

文章编号 1004-924X(2015)12-3480-10

基于直线检测的棋盘格角点自动提取

李 海, 张宪民*, 陈 忠

(华南理工大学 广东省精密装备与制造技术实验室, 广东 广州 510640)

摘要:针对现有棋盘格角点自动提取算法鲁棒性不足的缺点,提出了使用直线检测算法(LSD)来进行角点的自动提取。首先,使用 LSD 算法对标定图像进行处理,得出包含棋盘格子边缘的所有直线,并分别对所得直线的长度和角度进行伪排序以去除伪格子边缘。然后,对剩余直线的边缘端点进行近邻合并,得到角点的初始坐标并进行亚像素优化。最后,使用能量法对角点进行棋盘格结构复原与排序。实验结果显示:该方法可以正确提取含有阴影和噪声的玻璃材质标定板图像中的角点。与改进的 Harris 方法的角点坐标提取精度对比试验得到其最大偏差小于 0.2 pixel,平均偏差小于 0.15 pixel,表明该方法具有较高的鲁棒性且定位精度与改进的 Harris 方法相当,可用于工程实际中环境光源变化较大的场合。

关键词:直线检测;棋盘格;角点检测;鲁棒性;自动提取

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152312.3480

Automatic corner detection of checkerboard based on LSD

LI Hai, ZHANG Xian-min*, CHEN Zhong

(Guang Dong Province Key Laboratory of Precision Equipments and Manufacturing Technology,
South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangxm@scut.edu.cn

Abstract: To improve the robustness of current automatic corner detection algorithms, a novel algorithm based on Line Segment Detection (LSD) was proposed to extract the corners automatically. First, the LSD algorithm was used to process a checkerboard image to obtain all lines including checker edges. Then, the pseudo permutation of lengths and angles for obtained lines were done respectively to filter fake edges. Furthermore, the neighboring endpoints of the remaining lines were combined, and the coordinates of the corners were optimized with the sub-pixel algorithm. Finally, an energy method was utilized to recover the chessboard's structure and the corner points were ranked at the same time. Experimental results indicate that method proposed here automatically detects corners in images with noises and shadows. The maximum locating error and average error for the corner coordinate extraction are less than 0.2 pixels and 0.15 pixels respectively as compared with those of modified Harris method. This method has a higher robustness and its locating accuracy is almost as the modified Harris method, which shows it is suitable for a real factory environment.

Key words: Line Segment Detection (LSD); checkerboard; corner detection; robustness; automatic extraction

收稿日期:2015-08-18;修订日期:2015-10-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. U1501247);广东省科技攻关项目(No. 2014B090917001);广州市科技计划项目(No. 2015090330001)

1 引 言

相机标定是计算机视觉工作的基础和关键,已有大量学者对其展开了深入研究,现今最流行的方法为张正友提出的使用平面棋盘格进行标定的方法^[1]。平面标定物具有制作方便,操作简单等特点,在精度要求不高的场合可以通过打印的方式获取;而在精密测量领域,如光纤对接、DIC 光测力学、显微测量等领域往往使用陶瓷材质或者玻璃材质的标定物来提高测量精度。其中陶瓷标定板具有精度高、不透光的优点,但是其价格较贵。玻璃标定板的优点是价格低、精度高,但是在成像过程中易受外部光源的影响,如采用上置光源拍摄时会发生反光成像、光照过强或曝光过渡,从而使角点分离,还有光源与标定板不垂直时产生阴影等现象,这些现象都会造成现有常用角点自动检测方法失效。

角点提取是一种应用广泛的二维低层次特征,已有很多学者对其进行研究,且成果显著,如 Harris、SUSAN、尺度不变特征变换(SIFT)^[2-4]等。棋盘格角点的自动提方法可分为以下三种:第一种是以 Harris 或者 SUSAN 角点自动检测算法为基础的改进方法,代表方法如文献^[5-8],这类方法操作方便,但是角点误检率较高。第二种为针对棋盘格角点灰度特征分布或者几何特征,设计特殊检测模版对其进行识别或提取,代表方法如文献^[9-11],这些方法对特定棋盘格角点检测效果较好,但一般都需要较好的成像质量,通用性较差。第三种为综合各种特征对角点进行自动检测的工具箱,主要代表有 OpenCV^[12]和 Geiger 等 2012 年开发的标定工具箱^[13],这些方法适用性较好,但运算复杂,难以掌握原理。

由上述分析可知,现有角点检测算法都有其局限性,为了增加角点检测算法的鲁棒性,同时保证效率和通用性,本文提出基于 LSD(Line Segment Detector)直线检测方法^[14]对角点进行自动检测。文中第一部分介绍了研究背景;第二部分对本文方法进行了整体介绍;第三部分对算法关键步骤进行了详细阐述;第四部分为实验分析;第五部分为结论。

2 基于 LSD 的角点检测方法

2.1 LSD 直线检测算法

LSD 直线检测方法由 RG von Gioi 等于 2010 年提出,其可用于对图像中直线的快速提取。

作为一种直线检测算法,LSD 方法和 Hough^[15]直线算法相比主要有以下三个优点:一是可以在较少的时间内得出亚像素级的结果;二是具有较强的鲁棒性,可用于含有纹理或者含有大量噪声图像的直线检测;三是在使用时无需调节参数,更适用于自动检测^[14]。传统直线检测应用中 LSD 相对于 Hough 变换主要有以下缺点:LSD 算法在运行过程中设置图像中每一个点最多只能属于一条直线,所以在进行相交直线检测时会使相交直线截断为 4 段,如图 1 所示。本文正是利用这个“缺点”来实现角点自动提取。

