プロジェクタカメラシステムの多視点幾何とその応用

佐 藤 淳[†1]

プロジェクタの小型化高性能化にともない，プロジェクタカメラを用いた新たなシステム実現への期待が高まりつつある．特に近年では，複数のプロジェクタとカメラを用いたマルチプロジェクタカメラや，ダイナミックに位置や姿勢を変えるプロジェクタカメラに関する研究開発などが進展しつつある．本稿では，このような多数のプロジェクタとカメラが存在する場合に現れる特有な多視点幾何について述べる．特に，一見，邪魔物と見られがちなプロジェクタによってできる影に着目することで，プロジェクタカメラの校正やプロジェクタカメラを用いた 3 次元復元などが各段に安定化できることを示す．また，このようなプロジェクタカメラ特有の多視点幾何を用いた拡張現実感の例や，プロジェクタカメラをモバイル化したモバイルプロジェクタカメラなどの新しい応用の可能性に関しても述べる．

Multiple View Geometry for Projector Camera Systems and Its Applications

Jun Sato[†1]

The projector camera system has recently been applied for various new multimedia systems. In particular, multiple camera projector systems and dynamic camera projector systems have been studied recently. In this paper, we show the multiple view geometry for cameras and multiple projectors, and show some applications on augmented reality systems. In particular, we show that shadows made by projector light provide us very important information for calibrating projector camera systems and for reconstructing the 3D structure of the scene. We also show mobile projector camera systems, which can be applied for new multimedia systems.

1. はじめに

カメラとビデオプロジェクタを用いたプロジェクタカメラシステムは，近年，マンマシンインタラクション[1] や複合現実感[2),3] など様々な分野に応用されつつある．プロジェクタは通常平面のスクリーンに投影して用いるため，カメラ画像平面，プロジェクタ平面，スクリーン平面の 3 つの平面間の関係を用いてプロジェクタカメラシステムを構築することが可能である．すなわち，カメラ画像平面，プロジェクタ平面，スクリーン平面の 3 つの平面間の平面射影変換（homography）が求まればプロジェクタカメラシステムを構築することができる．このようなことから，3 つの平面間の関係を求めるプロジェクタカメラシステムの校正法が研究されている[4)–7)]．

Sukthanker ら[5)] は，スクリーンが矩形であることを利用してカメラ，プロジェクタ，スクリーン間の平面射影変換を求める方法を提案した．また，Okatani ら[6)] はプロジェクタの内部パラメータが既知であると仮定することにより，スクリーンの矩形輪郭がカメラによって観測できなくても，カメラ，プロジェクタ，スクリーン間の平面射影変換が求まることを示した．これらの研究ではスクリーンに投影する画像を制御することを目的としているため，各平面間の射影変換が求まればよい．

一方，プロジェクタ画像を非平面スクリーンへ投影したり，プロジェクタカメラシステムにより 3 次元計測を行ったりする場合には，カメラとプロジェクタの 3 次元位置および姿勢を校正する必要がある．このような校正は，カメラとプロジェクタ各々の 3×4 の投影行列を求めることでもある．東城ら[8)] は 3 次元座標が既知な基準儀を用いてカメラとプロジェクタの各々の投影行列を計算する方法を示している．しかし，このような基準儀を用いる方法では，3 次元座標が既知な基準儀を用意する必要がある．

†1 名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology

これに対して近年，佐藤[9] は，カメラが投光器であるという性質を積極的に利用することにより，プロジェクタによってできる任意の対称物の影の情報から，プロジェクタカメラシステムを射影的に校正する方法を示した．また，このようにして校正されたプロジェクタカメラシステムにより，空間中の 3 次元情報が，やはり物体の影情報を用いて復元可能であることを示した．1 台のプロジェクタと 1 台のカメラの組合せは 2 台のカメラと同等と見なせることから，プロジェクタカメラシステムには複数のカメラ間に成り立つ多視点幾何の知識を応用することが可能である[10)–12)]．しかし，プロジェクタが投光器であるという性質を積極的に用いれば，従来の複数のカメラ間で成り立つ幾何学的拘束よりはるかに強い拘束を得ることが可能となる．

本稿では，このようなプロジェクタカメラシステムにおけるプロジェクタとカメラ間の幾何学的な関係を影情報をもとに考える．特に，カメラ 1 台とプロジェクタ 1 台の場合のみでなく，複数のプロジェクタが存在する場合のプロジェクタカメラの多視点幾何が，影情報を用いることにより，より少ない対応点でより安定に求まることを示す．また，このような影情報を用いたプロジェクタカメラの校正や復元の応用例として仮想ピアノの実現例を示す．さらに，小型プロジェクタとカメラを一体化した携帯情報提示システムであるモバイルプロジェクタカメラを紹介する．

2. プロジェクタカメラの 2 視点幾何

本稿では，2 次元平面上の点や 3 次元空間中の点は斉次座標によって表す．すなわち 2 次元平面上の点 $\mathbf{x}$ は，その点が持つ x，y 座標との間に $[x, y, 1]^\top \sim [x^1, x^2, x^3]^\top$ なる同値関係が成り立つような斉次座標 $\mathbf{x} = [x^1, x^2, x^3]^\top$ によって表す．同様に 3 次元空間中の点は，その点の X，Y，Z 座標との間に $[X, Y, Z, 1]^\top \sim [X^1, X^2, X^3, X^4]^\top$ なる同値関係が成り立つ斉次座標 $\mathbf{X} = [X^1, X^2, X^3, X^4]^\top$ により表す．ここで $\sim$ は，一方を定数倍したときもう一方と等しいことを表す．また，本稿では点の斉次座標に上付き添字を用いるが，これは後に多視点幾何をテンソル表記を用いて表すためである．

まず，カメラとプロジェクタそれぞれ 1 台ずつよりなるプロジェクタカメラについて考える．一般にプロジェクタは単焦点カメラと同じ幾何学的な構造を持っていることから，プロジェクタもカメラと同じ投影幾何を用いて考えることができる．

今，プロジェクタ上の点 $\mathbf{x}' = [x'^1, x'^2, x'^3]^\top$ から投光した光が，3 次元空間中の点 $\mathbf{X} = [X^1, X^2, X^3, X^4]^\top$ で反射し，カメラに点 $\mathbf{x} = [x^1, x^2, x^3]^\top$ として投影されたとする．すると，この投影関係は以下のように表せる．

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{X} \tag{1}$$

$$\mathbf{x}' = \mathbf{A}'\mathbf{X} \tag{2}$$

ここで，$\mathbf{A}$，$\mathbf{A}'$ はそれぞれ 3×4 のカメラとプロジェクタの投影行列である．よく知られているように，2 台のカメラの投影像の間にはエピポーラ方程式が成り立つことから，カメラの像 $\mathbf{x}$ とプロジェクタの像 $\mathbf{x}'$ の間にも以下のエピポーラ方程式が成り立つ[10),11)]．

$$\mathbf{x}'^\top \mathbf{F} \mathbf{x} = 0 \tag{3}$$

このとき，7 自由度の基礎行列（$\mathbf{F}$ 行列）はプロジェクタとカメラとの間の相対的な位置姿勢の情報を表していることから，$\mathbf{F}$ 行列を求めることはプロジェクタカメラを校正することに等しい．すなわち，2 台のカメラの場合と同様に，空間中に 7 つ以上の点が存在すれば非線形に，また 8 つ以上の点が存在すれば線形解法により $\mathbf{F}$ 行列が求まり，プロジェクタとカメラの校正が射影的に行える．ところが，プロジェクタが投光器であるという性質を積極的に用いると，実は，2 台のカメラ間の校正よりもはるかに簡単に，しかもより安定にプロジェクタとカメラの校正を行うことが可能となる．以下では，このようなプロジェクタカメラ特有の 2 視点幾何について述べる．

一般にプロジェクタは投光器であることから，プロジェクタの前に対象物を置くと，その対象物の影がスクリーン上に映る．このような影は通常は邪魔者として扱われることが多く，複数のプロジェクタを使ってプロジェクタによって発生する影を消す方法なども提案されている[13)]．しかし，この影の情報は，実はプロジェクタカメラシステムを校正するうえで非常に重要な幾何学的情報を我々に与えてくれるのである．

