

# 基于角点灰度分布特征的棋盘格角点检测

伍明<sup>1,2,3</sup>, 伍俊龙<sup>1,2,3</sup>, 马帅<sup>1,2,3</sup>, 杨康建<sup>1,2</sup>, 杨平<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

<sup>2</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 在摄像机标定过程中,较差的光照条件和镜头畸变会造成棋盘格角点漏检和角点冗余。分析了角点的灰度分布特性,提出一种基于角点灰度分布特征的棋盘格角点检测算法。为确保在较差光照条件和镜头畸变下,棋盘格图像角点不漏检,算法首先利用角点的灰度分布特性提取候选角点;然后通过迭代的方式提高候选角点的精度并再次结合棋盘格角点的灰度分布特性剔除候选角点中非角点处的伪角点,避免棋盘格角点冗余;最后通过角点处的邻近点合并获得最终的棋盘格角点坐标。实验结果证明,在较差的光照条件和镜头畸变条件下,本算法角点无漏检和冗余。将该算法提取的棋盘格角点应用于摄像机标定,结果显示重投影误差的均方差在 0.1 pixel 范围以内,优于其他算法。

**关键词** 测量; 棋盘格; 角点检测; 灰度分布; 摄像机标定

中图分类号 TN206

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP57.011204

## Checkerboard Corner Detection Based on Corner Gray Distribution Feature

Wu Ming<sup>1,2,3</sup>, Wu Junlong<sup>1,2,3</sup>, Ma Shuai<sup>1,2,3</sup>, Yang Kangjian<sup>1,2</sup>, Yang Ping<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** During the camera calibration process, it is necessary to deal with the missed detection and redundancy of checkerboard corners caused by poor illumination conditions and lens distortion. In this study, we analyze the gray distribution properties of the corners and propose an algorithm for corner detection based on the checkerboard corners' gray distribution features. To ensure that the checkerboard corners are not missed under poor illumination conditions and lens distortion, the proposed algorithm firstly extracts candidate corners using the gray distribution characteristics of the corners. Then, we improve the accuracy of the candidate corners through iteration, and eliminate the fake corners based on the gray distribution characteristics of the checkerboard corners, avoiding the redundant corners. Finally, we extract the corner coordinates of the checkerboard by combining the nearest neighbor points. Experimental results show that there is no omission and redundancy in the corners under poor illumination conditions and lens distortion. By applying the checkerboard corners extracted by the proposed algorithm in camera calibration, a mean square error of the re-projection error less than 0.1 pixel has been achieved, which is better than those provided by existing algorithms.

**Key words** measurement; checkerboard; corner detection; gray distribution; camera calibration

**OCIS codes** 120.1880; 110.2960; 040.1490; 150.1488

收稿日期: 2019-07-03; 修回日期: 2019-07-13; 录用日期: 2019-07-15

基金项目: 中国科学院西部之光人才培养引进计划

\* E-mail: pingyang2516@163.com

# 1 引言

摄像机标定是计算机视觉的关键技术,在立体视觉<sup>[1]</sup>、视频监控<sup>[2]</sup>等领域得到了广泛的应用。摄像机标定是通过已知标定物成像,根据物像关系建立数学模型,从而反解摄像机内外参数的过程。摄像机标定能够建立相机拍摄的图像像素与相机坐标系中光线方向之间的对应关系。学者基于针孔模型对摄像机标定进行了深入研究<sup>[3-5]</sup>,其中张正友标定法<sup>[6]</sup>稳健性好、效率高,是目前比较主流的方法。大多数的相机标定都需要标定物,棋盘格是使用最多的标定物。Lavest等<sup>[7]</sup>指出,棋盘格特征点的定位精度直接影响着相机标定的精度。但在实际的标定过程中,较差的光照条件和镜头畸变会引起角点的漏检和冗余。

针对上述问题,Wang等<sup>[8]</sup>在Harris算法<sup>[9]</sup>基础上利用棋盘格角点附近区域灰度分布的对称性,实现角点信息的提取,但该算法对畸变较大的图像提取精度低,且角点误检率较高。储珺等<sup>[10]</sup>采用环形模板实现角点的提取,该算法使用大津法对图像进行二值化处理时并不能完全地将前景和背景分开,这导致图像角点的漏检和多检。Geiger等<sup>[11]</sup>采用两个不同的角点模板计算图像中每个像素的角点响应,然后将候选角点扩展到最大灰度梯度方向,该算法虽然在图像畸变较大的情况下可以很好地工作,但在较差的光照条件下会出现少许的角点漏检。申夏晶等<sup>[12]</sup>通过多次拍摄、逐级迭代估计和优化相机参数的方法实现了大畸变棋盘格图像的角点检测,但该算法适用范围小。Liu等<sup>[13]</sup>用Hessian角点检测器获得初始角点集,然后利用棋盘格图像的强度和几何特性消除初始角点集中的伪角点。王民等<sup>[14]</sup>在Harris算法基础上,利用图像局部加权熵与最小亮度变化算法相结合的方法实现角点检测,但该算法在灰度变化不明显的图像中不能准确区分边缘点和角点。目前常用的角点检测工具是基于Harris算子<sup>[9]</sup>的Matlab<sup>[15]</sup>标定工具箱和OpenCV标定工具箱<sup>[16]</sup>。这两种工具箱虽然普适性和稳健性较强,但运算量较大。

