

# CCD 摄像机标定中角点亚像素定位方法

王文韞, 郭迎福, 赵前程, 刘小娟

(湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** CCD 摄像机的标定是实现光学三维轮廓测量技术的必要步骤, 其标定精度在很大程度上取决于标定特征点的定位精度. 在分析现有棋盘格角点像素级和亚像素级定位方法不足的基础上, 提出了一种基于改进 SV 方法的棋盘格角点亚像素定位方法. 首先, 采用 SV 算子对角点进行像素级检测; 其次, 选取标定图像中以初定位角点坐标为中心的  $5 \times 5$  像素区域, 对其灰度值进行双线性插值; 最后, 计算插值图像的灰度质心, 再根据插值放大倍数, 将质心转换到亚像素坐标, 实现了角点亚像素定位. 实验结果表明, 该方法可以获得亚像素级角点坐标, 实现 CCD 摄像机的高精度标定, 标定平均误差为 0.108 mm.

**关键词:** CCD 摄像机标定; 棋盘格角点; SV 算子; 双线性插值; 亚像素

**中图分类号:** TP391      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2014)04-0034-05

## Sub - pixel corner detection method in CCD camera calibration

WANG Wenyun, GUO Yingfu, Zhao Qiancheng, LIU Xiaojuan

(Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment,  
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** CCD camera calibration is a necessary procedure to realize optical 3D profile measurement, its accuracy depends on the positioning accuracy of feature points in a great degree. A high accuracy corner detection method based on improved SV algorithm was proposed, through analyzing the deficiency of the existing methods to detecting black and white checkerboard corner points. Firstly, the corner points were detected in pixel level using the operators of symmetry and variance. Secondly, the simple gray bilinear interpolation was used for the area of a  $5 \times 5$  window, whose center was the initial location corner in the photographed checker calibration image. Finally, centroid algorithm was adopted in the areas of each corner neighborhood after interpolation to obtain gray centroid coordinates. According to the amplification factor, centroid coordinates were located to sub - pixel corner coordinates corresponding to the calibration image. The experiment prove the validity of the proposed method, which locate sub - pixel corner coordinates, also can realize the high CCD calibration accuracy. The experiment results show that the average error of CCD calibration is 0.108 mm.

**Key words:** CCD camera calibration; X - corner; symmetry and variance operators; bilinear interpolation; sub - pixel

光学三维轮廓测量技术是根据摄像机捕获的二维图像信息来计算三维空间中物体的几何信息, 具有非接触、高精度、自动化程度高等优点, 在自动化制造、在线检测、反求工程、医学诊断、机器视觉

等众多领域都有广泛应用. CCD 摄像机作为关键组成部件, 其结构参数的标定精度直接影响三维测量精度, 而 CCD 标定精度在很大程度上取决于标定板特征点的图像定位精度<sup>[1]</sup>. 因此, 获取标定特

征点的精确图像定位信息是实现高精度相机标定的关键.角点是图像中的强特征点,不同类型的角点有不同的特点,黑白棋盘格模板制作经济简单,其角点作为一类特殊的特征点,已被广泛地应用于摄像机标定中<sup>[2]</sup>.

目前,棋盘格角点检测方法主要可以分为两类,基于图像边缘的方法主要有 Radon 变换和 Hough 变换等,文献[3]通过变换找出角点所在的直线位置,然后线性求解得到直线的交点即为角点,但此类方法运算复杂、计算量大,且对畸变的棋盘格图像失效<sup>[4]</sup>;Harris 角点检测方法<sup>[5]</sup>、SUSAN 角点检测方法<sup>[6]</sup>和对称方差(SV, symmetry and variance)方法<sup>[7]</sup>是基于图像灰度变化的经典算法, Harris 方法的不足在于:角点处图像的模糊现象使得实际角点附近的一个或者多个点的 Harris 响应值较高,很难准确定位角点;SUSAN 方法存在不能有效区分棋盘内角点(正交 X 型角点)和边缘点的缺陷,因为实际计算过程中,圆形模板需要离散化,较大的量化误差就容易导致边缘点和角点的判断混乱<sup>[8]</sup>.SV 方法根据棋盘格角点中心对称点灰度值相近有别于边缘点及非角点的特性,提出 S 算子和 V 算子,原理简单、计算量小,而且对旋转、尺度、灰度等变化具有鲁棒性,但其角点检测精度只能达到像素级.

