



基于模板匹配的快速角点检测方法

程希希^a, 张艳玲^a, 田军委^b

(西安工业大学 a. 电子信息工程学院; b. 机电工程学院, 西安 710021)

摘 要: 角点检测是摄像机校准的重要环节, 可通过对棋盘图像进行角点检测来确定摄像机的内外参数, 然而传统方法在检测棋盘角点时保留了较多的冗余信息, 难以精确给出棋盘角点位置。为此, 提出一种新的棋盘角点检测方法。根据棋盘角点位于两对对称局部灰度区域交界点的特点构建匹配模板进行匹配, 将匹配度较高的响应点作为候选角点。同时采用阈值方法处理非角点, 通过非极大值抑制和梯度统计法筛选出目标角点。实验结果表明, 相比利用棋盘纹理和几何特征优化角点集的角点检测方法, 该方法提高了检测正确率, 缩短了检测时间, 并能够有效检测出复杂环境下的棋盘格图像和畸变图形。

关键词: 模板匹配; 角点检测; 亚像素定位; 非极大值抑制; 梯度方向

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: 程希希, 张艳玲, 田军委. 基于模板匹配的快速角点检测方法[J]. 计算机工程, 2020, 46(7): 222-227.

英文引用格式: CHENG Xixi, ZHANG Yanling, TIAN Junwei. Fast corner point detection method based on template matching[J]. Computer Engineering, 2020, 46(7): 222-227.

Fast Corner Point Detection Method Based on Template Matching

CHENG Xixi^a, ZHANG Yanling^a, TIAN Junwei^b

(a. School of Electronic Information Engineering; b. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

[Abstract] Corner point detection is an important part of camera calibration, as its detection accuracy will directly affect the accuracy of camera calibration. Camera calibration can determine the internal and external parameters of the camera by performing corner point detection on checkerboard images, but traditional methods preserve more redundant information while detecting the corners of the board, and fail to give accurate position of the corner points of the board. To address the problem, this paper proposes a more efficient checkerboard corner point detection method. The checkerboard corner point is characterized by the fact that it is the junction point of two pairs of symmetric local gray areas, and this feature can be used to build the matching template. The response point with higher matching degree is used as the candidate corner point. The threshold method is used to process the non-corner points, and the non-maximum value suppression and gradient statistics are used to screen the target corner point. Experimental results show that compared with the corner point detection methods which optimize the corner point set by checkerboard texture and geometric features, the proposed method can improve the detection accuracy, shorten the process of detection, and effectively detect the checkboard images and distorted images in complex environments.

[Key words] template matching; corner point detection; sub-pixel positioning; non-maximum value suppression; gradient direction

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0055021

0 概述

角点检测^[1]是计算机视觉领域中用于提取图像特征的一种重要方法。目前角点仍未有严格的数学

定义, 一般可认为是某属性上表现突出的点, 如二维图像亮度变化强度大的点、多条边缘曲线交汇点或曲线曲率局部极大值点。针对不同的应用场景, 也可以对“角点”自行定义, 如定义为“特征点”或“兴

基金项目: 陕西省科技厅重点项目(2017JY-045); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2015KTZDGY-02-01)。

