

文章编号:1007-2780(2018)02-0150-06

一种基于旋转不变性的角点检测方法研究

吴敏杨, 季 锋, 蒋 明*

(苏州科技大学 数理学院, 江苏 苏州 215009)

摘要:针对显微立体视觉标定过程中,因显微成像产生的畸变和模糊而造成棋盘格标定板角点误检的问题,提出一种基于旋转不变性的角点检测方法,研究了棋盘格角点间的几何特征,对所有特征角点进行排序,通过实验建立数学模型,计算筛选的特征角点的置信度,准确提取出棋盘格角点位置,并通过一系列实验对这种方法的准确度、噪点数量以及精度进行验证。结果表明,基于旋转不变性的棋盘格角点检测方法,准确率达到 91.2%,重投影误差的均方差约为 0.1 像素,具有较高的准确性和精度。

关 键 词: 旋转不变性;角点检测;几何特征;置信度;

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20183302.0150

Corner detection method based on rotation invariance

WU Min-yang, JI Feng, JIANG Ming*

(School of Mathematics and Physics, Suzhou University of Science and Technology,
Suzhou 215009, China)

Abstract: Aiming at the error detection of the chessboard corners caused by distortion and blur of microscopic imaging during the calibration processing of the micro stereovision, a corner detection method of chessboard based on rotation invariance is proposed, which studies the geometry of chessboard corners and sorts all the characteristic corners. Mathematical model is established through experiments, the confidence level of filtered characteristic corners are calculated, which extracts positions of the chessboard corners and validate the accuracy, the number of noise and the precision through a series of experiments. The results show that the accuracy rate of the corner detection based on rotation invariance reaches 91.2%, and the mean square error of the re-projection error is approximately 0.1 pixels, which has a comparatively high accuracy and high precision.

Key words: rotation invariance; corner detection; geometric characteristics; confidence level

收稿日期:2017-09-26;修订日期:2017-11-30.

基金项目:国家自然科学基金(No.11172193)

Supported by Foundation of National Natural Science(No. 11172193)

* 通信联系人, E-mail: jiangming@mail.usts.edu.cn

1 引言

随着制造业在微观领域的快速发展,微机械结构测量^[1]、微结构件的力学性能测试^[2-3]等的测量精度要求也日益提高。体视显微镜通过复杂的光学系统将微小物体的像放大,利用体视显微镜作为观察微小物体的工具,可以实现微小物体的高精度测量^[4-5]。因此将光学测量方法与显微镜技术相融合已成为近年来的研究热点^[6-7],如由双目视觉系统与体视显微镜构成显微立体视觉测量系统^[8-9]。显微立体视觉测量系统中,角点检测^[10]是摄像机标定^[11]的关键步骤,常用的角点检测算法有基于 Matlab 工具箱^[12]的角点检测算法、张广军角点检测^[13]算法和基于 OpenCV 的角点检测算法等^[14]。上述算法中存在着准确率低、带入噪点多以及算法执行复杂度高问题,只能在特定背景下使用这些角点检测方法,针对这一缺陷,提出一种新的基于旋转不变性的角点检测算法,针对棋盘格角点位置的几何特征,建立数学模型,对候选特征点进行置信度计算,通过实验选取合适参数参与对比,将候选点中的误检点以及噪点进一步剔除,提高角点检测过程中的准确率,并有效降低算法执行的操作复杂度,可实现棋盘图像角点的自动检测,提高显微立体视觉标定精度,满足了在显微标定的复杂环境下对棋盘格角点进行检测的要求。

2 算法原理及检测机制

2.1 棋盘格图像预处理

棋盘格图像预处理将对所有可能角点进行筛选,主要分为3个步骤,对图像进行初步的筛选,首先通过传统的 Canny 算子^[15]对图像进行边缘提取,棋盘格的边缘被提取出来,同时也降低了棋盘格之间的角点的可识别性。所以在软件执行程序中,会对边缘图像进行膨胀以及模式填充处理,将提取出来的棋盘格边缘更加细致化。填充过后的图像对特征点都进行了灰度值强调,所以对图像进行腐蚀操作时会提取出明显特征点的位置情况,图1为棋盘格图像预处理的具体流程。