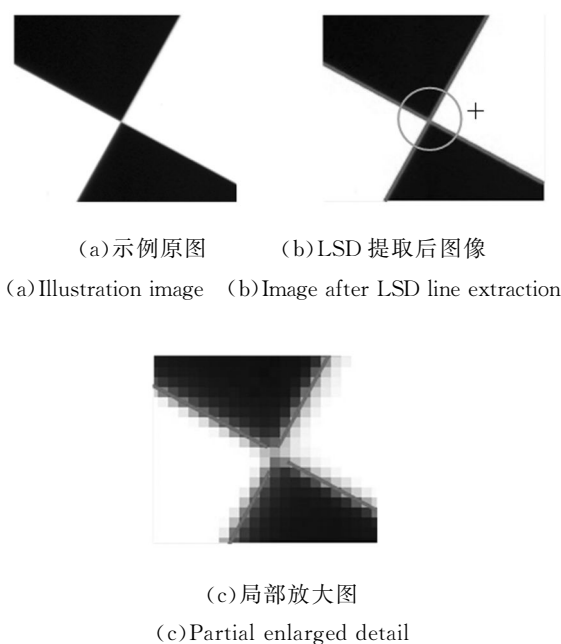


图 1 LSD 交叉直线检测效果图

Fig. 1 Detection graph of cross-straight lines with LSD

图像中的直线属于边缘,所以 LSD 直线检测算法也是依据图像梯度实现的,其算法流程如下:

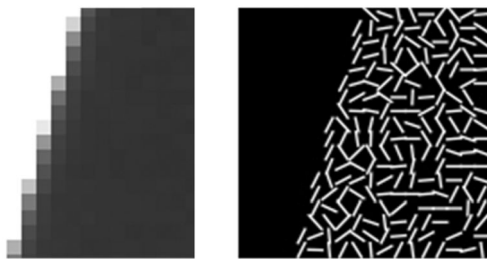
(1) 对分辨率较大的图像使用高斯尺度函数进行降采样,主要为了降低直线的不连续性。

(2) 求取图像的梯度大小和梯度方向图, 并将梯度方向图旋转 90° , 最终获得局部方向图, 如图 2(b) 所示。

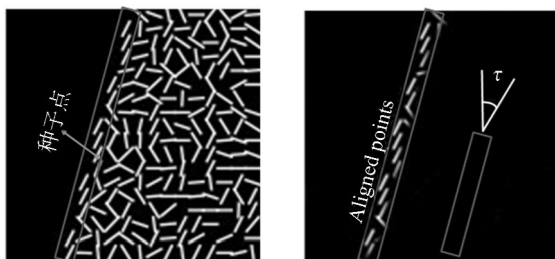
(3) 对梯度按大小进行伪排序。即将最小梯度值和最大梯度值之间均匀划分为若干区间, 每个区间对应一个数值, 然后按照每个点梯度大小将其放入对应区间。这种方法的优点是可以在线性时间内完成排序。排序结束后将所有点初始状态设置为未使用, 然后将较小梯度值对应点设置为已使用(相当于平滑处理)。

(4) 从状态标记为未使用的点中选出梯度值最大的点作为种子点, 在其周围搜索与其梯度方向在一定范围内的点, 同时生成包含这些点的矩形, 如图 2(c) 所示; 接着计算该矩形中同性点的密度是否满足条件, 若不满足, 则将该矩形截断为多个, 直至同性点的密度满足条件; 最后通过设定量化函数指标对这些点做进一步的筛选, 满足条件后输出该矩形;

(5) 循环第四步直至所有点状态为已使用。



(a) 灰度图 (a) Grey image (b) 局部方向图 (b) Partial orientation image



(c) 种子搜索增长 (c) Seed search growth (d) 预选直线外接四边形 (d) Enclosing rectangle of line support region

图 2 LSD 算法流程图

Fig. 2 Flowchart for LSD algorithm

2.2 角点提取算法

从灰度变化角度来说, 角点可定义为周围灰

度变化最剧烈的位置; 从几何角度来说, 角点可定义为两条直线的交点。由于边缘特征相对于角点灰度特征具有更好的抗噪性能, 因此可使用第二种定义的方法来提升检测算法的鲁棒性。

由于 LSD 算法在检测相交直线时, 直线在交点处被截断, 而截断处交点即为角点所在位置, 所以可利用该特性获取角点坐标。

本文所述角点提取算法流程如图 3 所示, 主要包括 LSD 直线检测、直线长度和角度伪排序与分析、伪直线去除、近邻直线端点合并与坐标优化、棋盘格结构复原与角点排序这几个部分。下一部分将会对这些关键步骤进行具体阐述。

