り立つ 3 視点幾何について考える．今，図 4 に示すようにカメラ C と平面鏡  $\Pi, \Pi'$  が存在し，3 次元空間中の点 X がカメラ C，仮想カメラ V, V' にそれぞれ点 x, x', x'' として投影されているとする．すると，x, x', x'' の間には，以下の trilinear 拘束が成り立つ．

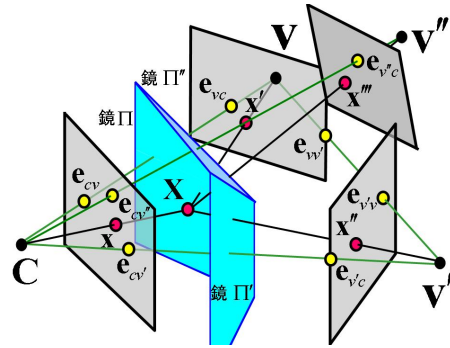


図 5 ミラー映像における 4 視点幾何

Fig.5 Four view geometry among a camera and three mirrors

$$x^i x'^j x''^k \varepsilon_{jqv} \varepsilon_{krv} T_i^{qr} = 0_{uv} \quad (3)$$

ここで、 $T_i^{qr}$  は  $3 \times 3 \times 3$  の trifocal tensor である。

このとき、実カメラ C と仮想カメラ V、実カメラ C と仮想カメラ V' の間には、第 3 章で示したようにそれぞれ自己エピポールの関係が成り立つ。ところが、仮想カメラ V、V' はそれぞれ鏡面の位置・姿勢に依存するため、これら 2 台のカメラ間の関係には 2 枚の鏡面  $\Pi, \Pi'$  間の相対的な回転が加わる。このため、仮想カメラ V、V' の関係は自己エピポールで表すことができない。しかし、V と V' の間には通常 2 視点幾何のように 7 自由度は存在せず、4 自由度のみとなる。これは、V と V' 間のエピポールには 1 自由度しかなく、この他に V と V' 間には 3 自由度のホモグラフィが存在するためである。この結果、カメラ 1 台と平面鏡 2 枚からなる 3 視点幾何には 8 自由度しか存在しないことが分かる。従って、trifocal tensor には 8 自由度しか存在せず、この 8 自由度の trifocal tensor が求められれば、カメラ 1 台と平面鏡 2 枚間の幾何学的関係が求まったことになる。

### 5. ミラー映像における 4 視点幾何

次に、1 台のカメラと 3 枚の平面鏡の間に成り立つ 4 視点幾何について考える。今、図 5 に示すようにカメラ C と平面鏡  $\Pi, \Pi', \Pi''$  が存在し、3 次元空間中の点 X がカメラ C、仮想カメラ V、V'、V'' にそれぞれ点  $x, x', x'', x'''$  として投影されているとする。すると、 $x, x', x'', x'''$  の間には次に示す quadrilinear 拘束が成り立つ。

$$x^i x'^j x''^k x'''^l \varepsilon_{ipa} \varepsilon_{jqb} \varepsilon_{krc} \varepsilon_{lsd} Q^{pqrs} = 0_{abcd} \quad (4)$$

ここで、 $Q^{pqrs}$  は  $3 \times 3 \times 3 \times 3$  の quadrifocal tensor である。

このとき、第 3 章で述べたように、実カメラと仮想カメラの間には自己エピポールの関係が成り立つが、仮想カメラ V、V'、V'' の間には自己エピポールの関係は成り立たない。しかし、第 4 章で述べたように C、V、V' の間には通常 2 視点幾何拘束よりも強い関係が成り立つ。この 3 視点幾何に対して新たに V'' が加わると、3 視点幾何の 8 自由度にさらに 2 自由度の  $e_{cv''}$ 、スケール 1 自由度、エピポールホモグラフィ 3 自由度の合計 6 自由度が加わる。この結果、カメラ 1 台と 3 枚の平面鏡からなる 4 視点幾何は 14 自由度を持つことがわかる。すなわち、14 自由度の quadrifocal tensor を求めることにより、カメラ 1 台と 3 枚の平面鏡の間の幾何学的関係を求めることができる。