本文通过分析棋盘格角点的灰度分布特性,提出一种基于角点灰度分布特征的棋盘格角点检测的方法。首先构造圆边界,并通过棋盘格角点灰度分布的交替性获得候选角点;然后在灰度梯度法<sup>[11]</sup>上加入高斯模板,通过迭代实现候选角点位置的亚像素优化;最后利用图像角点圆边界上的灰度分布特

征剔除非角点附近的冗余点再合并邻近角点得到最终的角点,解决了角点提取冗余和漏检的问题。本文采用先提高角点的精度再合并的方式,既确保了角点的精度又避免了先合并角点带来较大误差而导致的漏检问题。

## 2 基于角点灰度分布特征的角点检测

### 2.1 棋盘格角点的灰度分布特征

在检测候选角点时,本文方法借鉴Fast算法<sup>[17]</sup>圆边界检测器的思想。首先从图中任选像素点A作为半径为r的圆边界中心,得到该圆边界上的像素点。图1为半径为3 pixel的圆,将图中圆边界上的像素点个数记为n。以像素点1为起点按逆时针的顺序,将圆边界上像素的灰度值减去边界上像素的平均灰度值并依次排列成向量 $I_b$ ,使得角点附近的白色和黑色区域在向量 $I_b$ 中的值分别为正和负。

$$I_b(i) = I(i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(i), \quad (1)$$

式中: $i$ 为圆边界上的像素点序号; $n$ 为圆上的像素点个数; $I(i)$ 为圆边界上的像素值; $I_b(i)$ 为向量 $I_b$ 的元素。此外,将圆心A与圆上像素点所成的直线和圆心A与像素点1所成的直线X的角度记为 $\theta$ 。 $I_b$ 向下移动一位获得的向量与向量 $I_b$ 点乘后得到向量 $I_m$ 。根据棋盘格理想角点处的灰度分布特征,棋盘格角点处的 $I_b$ 、 $I_m$ 具有以下性质。

性质1:如图2(a),棋盘格角点周围的灰度分布为4个黑白相间的区域。即向量 $I_b$ 在像素点2,3,4,5处出现四次正负符号的变化,其符号变化的索引在向量 $I_m$ 中表现的值小于0,故向量 $I_m$ 的元素值小于0的个数应为4。

性质2:如图2(a),圆上任意相邻的两区域的像素点个数约为圆上所有像素点个数的1/2,即向量 $I_m$ 中不相邻的元素值小于0的索引之差约为 $I_m$ 元素个数的1/2(如像素点2与像素点4的索引之差为10,是总像素数20的1/2)。

性质3:如图2(b),对于同心圆,在同一相邻的两区域的交界处的小圆与大圆上的像素对应的角度 $\theta$ 约等,即大圆和小圆上 $I_m$ 元素值小于0的像素点对应的角度 $\theta$ 约等(如 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 约等。 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 分别为小圆和大圆对应的角度)。

### 2.2 获取候选角点

为了避免在较差的光照条件和镜头畸变下出现角点漏检,在获取的候选角点中应包括棋盘格所有

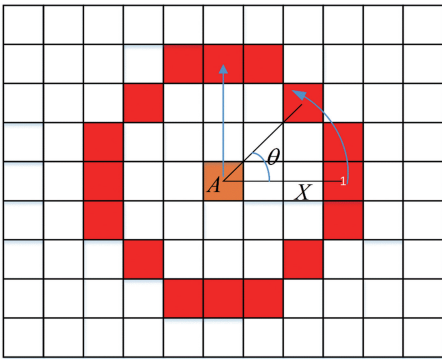


图 1 半径为 3 的圆上的像素点

Fig. 1 Pixels on circle with radius of 3

角点,因此选择合适的半径  $r$  构建圆边界,再对图像进行逐像素遍历并计算其向量  $I_m$ 。像素点的向量

$I_m$  满足性质 1 的像素坐标即视为候选角点的坐标。图 3(a)、(b)为棋盘格图像通过遍历后获得的整像素候选角点,可以看出候选角点集包含了所有的角点。即使在较差的光照条件和镜头畸变下候选角点集依然能包含棋盘格所有的角点,这为棋盘格角点不漏检奠定了基础。