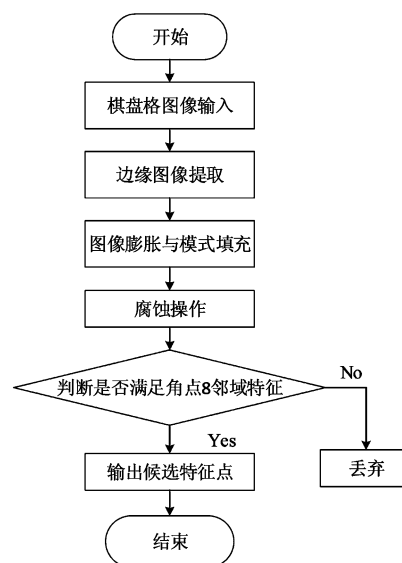


图1 棋盘格图像预处理流程图

Fig.1 Flowchart of preprocessing of the chessboard image

2.2 特征点提取

经图像预处理得到的候选点依旧较多,大大增加了棋盘格角点检测误判可能性。为了根据角点特征对每个点进行判定,去除尽可能多的非棋盘格角点,提出了一种基于旋转不变性的角点检测方法,在显微成像产生的图像存在模糊与畸变等干扰情况下,实现对棋盘格角点的检测与标定^[16]。

标定过程中需要对标定图像进行旋转操作,根据圆环的旋转不变特性^[17],分析标准棋盘格角点的几何特征,设角点 O 为圆心,取半径为 r 作圆,角度最大的白色扇形区域的中心线即是该角点的主方向^[18],如图 2(a)中 OA 表示主方向,其中 S 为角度最大的白色扇形区域,在理想情况下可得到两个主方向,由于这两个主方向关于角点中心对称,只需保留其中一个即可。角点特征的比较需要在同一个方向上进行,是实现旋转不变性支持的核心要点,因此需查找每个角点的主方向,并使其特征描述以主方向为首对齐,从而实现算法对于旋转不变性的要求。棋盘格角点中心为 O ,取 $r_{\min} = r, r_{\max} = R$,得到如图 2(b)阴影部分环形区域,并将其划分为 360 组块,其中每 1° 为一个组块。每个组块的值是其包围面积内的像素平均值,因此获得一个具有 360 维的向量 P 。

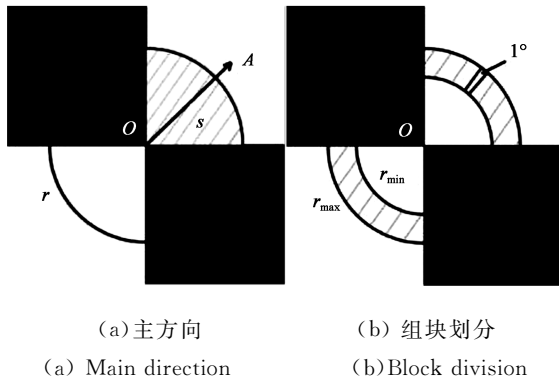


图 2 主方向提取

Fig.2 Extraction of principal direction

设 C_i 为以 P_i 为中心前后各 45 个组块的元素值之和, 则:

$$C_i = \sum_{i=m}^n P_i \quad (i=0, 1, 2, \dots, 359), \quad (1)$$

$$\text{其中, } m = \begin{cases} i-45 & , i \geq 45 \\ i-45+360 & , i < 45 \end{cases},$$

$$n = \begin{cases} i+45 & , i \leq 314 \\ i+45-360 & , i > 314 \end{cases}.$$

设 $C_k = \max\{C_0, C_1, \dots, C_{359}\}$, 此时 k 对应的角度就是该角点的主方向角度。

对向量 $\mathbf{P}$ 以主方向 k 为起始向量做环形平移, 使得

$$P'_i = P_f \quad (i=0, 1, 2, \dots, 359), \quad (2)$$

$$\text{其中, } f = \begin{cases} i+k-360 & , i \geq 360-k \\ i+k & , i < 360-k \end{cases}.$$