### 6. 多視点幾何計算に必要な対応点数

本章では  $M - 1$  枚の鏡と、これを観測する 1 台のカメラが存在する状況下において、1 台の実カメラと  $M - 1$  台の仮想カメラとの間に成り立つ  $M$  視点幾何の計算に必要な対応点数について考える。

一般に、カメラから得られる自由度が 3 次元点の自由度と tensor の自由度の合計を上回っていれば、多視点幾何の計算ができる。tensor の自由度は 2 視点幾何の場合、自己エピポールが成り立つため 2 自由度となる。しかし、3 視点幾何以降では、鏡が 1 枚追加される毎にエピポールとスケール、鏡と鏡の相対関係を表すホモグラフィの合計 6 自由度が加わる。従って、tensor の自由度は  $2 + 6(M - 2)DOF$  となる。

カメラから得られる画像点は一般に 2 自由度を持つ。しかし、自己エピポールが成り立つ場合には、仮想カメラの画像点はエピポールと対応する実カメラの画像点を結びエピポール線上に必ず存在する。このため、仮想カメラの画像点は 3 点目以降では 1 自由度しか持たない。従って、カメラから得られる自由度は  $2N + (N + 2)(M - 1)DOF$  となる。このため、対応点数  $N$  が以下の式を満たすとき、多視点幾何が計算可能となる。

$$2N + (N + 2)(M - 1) \geq 2 + 6(M - 2) + 3N \quad (5)$$

式 (5) を整理すると、多視点幾何計算に必要な最小点数は次式で表されることがわかる。

$$N \geq \frac{4M - 8}{M - 2} = 4 \quad (M \geq 3) \quad (6)$$

従って、tensor 計算に必要な対応点数は表 1 に示す通りとなる。

表 1 多視点幾何計算に必要な対応点数  
Table 1 Number of corresponding points for computing multiple view geometry

	2 視点幾何	3 視点幾何	4 視点幾何
ミラー画像	2	4	4
一般画像	8	7	6

表 1 より、ミラー画像を用いた多視点幾何の方が通常の多視点幾何よりも少ない対応点から多視点幾何を計算することができることが分かる。

### 7. ミラー映像における 3 視点幾何計算

第 6 章の解析により、ミラー映像における 3 視点幾何や 4 視点幾何は 4 点の対応点より計算できることが明らかになった。そこで、本章では 2 枚の平面鏡が存在する場合において成り立つ 3 視点幾何を対応点 4 点より計算する方法を示す。ここでは、復元に基づく手法と鏡面特有の幾何拘束を適用する手法の 2 つを新たに提案する。

#### 7.1 復元に基づく 3 視点幾何計算法

本節では、実カメラ  $C$  と仮想カメラ  $V$ 、実カメラ  $C$  と仮想カメラ  $V'$  の 2 つの空間それぞれにおいて 3 次元点  $X$  を射影復元し、それぞれの復元結果から 2 つの射影空間を 1 つの射影空間に統合することを考える。そして、同一射影空間内の 3 つのカメラ行列を求めることで、3 台のカメラ間の関係を計算する手法について述べる。

まず初めに、実カメラと仮想カメラの 2 台のカメラ間で 3 次元点  $X$  を射影復元する。そのために、これら 2 台のカメラ間の関係を求める必要がある。第 3 章に記述したように実カメラと仮想カメラの間には自己エピポーラが成り立たため、これら 2 台のカメラ間の関係を表す 2 視点幾何は空間中の 2 組の対応点から計算できる。この結果、実カメラのカメラ行列を  $P_c$ 、仮想カメラのカメラ行列を  $P_v, P_{v'}$  とすると、それぞれのカメラ行列は以下のように求めることができる。

$$P_c = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, P_v = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & -e_{vc} \end{bmatrix}, P_{v'} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & -e_{v'c} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$e_{vc}, e_{v'c}$  は仮想カメラ  $V, V'$  が実カメラの光学中心  $C$  を投影した点であるエピポールを表す。しかし、式 (7) の  $P_c$  と  $P_v$  は射影空間  $C-V$  において定義されており、 $P_c$  と  $P_{v'}$  は射影空間  $C-V'$  において定義されている。このため、式 (7) に示す 3 台のカメラ行列  $P_c, P_v, P_{v'}$  から、trifocal tensor を正しく計算することはできない。よって、これらの射影空間を一つの射影空間に統合する必要がある。そこで、3 次元射影変換により空間を統合