### 2.3 候选角点精细化

从图 3(a)、(b)图中可以看出获得的整像素候选角点的位置并非理想角点处。因此,从提高角点提取精度方面考虑,本文基于灰度梯度法<sup>[11]</sup>将候选角点附近的像素点的灰度梯度以高斯权重的形式并入计算,采用迭代实现角点位置的亚像素优化。如图 4 所示,假设  $T$  点为理想的角点,  $T_j$  与  $T_k$  为获取的候选角点可能

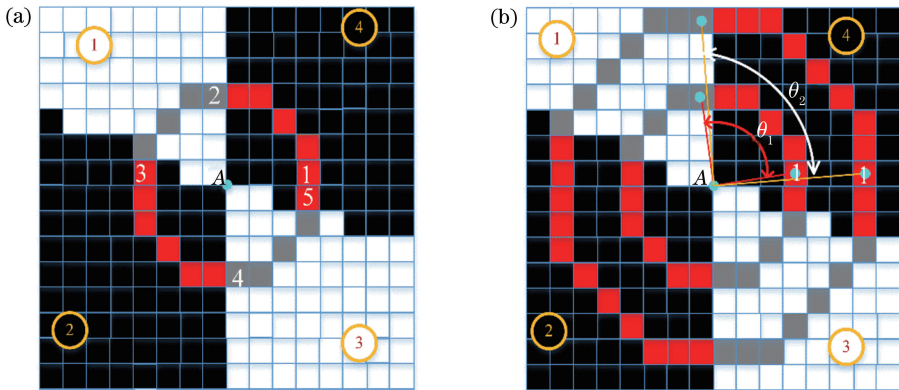


图 2 圆上的像素点在各区域的分布情况。(a)圆上任意相邻的两区域像素点之和约为圆上像素点总和的 1/2;

(b)同心圆上在交界处的像素点对应的角度  $\theta$  相同

Fig. 2 Distributions of pixels on circle in each region. (a) Sum of pixels in any two adjacent regions of circle is half of sum of pixels on circle; (b) pixels at boundary on concentric circle correspond to the same  $\theta$

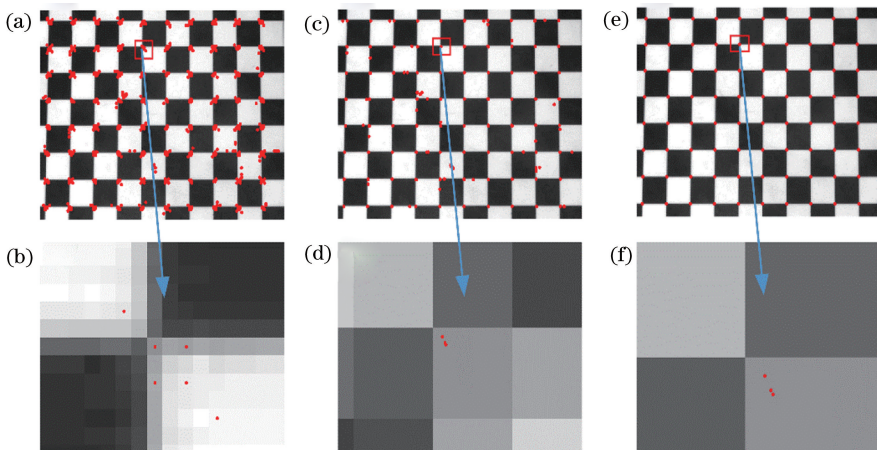


图 3 迭代优化前后候选角点分布情况。(a)迭代优化前候选角点的分布;(b)图 3(a)的局部放大图;(c)迭代后候选角点的分布;(d)图 3(c)的局部放大图;(e)剔除伪角点后候选角点的分布;(f)图 3(e)的局部放大图

Fig. 3 Distributions of candidate corners before and after iterative refinement. (a) Distribution of candidate corners before iterative refinement; (b) locally enlarged drawing of Fig. 3 (a); (c) distribution of candidate corners after iterative refinement; (d) locally enlarged drawing of Fig. 3 (c); (e) distribution of candidate corners after eliminating fake corners; (f) locally enlarged drawing of Fig. 3 (e)

