文章编号: 1008-1542(2008)01-0044-04

一种多摄像机视觉系统的标定方法

张颖康[1], 李雅轩[2], 孟军英[3]

(1. 河北大学电子信息工程学院, 河北保定　071002; 2. 河北科技大学图书馆, 河北石家庄　050018; 3. 石家庄学院计算机系, 河北石家庄　050019)

摘　要: 设计了一种标定多摄像机视觉系统的方法, 在多摄像机场景中, 放置共线的 2 点(一维标靶)并使其围绕 1 个固定端点摆动; 通过多摄像机从各自角度同步拍摄, 标定出各摄像机含径向畸变系数的内外参数。文中使用的标定物制作简单, 解决了标定物各角度的可见性问题, 适用于对分布式安放的多台摄像机进行集体标定。

关键词: 多摄像机系统; 摄像机标定; 一维标靶; 本质矩阵

中图分类号: TP39　　文献标识码: A

A method of multi-camera system calibration

ZHANG Ying-kang[1], LI Ya-xuan[2], MENG Jun-ying[3]

(1. College of Electronic and Information Engineering, Hebei University, Baoding Hebei 071002, China; 2. Library, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China; 3. Department of Computer, Shijiazhuang Institute, Shijiazhuang Hebei 050019, China)

Abstract: This paper proposes a flexible method of camera calibration: placing two collinear points with a fixed end point (1D object) which is captured by multi-camera systems. By moving the 1D object around the fixed point, all the cameras' parameters related to a coefficient of radial distortion can be calibrated easily. The calibration objects are simple to make and can be perfectly observed from any orientations. With these merits, the method is practical to calibrate the multi-camera systems. Experimental results show that the calibration is of high precision and convenience.

Key words: multi-camera system; camera calibration; 1D object; essential matrix

摄像机标定的过程是通过建立摄像机像素位置与场景点位置之间的关系, 最终确定摄像机内部几何和光学特性(内部参数)以及摄像机在三维空间坐标系中的位置和方向(外部参数)的过程。在运动捕捉等视觉系统中, 往往需要多台摄像机同时从多角度进行拍摄。基于 3D 立体标靶的标定方法[1]制作成本较高, 尺寸精度低。基于平面标靶的标定方法[2]因其标定板的可视范围有限, 也不适用于多目视觉系统。

笔者设计了一种基于一维标靶的多摄像机标定方法: 利用绕固定端点摆动的共线的 2 点(一维标靶), 标定出各摄像机的内外参数。一维标靶具有多角度可见和制作简单的优点, 适用于多摄像机系统的标定。

1　摄像机模型

摄像机成像模型见图 1, 点在成像平面 n_c 上的像素坐标为 $m=[u,v]^{\mathrm{T}}$, 在归一化投影平面 n_n 上的图像坐标为 $p=[x,y]^{\mathrm{T}}$, 空间点在摄像机坐标系 $OXYZ$ 下的坐标为 $M=[X,Y,Z]^{\mathrm{T}}$; 在世界坐标系 $O_{\mathrm{W}}X_{\mathrm{W}}Y_{\mathrm{W}}Z_{\mathrm{W}}$

收稿日期: 2007-10-30; 责任编辑: 李　穆
基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(F2007000221)
作者简介: 张颖康(1984-), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 主要从事计算机视觉方面的研究。

下的坐标为 $M_W=[X_W, Y_W, Z_W]^T$。点的齐次坐标记为 $\tilde{x}=[x^T, 1]^T$。在考虑畸变情况下有

$$\tilde{m}=\boldsymbol{K}\tilde{p}_d,\ \boldsymbol{K}=\begin{bmatrix}\alpha & \gamma & u_0\\ 0 & \beta & v_0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}。\tag{1}$$