することを考える。今、 $P_c$  と  $P_v$  により復元された 3 次元点を  $\hat{X}$ 、 $P_c$  と  $P_{v'}$  により復元された 3 次元点を  $\hat{X}'$  とすると、これらの間には以下の 3 次元射影変換の関係が成り立つ。

$$\hat{X}' = H_p \hat{X} \quad (8)$$

ここで、 $H_p$  は 3 次元射影変換を表す  $4 \times 4$  行列である。一般に、このような 3 次元射影変換は 15 自由度を持つことが知られている。ところが、2 つの射影空間  $C-V, C-V'$  にある 3 台のカメラ行列  $P_c, P_v, P_{v'}$  は式 (7) のように表すことができるため、空間統合のための 3 次元射影変換行列は以下に示すような形を取り、4 自由度しか持たない。

$$H_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ a & b & c & s \end{bmatrix} \quad (9)$$

次に、3 次元射影変換行列  $H_p$  を計算することについて考える。今、式 (8) に示す関係から、1 組の対応点から 3 次元射影変換行列  $H_p$  に関する拘束式が 1 本得られることが分かる。このため、空間  $C-V, C-V'$  それぞれにおいて、4 組の 3 次元点  $X_i, X'_i (i=1, 2, 3, 4)$  を射影復元し、これらを基底とすることで、3 次元射影変換行列  $H_p$  が計算できる。従って、3 次元射影変換行列  $H_p$  を計算するためには最低 4 組の対応点があれば良いことが分かる。また、この 3 次元射影変換  $H_p$  を用いることで、同一射影空間内の 3 台のカメラ行列が以下のように求まる。

$$P_c = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, P_v = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & -e_{vc} \end{bmatrix}, \hat{P}_{v'} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & -e_{v'c} \end{bmatrix} H_p \quad (10)$$

これらのカメラ行列を使用することで、trifocal tensor が計算できる<sup>1)</sup>。

以上より、同一射影空間内の 3 台のカメラ行列を求めるためには、実カメラと仮想カメラとの間で成り立つ 2 視点幾何を考え、それらの射影空間を統合する必要があった。また、これらの計算はそれぞれ独立であるため、2 視点幾何の計算に使用した 2 組の対応点は、空間統合のための 3 次元射影変換行列  $H_p$  の計算に使用した 4 組の対応点に含まれていても構わない。従って、trifocal tensor の計算に用いる対応点数は最低 4 組あればよく、ミラー映像における 3 視点幾何は 4 組の対応点から計算することができることがわかる。

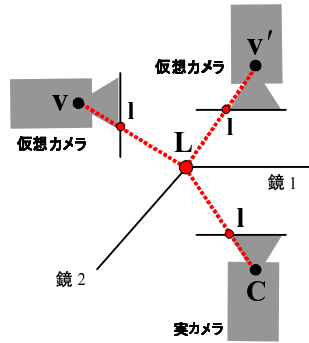


図 6 2枚の平面鏡特有の多視点幾何

Fig. 6 Three view geometry among a real camera and two virtual cameras on mirrors