今，**図 1** に示すように，プロジェクタ $\mathbf{P}$ とカメラ $\mathbf{C}$ と平面スクリーン Π が置かれているとする．このとき，プロジェクタの投光中心 $\mathbf{P}$ とカメラの視点 $\mathbf{C}$ を結ぶ直線がカメラの画像面と交わる点 $\mathbf{e} = [e^1, e^2, e^3]^\top$ はプロジェクタのカメラ画像上におけるエピポールである．同様に，この直線とプロジェクタの画像面との交点 $\mathbf{e}' = [e'^1, e'^2, e'^3]^\top$ はカメラのプロジェクタ画像上におけるエピポールである．ここで，3 次元空間中に点 $\mathbf{X}$ が存在し，この点がカメラ画像上に点 $\mathbf{x}$ として投影されているとする．また，プロジェクタの投光中心 $\mathbf{P}$ と $\mathbf{X}$ を結ぶ直線がプロジェクタ画像面と交わる点を $\mathbf{x}'$ とすると，点 $\mathbf{x}'$ は点 $\mathbf{X}$ のプロジェクタ画像面における像と考えることができる．したがってカメ

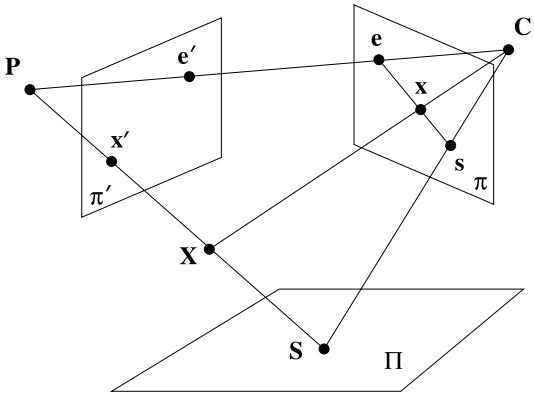


図 1 プロジェクタカメラの 2 視点幾何
Fig. 1 Two view geometry of projector camera systems.

ラ画像上の点 $\mathbf{x}$ とプロジェクタ画像上の点 $\mathbf{x}'$ とはステレオ視の関係にある．点 $\mathbf{x}$ はカメラ画像上において観測できるので，もしも $\mathbf{x}'$ が観測できれば，これらの点を用いてカメラとプロジェクタ間の $\mathbf{F}$ 行列が求まり，また 3 次元点 $\mathbf{X}$ を復元することができる．しかし，プロジェクタは投光器であるため，点 $\mathbf{x}'$ を観測することはできない．

ここで，3 次元空間中の点 $\mathbf{X}$ がスクリーン上にないとすると，プロジェクタから投光された光により，スクリーン上にこの点の影 $\mathbf{S} = [S^1, S^2, S^3, S^4]^\top$ が映る．プロジェクタの光は非常に強いため，通常このような影は非常に鮮明にスクリーン上に映る．このとき，カメラ画像には影 $\mathbf{S}$ の像が $\mathbf{s}$ として投影されているとする．すると，プロジェクタ画像面もカメラ画像面もスクリーン面も平面であるため，カメラに投影された影の像 $\mathbf{s} = [s^1, s^2, s^3]^\top$ とプロジェクタ画像面上の点 $\mathbf{x}' = [x'^1, x'^2, x'^3]^\top$ との関係は次に示すように平面射影変換によって表すことができる．

$$\mathbf{x}' = \mathbf{H}_{cp}\mathbf{s} \tag{4}$$

したがって，影の像 $\mathbf{s}$ は，プロジェクタ画像上の点 $\mathbf{x}'$ と同様に，3 次元空間中の点 $\mathbf{X}$ をプロジェクタの投光点 $\mathbf{P}$ に投影したときの投影像と見なすことができる．すなわち，カメラ画像上の点 $\mathbf{x}$ と点 $\mathbf{s}$ は，3 次元空間中の点 $\mathbf{X}$ を 2 つの異なる視点に投影したステレオ視の関係にあることが分かる．したがって，プロジェクタとカメラとの間の幾何学的な関係を表す $\mathbf{F}$ 行列は，カメラ画像上の物体の像 $\mathbf{x}$ と物体の影の像 $\mathbf{s}$ より求まる $\mathbf{F}$ 行列と射影的に等しいことが分かる．

ここで，$\mathbf{F}$ 行列が射影的に等しいとは，一方の $\mathbf{F}$ 行列に対して平面射影変換をかけたときにもう一方の $\mathbf{F}$ 行列となることをいう．このような関係にあるとき，これら 2 つの $\mathbf{F}$ 行列で表されたカメラ間の幾何学的関係は射影的に等しい．

このように，プロジェクタはカメラとは異なり物体を直接観測することはできないが，自分が出した光によってできる影をカメラにより観測することにより，間接的に物体を観測することができ，これをもとにプロジェクタカメラシステムの校正やプロジェクタカメラによる 3 次元復元を行うことができるようになる．そこで以降では，影に基づくプロジェクタカメラの校正や 3 次元復元を考える．

影に基づくプロジェクタカメラの校正においては，通常の 2 台のカメラの校正よりも強い幾何学的な拘束が存在し，これをもとにより少ない対応点からより安定に校正を行うことが可能となる．今，図 1 に示すように，プロジェクタ $\mathbf{P}$ からの光により空間中の点 $\mathbf{X}$ の影 $\mathbf{S}$ がスクリーン上で得られているとする．すると，3 次元空間中において $\mathbf{P}$，$\mathbf{X}$，$\mathbf{S}$ の 3 点は一直線上に存在することから，これらをカメラに投影した点 $\mathbf{e}$，$\mathbf{x}$，$\mathbf{s}$ も画像中において一直線上に存在することが分かる．この画像中の直線はエピポール $\mathbf{e}$ と点 $\mathbf{x}$ を通る直線であることから，点 $\mathbf{x}$ のエピポーラ線である．またこの直線はエピポール $\mathbf{e}$ と点 $\mathbf{s}$ を通る直線でもあることから点 $\mathbf{s}$ のエピポーラ線でもある．すなわちこの場合には，ステレオ視されている 2 つの画像上においてエピポーラ線とエピポールがともに等しいという自己エピポーラが成り立っていることが分かる[10]．自己エピポーラが成り立つとき，対応点どうしの関係は以下のようなエピポーラ方程式で表すことがきる．

$$\mathbf{s}^\top \mathbf{F}\mathbf{x} = 0 \tag{5}$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & -e^3 & e^2 \\ e^3 & 0 & -e^1 \\ -e^2 & e^1 & 0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

すなわち，この場合にはエピポール $\mathbf{e} = [e^1, e^2, e^3]^\top$ を求めることと，$\mathbf{F}$ 行列を求めることとは等しい．式 (6) の $\mathbf{F}$ 行列には定数倍の不定性があることから，この場合の $\mathbf{F}$ 行列の自由度は 2 しかないことが分かる．式 (6) を式 (5) に代入しテンソル表記を用いれば，この線形拘束は以下のように表せる．

$$x^i s^j \epsilon_{ijk} e^k = 0 \tag{7}$$

ここで，ϵ_{ijk} は $\{ijk\}$ の数の並びが偶置換である場合には 1 を，また奇置換である場合には -1 の値をとるテンソルであり，$\epsilon_{ijk}e^k$ とすることにより式 (6) の歪対称行列を表すことができる[12]．

1 組の対応点 $\mathbf{x} = [x^1, x^2, x^3]^\top$，$\mathbf{s} = [s^1, s^2, s^3]^\top$ からは式 (7) より $\mathbf{e} = [e^1, e^2, e^3]^\top$ に関する線形拘束が

1 本得られることから，2 組の対応点より $\mathbf{e}$ が求まり $\mathbf{F}$ 行列が計算できる．

3. プロジェクタカメラの 3 視点幾何

近年のプロジェクタカメラシステムでは，複数台のプロジェクタが用いられるケースが増えつつある．そこで次に，カメラ 1 台とプロジェクタ 2 台が存在するようなプロジェクタカメラシステムについて考える．