其中：$p_d=[x_d, y_d]^T$ 为归一化投影平面上畸变后的图像坐标；$\boldsymbol{K}$ 为摄像机内部参数矩阵；α, β 是图像中 u 轴和 v 轴的比例因子；(u_0, v_0) 为图像坐标系主点；γ 为 u 轴和 v 轴的倾斜参数。摄像机的径向畸变是影响视觉精度的主要因素[4]，其畸变模型为

$$p_d=[1+k(x_u^2+y_u^2)]p_u,\tag{2}$$

其中：$p_u=[x_u, y_u]^T$ 为理想图像坐标；k 为一阶径向畸变系数。根据摄像机透视投影模型可以得到

$$\tilde{p}_u=\frac{1}{Z}M=[X/Z, Y/Z, 1]^T。\tag{3}$$

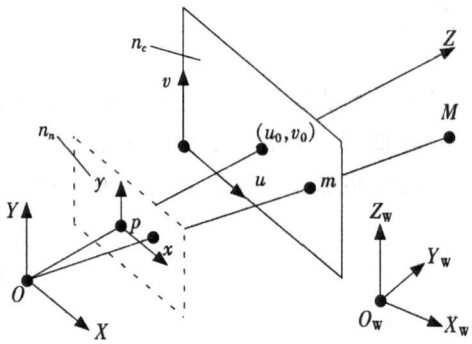

图 1　摄像机成像模型

Fig. 1　Camera model

由式(1)—式(3)可得，无畸变的摄像机内部线性模型为

$$Z\tilde{m}=\boldsymbol{K}M。\tag{4}$$

摄像机坐标系与世界坐标系间的空间欧式变换为

$$M=\boldsymbol{R}M_W+t,\tag{5}$$

其中：$\boldsymbol{R}$ 和 t 即为摄像机的外部参数，$\boldsymbol{R}=[r_1\quad r_2\quad r_3]$ 为 3×3 正交旋转矩阵(r_i 代表列向量)；$\boldsymbol{t}=[t_X\quad t_Y\quad t_Z]^T$ 为 3×1 平移向量。由式(4)、式(5)可得完整的线性投影模型

$$s\tilde{m}=\boldsymbol{K}[\boldsymbol{R}|t]\tilde{M}_W=\boldsymbol{P}\tilde{M}_W,\tag{6}$$

其中：s 为尺度因子；$\boldsymbol{P}=\boldsymbol{K}[\boldsymbol{R}|t]$ 为摄像机的投影矩阵。

2　各摄像机内部参数的标定

由图 2 可知，利用一维标靶进行标定，需要至少 3 个的共线点绕一端点摆动。为了便于旋转和固定，实际中可取消标靶的固定端点，其固定端点在图像中的坐标可利用最小二乘拟合法估计出[1]。

用 A, B, C 表示 3 点的摄像机坐标，a, b, c 表示 3 点在图像中的像素坐标。设 AB 长度为 L，则

$$\|B-A\|=L。\tag{7}$$

根据 3 点的位置关系，有

$$C=\lambda_A A+\lambda_B B,\tag{8}$$

其中：$\lambda_A=L_{BC}/L$；$\lambda_B=L_{AC}/L$。由式(8)可以得到

$$A=Z_A\boldsymbol{K}^{-1}\tilde{a};\ B=Z_B\boldsymbol{K}^{-1}\tilde{b};\ C=Z_C\boldsymbol{K}^{-1}\tilde{c}。\tag{9}$$

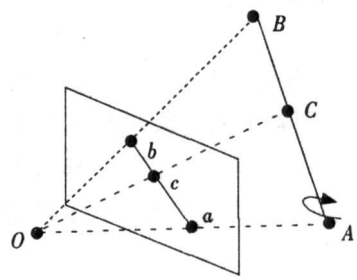

图 2　一维标靶

Fig. 2　1D calibration object

将式(9)代入式(8)并进行向量运算，可以推出

$$Z_B=-Z_A\frac{\lambda_A(\tilde{a}\times\tilde{c})\cdot(\tilde{b}\times\tilde{c})}{\lambda_B(\tilde{b}\times\tilde{c})\cdot(\tilde{b}\times\tilde{c})}。\tag{10}$$

将式(9)和式(10)代入式(7)最终可得

$$Z_A^2(\boldsymbol{h}^T\boldsymbol{K}^{-T}\boldsymbol{K}^{-1}\boldsymbol{h})=L^2。\tag{11}$$

其中：

$$\boldsymbol{h}=[h_1\quad h_2\quad h_3]^T=\tilde{a}+\frac{\lambda_A(\tilde{a}\times\tilde{c})\cdot(\tilde{b}\times\tilde{c})}{\lambda_B(\tilde{b}\times\tilde{c})\cdot(\tilde{b}\times\tilde{c})}\tilde{b}。\tag{12}$$

