

文章编号 1004-924X(2015)01-0237-08

基于改进棋盘的角点自动检测与排序

赵 斌*, 周 军

(西北工业大学 精确制导与控制研究所, 陕西 西安 710072)

摘要:考虑采用传统黑白棋盘进行相机自动标定时角点排序结果受标定模板旋转角度影响较大,本文设计了一种改进的棋盘标定模板及相应的角点自动检测与排序算法。新的标定模板通过增加 4 个长方形边界滤除复杂背景,增加沙漏状图形确定排序原点,从而使得排序结果适应于模板的旋转。针对新的标定模板提出了一种基于对称象限灰度交叉熵的角点检测算法,该算法通过抑制局部非极大值以及筛选矩形边界实现了角点的像素级定位,然后采用 Frostner 算子解算了角点的亚像素坐标。针对角点检测结果,采用曲线拟合并结合角点至原点的距离信息实现了角点自动排序。实验结果表明:得到的角点检测结果正确,亚像素解算坐标与 Matlab 标定工具箱的检测结果误差小于 0.8 pixel,排序结果对标定模板的旋转具有不变性,易于实现在线标定。

关键词:标定模板;角点检测;角点排序;交叉熵;棋盘

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152301.0237

Automatic detection and sorting of corners by improved chessboard pattern

ZHAO Bin*, ZHOU Jun

(*Institute of Precision Guidance and Control,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*)

* *Corresponding author, E-mail: b.zhao_npu@hotmail.com*

Abstract: In automatic camera calibration with traditional black and white chessboard patterns, the corner sorting results are usually influenced by the rotation angle of the calibration pattern. Therefore, this paper designs an improved chessboard pattern and corresponding automatic corner detection and sorting algorithm. In the new pattern, four rectangular boundaries were added to filter the complex background, and a double-triangle mark was used to determine the original point of the corners so as to adapt to the rotation of the pattern. A corner detection algorithm based on cross entropy of the symmetrical quadrant was proposed to implement the corner position with the accuracy of pixel level by local non-maximum suppression and rectangular selection. Then, the Frostner operator was used to calculate the sub-pixel coordinates of the corners. According to the detected corner, the curve fitting method was employed to realize the automatic corner sorting with the distance information between the corners and the origin. Experiment results show that the corner detection results are correct and the sub-pixel coordinate error between the new method and Matlab Calibration Toolbox is less than 0.8 pixel unit. Moreover, the sorting results show an invariance to the pattern rotation, which verifies that the method is suitable for online auto camera calibration.

收稿日期:2014-05-13;修订日期:2014-06-23.

基金项目:西北工业大学基础研究基金资助项目(No. JCT20130101)

Key words: calibration pattern; corner detection; corner sorting; cross entropy; chessboard pattern

1 引言

室内卫星编队飞行任务通常要求视觉定位系统的定位精度达到毫米级^[1-2],实现这个标定级别的关键是提高相机参数的标定精度。众多标定方法中,最常用的是基于平面标定模板的张正友方法^[3]。该方法依靠多幅标定模板图像对应点之间的坐标关系直接进行相机参数解算^[4],但其前提是预知标定模板多幅图像特征点间的对应关系,而获得它们的对应关系首先要进行角点检测^[5-6]与排序。

黑白棋盘^[7-8]是目前使用最多的标定模板,在此基础上出现了多种角点检测与排序工具。其中,Matlab 相机标定工具箱^[9]使用最广泛,然而在其使用过程中,首先要人工按顺序指定每幅标定模板图像的 4 个边界角点,才能实现角点检测与正确排序,不过这导致标定过程无法自动进行。除此之外,OpenCV 算法库^[10]也提供了较为便捷的角点检测与相机标定库函数,但实际使用时发现,该方法对于偏转角度较大的标定模板图像得到的角点检测结果往往排序混乱,不利于相机参数求解。因此,研究一种可靠、自动的角点检测与排序算法成为实现全自动相机标定的关键。