### 7.2 鏡面特有の幾何拘束を用いた3視点幾何の計算法

複数の鏡面を利用した場合、鏡面特有の幾何関係が存在する。この関係を用いれば、前節で述べたような復元を介すことなく直接3視点幾何を計算することができる。

図6に示すように2枚の平面鏡が存在する場合、2つの鏡面の境界線Lは実カメラC、仮想カメラV及び、仮想カメラV'の3台のカメラに同一の直線lとして投影される。これは、CとV及び、CとV'が対称関係になっていることから明らかである。この鏡面特有の幾何関係は以下のような3直線間の3視点幾何拘束として表すことができる。

$$l_p l_q l_r \varepsilon^{piv} T_i^{qr} = 0^v \quad (11)$$

ここで、直線lは画像中から直接得られていない場合でも、仮想カメラ同士の間 Fundamental 行列  $F_{vv'}$  の計算を介すことで求めることができる。以下では、直線lの具体的な計算法について説明する。

図7に示すように、仮想カメラV、V'と空間中のある点Xから成るエピポーラ平面と2枚の平面鏡は必ず直線L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>で交わる。そして、この2直線はL上の1点X\*で必ず交わる。この時、エピポーラ平面と鏡面の交線はエピポーラ線として投影される。このため、図8に示すように、これら2台の仮想カメラ間のエピポーラ線l<sub>v</sub>とl<sub>v'</sub>の交点とX\*の投影点x\*が一致する。従って、対応する2本のエピポーラ線の交点x\*はいずれもLの投影像である直線l上に存在する。このため、2台の仮想カメラ間の Fundamental 行列  $F_{vv'}$  を用いることで、以下の拘束式が導出できる。

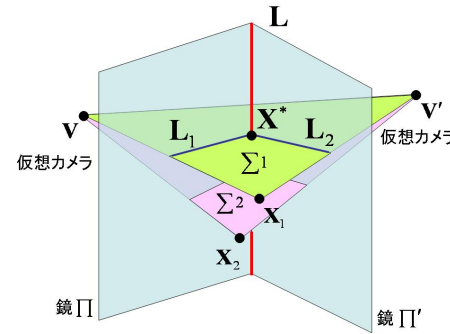


図 7 2枚の平面鏡特有の多視点幾何

Fig. 7 Three view geometry among a real camera and two virtual cameras on mirrors

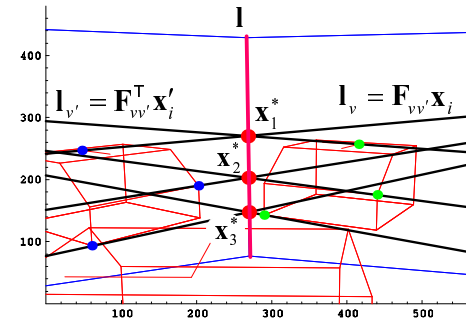


図 8 実カメラの投影像

Fig. 8 Image of a real camera

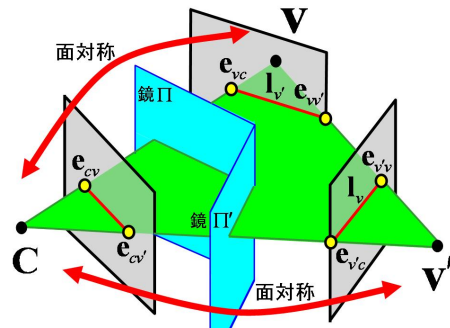


図 9 エピポールの面対称性

Fig. 9 Planar symmetry and epipoles

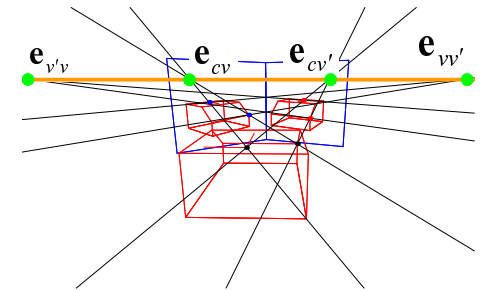


図 10 エピポール同士の関係

Fig. 10 Relationship among four epipoles

$$\det[M^T M] = 0 \quad (12)$$

ただし、Mは次に示すようにn個のエピポーラ線の交点x<sub>i</sub>\* (i = 1, ..., n)より成るn × 3行列である。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1^{*\top} \\ \vdots \\ \mathbf{x}_n^{*\top} \end{bmatrix}$$

