

4C-6

オブジェクト指向パラダイムに基づくカメラキャリブレーションデータの記述

○藤井 誠 稲葉雅幸 井上博允
 東京大学工学部

1. まえがき

カメラキャリブレーションの手法として、現在多くのものが研究されている。本稿では、従来からある、画像点の対応から透視変換行列を求める手法を、画像の直線の対応を用いるように拡張し、またオブジェクト指向型言語でキャリブレーションデータをクラス化した。これにより、キャリブレーションの計算時にこれらの、対応のタイプの異なるデータが混在可能となり、更にこのデータ構造が他のキャリブレーション手法にも応用できることを示す。

2. カメラモデルの算出

カメラを、単純に透視変換の座標系でモデル化した。カメラのパラメータとしてはこの座標系の位置、姿勢(外部パラメータ[EXT])のほかに、カメラに固有の内部パラメータ[INT]をもつ。[INT]は、1画素当たりの視野角の逆数(k_u, k_v):スケールに相当するもの)、スクリーン座標におけるスクリーンとレンズの光軸との交点(u_0, v_0)、より決まる。

透視変換は 3×4 の透視変換行列[T]で表現され、 $[T] = [INT][EXT]$ と表される。具体的には、[1]

$$[INT] = \begin{bmatrix} k_u & u_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_0 & k_v & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

本章では、対象世界と画像の対応から透視変換行列を計算する方法について説明する。透視変換行列からこれらのパラメータを分離する方法については、例えばGanapathyの方法[1]がある。

シーンの3次元の点(x y z)と、その投影点である画像上の2次元の点(u v)との関係は、透視変換行列によって次のように表される。

$$(U \ V \ W)^t = [T](x \ y \ z \ 1)^t \\ (u \ v)^t = (U/W \ V/W)^t$$

[T]の要素数は $3 \times 4 = 12$ であるが、[T]を定数倍しても投影は不変で、[T]の独立変数は11個である。

[T]のij成分を t_{ij} と表すと、 $t_{34} = 1$ としてよく未知パラメータは $X = (t_{11} \ t_{12} \ t_{13} \ t_{14} \ t_{21} \ t_{22} \ t_{23} \ t_{24} \ t_{31} \ t_{32} \ t_{33})^t$ となる。シーンと画像の間の、対応づけは、この11個の変数の間に、なんらかの条件式をもたらす。以下にその例を挙げる。

1) 点と点の対応[2]

これはシーンのある点(x y z)の画像上の投影点が既知(u v)である場合で、u方向とv方向の拘束から、1組の対応につき2個の線形の条件式が得られる。

具体的には、

$$[x \ y \ z \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -ux \ -uy \ -uz] X = u \\ [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ x \ y \ z \ 1 \ -vx \ -vy \ -vz] X = v$$

これは共に $aX = b$ と表される。

2) 直線と直線の対応

シーンにおける直線 l_s (2点 (x_a, y_a, z_a) (x_b, y_b, z_b) で代表させる)の投影としての直線が、画像上で分かっている(点 $(u' \ v')$ を通る方向ベクタ $(du \ dv)$ の直線-直線 l_c とおく)場合。このとき、2点 (x_a, y_a, z_a) 、 (x_b, y_b, z_b) の投影が共に l_c 上にあることから、1組のあたり2個の線形の条件式が得られる。

具体的には、

$$[dvx_a \ dvy_a \ dvz_a \ 0 \ -dux_a \ -duy_a \ -duz_a \ -du \ (v'du-u'dv)x_a \ (v'du-u'dv)y_a \ (v'du-u'dv)z_a] X = 0 \\ [dvx_b \ dvy_b \ dvz_b \ 0 \ -dux_b \ -duy_b \ -duz_b \ -du \ (v'du-u'dv)x_b \ (v'du-u'dv)y_b \ (v'du-u'dv)z_b] X = 0$$

これも、共に $aX = b$ と表される。

このようにしていくつかの対応データの組から、Tの成分に関する条件式が11個以上揃えばTを求めることができる。なお、条件式が11個より多いときの処理は疑似逆変換法[2]による。

3. 対応データのクラス化

対応のタイプ毎にクラスを設け、個々の対応データはそのインスタンスとして表現される(図1)。カメラのインスタンスがこれらを統括する。これらのデータの組から透視変換行列を求める際には、各データの組に区別なく同名のメソッド:coef-a, :const-bを送り、2章で説明した線形条件式の係数aと定数項bを問い合わせる。個々のデータの組は、それに対して、各々の対応のタイプに応じた係数、定数項の値を返す。カメラはそれらから成る係数行列A、定数項ベクタbを構成する。ここに、i番目の対応データによる線形条件式(2つ)を