作者简介: 程希希(1994—), 女, 硕士研究生, 主研方向为图像处理; 张艳玲, 副教授; 田军委, 教授。

收稿日期: 2019-05-27 修回日期: 2019-08-31 E-mail: 1979088829@qq.com

趣点”等。角点能够有效保留图像重要特征,剔除冗余信息,提升信息处理速度。这使得角点检测在 3D 视觉重建、运动目标识别和图像匹配^[2]上都得到了很好的应用。

棋盘标定板由于制作简单而被广泛用于标定研究中。角点类型主要有 4 种,分别是 L 型^[3]、T 型、Y 型和 X 型。在已发表的文献中,自动棋盘格角点检测主要分为两类,其中一类是基于灰度强度^[4]分布,用角点附近的灰度来判断它是否为棋盘格角点。最初的角点检测算法如 Harris^[5]和 SUSAN 算法^[6],不能从检测的角点中精确区分棋盘格角点,其后针对这一问题,大量的改进算法被提出。文献[7]改进了 SUSAN 算法,以小邻域环形模板灰度的跳变次数为依据来判断角点类型。文献[8]则是利用了角点的灰度对称性以及交替性来提取角点。文献[9]结合了文献[7]中的小邻域环形模板和文献[8]中的灰度对称性特点来定位角点。文献[10]利用 X 角点的方向特性进行亚像素检测定位。文献[11]根据角点周围图像出现强烈的鞍形,通过直线拟合边缘定位鞍点从而获取角点位置。文献[12]利用棋盘纹理和几何特征从 Harris 候选角点中提取角点。文献[13]提出了基于生长的角点检测算法,该算法会绕开图像遮盖的干扰,以生长出最大的棋盘。另一类算法则是利用边缘或线来进行角点检测。文献[14]在边缘轮廓的基础上,构建多尺度相关矩阵并以不同尺度下的归一化特征值乘积检测角点,文献[15]也采用了相关矩阵。文献[16]利用边缘像素及其左右支撑区域的微分模式之间的相似性来构建角点测度以度量角点。但基于边缘轮廓的角点检测如文献[16]对棋盘格角点的检测仍存在很大的局限,因此,本文在文献[13]的基础上改进该算法以获得更高精度的角点检测结果,并与文献[12]的算法进行对比实验。

本文根据棋盘格角点的构成类型将其分为两种主要类型,即矩形黑白块和三角黑白块环接而成的角点。构建这两种类型的角点模型,并根据卷积原理得到与角点相似度最大的点。通过阈值处理^[17]过滤因噪声影响以及复杂环境的干扰而出现的大量非角点,运用非极大值抑制的方法剔除角点附近的伪角点,并利用角点的梯度特性对角点进行亚像素定位。

1 本文算法

1.1 基于模板匹配的角点检测

不同于基于梯度或边缘的方法,基于模板匹配的角点检测方法是直接针对于像素的灰度值^[18](像素强度)的。这种方法的一般操作过程是先建立一个模板 mask,通过模板来操作或比较图像局部的像素,从而判断其是否为角点。本文方法即基于该思

想进行角点检测。

本文方法的信号处理流程如图 1 所示,主要由角点原型模板的创建、阈值处理、基于方向梯度统计的亚像素定位 3 个部分组成。

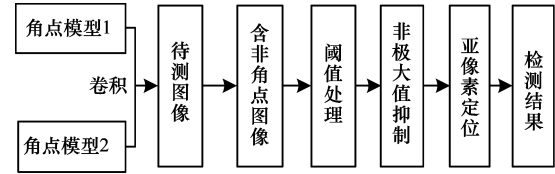


图 1 基于模板匹配的角点检测流程

Fig. 1 Corner point detection procedure based on template matching

根据角点的不同特征,本文利用棋盘角点位于局部灰度区域交界点处的特点,且灰度区域呈现明显的对称性来检测棋盘内圈角点以及剔除棋盘外圈角点。

1.2 模板构建

笔者对 X 角点直观分析发现图像在进行测度变换后主要呈现两种不同的模型^[13],一种角点与坐标轴平行,另一种角点与坐标轴的夹角为 45°,如图 2 所示。

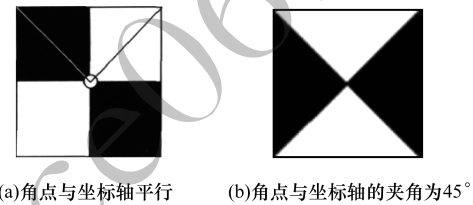


图 2 两种角点原型

Fig. 2 Two archetypes of corner point

根据角点模型定义的上述两种角点原型,对于由透视变换引起的较大范围变形的角点检测而言满足要求。本文将构建的角点子图像遍历棋盘格图像,得到各像素点的响应值。将响应值的大小作为角点相似度的依据,对响应值进行进一步的处理逐步确定角点位置,最终实现角点检测。

