

文章编号 1004-924X(2015)增-0479-05

采用黑白检测算子的棋盘格角点检测

范新峰*, 程远增, 付 强

(军械工程学院 电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要:针对 CCD 相机高精度标定对标定板角点检测的要求,分析了黑白棋盘格图像的灰度特性,提出了一种基于黑白检测算子(BW 算子)的棋盘格亚像素检测算法。该算法首先定义 4 个方向,根据 BW 算子统计各个方向上的灰度值,计算 C^{BW} 值(BW 算子的响应值)并检测出角点,获得像素级坐标;然后利用角点邻域内的灰度信息,根据本文提出的亚像素定位算法,将角点坐标提高到亚像素级精度。在 MATLAB 编译环境下进行了仿真实验,结果表明,该算法能完整准确地检测棋盘格角点,定位精度达到了 0.1 pixel。该检测算法为 CCD 相机的高精度标定提供了基本条件。

关键词: BW 算子;棋盘格;角点检测;亚像素定位;相机标定

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0479

Chessboard corner detection based on black-white detection operator

FAN Xin-feng*, CHENG Yuan-zeng, FU Qiang

(Department of Electronic and Optical Engineering, Ordnance Engineering
College, Shijiazhuang 050003, China)

* Corresponding outhor, E-mail: nichowen@sina.com

Abstract: According to the requirement of the high-precision calibration of a CCD camera for corner detection in the calibration plate, a sub-pixel corner detection algorithm of black-white chessboard based on black-white operators (referred to BW operator) was proposed with the analysis of the gradation characteristic of a chessboard image. The algorithm checks firstly out the gray values in 4 directions as defined. The C^{BW} (the response to BW operator) was calculated to obtain the coordinates of corners with the precision at pixel level. Then the sub-pixel location algorithm based on the gray information of corner neighborhood was proposed to improve the precision of coordinates to sub-pixel level. The simulation experiment was performed in the MATLAB environment and the experimental results show the algorithm detects completely and accurately corners of chessboard with a precision of 0.1 pixel level. The detection algorithm provides a basic condition for the high-precision of CCD cameras.

Key words: black-white(BW) operator; chessboard; corner detection; sub-pixel location; camera calibration

收稿日期:2015-05-05;修订日期:2015-06-01.

基金项目:武器装备军内科研项目(No. 装司[2014]551)

1 引言

计算机视觉是利用计算机及附属 CCD 等感光元件来代替人类视觉完成对周围环境进行感知和分析任务的综合性技术^[1]。它的环境适应能力强,处理方式简单,已被广泛应用于三维测量、医学诊断、机器人导航及虚拟现实等领域。CCD 相机作为最基本的器件,其标定精度直接影响计算机视觉任务的精度,而 CCD 相机的标定精度很大程度上由标定板图像的角点检测精度决定。

黑白棋盘格^[2-3]具有制作过程简单、角点特点鲜明等优点,作为标定板已被广泛应用于相机标定过程。因此,提高黑白棋盘格角点检测精度对于相机标定十分必要。目前,针对棋盘格角点的检测方法主要有针对一般角点的通用算法^[4-5]和针对棋盘格角点的检测算法^[5-7]。文献[4]中提出的 SUSAN 角点检测算法,它的抗噪能力强,可以快速鲁棒地检测出目标角点。但由于只考虑 USAN 区域面积而未考虑 USAN 区域形状特性^[8],所以对类似正交 X 型角点的特殊角点会出现漏检现象。文献[5]中提出的 Harris 角点检测算法利用图像灰度的高斯梯度判断角点,计算量大,而且不能解决圆角效应引起的角点偏移问题。文献[6]中提出的基于环形模板灰度变化次数和图像高度对称的角点亚像素检测算法,克服了不能有效检测棋盘内角点和边缘点的缺陷,角点检测达到了亚像素级别,但算法计算量大,实时性不高。文献[7]中提出的基于图像物理坐标环形模板的棋盘格角点检测算法,避免了漏检、误检现象,将角点定位到亚像素级,但该算法存在耗时大的问题。