许多研究人员对经典黑白棋盘进行了改进,以实现角点自动检测与排序。文献^[11]在黑白棋盘四周增加了 4 个长方形边界,基于参考图像和腐蚀算子检测长方形边界,在此基础上,再采用交比不变性原理实现角点定位;文献^[12]在黑白棋盘中增加 5 个沙漏状图形来充分减小立体投影后由图像几何形状变化带来的影响,由于易于确定角点的原点,从而实现了排序;文献^[13]提出了一种以渐进圆形为特征的平面标定模板的设计方案,并给出了特征点检测及排序算法。这些方法均能实现在线角点检测,然而当标定模板图像相对相机光轴的旋转角度超过 90° 时,上述自动排序算法均会失效。主要原因是以上标定模板的角点都是按照上下对称设计的,当模板上下颠倒时,排序结果就会发生变化,从而使得传统检测排序

方法无法有效应对图像旋转带来的角点排序非唯一问题。

本文综合文献^[11]与文献^[12]提出的标定模板特征,提出了一种适合于标定模板大角度旋转的改进黑白棋盘设计,同时给出了相应的角点自动检测与排序算法。

2 黑白棋盘标定模板的改进

为了实现相机自动标定,本文提出的标定模板设计时需满足以下两方面条件:(1)在复杂背景下,角点易于检测;(2)标定模板相对相机光轴旋转时,角点排序结果不会发生变化。

以往的角点检测算法在复杂背景下常常会检测到错误角点,这些噪点通常分布于背景区域。如果能够像 Matlab 标定工具箱那样事先在每一幅标定模板图像中确定出角点分布的有效区域,那么第一个问题就会迎刃而解。另一方面,如引言部分所分析,在大角度旋转下角点排序之所以会出错,是因为角点分布通常都是上下对称的,所以当图像上下颠倒时,其排序结果就会发生变化。如果标定模板的角点分布不满足对称特性,人为指定其角点排序的原点,则第二个问题就可以解决。

基于以上讨论,本文提出一种改进的黑白棋盘设计,如图 1 所示。相比传统设计,新的模板增加了 4 个长方形边界区域以及一个“沙漏状”的图形。将图 1 中两个倒三角的交点处定义为角点排序的原点。

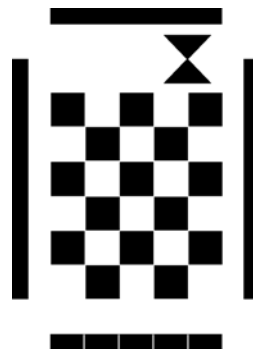


图 1 改进的黑白棋盘结构

Fig. 1 Improved black and white chessboard pattern

3 角点检测算法

3.1 角点特性分析

传统黑白棋盘的内部角点可定义为:两个相间的黑色方格和白色方格的交叉点。对于改进的标定模板,还需要检测“沙漏状”的角点排序原点。

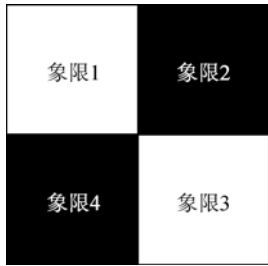


图 2 内部角点局部象限定义

Fig. 2 Local quadrant definition of internal corners

首先,定义像素点的 4 个象限,如图 2 所示。与其他像素点相比,内部角点具有如下特性:

(1)角点相邻象限间像素的灰度差的绝对值最大(对于角点排序原点来说,象限定义需要旋转 45°);

(2)角点对角象限像素的灰度差异最大;

(3)角点局部灰度值变化剧烈,具有最大的灰度梯度值;

(4)内部角点坐标的分布位于图 1 所示的长方形边界以内。

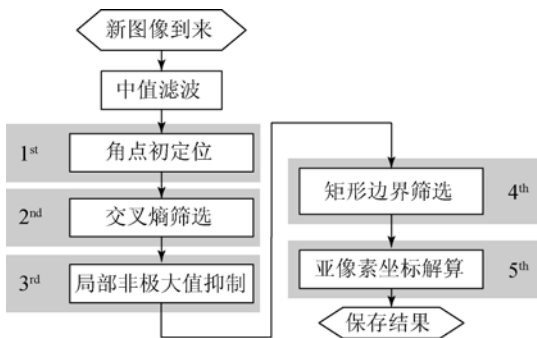


图 3 角点检测算法流程

Fig. 3 Flowchart of corner detection algorithm

据此可以得到角点检测算法流程,如图 3 所示,其包括 5 个步骤:角点初定位,交叉熵筛选,局部非极大值抑制,矩形边界筛选,亚像素坐标解

算。该算法的主要特点是:(1)在传统基于灰度信息的角点检测^[14]方法的基础上引入象限灰度信息距离的度量—交叉熵,以实现精确筛选;(2)采用标定模板矩形区域斜率进行角点筛选,可有效滤除分布于背景区域的噪点。

