複数枚のカメラ画像からの3次元物体形状復元手法の形式表現

北海道大学工学研究科　○宮本 甲次　田中 文基　岸浪建史
システム テクノロジー インスティテュート　門脇 聰一

要旨
複数枚のカメラ画像から 3 次元形状を復元する手法は様々提案されているが、その物理的な意味や性質は明確には記述されていない。本研究では、カメラ内部パラメータの導出法を含めた復元手法を形式表現し、その意味や性質を明確に記述することで、その手法の特徴を明らかにする。

1．はじめに

複数のカメラ画像から 3 次元形状の復元を行う研究は今までに様々なものが提案されているがその物理的意味や性質には明確な記述がない。そこで本研究ではカメラ内部パラメータの導出法を含めた復元方法を形式表現し、それらの意味や性質を明確にすることによってその手法の特徴を明らかにする。

2．透視投影とエピポーラ幾何

2 次元の画像から 3 次元形状の復元を議論するために、はじめに透視投影と、複数の視点における画像間の対応関係を表しているエピポーラ幾何について概説する。

2．1 透視投影

図 1 に示すように座標系 XYZ をワールド座標、座標系 $X_C Y_C Z_C$ をカメラ座標とし、C を光学中心、f を焦点距離、c を画像中心とする。カメラ座標系において、3 次元空間中の点 $X=[X,Y,Z]^T$ が、2 次元画像上の点 $x=[x,y]^T$ に投影されているとする。3 次元空間中の点とその投影像との間に式（1）の関係が成り立つ。ただし $\tilde{X}$ は X の同次座標を表す。

$$\lambda\tilde{x} = P_f \tilde{X} \quad ただし\ P_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{1}$$

また、物理座標 $\tilde{x}$ から画像座標 $\tilde{m}$ への変換はカメラ内部パラメータ行列 K を用いて、式（2）のようになる。

$$\tilde{m} = K\tilde{x} \quad ただし\ K = \begin{bmatrix} a_u & s & u_0 \\ 0 & a_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

ワールド座標 X_w からカメラ座標 X への変換はカメラ外部パラメータ行列 M を用いて、式（3）のようになる。

$$X = MX_w \quad ただし M = \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} R：回転(3\times3)\ t：並進(3\times1) \tag{3}$$

以上のことからワールド座標系における透視投影は式（4）になる。

$$\lambda\tilde{m} = P\tilde{X} = KP_f M\tilde{X} = K[R \quad t]\tilde{X} \tag{4}$$

2．2 エピポーラ幾何

次に 2 台のカメラで投影を行う場合を考える。複数の視点における相対的なカメラの位置や姿勢の情報はエピポーラ幾何によって記述できる。

図 2 に示すように $C^{(1)}$ を第 1 カメラの光学中心とし、ワールド座標系の原点にとる。$C^{(2)}$ を第 2 カメラの光学中心とする。$C^{(1)}, C^{(2)}, X$ を含む平面 Σ をエピポーラ平面といい、エピポーラ平面 Σ と画像面 $\pi^{(1)}$、$\pi^{(2)}$ とが交わってできる直線 l、l' をエピポーラ線という。また視点 $C^{(2)}$ を画像面 $\pi^{(1)}$ に投影した点 e、逆に視点 $C^{(1)}$ を画像面 $\pi^{(2)}$ に投影した点 e' を共にエピポールという。エピポーラ線は必ずエピポールを通る。2 つの画像上の対応する点 x と x' の間の関係は E 行列で式（5）で表される。

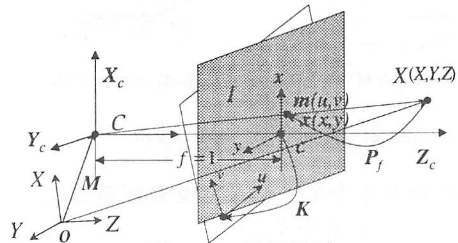

図 1　透視投影

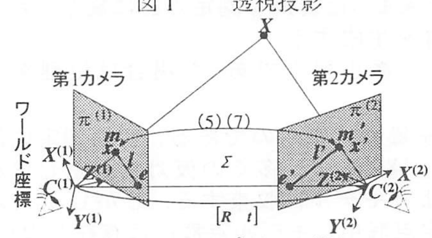

図 2　エピポーラ幾何

$$\tilde{x}^T E\tilde{x}' = 0 \tag{5}$$

式（5）をエピポーラ方程式といい、異なる視点から得られた 2 つの画像において対応する点は必ず式（5）を満たす。E 行列は 2 つのカメラ間の回転 R と並進 t から構成され、式（6）で表される。

$$E = t \times R = [t]_\times R \quad ただし\ [t]_\times = \begin{bmatrix} 0 & -t_3 & t_2 \\ t_3 & 0 & -t_1 \\ -t_2 & t_1 & 0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