近 30 年来,随着国内外许多研究者对亚像素研究工作的开展,很多亚像素检测方法也逐渐被人们所应用.许多学者针对 Harris 方法和 SUSAN 方法的缺陷进行了改进,取得了角点亚像素定位的一些进展<sup>[9-12]</sup>,杨幸芳<sup>[9]</sup>等人提出一种基于灰度对比的棋盘格亚像素角点检测算法,运用在 SUSAN 圆模版内附加两个圆环模板的方法,克服了无法有效检测棋盘格角点时边缘点及内角点的不足,但实时性不佳.唐亚平等<sup>[10]</sup>提出一种结合 Harris 算子和 Forstner 算子的亚像素角点提取算法,先利用图像领域灰度相似度得到大部分角点的粗定位值,然后通过计算自相关矩阵的 2 个特征值,利用特征值和阈值比较筛选得到全部角点的粗定位值,避免了 CRF(corner reference function 角点响应函数)的计算,最后利用 Forstner 算子对粗定位后的角点进行亚像素级精确定位,该方法抗噪声性能较强,但对初始值位置精度要求较高.

这些改进大多集中在阈值判断、多尺度避免角点偏差及减少计算量等方面,无法同时兼顾检测效率和精度.插值是一个利用离散样本估计连续事件

中间值的过程,图像的插值放大是将低分辨率的图像通过插值的方法变成高分辨率的图像.Thomas<sup>[13]</sup>提出一种对二维图像进行双线性插值优化,能得到比最近邻插值方法更好的图像效果,相较复杂插值方法只需更少计算量的方法.传统的灰度重心法是一种用于对称目标的亚像素定位技术,但其抗噪声性能较差.因此,考虑 SV 方法在快速、高精度识别角点方面的优势,本文引入双线性插值和质心算法,提出了一种基于改进 SV 方法的棋盘格角点亚像素定位方法.

## 1 SV 算法角点识别原理

棋盘格图像由黑白相间的方格组成,通过观察图 1 可知:1)关于棋盘格角点中心对称的像素点灰度值较接近;2)关于边界点和非角点中心对称的像素点的灰度值则有较大差异.

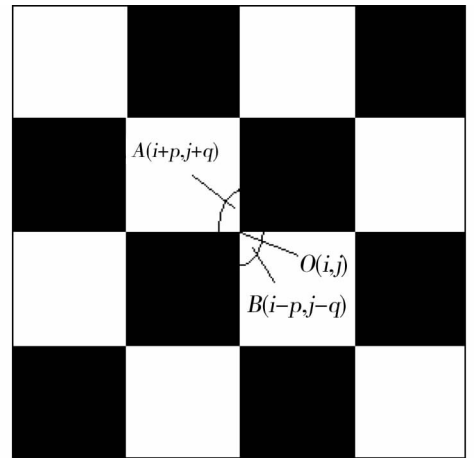


图 1 棋盘格角点对称示意图

图 1 中像素点 A 与 B 关于角点 O 对称,由此引入对称算子<sup>[7]</sup>(symmetry operator).对于每个像素  $I(i,j)$ ,以该像素为中心的窗口记为  $W$ ,一般取  $3 \times 3$  或者  $5 \times 5$  的方形, $n$  为窗口  $W$  中像素的数目.定义对称算子的响应值为  $W$  窗口中关于  $I(i,j)$  对称的每一对像素点的灰度差的绝对值的均值,表达式为

$$C_s(i,j) = \left| \sum_{(i+p,j+q) \in W} |I(i+p,j+q) - I(i-p,j-q)| \right| / n. \quad (1)$$

