基于多视定位算法的多摄像机标定

宓　桃[1)]　安　平[1),2)]　刘苏醒[1)]　张兆杨[1),2)]

[1)]（上海大学通信与信息工程学院，上海　200072）　[2)]（上海大学新型显示技术及应用集成教育部重点实验室，上海　200072）

摘　要　针对多摄像机系统标定，提出一种基于多视定位算法的标定方法，标定过程只需一块可自由移动的平面模板即可，利用约束优化思想，将各摄像机坐标系转换到参考摄像机坐标系下，从而得到摄像机之间相对位置关系。标定操作过程简单，易于实现。实验结果表明，该方法是一种有效的多摄像机标定方法。

关键词　多摄像机　标定　多视定位

中图法分类号：TP391.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006-8961(2008)10-1922-04

Multi-camera Calibration Based on Multi-view Registration Algorithm

MI Tao[1)], AN Ping[1),2)], LIU Su-xing[1)], ZHANG Zhao-yang[1),2)]

[1)] (*School of Communication and Information Engineering*, *Shanghai University*, *Shanghai* 200072)

[2)] (*Key Laboratory of Advanced Displays and System Application*, *Ministry of Education*, *Shanghai* 200072)

Abstract　Camera calibration is a key technology in computer vision, and multi-camera calibration is the inevitable step towards an efficient use of multi-camera systems. For multi-camera systems, a method based on multi-view registration is proposed. A planar model with known reference points placed at a few different locations is only required as a calibration object. Using constrained optimization method, each camera coordinate system can be translated into reference camera coordinate system, and thus can get the relative positions between them. The experimental results show that the method is practical in multi-view calibration.

Keywords　multi-camera, calibration, multi-view registration

1　引　言

摄像机标定是计算机视觉领域的一项关键技术，它是从 2 维(2D)图像提取 3 维(3D)空间信息必不可少的步骤，这项技术已被广泛应用于 3D 结构重建、导航、视觉监控等领域。迄今为止，对于单摄像机标定问题已提出了很多方法，有多种经典方法可供选择[1]。在一些较为复杂的应用中，譬如实时 3D 获取系统等，需要使用到多台摄像机，一般的标定方法不再适用了，需要用新的途径来解决。因此，提出一种基于多视定位算法的多摄像机标定方法。该算法首先用基于平面模板的方法求解出各摄像机内参及各摄像机相对于模板的姿态转换关系；然后利用多视定位算法，将各摄像机坐标系统一到参考摄像机坐标系下，从而得到摄像机之间相对位置关系；最后将求得的各摄像机的内参和相对位置参数作为初始值，进行全局优化，得到摄像机模型参数最优解。

2　多摄像机标定算法

2.1　多摄像机线性模型

假定摄像机模型为经典的针孔模型，共有 $I(i=1,\cdots,I)$ 个摄像机，将平面模板放置在 $J(j=$

基金项目：国家自然科学基金项目(60672052)；上海市曙光计划(06SG43)；上海市经委产学研示范工程(07-040C)；新型显示教育部重点实验室开放性课题资助项目(07K04)。

收稿日期：2008-07-11；**改回日期**：2008-07-21

第一作者简介：宓　桃(1984～　)，女。现为上海大学信号与信息处理专业硕士研究生。研究方向为 3 维视频信号处理。
E-mail：laryssa@126.com

$1,\cdots,J$) 个不同位置,拍摄得到的每帧图像有 $N(n=1,\cdots,N)$ 个图像点。平面模板上 3D 点坐标表示为 $\boldsymbol{M}=[X,Y,Z]^{\mathrm{T}}$,图像上的 2D 图像点坐标表示为 $\boldsymbol{m}=[u,v]^{\mathrm{T}}$,则对于视点 i,模板平面上 3D 坐标点 $\boldsymbol{M}$ 和其投影图像平面上坐标点 $\boldsymbol{m}_i$ 的关系如下:

$$s_i\boldsymbol{m}_i=\boldsymbol{K}_i[\boldsymbol{R}_i\quad \boldsymbol{t}_i]\boldsymbol{M} \tag{1}$$

