

2001年10月13日(土)

資料番号197-13

明るさ拘束に基づく tri-focal テンソルの導出による画像からの三次元形状の復元

3D Structure from Images

Using Tri-focal Tensor and Brightness Constraints

○千葉光平, 岡谷貴之, 出口光一郎

○ Kohei Chiba, Takayuki Okatani, Koichiro Deguchi

東北大学

Tohoku University

キーワード: コンピュータビジョン, 三次元形状復元, Tri-focal テンソル, オプティカルフロー

〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01 東北大学大学院 情報科学研究科

システム情報科学専攻 出口研究室

千葉光平, Tel.(022)217-7017, E-mail: chiba@fractal.is.tohoku.ac.jp

1. はじめに

三次元物体の形状復元法は、ステレオ法や、オプティカルフローを用いて行われてきた。しかしステレオ法にはカメラのキャリブレーションが難しい。オプティカルフローを用いる場合には、オプティカルフローそのものを正確に求めるのが難しい。などといった困難な問題がある。

それに対して、カメラの位置をずらして得た三枚の画像を用い、その三枚の画像の間に存在する関係を示す Tri-focal テンソルを導出し、それにオプティカルフローの拘束式を導入して、カメラパラメータが未知のままでオプティカルフローの対応付けも行わない三次元物体の形状復元を行う手法が提案された[1]。

ここでは、その手法の有効性を実証すると共に、実用上の問題点を指摘する。

2. Tri-focal テンソルの導出

三次元空間の物体とカメラの配置を図 1 に示す。この図で P は三次元空間内の注視して

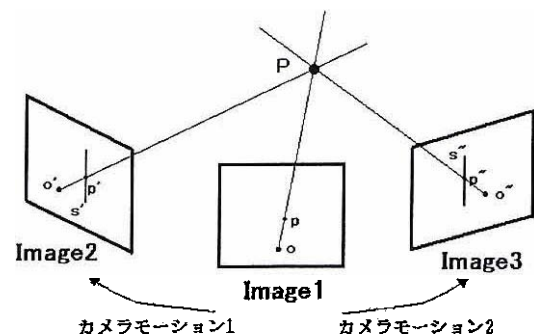


図 1:カメラ配置図

いる点であり、 p 、 p' 、 p'' はそれぞれ Image1、Image2、Image3 に P を投影したときの画像上の点である。

ここで Image1 上の点 p の斉次座標を $(x, y, 1)$ 、三次元空間の点 P の斉次座標を $(X, Y, Z, 1)$ とし、次のような関係を持つものとする。

$$p \equiv [I; 0]P \quad (1)$$

($\equiv$ は定数倍をして等しいことを表す)

次に Image2、Image3 上の点 p' 、 p'' と Image1 上の点 p との関係は(1)を次のように表される。

$$p' \equiv Ap + \rho t' \quad (2)$$

$$p'' \equiv Bp + \rho t'' \quad (3)$$

ここで A 、 B 、 t' 、 t'' は、それぞれ Image1 に対する、Image2 の回転、Image3 の回転、Image2 の並進、Image3 の並進であり、 ρ は相対アフィン深さである。

Image2、Image3 上で、 p' 、 p'' を通る直線を考え、それらを定数ベクトル s' 、 s'' を用いて次のように表す。

$$s'^T p' = 0 \quad s''^T p'' = 0 \quad (4)$$

すると、(2)、(3)式に(4)式を用いて ρ を消去し、次式が得られる。

$$s'^T t' s''^T Bp - s''^T t'' s'^T Ap = 0 \quad (5)$$

この式をテンソル表記したのが次式である。

$$p^i s'_k s''_j T_i^{jk} = 0 \quad (6)$$

ここで T_i^{jk} はカメラの位置関係のパラメータ A 、 B 、 t' 、 t'' から作られるテンソルで Tri-focal テンソルと呼ばれる。

これにより定数ベクトル s' 、 s'' を導入することによって、 p' 、 p'' とカメラの動きを結びつける関係式が得られたことになる。

3. オプティカルフローの明るさ拘束式

次に実際にカメラ位置を求めるための拘束

を運動場方程式とオプティカルフローの拘束式から導出する。

カメラの回転は微小とすると

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

と表される。

さらに、物体の奥行き方向の並進も十分小さいとする。

このとき、カメラの運動に対する画像の動きは次に示す方程式で表される[2]。

$$\begin{aligned} u' &= \frac{1}{z}(t'_1 - xt'_3) - \omega'_3 y + \omega'_2(1 + x^2) - \omega'_1 xy \\ v' &= \frac{1}{z}(t'_2 - yt'_3) + \omega'_3 x - \omega'_1(1 + y^2) + \omega'_2 xy \end{aligned} \quad (8)$$