对于棋盘格角点,对称算子响应值  $C_s$  较小;由于边界一边像素灰度值大,另一边像素灰度值小,故在边界点的对称算子响应值  $C_s$  较大. $C_s$  反映了以该像素为中心的小窗口像素灰度分布的空间对称性,但在平坦区域像素的  $C_s$  值也比较小.故又引入方差算子<sup>[7]</sup>(variance operator),主要用于剔除平坦区域的像素点.方差算子的响应值反映了周围像

素灰度值变化的剧烈程度,其表达式为

$$C_v = \sum_{(i,j) \in W} (I(i,j) - \bar{I})^2 / (n - 1). \quad (2)$$

其中 $\bar{I}$ 为窗口 $W$ 中像素的灰度平均值.对于平坦区域的像素,其方差算子的响应值 $C_v$ 较小;边界点和棋盘格角点的 $C_v$ 值较大.

对称方差算法首先用对称算子把棋盘格角点和平坦区域像素点识别出来,接着用方差算子剔除平坦区域像素点,即可识别角点.定义SV算子响应值为 $C_{SV} = K \times C_v - C_s$ , $K$ 为经验常数,一般取 $0.1 \sim 0.5$ .综上所述,棋盘格角点是S算子响应值较小,V算子响应值较大的点,该算法具有对称性和统计规律,因此具有旋转不变性和较强的抗噪声能力,但识别精度只能到像素级.

## 2 亚像素级角点定位

双线性插值又称一阶插值,它先后对水平、垂直方向上进行一阶线性插值,属于对称插值算法.插值后的图像在保真的情况下可以增加特征点图像采样点数,进而提高计算精度.图像的插值放大方法可以描述如下:对于一幅灰度数字图像,它的每一个像素可以看作是其二维坐标位置的函数 $f(x,y)$ ,设原图数 $f(x,y)$ 大小为 $M \times N$ ,插值处理后图像 $f'(x,y)$ 大小为 $(M' \times N')$ ,由映射关系知 $f'(x,y)$ 的第 $i'$ 行和第 $j'$ 列像素点的灰度值 $V'(i',j')$ 对应 $f(x,y)$ 的第 $i$ 行和第 $j$ 列像素点的灰度值 $V(i,j)$ ,其中, $i = \lfloor i' \rfloor$ , $j = \lfloor j' \rfloor$ .取整运算后即可得插值节点的灰度值.

如果一个输出像素被映射到4个输入像素之间,则其灰度值由这4点灰度值插值决定.首先,对 $x$ 方向进行插值,计算公式如下:

$$V(i,y) = V(x,y) + (i-x)[V(x+1,y) - V(x,y)]. \quad (3)$$

$$V(i,y+1) = V(x,y+1) + (i-x)[V(x+1,y+1) - V(x,y+1)]. \quad (4)$$

接着对 $y$ 方向进行插值求出 $V(i,j)$ :

$$V(i,j) = V(i,y) + (j-y)[V(i,y+1) - V(i,y)]. \quad (5)$$

综合式(3)~式(5)即可以求出插值节点,依次能得到放大后的灰度数字图像 $f'(x,y)$ .

质心算法特别适用于对称图像的中心计算,其优点在于充分利用图像中的每一点的灰度值较高的质心坐标计算精度.鉴于棋盘格角点图像形状和灰度分布具有对称性以及灰度对比强烈的特点,本文在SV检测方法的基础上采用双线性插值结合质心算法来进一步求取棋盘格图像角点的亚像素级坐标.

具体实现方法:首先通过SV算子得到像素级

的初定位角点坐标;其次,对以初定位角点坐标为中心的 $5 \times 5$ 窗口内像素灰度值进行双线性插值运算,即在 $x,y$ 2个方向分别进行一次线性插值,得到插值运算后的细分图像;最后,对各角点邻域插值后的图像求取其质心坐标,再根据插值放大倍数,转换得到亚像素级角点坐标.