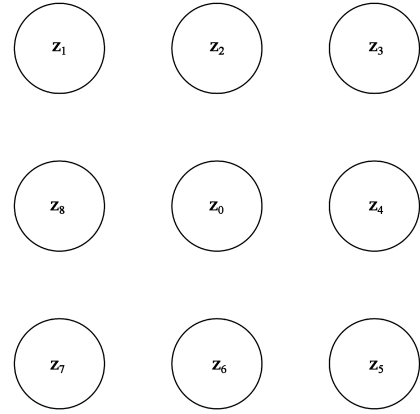
此时得到的新向量 $\mathbf{P}'$, 称之为该候选特征点的特征向量, 即作为该候选特征点特征的描述子。根据描述子, 构建一个标准的棋盘格角点, 提取得到该角点的特征向量 $\mathbf{F}$ 。使用夹角余弦方法, 计算候选特征点特征向量 $\mathbf{P}'$ 与标准棋盘格角点特征向量 $\mathbf{F}$ 的夹角余弦值作为该候选特征点的置信度 S :

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (P'_i \times F_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n P'^2_i} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n F^2_i}}, \quad (3)$$

同时式(3)也作为筛选特征点的依据。通过实验分析置信度的取值区间, 在各种情况下对 S 进行计算, 实验证明, 置信度 S 达到 0.8 以上, 即可认为是特征点。

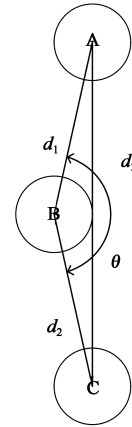
2.3 棋盘格角点检测

定义满足以下条件的中心特征点为棋盘格角点的初始点。设中心特征点为 Z_0 , 其相邻的 8 个特征点分别为 $Z_1 \sim Z_8$ 如图 3(a), 坐标分别为 (x_i, y_i) , $0 \leq i \leq 8$, 考虑到棋盘格角点由于畸变的存在不完全对称, 因此定义 A、B、C 三点如图 3(b)所示:



(a) 棋盘格角点初始点

(a) Initial point of the chess-board corner



(b) 棋盘格角点判定

(b) chess-board corner determination

图 3 棋盘格角点提取

Fig.3 Extraction of chessboard corners

坐标分别为 (a_i, b_i) , $0 \leq i \leq 2$, 若 A、B、C 满足两个基本判定原则, 即

$$\left| 1 - \frac{d_1}{d_2} \right| < d_{th}, \quad (4)$$

$$\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2, \quad (5)$$

其中: d_1 、 d_2 分别为 AB、BC 边的长度, θ 为 AB 和 BC 之间的夹角, 经过大量实验可得出 d_{th} 、 θ_1 、 θ_2

作为特定情况下的判定标准,则认为 A、B、C 三点共线且 $AB=BC$ 。若 $Z_1Z_2Z_3$ 、 $Z_8Z_0Z_4$ 、 $Z_7Z_6Z_5$ 、 $Z_1Z_8Z_7$ 、 $Z_2Z_0Z_6$ 、 $Z_3Z_4Z_5$ 、 $Z_1Z_0Z_5$ 和 $Z_3Z_2Z_7$ 这 8 组点均满足上文两个基本判定原则,则认为 $Z_0 \sim Z_8$ 这 9 个点属于棋盘格的角点,且 Z_0 为棋盘格角点初始点,以此方法对所有候选特征点进行判定,提取出棋盘格角点位置。

