

プロジェクタカメラの多視点幾何とその応用

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
E-mail: tjunsato@nitech.ac.jp

あらまし プロジェクタの小型化高性能化に伴い、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。本発表では、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を明らかにすると共に、このようなプロジェクタカメラを使った拡張現実感の例などを示す。特に、一見、邪魔物と見られがちなプロジェクタによる影が、プロジェクタカメラシステムの校正や3次元復元などを行う上で非常に重要な役割を果たすことや、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による新たなプロジェクタカメラの可能性などに関して述べる。

キーワード 未校正カメラ, 未校正プロジェクタ, モバイルプロジェクタカメラ, 拡張現実感, 射影復元

Multiple View Geometry for Projector Camera Systems

Jun SATO[†]

[†] Department of Computer Science and Engineering,
Nagoya Institute of Technology
Gokiso-cho Showa-ku Nagoya 466-8555, Japan
E-mail: tjunsato@nitech.ac.jp

Abstract 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.

Key words uncalibrated cameras, uncalibrated projectors, mobile projector camera systems, augmented reality, projective reconstruction

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]。

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良い。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次元計測を行う場合には、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 [7] 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。

これに対して近年、我々の研究室では、カメラが投光器であるという性質を積極的に利用して、プロジェクタによってできる影の情報をを用いることにより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提案した [8]。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。

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

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、この場合には 2 台のカメラ間の多視点幾何の考え方を適用することができる [9], [10]。すなわち、カメラとプロジェクタ間の位置姿勢の情報は、7 自由度の基礎行列 ($\mathbf{F}$ 行列) によって表される。従って、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基礎行列が求まり、プロジェクタとカメラの校正が射影的に行えるように思われる。しかし、プロジェクタは投光器であることから、受光器であるカメラのように対象物を観測することはできない。従って 2 台のカメラ間の校正法をそのまま用いることは一般にできない。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より簡単に、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。

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 [11]。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上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、プロジェクタとカメラと平面スクリーンが置かれているとする。この時、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

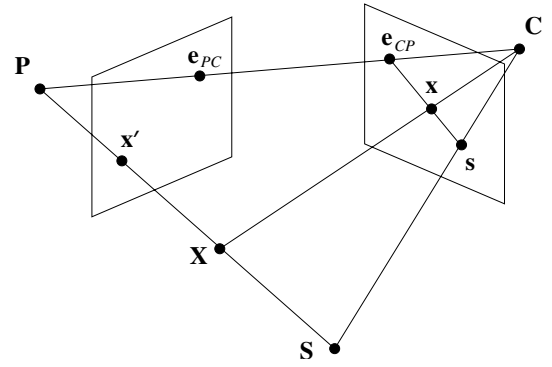


図 1 プロジェクタカメラの 2 視点幾何

点 $\mathbf{e}_{cp}$ が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 $\mathbf{e}_{pc}$ が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上における像と考えることができる。従ってカメラ画像上の点 $\mathbf{x}$ 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 $\mathbf{X}$ がスクリーン上に無いとすると、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 $\mathbf{S}$ が映る。プロジェクタの光は非常に強いいため、通常このような影は非常に鮮明にスクリーン上に映る。この時、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 $\mathbf{s}$ とプロジェクタ画像面上の点 $\mathbf{x}'$ 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。

$$\mathbf{x}' \sim \mathbf{H}_{cp}\mathbf{s} \quad (1)$$

ここで、 $(\sim)$ は定数倍の不定性を除いて等しいことを表す。従って、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わかる。従って、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わかる。

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 $\mathbf{F}$ 行列となることを言う。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

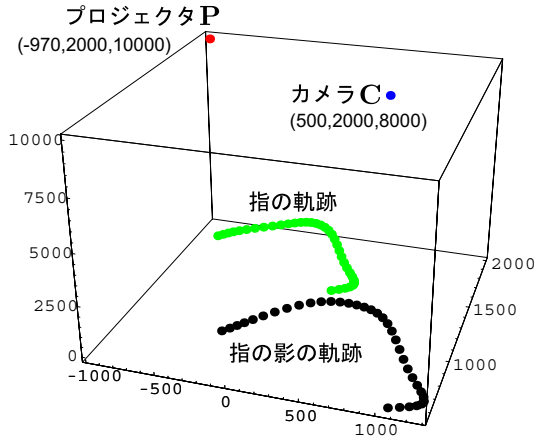


図2 3次元運動と影の運動

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、これをもとにカメラプロジェクトシステムの校正やカメラプロジェクトによる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トカメラの校正や3次元復元を考える。

