

星座認識のためのカメラ補正 Camera Calibration for Constellation Recognition

岩波 聖人 新谷 幹夫
Masato Iwanami, Mikio Shinya

1 はじめに

夜空を眺め、星を見上げるのはロマンティックではあるが、星空を楽しむために必要な星座の知識は数層が高い。本研究は、画像から星を認識することを目的とし、その認識と表裏一体であるカメラ補正法を論ずる。応用としては、携帯電話の画像メール機能を利用したオンライン星空ガイドンスや PC 接続型天体望遠鏡などを想定する。本稿の具体的寄与は従来法より 1 点少ない 4 点の対応により透視変換の推定を可能とした点にある。

2 天体とカメラのモデル

天体 恒星は無遠にあり、その絶対位置を変えないと見なせる。したがって、その同次座標 $U=(U_x, U_y, U_z, 0)^t$ は絶対座標系 XYZ で不変である (図 1)。天文分野では、天球座標系と呼ばれる絶対座標系が用いられ、様々な恒星の座標データベースが公開されている。

カメラモデル 透視投影カメラであるとすれば、 4×3 行列 T により、像点 u は

$$s u = T U \quad (1)$$

と与えられる。s はスケールファクタで任意の定数である。T の要素数は 12 だが、スケール倍の任意性があるので、実際には 11 自由度である。

画像中心を原点にとり、カメラの軸が直交していれば、

$$T = \begin{pmatrix} dx \cdot \hat{x} & tx \\ dy \cdot \hat{y} & ty \\ \hat{z} & tz \end{pmatrix} \quad (2)$$

$\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ はカメラ座標の軸方向単位ベクトル、 $t=(tx, ty, tz)^t$ は移動ベクトル、dx, dy は倍率である。回転の自由度が 3、移動の自由度が 3、倍率の自由度が 2 で合計 8 自由度となる。T は自由度に応じ、何組かの対応点の対 U_i, u_i から推定ができる。

透視変換 T が正しく推定されれば、像点とデータベース上の星のモデル (3 次元座標) とが数値的に対応できる。すなわち、認識と透視変換の推定はほとんど表裏一体であることが分かる。

3 アプローチ

通常のカラリブレレーションと異なるのは、対応関係が未知である点である。そこで、

1) 対応を仮定し、2) T を推定し、3) その妥当性を評価し、4) 最も妥当な T を採用する、ことにする。したがって、推定法としては、推定精度そのものより、以下の点が重要となる。

① **少ない対応点数**: 組み合わせ数を押さえるため、必要とされる最小対応点数を小さくしたい。例えば、4 点と 5 点では大きな違いとなる。

② **小さな計算量**: 同じく多数の組み合わせに対する計算を行うので、個々の計算量も押さえたい。

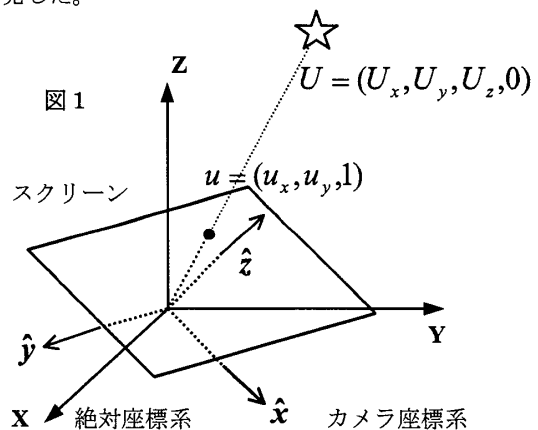
東邦大学理学部情報科学科

Dept of Infomation Science, Toho Univ.

③ **頑強性**: 仮定されるほとんどの対応は誤ったものなので、破綻しない強さが必要である。

条件①のためには自由度の低い直交性を仮定した変換式 (2) を推定することが望ましいが、非線形方程式を解く必要があり、条件②③を満たさない。一方、一般の透視変換式 (1) を解くことは線形処理で可能であり、②③の意味では好ましいが、自由度が 11 と高く、必要対応点数が 6 と多くなってしまふ。

対象形状を平面に限定すれば、式 (1) は縮退し、自由度が減少する。縮退した変換を計算した後に、直交性を導入すれば、不足した情報を復元できる。広く利用されている Tsai の手法 [1] でも、初期値を求めるのに同様なアプローチを取っているが、5 点の対応が必要とされている。前述のように本研究では対応点数の増加は致命的になりうる。そこで、以下のように、4 点の対応から推定ができる手法を開発した。



4 提案手法

4-1 クロスレイシオ法

U_i が同一平面上にあるとする。簡単のため、この平面の法線方向を絶対座標系の Z 軸に取る。このように取れば、 U_{zi} は一定値 c と置ける (一般の場合は、このように座標変換すると考えればよい)。すると、式 (1) は、

$$s \cdot u_i = P (U_{xi} U_{yi} 1)^t \quad (3)$$

のように表せる。P は 3×3 であるが、s は任意なので、例えばある要素を 1 と置くことができ、未知数は 8 個とできる。したがって、4 点の同一直線上にない点の対応が与えられれば、線形連立方程式を解くことで P が求まる。この処理は幾何学的には透視変換不変量であるクロスレイシオを利用していると解釈できるので、クロスレイシオ法と呼ぶことにする。P は任意の 4 対応点に関して決定されるが、一般には直交条件は満たしていない。