每种角点原型均由 4 个滤波核组成,以顺时针方向将模板分为 {A, D, B, C} 4 个部分。滤波核用于后面与图像进行卷积操作,本文的重点就是运用这两种角点原型计算出每个像素与角点的角点相似度,而像素处的角点相似度 C 是由所有原型以及 fippings 组合的最大值来定义的。

$$C = \max(s_1^1, s_2^1, s_1^2, s_2^2) \quad (1)$$

$$s_1^i = \min(\min(f_A^i, f_B^i) - \mu, \mu - \min(f_C^i, f_D^i)) \quad (2)$$

$$s_2^i = \min(\mu - \min(f_A^i, f_B^i), \min(f_C^i, f_D^i) - \mu) \quad (3)$$

$$\mu = 0.25(f_A^i + f_B^i + f_C^i + f_D^i) \quad (4)$$

其中, f_X^i 表示卷积核 X ($X = A, B, C, D$) 与角点原型 i ($i = 1, 2$) 在某一像素点的卷积响应。卷积公式如式(5)所示, 其中 R 为图像任一点的响应值, w 为卷积核系数, z 为与该系数对应的灰度值, mn 为卷积核中包含的像素点总数。

$$R = \sum_{i=1}^{mn} w_i z_i \quad (5)$$

由于灰度区域的分布特点, 棋盘格角点可能会出现左对角线为黑, 右对角线为白, 或者左对角线为白, 右对角线为黑的情况。针对以上两种可能的 flippings, s_1^i, s_2^i 表示原型 i 的这两种可能性, 其中, s_1^i 表示左对角线为黑, s_2^i 表示左对角线为白的情况, 如图 3 所示。

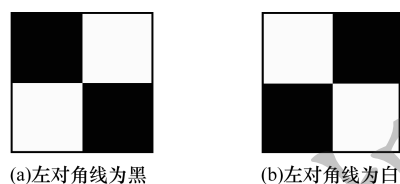


图 3 两种 flippings

Fig. 3 Two types of flippings

本文方法选定 3 个模板尺度以满足图像中不同于棋盘尺度的需求, 模板角度分别与坐标轴平行和与坐标轴呈现 45° 夹角。具体模板示例如图 4 所示。

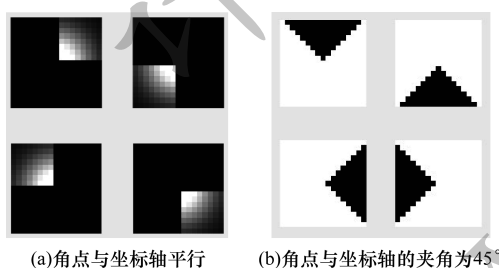


图 4 模板示例图

Fig. 4 Template examples

根据图像卷积原理, 当卷积核选择与图像中越相似的部分卷积后, 得到的响应值越高, 反之越低。当图像受到光照和畸变, 4 个卷积核的任何一个响应值较小时, 角点相似度 C 变小, 由此可以有效区分伪角点和角点。

1.3 阈值处理

通过原图像与角点原型卷积已初步获取角点位置。由于图像含有大量的噪声, 仍有大量的伪角点被检测出来。因此, 需要对该方法进行进一步的优化。此处将采用阈值处理, 具体如下:

$$C = \begin{cases} C(x, y), & C > g \\ 0, & C \leq g \end{cases} \quad (6)$$

其中, g 为选定阈值。拟角点与伪角点之间的差值较大, 通过大量实验经验可知, 将 g 的值设定为角点相似度 C 的一半, 即当 $g = 0.5 \times C$ 时伪角点的剔除效果较好。

通过阈值化后可得到较为清晰的角点相似度图。然而阈值化的结果只能够去除偏值较大的非角点(角点附近仍有大量 C 值接近的点), 如图 5 所示。

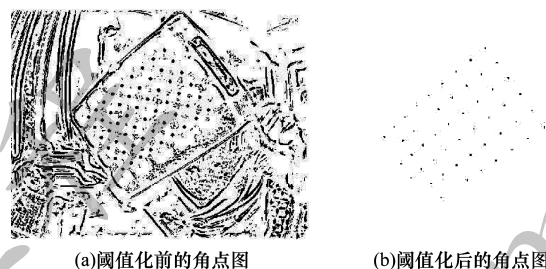


图 5 阈值化前后的角点图

Fig. 5 Corner point figure before and after the threshold

为了后续的亚像素定位, 需要进一步逼近角点精确的位置以便利后续的角点方向精细化。在此方法中, 首先利用非极大值抑制来获得最终的角点位置。由于经过非极大值抑制后的角点位置为像素级的, 因此后面的工作主要是对角点位置以及边缘方形进行方向精细化处理。