式中,s_i 是任意的比例因子,$[\boldsymbol{R}_i\quad \boldsymbol{t}_i]$ 是外参数矩阵,表示模板相对摄像机的旋转分量和平移分量,$\boldsymbol{K}_i$ 是内参数矩阵,

$$\boldsymbol{K}_i=\begin{bmatrix} f_{ui} & \gamma & u_{0i} \\ 0 & f_{vi} & v_{0i} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中,(u_{0i},v_{0i}) 为主点坐标,f_{ui},f_{vi} 分别是 u 轴 v 轴尺度因子,γ 是畸变因子。

2.2　各摄像机内部参数的标定

摄像机内部参数的标定本文采用了基于平面模板的方法[2],这种方法利用模板平面和其成像平面的单应矩阵之间的约束关系,求解出摄像机的内参矩阵以及摄像机和该模板平面之间的位置关系。其原理如下:

在摄像机视野范围内,拍摄多幅($\geqslant 3$)图像。将世界坐标系确定在模板平面上,令模板平面的 Z 坐标为零,记 $\boldsymbol{r}_a$ 为旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 的第 a 列,记点 $\boldsymbol{x}$ 齐次坐标形式为 $\boldsymbol{x}=[\boldsymbol{x},1]^{\mathrm{T}}$,则由式(1)有

$$s\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}=\boldsymbol{K}[\boldsymbol{r}_1\quad \boldsymbol{r}_2\quad \boldsymbol{r}_3\quad \boldsymbol{t}]\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}=\boldsymbol{K}[\boldsymbol{r}_1\quad \boldsymbol{r}_2\quad \boldsymbol{t}]\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}$$

这里令 $\boldsymbol{M}=[X,Y,1]^{\mathrm{T}}$,则有

$$s\boldsymbol{m}=\boldsymbol{H}\boldsymbol{M},\ \boldsymbol{H}=\boldsymbol{K}[\boldsymbol{r}_1\quad \boldsymbol{r}_2\quad \boldsymbol{t}] \tag{2}$$

式中,$\boldsymbol{H}$ 为 3×3 单应矩阵(homography)。从 $\boldsymbol{H}$ 可以得到关于摄像机内参数矩阵 $\boldsymbol{K}$ 的 2 个线性约束方程。令 $\boldsymbol{H}=[\boldsymbol{h}_1\quad \boldsymbol{h}_2\quad \boldsymbol{h}_3]$,由式(2)可以得到 $[\boldsymbol{h}_1\quad \boldsymbol{h}_2\quad \boldsymbol{h}_3]=\lambda\boldsymbol{K}[\boldsymbol{r}_1\quad \boldsymbol{r}_2\quad \boldsymbol{t}]$,$\lambda$ 为任意的比例因子;又由于 $\boldsymbol{r}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_2=0$,$|\boldsymbol{r}_1|=|\boldsymbol{r}_2|$,从而得到对内参数矩阵 $\boldsymbol{K}$ 的 2 个基本约束($\boldsymbol{K}^{-\mathrm{T}}\boldsymbol{K}^{-1}$ 称为绝对二次曲线的像):

$$\boldsymbol{h}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}^{-\mathrm{T}}\boldsymbol{K}^{-1}\boldsymbol{h}_2=0$$

$$\boldsymbol{h}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}^{-\mathrm{T}}\boldsymbol{K}^{-1}\boldsymbol{h}_1=\boldsymbol{h}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}^{-\mathrm{T}}\boldsymbol{K}^{-1}\boldsymbol{h}_2$$

$\boldsymbol{K}$ 含有 5 个未知参数,当求解出 $\boldsymbol{H}$ 后,每帧图像可以获得以上 2 个约束,当图像数目大于等于 3 时,至少有 6 个方程,从而可线性唯一解出 $\boldsymbol{K}$。

为计算单应矩阵 $\boldsymbol{H}$,本文引用了 Hartly 提出的 DLT 方法[3]。选取 $n(n\geqslant 4)$ 对图像平面-模板平面对应点,利用式(2)先线性估计出 $\boldsymbol{H}$,所得结果作为非线性优化初始值。最小化代价函数 $\sum_{b=1}^{n}\|\boldsymbol{m}_b-\boldsymbol{H}\boldsymbol{M}_b\|^2$,其中 $\boldsymbol{M}_b$ 为模板平面上第 b 个点,$\boldsymbol{m}_b$ 是其对应投影图像点,从而得到 $\boldsymbol{H}$ 精确解。