质心坐标计算公式<sup>[14]</sup>如下:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i p(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^n p(x_i, y_i)}; \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i p(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^n p(x_i, y_i)}. \quad (6)$$

式中, $\bar{x}, \bar{y}$ 为质心坐标, $n$ 为图像像素个数, $(x_i, y_i)$ 为第 $i$ 个像素的坐标, $p(x_i, y_i)$ 为第 $i$ 个像素的灰度值.

## 3 CCD标定角点提取实例

本文选用德国AVT PIKE F-032C彩色摄像机进行标定,其分辨率为 $640(H) \times 480(V)$ ,镜头焦距 $f = 12 \text{ mm}$ ;选择3 mm厚的PVC塑料板制作标定板,不易变形也不厚重;黑白棋盘格图像由 $20 \times 20$ 个方格组成,每个方格大小为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ,采用雕刻机雕,误差在 $\pm 0.08 \text{ mm}$ 范围内.

CCD摄像机结构参数的定标采用经典的Tasi 2步法<sup>[15]</sup>.该方法是只考虑径向畸变的典型标定算法,先用径向排列约束得到部分外部参数的精确解,再将其余外部参数与畸变修正参数进行迭代求解,但需对内部参数比例因子和像面中心进行预标定.预标定的具体实现方法:首先通过垂直拍摄一幅同心圆图像求得比例因子;当镜头焦距为12 mm和8 mm时分别拍摄同一位姿的棋盘格标定板图像,根据变焦距拍摄,视场变化,像面中心不变原理求得图像中心的像素坐标;接着采用Tasi 2步法对摄像机其余内外参数进行标定,整个标定过程不需要辅助设备,也不需要精确调整标定板的位姿,只需拍摄一幅同心圆图像和两幅标定板图像,标定过程简单、快捷,特别适用于现场标定.实验计算得到比例因子 $S_{xy} = 0.99935$ ,图像中心的像素坐标 $(C_x, C_y) = (315, 248)$ .

采用加权中值滤波<sup>[16]</sup>将偶然因素引起的波动或采集卡不稳定而造成的脉冲干扰消除.经过预处理后的图像,可以消除无用信息、干扰点,缩小计算范围,提高计算速度.图2为镜头焦距 $f = 12 \text{ mm}$ 时CCD摄像机采集到的标定板图像,图3为对其进行滤波去噪、裁剪等预处理图像.图4为用SV

算法提取的特征点图像.