ここで u' 、 v' はそれぞれ画像上のオプティカルフローの x 方向、 y 方向成分ので、 t' 、 ω' はそれぞれ並進と回転の速度である。

一方、オプティカルフローには次の明るさ拘束式が成り立つ。

$$u'I_x + v'I_y + I'_t = 0 \quad (9)$$

この式で I_x 、 I_y はそれぞれ Image1 の濃淡の x 方向、 y 方向の微分であり、 I'_t は画像の時間微分でここでは Image1 と Image2 の画像上の同座標の点の濃淡の差をあてる。

次に s 、 q を次の(10)、(11)式のようにおくことにより(8)式を用いて、(9)式を(12)のように書きかえる。

$$\begin{pmatrix} I_x \\ I_y \\ -xI_x - yI_y \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$q = p \times s = \begin{pmatrix} -I_y - y(xI_x + yI_y) \\ I_x + x(xI_x + yI_y) \\ xI_y - yI_x \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$ks^T t' + q^T \omega' + I'_i = 0 \quad (12)$$

この式の k は (8) 式の $\frac{1}{z}$ を置き換えたものである。

同様の式変形を Image3 に対しても行うことで次式を得る。

$$ks^T t'' + q^T \omega'' + I''_i = 0 \quad (13)$$

上の (12)、(13) 式から k を消去すると次の拘束式が得られる。

$$I'_i s^T t' - I''_i s^T t'' + s^T [t' \omega''^T - t'' \omega'^T] q = 0 \quad (14)$$

この式は画像上のすべての点において成り立つ。そこで、すべての点におけるこの拘束からできる式を連立させて解くことでカメラの運動パラメータを決定できる。

4. カメラ運動の推定

カメラモーションの推定法を次に示す。

画像上のすべての点に対する (14) 式を並べて次のような式を作る。

$$\begin{pmatrix} I''_{11} s_{11} & \cdots & s_{31} q_{31} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I''_{1N} s_{1N} & \cdots & s_{3N} q_{3N} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t'_1 \\ \vdots \\ t'_3 \\ w_3 \\ -t_3 \\ w_3 \end{pmatrix} = 0 \quad (15)$$

(15) 式内の左側の括弧内は画像から得られる値である。右側の括弧内はカメラの運動を表す 15 のパラメータからなっているので、(15) 式を解くことによりカメラモーションが決定される。

5. 物体形状の復元

前項においてカメラ運動が求まったとする。続いて、それを用いて画像から物体形状の復元を行う。

カメラ運動が求まったとすると、それらは (12)、(13) 式の拘束を満たさねばならない。そこで各式のこの拘束からのずれの二乗を足し合わせたものを評価関数とする。

$$E = \min_k \sum_{x,y \in R} \sum_i \beta(x,y) |s^T t^j| (ks^T t^j + q^T \omega^j + I'_i)^2 \quad (16)$$

ここで β は注目している点を中心とするある範囲 R の中心に近い側により大きな重みをかける関数である。絶対値のついている項は画像の濃度公配が少ないところでは重みを少なくするようにする項である。この評価関数を最小にするような k を求める。これによりカメラから物体上のそれぞれの点までの深さが分かる。

6. 実験

6. 1 シミュレーション

まず、シミュレーションとして次の二つの場合について検証を行った。

カメラから物体の中心までの距離を 1 m、カメラの焦点距離を 3 0 mm、カメラの視野角を 20° とし、復元対象の物体として(1)半径 0. 3 m の球、(2)半径 0. 2 5 m の円柱を考え、それぞれの表面には、中心からの奥行きに比例した濃淡の画像が貼り付けてあるとする。画像のサイズはともに、5 0 1 pixel $\times$ 5 0 1 pixel である。(1)、(2)の画像を図 2 に示す。

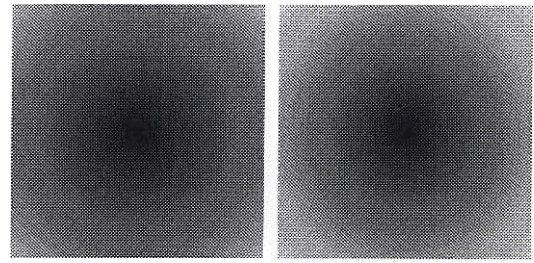


図 2 : (1)球面(2)円柱面

カメラをそれぞれ上と右にずらして取った計二枚の画像をそれぞれ用意し、三枚の画像で一つの物体の形状復元を行う。

球の場合の復元結果を図 3 に、円柱の場合の復元結果を図 4 に示す。復元の際は焦点距離などの情報は用いない。画像の中央付近で連続的でない部分が見られる。これは物体の形状の公配と表面の濃淡の公配が、ともに 0 に近くなるために起こると考えられる。