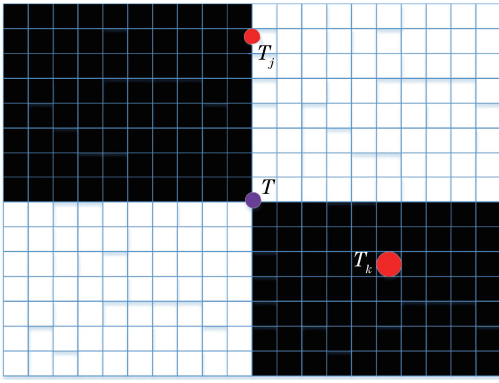


图4 候选角点的梯度图

Fig. 4 Gradient graphs of candidate corner points

出现的位置( $j, k$  为位置编号),  $T_j$  的灰度梯度  $\nabla T_j$  方向与  $\overrightarrow{T_j T}$  的方向垂直,  $T_k$  的灰度梯度  $\nabla T_k$  等于 0。因此可将  $T_j$  点处的梯度向量与向量  $\overrightarrow{T_j T}$  的关系描述为

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \sum_u \sum_v \omega(u, v) \mathbf{G}_x(u, v) \mathbf{G}_x(u, v) & \sum_u \sum_v \omega(u, v) \mathbf{G}_x(u, v) \mathbf{G}_y(u, v) \\ \sum_u \sum_v \omega(u, v) \mathbf{G}_x(u, v) \mathbf{G}_y(u, v) & \sum_u \sum_v \omega(u, v) \mathbf{G}_y(u, v) \mathbf{G}_y(u, v) \end{pmatrix}^{-1} \cdot \\ &\left( \sum_u \sum_v \begin{pmatrix} \omega(u, v) \mathbf{G}_x(u, v) \mathbf{G}_x(u, v) \cdot u + \omega(u, v) \mathbf{G}_x(u, v) \mathbf{G}_y(u, v) \cdot v \\ \omega(u, v) \mathbf{G}_x(u, v) \mathbf{G}_y(u, v) \cdot u + \omega(u, v) \mathbf{G}_y(u, v) \mathbf{G}_y(u, v) \cdot v \end{pmatrix} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $u, v$  为候选角点的位置;  $\bar{u}, \bar{v}$  为更新后的角点位置;  $\omega(u, v)$  为窗口的高斯权重;  $\mathbf{G}_x, \mathbf{G}_y$  为图像的灰度梯度。考虑到噪声和光照等因素的影响, 采用多个尺寸的高斯窗口对候选角点进行迭代更新。图 3(a)、(b) 候选角点精细化后的角点分布如图 3(c)、(d) 所示, 候选角点经过迭代后基本都收敛到真实角点处, 提高了角点的精度, 实现了角点精细化。

## 2.4 去除伪角点

如图 3(c)、(d) 所示, 候选角点经过不同的高斯模板角点精细化后在非角点附近依然存在较多的冗余点。造成此情况的原因是在获取候选角点时, 我们通过性质 1 只定性地给出了角点附近的灰度分布, 满足交替性。而性质 2、3 能定量地给出候选角点圆边界上灰度交替处像素点对应的向量  $\mathbf{I}_m$  中索引之间的关系, 因此对角点精细化后的候选角点同时采用性质 2、3 去除非角点处的候选角点, 其结果如图 3(e)、(f) 所示。对于较差的光照条件和畸变的图像, 通过放宽阈值能很好地剔除非角点处的候选角点并且能确保角点附近有候选角点, 这保证了算法角点检测时不会出现角点漏检和冗余的情况。

$$\nabla T_j \cdot \overrightarrow{T_j T} = 0. \quad (2)$$

在实际图像中, 由于噪声和光照等条件的影响, (2) 式一般不等于 0。另外, 图像在角点处的灰度值变化为渐变的过程, 因此加入高斯窗口将 (2) 式转换为最优化问题, 即

$$T = \min_{T_k \in N(T_j)} \sum \omega(T_k) [\mathbf{G}_{T_k}^T (T - T_k)]^2. \quad (3)$$

最优化问题的封闭解可表示为

$$T = \left[ \sum_{T_k \in N(T_j)} \omega(T_k) \mathbf{G}_{T_k} \mathbf{G}_{T_k}^T \right]^{-1} \cdot \sum_{T_k \in N(T_j)} \omega(T_k) (\mathbf{G}_{T_k} \mathbf{G}_{T_k}^T) T_k, \quad (4)$$

式中:  $T_k$  为以候选角点  $T_i$  为中心的高斯窗口中的像素;  $N(T_i)$  为候选角点集合;  $\mathbf{G}_{T_k}$  为点  $T_k$  处的梯度向量;  $\omega(T_k)$  为点  $T_k$  处所占的权重。候选角点的更新位置进一步表述为

## 2.5 邻近角点合并

经过角点精细化和去除伪角点后, 候选角点难以收敛到同一角点位置, 而是以邻近点的形式存在, 如图 3(e)、(f) 所示。假设这些邻近点  $h$  的集合为  $H$ , 即

$$\begin{aligned} h_1(x_1, y_1), h_2(x_2, y_2), \dots, \\ h_m(x_m, y_m) \in H, m \geq 2, \end{aligned} \quad (6)$$