先に述べたように，プロジェクタは幾何学的には単焦点カメラと同等の性質を持つことから，これは 3 台のカメラ間の多視点幾何をベースに考えることができる．しかし，前章で述べたような影の情報に着目すれば，従来のカメラの 3 視点幾何よりもはるかに強い 3 視点幾何の拘束を得ることができ，これをもとに，より少ない対応点からより安定にカメラプロジェクタシステムを校正することが可能となる．

今，**図 2** に示すように，1 台のカメラ $\mathbf{C}$ と 2 台のプロジェクタ $\mathbf{P}_1$，$\mathbf{P}_2$ が存在するとする．このとき，$\mathbf{P}_1$ および $\mathbf{P}_2$ のカメラ画像における像 $\mathbf{e}_{c1}$ および $\mathbf{e}_{c2}$ を考えると，これらがそれぞれのプロジェクタのカメラ画像上におけるエピポールである．また，$\mathbf{P}_1$ と $\mathbf{P}_2$ を結ぶ直線を考え，この直線とスクリーン面との交点 $\mathbf{S}_{12}$ をカメラ画像に投影した点 $\mathbf{e}_{c12}$ を考えると，この点 $\mathbf{e}_{c12}$ は，プロジェクタ $\mathbf{P}_1$ とプロジェクタ $\mathbf{P}_2$ の間のエピポールをカメラ画像上において観測したものとなる．したがって，これら 3 つのエピポール $\mathbf{e}_{c1}$，$\mathbf{e}_{c2}$，$\mathbf{e}_{c12}$ が求まれば，プロジェクタカメラシステムの 3 視点幾何が射影的に一意に決まったことになる．このとき，$\mathbf{P}_1$，$\mathbf{P}_2$，$\mathbf{S}_{12}$ の 3 点は同一直線上に存在することから，これらのカメラ画像上の像 $\mathbf{e}_{c1}$，$\mathbf{e}_{c2}$，$\mathbf{e}_{c12}$ も同一直線上に存在する．したがって，これら 3 つのエピポールは互いに独立に存在することはできず，同一直線上の拘束があることからこれらの 3 つのエピポールが持つ自由度は $6-1=5$ 自由度である．すなわち，カメラ 1 台，プロジェクタ 2 台よりなるプロジェクタカメラの 3 視点幾何は，影情報をもとに考えれば 5 自由度であることが分かる．通常の 3 視点幾何が 18 自由度であることからすると，その自由度が非常に小さいことから，従来より少ない対応点でより安定に求められると考えられる．

ここで 3 次元空間中に点 $\mathbf{X}$ が存在するとすると，この点のカメラ画像における像 $\mathbf{x}$ が得られる．また，この点 $\mathbf{X}$ のプロジェクタ $\mathbf{P}_1$ によるスクリーン上の影を $\mathbf{S}_1$，プロジェクタ $\mathbf{P}_2$ によるスクリーン上の影を $\mathbf{S}_2$ とすると，これらの像 $\mathbf{s}_1$ および $\mathbf{s}_2$ がカメラ画像上において観測される．このとき，画像中

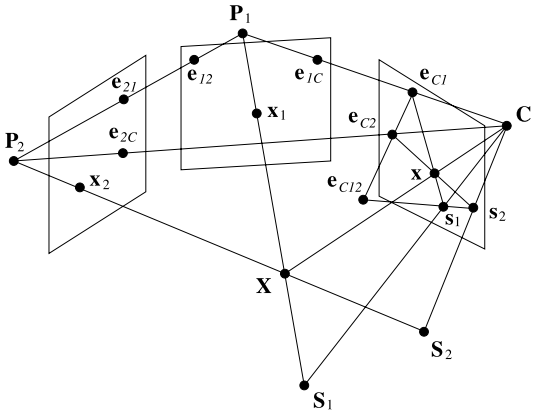


図 2 プロジェクタカメラの 3 視点幾何
Fig. 2 Three view geometry of projector camera systems.

の 3 つの点 $\mathbf{x} = [x^1, x^2, x^3]^\top$，$\mathbf{s}_1 = [s_1^1, s_1^2, s_1^3]^\top$，$\mathbf{s}_2 = [s_2^1, s_2^2, s_2^3]^\top$ の間には通常の 3 台のカメラの場合と同様に，以下の trilinear 拘束の関係が成り立つ．

$$x^i s_1^j s_2^k \epsilon_{jqu} \epsilon_{krv} \mathcal{T}_i^{qr} = 0_{uv} \tag{8}$$

ただし，この場合の trifocal tensor $\mathcal{T}_i^{qr}$ は，先ほど見たとおり，通常のカメラとは異なり 5 自由度しか持たない．この 5 自由度の $\mathcal{T}_i^{qr}$ を求めることは，プロジェクタカメラを射影的に校正することに等しい．そこで，$\mathcal{T}_i^{qr}$ が何組の対応点より求まるかを考えることにする．

$\mathcal{T}_i^{qr}$ を求めることは，$\mathbf{e}_{c1}$，$\mathbf{e}_{c2}$ および $\mathbf{e}_{c12}$ を求めることに等しい．2 視点幾何の場合と同様に画像上の $\mathbf{e}_{c1}$，$\mathbf{x}$，$\mathbf{s}_1$ の 3 点は図 2 に示すように同一直線上にあり，また $\mathbf{e}_{c2}$，$\mathbf{x}$，$\mathbf{s}_2$ の 3 点も同一直線上にある．したがって，空間中に 2 点 $\mathbf{X}_1$，$\mathbf{X}_2$ が存在すれば，これら 2 点のカメラ画像上の像と影の像より，$\mathbf{e}_{c1}$ および $\mathbf{e}_{c2}$ が求まる．さらに，$\mathbf{S}_1$，$\mathbf{S}_2$，$\mathbf{S}_{12}$ の 3 点も同一直線上に存在することから，これらの像 $\mathbf{s}_1$，$\mathbf{s}_2$，$\mathbf{e}_{c12}$ の 3 点も同一直線上にある．したがって，$\mathbf{e}_{c12}$ は $\mathbf{e}_{c1}$ と $\mathbf{e}_{c2}$ を結ぶ直線と，$\mathbf{s}_1$ と $\mathbf{s}_2$ を結ぶ直線の交点として求まる．

さて，このようにして求めた $\mathbf{e}_{c1}$，$\mathbf{e}_{c2}$，$\mathbf{e}_{c12}$ では，お互いのエピポール間の相対的な大きさが定まっていない．これらのエピポールは，カメラと 2 台のプロジェクタの間の並進を表していることから，以下の関係が成り立つように 3 つのエピポールのスケール α，β，γ を選ぶことで，これらのエピポール間の相対的な大きさを合わせることができる．

$$\alpha \mathbf{e}_{c1} - \beta \mathbf{e}_{c2} - \gamma \mathbf{e}_{c12} = \mathbf{0} \tag{9}$$

このようなスケール α，β，γ は以下の線形方程式を解くことで求まる．

$$\begin{bmatrix} \mathbf{e}_{c1} & -\mathbf{e}_{c2} & -\mathbf{e}_{c12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \mathbf{0} \qquad (10)$$

このようにしてスケール合わせを行ったエピポールを用いることにより，カメラと 2 台のプロジェクタの投影行列をそれぞれ以下のようにおくことができる．

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= [\ \mathbf{I} \quad \mathbf{0}\ ] \\ \mathbf{A}' &= [\ \mathbf{I} \quad \alpha\mathbf{e}_{c1}\ ] \\ \mathbf{A}'' &= [\ \mathbf{I} \quad \beta\mathbf{e}_{c2}\ ] \end{aligned} \qquad (11)$$

これらの投影行列より，trifocal tensor が以下のように求まる[12]．

$$\mathcal{T}_i^{jk} = \epsilon_{ipq} \det [\ \mathbf{a}^p \quad \mathbf{a}^q \quad \mathbf{a}'^j \quad \mathbf{a}''^k\ ] \qquad (12)$$

ここで，$\mathbf{a}^i$ は行列 $\mathbf{A}^\top$ の第 i 列を，$\mathbf{a}'^i$ は行列 $\mathbf{A}'^\top$ の第 i 列を，また $\mathbf{a}''^i$ は行列 $\mathbf{A}''^\top$ の第 i 列をそれぞれ表す．式 (11) と式 (12) より，この場合の trifocal tensor はエピポール $\mathbf{e}_{c1}$，$\mathbf{e}_{c2}$，$\mathbf{c}_{c12}$ のみから決まることが分かる．