同様に対応点 m と m' との間には式（7）に示すように F 行列によって対応点の関係が表される。

$$\tilde{m}^T F\tilde{m}' = 0 \tag{7}$$

式（7）もエピポーラ方程式という。F 行列は式（8）に示すように 2 つのカメラ内部パラメータ K_0, K_α と 2 つのカメラ間の

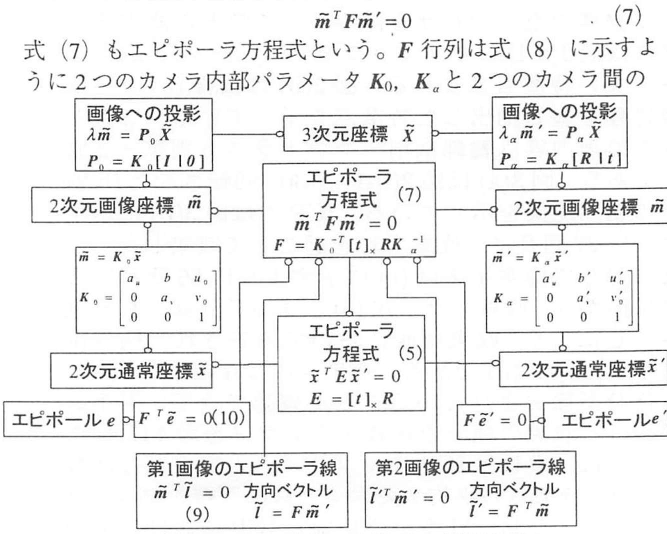

図 3　エピポーラ幾何の相互関係

回転$\boldsymbol{R}$と並進$\boldsymbol{t}$から構成される。

$$F = K_0^{-T}[t]_\times R K_\alpha^{-1} \tag{8}$$

$\boldsymbol{F}$行列からエピポーラ線が計算でき、第1画像上のエピポーラ線の方程式は式（9）で表される。

$$\tilde{m}^T \tilde{l} = 0 \quad ただし \tilde{l} = F\tilde{m}' \tag{9}$$

第2画像のエピポーラ線も式（9）と同様の方法で求められる。またエピポールも$\boldsymbol{F}$行列から求められる。第1画像上のエピポールは式（10）に示すように$\boldsymbol{F}$行列から求められる。

$$F^T \tilde{e} = 0 \tag{10}$$

第2画像のエピポールも同様の方法で求められる。しかし$\boldsymbol{F}$行列の階数が2であるから$\tilde{e}$と$\tilde{e}'$の絶対的な大きさまでは決定できない。これらの相互関係を図3に示す。なお図中の番号は、本文中の式番号に対応する。

3．復元の手順

形状復元の手順をIDEF-0を用いて図4に示す。それぞれの操作について次節以降に詳細を述べる。

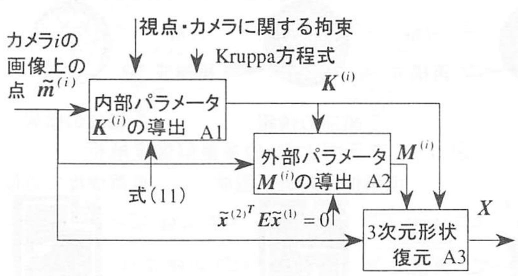

図4　　2次元画像から3次元形状復元の手順

3．1 カメラの内部パラメータの導出

図5に内部パラメータの導出過程を示す。また複数枚の画像から直接カメラ内部パラメータ行列を求める手続きにおける相互関係を図6に示す。カメラ内部パラメータ行列を求めるために絶対円錐曲線に基づいたKruppa方程式を用いる。絶対円錐曲線Ωとは無限遠平面Π_∞上の円錐曲線のことである。いまΩ上の任意の点 を画像上に投影する。すると画像上の円錐曲線ω、ω'は円錐曲線の方程式からカメラの位置、姿勢に無関係でカメラ内部パラメータのみに依存する関数になる。よってω、ω'が求まれば、$\boldsymbol{K}$を計算することができカメラの校正ができるが、直接ω、ω'を求められないのでこれらの双対を考え、その双対曲線を用いて円錐曲線と直線とが接するという条件を導き、その条件を適用させるためにそれぞれの画像においてのエピポーラ線がω、ω'に接すると考えて、2つの条件式を導きこの2つの方程式を同時に満たすものとして式（11）に示す行列Kruppa方程式を導出する。

$$FK_\alpha K_\alpha^T F^T = \lambda[e]_\times K_0 K_0^T [e]_\times^T \tag{11}$$

1組のステレオ画像から2つの拘束式が得られる。カメラの内部パラメータ行列の自由度は5であるので、3つの視点からの画像があれば6つの拘束式が得られ内部パラメータ行列の全ての要素が得られ、カメラの校正ができることになる。

