

摄像机标定中靶标圆心像点坐标的精确计算

徐 鹏^{1,2}, 汪建业¹, 王燕儒¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 摄像机标定是机器视觉中的一个关键问题。当靶标特征像点在世界坐标系中的坐标值确定后, 便可以计算得到内参和外参, 进而完成摄像机标定。为了简化靶标特征像点的计算方法并提高其计算精度, 提出了基于透视不变性的计算方法来得到虚圆心像点坐标。该方法利用计算机搜索算法找出 3 个圆心不共线的圆形靶标的椭圆像的公切线, 每个椭圆上两对切点连线的交点即为对应靶标虚圆心的像点。模拟实验验证了该方法的实用性。结果表明: 算法不存在模型误差, 计算过程简洁高效, 提高了靶标特征像点坐标的计算精度, 使摄像机的标定更加精确。

关键词: 摄像机标定; 圆形靶标; 成像几何模型; 应用光学

中图分类号: TP242.62 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2011)07-1342-05

Calculation exact center coordinate of a target circle in camera calibration

Xu Peng^{1,2}, Wang Jianye¹, Wang Yanru¹

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Chinese Academy of Sciences, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230032, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Camera calibration is a key problem for machine vision. When the target characteristic points coordinates in world coordinates system are confirmed, the internal and external parameters are calculated and the camera calibration is implemented. In order to simplify the algorithms and improve the accuracy of the calculation, an algorithm based on the invariants of projection for calculating coordinates of suppositional centers was presented. This algorithm is to use computer visual search to get all common tangents of three ellipses images of corresponding circular target whose centers were not on one beeline. The intersection of two beelines determined by two pairs of tangency points on one ellipse was just the center of the corresponding circle on the target image. The practicability of this algorithm is illustrated by the simulation experiment. The result shows that this algorithm has no model error, and the numerical procedure is simplified. The calculating precision of the target characteristic points coordinates has thus been improved, and the camera calibration will be more accurate.

Key words: camera calibration; circular target; imaging geometric model; applied optics

收稿日期: 2010-11-13; 修订日期: 2010-12-29

基金项目: 国家 863 计划(2006AA861062)

作者简介: 徐鹏(1986-), 男, 博士生, 主要从事大气湍流光学测量方法方面的研究。Email: xup@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 汪建业(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事大气湍流光学测量方法方面的研究。Email: jywang@aiofm.ac.cn

0 引言

在应用光学中, 机器视觉常用于遥感图像、工业检测、视觉导航、医学图像分析等领域, 而机器视觉中的一个关键问题就是摄像机标定。在摄像机标定方法中, Heikkila 方法是以圆形靶标中心为标定参照点, 圆形靶标的优势在于其形状独特, 特征点容易识别提取, 其提取方法有两类: 第一类先提取图像边缘, 再搜寻边缘组成链上的曲率最大点^[1-3]; 第二类先定义某种算子, 再在灰度化图像上寻找该算子的极值^[4-6]。但圆形靶标在像平面的投影通常为椭圆, 而椭圆中心并不是靶标圆心的投影。因此, 将椭圆中心近似为靶标圆心的投影方法不可避免地在计算过程中引入模型误差。文中利用透视不变性原理, 提出了一套在针孔成像模型中圆形靶标圆心像点的计算方法, 理论上可以证明该方法不存在模型误差。摄像机的标定常采用针孔成像模型与圆形靶标, 在采集过程中, 图像往往存在透视变形。解决此问题的传统方法通常是对拍摄图像边缘化处理后进行椭圆拟合, 然后求出椭圆中心坐标近似代替虚圆心像点, 或在复域内解出虚圆心像点坐标, 但大多需要大量已知条件与复杂计算, 且存在一定的模型误差。

为了简化摄像机标定中的计算方法, 提高计算精度, 提出了基于透视不变性的虚圆心像点坐标计算方法。该方法不需要进行椭圆拟合, 只需要将图像边缘化处理, 利用计算机搜索算法找出 3 个圆心不共线的圆形靶标像的公切线, 每个像上两对切点连线的交点即为对应靶标虚圆心的像点。

1 靶标圆心与其像点的几何模型

1.1 圆形靶标的几何性质

圆形靶标通常是由若干半径相等的圆形标志物组成, 如图 1 所示, 任意选取两个圆 O' 与 O'' , 并作两条外公切线 l_1 与 l_2 , 则由初等几何很容易证明: 线段 A_1B_1 与线段 A_2B_2 分别为 O' 与 O'' 的直径。