影に基づくプロジェクト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。3次元空間中において $\mathbf{P}$, $\mathbf{X}$, $\mathbf{S}$ は一直線上に存在することから、カメラ画像上の点 $\mathbf{e}_{cp}$, $\mathbf{x}$, $\mathbf{s}$ も画像中において一直線上に存在することがわかる。この画像中の直線は対応点同士を通る直線であることから、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共に等しいという自己エピポーラとなっていることがわかる [10]。自己エピポーラが成り立つとき、対応点同士の関係は以下のようなエピポーラ方程式で表すことができ、この場合の $\mathbf{F}$ 行列の自由度は2しかない。

$$\mathbf{s}^T \mathbf{F} \mathbf{x} = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & -f_3 & f_2 \\ f_3 & 0 & -f_1 \\ -f_2 & f_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

但し、画像上の点の座標は齊次座標で表されているものとする。対応点一組からは式 (2) より $\mathbf{F}$ 行列に関する一つの拘束式が得られることから、この場合には2組の対応点より $\mathbf{F}$ 行列が求まる。また、 $\mathbf{F}$ 行列が2自由度しか持っていないことから、この場合には一般の2台のカメラの $\mathbf{F}$ 行列計算よりも遥かに安定に $\mathbf{F}$ 行列が求まる [8]。

図2は、3次元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3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、プロジェクトカメラをより良く校正できることがわかる。

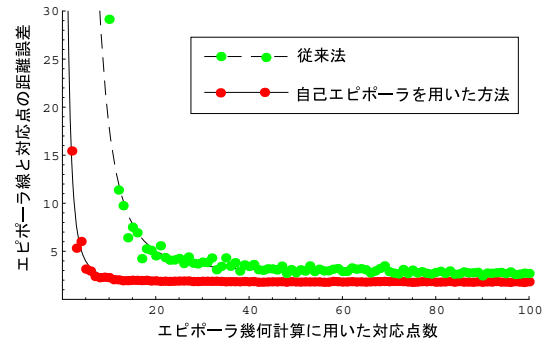


図3 エピポーラ幾何計算の評価

3. プロジェクタカメラの3視点幾何

近年のプロジェクトカメラシステムでは、複数台のプロジェクトカメラ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台とプロジェクト2台が存在するようなプロジェクトカメラシステムについて考える。

先に述べたように、プロジェクト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、前節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視点幾何よりも遥かに強い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トシステムを校正することが可能となる。

今、図4に示すように、1台のカメラ $\mathbf{C}$ と2台のプロジェクト $\mathbf{P}_1$, $\mathbf{P}_2$ が存在するとする。この時、 $\mathbf{P}_1$ 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ト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、プロジェクト $\mathbf{P}_1$ とプロジェクト $\mathbf{P}_2$ 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。従って、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、プロジェクトカメラシステムの3視点幾何が射影的に一意に決まったことになる。この時、 $\mathbf{P}_1$, $\mathbf{P}_2$, $\mathbf{S}_{12}$ 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。従って、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、プロジェクト2台よりなるプロジェクトカメラの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わかる。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、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 $\mathbf{X}$ のプロジェクト $\mathbf{P}_1$ によるスクリーン上の影を $\mathbf{S}_1$ 、プロジェクト $\mathbf{P}_2$ 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。この時、画像中の3つの点 $\mathbf{x} = [x^1, x^2, x^3]^T$, $\mathbf{s}_1 = [s_1^1, s_1^2, s_1^3]^T$, $\mathbf{s}_2 = [s_2^1, s_2^2, s_2^3]^T$ の