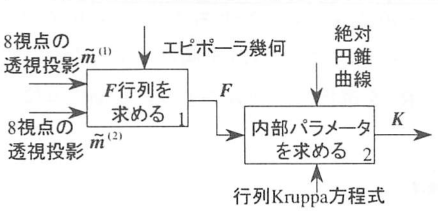

図5　　内部パラメータの導出

3．2 カメラの外部パラメータの導出

外部パラメータを求めるにはいくつか方法があるが本研究ではエピポーラ方程式（5）における$\boldsymbol{E}$行列を用いる。エピポーラ方程式（5）は$\boldsymbol{E}$行列を定数倍しても式（5）の表す内容に変化がなく定数倍の不定性があるため、8点の対応点があれば線形解法で解くことができる。$\boldsymbol{E}$行列の構成要素は3次元の回転$\boldsymbol{R}$と並進$\boldsymbol{t}$である。しかし、$\boldsymbol{E}$行列には定数倍の不定性があるため並進$\boldsymbol{t}$の大きさを求める事はできない。それらの導出過程を図7に示す。ただし$\hat{t}, \hat{M}$を不定性を持つ$\boldsymbol{t}$、$\boldsymbol{M}$とする。

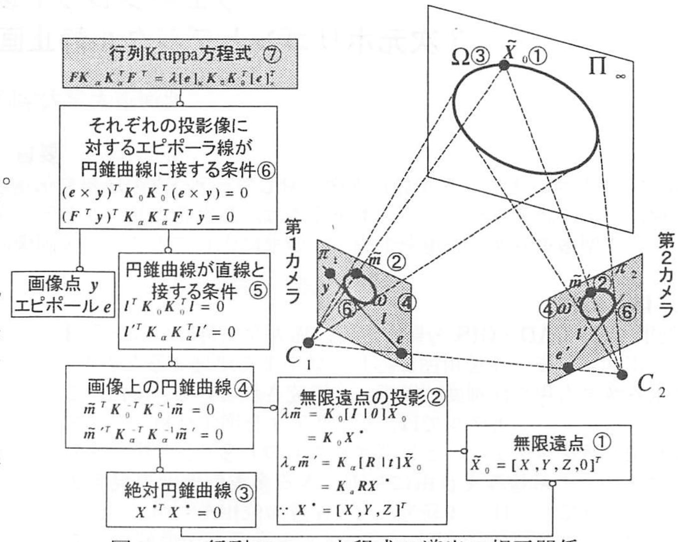

図6　　行列Kruppa方程式の導出の相互関係

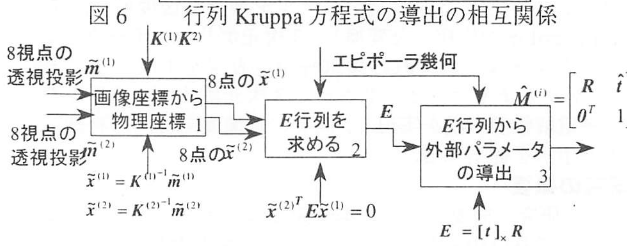

図7　　外部パラメータの導出

3．3 3次元形状復元

この段階でカメラ内部、外部パラメータ行列は求められているので、式（4）から射影行列$\boldsymbol{P}$は式（12）として導出できる。

$$P^{(i)} = K^{(i)} P_f M^{(i)} \tag{12}$$

よって$\lambda^{(i)}\tilde{m}^{(i)} = P^{(i)}\tilde{X}$から一般逆行列を用いて$\boldsymbol{X}$を計算できるが、カメラ外部パラメータが不定性を残しているのでこの$\boldsymbol{X}$にも不定性が残ってしまう（$\hat{X}$）。しかしそれは適切な補正値を与えてやることにより、正しい$\boldsymbol{X}$が計算される。それらの過程を図8に示す。

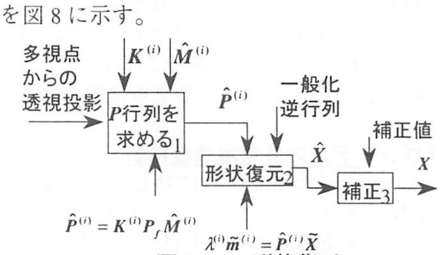

図8　　形状復元

4．結論

本研究の結論は以下の通りである。

エピポーラ幾何について形式表現することによって$\boldsymbol{F}$, $\boldsymbol{E}$行列、エピポーラ線、エピポールなどの相互の関係が明確になり、その結果$\boldsymbol{F}$, $\boldsymbol{E}$行列を基準として導出されていることから、$\boldsymbol{F}$, $\boldsymbol{E}$行列の導出が重要であることがわかった。

<参考文献>

[1]佐藤淳　コンピュータビジョン　コロナ社 1999

[2]S.J.Maybank and O.D.Faugeras. **A Theory of Self-Calibration of a Moving Camera** International Journal of Computer Vision, Vol.8, No.2, pp.123-152, 1992.