本文在研究棋盘格图像角点灰度特性的基础上,结合刘阳^[9]等提出的 BW 算子,提出了一种黑白棋盘格角点亚像素检测算法。算法针对性强,计算量小,实验结果表明提取的角点能达到亚像素级精度。

2 棋盘格图像灰度特性分析

棋盘格是相机标定过程中最常用的工具,其图像由若干个黑白相间的正方形组成,如图 1 所示。分析图 1 可知:棋盘格角点是 X 型角点,关

于角点对称的像素点灰度相近;关于其它点对称的像素点灰度一般相差较大。在图 1 中,完整的黑格或白格区域是平坦区域,相邻黑白格间的区域是边缘区域,角点周围的区域是角点区域。

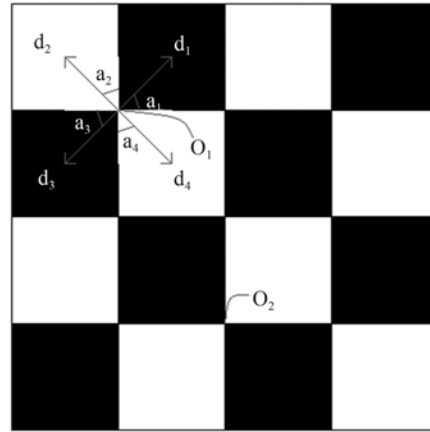


图 1 棋盘格图像及 X 型角点特性分析图

Fig. 1 Chessboard image and characteristic analysis of X-corner

角点是二维图像灰度变化最剧烈或图像边缘曲线上曲率值最大的强特征点^[10]。图 1 中, O_1 、 O_2 是典型的两类棋盘格 X 型角点,它们最大的特点是水平、竖直 2 个方向上灰度变化明显,有别于棋盘格 4 条边缘线交集处的角点。

针对这两类 X 型角点,图 1 给出了特性分析示意图,下面以 O_1 型角点为例进行说明:两条黄线是棋盘格图像的边缘方向;以 O_1 为中心,定义 4 个方向 d_1 、 d_2 、 d_3 和 d_4 ,如图中红色箭头所示; d_1 、 d_2 、 d_3 和 d_4 与逆时针方向相邻的边缘方向所形成的夹角分别是 a_1 、 a_2 、 a_3 和 a_4 。当 d_1 、 d_3 趋近于黑格对角线方向时,该方向上像素点的灰度值趋于极小值(纯黑),且 a_1 、 a_3 取 45° 时,灰度值达到理想的极小值;当 d_2 、 d_4 趋近于白格对角线方向时,该方向上像素点的灰度值趋于极大值(纯白),且 a_2 、 a_4 取 45° 时,灰度值达到理想的极大值。根据以上分析,得到如下结论:对于 O_1 型角点,当在 d_1 、 d_2 、 d_3 和 d_4 方向上取相同个数的像素点,且 a_1 、 a_2 、 a_3 和 a_4 取 45° 时, d_1 、 d_3 方向上的像素点的灰度和取极小值, d_2 、 d_4 方向上的像素点的灰度和取极大值。类似地,对于 O_2 型角点,建立相同的特性分析图,得到如下结论:当在 d_1 、 d_2 、 d_3 和 d_4 方向上取相同个数的像素点,且 a_1 、 a_2 、 a_3 和 a_4 取 45° 时, d_1 、 d_3 方向上的像素点

的灰度和取极大值, d_2 、 d_4 方向上的像素点的灰度和取极小值。对于平坦和边缘区域内的像素点,上述结论不成立。

3 棋盘格角点亚像素检测算法

3.1 BW 算子角点检测

BW 算子是刘阳^[9]等提出的一种构思巧妙算子,其定义为:

$$C^{BW}(i, j) = \left| \sum I(l, m) - \sum I(p, q) \right|, \quad (1)$$

式中: $I(l, m)$ 是以 (i, j) 为中心, d_1 、 d_3 方向上的像素点的灰度值; $I(p, q)$ 是以 (i, j) 为中心, d_2 、 d_4 方向上的像素点的灰度值; $C^{BW}(i, j)$ 是 BW 算子的响应值。