ここで,  $\mathbf{x}_i^*$  ( $i = 1, \dots, n$ ) は  $\mathbf{F}_{vv'}$  を用いて以下のように表せる.

$$\mathbf{x}_i^* = \mathbf{F}_{vv'} \mathbf{x}_i \times \mathbf{F}_{vv'}^\top \mathbf{x}_i' \quad (13)$$

また, カメラ C を仮想カメラ V, V' に投影した点がエピポール  $\mathbf{e}_{vc}$  と  $\mathbf{e}_{v'c}$  であることから, 第一カメラの光学中心を対応点とした以下の拘束式を立てることができる.

$$\mathbf{e}_{v'c}^\top \mathbf{F}_{vv'} \mathbf{e}_{vc} = 0 \quad (14)$$

また, 第 1 仮想カメラ上の画像点  $\mathbf{e}_{vc}$  に対応する第 2 仮想カメラ上のエピポーラ線  $\mathbf{l}_v$ , 及び第 2 仮想カメラ上の画像点  $\mathbf{e}_{v'c}$  に対応する第 1 仮想カメラ上のエピポーラ線  $\mathbf{l}_{v'}$  は次式のように表すことができる.

$$\mathbf{l}_v = \mathbf{F}_{vv'} \mathbf{e}_{vc} \quad (15)$$

$$\mathbf{l}_{v'} = \mathbf{F}_{vv'}^\top \mathbf{e}_{v'c} \quad (16)$$

ここで, 図 9 のように実カメラ C と仮想カメラ V, 及び実カメラ C と仮想カメラ V' は, それぞれ 2 台のカメラ間の位置・姿勢が各鏡面に対して面対称であるため, 仮想カメラ上の直線  $\mathbf{l}_v$  と  $\mathbf{l}_{v'}$  は, 実カメラ中の 2 つのエピポール  $\mathbf{e}_{cv}, \mathbf{e}_{c'v'}$  を結ぶ直線と一致する. すなわち, 全てのエピポールは図 10 に示す通り一直線上に存在する. このため, 次式に示す拘束が存在する.

$$\mathbf{e}_{vc} \times \mathbf{e}_{v'c} = \mathbf{F}_{vv'} \mathbf{e}_{vc} = \mathbf{F}_{vv'}^\top \mathbf{e}_{v'c} \quad (17)$$

よって, 式 (12), 式 (17), 式 (14), 式 (1), 及び  $\det[\mathbf{F}_{vv'}] = 0$  より, 2 台の仮想カメラ間の  $\mathbf{F}_{vv'}$  が最低 4 組の対応点から計算できる. このようにして  $\mathbf{F}_{vv'}$  が求めれば, 式 (13) よりエピポーラ線の交点  $\mathbf{x}^*$  が計算でき, このような交点が 2 点以上得られれば, 次式により直線  $\mathbf{l}$  を求めることができる.

$$\mathbf{l} = \mathbf{x}_i^* \times \mathbf{x}_j^* \quad (i \neq j)$$

一方, 実カメラと仮想カメラの間に成り立つ自己エピポーラが 2 組存在するため, 2 組の対応点から 2 つのエピポールが計算できる. これらのエピポールは, 実カメラ C を仮想カメラ V, V' に投影したものであるから, 対応点として考えることができる. このため以下

の拘束が成り立つ.

$$e_{vc}^j e_{v'c}^k \varepsilon_{jqu} \varepsilon_{krv} T_i^{qr} = 0_{uv} \quad (18)$$

よって, 通常の 3 視点幾何拘束式 (3) に加えて式 (11), 式 (18) を適用することで, 最低 4 組の対応点から trifocal tensor を計算することが可能となる.