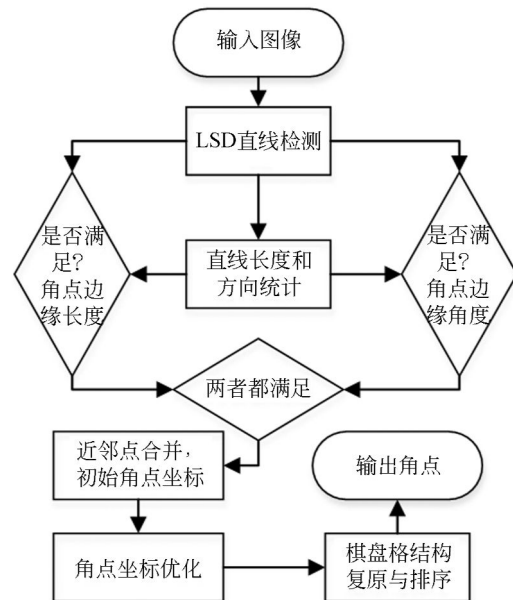


图 3 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flow chart

3 角点自动检测的关键步骤

3.1 直线长度和角度的伪排序

通过对棋盘格标定板图像进行 LSD 直线检测, 便可得到图中所有直线, 包括棋盘格边缘直线、背景直线和其他噪声直线, 如图 4(a) 所示。为了便于后续去除伪边缘直线, 对所有检测出的直线分别进行长度和角度的伪排序。

设图像经过 LSD 直线检测后得到 I 个直线, 对应的长度与角度分别为 $L[i]$ 、 $A[i]$, 其中 $i=1, 2, \dots, I$ 。以 $L[i]$ 为例, 其伪排序算法伪码如下:

算法 1: 直线长度伪排序

输入:输入数据数组 L 、所分区间数 $nBins$ 、总区间边界 $BinEdge$ 。

输出:每个区间内直线数量 $nLines[j]$ 、每个区间内直线索引号数组 $nIndex[j]$. $j=1,2,\dots,nBins$ 。

```

1 Bins[j] ← BinEdge 分为 nBins 个区间后第 j 个边界
2 for each L[i] do
3   foreach Bins[j] do
4     if L[i] ∈ Bins[j] Then
5       nLines[j]++;
6       Add i to nIndex[j];
7   end
8 end
9 end

```

对直线角度的伪排序算法与直线长度雷同,不再赘述。将伪排序后的数据 $nLines[j]$ 绘成统计图,可得图 4(b)、4(c) 所示结果。

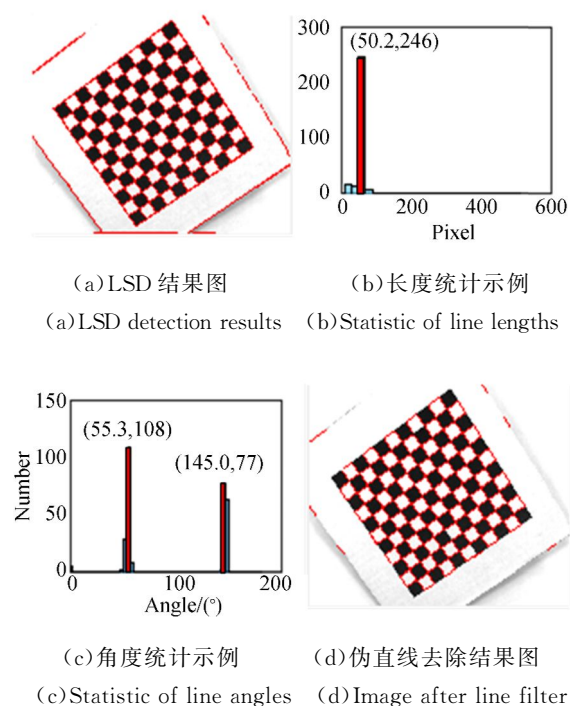


图 4 直线长度和角度统计示意图

Fig. 4 Statistic examples of length and angle for lines

3.2 伪直线去除

被检测出直线中往往包含大量棋盘格子边缘之外的直线,为了保证能够识别后续真实角点以及正确复原棋盘格结构,必须对已检测出的直线

进行过滤,目的是保留棋盘格子边缘的同时去除尽量多的伪直线边缘。

由于棋盘格具有相同的物理尺寸,经过提取后格子边缘仍具有相近的图像尺寸,因此经过长度伪排序后应有一个极值,如图 4(b) 所示;由于棋盘格由两簇平行线构成,所以提取后截断的边缘角度应分布在两个值附近,且这两个值应该相差 90° 左右,如图 4(c) (彩图见期刊电子版) 中红色柱形所示。对 3.1 部分所述伪排序的统计结果进行极值检测,便可迅速获得边缘线段长度分布区间与角度分布区间索引号,分别设为 KL 、 $KA1$ 、 $KA2$ 。

根据格子边缘长度所在区间的索引号 KL , 可得到对应区间包含直线的索引值向量 $nIndexL[KL]$; 同理可得格子边缘角度极值对应区间包含的直线索引向量 $nIndexA[KA1]$ 、 $nIndexA[KA2]$, 将这两个向量做并运算得到向量 $nIndexL[KA]$ 。选取向量 $nIndexL[KL]$ 与向量 $nIndexL[KA]$ 中的相同元素并保留, 这些元素代表满足条件的格子边缘直线索引值。经过上述步骤, 可滤掉绝大部分伪直线, 格子边缘直线则被保留, 如图 4(d) 所示。虽然还有少数伪直线不能够被去除, 但由于数量较少, 且远离格子区域, 因此这些伪直线产生的伪角点可在后续棋盘格结构复原步骤被去除。