因此, 若再取半径相等的圆 O''' , 并与圆 O' 作两条外公切线 l_3 与 l_4 , 则线段 C_1C_2 也必为圆 O' 的直径。线段 A_1B_1 与线段 C_1C_2 的交点即为圆心 O' , 如图 2 所示。

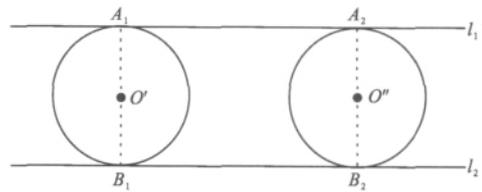


图 1 两圆的外公切线

Fig.1 Two common tangents of two circles

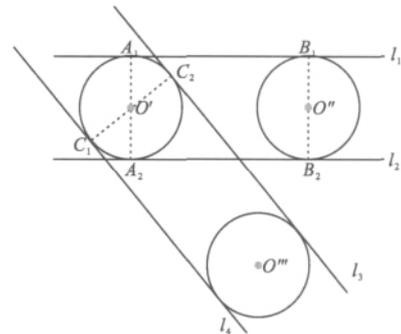


图 2 3 个圆的外公切线

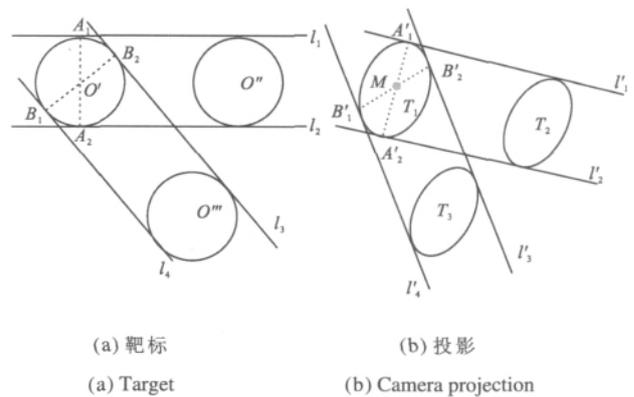
Fig.2 Four common tangents of three circles

1.2 靶标圆与其像之间的投影关系

针孔成像模型符合透视投影变换, 而高等画法几何学中透视投影变换有以下性质: 点一定与点对应, 且是一一对应的; 直线的像仍为直线^[7]。

由此可以推导出靶标圆与其像之间的性质: 两个圆的公切线经针孔模型所成的像为对应两椭圆的公切线; 过像平面上任一椭圆与任意不同的两个椭圆分别作两条外公切线, 则两对切点所确定的两条直线的交点是靶标圆心的像点。

如图 3 所示, A'_1, A'_2, B'_1, B'_2 分别为 A_1, A_2, B_1, B_2 的像, 则直线 $A'_1A'_2$ 与 $B'_1B'_2$ 为靶标上直线 A_1A_2



(a) 靶标

(b) 投影

(a) Target

(b) Camera projection

图 3 靶标与其投影示意图

Fig.3 Target and the camera projection

与 B_1B_2 的像。又因为点 M 必为点 O' 对应的像点,由圆形靶标的几何性质可知,点 O' 是圆 O' 的圆心,所以 M 是靶标圆心 O' 的像点。

1.3 圆心像点坐标的计算

使用上述模型, 圆心像点坐标的计算过程将变得非常简单, 求解过程如下。

设 $A'_1(x_1, y_1)$ 、 $A'_2(x_2, y_2)$ 、 $B'_1(x_3, y_3)$ 、 $B'_2(x_4, y_4)$ 、 $M(x_0, y_0)$, 其中 A'_1 、 A'_2 、 B'_1 、 B'_2 坐标已知, 那么可以建立直线 $A'_1A'_2$ 的点斜式方程为:

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) \tag{1}$$

与 $B'_1B'_2$ 的点斜式方程为:

$$y - y_3 = \frac{y_4 - y_3}{x_4 - x_3} (x - x_3) \tag{2}$$

联立公式(1)、(2)求解交点可得

$$x_0 = \frac{(y_3 - y_1) + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x_1 - \frac{y_4 - y_3}{x_4 - x_3} x_3}{\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} - \frac{y_4 - y_3}{x_4 - x_3}} \tag{3}$$

$$y_0 = \frac{(x_3 - x_1) + \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} y_1 - \frac{x_4 - x_3}{y_4 - y_3} y_3}{\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} - \frac{x_4 - x_3}{y_4 - y_3}} \tag{4}$$