1.4 亚像素定位及方向精细化

通过上述处理检测到的棋盘角点为非亚像素角点, 但是在进行摄像机标定时必须将角点位置精确到亚像素级。对棋盘角点图像分析可知, X 角是相邻黑白区域块交界的临界点, 黑白区域块的灰度差异较大。角点的方向分析将角点的定位问题转化为方向交点的问题, 且能够较为准确地将角点定位到亚像素精度。

在理想情况下, 像素点 q 是角点 p 局部邻域上的一点, f_q 为像素点 q 的图像梯度向量。

1) 当像素点 q 位于平坦区域时, 有:

$$f_q^T(q-p) = 0 \quad (7)$$

2) 当像素点 q 位于边界上时, 同样有:

$$f_q^T(q-p) = 0 \quad (8)$$

这是因为, 当像素点位于平坦区域时, 像素的变化为 0, 梯度向量即为 0 。而当像素点位于边界上时, 像素点梯度向量方向与 $(q-p)$ 方向相互垂直, 因此, 可以利用像素点的方向信息对角点进行亚像素定位以及方向的精细化。

以上为理想状态, 但实际情况中, 由于噪声、曝光、畸变等影响, 会造成梯度方向不理想, 边缘不够锐利。结合实际情况, 本文中角点 p 位置要求在角点候选集 p' 的邻域 $N(p')$ 内满足下式:

$$p = \arg \min_{p'} \sum_{q \in N(p')} (f_q^T (q - p'))^2 \quad (9)$$

其中, N 表示一个 11×11 的领域且相邻像素是由梯度大小自动加权的。对式(9)右侧中 p' 进行求导并令其等于 0, 得到解析解:

$$p = \left(\sum_{q \in N} f_q f_q^T \right)^{-1} \sum_{q \in N} (f_q f_q^T) q \quad (10)$$

本文通过寻求对应梯度方向向量上的最小误差来实现改进边缘方向向量 e_1 和 e_2 的准确性:

$$e_i = \arg \min_{p'} \sum_{q \in M_i} (f_q^T e'_i)^2 = 1, \text{ s. t. } e_i^T e'_i = 1 \quad (11)$$

$$M_i = \{q | q \in N \wedge |m_i^T f_q| < 0.25\} \quad (12)$$

其中, M_i 为临近像素的集合, 并与模式 i 的梯度 $m_i = [\cos(a_i) \sin(a_i)]^T$ 相对齐。进行亚像素定位后的角点图如图 6 所示。



图 6 亚像素定位后的角点图

Fig. 6 Corner point figure after sub-pixel positioning

2 实验结果与分析

2.1 精度和实时性实验

为了验证本文算法的精度和实时性, 使用 Matlab 软件分别与 Harris 角点检测算法、SUSAN 角点检测算法以及文献[12]算法进行对比实验, 结果如图 7 所示。

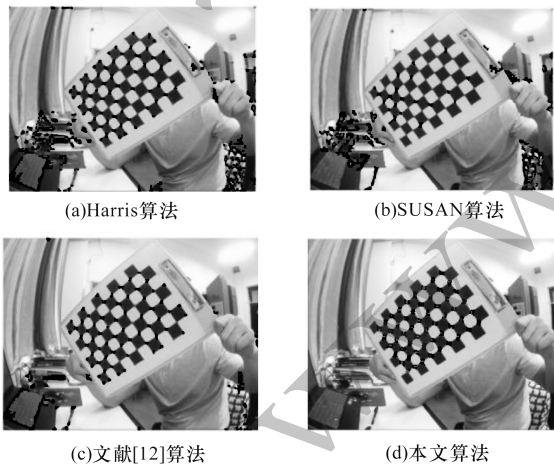


图 7 4 种算法检测出的角点图对比

Fig. 7 Comparison of corner points figures detected by four algorithms

由图 7 可以看出, 不同角点检测算法都能识别角点, 但是本文提出的算法在误检率上有着明显的优势。为了进一步对比 4 种算法在角点检测正确率以及实时性方面的不同, 现取 3 张棋盘图进行检测,

