計測自動制御学会東北支部 第245回研究集会 (2008.10.24)
資料番号 245-3

複数視点画像による３次元形状復元

3D Shape Reconstruction Using Multi-View Images

○佐藤駿介*，大久保重範**

○Syunsuke Sato*, Shigenori Okubo**

*山形大学

*Yamagata University

キーワード： ３次元形状復元 (3D shape reconstruction)，カメラキャリブレーション(camera calibration)，カメラパラメータ (camera parameter)，エピポーラ (epipolar),

連絡先： 〒992-8510　米沢市城南4–3–16 山形大学 工学部 機械システム工学科 大久保研究室
佐藤駿介，Tel.: (0238)26-3245，Fax.: (0238)26-3245，E-mail: sokubo@yz.yamagata-u.ac.jp

1.　はじめに

人間は，2次元画像から3次元構造を知覚することができる．この知覚機能をコンピュータによって実現させようとする学問はコンピュータビジョンと呼ばれている．コンピュータビジョンによってコンピュータに人の知覚機能を持たせることができれば，より一層ロボットに人の役割を分担させることができ，広く応用できる分野である．
本研究はカメラの位置が未知である，人の手によって撮影された2次元画像から，被写体の3次元形状を推定するシステムの開発を目的とする．装置などを用いず，簡便な手法で画像から物体の形状情報を得ることができれば，低コストで3次元形状データを作成することができ，CG製作，計測，設計など様々な分野に応用することができる．

2.　撮影画像

入力データは，多視点から被写体をデジタルカメラで撮影したものを用いる．本稿では，結果の確認のために，Fig. 1のようなコンピュータ上の3Dモデルを手動で回転させながらスクリーンショットをとったものをデータとして用いるが，実際の撮影画像でも同様にして用いることが可能である．
カメラのパラメータを計算するためには画像間で共通する情報が必要であるため，印刷したパターンシートのモデルを用意し，このモデル上に対象となる物体モデルを置いた．

3.　パターンシートの点座標

パターンシートのモデルをFig. 2で示す．パターンシートの点の位置関係は既知であり，点の画像座標との対応をとることによりカメラの内部・外部パラメータを計算をおこなう．パターン点の画像座標を得るためには画像背景および被写体の雑音，被写体によって遮蔽されることを考慮する必要がため，点画像座標取得は次の手順で行った．

1) 画像を2値化し，ラベリング処理を行って画素の集合を分類し，各集合ごとの図形情報を

得る．

2) 図形の最長最短比等から，円形に近くない図形を除外する．

3) 図形をグループに所属させ，近いグループ同士から順に，以下の条件を満たしながら同一グループ化させていく

- グループ内でパターン点のサイズまたはパターン点同士の距離の違いが大きいグループは除外する．
- グループ化したパターン点から最小二乗法による直線を求め，その直線からのパターン点の距離が大きいグループは除外する．
- 目標パターン点数を超えたグループは除外する．