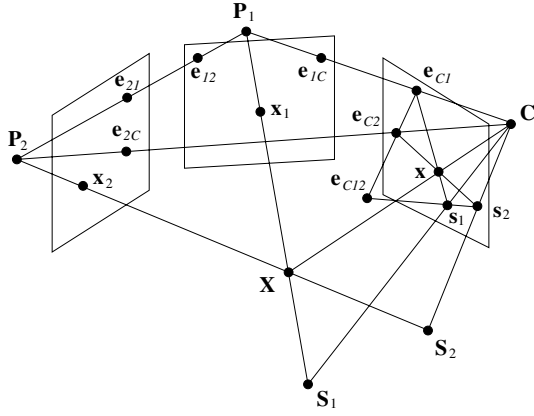


図4 プロジェクタカメラの3視点幾何

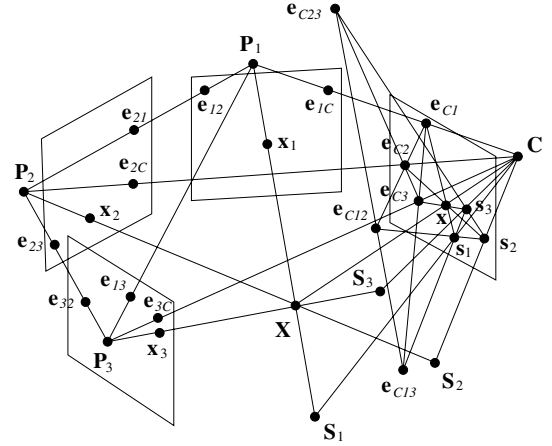


図5 プロジェクタカメラの4視点幾何

間には以下の trilinear 拘束の関係が成り立つ.

$$x^i s_1^j s_2^k \epsilon_{jqu} \epsilon_{krv} \mathcal{T}_i^{qr} = 0_{uv} \quad (4)$$

ここで $\mathcal{T}_i^{qr}$ は $3 \times 3 \times 3$ の trifocal tensor であり, 27個の要素を持つが, 先に見た通り, その自由度は5である. 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と等しい. 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, e_{c1} , e_{c2} および 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 e_{c1} , x , s_1 の3点は同一直線上に有り, また e_{c2} , x , s_2 の3点も同一直線上に有る. 従って, 空間中に2点 X_1 , 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, e_{c1} および e_{c2} が求まる. さらに, S_1 , S_2 , 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 s_1 , s_2 , e_{c12} の3点も同一直線上に有る. 従って, e_{c12} は e_{c1} と e_{c2} を結ぶ直線と, s_1 と s_2 を結ぶ直線の交点として求まる. 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わかる.

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[9]. 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自由度しかないことを示す.

今, 図5に示すように, カメラCと3台のプロジェクタ P_1 , P_2 , 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と. この時, 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 e_{c1} , e_{c2} , e_{c3} を考える. また, P_1 と P_2 を結ぶ直線とスクリーン面との交点を S_{12} とし, この点のカメラ画像における像を e_{c12} とする. 同様に, P_1 と P_3 を結ぶ直線とスクリーン面との交点 S_{13} のカメラ画像における像を e_{c13} とし, P_2 と P_3 を結ぶ直線とスクリーン面との交点 S_{23} のカメラ画像における像を 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 e_{c1} , e_{c2} , e_{c3} , e_{c12} , e_{c13} , 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 e_{c1} , e_{c2} , e_{c3} は3つのプロジェクタの配置に応じて全く自由に振舞えるので合計6自由度を持つ. 次に, e_{c12} は e_{c1} と 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, e_{c13} は e_{c1} と 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 e_{c23} は, e_{c2} と e_{c3} を結ぶ直線上に存在し, かつ, e_{c12} と e_{c13} を結ぶ直線上に存在するため0自由度である. e_{c12} と e_{c13} と 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, P_1 , P_2 , P_3 の3点を通る平面と, S_1 , S_2 , 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わかる. 一般の4視点幾何は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わかる. 以上見てきた, 2視点, 3視点, 4視点幾何の自由度の比較を表1にまとめる.