棋盘规格分别为 9×6 、 8×6 、 8×8 , 格子尺寸为 $29 \text{ mm} \times 29 \text{ mm}$, 如图 8 所示。



(a) 棋盘 1 规格为 9×6 (b) 棋盘 2 规格为 8×6 (c) 棋盘 3 规格为 8×8

图 8 测试棋盘格

Fig. 8 Checkerboards for the test

分别用 SUSAN 角点检测算法、Harris 角点检测算法、文献[12]算法以及本文算法对图 8 进行角点检测。角点检测个数对比, 角点检测正确率对比以及角点检测时间对比分别如表 1 ~ 表 3 所示。

表 1 角点检测个数对比

Table 1 Comparison of the number of corner points detected

算法	棋盘 1	棋盘 2	棋盘 3
SUSAN 算法	609	593	786
Harris 算法	302	286	314
文献[12]算法	69	59	75
本文算法	54	48	64

表 2 角点检测正确率对比

Table 2 Comparison of corner points detection accuracy %

算法	棋盘 1	棋盘 2	棋盘 3
SUSAN 算法	8.867	8.094	8.142
Harris 算法	17.881	16.783	20.382
文献[12]算法	78.261	81.356	83.077
● 本文算法	100.000	100.000	100.000

表 3 角点检测时间对比

Table 3 Comparison of detection time of corner points s

算法	棋盘 1	棋盘 2	棋盘 3
SUSAN 算法	3.243 2	2.794 6	2.091 1
Harris 算法	2.005 1	1.237 7	1.562 8
文献[12]算法	0.725 6	1.091 5	0.556 1
本文算法	0.659 1	0.779 6	0.438 9

由以上对比可以直观地判断出本文算法能够有效检测出角点, 而常规角点检测算法存在误检、重检问题。这是因为高斯卷积的圆角效应^[11], 使用 Harris 角点检测算法会在理想角点附近检测出多余的伪角点^[19]。而对于 SUSAN 角点检测算法, 它是基于图像的灰度信息提出的低层次^[20]图像处理算法, 由于该算法无需边缘检测, 也无需梯度计算, 因此具有较高的效率和较强的抗干扰能力。但是 SUSAN 算法不能有效区分棋盘内角点和边缘点, 导致伪角点的数量大增。文献[12]的角点检测算法结合棋盘格的灰度分布和边缘信息来消除假角, 其性能要优于传统的角点检测算法, 但当棋盘背景较为复杂时或角点附近的区域块较

大时,将造成误检。另外其得到的角点信息为像素级,不能够用于高要求的摄像机标定等工作。因此,本文算法对比上述的角点检测算法都表现出较大的优势。

2.2 适应性实验

实验 1 光源对角点检测的影响

光源对图像的质量有着极大的影响,不适合的光源将大幅降低图像的质量。例如,阴影会使边缘模糊造成误检,不均匀的光照造成阈值选择困难。选择一组图片,棋盘规格为 7×6 。在采集照片时,尽可能使得标定板充盈到整个平面,保持每一组图像在采集过程中间距不变,变化的只是光源强度。采集 20 组图像进行实验,光照值分别为 274 Lux 和 68 Lux,随机抽取一组实验结果进行展示,如图 9 所示。可以看出,光线强度不同的情况下,本文算法仍能准确定位角点。

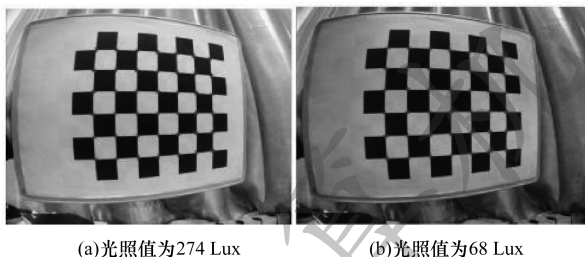


图 9 光源对角点检测的影响

Fig. 9 Influence of light source on corner point detection

实验 2 畸变图像(鱼眼图像)角点检测

传统的棋盘格角点检测方法难以准确提取鱼眼图像边缘处的角点,造成相机标定精度低,为此,本文进行下鱼镜头大畸变成像的棋盘格角点检测。同样采集 20 幅图像进行实验,随机抽取一组实验结果进行展示,如图 10 所示。实验结果表明,对于鱼眼棋盘图像,棋盘格虽然受到镜头的畸变,但是不同尺度的模版能弥补角点对角线棋盘格尺度不对称现象,从而正确识别角点。