且邻近点满足

$$\begin{aligned} D[h_q(x_q, y_q), h_p(x_p, y_p)] \leq \delta, \\ q \leq m, p \leq m, q \neq p, \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $m$  为角点附近冗余点的个数;  $D$  为两像素点的欧氏距离;  $p, q$  为角点附近冗余点的编号。经过角点精细化后的常数  $\delta$  很小, 一般不超过 0.5 pixel。于是采用点  $h \left( \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_m}{m}, \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_m}{m} \right)$  来合并更新上述的邻近点, 最后得到点的集合即为棋盘格的角点。

综上所述, 角点检测算法流程如图 5 所示。

## 3 实验结果与分析

采用的相机是 baumerTGX03, 其分辨率为

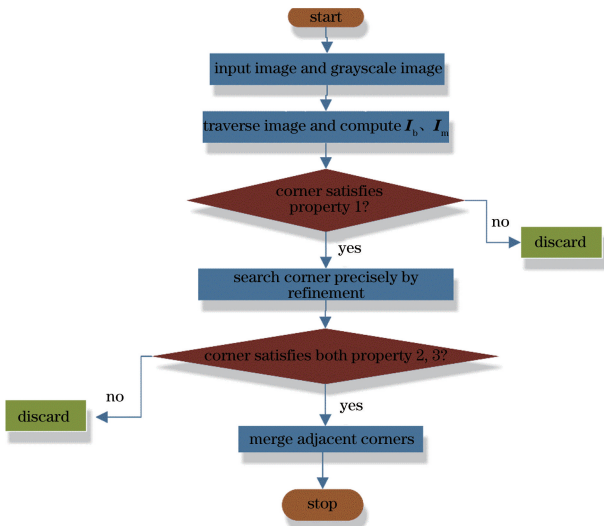


图 5 角点检测流程

Fig. 5 Flow chart of corner detection

656 pixel×494 pixel, 像元大小为 7.4 μm×7.4 μm。镜头为日本 VST 公司的 SV-1614HF, 焦距为 16 mm, 光圈范围为 1.4~16 mm, 最近对焦距离为 100 mm。标定板 CT0200-15 陶瓷亚光棋盘格, 外形尺寸为 200 mm×200 mm, 单格尺寸为 15 mm×15 mm。在畸变图像实验中, 为验证本文算法的稳健性, 采用来源于文献[18]的图像。

### 3.1 光照条件变化实验

为了检验本文角点检测的稳健性, 相机采集了多幅在不同光照条件下的棋盘格图像。每幅图像中的棋盘格角点数为 88, 总共包含 264 个棋盘格角点。图 6(a) 为弱光照条件、正常光照和强光照条件下的采集图像。图 6(b)、(c)、(d) 分别是 Matlab Toolbox<sup>[15]</sup>、文献[11]以及本文方法检测的结果。

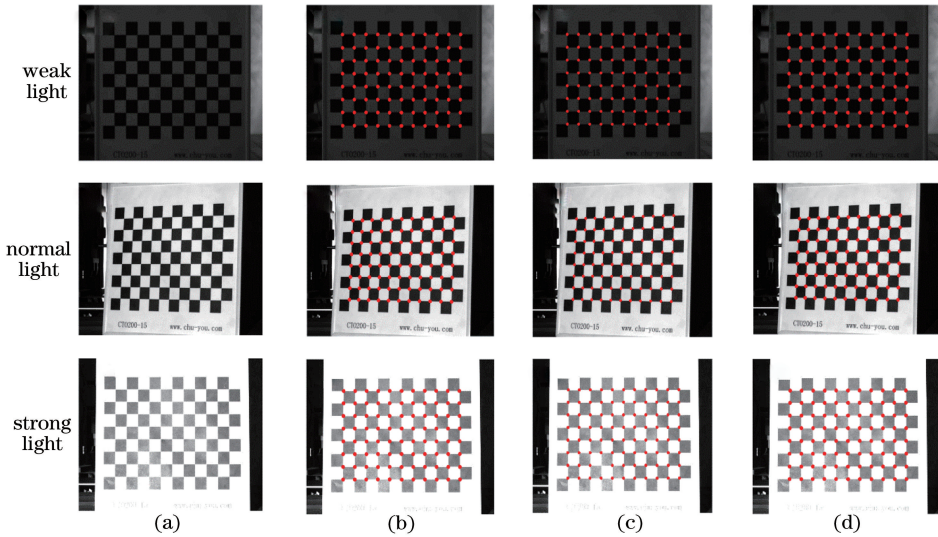


图 6 角点检测对比实验。(a)源图像;(b) Matlab Toolbox<sup>[15]</sup>角点检测结果;(c)文献[11]角点检测结果;(d)本文方法的检测结果