以上より，この場合には空間中に 2 点が存在すれば，これらの像と影の像より $\mathcal{T}_i^{qr}$ が求まり，プロジェクタカメラが射影的に校正できることが分かる．

4. プロジェクタカメラの 4 視点幾何

次にカメラ 1 台とプロジェクタ 3 台が存在する場合のプロジェクタカメラの多視点幾何について考える．この場合には，4 台のカメラの多視点幾何がベースとなる．通常の 4 視点幾何は 29 自由度であることが知られている[11]．これに対して，影情報に基づくプロジェクタカメラの多視点幾何は 8 自由度しか持たず，より少ない対応点から計算可能であることを示す．

今，**図 3** に示すように，カメラ $\mathbf{C}$ と 3 台のプロジェクタ $\mathbf{P}_1$，$\mathbf{P}_2$，$\mathbf{P}_3$ よりなるプロジェクタカメラシステムがあるとする．このとき，カメラ画像上におけるそれぞれのプロジェクタに関するエピポール $\mathbf{e}_{c1}$，$\mathbf{e}_{c2}$，$\mathbf{e}_{c3}$ を考える．また，$\mathbf{P}_1$ と $\mathbf{P}_2$ を結ぶ直線とスクリーン面との交点を $\mathbf{S}_{12}$ とし，この点のカメラ画像における像を $\mathbf{e}_{c12}$ とする．同様に，$\mathbf{P}_1$ と $\mathbf{P}_3$ を結ぶ直線とスクリーン面との交点 $\mathbf{S}_{13}$ のカメラ画像における像を $\mathbf{e}_{c13}$ とし，$\mathbf{P}_2$ と $\mathbf{P}_3$ を結ぶ直線とスクリーン面との交点 $\mathbf{S}_{23}$ のカメラ画像における像を $\mathbf{e}_{c23}$ とする．すると，このプロジェクタカメラシステムを射影的に校正することと，これら 6 個のエピポール $\mathbf{e}_{c1}$，$\mathbf{e}_{c2}$，$\mathbf{e}_{c3}$，$\mathbf{e}_{c12}$，$\mathbf{e}_{c13}$，$\mathbf{e}_{c23}$ を求めることは等しい．

そこで，これら 6 個のエピポールの自由度について考える．まず，エピポール $\mathbf{e}_{c1}$，$\mathbf{e}_{c2}$，$\mathbf{e}_{c3}$ は 3 つのプロジェクタの配置に応じてまったく自由に振る舞えるので合計 6 自由度を持つ．次に，$\mathbf{e}_{c12}$ は $\mathbf{e}_{c1}$ と $\mathbf{e}_{c2}$ を結ぶ直線上に必ず存在するので 1 自由度しか持たない．同様に，$\mathbf{e}_{c13}$ は $\mathbf{e}_{c1}$ と $\mathbf{e}_{c3}$ を結ぶ直線上に必ず存在するのでやはり 1 自由度しか持たない．最後に $\mathbf{e}_{c23}$ は，$\mathbf{e}_{c2}$ と $\mathbf{e}_{c3}$ を結ぶ直線上に存在し，かつ，$\mathbf{e}_{c12}$ と $\mathbf{e}_{c13}$ を結ぶ直線上に存在するため 0 自由度である．$\mathbf{e}_{c12}$ と $\mathbf{e}_{c13}$ と $\mathbf{e}_{c23}$ の 3 点が同一直線上に存在することは，これら 3 点が，$\mathbf{P}_1$，$\mathbf{P}_2$，$\mathbf{P}_3$ の 3 点を通る平面と，$\mathbf{S}_1$，$\mathbf{S}_2$，$\mathbf{S}_3$ の 3 点を通る平面とが交わってできる直線上にあることから明らかである．以上より，カメラ 1 台とプロジェクタ 3 台のプロジェクタカメラの多視点幾何は，影情報に基づけば 8 自由度しかないことが分かる．一般の 4 視点幾何が 29 自由度であることからすると，非常に少ない自由度でその幾何が表現できることが分かる．

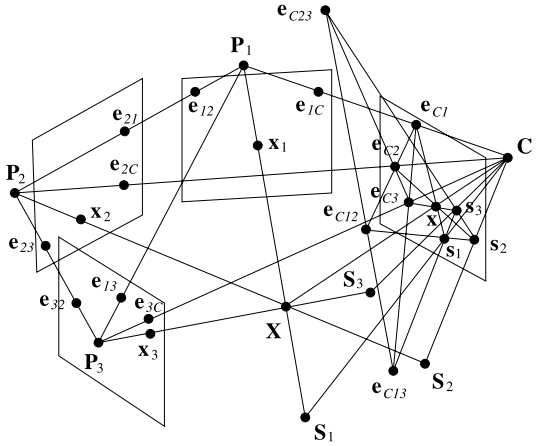


図 3 プロジェクタカメラの 4 視点幾何
Fig. 3 Four view geometry of projector camera systems.

ここで 3 次元空間中に点 $\mathbf{X}$ が存在するとすると，この点のカメラ画像における像 $\mathbf{x}$ が得られる．また，この点 $\mathbf{X}$ のプロジェクタ $\mathbf{P}_1$ によるスクリーン上の影を $\mathbf{S}_1$，プロジェクタ $\mathbf{P}_2$ によるスクリーン上の影を $\mathbf{S}_2$，プロジェクタ $\mathbf{P}_3$ によるスクリーン上の影を $\mathbf{S}_3$ とすると，これらの像 $\mathbf{s}_1$，$\mathbf{s}_2$，$\mathbf{s}_3$ がカメラ画像上において観測される．このとき，画像中の 4 つの点 $\mathbf{x} = [x^1, x^2, x^3]^\top$，$\mathbf{s}_1 = [s_1^1, s_1^2, s_1^3]^\top$，$\mathbf{s}_2 = [s_2^1, s_2^2, s_2^3]^\top$，$\mathbf{s}_3 = [s_3^1, s_3^2, s_3^3]^\top$ の間には以下の quadrilinear 拘束の関係が成り立つ．

$$x^i s_1^j s_2^k s_3^l \epsilon_{ipa}\epsilon_{jqb}\epsilon_{krc}\epsilon_{lsd}\mathcal{Q}^{pqrs} = 0_{abcd} \qquad (13)$$

ここで $\mathcal{Q}^{pqrs}$ は $3 \times 3 \times 3 \times 3$ の quadrifocal tensor であり，81 個の要素を持つが，先に見たとおり，そ

の自由度は 8 である．この 8 自由度の $\mathcal{Q}^{pqrs}$ を求めることは，プロジェクタカメラを射影的に校正することと等しい．3 視点の場合と同様に幾何学的に考えれば，空間中に $\mathbf{X}_1$，$\mathbf{X}_2$ の 2 点が存在すれば，これらの像と影の像より，6 個のエピポール $\mathbf{e}_{c1}$，$\mathbf{e}_{c2}$，$\mathbf{e}_{c3}$，$\mathbf{e}_{c12}$，$\mathbf{e}_{c13}$，$\mathbf{e}_{c23}$ が求まる．このようにして求めたエピポールではお互いの相対的な大きさが定まっていない．そこで，3 視点幾何の場合と同様に考えれば，これらのエピポールの間には以下のような関係があることが分かる．

$$\begin{bmatrix} \mathbf{e}_{c1} & -\mathbf{e}_{c2} & 0 & -\mathbf{e}_{c12} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{e}_{c2} & -\mathbf{e}_{c3} & 0 & -\mathbf{e}_{c23} & 0 \\ -\mathbf{e}_{c1} & 0 & \mathbf{e}_{c3} & 0 & 0 & -\mathbf{e}_{c13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \kappa \\ \lambda \\ \mu \end{bmatrix} = \mathbf{0} \tag{14}$$

式 (14) を解くことで，それぞれのエピポールのスケール α，β，γ，κ，λ，μ を決定することができる．このようにしてスケール合わせをしたエピポールを用いれば，カメラと 3 台のプロジェクタの投影行列が以下のように表せる．