4) グループ化したパターン点サイズの大小を元にグループをに識別し，パターン点それぞれの画像座標を得る．

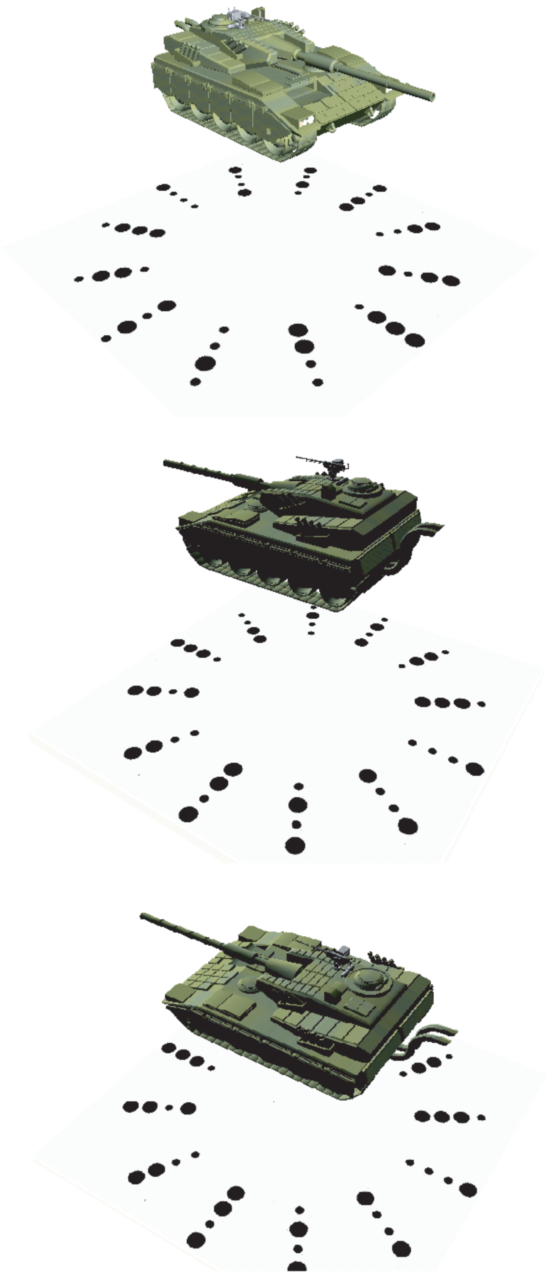

Fig. 1　Multi-View Images

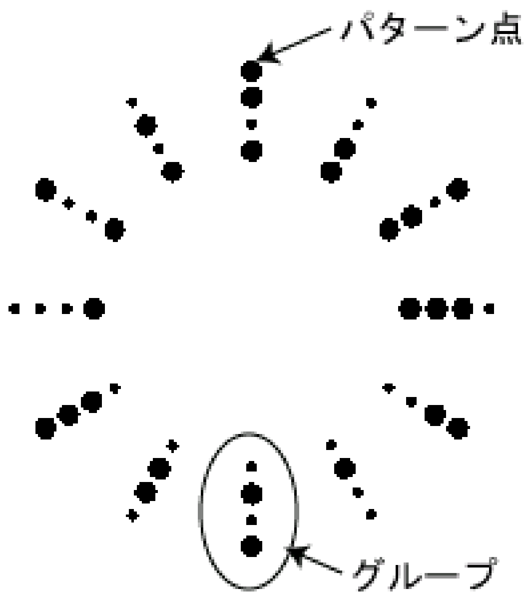

Fig. 2　Pattern Sheet

4. カメラキャリブレーション

パターンの画像座標を元に，カメラの内部パラメータ$\boldsymbol{A}$および外部パラメータ$[\boldsymbol{R}|\boldsymbol{t}]$を求めるために，カメラキャリブレーションを行う．内部パラメータ$\boldsymbol{A}$は焦点距離，CCDの素子の並びの角度などのカメラの性質であり，外部パラメータ$\boldsymbol{R}$，$\boldsymbol{t}$はそれぞれの撮影画像におけるカメラの位置，姿勢等のカメラの運動情報である．

先のパターンシートの点の3次元座標

$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}^T$ と対応する画像座標

$\boldsymbol{m} = \begin{bmatrix} u & v \end{bmatrix}^T$ との関係はホモグラフィー行列$\boldsymbol{H}$を用いて次式で表すことができる．

$$s\widetilde{\boldsymbol{m}} = \boldsymbol{H}\widetilde{\boldsymbol{M}} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{H} = \boldsymbol{A}\begin{bmatrix} \boldsymbol{r}_1 & \boldsymbol{r}_2 & \boldsymbol{t} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

この式から2つの線形方程式を得て展開する．

$$\begin{bmatrix} X & Y & 1 & 0 & 0 & 0 & -uX & -uY & -u \\ 0 & 0 & 0 & X & Y & 1 & -vX & -vY & -v \end{bmatrix}\boldsymbol{h} = 0 \tag{3}$$

$$\boldsymbol{h} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{21} & h_{22} & h_{23}h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}$$

パターンシートの各点における(3)を積み重ねて

$$\boldsymbol{Bh} = 0 \tag{4}$$

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} X & Y & 1 & 0 & 0 & 0 & -uX & -uY & -u \\ 0 & 0 & 0 & X & Y & 1 & -vX & -vY & -v \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_nX_n & -u_nY_n & -u_n \\ 0 & 0 & 0 & X & Y & 1 & -v_nX_n & -v_nY_n & -v_n \end{bmatrix}$$