由以上步骤可知, 去除伪直线是否成功取决于上一步伪排序的结果。为了在伪排序过程中获取正确的极值区间, 需要注意以下几点:

第一, 合理设置直线长度伪排序算法中的控制参数 $nBins$ 与 $BinEdge$ 。对于参数 $BinEdge$, 若要使格子能够被辨识, 其一般至少应大于 10 pixel, 而经过 LSD 检测后很多噪声直线长度小于 10 pixel, 因此其默认值取为 $[10, \text{Min}\{\text{Max}(L), \text{Width}\}]$, 其中 $\text{Max}(L)$ 表示检测出直线中长度最大值, Width 表示图片纵横分辨率中的较小值; 对于参数 $nBins$, 其值过大或过小通用性都会受到影响, 多次实验发现其值取 25 时, 可获得较好效果。

第二, 由于标定板倾斜对边缘直线角度的影响较小, 且直线角度取值在 $0 \sim 180^\circ$, 因此伪排序中控制参数 $nBins$ 与 $BinEdge$ 默认值可分别取为 60, $[0, 180]$, 其中 $BinEdge$ 的单位为度。

第三, 在获取极值区间时, 为了防止区间分割

正好处于真实极值附近,取值时需适当放大对应极值区间,默认分别向左右边缘拓展 0.5 倍宽度。

第四,当采用默认参数无法去除图像中伪直线时,可以手动输入控制参数 nBins 与 BinEdge。

实验发现上述默认取值方法可以在绝大多数标定图像中实现角点正常提取,下文除特别声明外,所有结果都为使用默认值所得。

3.3 角点初始坐标获取

上述步骤结束后,经 LSD 直线检测后所得图像中的大部分背景直线与噪声直线等非棋盘格子边缘已经去除。接下来利用相交直线经过 LSD 检测后在交点处被分割为 4 段直线的特性进行角点初定位。

设经过伪直线去除之后剩余直线的所有端点坐标为 (x, y) 。给每个点设置标记值,用以代表该点的使用状态,初值为零,表示未处理。具体过程如下:首先从使用状态为零的点中找出任意一点记为 (x_i, y_j) ;然后找出该点附近的所有点,并计算这些点到 (x_i, y_j) 的距离,将距离小于一定值的点的标志值改为 j ,接着进行下一循环,其中 j 表示循环次数,直至所有点的使用状态都非零;最后将使用状态标记值相同的点进行合并,将多点的中心作为角点初始坐标。

3.4 角点亚像素优化

文献[16]指出角点定位精度对后续的相机标定精度具有重要影响,所以对角点进行亚像素精度优化很有必要。虽然通过上一步已得到角点的亚像素坐标,但由于相交截断处的具体位置具有一定的任意性,尤其是当图像质量较差时,该位置更难确定,因此需对角点坐标进行优化。

常用的棋盘格亚像素方法有灰度重心法、Frostner 插值法和灰度梯度法等^[17],本文选用灰度梯度法进行角点正像素优化,其基本原理如图 5 所示。设角点的真实位置为 C 点,可将 C 点附近的点分为两类,一类为边缘上的点,如图中 P ,另一类为非边缘点,如图中 Q 。对于理想角点来说, P 点的梯度向量与边缘垂直,而 Q 点处的梯度值为零,所以角点附近区域的所有点都有以下特性:

$$\nabla \vec{C}_i \cdot \vec{CC}_i = 0, \quad (1)$$

其中: C_i 表示以 C 为中心的一块区域中任意一点, $\nabla \vec{C}_i$ 表示点处的梯度向量。该问题可简化为如下优化问题:

$$c = \min \sum_{c_i \in N(c)} (\mathbf{g}_{c_i}^T (c_i - c))^2, \quad (2)$$

该优化问题封闭形式解如下:

$$c = \left(\sum_{c_i \in N} \mathbf{g}_{c_i} \mathbf{g}_{c_i}^T \right)^{-1} \cdot \sum_{c_i \in N} (\mathbf{g}_{c_i} \mathbf{g}_{c_i}^T) c_i, \quad (3)$$

上述两式中小写字母 c, c_i 分别表示点 C 和点 C_i 的坐标, \mathbf{g}_{c_i} 表示点 C_i 处的梯度向量, N 表示点 c 附近区域。

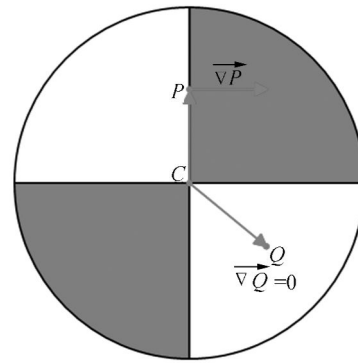


图 5 角点梯度图

Fig. 5 Gradient image of a corner

3.5 棋盘格结构复原

经过上述步骤,检测出的角点已包含所有棋盘格角点,为了能够将检测出的角点用于后续标定,必须要对检测出的角点进行自动排序,以确定角点图像坐标与实际物理坐标之间的关系。

当前角点的自动排序方法主要有凸包法^[18]、直线拟合排序法^[19]、网格法^[20]、能量法^[13]等几种。其中前面 3 种方法需要先验数据或者手动协助才能完成,而文献[13]中的能量法则可以自动实现,且可以搜索出图像中满足条件的最大角点所在的长方形区域。