根据棋盘格图像灰度特性分析结果,角点区域内的像素点存在如下特点:以 (i, j) 为中心,

$$\begin{cases} i_x = i_{BW} + c_1 [(1 - |I_5 - I_9|) - (1 - |I_5 - I_1|) + (1 - |I_5 - I_3|) - (1 - |I_5 - I_7|)] + \\ \quad c_2 [(1 - |I_5 - I_4|) + (1 - |I_5 - I_6|)] \\ j_y = j_{BW} + c_1 [(1 - |I_5 - I_9|) - (1 - |I_5 - I_1|) + (1 - |I_5 - I_3|) - (1 - |I_5 - I_7|)] + \\ \quad c_2 [(1 - |I_5 - I_2|) + (1 - |I_5 - I_8|)] \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $I_l (l=1, 2 \dots 8, 9)$ 表示角点及 8 邻域内像素点(位置关系如图 2 所示,其中点 5 是检测到的角点)的灰度值,它们的大小量化为 $0 \sim 1$; (i_{BW}, j_{BW}) 表示根据 BW 算子检测到的角点的像素级坐标; (i_x, j_y) 表示角点的亚像素坐标; c_1 、 c_2 表示权值,反映了周围像素点灰度对角点亚像素位移的影响程度(距离越近,影响越大),选定 $c_1 = \frac{\sqrt{2}}{4}$, $c_2 = \frac{1}{2}$ 。

2.3 算法实现

棋盘格角点亚像素检测算法主要包括以下步骤:

(i) 定义 4 个方向,遍历棋盘格图像中的每一个像素点,按式(1)计算 C^{BW} 值;按式(3)初步提取 C^{BW} 值较大的区域 I_0 (包含棋盘格角点的多个像素点)。其中, d_1 、 d_2 、 d_3 和 d_4 方向上像素点的个数通过实验取为 5,平衡了算法计算量和抗噪性之间的关系; T_h 是设定的灰度阈值,可根据实际情况获得:

$$C^{BW}(i, j) \geq T_h. \quad (3)$$

d_1 、 d_3 方向上与 d_2 、 d_4 方向上像素点的灰度值相差较大。结合 BW 算子,有如下结论:棋盘格图像中,角点区域内像素点 C^{BW} 值较大,而平坦和边缘区域内的像素点 C^{BW} 值较小。由此引出棋盘格 X 型角点的判断准则:当 C^{BW} 值取得局部极大值时,对应的像素点即为棋盘格角点。因为数字图像的灰度分辨率是以像素为单位,根据 BW 算子检测到的角点其定位精度仅仅是像素级的,不能满足相机标定过程对角点精度的要求,必须通过有关手段将精度提高到亚像素级。

2.2 亚像素级角点定位

在检测到棋盘格像素级角点的基础上,充分利用角点区域内像素点的灰度信息,考虑到它们对角点定位的影响,提出了新的亚像素角点定位算法:

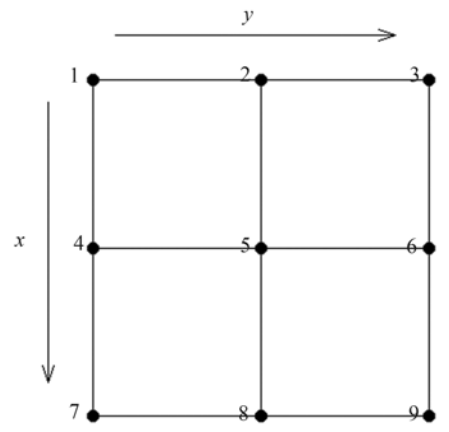


图 2 角点 8 邻域像素点位置关系图

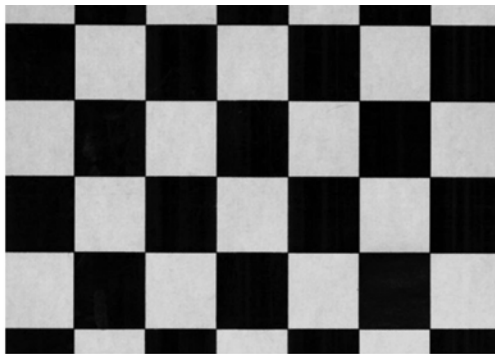
Fig. 2 Positional relationship of neighborhood pixels of corner