ここで3次元空間中に点 X が存在するとすると, この点のカメラ画像における像 x が得られる. また, この点 X のプロジェクタ P_1 によるスクリーン上の影を S_1 , プロジェクタ P_2 によるスクリーン上の影を S_2 , プロジェクタ P_3 によるスクリーン上の影を S_3 とすると, これらの像 s_1 , s_2 , s_3 がカメラ画像上において観測される. この時, 画像中の4つの点 $x = [x^1, x^2, x^3]^T$, $s_1 = [s_1^1, s_1^2, s_1^3]^T$, $s_2 = [s_2^1, s_2^2, s_2^3]^T$, $s_3 = [s_3^1, s_3^2, s_3^3]^T$ の間には以下の quadrilinear 拘束の関係が成り立つ.

$$x^i s_1^j s_2^k s_3^l \epsilon_{ipa} \epsilon_{jqb} \epsilon_{krc} \epsilon_{lsd} \mathcal{Q}^{pqrs} = 0_{abcd} \quad (5)$$

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, 先に見た通り, 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 X_1 , 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 e_{c1} , e_{c2} , e_{c3} , e_{c12} , e_{c13} , e_{c23} が求まり, $\mathcal{Q}^{pqrs}$ が計算できることがわかる.

5. 影情報に基づく3次元復元

近年の多視点幾何の研究より, カメラ間のエピポラ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は全く等

表 1 多視点幾何の自由度と計算に必要な最低点数

	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

しいことが明らかになっている。すなわち、前節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 $\mathbf{A}$ とプロジェクタの投影行列 $\mathbf{A}'$ がそれぞれ以下のように求まる。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} [\mathbf{e}_{cp}]_{\times} \mathbf{F} & \mathbf{e}_{cp} \end{bmatrix}$$

ここで $[\cdot]_{\times}$ はベクトル積を行列の積で表すための歪対象行列である。trifocal tensor や quadrifocal tensor が得られた場合においても、同様に、これらのテンソルからカメラとプロジェクタの投影行列を得ることができる。

このようにしてカメラとプロジェクタの投影行列 $\mathbf{A}, \mathbf{A}'$ が求まると、これを 2 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 $\mathbf{A}, \mathbf{A}'$ 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得ることができれば、この射影的な不定性は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つていくことにより、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、自己エピソード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 6(a) は、図 2 の運動に関して、従来の正規化 8 点法によりエピソード幾何を計算して 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ソード幾何を計算し 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わかる。

6. 仮想ピアノの実現

本節では、前節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

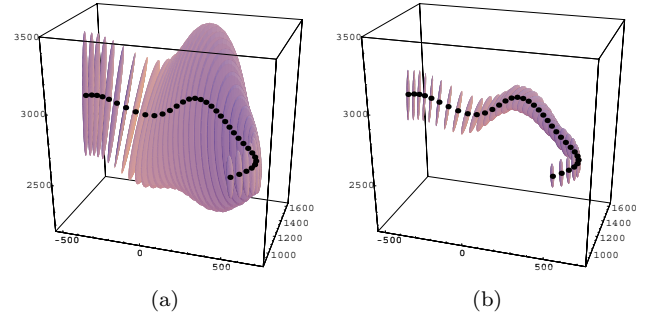


図 6 3次元復元の評価

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 $\mathbf{K}_i$ ($i = 1, \dots, 4$) を仮想ピアノの四隅とし、これらがカメラ画像上に $\mathbf{k}_i$ ($i = 1, \dots, 4$) として投影されているとする。この時、プロジェクタ画像上の 4 点 $\mathbf{k}'_i$ ($i = 1, \dots, 4$) が以下のように求まる。

$$\mathbf{k}'_i \sim \mathbf{H}_{cp} \mathbf{k}_i \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (6)$$