实际结果参见实验部分图 7 所示。能量法基本原理如下:

(1) 定义棋盘格结构能量函数

$$E(X, Y) = E_{\text{corners}}(Y) + E_{\text{struct}}(X, Y), \quad (4)$$

$$E_{\text{struct}}(x, y) = |E_{\text{corners}}(y)| \cdot \max_{(i, j, k) \in \Gamma} \frac{\|c_i + c_k - 2c_j\|_2}{\|c_i - c_k\|_2}, \quad (5)$$

其中: $X = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 代表所有已检测到的角点的坐标; $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 代表已检测角点对应的编号; $E_{\text{corners}}(Y)$ 表示当前棋盘格结构中已确认角点数量的负数; Γ 表示当前复原结构中所有点的集合; $E_{\text{struct}}(x, y)$ 表示一种量化评价指标,即使用第 k 个点的两个相邻点 i, j 来评估第 k 点是

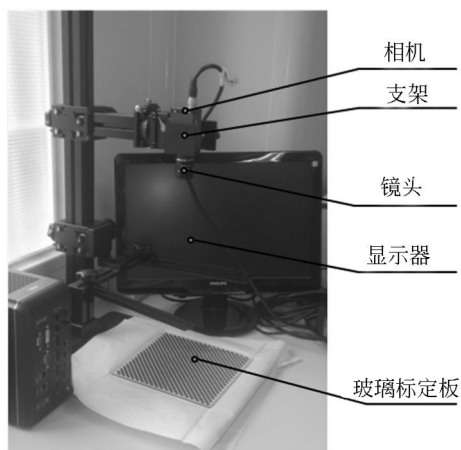


图 6 实验设备
Fig. 6 Experiment setup

否属于棋盘格内部点;

(2) 选取已知角点中任意一点作为种子点,然后朝着能量函数变化最大的方向进行膨胀,直至不能满足条件,标记已使用的种子点;

(3) 选择未使用的种子点进行下一轮结构复原;

(4) 找出使能量函数值最小的那轮膨胀,将该过程所复原的结构作为棋盘格的复原结构,并输出对应角点。

在实际运行中,可以在第二步膨胀过程中使用优化算法加快能量方法结构复原的运行速度,限于篇幅,文中不再进行具体描述。

4 实验分析

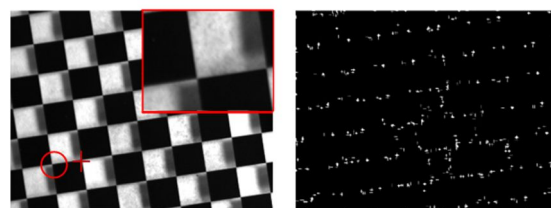
文中所用实验设备如图 6 所示,其中相机为德国 AVT 公司 MANTA G-201,其分辨率为 1 624 pixel×1 234 pixel;标定板为东莞宏诚光学公司的 HBM-03-5Q,外形尺寸为 200 mm×200 mm×3 mm,单格长度为 5 mm;所用电脑处理器为酷睿 i-5,主频为 3.2 GHz;软件平台为 Mat-LAB。

4.1 流程展示实验

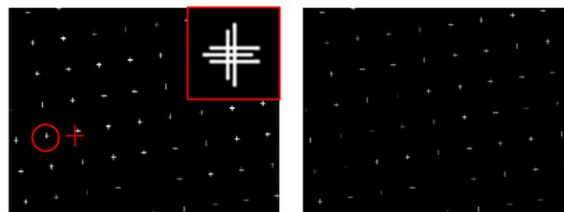
为了更加直观地展示文中方法流程,选择一幅标定板图像进行角点提取,中间过程结果如图 7 所示。其中图 7(a)为在自然环境下拍摄的玻璃材质标定板,观察可知,此图像中含有大量阴影与噪声;图(b)~(f)分别为各个关键步骤的结果图。

分析各步骤结果可知:经过 LSD 检测之后,

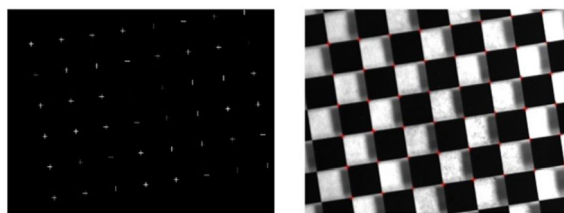
包含棋盘格边缘在内的大量直线被检测出来,如图 7(b)所示;经过伪边缘去除之后,绝大部分伪格子边缘被去除,如图 7(c)所示;经过近邻端点合并与坐标优化之后,可以得到棋盘格角点的坐标,如图 7(d)所示;经过棋盘格结构复原之后,算法成功地在所有角点之中复原出了最大内接矩形,如图 7(e)所示。该实验中所用图像含有较多阴影与噪声,这也说明了文中方法的具有较高的鲁棒性。



(a)原图像 (b)LSD 检测后边缘端点
(a)Original image (b)Corner image after LSD detection



(c)边缘长度和角度
过滤后角点图 (d)角点合并与坐标
优化后角点图
(c)Coner image after filter (d)Corner image after
combining and optimizing



(e)棋盘格结构复原 (f)检测后图像
(e)Structure recovery of
chessboard (f)Image after automatic
detection