(ii) 在区域 I_0 中找出 C^{BW} 值最大的点,只占 1 个像素大小,即为角点,记为 (i_{BW}, j_{BW}) 。

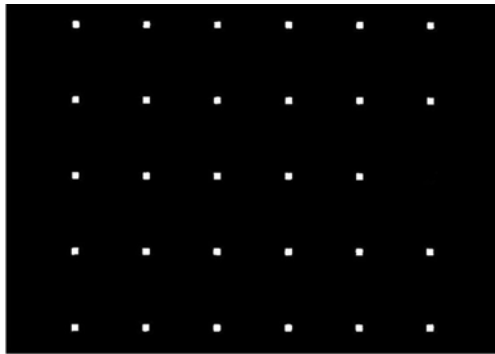
(iii) 以角点 (i_{BW}, j_{BW}) 为中心,在角点区域内根据式(2)计算角点的亚像素坐标。

4 实验结果及分析

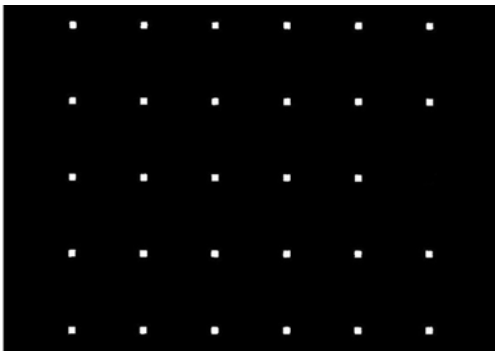
为了验证本文算法的正确性,用如图 3(a)所示的棋盘格图像在 MATLAB 编译环境下进行仿真实验,角点的检测效果如图 3(b)所示。作为对比,采用 SUSAN 角点检测算法进行角点检测,角点的检测效果如图 3(c)所示。



(a)原始棋盘格图像
(a)origin chessboard image



(b)本文算法检测效果图
(b)result image by proposed algorithm



(c)SUSAN角点检测算法检测效果图
(c)result image by SUSAN corner detection algorithm

图 3 本文算法与 SUSAN 角点检测算法对比图
Fig. 3 Detection results by proposed algorithm and SUSAN corner detection algorithm

由图 3(b)可知,本文算法能够准确检测棋盘格的全部 30 个 X 型角点,不存在误检、漏检情况;由图 3(c)可知,SUSAN 角点检测算法也能较完整地检测角点,但与本文算法相比,存在较少的漏检情况,只检测出 29 个角点。表 1 给出了本文算法计算出的部分角点坐标。

表 1 本文算法角点亚像素检测结果

Tab. 1 Corner detection result of proposed algorithm (pixel)

角点序列	图像像素坐标	
	i_x	j_y
1	35.852 5	121.883 9
2	36.998 5	243.002 4
3	36.921 4	364.923 4
4	37.087 8	487.901 5
5	37.902 8	609.891 0
6	37.892 2	731.917 7

为了验证本文算法的精度,先根据本文算法计算角点的亚像素坐标 (i_x, j_y) ;然后根据张艳珍^[11]提出的线性变换两步法完成相机标定,选取 n 个世界坐标已知的测试点(棋盘格角点)作为参照,用已标定好的相机成像模型求对应的投影图像坐标 (u_x, v_y) 。

误差分析^[12]采用绝对误差来描述,定义为测试点的真实图像像素坐标与再投影后相应的图像像素坐标之差的模平均值^[13]:

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(i_x - u_x)^2 + (j_y - v_y)^2]^{1/2}. \quad (4)$$

经计算, $E=0.107 2$,角点定位精度达到 0.1 pixel 的亚像素级别。

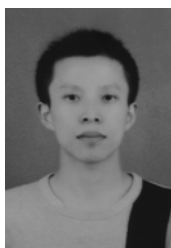
5 结 论

本文在分析棋盘格图像灰度特性的基础上,提出了基于 BW 算子的棋盘格角点亚像素检测算法。算法简单,构思巧妙,易于实现,角点的定位精度达到了亚像素级别,为 CCD 相机的高精度标定提供了基本条件。实验结果表明,算法正确、精度较高,达到了 0.1 pixel,可以为相机标定提供可靠数据。