これらの点は、2. 節で説明したように、プロジェクタをカメラと見なした時にスクリーン上の 4 点 $\mathbf{K}_i$ ($i = 1, \dots, 4$) をプロジェクタ画像に投影した点であると考えられる。従って、4 点 $\mathbf{k}'_i$ ($i = 1, \dots, 4$) 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 箇所 $\mathbf{R}_i$ ($i = 1, \dots, 4$) 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点が成す複比は射影変換のもとで不変であり、その値は常に -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。従って、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。

$$h = \frac{H}{H'} \quad (7)$$

図7は、仮想ピアノのために構成したカメラ1台、プロジェクタ1台よりなるプロジェクタカメラシステムである。プロジェクタとカメラは特に校正を行わず、適当に配置したので、その位置姿勢は未知である。図8は、このプロジェクタカメラにおいて、指先とその影を対応点として2.節で述べた2自由度の $\mathbf{F}$ 行列を計算し、この $\mathbf{F}$ 行列を用いてリアルタイムにエピソード線を描いた結果である。エピソード線が対応する指先をほぼ通っていることから、正しく2視点幾何が求まっていることがわかる。図9は、仮想ピアノの演奏の様子である。色が変わっ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わかる。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、そのアフィンの速度に基づいて音の強弱も計算している。

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、人体に装着できるようになると考えられる。本節では、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

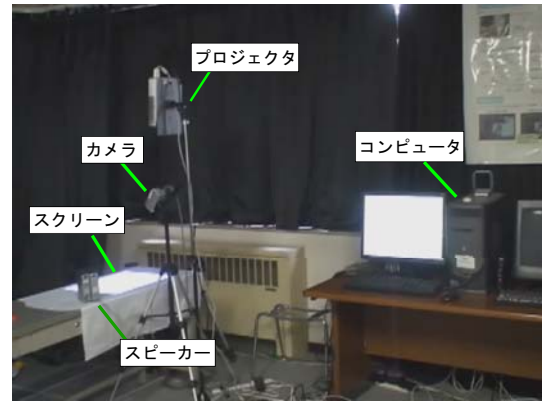


図7 プロジェクタカメラによる仮想ピアノ

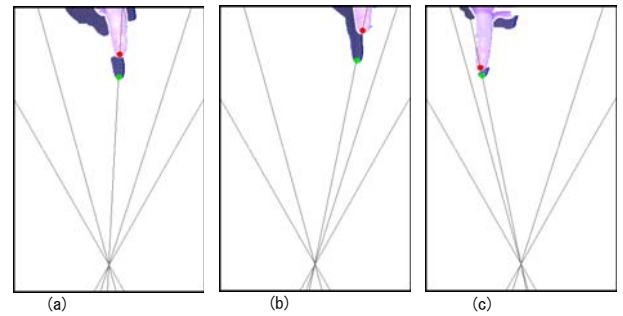


図8 エピソード線の計算結果

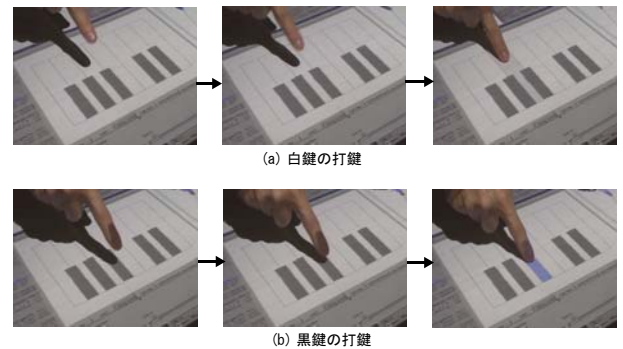


図9 仮想ピアノの演奏の様子

取っても、プロジェクタによって必要な映像が必要な位置に常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、例えば図10に示すように、ユーザ頭部にこれを設置すれば、常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11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稿範囲は変化するが、提示されている情報は壁に固定

されている様子がわかる。

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概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常に運動しているため、多くの特徴点を画像中において常に安定にトラッキングするのは容易ではない。

そこで[12]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 $\mathbf{F}$ 行列として予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点以上のマーカー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。従って、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。

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 $\mathbf{X}_i$ ($i = 1, \dots, 3$) をカメラで観測することにより、その像 $\mathbf{x}_i$ ($i = 1, \dots, 3$) 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 $\mathbf{\Pi} = [\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4]^T$ が以下の式を解くことで求まる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 & \mathbf{X}_2 & \mathbf{X}_3 \end{bmatrix}^T \mathbf{\Pi} = \mathbf{0} \quad (8)$$