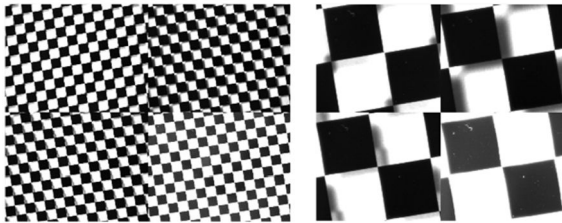
图 7 角点自动检测流程

Fig. 7 Procedures of automatic corner detection

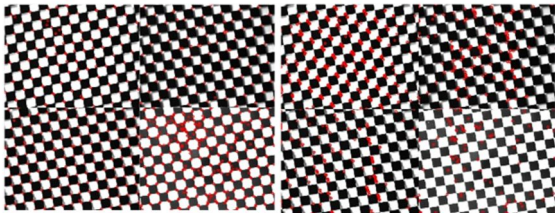
4.2 鲁棒性实验

为了进一步检验文中所述方法的鲁棒性与实用性,在不同光照条件下拍摄一组玻璃标定板图像。如图 8(a)所示,其中编号 1、2、3 为相同视场

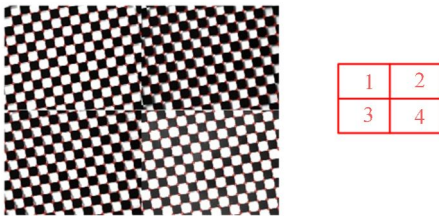
但不同光源入射角度时拍摄的玻璃标定板图像,编号 4 为增加相机曝光时间得到的角点分离图像。对上述图像分别使用 Harris 角点提取、SUSAN 角点提取、OpenCV 标定工具箱和本文方法进行提取实验,结果如图 8(b)~(e)所示。



(a)测试源图像 (b)局部放大图
(a)Test images (b)Partial enlarged detail



(c)Harris 角点检测结果 (d)SUSAN 角点检测
(c)Results of Harris method (d)Results of SUSAN method



(e)文中方法检测结果
(e)Results of proposed method

图 8 角点检测对比试验

Fig. 8 Contrast test of corner detection

图中不包含 OpenCV 工具箱的结果,因为本文实验中其无法输出。分析原因如下:OpenCV 工具箱中使用的方法为文献[11]方法,而该方法第一步使用最佳阈值进行分割。由于文中使用图像含有阴影,经最佳阈值分割之后棋盘格四边形结构遭到破坏,故无法得到结果。统计其他 3 种角点检测算法所得结果如表 1。实验所用标定板图像的真实角点数量为 160 个。由表 1 可知,SUSAN 方法受图像中阴影的影响已经无法正常使,正确率几乎为零。Harris 方法受阴影与孤立噪声的影响较大,漏检率高且稳定性很差,尤其

在检测角点分离图像时,无法找出正确交叉角点。文中所述方法可以正确检测出图像中绝大部分角点;编号为 1、2 的图像经处理后虽然少了 6 个角点,但观察发现这些角点都属于图像中边角区域,对后续棋盘格结构复原没有影响。

表 1 3 种方法检测角点个数

Tab. 1 Number of detected corners by different methods

图像编号	Harris	SUSAN	本文方法
1	135	1 832	154
2	93	270	154
3	162	451	160
4	413	92	160

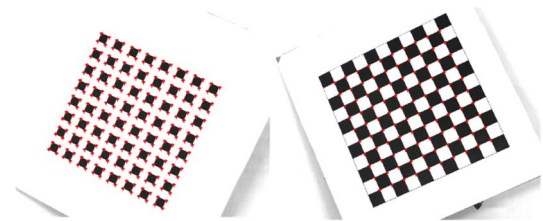
(注:4 幅图像棋盘格角点真实总数均为 160 个)

综上可知,本文方法在角点自动检测过程中能够适应环境光变化的情形,具有更高的鲁棒性。

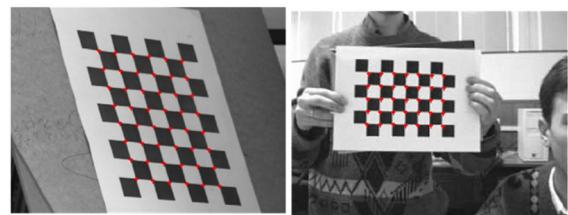
4.3 通用性实验

为了检测本文方法的通用性,从网络上选择一组不同类型的标定板图像进行检测与排序实验,结果如图 9 所示。

实验表明,该方法能够实现无复杂背景棋盘格角点的正确提取(如图 9(a)~(b));对于含有部分背景的图像也能进行正确检测(如图 9(c)~(e));但对于背景特别复杂且棋盘格小格子数量较少时会出现不能正常识别或者错误复原的情况,如图 9(f)。通过检测图 9(f)算法执行过程发



(a)类型一 (b)类型二
(a)Type one (b)Type two



(c)类型三 (d)类型四
(c)Type three (d)Type four



(e)类型五 (f)类型六
(e)Type five (f)Type six

图 9 通用性实验

Fig. 9 Universal experiment

现:由于背景复杂,LSD 算法检测出来的长度相似的伪直线数量偏多,致使伪直线去除过程无法正常进行,格子边缘直线被去除,因此失败。

4.4 伪直线去除对比实验

为了验证伪直线去除过程在整个算法中的作用以及伪排序过程中参数 nBins 与 BinEdge 的作用,选择在上一实验中失败的图像图 9(f)进行进一步分析。本实验中通过手动设置参数 nBins 与 BinEdge 的值实现对该图像棋盘格子边缘的正确提取。