设 $\omega=\boldsymbol{K}^{-T}\boldsymbol{K}^{-1}$，由于 ω 为对称矩阵，可以用 6 维向量表示

$$\boldsymbol{d}=[\omega_{11}\quad\omega_{12}\quad\omega_{22}\quad\omega_{13}\quad\omega_{23}\quad\omega_{33}]^T。\tag{13}$$

令 $x = Z_A^2 \boldsymbol{d}$, 则由式(10)可得

$$\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}} x = L^2, \tag{14}$$

其中: $\boldsymbol{v} = [h_1^2 \quad 2h_1h_2 \quad h_2^2 \quad 2h_1h_3 \quad 2h_2h_3 \quad h_3^2]$。摄像机采集 N 幅图像可以得到

$$\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}} x = L^2 \boldsymbol{e}, \tag{15}$$

其中: $\boldsymbol{V} = [v_1 \cdots v_N]^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{e} = [1 \cdots 1]^{\mathrm{T}}$。利用最小二乘法得到

$$x = L^2 (\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{V})^{-1} \boldsymbol{V}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{e}。 \tag{16}$$

由 $\boldsymbol{x}$ 可构造出 $\boldsymbol{Z}_A^2 \omega = Z_A^2 \boldsymbol{K}^{-\mathrm{T}} \boldsymbol{K}^{-1}$, 对其进行 Cholesky 分解, 可以解出内部参数 $\boldsymbol{K}$ 和 Z_A 的初始解。Z_B 可由式(10)算出。A, B, C 的初值可由式(9)和式(8)求出。

用球形坐标 θ 和 φ 来表示一维标靶在空间中的方位。B 点的三维坐标可由式(17)表示:

$$\boldsymbol{B} = A + L \begin{bmatrix} \sin\theta \cos\varphi \\ \sin\theta \sin\varphi \\ \cos\theta \end{bmatrix}。 \tag{17}$$

同样点 C 可根据式(8)表示出。建立优化的目标函数:

$$\sum_{i=1}^{N} (\| m_i - \varphi(K, k, M_i) \|), (m \in \{b, c\}, M \in \{B, C\})。 \tag{18}$$

其中: m 为实际采集到的图像坐标; φ 为 B, C 经成像模型(式(1)—式(3))投影到图像上的坐标。应用 LM 算法[3] 对式(18)进行优化, 畸变系数 k 的优化初值可选为 0。

3 摄像机外部参数的标定

将两两摄像机采集到的标定点的图像进行匹配, 通过摄像机对所拍摄标定点的对应关系, 可以求出两两视图之间的本质矩阵 $\boldsymbol{E}$[4]。

对 $\boldsymbol{E}$ 进行奇异值分解, 可得

$$\boldsymbol{E} = \mathrm{U}\,\mathrm{diag}(\sigma, \sigma, 0)\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}。 \tag{19}$$

其中 $\boldsymbol{U}$ 和 $\boldsymbol{V}$ 为正交矩阵。

于是可求出 (R, t) 的 4 个解:

$$(\boldsymbol{U}\boldsymbol{W}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}, u_3); (\boldsymbol{U}\boldsymbol{W}\boldsymbol{V}\mathrm{T}, -u_3); (\boldsymbol{U}\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}, u_3); (\boldsymbol{U}\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}, -u_3)。 \tag{20}$$

利用空间点总是位于摄像机前面这一条件, 可以选择出其中正确的解。由式(6)分别计算出各摄像机在 4 个不同解下的投影矩阵 $\boldsymbol{P}$, 并对标定点进行三维重构[4~7]。因为空间点总是在摄像机前面, 从而可知使重建出的点的 Z 坐标为正的一组解即为正确解。