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= [\ \mathbf{I} \quad \mathbf{0}\ ] \\ \mathbf{A}' &= [\ \mathbf{I} \quad \alpha\mathbf{e}_{c1}\ ] \\ \mathbf{A}'' &= [\ \mathbf{I} \quad \beta\mathbf{e}_{c2}\ ] \\ \mathbf{A}''' &= [\ \mathbf{I} \quad \gamma\mathbf{e}_{c3}\ ] \end{aligned} \tag{15}$$

これらの投影行列より，quadrifocal tensor を以下のように得ることができる[12]．

$$\mathcal{Q}^{pqrs} = \det [\ \mathbf{a}^p \quad \mathbf{a}'^q \quad \mathbf{a}''^r \quad \mathbf{a}'''^s\ ] \tag{16}$$

以上より，この場合の quadrifocal tensor は，空間中に 2 点が存在すれば求まることが分かる．

以上見てきた，2 視点，3 視点，4 視点幾何の自由度と必要対応点数を，従来の多視点幾何の場合と比較した結果を**表 1** に示す．いずれの場合においても，影情報を用いることで自由度が大幅に減少し，少ない対応点で多視点幾何が求まることが分かる．また，影情報に基づく場合には，線形計算において必要な最小点数と幾何学的な最小点数とが一致しており，線形計算により幾何学的に整合性のとれた multifocal tensor が求まることが分かる．

表 1 多視点幾何の自由度と計算に必要な最低点数
Table 1 DOF of multiple view geometry and the minimum number of corresponding points required for computing the geometry.

	従来の多視点幾何		影に基づく多視点幾何	
	自由度	必要点数	自由度	必要点数
2 視点幾何	7	7 (8)	2	2 (2)
3 視点幾何	18	6 (7)	5	2 (2)
4 視点幾何	29	6 (6)	8	2 (2)

( ) 内は，線形計算における必要点数

5. 影情報に基づくプロジェクタカメラの校正と 3 次元復元

近年の多視点幾何の研究より，カメラ間の多視点幾何を求めることと，これらのカメラを射影的に校正することとは，まったく等しいことが明らかになっている．すなわち，前章に述べたように影情報を用いて多視点幾何が求まると，カメラの投影行列とプロジェクタの投影行列をそれぞれ式 (15) のように得ることができる．

このようにしてカメラとプロジェクタの投影行列が求まると，これを N 台のカメラの投影行列と同等に扱い，カメラ画像上の対象物の像 $\mathbf{x}$ と対象物の影の像 $\mathbf{s}$ から，ステレオ視により 3 次元復元を行うことができる．ただし，投影行列には射影的な不定性が存在するため，これらの投影行列を用いて 3 次元復元を行った結果は，射影的な不定性が残る射影復元となる．

ここでもしもカメラとプロジェクタの内部パラメータが既知であったり自校正などによりこれを得ることができたりすれば，この射影的な不定性を取り除くことができ，ユークリッド復元を得ることができる．一方，完全にユークリッド的な 3 次元情報が得られなくても，射影復元のままで，あるいはアフィン復元に持っていくことにより，様々なアプリケーションに応用することもできる．

影情報による復元では，自己エピポーラの性質によりプロジェクタカメラの校正が安定に行われるため，非常に安定に復元結果が得られる．**図 4** は，プロジェクタ 1 台，カメラ 1 台の環境下において，空間中の 1 点が 3 次元運動を行った場合の運動の軌跡とその影の軌跡の例である．これらの 3 次元運動の投影像と影の投影像に標準偏差 1 画素のノイズを与えて $\mathbf{F}$ 行列を計算した結果を**図 5** に実線で示す．破線は従来の正規化 8 点法を用いた場合の結果である．図より，影の自己エピポーラの性質を用いた方が格段に安定に $\mathbf{F}$ 行列を計算でき，プロジェクタカメラをより良く校正できることが分かる．また**図 6** (a) は，図 4 の運動に

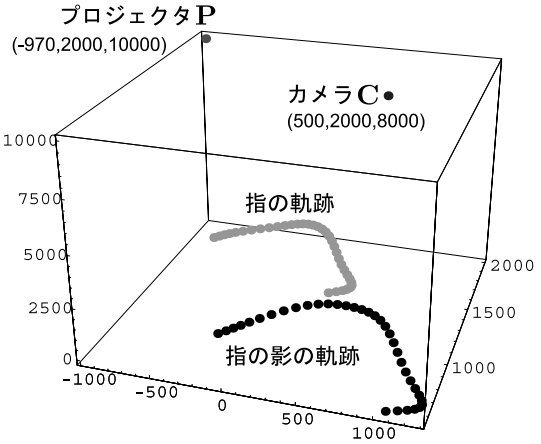


図 4 3 次元運動と影の運動
Fig. 4 3D motion of an object and the motion of its shadow.

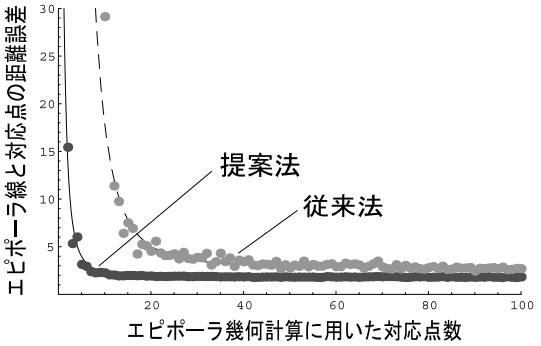
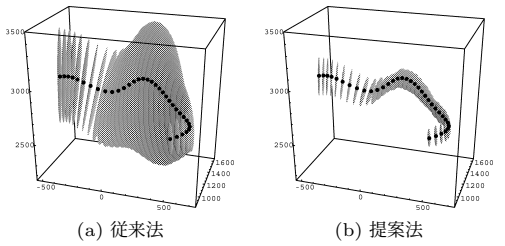


図 5 エピポーラ幾何計算の評価
Fig. 5 Accuracy of computed epipolar geometry.



(a) 従来法 (b) 提案法

図 6 3 次元復元の評価
Fig. 6 Stability of 3D reconstruction.

関して，従来の正規化 8 点法によりエピポーラ幾何を計算して 3 次元復元を行った結果である．これに対して，(b) は影情報を用いてエピポーラ幾何を計算し 3 次元復元した結果である．図中の楕円体は標準偏差 1 画素の画像ノイズを与えて復元を繰り返した場合に得られる復元結果の 3σ の不確定領域を表す．この結果より，影情報を用いた場合には，3 次元復元が格段に安定化することが分かる．

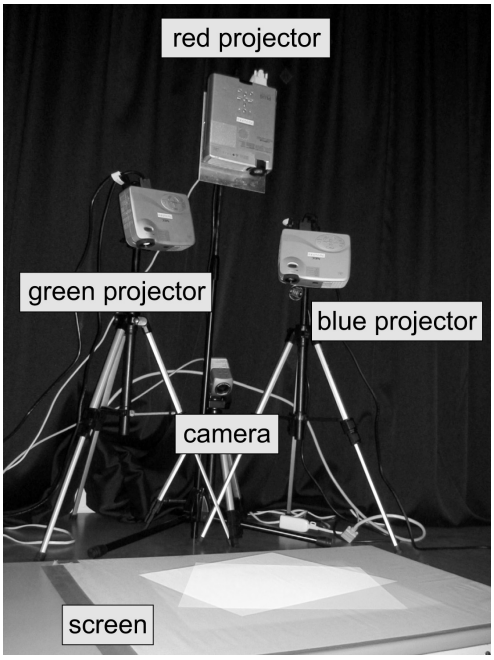


図 7 3 台のプロジェクタと 1 台のカメラよりなるプロジェクタカメラ
Fig. 7 Projector camera system from 3 projectors and 1 camera.