2 靶标圆心像点的计算

文中使用通用靶标进行计算, 如图 4 所示。该靶标使用人数较多, 可以将结果进行相互对比以验证结果。

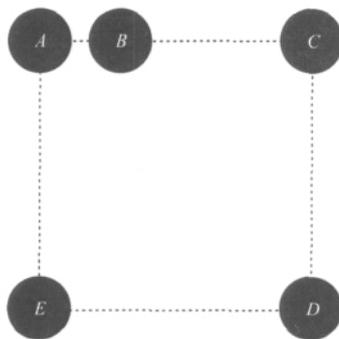


图 4 靶标示意图

Fig.4 Schematic of target

靶标取 1 个边长为 100 mm 的正方形, 分别以 4 个顶点(对应为 A 、 C 、 D 、 E)为圆心, 12 mm 为半径作

圆。以 AC 边上距离 A 点 30mm 处的 B 为圆心, 12 mm 为半径作圆。用一位置固定的数码相机摄得其像, 如图 5 所示, 像平面取左上角为坐标原点, 向下为 x 轴, 向右为 y 轴。

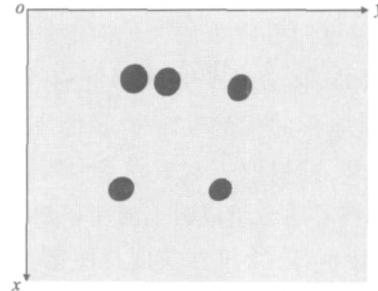


图 5 靶标的像

Fig.5 Target image

下面介绍文中方法的计算过程。

(1) 对图 5 中的靶标圆进行边缘提取, 采用 MATLAB 图像处理工具箱的 Canny 边界探测器进行处理, 得到的结果如图 6 所示。

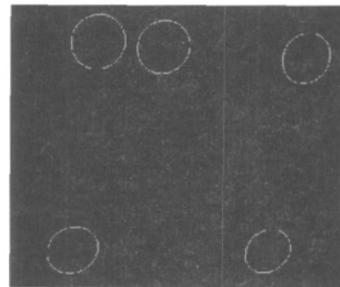


图 6 进行边缘化的像

Fig.6 Out-of-focus target image

(2) 将 MATLAB 处理后的数据用 VC++6.0 读出, 使用 C 语言算法实现两圆的外公切线切点坐标计算, 并绘制外公切线。文中采用动态搜索, 通过搜索目标点的区域归属来判断其是否为切点。处理结果如图 7 所示。

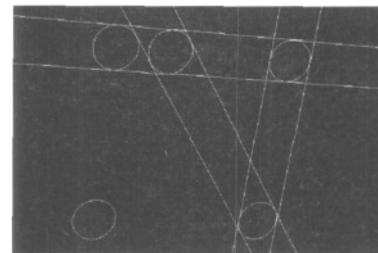


图 7 绘制公切线

Fig.7 Plot six common tangents on the target image

此时, 点 O 、 P 、 Q 即为对应靶标圆心的实际像点, 如图 8 所示。

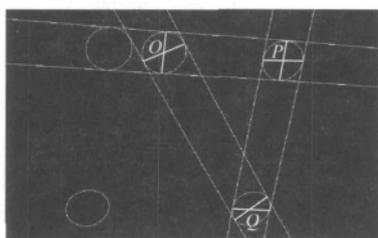


图 8 靶标圆心像点示意图

Fig.8 Centers of circles on the target image

(3) 将切点坐标代入公式(3)、(4), 计算出对应圆心像点的坐标。

(4) 重复步骤(2)与步骤(3), 直到计算完所有圆心像点的坐标。

计算结果如表 1 所示(单位: 像素)。

表 1 切点与圆心像点的坐标

Tab.1 Coordinate of the tangent point and the centers of circles on the target image

Circles	A	B	C
Coordinate of the tangent point	(181,281)	(180,386)	(209,603)
	(193,364)	(210,459)	(217,675)
	(148,331)	(156,428)	(175,652)
	(230,315)	(236,411)	(251,634)
Crossing point	(187.125 2, 323.365 8)	(193.946 5, 419.936 4)	(213.433 0, 642.897 4)
Circles	D	E	
Coordinate of the tangent point	(500,548)	(499,245)	
	(504,616)	(503,323)	
	(484,614)	(489,248)	
	(521,550)	(509,321)	
Crossing point	(502.046 2, 582.785 0)	(501.492 1, 283.596 2)	

取上述靶标模型使用椭圆中心近似法得到的圆心像点坐标值进行对比, 得到的结果如表 2 所示(单位: 像素)^[8]。

表 2 圆心像点精确计算坐标值与椭圆中心坐标值的比较

Tab.2 Comparison of exact coordinate of the centers of circles on the target image with coordinate of the centers of ellipse