$$a_{1i} X = b_{1i} \\ a_{2i} X = b_{2i} \quad \text{とかくと}$$

A description of camera calibration data based on object oriented paradigm

Fujii Makoto, Inaba Masayuki, Inoue Hirochika
 Univ. of Tokyo

$$A = [a_{11} \ a_{21} \ a_{12} \ a_{22} \ \dots \ a_{1i} \ a_{2i} \ \dots]^t$$

$$b = [b_{11} \ b_{21} \ b_{12} \ b_{22} \ \dots \ b_{1i} \ b_{2i} \ \dots]^t$$

このA, bより疑似逆変換法で連立方程式を解き、透視変換行列を求める。

このデータ構造の特徴は、性質の違ういくつかのキャリブレーションデータを自由に混在させることができる点である。

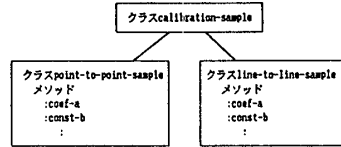


図1 キャリブレーションのためのデータのクラス木。その対応のタイプにより別々のクラスが混在されているが、両名のメソッドを持っているため、外部から区別なく扱える。

4. 実システムへの応用

実際の画像データ [3]と3次元ソリッドモデラ [4]を用いて行ったキャリブレーション例を図2に示す。図2に於てエッジ4箇所、点3箇所の対応を人手で選んで与えた。この7個の対応データから透視変換行列を算出し、Ganapathyの方法によりカメラパラメーターを求めた。このように直線対応のデータと点对応のデータが混在可能である。この場合、4つのエッジのみ、または3つの点のみでは、データの数が不足により透視変換行列の算出は不可能である。また、直線の対応を用いると途切れて短くなった線分でもデータとして用いることができる。

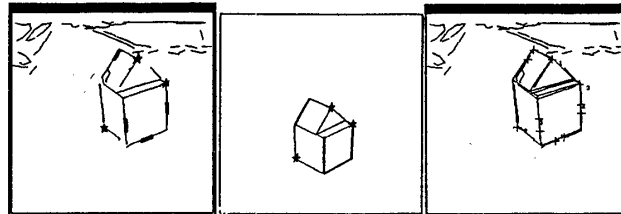


図2 左: エッジ抽出ハードウェア [3]による積木シーンの画像。
中: 積木の3次元モデル。
両者の対応を、太線で示されたエッジ4箇所と、*印で示された点3箇所の対応をデータとして与えた。
右: 求めたカメラパラメーターに従ってモデルを再投影した(画像線分と重畳して表示)。

5. 他のキャリブレーション手法への拡張

[INT]が既知のとき画像上の誤差の自乗和が最小になるように[EXT]をNewton-Raphson法により計算する場合にも、本システムのクラス化が有効である。この場合のキャリブレーションは非線形の多変数関数を最小にする問題で、繰り返し計算の各段階において、誤差自乗和のカメラパラメーターによる1階微分と2階微分が必要である。これらの算出は、個々のデータの組において別々に誤差自乗の微分を計算し、この和をとればよいから、3章と同じように、対応タイプのクラス毎に、以下のように誤差を定義することにより、異なるタイプのデータを区別なく扱える。

- 1) 点と点の対応の場合: シーン上の点(x y z)と画像上の投影点(u v)の距離の自乗
- 2) 直線と直線の対応の場合: 点(x_a y_a z_a)の投影点とLcの距離の自乗 + 点(x_b y_b z_b)の投影点とLcの距離の自乗。

なおこの誤差の定義は1例であり、例えば対応する直線の画像上でのずれの角などを評価関数に取り込むこともできる。

6. まとめ

キャリブレーションのためのデータをクラス化することによって、性質の違うキャリブレーションデータを統一的に扱えることを示した。これにより、例えば移動するカメラが、随時カメラ位置を計算する必要のある場合、灯台に相当するような点と点の対応と、テーブルの縁のような線と線の対応とをキャリブレーションデータとして混在して用いることができ、一方だけではデータが不足な場合でも両方を合わせることでキャリブレーションが可能となる。

本手法のプログラミングにはオブジェクト指向型言語Euslisp [5]を用いた。現在、この手法を、ある拘束条件にしたがって置かれている物体の姿勢計測に応用することを試みている。

参考文献:

[1] Sundaram Ganapathy, Decomposition of transformation matrices for robot vision
IEEE Conf on Robotices, 1984

[2] Dana H. Ballard / Christopher M. Brown 福村 訳
コンピュータ・ビジョン 日本コンピュータ協会、補遺1

[3] 森部、中野、久野、長谷川、濃淡エッジ線分化方式による画像処理(1), 昭和61年度電子通信学会総合全国大会6-274

[4] 松井、稲葉 「対象指向型Lisp: Euslispを用いたロボット用幾何モデリングシステム」, 情報処理学会37回大会, P1627

[5] 松井、塚本 「Euslisp: 対象指向による型拡張性を有するシステムの実現」, 情報処理学会35回大会