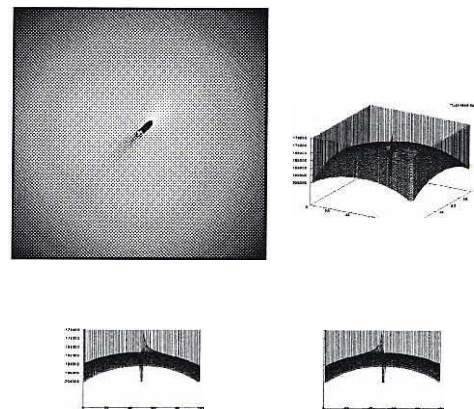


図 3 : 球復元図

6. 2 実画像による実験

次に実験に用いた三枚の画像を図 5 に示す。撮影には焦点距離 2 4 mm、画角 60° のデジタルスチールカメラを用い、物体までの距離は約 0. 7m とし、画像の x 軸、y 軸方向にそれぞれ 5mm カメラを動かし二枚の画像を得た。画像のサイズは 5 7 6 pixel $\times$ 3 7 8 pixel で、1 1 5 2 pixel $\times$ 7 5 6 pixel の画像を 4 分の 1 に圧縮して用いている。

実画像の場合の復元結果を図 6 に示す。復元には焦点距離などのカメラパラメータは用いていない。

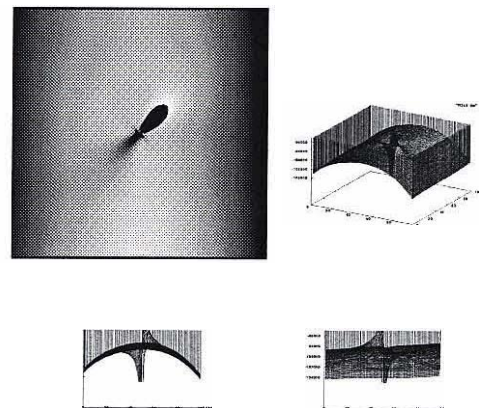


図 4 : 円柱復元結果

7. おわりに

三枚の画像系列間の関係を示す Tri-focal テンソルを導出、オプティカルフローの明るさ拘束式を導入し、カメラパラメータやオプティカルフローの対応付けを必要としない方法で物体の三次元形状復元のシミュレーションを行

い、実画像による実験を行った。

シミュレーションは球面と円柱面について行い、形状の復元を確認した。

実画像における実験では、円柱部分の形状の復元を確認できたが、背景部分ではよい結果を

得られなかった。

円柱部分には表面に濃淡のある縞模様があるが、背景部分は比較的濃淡が少ない。濃淡が少ない部分や濃淡が急激に変化する部分では、差分による画像の微分がきちんと得られないため、背景部や円柱との境目は形状が求まらなかったと考える。これを克服するためには差分の精度を上げる必要がある。

また、濃淡のなだらかな部分や表面の形状が滑らかな部分以外の影響を少なくするために、動きの推定を画像の一部分に限定して行う必要がある。

参考文献

[1]Gideon P. Stein and Amnon Shashua:
Model-Based Brightness Constraints: On
Direct Estimation of Structure and Motion,
IEEE Transactions on Pattern Analysis and
Machine Intelligence, Vol.22, No.9,
pp.992-1015, September, 2000

[2]出口:画像と運動の対応付け,
計測と制御, 第40巻, 9号, pp.618-623,
2001

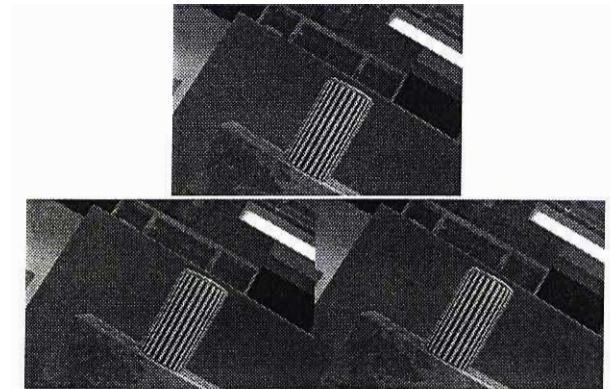


図 5:復元に用いた実画像

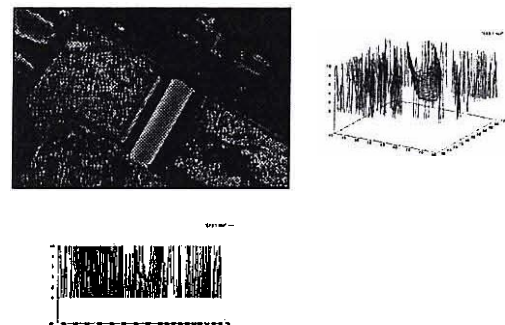


図 6:実画像復元結果