3 精度检验与分析

图 4 为标定板(规格为 $7\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ 的棋盘格)的图像,由于显微成像的原因,标定板边缘畸变较大且模糊。为检验文中方法的准确度,共采集了 100 幅分别绕 x 、 y 、 z 轴旋转一定角度的棋盘格图像,其中每幅图包含 48 个棋盘格角点,100 幅实验图像共包含 4 800 个棋盘格角点,在相同参数条件下,分别使用文中方法和两种经典的角点检测方法(Harris 算子和 ChESS 算子)进行角点检测。三种角点特征算法检测的特征点个数、检测的棋盘格角点个数和棋盘格角点检测准确率列于表 1。结果表明,文中方法的检测方法在检测到棋盘格角点的同时噪点个数最少;Harris 算子和 ChESS 算子的检测方法在检测到棋盘格角点的同时包含较多的噪点,棋盘格角点检测准确率较低。

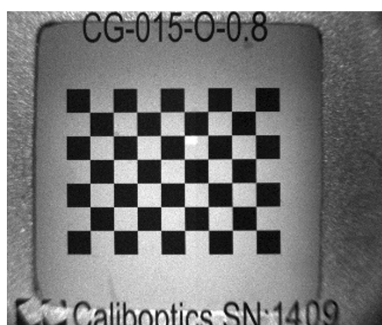


图 4 棋盘格图像

Fig.4 Chessboard image

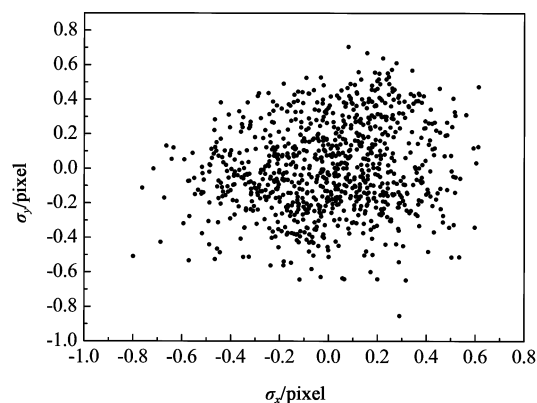
表 1 角点检测准确率结果

Tab.1 Results of corner detection accuracy

角点检测方法	检测的特征点个数	检测的棋盘格角点个数	棋盘格角点检测准确率/%
文中方法	5 263	4 800	91.2
Harris	6 441	4 767	74.0
ChESS	6 986	4 786	68.5

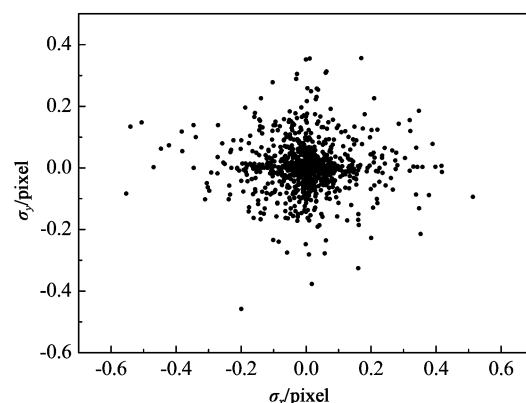
分别对进行整像素角点检测和亚像素角点检测^[19]得到的 19 幅显微棋盘格图像角点进行重投影实验,重投影误差如图 5 所示。其中,图 5(a)表示整像素角点检测得到的重投影误差,图 5(b)表示亚像素角点检测得到的重投影误差,其中 x 轴表示图像行方向误差, y 轴表示图像列方向误差。根据检测到的棋盘格角点位置计算得到的摄像机内参如表 2 所示。其中, σ_x 表示棋盘格角点在 x 轴重投影误差的均方差, σ_y 表示棋盘格角点在 y 轴重投影误差的均方差, f_x 和 f_y 分别表示摄像机 x 轴和 y 轴的焦距, u_0 和 v_0 为图像中心点坐标, k_1 和 k_2 为摄像机径向畸变系数, p_1 和 p_2 为摄像机切向畸变系数。