Fig. 6 Contrast experiments of corner detection. (a) Original images; (b) results of corner detection by Matlab Toolbox<sup>[15]</sup>; (c) results of corner detection by algorithm in Ref. [11]; (d) results of corner detection by proposed algorithm

采用上述 3 种角点检测算法对 3 幅不同光照条件下拍摄的图像进行检测, 得到的每幅图像的角点数如表 1 所示。从图 6 和表 1 看出, 在使用 Matlab Toolbox<sup>[15]</sup>对棋盘格进行角点检测时, 通过调节角度指标 minCornerMetric 参数的阈值可使算法在较差光照下也能很好地检测出角点。文献[11]的方法在弱光照条件下检测角点时, 由于噪声和阴影的影响漏检了 2 个角点; 在强光条件下由于角点分离, 算法漏检了 1 个角点; 在正常光照条件下, 算法能很好地检测出角点, 满足相机标定的需求。相比之下, 本文方法也能很好地检测出所需的棋盘格角点, 能克服光照条件变化的影响,

具有很好的稳健性。

表 1 不同方法检测的角点个数

Table 1 Number of corner points detected by different algorithms

Image number	Matlab Toolbox <sup>[15]</sup>	Algorithm in Ref.[11]	Proposed algorithm
No.1	88	86	88
No.2	88	88	88
No.3	88	87	88

### 3.2 大畸变图像实验

为进一步检测本文方法的稳健性, 选取一组畸变较大的棋盘格图像<sup>[18]</sup>进行实验。将本文算法

和 Matlab Toolbox<sup>[15]</sup>、文献[11]的算法进行实验对比,其结果如图 7 (a)~(d) 所示。Matlab Toolbox<sup>[15]</sup>依然需要通过调节 minCornerMetric 参数才能完全地检测出角点,操作较繁琐。文献[11]的算法采用了两种不同的角点模板,故在图像畸变

较大的情况下也能很好地工作。由于大畸变的棋盘格图像的角点分布特征依然具有本文算法所提及的性质,且本文是逐级筛选获得最终的角点,因此使用本文算法对畸变较大的棋盘格图像能检测出角点,无漏检、冗余角点等情况出现。

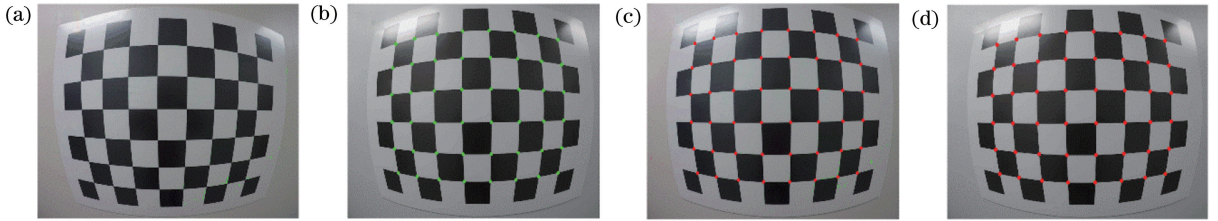


图 7 畸变较大的棋盘格。(a)源图像;(b) Matlab Toolbox<sup>[15]</sup>角点检测结果;(c)文献[11]角点检测结果;  
(d)本文方法的检测结果

Fig. 7 Checkerboard with large distortion. (a) Original images; (b) result of corner detection by Matlab Toolbox<sup>[15]</sup>;  
(c) result of corner detection by algorithm in Ref. [11]; (d) result of corner detection by proposed algorithm

### 3.3 精度对比实验

文献[7]指出棋盘格角点的提取精度直接影响摄像机标定的精度。因此,为了检验本文角点检测的精度,分别采用 Matlab Toolbox<sup>[15]</sup>、文献[11]算法和本文算法对拍摄的 10 幅棋盘格图像(如图 8 所示)进行角点提取。将提取的角点使用文献[6]的摄像机标定方法进行摄像机标定。3 种角点检测的方法得到的相机内外参数如表 2 所示,其中  $x$ 、 $y$  分别为图像的列方向和行方向, $f_x$ 、 $f_y$  为  $x$ 、 $y$  方向的等效焦距, $u_0$ 、 $v_0$  为图像中心, $k_1$ 、 $k_2$  为径向畸变系数, $s$  为 skew 系数, $\sigma$  为重投影误差的均方差。10 幅图像的重投影误差如图 9 所示, $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  分别为  $x$  和  $y$  方向的重投影误差。