以下に, trifocal tensor の計算に使用できる拘束式をまとめる.

$$\begin{aligned} x^i x'^j x''^k \varepsilon_{jqu} \varepsilon_{krv} T_i^{qr} &= 0_{uv} \\ e_{vc}^j e_{v'c}^k \varepsilon_{jqu} \varepsilon_{krv} T_i^{qr} &= 0_{uv} \\ l_p l_q l_r \varepsilon^{piv} T_i^{qr} &= 0^v \end{aligned}$$

## 8. 実画像実験

本章では, 実画像を用いた実験により, 3 視点幾何の幾何計算を行い視点変換を行った結果を示す. 図 11 に本実験の様子を示す. 本実験では, 1 台のカメラと図 11 の黄色い円で囲った 2 枚の鏡  $\Pi, \Pi'$  を用いて提案法により trifocal tensor を計算した. 鏡面とカメラを固定して, 物体を動かすことで, 実カメラと 2 台の仮想カメラとの間で 50 組の対応点を取得した.

このとき, カメラで撮影された画像を図 12 に示す. 図 12 の赤色の点は実カメラに投影された画像点を表し, 緑色の点は第 1 仮想カメラに投影された点 (鏡面  $\Pi$  中の点) を, 黄色の点は第 2 仮想カメラに投影された点 (鏡面  $\Pi'$  中の点) を表す. 図 12 の青色で示す 9 組の対応点を用いて第 4 章で述べた提案法により trifocal tensor を計算した. 求めた trifocal tensor を用いて, 赤色で示す実カメラの画像点と, 緑色で示す第 1 仮想カメラの画像点から黄色で示す第 2 仮想カメラの画像点を推定した. その結果を図 13 に青色の点で示す.

推定された青色の点と実際に第 2 仮想カメラに投影された黄色の点がほぼ一致していることから, 3 視点幾何が正しく計算されていることがわかる. また, 画像中の 50 組の対応点に対して, 計算により求めた点と実際の点との平均 2 乗誤差を計算したところ, 2.34(pixel) であったことから, 3 視点幾何が精度良く計算されていることが確認できる.

## 9. 安定性評価

本章では, 提案法による 3 視点幾何計算の安定性をコンピュータ上で合成した画像を用いて定量的に評価する.

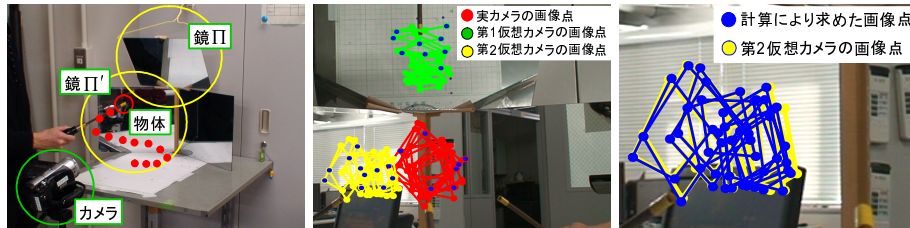


図 11 実験環境 Fig. 11 Experimental environment  
 図 12 カメラ画像 Fig. 12 Camera image  
 図 13 視点変換の結果 Fig. 13 Result of view transfer

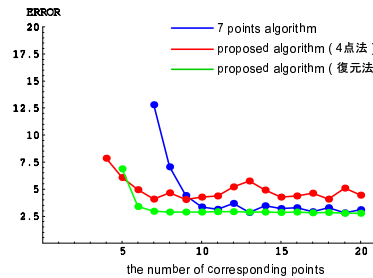


図 16 3 視点幾何計算評価

Fig. 16 Relationship between accuracy of point transformation and number of points.