基于平面模板的方法一般多用于标定单个的摄像机,即只用求解摄像机内部参数的问题。对于多摄像机标定,不仅要求解出各个摄像机的内参矩阵 $\boldsymbol{K}$,还要求解出各个摄像机之间的位置关系。基于平面模板的方法世界坐标系放在标定模板平面上,那么当标定模板平面位于不同的位置时,其世界坐标系也是在改变的。要求解各个摄像机之间的位置关系,就必须要有统一的世界坐标系。本文采用多视定位算法来得到固定的绝对世界坐标系,把这些在各个浮动视图测量坐标系下测得的数据点统一到固定视图所在的坐标系下,完成各个摄像机位置关系的求解。

3　多视定位算法

多视定位是把在各个浮动视图测量坐标系下测得的数据点统一到固定视图所在的坐标系下,以便于后续模型重建。从数学上来说,多视定位就是如何获得视图之间坐标变换的问题[4,5]。本文将多视定位算法用于求解多摄像机外部参数。

将建立好对应关系的数据点集 $\boldsymbol{P}$ 和 $\boldsymbol{Q}$ 分别表示为 $\boldsymbol{P}=[\boldsymbol{p}_1,\boldsymbol{p}_2,\cdots,\boldsymbol{p}_n]$ 和 $\boldsymbol{Q}=[\boldsymbol{q}_1,\boldsymbol{q}_2,\cdots,\boldsymbol{q}_n]$(其中 $\boldsymbol{p}_i$ 和 $\boldsymbol{q}_i$ 表示 $\boldsymbol{P}$ 和 $\boldsymbol{Q}$ 中点的坐标所组成的列向量,即 $\boldsymbol{p}_i=[\boldsymbol{p}_{ix},\boldsymbol{p}_{iy},\boldsymbol{p}_{iz}]^{\mathrm{T}}$,$n$ 为对应点对个数)。设 $\boldsymbol{q}_i=\boldsymbol{R}\boldsymbol{p}_i+\boldsymbol{T}+\boldsymbol{N}_i(i=1,2,\cdots,n)$,其中 $\boldsymbol{R}$ 为旋转变换矩阵,$\boldsymbol{T}$ 为平移变换矩阵,$\boldsymbol{N}_i$ 为对应的误差向量。为了寻找一个最优 $\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{T}$ 使得误差 $\sum_{i=1}^{n}\|\boldsymbol{N}_i\|^2$ 最小,建立如下的目标函数:

$$f(\boldsymbol{R},\boldsymbol{T})=\sum_{i=1}^{n}\|\boldsymbol{q}_i-(\boldsymbol{R}\boldsymbol{p}_i+\boldsymbol{T}_i)\|^2 \tag{3}$$

令 $\boldsymbol{G}=(1,1,\cdots,1)^{\mathrm{T}}$,由于旋转变换矩阵 $\boldsymbol{R}$ 满足 $\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}=\boldsymbol{I}_3$,$\det(\boldsymbol{R})=1$,因此 $\boldsymbol{R},\boldsymbol{T}$ 的求解可描述为式(4)所示的约束优化问题

$$\min_{\boldsymbol{R}\in C^{3\times 3},\boldsymbol{T}\in C^{3\times 3}}\|\boldsymbol{Q}-\boldsymbol{R}\boldsymbol{P}-\boldsymbol{T}\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\|_{\mathrm{F}}^2 \tag{4}$$

式中,$C^{3\times 3}$ 表示全体 3×3 型复矩阵构成的线性空

间，F 表示由矩阵 Frobenius 范数定义。式(4)的拉格朗日函数

$$W = \| Q - RP - TG^{\mathrm{T}} \|_{\mathrm{F}}^{2} + \mathrm{tr}(L(R^{\mathrm{T}}R - I)) + \lambda(\det(R) - 1)$$

式中，L 为 Lagrange 乘子对称矩阵；λ 为 Lagrange 乘子。式(4)的最优解 (R,T) 满足

$$\frac{\partial W}{\partial R} = 0 , \frac{\partial W}{\partial T} = 0 \tag{5}$$