从表 2 的实验结果可以看出,本文方法与 Matlab Toolbox<sup>[15]</sup>、文献[11]算法提取的角点用于摄像机标定时,得到的相机内参数接近。从表 2 和图 9 可以看出,经过角点精细化后重投影误差从 0.2412 pixel 降至 0.0708 pixel,角点精度得到显著提高。从表 2 可知,本文通过加入高斯模板进行迭代的方式,获得的角点重投影误差的均方差略低于 Matlab Toolbox<sup>[15]</sup> 和文献[11]的。另外,从图 9 可以直观看出本文方法得到的重投影误差更小,主要集中在 0.1 pixel 范围内,在  $x$  和  $y$  方向上的最大重投影误差不超过 0.25 pixel。综上所述,本文方法检测的棋盘格角点具有较高的精度,能满足视觉领域中摄像机标定的要求。

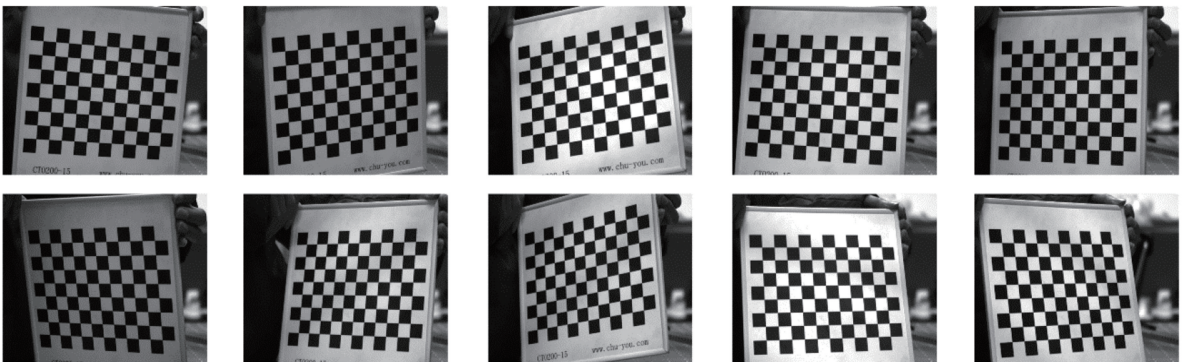


图 8 不同拍摄角度的 10 幅棋盘格图像

Fig. 8 10 checkerboard images with different shooting angles

## 4 结 论

提出一种基于棋盘格角点灰度分布特征的角点检测算法。该方法利用棋盘格角点灰度分布特性实现候选角点的识别;通过加入高斯模板迭代估计角

点位置,实现了角点坐标的亚像素提取,保证了角点检测的精度;最后通过量化角点灰度分布特性和邻近点合并获得最终的角点。实验证明了本方法的稳健性,特别是对于不同光照条件和大畸变情况下采集的图像,均可实现稳定检测。与其他算法相比,

表2 摄像机标定结果

Table 2 Results of camera calibration

Algorithm	$f_x$	$f_y$	$s / 10^{-2}$	$u_0/\text{pixel}$	$v_0/\text{pixel}$	$k_1$	$k_2$	$\sigma / \text{pixel}$
Matlab Toolbox <sup>[15]</sup>	2178.8	2179	6.82	318.87	241.87	-0.1848	2.2742	0.0968
Algorithm in Ref.[11]	2176.2	2178.2	0.50	313.10	244.60	-0.1562	1.3429	0.0743
Without refinement	2183.6	2183.2	0.90	313.80	246.90	-0.1123	-1.1400	0.2412
With refinement	2177.1	2176.9	6	314.10	246	-0.1497	1.0348	0.0708