图 10(a)为图 9(f)经过 LSD 直线检测后的结果,由图可知其中包含大量伪边缘;图 10(b)所示为经过长度伪排序后的结果,由图可知极值点为(10,217),即 LSD 检测出的长度为 10 pixel 左右的直线占了很大部分;图 10(c)所示为经过伪直线去除后的结果,由图可知该步骤未能正确去除伪直线,因此造成图 9(f)中无法得出棋盘格角点。

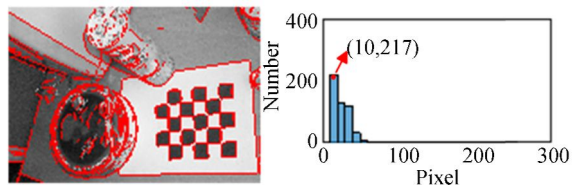
本例中通过检查发现棋盘格边缘直线长度集中在 30 pixel 附近,因此手动设置参数 BinEdge 的左端值为 28,其他参数不变,可得长度统计图 10(d),发现此时极值点为(30,116);经过伪直线去除后可得图 10(e),此时大部分伪直线已被去除且真实边缘得以保留;经过后续步骤处理可得角点检测结果如图 10(f)所示。

该试验中不用改变角度伪排序参数,这是因为伪边缘直线有任意性,因此没有对角度极值产生影响。本实验验证了伪排序过程中控制参数设置的重要性,同时也从侧面证明了本算法具有很好的通用性。

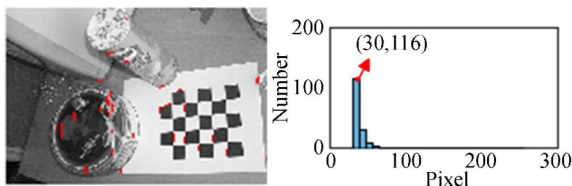
4.5 角点检测对比实验

4.5.1 精度对比实验

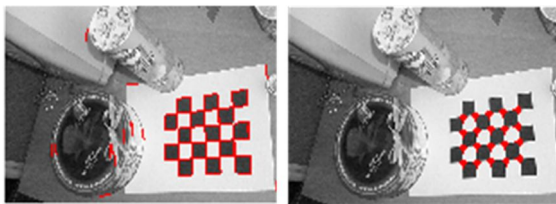
为了检测本文角点提取方法的精度,对同一



(a)LSD 检测结果图 (b)长度统计图
(a)Image of LSD detection (b)Statistic of line length



(c)伪直线去除结果图 (d)新长度统计图
(c)Image after pseudeline filter (d)New statistic of line length

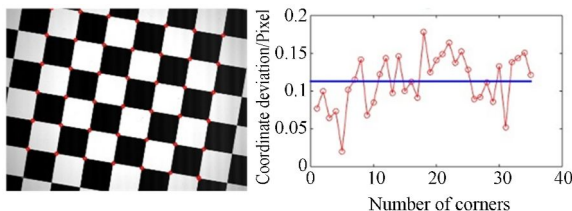


(e)伪直线去除结果图 (f)角点检测图
(e)Image after pseudeline filter (f)Corner detection image

图 10 伪直线过滤实验

Fig. 10 Filter experiment of pseudelines

幅照片分别使用改进的 Harris 方法和本文方法进行角点提取,接着进行坐标对比,之后计算两种方法所得结果的距离差值。首先从图像中任选一幅做单个实验,所得结果为图 11。从图 11(b)点误差分布图中可知,这幅图像中角点最大位置差为 0.178 pixel,平均偏差为 0.113 pixel。



(a)角点检测图 (b)对比坐标偏差
(a)Corner detection image (b)Comparison of coordinate deviation

图 11 精度对比图

Fig. 11 Comparison image of location accuracy

为了增加可信度,接着选出 7 幅图像进行同样操作,并记录每组中角点误差的最大值与平均值,实验结果如表 2。从表 2 可以发现,两种方法的对比最大偏差总是小于 0.2 pixel,平均偏差小于 0.15 pixel,说明文中算法定位能力与改进的 Harris 方法相近,可满足实际应用要求。

表 2 图像中最大坐标偏差和平均偏差

Tab. 2 Maximum and average deviations in every image (pixel)

图像编号	最大偏差	平均偏差
1	0.129 5	0.073 1
2	0.101 2	0.045 4
3	0.093 4	0.049 7
4	0.177 1	0.091 3
5	0.178 6	0.112 9
6	0.145 6	0.083 4
7	0.181 1	0.089 9

4.5.2 运行速度对比实验

本实验主要用于检测本文算法的运行效率,并与 Harris 算法进行对比。选择 5 幅图像进行实验。分辨率均为 1 624 pixel×1 234 pixel,但是图像中棋盘格子数量逐渐增加,经处理可得结果如表 3。

由表 3 可发现,对于相同分辨率的图像,Harris 算法的运算时间基本保持稳定,而本文算法的运算时间则随着角点数量的增加不断增加。分析原因如下:本文算法在棋盘格结构复原部分,需要多次遍历已检测角点来优化棋盘格结构,因