由式(5)可推导出，

$$T = \frac{1}{n}(Q - RP)G \tag{6}$$

将式(6)代入式(3)可得

$$f(R,T) = \| A' - RB' \|_{\mathrm{F}}^{2}$$

其中，

$$A' = Q\left(I - \frac{1}{n}GG^{\mathrm{T}}\right) , B' = P\left(I - \frac{1}{n}GG^{\mathrm{T}}\right)$$

因此式(4)的求解等价于如下的约束优化

$$\min_{R \in C^{3\times 3}} \| A' - RB' \|_{\mathrm{F}}^{2} \tag{7}$$

其中 $R^{\mathrm{T}}R = I_3 \det(R) = 1$

令 $X = A'B'^{\mathrm{T}} = Q\left(I - \frac{1}{n}GG^{\mathrm{T}}\right)P^{\mathrm{T}}$，对 X 进行奇异值分解得：$X = UDV^{\mathrm{T}}$（其中 $D = \mathrm{diag}(d_1, d_2, d_3), d_1 \geqslant d_2 \geqslant d_3 \geqslant 0$）。根据矩阵奇异值分解定理可知，式(7)达到最小时的旋转变换矩阵为

$$R = USV^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

式中，

$$S = \begin{cases} I & \det(U)\det(V) = +1 \\ \mathrm{diag}(1,1,-1) & \det(U)\det(V) = -1 \end{cases}$$

由此，式(3)目标函数取最小值时的平移变换 T 和旋转变换矩阵 R 可分别由式(6)、(8)求得。

4 全局优化

为了获取精确的摄像机模型参数，最后进行整体优化。将用平面模板方法求得的各摄像机的内参和多视定位算法得到的相对位置参数作为初始值，最小化如下模型[6]：

$$\sum_{i=1}^{\mathrm{I}} \sum_{j=1}^{\mathrm{J}} \sum_{n=1}^{\mathrm{N}} \| m_{in}^{j} - \hat{m}(K_i, R_i, T_i, R_1^j, T_1^j, M_n^j) \|^2 \tag{9}$$

式中，$\hat{m}(K_i, R_i, T_i, k_{i1}, k_{i2}, M_n)$ 是点 m_i^n 的投影，R_1^j, T_1^j 表示模板 j 坐标系统与参考摄像机 1 坐标系统之间的刚性转换。式(9)是一个非线性优化问题，采用 Levenberg-Marquardt 非线性优化算法，即可得到摄像机内外部参数的最优解。

5 实验方案及结果分析

5.1 实验方案设计

为了验证多视定位多摄像机标定方法，在 Matlab 7.1 平台上用多视定位算法完成多摄像机标定过程。自制 30mm×30mm 的棋盘格模板，实验用的图像如图 1 所示，图像分辨率为 640×480。

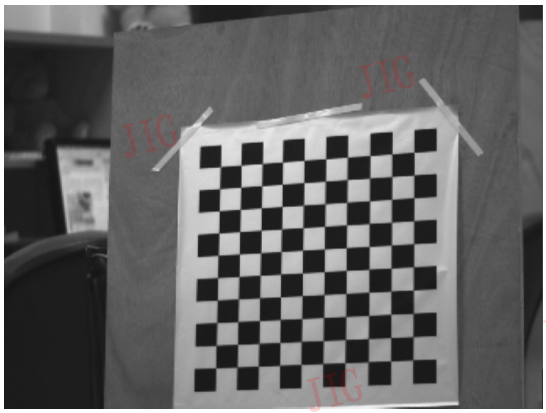

图 1 实验用模板图像

Fig. 1 The image of the model plane

实验系统设计如图 2 所示。摄像机平行固定在水平架上，用 3 个摄像机（可推广至多于 3 个）同时对模板进行拍摄，假设模板可以被所有摄像机观测到，在 6 个模板位置共拍摄了 18 幅图像。

图 2 多摄像机设置

Fig. 2 Multi-camera calibration setup

应用多视定位多摄像机标定方法，将最左边摄像机作为参考摄像机，记为摄像机 1，其余从左向右依次记为摄像机 2、3，实际操作中 3 个摄像机固定在系统架上水平排成一排，精确控制水平间隔在 60mm。首先采用平面模板方法求得各摄像机的内