次に実際のプロジェクタカメラシステムにおける実験結果を示す．本実験では，**図 7** に示すように，カメラ 1 台とプロジェクタ 3 台よりなるプロジェクタカメラを用いた．これらのプロジェクタとカメラは未校正であり，また位置姿勢などもまったく分からない．プロジェクタを複数用いた場合には，スクリーン上にできる複数のプロジェクタの影の見分けがつかないという問題点がある．そこで，3 台のプロジェクタから，それぞれ赤，緑，青，の単一色の光を出し，これらを平面射影変換を用いてスクリーン上で合成することにより，スクリーン上にはカラー画像を生成しつつ，スクリーン上にない点に関しては色の異なる影ができるようにした．**図 8** はこのようなプロジェクタシステムにおける影の色の付き方を示している．プロジェクタの光の補色が影の色となるため，色情報によりどのプロジェクタの影かが分かる．**図 9** は実際のカメラの画像の例であり，**図 10** (a)，(b)，(c)，(d) は，色情報をもとに分離した，物体像とそれぞれのプロジェクタの影の像である．このようにして分離した影の像と物体の像を用いて，4 章で述べた 4 視点幾何の計算を行った．**図 11** は，このようにして計算したエピポーラ線の例である．プロジェクタカメラの 4 視点幾何は

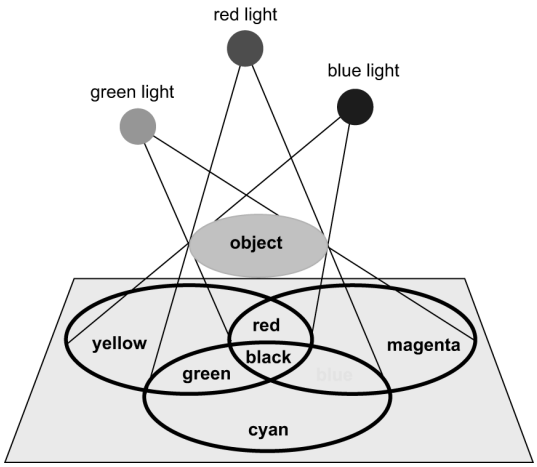


図 8 プロジェクタの光の色と影の色
Fig. 8 Color of projector lights and color of shadows.

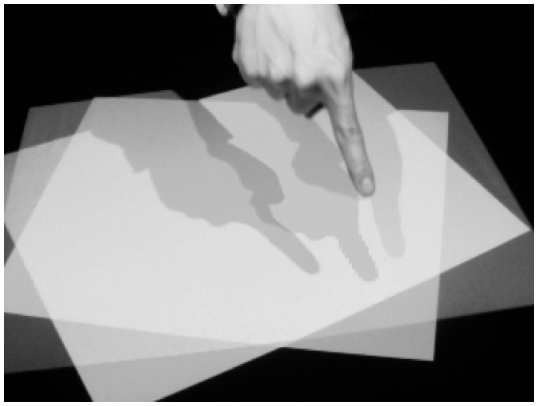
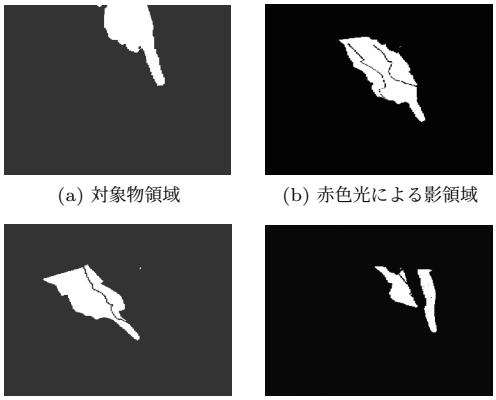


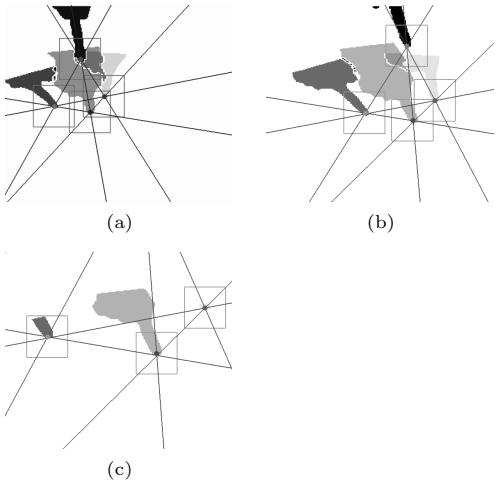
図 9 対象物の像と影の像
Fig. 9 Image of an object and its shadows.



(a) 対象物領域 (b) 赤色光による影領域

(c) 緑色光による影領域 (d) 青色光による影領域

図 10 影の分離
Fig. 10 Separation of shadows.



(a) (b)

(c)

図 11 4 視点幾何の計算結果
Fig. 11 Estimated four view geometry.

6 個のエピポールによって表される．そこで，求めた quadrifocal tensor から 6 本のエピポーラ線を引き，これらが正しく対応点を通ることを確認した．これらの図に示すように，いずれのエピポーラ線も正しく 2 つの対応点を通っていることから，エピポールが正しく求まり，4 視点幾何が正確に計算できていることが分かる．

6. 仮想ピアノの実現

本章では，前章での射影復元結果に対して情報を付加することによりアフィン復元が得られ，この結果，未校正プロジェクタカメラシステムにより仮想ピアノが実現できることを示す．

初めにプロジェクタにより仮想のピアノをスクリーン上の任意の位置に配置する．このために，まず，プロジェクタからスクリーン上に 4 点以上を投影し，これらの点のカメラにおける投影像から，カメラ画像とプロジェクタ画像との間の平面射影変換 $\mathbf{H}_{cp}$ を求める．

次に，スクリーン上において仮想ピアノを配置する位置を指で指し示すことにより，プロジェクタ画像とスクリーン面との関係を求める．今，スクリーン上で指示した 4 点 $\mathbf{K}_i = [K_1^1, K_1^2, K_1^3, K_1^4]^\top$ $(i = 1, \cdots, 4)$ を仮想ピアノの四隅とし，これらがカメラ画像上に $\mathbf{k}_i = [k_i^1, k_i^2, k_i^3]^\top$ $(i = 1, \cdots, 4)$ として投影されているとする．このとき，プロジェクタ画像上の 4 点 $\mathbf{k}'_i = [k'^1_i, k'^2_i, k'^3_i]^\top$ $(i = 1, \cdots, 4)$ が以下のように求まる．

$$\mathbf{k}'_i = \mathbf{H}_{cp}\mathbf{k}_i \quad (i = 1, \cdots, 4) \tag{17}$$

これらの点は，2 章で説明したように，プロジェク

タをカメラと見なしたときにスクリーン上の 4 点 $\mathbf{K}_i$（$i = 1, \cdots, 4$）をプロジェクタ画像に投影した点であると考えられる．したがって，4 点 $\mathbf{k}'_i$（$i = 1, \cdots, 4$）がピアノの四隅となるようプロジェクタ画像上においてピアノを描画すれば，スクリーン上において指で指し示した位置に仮想ピアノが配置される．

ただし，本稿ではスクリーン上の 4 点 $\mathbf{K}_i$ の指示を行う場合に，スクリーンからある一定の間隔だけ離れたスクリーンに平行な平面 Φ 上において指先を 4 カ所 $\mathbf{R}_i$（$i = 1, \cdots, 4$）に移動させ，この指先の 4 点 $\mathbf{R}_i$ のスクリーン上における影 4 点をピアノの角 $\mathbf{K}_i$ とする．このときの平行平面 Φ を基準平面と呼ぶことにする．基準平面の実際の高さは知る必要はない．このようにスクリーン上ではなくスクリーンから一定の間隔だけ離れた平面上において 4 点を指示する理由は，スクリーン上のピアノの角の 4 点を指示しつつ，次に述べる射影復元からアフィン復元への不定性の除去を行うためである．

仮想ピアノを実現するためには，指先で押した鍵盤を判別すると同時に，どのような強さでこの鍵盤を押したかを計算し，これを発生する音の強弱として表現する必要がある．押された鍵盤の判別は指先がスクリーン平面と接触した瞬間のピアノに対する指の 2 次元位置によって判別することができる．一方，鍵盤を押した強さは指の打ち下ろし速度に比例すると考えられるので，ある微小な時間間隔 Δt における指の 3 次元位置の変化から求める必要がある．指の各時刻における 3 次元位置は，前節に述べた方法により，画像における指先の像とプロジェクタによる指先の影の像から射影復元できる．しかし射影復元には 3 次元射影変換の不定性が残っていることから，射影復元結果から音の強さを求めることはできない．そこで射影復元された結果に対して情報を付加することによりアフィン復元を得る方法を考える．アフィン復元された結果には 3 次元アフィン変換の不定性が残るが，距離の比は不定性なく一意に求まるため，音の強さを制御するためにはユークリッド復元が行えなくてもアフィン復元が行えれば十分である．