另外, t 的比例因子可由标靶上 2 点的真实距离 L 与重构出来的距离 L' 的比值求出:

$$s = L/L', s \text{ 为尺度因子}。 \tag{21}$$

实际中比例因子取所有样本求出的 s 的平均值。

4 集束优化

通过最小化重投影误差可对结果进行优化。另外, 利用欧式空间距离不变性, 最小化 2 点的实际距离 L 与重构出来的距离 L' 可得更可靠的目标函数为

$$e = \sum_{i}^{MN} \| L - L_j' \|, i = 1, 2, \cdots。 \tag{22}$$

5 实验结果

实验采用 3 台摄像机同步拍摄 180 张图像, 图像的分辨率均为 540 × 720。实验中用吉他弦串上 2 个珠子, 固定在易于旋转的装置上。2 个珠子到固定点的距离分别为 110.5 mm 和 242.5 mm。

图 3 为 3 台摄像机拍摄的样本图像, 标定出的各摄像机内部参数见表 1, 2 台摄像机相对于基准摄像机的外部参数见表 2。

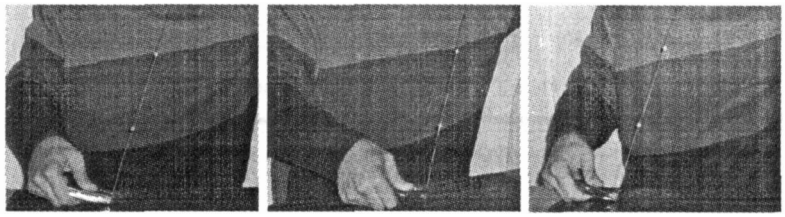

图 3　利用一维标靶标定内部参数的样本图像

Fig. 3　Sample images of calibration with 1D object

表 1　内部参数的标定结果

Tab. 1　Calibration result of intrinsic camera parameters

组份	α	β	γ	u_0	v_0	k
1	1 320.0	1 324.6	1.4	370.0	268.1	- 0.13
2	1 020.1	1 050.2	0.8	355.3	269.5	- 0.10
3	1 002.4	1 005.8	1.5	365.2	262.4	- 0.09

表 2　外部参数标定结果

Tab. 2　Calibrated result of extrinsic camera parameters

组份	$\boldsymbol{R}$	$\boldsymbol{t}$
1	$\boldsymbol{R}_1=\begin{bmatrix} 0.997\,1 & 0.070\,5 & 0.027\,2 \\ -0.014\,1 & 0.527\,0 & -0.849\,8 \\ -0.074\,2 & 0.847\,0 & 0.526\,4 \end{bmatrix}$	$\boldsymbol{t}_1=\begin{bmatrix} -535.4 \\ 25.9 \\ 135.6 \end{bmatrix}$
2	$\boldsymbol{R}_2=\begin{bmatrix} 0.933\,7 & -0.354\,5 & 0.050\,6 \\ 0.240\,9 & 0.517\,3 & -0.821\,2 \\ 0.264\,9 & 0.778\,9 & 0.568\,4 \end{bmatrix}$	$\boldsymbol{t}_2=\begin{bmatrix} 636.1 \\ -102.6 \\ -188.7 \end{bmatrix}$

集束优化后对标定点进行三维重建, 重建出的 2 点的距离与实际测量距离的平均差值在 1 mm 之内。

6　结　语

利用一维标靶标定出各摄像机的内部参数; 多摄像机同步采集, 利用本质矩阵分解方法, 求解出各摄像机的外部参数; 采用非线性优化方法, 提高了算法的鲁棒性。实验证明, 此种标定方法适用于对多摄像机的标定, 标定过程简便, 标定精度较高。

参考文献:

[1] ZHANG Z. Camera calibration with one-dimensional objects[J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(7): 892-899.

[2] ZHANG Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[A]. Proceedings of the 7th International Conference on Computer Vision[C]. Greece: Corfu, 1999.

[3] MORE J. The levenberg-marquardt algorithm, implementation and theory[A]. Numerical Analysis, Lecture Notes in Mathematics 630 [C]. London: Springer-Verlag, 1977.

[4] HARTLEY, ZISSERMAN. Multiple View Geometry in Computer Vision[M]. London: Cambridge University Press, 2000.

[5] 张广军. 计算机视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[6] HARTLEY R I. In defense of the eight-point algorithm[J]. IEEE Tran Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(6): 580-593.

[7] HARTLEY R I. Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras[A]. Proceedings European Conference on Computer Vision[C]. London: Springer-Verlag, 1992.