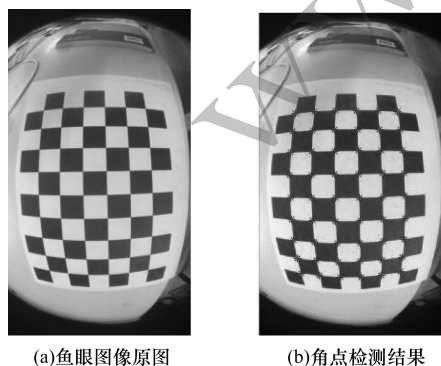


图 10 鱼眼图像及检测结果

Fig. 10 Fish-eye image and detection result

鱼眼畸变图采用的棋盘规格为 6×9 ,而检测结果漏检 0 个角点,误检 0 个角点。以上是由于摄像头畸变造成的图像畸变,现选取非镜头畸变造成的图像畸变,而是由黑白交替的正方形以及不同大小的菱形构成的图像。选取 20 幅此类型的棋盘图进行实验,随机选取一组显示结果,如图 11 所示。由图中检测结果可知,本文算法对于非鱼眼镜头的畸变棋盘图像仍然有效。

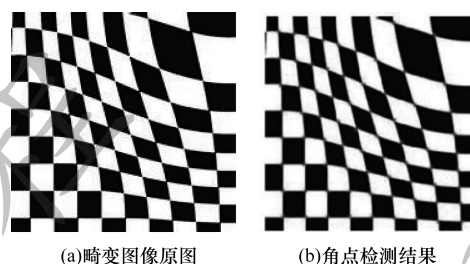


图 11 畸变图像的角点检测

Fig. 11 Corner point detection of distorted image

由以上对比图可以直观地判断出本文算法能够有效检测出角点,当棋盘图像受到不同光照,鱼眼镜头下的枕、桶形畸变以及不规则畸变图像的影响时,角点的构成方式并没有改变。不同尺度和角度的模板保障了每一个角点都能够被检测出,而改进的梯度方向统计策略以及非极大值抑制能有效排除冗余信息,达到最终的亚像素角点定位目标。本文算法在不同适应性实验中均表现出较大的优势。

3 结束语

本文提出一种基于模板匹配的快速角点检测方法。通过创建两种角点原型滤波核并与图像进行卷积,得到角点相似度,以此剔除响应值较小的伪角点。在此基础上,进行非极大值抑制,利用角点的方向特性提取角点并实现亚像素定位。实验结果表明,相较于传统的角点检测方法,该方法能够得到更好的检测结果,在畸变影响下也能够准确检测出角点。由于本文方法对过曝光的图像存在一定的漏检率,因此下一步将改进该算法,使其在棋盘图像处于不同光照环境时都能够准确提取角点。

参考文献

- [1] ZHANG Weichuan, KONG Xiangnan, SONG Wen. Review of image corner detection algorithms[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 11(11): 2315-2321. (in Chinese)
章为川,孔祥楠,宋文. 图像的角点检测研究综述[J]. 电子学报, 2015, 11(11): 2315-2321.
- [2] JIA Di, ZHU Ningdan, YANG Ninghua, et al. Image matching methods[J]. Journal of Image and Graphics, 2019, 24(5): 677-699. (in Chinese)