$\|\boldsymbol{Bh}\|$を最小とする$\boldsymbol{h}$を求める．最小二乗法により，

$$\min_{\boldsymbol{h}} \|\boldsymbol{Bh}\|^2 = \min_{\boldsymbol{h}} \boldsymbol{h}^T\boldsymbol{B}^T\boldsymbol{Bh} \tag{5}$$

ラグランジェの未定乗数法より，

$$\frac{d(C)}{d\boldsymbol{h}} = 2\boldsymbol{B}^T\boldsymbol{Bh} + 2\lambda\boldsymbol{h} = 0 \tag{6}$$

$$C = \boldsymbol{h}^T\boldsymbol{B}^T\boldsymbol{Bh} + \lambda(1 - \boldsymbol{h}^T\boldsymbol{h})$$

$\boldsymbol{h}$は$\boldsymbol{B}^T\boldsymbol{B}$の最小固有値に対する固有ベクトルとなり，ホモグラフィー行列が求められる．

また，(1)を

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{h}_1 & \boldsymbol{h}_2 & \boldsymbol{h}_3 \end{bmatrix} \cong \boldsymbol{A}\begin{bmatrix} \boldsymbol{r}_1 & \boldsymbol{r}_2 & \boldsymbol{t} \end{bmatrix} \tag{7}$$

とおくと$\boldsymbol{r_1}$，$\boldsymbol{r_2}$が直行する単位ベクトルなので

$$\begin{aligned} \boldsymbol{h}_1^T\boldsymbol{A}^{-T}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{h}_2 = 0 \\ \boldsymbol{h}_1^T\boldsymbol{A}^{-T}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{h}_1 = \boldsymbol{h}_2^T\boldsymbol{A}^{-T}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{h}_2 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{h}_i^T\boldsymbol{D}\boldsymbol{h}_j = \boldsymbol{v}_{ij}^T\boldsymbol{d} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{D} = \boldsymbol{A^{-T}A^{-1}} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{d} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{D}_{11} & \boldsymbol{D}_{12} & \boldsymbol{D}_{22} & \boldsymbol{D}_{13} & \boldsymbol{D}_{23} & \boldsymbol{D}_{33} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{v}_{ij} = [&h_{i1}h_{j1} \quad h_ih_{j2} + h_{i2}h_{j1} \quad h_{i2}h_{j2} \\ &h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3} \quad h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3} \quad h_{i3}h_{j3}]^T \end{aligned}$$

(8)から

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_{12}^2 \\ (\boldsymbol{v}_{11} - \boldsymbol{v}_{22})^T \end{bmatrix}\boldsymbol{d} = 0 \tag{11}$$

各画像における(11)を積み重ねて

$$\boldsymbol{Vd} = 0 \tag{12}$$

$\boldsymbol{d}$は先に$\boldsymbol{h}$を求めたのと同様に，$\boldsymbol{V}^T\boldsymbol{V}$の最小固有値に対する固有ベクトルとして求めることができる．$\boldsymbol{D}$が求まることにより，(10)から

$$\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha^2} & -\frac{\gamma}{\alpha^2\beta} & \frac{v_0\gamma - u_0\beta}{\alpha^2\beta} \\ -\frac{\gamma}{\alpha^2\beta} & \frac{\gamma^2}{\alpha^2\beta^2} + \frac{1}{\beta^2} & -\frac{\gamma(v_0\gamma - u_0\beta)}{\alpha^2\beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} \\ \frac{v_0\gamma - u_0\beta}{\alpha^2\beta} & -\frac{\gamma(v_0\gamma - u_0\beta)}{\alpha^2\beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} & \frac{(v_0\gamma - u_0\beta)^2}{\alpha^2\beta^2} + \frac{v_0^2}{\beta^2} + 1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} &v_0 = (D_{12}D_{13} - D_{11}D_{23})/(D_{11}D_{22} - D_{12}^2) \\ &\lambda = D_{33} - \left[D_{13}^2 + v_0(D_{12}D_{13} - D_{11}D_{23}\right]/D_{11} \\ &\alpha = \sqrt{\lambda/D_{11}} \\ &\beta = \sqrt{\lambda D_{11}/(D_{11}D_{22} - D_{12}^2)} \\ &\gamma = -D_{12}\alpha^2\beta/\lambda \\ &u_0 = -\gamma v_0/\beta - D_{13}\alpha^2/\lambda \end{aligned} \tag{14}$$