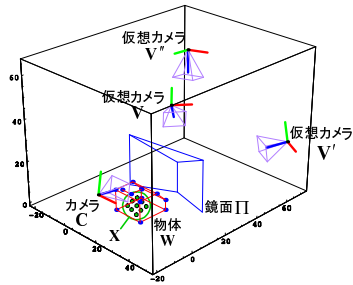


図 14 シミュレーション環境  
Fig. 14 Experimental enviroment

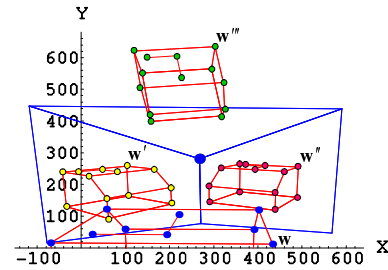


図 15 実カメラに投影される画像  
Fig. 15 Input image on real camera

本実験では、図 14 に示すように 1 台のカメラ  $C$  と 3 枚の鏡  $\Pi$ ,  $\Pi'$ ,  $\Pi''$ , 及び、3 台の仮想カメラ  $V$ ,  $V'$ ,  $V''$  を配置した。このとき、カメラ  $C$  において得られる画像を図 15 に示す。 $w_i, w'_i, w''_i, w'''_i (i = 1, \dots, 20)$  は、それぞれカメラ  $C$ , 仮想カメラ  $V, V', V''$  において得られる点  $W_i (i = 1, \dots, 20)$  の投影像である。多視点幾何計算に用いる点は、物体上の点  $W_i$  の 20 点とした。計算された多視点幾何を評価するために、 $W_i$  とは異なる点  $X_i (i = 1, \dots, 100)$  を物体  $W_i$  内にランダムに 100 点配置した。点  $X_i$  は 4 台のカメラにそれぞれ  $x_i, x'_i, x''_i, x'''_i$  として投影した。また、それぞれの画像点  $x_i, x'_i, x''_i, x'''_i, w_i, w'_i, w''_i, w'''_i$  に対して標準偏差 1pixel のガウスノイズを印加した。図 14, 図 15 では、見やすさのため  $X_i \in X, W_i \in W$  として表す。

図 15 の物体上の点  $w, w', w''$  の 20 組から trifocal tensor を計算した。このとき、7 組以上の対応点から線形に trifocal tensor を求める正規化 7 点法<sup>1)</sup> と、7.1 節に示した復元を介す手法 (復元法), 及び 7.2 節に示した 4 組以上の対応点から trifocal tensor を求める

提案法との比較評価を行った。評価は、計算により得られた trifocal tensor と  $x, x'$  の 2 つの対応点組から残りの 1 つの点  $x''$  を推定し、推定された点と実際に観測された点との距離により行った。得られた結果を図 16 に示す。

図 16 の横軸は 3 視点幾何計算に用いた対応点数であり、縦軸は trifocal tensor から計算した点と実際の点との距離の平均 2 乗誤差を表す。また、青色の点は従来法である 7 点法による誤差を表し、赤色の点は 4 組の対応点から計算した誤差を、緑色の点は復元を介す手法による誤差を表す。図 16 より、提案法の方が従来法より少ない対応点数でより安定な幾何計算が可能であることがわかる。これは、提案法では計算の空間が減少するためと考えられる。また、従来法では幾何学的に 18 自由度の問題を線形 26 自由度の問題として計算しているのに対し、提案法では幾何学的 8 自由度の問題を非線形 8 自由度の問題として解いており、余計な自由度を加えていないため安定になると考えられる。次に、鏡面特有の幾何拘束を用いる手法と復元を介す手法とを比較すると、復元を介す手法の方が高い精度が得られている。これは、前者では鏡面と鏡面が交差する直線を計算するために非線形式を解かなければならず、対応点が増加してもこの部分の計算精度が向上しないためであると考えられる。

## 10. 鏡面復元への応用

本章では、提案した理論を用いて鏡面の形状を復元する手法及び、実画像実験の結果について述べる。

### 10.1 鏡面の復元法

これまで述べてきた多視点幾何を計算すると、同時に複数台のカメラ間の相対的な視点位置を決定できる。従って、鏡面は実カメラと仮想カメラの視点を結ぶ線分に対して、垂直二等

分する無限に広がる平面上に存在すると考えられる。ただし、射影空間においては平行性、線分の比、直角性などの幾何情報が保存されない。このため、垂直二等分する平面という概念が存在しない。そこで、本章では内部パラメータを既知とすることで射影不定性を取り除き、鏡面形状の復元を行うことを考える。