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[12]。

$$\mathbf{H}_{cp} = [\mathbf{e}_{pc}]_{\times} \mathbf{F} - \frac{\mathbf{e}_{pc} \pi^T}{\Pi_4} \quad (9)$$

ここで、 $\pi = [\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3]^T$ 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ーを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

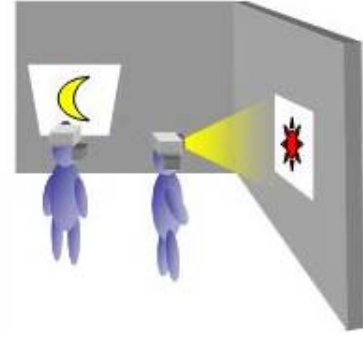


図 10 モバイルプロジェクタカメラによる情報提示

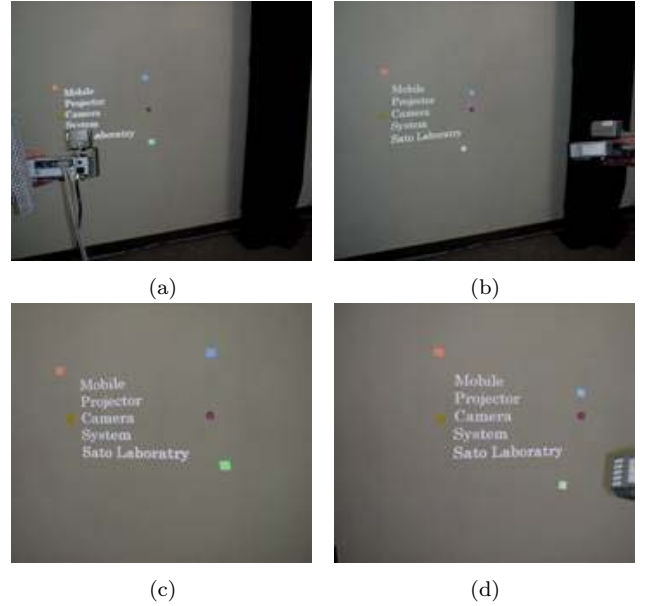


図 11 プロジェクタカメラの運動と情報提示の結果

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、マーカー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わかる。

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、マーカー点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[12]。

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. ま と め

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を示した。特に、カメラとプロジェクタが1台づつよりなる場合の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

これらの多視点幾何を計算するために必要な最低点数を明らかにした。

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を示した。

尚、本稿の内の、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、モバイルプロジェクタカメラに関しては浜田康司君の協力を得た。

文 献

- [1] K. Oka, I. Sato, Y. Nakanishi, Y. Sato, H. Koike, Interaction for entertainment contents based on direct manipulation with bare hands, Proc. IFIP International Workshop on Entertainment Computing”, pp.391-398, 2002.
- [2] P.Milgram, F.Kishino. 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] M. Brown, A. Majumder, R. Young, Camera-Based Calibration Techniques for Seamless Multiprojector Displays, IEEE Transactionon Visualization and Computer Graphics, Vol.11, No.2, pp.193-206, 2005.
- [5] R.Sukthankar, R.G.Stockton, M.D.Mullin, Smarter Presentations: Exploiting Homography in Camera-Projector Systems, Proc. International Conference on Computer Vision, Vol.1, pp.247-253, 2001.
- [6] T.Okatani, K.Deguchi, Autocalibration of a Projector-Screen-Camera System: Theory and Algorithm for Screen-to-Camera Homography Estimation, IEEE Transactions on Patteren Analysis and Machine Intelligence, Vol.27, No.12, pp.1845-1855, 2005.
- [7] 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.
- [8] 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, pp49-58, 2006.
- [9] R.Hartley, A.Zisserman, Multiple View Geometry, Cambridge University Press, 2000.
- [10] 佐藤 淳. コンピュータビジョナー視覚の幾何学-. コロナ社, 1999.
- [11] R. Sukthankar, T.-J. Cham, G. Sukthankar, Dynamic Shadow Elimination for Multi-Projector Displays, Proc. Computer Vision and Pattern Recognition, 2001.
- [12] 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.