Circles	Coordinate	Exact coordinate of the centers of circles on the target image	Centers of ellipse
A	x	187.125 2	189.492 0
	y	323.365 8	322.900 4
B	x	193.946 5	196.919 0
	y	419.936 4	423.003 4
C	x	213.433 0	213.152 8
	y	642.897 4	639.895 9
D	x	502.046 2	502.967 5
	y	582.785 0	582.737 3
E	x	501.492 1	501.783 0
	y	283.596 2	284.694 5

3 误差分析与讨论

由上述结论可知, 算法在处理针孔模型成像问题时不存在模型误差, 与传统的 Heikkila 方法相比, 标定精度得到了提高。

使用该模型进行计算时, 存在的误差主要有以下 3 个方面。

(1) 分辨率误差 由于 CCD 以像素为单元, 因此在数字化图像时, 相机分辨率越小, 误差越大;

(2) 图像处理过程中产生的误差 由于外界光照角度及光强的不均匀, 目标像点的边缘不够清晰, 导致在目标像斑轮廓提取与切点计算时产生误差;

(3) 设备误差 若相机使用广角镜头等大视野镜头拍摄时, 像点会因径向畸变产生枕形或桶形畸变, 直线的像不再是直线, 在使用针孔模型时会由于不满足线性投影关系产生误差, 其数学模型为:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+kr^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1+kr^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: (x_u, y_u) , (x_d, y_d) 分别为像点的理想与实际坐标; $r = \sqrt{x_d^2 + y_d^2}$ 为像点到相机光轴与图像平面的距离。

为了减小设备误差与分辨率误差, 满足精度要

求,在实际操作过程中选取经过优化设计的镜头以及分辨率更高的 CCD。图像处理过程中可以通过选取两个以上椭圆像斑与目标椭圆外公切线,计算多条切点连线的交点坐标,再计算这些点的重心坐标以减小切点计算误差。同时,还可以通过使用更先进的图像分割算法来减小轮廓提取时产生的误差。

4 结 论

摄像机标定是计算确定摄像机内参和外参的过程^[9]。为了进行摄像机标定,必须已知靶标特征点的空间坐标,并建立起与像点间的坐标对应关系。靶标特征点与其像点在世界坐标系中的坐标值确定后,便可以使用多种算法计算内参和外参,完成摄像机标定。对于圆形靶标,传统的做法是取靶标对应椭圆像点几何中心近似代替圆心的像点,计算过程中需要进行椭圆拟合等一系列计算,且本身存在模型误差。文中的模型巧妙利用了高等画法几何中针孔模型的投影关系,消除了系统误差,在计算过程中不需要考虑靶标摆放位置,更不用进行椭圆拟合等计算,有效减小了计算过程中引入的误差。模拟实验表明了该算法更具准确性与合理性。

参考文献:

[1] Dreschler L, Nage1 H H. Volumetric model and 3D trajectory of a moving car derived from monocular TV-frame sequence of a street scene[J]. *CVGIP*, 1982, 20(3): 199-228.

- [2] Kitchen L, Rosenfeld A. Gray level corner detector [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1982, 3(1): 95-102.
- [3] Rangarajan K, Shah M, Van Brackle D. Optimal corner detector[J]. *CVGIP*, 1989, 48(2): 230-245.
- [4] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector[C]// Proceedings 4th Alvey Vision Conference, 1988: 147-151.
- [5] Zhang Dan, Duan Jin, Gu Lingjia, et al. Method of camera calibration based on image processing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 293-297. (in Chinese)
张丹, 段锦, 顾玲嘉, 等. 基于图像的模拟相机标定方法的研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(S): 293-297.
- [6] Trajkovic M, Hedley M. Fast corner detection[J]. *Image and Vision Computing*, 1998, 16(2): 75-87.
- [7] Ye Yuju, Jian Zhaoquan. Higher Descriptive Geometry [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1990: 85-91. (in Chinese)
叶玉驹, 简召全. 高等画法几何学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990: 85-91.
- [8] Li Xingnan, Fan Debin, Chen Jianjun, et al. Research of camera calibration [J]. *Journal of Jiujiang University*, 2009 (3): 9-14. (in Chinese)
李兴南, 范德斌, 陈剑军, 等. 摄像机标定算法研究[J]. *九江学院学报*, 2009(3): 9-14.
- [9] Liu Feng, Wang Xiangjun, Xu Wei, et al. Self-calibration method for the parallel tracking platform based on the monocular vision [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 175-179. (in Chinese)
刘锋, 王向军, 许薇, 等. 并联跟踪台单目视觉自标定方法[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(1): 175-179.