射影復元結果からアフィン復元結果を得るには，もともと実空間中において無限遠に存在する点が，復元結果中においても無限遠点となるよう射影復元結果に対して 3 次元射影変換を行うことによって得られる．これは，実空間中において平行な平面上に存在する点が復元結果中においても平行な平面上に存在するように変換することでもある．

そこで，まず指で指示した 4 点 $\mathbf{R}_i$ がスクリーンと平行な平面上に存在することを用いて，これら 4 点 $\mathbf{R}_i$ の射影復元結果が，これら 4 点のスクリーン上における影 $\mathbf{K}_i$ の復元結果と平行となるよう射影復元結果を射影変換する．この変換により，スクリーン平面上の無限遠点が復元結果においても正しく無限遠の点となる．しかしこの状態ではスクリーン平面上にはない無限遠点が，復元結果中においてまだ正しく無限遠の点とはなっていない．そこで次にこれらの点が復元結果中において正しく無限遠点となるよう射影変換する．このために，仮想ピアノを打鍵する場合には，スクリーン近傍において指がほぼ等速直線運動していることを利用する．直線上において等間隔に並ぶ 3 点 $\mathbf{X}_0$，$\mathbf{X}_1$，$\mathbf{X}_2$ と無限遠点 $\mathbf{X}_\infty$ の計 4 点がなす複比は射影変換のもとで不変であり，その値はつねに -1 となる．この性質を用いることにより，射影的に歪んだ直線上等間隔の 3 点からその直線上の無限遠点が求まる．この点が実際に無限遠の点となるよう復元結果を射影変換することにより，アフィン復元を得ることができる．

このようにして得られたアフィン復元結果においては比が不変である．したがって，アフィン復元結果においてスクリーンに指が接する瞬間から Δt 時刻前の指の高さが H であり基準平面 Φ の高さが H' であるとき，打鍵の強さ h は以下に示すように H' に対する指の高さ H として求まる．

$$h = \frac{H}{H'} \tag{18}$$

図 12 は，図 7 に示すプロジェクタカメラを用いて仮想ピアノを実現し，演奏している様子である．色が変化した仮想鍵盤が押されたと認識された鍵盤である．正しく打鍵が認識されていることが分かる．この仮想ピアノでは，指先の 3 次元位置の復元結果に基づいてアフィン的速度を計算し，音の強弱も付けている．

7. モバイルプロジェクタカメラ

プロジェクタは年々小型化が進んでいることから，近い将来，プロジェクタは様々なモバイル機器に搭載されたり，人体に装着できたりするようになると考えられる．このようなことから，近年，可搬型のプロジェクタカメラシステムの研究が進展しつつある[7),14),15)]．本章では，プロジェクタカメラをユーザが装着し，ユーザが様々な位置や姿勢の状態をとっても，プロジェクタによって必要な映像が必要な位置につねに提示されるようなモバイルプロジェクタカメラシステムを考える．従来の据え置き型のプロジェクタカメラシステムでは，情報提示範囲がユーザの位置姿勢とは無関係に

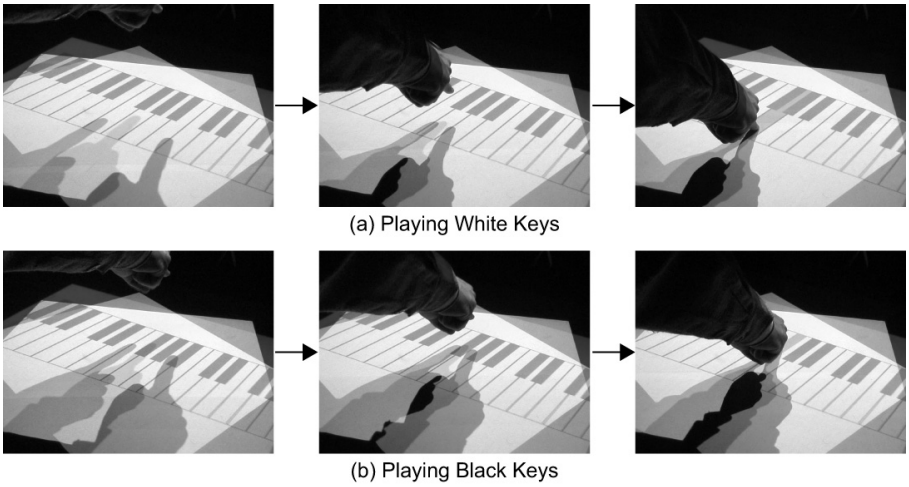


図 12 仮想ピアノの演奏の様子
Fig. 12 Playing the virtual piano.

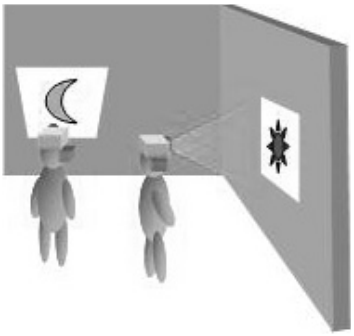
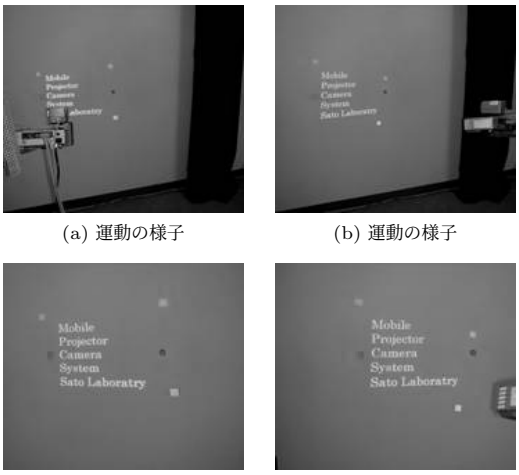


図 13 モバイルプロジェクタカメラによる情報提示
Fig. 13 Presentation by using a mobile projector camera system.



(a) 運動の様子 (b) 運動の様子

(c) 情報提示結果 (d) 情報提示結果

図 14 プロジェクタカメラの運動と情報提示の結果
Fig. 14 Motions of the mobile projector camera and the results of presentation on the wall.

決まっているため，真にユーザが必要とする位置に情報が提示されているとは限らない．ここで考えるモバイルプロジェクタカメラでは，たとえば**図 13** に示すように，ユーザ頭部にこれを設置すれば，つねにユーザの視野範囲と一致するように情報提示範囲を設定することができるため，ユーザに対して無駄のない情報提供ができるなど，新たな情報提示方式としての展開が期待できる．

図 14 は，運動するモバイルプロジェクタカメラにより，あたかも壁に静止した文字が描かれているかのように提示した例である．(a)，(b) は，モバイルプロジェクタカメラの運動の様子であり，(c)，(d) は (a)，(b) それぞれにおける情報提示の結果である．モバイルプロジェクタカメラの運動に従ってプロジェクタの投光範囲は変化するが，提示されている情報は壁に固定されている様子が分かる．

このようなモバイルプロジェクタカメラにおける特有の問題として，対応点のトラッキングの問題がある．従来のプロジェクタカメラシステムでは，用いるプロジェクタとカメラとスクリーンが空間中におおむね固定されていることを前提としていたため，プロジェクタカメラシステムの校正には，用いる特徴点の数などに特段の配慮を行う必要がなかった．これに対して，モバイルプロジェクタカメラではプロジェクタとカメラがつねに運動しているため，多くの特徴点を画像中においてつねに安定にトラッキングするのは容易ではない．