4-2 直交化

直交条件に基づき、縮退により欠落した情報を推定することができる。P を用いれば、新たな対応点をいくらでも計

算できるので、例えば Tsai の手法を適用することも可能である。しかし本研究では、星が無限遠にあり、視点が原点にあること ($t=0$) を利用し、より簡単な手法で復元する。まず、画像中心(00)が視軸 (z 軸) 上にあるとして、

$$z_c = P^{-1}(0\ 0\ 1)^t$$

により、平面と z 軸との交点 z_c を求め、それを正規化して視線方向 \hat{z} を求める。x 軸上の像点(1,0)を通る光線と平面との交点 x_c を同様に

$$x_c = P^{-1}(1\ 0\ 1)^t$$

と求める。ys は zs と x_c に垂直で、右手系を仮定すれば、

$$\hat{y} = (\hat{z} \times x_c) / |\hat{z} \times x_c|$$

と求まる。x 軸も、

$$\hat{x} = \hat{y} \times \hat{z}$$

で求められる。倍率は

$$U_i = (\hat{x}\ \hat{y}\ \hat{z})^t U_i$$

とカメラ座標系に変換しておけば、

$$u_{ix} = dx U'_{ix} / U'_{iz}$$

$$u_{iy} = dy U'_{iy} / U'_{iz}$$

なので、例えば線形の最小自乗法などで求めることができる。これにより、T が完全に復元される。

4-3 推定結果の評価と認識

前述のように P は一般に直交ではなく、他方 T は直交している。P を用いれば U_i の像は u_i に重なるが、T を用いた場合、P が直交であるときに限り重なる。そこで、

$$D = \sum |u_i - T U_i|^2$$

が小さければ、推定した P が直交に近く妥当性が高いと言える。さらに、推定に用いた 4 点以外にも星像点 v があれば、この点と、座標データベースの星 V_j を T を用いて投影した点のうち最も近い点との距離

$$e = \min (|v - T V_j|^2)$$

が小さいほど、T はもっともらしい。そこで、この和と D の和

$$E = \sum e + D$$

により、推定結果を評価する。最小の評価値 E を与える T が推定結果で、そのとき得られる星像とデータベースとの対応が、認識結果となる。

5 枝刈り判定

データベースは 1000 オーダーの恒星を想定しているので、全ての 4 つ組について推定処理を行うことは避けたい。そこで、1) 画像が右手系である (鏡を用いない) こと、2) カメラの最大画角 A を設定すること、を前提に枝刈りを行う。具体的には以下の判定を行う。

①最初の星 U_1 を仮定したら、方向 (座標) の差が最大視野角以内の星のみを 2 番目以降の星として選択する。

② U_1 と 2 番目の星 U_2 の対応が決まった後、3 番目の星 U_3 と U_1, U_2 の左右関係が、画像面での u_1, u_2, u_3 の左右関係が一致しない場合は棄却する。

③最大視野角を用いると長さの比が

$$\cos A < (L_{12}/L_{13}) / (l_{12}/l_{13}) < 1 / \cos A \quad (4)$$

であることが証明できる。ただし、

$$L_{ij} = |U_i - U_j|, l_{ij} = |u_i - u_j|$$

である。 U_1, U_2 選択後、(4) 式を満足しない U_3 は選択しない。また、 U_1, U_2, U_3 選択後は U_4 についても同様の判定をする。

U_2, U_3 選択時に大半の星を棄却できるので、効果が期待できる。

6 処理のアウトライン

全体の処理の流れを以下に示す。

- (1) 画像の読み込みと星の像点の抽出
- (2) 抽出した像点から、一直線上にない 4 点 u_i を選ぶ。
- (3) データベースの全ての星の中から、枝刈り判定①②③をパスしたものについて、4 点を適当な仮想平面に投影し、 U_i を得る (図 2)。この平面上の点 U_i に対してクロスレイシオ法を用いて透視変換 T を推定し、評価値 E を計算する。
- (4) 最小の E を与える対応を認識結果とする。

6 予備実験

オリオン座など 5 つの星座、38 個の星をデータベースとして用い、予備的な実験を行った。市販デジタルカメラで撮影した数枚の画像から、簡単な閾値処理などで星像点を抽出し、提案手法による認識実験を行ったところ、正しい認識結果が得られた。カテゴリ数、データ数共に限られてはいるが、原理確認はできたと考えている。

7 まとめ

夜間天空写真から星を認識することを目的とし、認識と表裏一体であるカメラ補正法としてクロスレイシオ法を提案した。想定する応用形態では、カメラ補正で必要とされる対応点数を減少させることが、重要なポイントであるが、本手法では、従来法より一点少ない 4 点で推定が行える。また、組み合わせ数を押さえるための枝刈り処理も提案した。予備実験で良好な結果が得られたが、今後、星像点抽出法の検討を進めるとともに、数 1000 規模の恒星データベースを用いて、有効性を実証的に検証して行きたい。

(参考文献)

[1] R Tsai, A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses, IEEE J. of Robotics and Automation, vol. RA-3, No.4, pp.323-344 (1987).

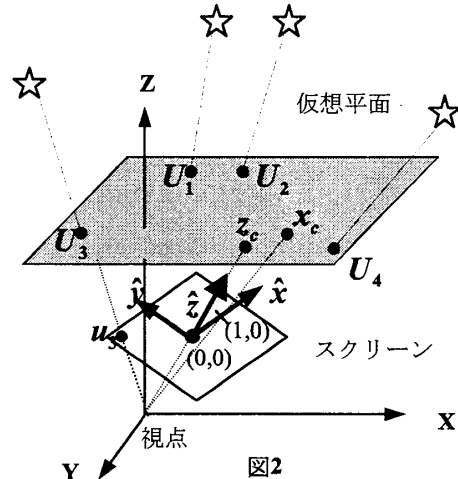


図 2