实验分别对整像素角点检测和亚像素角点检测得到的结果计算重投影误差,由角点重投影误差图 5(a)可见,整像素角点检测得到的棋



(a) 整像素检测

(a) Integrate pixel detection



(b) 亚像素检测

(b) Subpixel detection

图 5 重投影误差 σ (单位:像素)

Fig.5 Reprojection error (Work unit: Pixel)

盘格角点在 x 轴和 y 轴的重投影误差均小于 1 个像素,大多集中在 0.6 个像素范围内,重投影误差的均方差在 x 轴和 y 轴分别约为 0.26 和 0.28 个像素。由表 2 的摄像机标定结果可以看出,即使不进行亚像素角点检测,使用基于旋转不变性的角点检测方法进行角点检测依旧可以

得到较好的角点检测精度。由角点重投影误差图 5(b)可见,通过亚像素角点检测,棋盘格角点在 x 轴和 y 轴的重投影误差均小于 0.5 个像素,角点重投影误差集中在 0.2 个像素范围内,重投影误差的均方差在 x 轴和 y 轴均约为 0.10 像素。综上所述,基于旋转不变性的角点检测方法具有较高的检测精度,适用于显微立体视觉的标定。

表 2 摄像机标定结果

Tab.2 Results of camera calibration

摄像机内参数	整像素检测	亚像素检测
σ_x/pixel	0.26	0.10
σ_y/pixel	0.28	0.10
f_x/pixel	8038.78 ± 0.78	8038.95 ± 0.32
f_y/pixel	8079.13 ± 0.79	8079.26 ± 0.33
u_0/pixel	7.08 ± 1.12	6.67 ± 0.74
v_0/pixel	4.97 ± 1.16	4.96 ± 0.79
$k_1 (\times 10^{-2})$	25.85 ± 0.78	26.08 ± 0.37
$k_2 (\times 10^{-2})$	19.58 ± 1.53	20.73 ± 1.07
$p_1 (\times 10^{-3})$	-40.53 ± 0.25	-45.68 ± 0.16
$p_2 (\times 10^{-3})$	2.02 ± 0.25	2.04 ± 0.16

4 结 论

提出了一种基于旋转不变性的角点检测方法对棋盘格角点进行检测,在分析棋盘格角点几何特征的基础上,以特征向量的置信度为衡量标准对候选特征点进行筛选,实现了棋盘格角点的自动提取。实验结果表明,提出的算法对棋盘格角点进行提取能更加有效的描述特征角点的位置。重投影误差均方值约为 0.1 个像素,角点检测准确率为 91.2%,具有较高的精度和准确率。因此基于旋转不变性的角点检测方法实现了棋盘格角点的自动检测,对于显微标定过程中易产生模糊和畸变的环境下的角点检测,具有可靠性和可行性。

参 考 文 献:

- [1] 白云鑫.某航天零件微细结构精确测量及自动加工技术研究[D].太原:中北大学,2017.
BAI Y X. Research on precise measurement and automatic processing technology of micro structure for a space component [D]. Taiyuan: North University of China, 2017. (in Chinese)
- [2] 刘燕锋,陈志勇,张嵘.微机械应力测试结构的温度特性和应力抑制方法[J].光学精密工程,2016,24(6): 1345-1351.
LIU Y F, CHEN Z Y, ZHANG R. Temperature characteristics of MEMS stress-testing structure and a stress-suppressing method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1345-1351. (in Chinese)
- [3] BOUFAIDA Z, BOISSE J, ANDRE S, *et al.* Mesoscopic strain field analysis in a woven composite using a spectral solver and 3D-DIC measurements [J]. *Composite Structures*, 2017, 160: 604-612.
- [4] LUNT A J G, SALVATI E, MA L F, *et al.* Full in-plane strain tensor analysis using the microscale ring-core FIB milling and DIC approach [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2016, 94: 47-67.
- [5] 刘艳梅,金博伟,魏阳杰,等.基于显微视觉的亚像素压电陶瓷驱动特性测量[J].仪器仪表学报,2015,36(5): 1163-1169.
LIU Y M, JIN B W, WEI Y J, *et al.* Measurement on driving characteristic of a piezoelectric actuator based on the sub-pixel of micro-vision [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(5): 1163-1169. (in Chinese)
- [6] WU H, ZHANG X M, GAN J Q, *et al.* Displacement measurement system for inverters using computer micro-vision [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 81: 113-118.
- [7] APOLINAR J, RODRIGUEZ M. Three-dimensional microscope vision system based on micro laser line scanning and adaptive genetic algorithms [J]. *Optics Communications*, 2017, 385: 1-8.
- [8] SHA X P, LI W C, LV X Y, *et al.* Research on auto-focusing technology for micro vision system [J]. *Optik-Inter-*

- national Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 142: 226-233.
- [9] 任茂栋,梁晋,唐正宗,等.微尺度三维变形测量的显微数字图像相关系统[J].光学学报,2014,34(5):0512002.
REN M D, LIANG J, TANG Z Z, *et al.* Microscopic three-dimensional deformation measurement system based on digital image correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0512002. (in Chinese)
- [10] 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 C, ZHAO J, SUN Q. Improved Harris corner detection method based on edge [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(6): 939-942. (in Chinese)
- [11] 赵亚凤,胡峻峰.一种双正交消隐点的双目相机标定方法[J].液晶与显示,2016,31(10):958-966.
ZHAO Y F, HU J F. Binocular self calibration using two pairs of orthogonal vanishing points [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(10): 958-966. (in Chinese)
- [12] BOUGUET J Y. Camera calibration toolbox for Matlab [J]. *High Speed Vision System & Object Tracking*, 2013.
- [13] 张广军.机器视觉[M].北京:科学出版社,2005.
ZHANG G J. *Machine Vision* [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [14] 聂伟乐,瞿建荣.基于OpenCV的运动目标光流算法仿真[J].应用光学,2008,29(6):867-869.
NIE W L, QU J R. Simulation for moving target processing algorithm based on OpenCV [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(6): 867-869. (in Chinese)
- [15] GOULART J T, BASSANI R A, BASSANI J W. Application based on the Canny edge detection algorithm for recording contractions of isolated cardiac myocytes [J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2017, 81: 106-110.
- [16] 王巨森,刘自强.摄像机标定方法的实现[J].电大理工,2015(2):12-13.
WANG J S, LIU Z Q. Implementation of camera calibration method [J]. *Study of Science and Engineering at RTVU*, 2015(2): 12-13. (in Chinese)
- [17] 黄丽艳.抗旋转变换的图像哈希算法[D].桂林:广西师范大学,2014.
HUANG L Y. Image hashing algorithms resistant to rotation [D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2014. (in Chinese)
- [18] 李根,李文辉.主方向旋转LBP特征的平面旋转人脸检测[J].电子学报,2015,43(1):198-202.
LI G, LI W H. face detection under rotation in image plane using principal direction rotation LBP [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(1): 198-202. (in Chinese)
- [19] SROBA L, RAVAS R, GRMAN J. The influence of subpixel corner detection to determine the camera displacement [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 100: 834-840.

作者简介:吴敏杨(1993—),女,江苏常州人,硕士研究生,主要研究方向:光学仪器与检测。E-mail:wuminyang1028@163.com

蒋明(1961—),女,江苏苏州人,博士,教授,主要研究方向:光测力学及图像处理技术。E-mail:jiangming@mail.usts.edu.cn