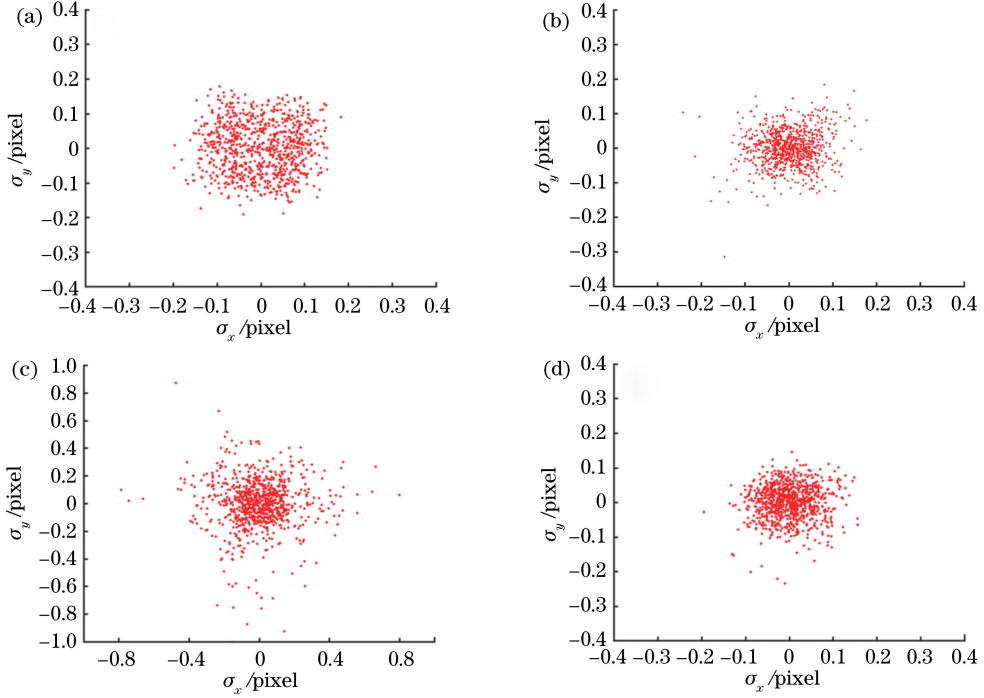


图9 重投影误差。(a) Matlab Toolbox<sup>[15]</sup>；(b)文献[11]算法；(c)本文算法(角点未精细化)；  
(d)本文算法(角点精细化)

Fig. 9 Re-projection error. (a) Matlab Toolbox<sup>[15]</sup>；(b) algorithm in Ref. [11]；(c) proposed algorithm (without refinement)；(d) proposed algorithm (with refinement)

本算法能获得更高的角点精度和更好的标定结果。

## 参 考 文 献

- [1] Li S Q, Xie X P, Zhuang Y J. Research on the calibration technology of an underwater camera based on equivalent focal length[J]. Measurement, 2018, 122: 275-283.
- [2] Cui Z G, Li A H, Feng G Y, et al. Cooperative object tracking using dual-pan-tilt-zoom cameras based on planar ground assumption [J]. IET Computer Vision, 2015, 9(1): 149-161.
- [3] Liu Z, Wu Q, Wu S N, et al. Flexible and accurate camera calibration using grid spherical images [J]. Optics Express, 2017, 25(13): 15269-15285.
- [4] Sun C, Liu H B, Chen S Y, et al. A general imaging model based method for Scheimpflug camera calibration[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815009.
- [5] Yu J, Chen C, Gao N, et al. Camera calibration based on phase target [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 111203.
- [6] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [7] Lavest J M, Viala M, Dhome M. Do we really need an accurate calibration pattern to achieve a reliable camera calibration? [M] // Burkhardt H, Neumann B. Computer vision-ECCV' 98. Lecture notes in

- computer science. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998, 1406: 158-174.
- [8] Wang Z S, Wu W, Xu X H, et al. Recognition and location of the internal corners of planar checkerboard calibration pattern image[J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 185(2): 894-906.
- [9] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector [C] // Proceedings of the Alvey Vision Conference 1988, September 1988, Manchester, UK. UK: AVC, 1988: 147-152.
- [10] Chu J, Guolu A Z, Zhao G H. Chessboard corner detection based on circular template[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(1): 189-196.  
储珺, 郭卢安政, 赵贵花. 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.
- [11] Geiger A, Moosmann F, Car Ö, et al. Automatic camera and range sensor calibration using a single shot[C]// 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 14-18, 2012, St Paul, MN, USA. New York: IEEE, 2012: 3936-3943.
- [12] Shen X J, Cheng M J, Xiao J J, et al. Corner detection for fisheye checkerboard images based on iterative correction [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 091501.  
申夏晶, 程梦娇, 肖江剑, 等. 基于迭代校正的鱼眼棋盘格图像角点检测[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 091501.
- [13] Liu Y, Liu S P, Cao Y, et al. Automatic chessboard corner detection method[J]. IET Image Processing, 2016, 10(1): 16-23.
- [14] Wang M, Liu T, Yun W G. Corner detection algorithm based on local weighted entropy and adaptive threshold [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 051003.  
王民, 刘涛, 贲卫国. 基于图像局部加权熵和自适应阈值的角点检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 051003.
- [15] Bouguet J Y. Camera calibration toolbox for Matlab [EB/OL]. (2015-10-14) [2019-05-13]. [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc).
- [16] Rufli M, Scaramuzza D, Siegwart R. Automatic detection of checkerboards on blurred and distorted images [C] // 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, September 22-26, 2008, Nice, France. New York: IEEE, 2008: 3121-3126.
- [17] Rosten E, Drummond T. Fusing points and lines for high performance tracking [C] // ICCV 2005, December 11-18, 2005, Santiago, Chile. New York: IEEE, 2005: 1508-1515.
- [18] Keenan R. Udacity/CarND-camera-calibration [EB/OL]. (2016-11-18) [2019-05-13]. [https://github.com/udacity/CarND-Camera-Calibration/tree/master/calibration\\_wide](https://github.com/udacity/CarND-Camera-Calibration/tree/master/calibration_wide).