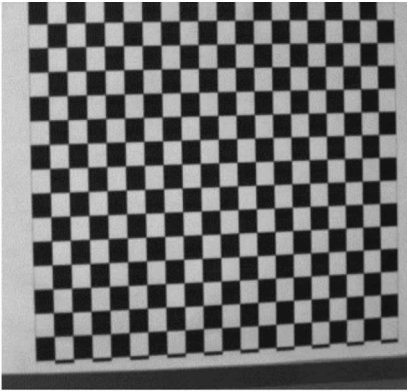


图2 采集的棋盘格图像

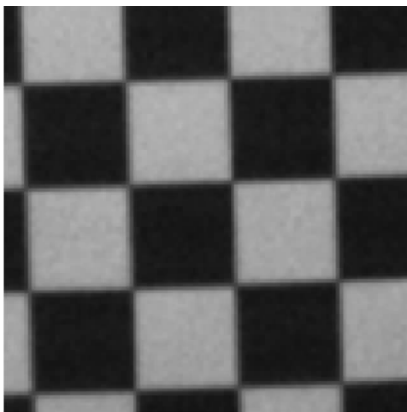


图3 预处理后的图像

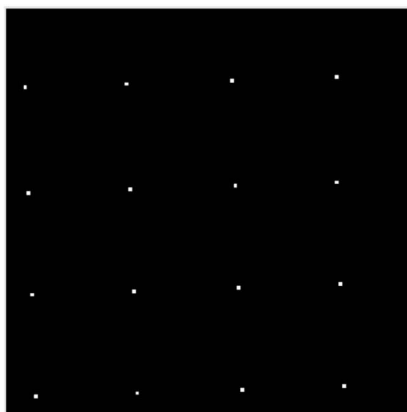


图4 像素级角点图像

从图4中,可知共检测出16个角点,用 Matlab 软件编程,分别对这16个角点的 $5 \times 5$ 邻域内的灰度值进行水平、垂直方向上的一阶线性插值,为了图像不失真,选取放大倍数为30,接着根据质心坐标计算公式求得插值后区域的质心坐标,再缩小相应倍数后转换到图4的坐标系统中,由此可以得到亚像素级角点坐标.选取其中11个点作为标定,其余5个点用于检验 CCD 的标定精度.定义图4

中左上角第一个角点对应世界坐标系的原点,表1给出了用改进 SV 算法计算出的亚像素级角点的计算机像素坐标和其对应的三维世界坐标.

表1 角点的亚像素坐标及其世界坐标

点序列	计算机坐标/pixel		三维世界坐标/mm	
	$x_f$	$y_f$	$x_w$	$y_w$
1	5.60	22.78	0	0
2	34.73	21.53	20	0
3	94.72	19.79	60	0
4	6.85	52.90	0	20
5	65.84	51.16	40	20
6	95.22	49.91	60	20
7	36.72	80.53	20	40
8	67.09	79.78	40	40
9	8.59	111.15	0	60
10	37.96	109.66	20	60
11	96.71	107.91	80	60

应用 Tasi 2 步法,对摄像机的其他参数求解,得到如下参数:

有效焦距: $f = 11.49$ ;

畸变系数: $k = -0.0023$ ;

$$\text{旋转矩阵: } \mathbf{R} = \begin{bmatrix} -0.9890 & 0.0366 & 0.1434 \\ 0.0282 & -0.9046 & 0.4253 \\ 0.1455 & 0.4247 & 0.8936 \end{bmatrix};$$

$$\text{平移矩阵: } \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 62.4723 \\ 70.2179 \\ 965.0095 \end{bmatrix}.$$

## 4 标定精度计算

通过评价 CCD 的标定精度来验证改进方法的角点识别精度,选取图4中其余5个角点作为校验点.把它们的计算机图像坐标(即亚像素级角点坐标)通过标定得到的摄像机内外参数反向求解,得到其对应的三维世界坐标,简称为标定三维坐标.表2给出用 SV 算法和本文提出方法计算得到的5个校验点的标定三维坐标、实际三维坐标及其误差.从表2可以看出,有个别点的误差较大,本实验中 CCD 摄像机距离参考面约1 m左右,可知一个像素的分辨率对应到三维世界坐标系就可达到0.7 mm 甚至更大,对照下面给出的误差分析计算结果,标定平均误差为0.108 mm,可以评价本文提出的亚像素角点定位方法能够实现高精度的 CCD 摄像机定标.

误差分析计算结果如下:

$x$  坐标、 $y$  坐标的平均误差:

$$x_{\text{error}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{wi} - x'_{wi}| = 0.124 \text{ mm};$$

$$y_{\text{error}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{wi} - y'_{wi}| = 0.092 \text{ mm}.$$

$$\text{总的平均误差: } \frac{1}{2}(x_{\text{error}} + y_{\text{error}}) = 0.108 \text{ mm}.$$

$x$  坐标、 $y$  坐标的标准差分别为

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{wi} - x'_{wi})^2}{n}} = 0.166 \text{ mm};$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{wi} - y'_{wi})^2}{n}} = 0.126 \text{ mm}.$$