そこで文献 7) では，プロジェクタとカメラが一体となったモバイルプロジェクタカメラシステムを考え，

プロジェクタとカメラが運動してもプロジェクタとカメラ間の相対的な位置および姿勢は変化しないと仮定することにより，これらの間の幾何学的な関係を $\mathbf{F}$ 行列としてあらかじめ求めておくことで，より少ない対応点によりスクリーン上の映像を正しく提示する方法を提案した．

一般に，カメラ画像とプロジェクタ画像との間の平面射影変換 $\mathbf{H}_{cp}$ を求めるためには，4 点以上の点をプロジェクタより投影してこれをカメラで観測する必要がある．また，プロジェクタ画像と平面スクリーンとの間の平面射影変換 $\mathbf{H}_{ps}$ の計算には，4 点以上のマーカをスクリーン上に置き，これをカメラ観測して求めたカメラスクリーン間の平面射影変換 $\mathbf{H}_{cs}$ とカメラプロジェクタ間の平面射影変換 $\mathbf{H}_{cp}$ とから $\mathbf{H}_{ps} = \mathbf{H}_{cs}\mathbf{H}_{cp}^{-1}$ として求めるのが一般的である．したがって，通常，プロジェクタ画像をカメラを用いて制御するためには，合計 8 点以上の対応点が必要となる[14]．

一方，プロジェクタとカメラが一体化している場合には，プロジェクタとカメラ間の幾何学的な関係を $\mathbf{F}$ 行列として事前に求めておくことが可能である．このように $\mathbf{F}$ 行列が事前に求まっている場合には，プロジェクタから投光されたスクリーン上の 3 点 $\mathbf{X}_i$ $(i = 1, \cdots, 3)$ をカメラで観測することにより，その像 $\mathbf{x}_i$ $(i = 1, \cdots, 3)$ からスクリーン上の 3 点 $\mathbf{X}_i$ を射影的に復元することができる．このように復元された 3 点より，スクリーン平面の斉次座標 $\mathbf{\Pi} = [\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4]^\top$ が以下の式を解くことで求まる．

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 & \mathbf{X}_2 & \mathbf{X}_3 \end{bmatrix}^\top \mathbf{\Pi} = \mathbf{0} \tag{19}$$

このようにしてスクリーン平面が求まると，カメラ画像とプロジェクタ画像の間の平面射影変換 $\mathbf{H}_{cp}$ が以下のように求まる[7]．

$$\mathbf{H}_{cp} = [\mathbf{e}_{pc}]_\times \mathbf{F} - \frac{\mathbf{e}_{pc}\pi^\top}{\Pi_4} \tag{20}$$

ここで，$\pi = [\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3]^\top$ であり，また，$[\,\cdot\,]_\times$ はベクトル積を行列を用いて表すための 3×3 の歪対象行列を表す．また，スクリーン上にマーカを 4 点置いておけば，これらのカメラ画像における像よりスクリーン面とカメラ画像との間の平面射影変換 $\mathbf{H}_{sc}$ が得られるため，スクリーン面とプロジェクタ画像との間の平面射影変換 $\mathbf{H}_{sp}$ が求まり，スクリーン上の任意の位置へとプロジェクタの光を制御することが可能となる．以上より，カメラとプロジェクタ間の $\mathbf{F}$ 行列が求まっている場合には，マーカ 4 点とプロジェクタからの投影点 3 点の合計 7 点からプロジェクタによる適切な映像生成が行えることが分かる．

カメラの内部パラメータとプロジェクタの内部パラメータが既知である場合には，さらに対応点を削減することができ，マーカ点 2 点とプロジェクタからの投影点 3 点の合計 5 点によりスクリーン面とプロジェクタ画像との間の平面射影変換 $\mathbf{H}_{sp}$ が求まることが明らかになっている[7]．

以上のように，カメラとプロジェクタが一体化している場合には，これらの間のエピポーラ幾何を事前に計算しておくことで，画像中においてトラッキングする特徴点数を削減することができ，より実用性が向上する．

8. おわりに

本稿では，未校正なプロジェクタカメラシステムを射影的に校正する場合に，対象物の影情報を用いることの有用性について述べた．特に，カメラとプロジェクタが 1 台ずつよりなる場合の 2 視点幾何，カメラ 1 台とプロジェクタ 2 台の場合の 3 視点幾何，カメラ 1 台とプロジェクタ 2 台の場合の 4 視点幾何について，影情報を用いた場合の幾何学的な自由度を明らかにし，またこれらの多視点幾何を計算するために必要な最小点数が，通常の多視点幾何の必要最小点数よりも大幅に少なくて済み，かつ安定に求まることを示した．

さらにこのようにして射影的に校正されたプロジェクタカメラシステムにより，影情報を用いて空間中の点を 3 次元復元する方法について説明し，これを応用した仮想ピアノの例を示した．また，プロジェクタとカメラを一体化してモバイル化したモバイルプロジェクタカメラについて述べ，このようなモバイルプロジェクタカメラによる映像生成を，より少ない特徴点のトラッキングより実現する方法についても述べた．

なお，本稿のうちの，多視点幾何の解析と仮想ピアノに関しては当研究室の西江桂亮君の研究に基づいており，またモバイルプロジェクタカメラに関しては浜田康司君の研究に基づいたものである．

参考文献

1) Oka, K., Sato, I., Nakanishi, Y., Sato, Y. and Koike, H.: Interaction for entertainment contents based on direct manipulation with bare hands, *Proc. IFIP International Workshop on Entertainment Computing*, pp.391–398 (2002).
2) Milgram, P. and Kishino, F.: A taxonomy of mixed reality visual display, *IEICE Trans. Inf. & Sys.*, Vol.E77-D, No.12, pp.1321–1329 (1994).

3) 田村秀行，大田友一：複合現実感，映像情報メディア学会誌，Vol.52, No.3, pp.266–272 (1997).
4) Brown, M., Majumder, A. and Young, R.: Camera-Based Calibration Techniques for Seamless Multiprojector Displays, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.11, No.2, pp.193–206 (2005).
5) Sukthanker, R., Stockton, R.G. and Mullin, M.D.: Smarter Presentations: Exploiting Homography in Camera-Projector Systems, *Proc. International Conference on Computer Vision*, Vol.1, pp.247–253 (2001).
6) Okatani, T. and Deguchi, K.: Autocalibration of a Projector-Screen-Camera System: Theory and Algorithm for Screen-to-Camera Homography Estimation, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.27, No.12, pp.1845–1855 (2005).
7) 浜田康司，佐藤　淳：モバイルプロジェクタカメラの校正と映像生成，画像の認識理解シンポジウム (2006).
8) 東城賢司，日浦慎作，井口征士：プロジェクタを用いた 3 次元遠隔指示インタフェースの構築，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.7, No.2, pp.169–176 (2002).
9) 西江桂亮，佐藤　淳：未校正カメラと未校正プロジェクタによる 3 次元復元と仮想楽器への応用，情報処理学会誌，Vol.47, No.SIG10, pp.49–58 (2006).
10) 佐藤　淳：コンピュータビジョン—視覚の幾何学，コロナ社 (1999).
11) Hartley, R. and Zisserman, A.: *Multiple View Geometry*, Cambridge University Press (2000).
12) 佐藤　淳：テンソルと多視点幾何，情報処理学会研究報告，CVIM-159, pp.33–42 (2007).
13) Sukthankar, R., Cham, T.J. and Sukthankar, G.: Dynamic Shadow Elimination for Multi-Projector Displays, *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition* (2001).
14) Beardsley, P., Forlines, C., Raskar, R. and VanBaar, J.: Handheld Projectors for Mixing Physical and Digital Textures, *Proc. IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems* (2005).
15) Kushal, A., VanBarr, J., Raskar, R. and Beardsley, P.: A Handheld Projector Supported by Computer Vision, *Proc. Asian Conference on Computer Vision*, pp.183–192 (2006).

(平成 19 年 5 月 10 日受付)
(平成 19 年 11 月 21 日採録)

（担当編集委員　蔵田 武志）

佐藤　　淳（正会員）

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着任．平成 10 年より名古屋工業大学電気情報工学科助教授．平成 16 年より同大学大学院情報工学専攻教授．この間に，ATR 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，視覚誘導，視覚的ユーザインターフェイス，ITS 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受賞．電子情報通信学会，IEEE 各会員．