内部パラメータが既知の場合、実カメラと仮想カメラから物体をユークリッド復元することができる。このとき、これらのカメラ間には並進の大きさに関する不定性のみが残る。従って、複数の鏡面を復元する場合には、実カメラと仮想カメラの間でそれぞれ独立に存在するスケールの不定性を取り除く必要がある。そこで、実カメラと仮想カメラのそれぞれのペアで復元された、複数の復元結果からスケール変換行列を求め、空間を統合する。この結果、同一ユークリッド空間内の仮想カメラの視点位置を求めることができ、実カメラと仮想カメラの視点をつなぐ線分を垂直二等分する平面として整合性の取れた複数の鏡面を復元することができる。

### 10.2 鏡面復元の実験結果

本章では、実画像を用いた実験により、提案法を用いることで複数の鏡面が正しく復元できることを示す。

まず、実験に用いた環境について示す。本実験では、図 17 に示すように、1 台のカメラ C と 4 枚の平面鏡  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$  を配置し、カメラと鏡面の間に物体 X を置いた。このような配置においてカメラ C により得られる入力画像を図 18 に示す。ここで、画像中の赤色の点は物体 X 上の点 W を投影したものであり、画像から 2 組の対応点を手動で選択したものである。また、紫色、ピンク、黄、水色で示す直線は、それぞれ、実カメラと 4 台の仮想カメラとの間のエピポーラ線を表す。

本実験では、図 18 の赤色の点で示す 2 組の対応点を用いて 10.1 節で提案した手法により鏡面を復元した。その結果を図 19 に示す。

図 17 と図 19 を見比べると、鏡面物体の概形が一致していることが見て取れる。以上より、鏡面物体の形状が提案法により正しく復元できることがわかる。

## 11. ま と め

本研究では、カメラと複数の平面鏡の間に成り立つ多視点幾何を提案した。さらに、多視点幾何を求めるために鏡面特有の幾何関係を適用する手法について述べ、従来よりも少ない対応点から安定に幾何計算ができることを確認した。また、提案した理論を用いることで、鏡面復元が可能であることを確認した。今後の課題としては、さらに安定な多視点幾何の計

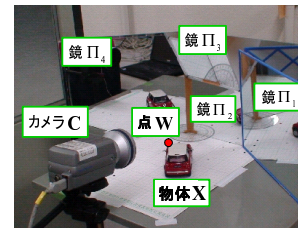


図 17 実験環境  
Fig. 17 Experimental environment

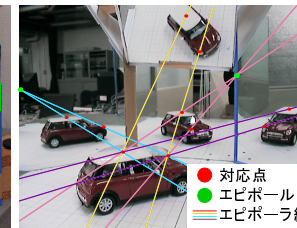


図 18 カメラ画像  
Fig. 18 Camera image

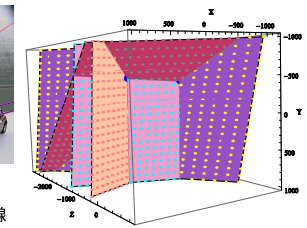


図 19 鏡面の復元結果  
Fig. 19 Reconstructed Mirrors

算法の検討および、鏡面上の多視点幾何を利用したオートキャリブレーションなどが考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) R.Hartley and A.Zisserman. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2000.
- 2) D.Q. Huynh. Affine reconstruction from monocular vision in the presence of asymmetry plane. *International Conference on Computer Vision*, Vol.1, pp. 476–482, 1999.
- 3) GianLuca Mariottini, Stefano Scheggi, Gabio Morbidi, Domenico Prattichizzo. Catadioptric stereo with planar mirrors. *Multiple-View Geometry and Camera Localization*, 2009.
- 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) 安室喜弘 井村誠孝 眞鍋佳嗣 浦西友樹, 千原國宏. 円筒鏡を用いた三次元形状計測システム. 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.47, pp. 143–151, 2006.
- 6) 越後富夫 栗田尚樹, 八木康史. 全方位物体検出のための複合球面鏡ステレオ. 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2004), Vol.1, pp. 362–367, 2004.
- 7) 姜偉清水雅夫, 奥富正敏. 超広角撮影の周辺視野を使った単眼高精度マルチステレオシステム. 第 15 回画像センシングシンポジウム (SSII2009) 講演論文集, pp. 1–8, 2009.