表2 SV方法与改进方法计算的标定坐标及其误差

点序列	实际坐标/mm ( $x_w, y_w$ )	SV 标定坐标/mm ( $x'_{w1}, y'_{w1}$ )	改进 SV 标定坐标/mm ( $x'_{w2}, y'_{w2}$ )	SV 标定误差/mm ( $\Delta x_{w1}, \Delta y_{w1}$ )	改进 SV 标定误差/mm ( $\Delta x_{w2}, \Delta y_{w2}$ )
1	(40, 0)	(39.65, -0.28)	(40.02, 0.07)	(0.35, 0.28)	(-0.02, -0.07)
2	(20, 20)	(19.46, 20.78)	(20.17, 19.74)	(0.54, -0.78)	(-0.17, 0.26)
3	(0, 40)	(-0.12, 40.31)	(-0.05, 40.01)	(0.12, -0.31)	(0.05, -0.01)
4	(60, 40)	(59.73, 39.52)	(60.06, 40.05)	(0.27, 0.48)	(-0.06, -0.05)
5	(40, 60)	(39.52, 60.36)	(39.68, 60.07)	(0.48, -0.36)	(0.32, -0.07)

## 5 结论

本文针对现有亚像素角点检测方法无法同时兼顾检测效率和精度的问题,在SV角点定位方法的基础上,结合双线性插值和质心算法,提出了基于改进SV方法的亚像素棋盘格角点定位方法.在保持SV方法原理简单、易于实现、计算量小、抗噪声性能好等优点的基础上大大提高了角点定位精度,可达到亚像素级,为CCD的高精度标定提供了保障.最后,根据CCD摄像机标定实例,经过误差分析得出CCD摄像机标定平均误差为0.108 mm,改进算法比原算法具有更高的角点定位质量,验证了本文提出方法的正确性及有效性.

## 参考文献:

- [1] 古鑫桐,鲁东明,刁常宇.复杂背景下棋盘格角点亚像素识别[J].计算机工程与应用,2010,46(26):145-147.
- [2] Bastanlar Y, Yardimci Y. Corner validation based on extracted comer properties [J]. Computer Vision and Image Understanding,2008,24(3):112-119.
- [3] 蔡振江,王渝,张娟.采用Hough变换和灰度变化的图像角点检测法[J].北京理工大学学报,2005,25(9):796-799.
- [4] 张裕,方康玲,刘永祥.基于Harris算法的黑白棋盘格角点检测[J].计算机应用与软件,2010,27(8):251-254.
- [5] Kang X, Han C Z. SAR image edge detection by ratio-based Harris method[C]// Acoustics, Speech and Signal

Processing. Toulouse: IEEE, 2006.

- [6] Rafajlowicz E. SUSAN edge detector reinterpreted, simplified and modified[C]// Multidimensional Systems. Aveiro: IEEE, 2007.
- [7] 刘阳成,朱枫.一种新的棋盘格图像角点检测算法[J].中国图象图形学报,2006,11(5):656-660.
- [8] 杨幸芳,黄玉美,高峰,等.用于摄像机标定的棋盘图像角点检测新算法[J].仪器仪表学报,2011,32(5):1109-1113.
- [9] 杨幸芳,黄玉美,李艳,等.基于改进的SUSAN算子的棋盘格亚像素角点检测算法[J].中国机械工程,2010,21(21):2541-2545.
- [10] 唐亚平,陈苏婷.一种改进的亚像素角点提取算法[J].电脑知识与技术,2014,10(19):4552-4555.
- [11] 龚平,刘相滨,周鹏.一种改进的Harris角点检测算法[J].计算机工程与应用,2010,46(11):173-175.
- [12] 何海清,黄声享.改进的Harris亚像素角点快速定位[J].中国图象图形学报,2012,17(7):853-857.
- [13] Thomas M L, Claudia G, Klaus S. Survey interpolation methods in medical image processing [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1999, 18(11):1049-1075.
- [14] 王庆有,孙学珠. CCD应用技术[M].天津:天津大学出版社,1993.
- [15] Roger Y, Tsai A. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. IEEE Journal Robot, Automat, 1987, RA-3(4):323-344.
- [16] 倪麟,曹莉.基于自适应加权中值滤波的二维Otsu图像分割算法[J].计算机应用研究,2013,30(2):598-600.