此算法运行时间与棋盘格角点数量正相关,且该过程消耗时间较多,因此相同分辨率图像中含有不同数量角点时运行时间变动较大。从整体上看文中算法运行时间与 Harris 算法处于相同数量级,属于可接受范围。

表 3 处理时间对比表

Tab. 3 Comparison of running time

图像编号	格子数量	Harris/s	本文方法/s
1	4×8	16.15	2.06
2	6×7	16.27	2.89
3	8×10	16.03	4.56
4	9×14	16.45	6.648
5	11×17	16.21	14.83

5 结 论

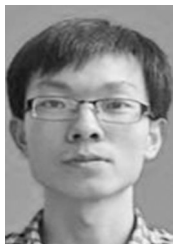
针对现有棋盘格角点自动提取方法不够鲁棒的缺点,本文提出采用基于 LSD 直线检测的方法来提取角点坐标,并通过能量法实现棋盘格结构的复原与角点自动排序。其后,进行了一系列实验,实验结果证明:(1)本文方法的鲁棒性确实得到了提升,可以实现复杂环境下标定板图像中角点的正确提取;(2)基于能量法的棋盘格结构复原方法可以出色地完成棋盘格内角点的自动排序;(3)定位精度对比与通用性实验说明了算法的定位效果与改进的 Harris 方法相近且具有较好的通用性,可满足实际应用。

参考文献:

- [1] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [2] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector [C]. *Proceeding of the 4th Alvey Vision Conference*, 1988: 147-151.
- [3] SMITH S M, BRADY J M. SUSAN-A new approach to low level image processing [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 23(1): 45-78.
- [4] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant key points [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [5] 高健. 基于 Harris 角点和高斯差分的特征点提取算法[J]. *模式识别与人工智能*, 2008(2): 171-176. GAO J. A feature detection method based on Harris corner and difference of Gaussian [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2008(2): 171-176. (In Chinese)
- [6] 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): 2541-2545. YANG X F, HUANG Y M, LI Y, et al.. Sub-pixel corner detection algorithm of chessboard image based on improved SUSAN operator [J]. *China Mechanical Engineering*, 2010(21): 2541-2545. (In Chinese)

- [7] 王威,唐一平,任娟莉,等. 一种改进的 Harris 角点提取算法[J]. 光学精密工程, 2008,16(10):1995-2001.
WANG W, TANG Y P, REN J L, et al.. An improved algorithm for Harris corner detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(10):1995-2001. (in Chinese)
- [8] 刘博超,赵建,孙强. 基于边缘改进的 Harris 角点检测方法[J]. 液晶与显示, 2013,28(6):939-942.
LIU B CH, ZHAO J, SUN Q. Improved Harris corner detection method based on edge [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals & Displays*, 2013, 28(6):939-942. (in Chinese)
- [9] 储璐,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.
CHU J, GUOLU AN ZH, ZHAO G H. Chessboard corner detection based on circular template [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1):189-196. (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 of checkerboard corners based on grey-level difference [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6):1360-1366 (in Chinese)
- [11] ZHANG Y J. Fast approach to checkerboard corner detection for calibration [J]. *Optical Engineering*, 2014,53(11):112203.
- [12] RUFLI M, SCARAMUZZA D, SIEGWART R. Automatic detection of checkerboards on blurred and distorted images [C]. *IEEE/RSJ International Conference on IROS*, 2008:3121-3126.
- [13] GEIGER A, MOOSMANN CARO et al.. Automatic camera and range sensor calibration using a single shot[J]. *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2012, 3936-3943.
- [14] von GIOI R G, JAKUBOWICZ J, MOREL J M, et al.. LSD: A fast line segment detector with a false detection control [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(4):722-732.
- [15] BALLARD D H. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes [J]. *Pattern Recognition*, 1981, 13(2): 111-122.
- [16] LAVEST J M, VIALA M, DHOME M. Do we really need an accurate calibration pattern to achieve a reliable camera calibration[J]. *European Conference on Computer Vision*, 1998,158-174.
- [17] 何娟. 摄像机标定中角点快速提取算法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2011,38-47.
HE J. *Research on Fast Corner Extraction Algorithm in Camera Calibration* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011, 38-47. (In Chinese)
- [18] 熊会元,宋志坚,余志,等. 基于凸包的棋盘格角点自动识别与定位方法[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2009,48(1):1-5.
XIONG H Y, SONG ZH J, YU ZH, et al.. Automatic extracting and locating checkerboard corners method based on convex hull [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2009, 48(1):1-5. (in Chinese)
- [19] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,23(1):237-244. (in Chinese)
- [20] 谭晓波. 摄像机标定及相关技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2004:34-39.
TAN X B. *Study on Camera Calibration and Its Correlation Technique* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004: 34-39. (in Chinese)

作者简介:



李 海(1990—),男,河南南阳人,博士研究生,2013年于中国海洋大学获得学士学位,2014年开始在华南理工大学攻读博士学位,主要从事机器人视觉及位姿测量方面的研究。E-mail: hans_haili@163.com



张宪民(1964—),男,河北涿州人,教授,博士生导师,1993年于北京航空航天大学机电系获得工学博士学位,现为华南理工大学机械与汽车工程学院院长,主要从事精密柔顺机构、精密定位系统、机器视觉等方面的研究。E-mail: zhangxm@scut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)