参,然后通过多视定位算法将各摄像机坐标系转换到摄像机 1 坐标系下,将摄像机 1 作为新的世界坐标系,各摄像机有了统一的世界坐标系,可得到各摄像机比较精确的相对位置参数。由以上两步计算得到的参数作为初始值,最后全局优化得到摄像机内外部参数的最优解。

为了和多视定位算法比较,用了文献[7]的两两摄像机标定方法,摄像机对 1-2 和 1-3 分别一起标定,由文献[7]中两个摄像机之间的几何关系原理,可得到各摄像机对之间的位置关系。两种算法实验中均可得到摄像机 2 和摄像机 3 相对于摄像机 1 的位置参数。

5.2　实验结果与分析

用本文算法所得摄像机内外参数如表 1 所示。

表 1　选取 6 个模板位置得到的摄像机参数

Tab. 1　Estimated camera parameters using 6 planes

摄像机参数	摄像机 1	摄像机 2	摄像机 3
$(f_u \quad f_v)$	(2582.5 2589.0)	(2629.8 2627.8)	(2695.1 2696.3)
$(u_0 \quad v_0)$	(321.8 303.8)	(320.3 284.0)	(349.1 274.3)
γ	1.6	2.4	-0.3
$R(°)$	(0 0 0)	(0 0 -0.003)	(0 0 0.005)
$T(\mathrm{mm})$	(0 0 0)	(56.813 -7.108 0.001)	(117.4929 29.0514 0.002)

表 2 列出了对于平移向量水平参量,多视定位算法和摄像机两两标定方法的比较情况。

表 2　水平参量比较

Tab. 2　Comparison of horizontal parameters

单位:mm

标定法	摄像机 1	摄像机 2	摄像机 3
两两标定算法	0	71.219	126.342
本文算法	0	56.813	117.492
实际值	0	60	120

由表 2 可见,结果虽和实际值(实际测量)都有一定误差,但用多视定位算法求得的外参比两两标定得到的结果更为精确。主要由于两两相机标定没有统一世界坐标系统,由于噪声的影响,各个摄像机之间的位置关系将会随世界坐标系统的变化而不同。而采用多视定位算法将各摄像机坐标系转换到参考摄像机坐标系下,将参考摄像机作为新的世界坐标系,使各摄像机有统一的世界坐标系,得到的摄像机之间的相对位置关系比较精确。

6　结　论

针对多摄像机系统的标定,主要采用多视定位算法及全局优化过程来获取各摄像机之间的位置参数。该标定方法操作过程简单、易于实现,只需将模板放置在不同位置,拍摄若干图像即可计算出摄像机的各参数。实验结果表明,它能有效解决多摄像机标定问题,可以用于计算机视觉系统中摄像机阵列的标定过程。下一步工作是用多视定位多摄像机标定算法获得的摄像机内外参用于多视点视频系统的新视点快速绘制。

参考文献(References)

1　Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, **3**(4): 323 ~ 344.

2　Zhang Zheng-you. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, **22**(11): 1330 ~ 1334.

3　Hartley Richard. Multiple View Geometry in Computer Vision Second Edition[M]. London, United Kingdom: Cambridge University Press, 2003: 88 ~ 91.

4　Tomas Svoboda. A software for complete calibration of multicamera systems [A]. In: Proceedings of SPIE Image and Video Communications and Processing 2005[C], San Jose, California, USA, 2005, **5685**: 115 ~ 128.

5　Wu Min, Zhou Lai-shui, An Lu-ling. A method for multi-view Registration in Reverse Engineering[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2003, **29**(3): 346 ~ 350. [吴敏,周来水,安鲁陵. 逆向工程中的多视定位算法研究[J]. 数据采集与处理, 2003, **29**(3): 346 ~ 350.]

6　Zhang Liu-xin, Li Bin, Jia Yun-de. A practical calibration method for multiple cameras[A]. In: Proceedings of the Fourth International Conference on Image and Graphics 2007[C], Washington DC, USA, 2007: 45 ~ 50.

7　Bouguet Jean Yves. Camera Calibration Toolbox for Matlab [EB/OL]. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/, 2004.