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{r_1} &= \boldsymbol{\lambda A^{-1} h_1} \\
\boldsymbol{r_2} &= \boldsymbol{\lambda A^{-1} h_2} \\
\boldsymbol{r_3} &= \boldsymbol{r_1} \times \boldsymbol{r_2} \\
\boldsymbol{t} &= \lambda \boldsymbol{A^{-1} h_3}
\end{aligned} \tag{15}
$$

カメラの内部パラメータ$\boldsymbol{A}$及び、カメラの外部パラメータ$\boldsymbol{R}$, $\boldsymbol{t}$を得ることができる．カメラの位置，姿勢を知ることができる．

5. 特徴点抽出

被写体の特徴点をHarrisオペレータを用い抽出する．Fig. 3のように特徴点を抽出する．

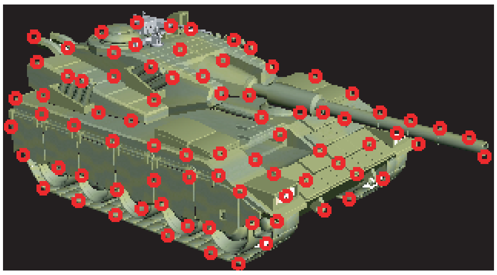

Fig. 3 Feature Point Extraction

6. 形状復元

カメラパラメータから画像間の運動を求め，特徴点の3次元座標を得る．カメラ間の運動を$\boldsymbol{T}$，2つの画像座標系(x, y),(x', y')を仮定すると，次式が成り立つ．

$$
\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = I_{24} \boldsymbol{T} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z(x, y) \\ 1 \end{bmatrix} \tag{16}
$$

$z(x, y)$を(x, y)の奥行きと仮定し，$z(x, y)$を変化させることで対応点を探す．Fig. 4は，上図のある一つの特徴点((Fig. 3の特徴点の中の一つ)(x, y)に対応する(x', y')（エピポーラ線）を別の画像に描画したものを下図に示したものである．このエピポーラ線にそって(x', y')の相似度を求め，相似度が高いときの$z(x, y)$を(x, y)の奥行きとすることで3次元形状を得る．ノイズに強くするため，相似度は正規化相関法を用いて対応点を中心とする局所的パターンの相似度を計算する．

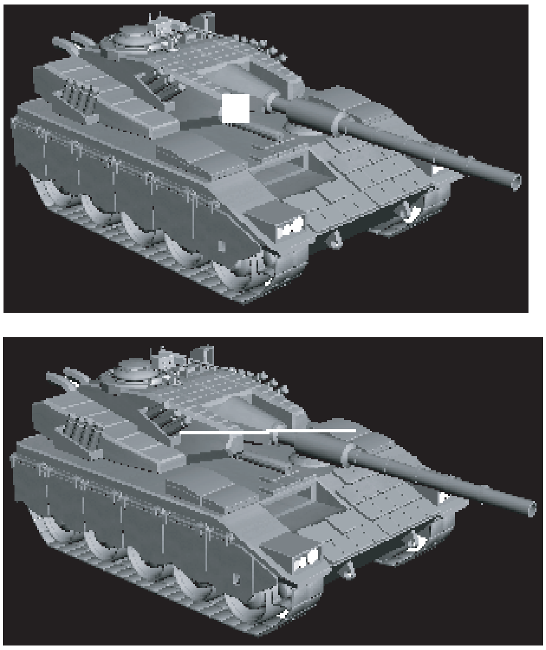

Fig. 4 Feature Point, Epipolar Line

7. おわりに

実際にプログラムを組んでみた結果，Fig. 4の例のように，上図の特徴点と下図のエピポーラ線が被写体の同じ位置の近くを通っているため，カメラの運動は得られている．このような運動を得るため必要な写真の枚数は，写真の撮り方により変わるが20〜40枚ほど必要である．今後は，得られた3次元形状を元に，3Dモデルを作成し，3Dモデルを作成するために十分な精度が得られているかどうか確認していく予定である．

参考文献

1) 佐藤　淳: コンピュータビジョン，コロナ社(1999)
2) Zhengyou Zhang: A Flexible New Technique for Camera Calibration IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **22**-11, 1330/1334 (2000)
3) 徐　剛: 写真から作る3次元CG，近代科学社(2001)