参考文献:

- [1] 高宏伟. 计算机双目立体视觉[M]. 北京:电子工业出版社,2012.
GAO H W. *Computer Based Binocular Vision* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry. (in Chinese)
- [2] 熊显明,任娟娟. 黑白棋盘格中的角点提取算法的研究[J]. 微型机与应用,2014,33(9): 66-69.
XIONG X M, REN J J. Research of corner detection algorithm in the black and white checkerboard [J]. *Microcomputer and Its Applications*, 2014, 33(9): 66-69. (in Chinese)
- [3] 赵斌,周军. 基于改进棋盘的角点自动检测与排序[J]. 光学精密工程,2015,23(1): 237-244.
ZHAO B, ZHOU J. Automatic detection and sorting of corners by improved chessboard pattern [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(1): 237-244. (in Chinese)
- [4] SMITH S M, BRADY J M. SUSAN-a new approach to low level image processing [J]. *Computer Vision*, 1997, 23(1): 45-78.
- [5] HARRIS C, STEPHEN S M. A combined corner and edge detection [C]. In *Proceeding of The Fourth Alvey Vision Computer Vision*, 1988, 147-151.
- [6] 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.
YANG X F, HUANG Y M, GAO F, et al.. New corner detection algorithm of chessboard image for camera calibration [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(5): 1109-1113. (in Chinese)
- [7] 储珺,郭卢安政,赵桂花. 采用环形模板的棋盘格角点检测[J]. 光学精密工程,2013,21(1): 189-196.
CHU J, GUO L A ZH, ZHAO G H. Chessboard corner detection based on circular template [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(1): 189-196. (in Chinese)
- [8] 戴士杰,邵猛,吴佳宁,等. 使用12像素对称模板的棋盘格内角点检测[J]. 红外与激光工程,2014,43(4): 1306-1311.
DAI S J, SHAO M, WU J N, et al.. Inter corner detection of chessboard image for camera calibration based on 12 pixels symmetrical template [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1306-1311. (in Chinese)
- [9] 刘阳,王福利,常玉清,等. 黑白棋盘格角点检测算法[J]. 东北大学学报(自然科学版),2007,28(8): 1090-1093.
LIU Y, WANG F L, CHANG Y Q, et al.. Black and white X-corner detection algorithm [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2007, 28(8): 1090-1093. (in Chinese)
- [10] 屠大维,张翼成. 基于灰度差异的棋盘格角点自动检测[J]. 光学精密工程,2011,19(6): 1360-1366.
TU D W, ZHANG Y CH. Auto-detection checkerboard corners based on gray-level difference [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(6): 1360-1366. (in Chinese)
- [11] 张艳珍,欧宗英. 一种新的摄像机线性标定方法[J]. 中国图像图形学报,2001,6(8): 727-731.
ZHANG J X, OU Z Y. A new linear approach for camera calibration [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2001, 6(8): 727-731. (in Chinese)
- [12] 唐巍,叶东,袁峰,等. 灰色关联分析法在双目视觉测量系统误差分析中的应用[J]. 光学精密工程,2013,21(2): 503-513.
TANG W, YE D, YUAN F, et al.. Application of gray incidence method to error analysis of binocular vision measurement system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 503-513. (in Chinese)
- [13] 张颖. 一种摄像机亚像素线性标定方法[J]. 计算机工程与应用,2007,43(9): 56-58.
ZHANG Y. New linear approach for camera calibration with sub-pixel accuracy [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(9): 56-58. (in Chinese)

作者简介:



范新峰(1990—),男,湖北武穴人,2013年于军械工程学院获得学士学位,主要从事计算机视觉方面的研究。E-mail: nichowen@sina.com



程远增(1966—),男,河南南阳人,博士,教授,硕士生导师,1988年于军械工程学院获得学士学位,1991年于军械工程学院获得硕士学位,2009年于北京理工大学获得博士学位,主要从事火力控制理论与技术、检测技术与自动化装置方面的研究。E-mail: cheng-yz@126.com