- 贾迪,朱宁丹,杨宁华,等. 图像匹配方法研究综述[J]. 中国图象图形学报,2019,24(5):677-699.
- [3] NOBLE J A. Finding corners [J]. Image and Vision Computing,1988,6(2):121-128.
- [4] ZHAO Wenbin, ZHANG Yanning. Survey on corner detection[J]. Application Research of Computers,2006,23(10):17-19. (in Chinese)
赵文彬,张艳宁. 角点检测技术综述[J]. 计算机应用研究,2006,23(10):17-19.
- [5] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector [C]//Proceeding of the 4th Alvey Vision Conference. Manchester, UK:[s. n.],1988:147-151.
- [6] SMITH S M, BRADY J M. SUSAN—a new approach to low level image processing[J]. Computer Vision,1997,23(1):45-78.
- [7] YANG Xingfang, HUANG Yumei, GAO Feng, 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)
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.
- [8] DENG Yingna. X corner detection in chessboard image based on shape recognition [J]. Measurement & Control Technology,2016,35(6):42-55. (in Chinese)
邓颖娜. 基于形状识别的X型棋盘格角点检测[J]. 测控技术,2016,35(6):42-55.
- [9] CHU Jun, GUOLU Anzheng, ZHAO Guihua. Chessboard corner detection based on circular template [J]. Optics and Precision Engineering,2013,21(1):189-195. (in Chinese)
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):189-195.
- [10] MENG Cai, XUE Jiao. Sub-pixel X-corner detection and location with directional characteristics [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2015,41(4):580-588. (in Chinese)
孟偲,薛姣. 具有方向特性的X角点的亚像素检测定位[J]. 北京航空航天大学学报,2015,41(4):580-588.
- [11] ALTURKI A S, LOOMIS J S. X-corner detection for camera calibration using saddle points[EB/OL]. [2019-04-30]. https://ecommons.udayton.edu/stander_posters/773.
- [12] LIU Yu, LIU Shuping, CAO Yang, et al. A practical algorithm for automatic chessboard corner detection[C]//Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Image Processing. Washington D. C., USA: IEEE Press,2014:3449-3453.
- [13] GEIGER A, MOOSMANN F, CAR O, et al. Automatic camera and range sensor calibration using a single shot[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington D. C., USA: IEEE Press,2012:3936-3943.
- [14] WANG Hao, ZHOU Zuofeng, CAO Jianzhong, et al. Corner detection via multi-scale autocorrelation matrix on edge contours [J]. Systems Engineering and Electronics,2014,36(6):1220-1224. (in Chinese)
王浩,周祚峰,曹剑中,等. 基于边缘轮廓上多尺度自相关矩阵的角点检测算法[J]. 系统工程与电子技术,2014,36(6):1220-1224.
- [15] DENG Xiaolian, DU Yuqi, WANG Changyao, et al. An adaptive threshold corner detection algorithm based on auto-correlation matrix of image pixel [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(18):134-140. (in Chinese)
邓小炼,杜玉琪,王长耀,等. 像素自相关矩阵的阈值自适应角点检测算法[J]. 农业工程学报,2017,33(18):134-140.
- [16] WANG Fuping, SHUI Penglang. Corner detection algorithm using multiscale differential mode similarity [J]. Opto-Electronic Engineering,2016,43(10):56-62. (in Chinese)
王富平,水鹏朗. 多尺度微分模式相似性角点检测算法[J]. 光电工程,2016,43(10):56-62.
- [17] LONG Jianwu. Research on key techniques of image threshold segmentation [D]. Jilin: Jilin University,2014. (in Chinese)
龙建武. 图像阈值分割关键技术研究[D]. 吉林:吉林大学,2014.
- [18] XIAO Qian, LU Hongwei. Adaptive corner detection based on gaussian smoothing [J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics,2003,15(11):1358-1361. (in Chinese)
肖茜,卢宏伟. 基于高斯平滑的自适应角点检测[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2003,15(11):1358-1361.
- [19] BI Yunfeng, XU Gang, JIANG Juanjuan, et al. A novel corner detection algorithm of chessboard image [J]. Journal of Nanyang Normal University,2016,15(3):25-28. (in Chinese)
毕运锋,许钢,江娟娟,等. 一种新型棋盘格角点检测算法[J]. 南阳师范学院学报,2016,15(3):25-28.
- [20] ZHANG Yuchi, LI Guolin, XIE Xiang, et al. A new algorithm for accurate and automatic chessboard corner detection [C]//Proceedings of 2017 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press,2017:1-4.