3.2 角点初定位

定义角点邻域滑动窗 W ,其边长 $l=2s+1$,其中 s 为分布到每个象限的正方形区域的边长。据此对 4 个象限像素灰度和计算如下:

$$\begin{aligned}
 F(i, j)_1 &= \sum_{r=-s}^{-l} \sum_{c=-s}^l f(i+r, j+c), \\
 F(i, j)_2 &= \sum_{r=l}^s \sum_{c=-s}^{-l} f(i+r, j+c), \\
 F(i, j)_3 &= \sum_{r=l}^s \sum_{c=l}^s f(i+r, j+c), \\
 F(i, j)_4 &= \sum_{r=-s}^{-l} \sum_{c=l}^s f(i+r, j+c),
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中: $f(i, j)$ 为像素点 (i, j) 的灰度值, $F(i, j)_k$ 是第 k 个象限的像素灰度和, $k \in \{1, 2, 3, 4\}$ 。

理想情况下,在图 2 所示黑白相邻的象限中,像素灰度差的绝对值为 $255s^2$ 。考虑到图像倾斜投影及 AD 采样噪声,灰度差通常小于该数值。于是得到角点初选规则如下:

$$\begin{aligned}
 |F(i, j)_1 - F(i, j)_2| &\geq \mu \cdot 255s^2, \\
 |F(i, j)_3 - F(i, j)_4| &\geq \mu \cdot 255s^2,
 \end{aligned} \tag{2}$$

其中: μ 表征相邻像素象限灰度值差异程度; s 表征检测窗尺寸。随着 μ 减小,角点检测数量呈非线性增长,根据经验取值 $0.1 \sim 0.3$; s 可以根据图像尺寸及黑白棋盘像素面积确定,通常取值为 5 即可。

对于排序原点的检测,可以将检测窗旋转 45°后,同样按照式(2)进行初选。

3.3 交叉熵角点筛选

交叉熵^[15]用于定量描述 2 个随机分布之间的信息差异。对于角点 (i, j) ,可以得到如下先验公式:

$$f(i-m, j-n) = f(i+m, j+n), 0 \leq m, n \leq s. \tag{3}$$

即小范围内相对角点 (i, j) 对称的像素点的灰度值也对称,也即互相对称的 2 个象限之间的灰度差异最小。据此给出象限之间灰度信息的交叉熵定义如下。

定义 1:针对角点 (i, j) ,其第一象限和第三象

限像素灰度的交叉熵表达为:

$$D_{13}(i, j) = \sum_{m=-s}^{-l} \sum_{n=-s}^l f(i+m, j+n) \cdot \log_2 \frac{f(i+m, j+n)}{f(i-m, j-n)} + \sum_{m=-s}^{-l} \sum_{n=-s}^l f(i-m, j-n) \cdot \log_2 \frac{f(i-m, j-n)}{f(i+m, j+n)}. \quad (4)$$

同理可以得到角点 (i, j) 处第二象限和第四象限的灰度交叉熵 $D_{24}(i, j)$ 。

其中 s 同样取值为 5。对于候选角点进行交叉熵计算时,对应象限灰度值对称特性最好时(此时交叉熵最小),即可实现角点筛选,相关实验结果见第 5 节。

3.4 局部非极大值抑制

为了避免模糊角点附近产生若干个候选角点的情况,本文引入边缘检测思想进行角点精确定位。通常真实角点始终处于图像黑白框的边缘,采用 Canny^[16]算子设计如下非极大值抑制规则:

(1)计算备选角点附近 X 与 Y 方向上的灰度梯度^[17];

(2)根据梯度值计算梯度向量幅值;

(3)选择局部梯度幅值最大的点即为最终的角点像素。

3.5 矩形边界确定

图 1 所示的标定模板中 4 个矩形区域边界具有以下特点:长宽比和面积均远大于黑白方格。限于篇幅,这里仅给出基于 OpenCV 算法库^[18]的矩形边界确定思路:

(1)对图像二值化后进行轮廓检测;

(2)通过长宽比和面积数值筛选得到 4 个矩形框边界;

(3)通过矩形的中心像素坐标确定沿矩形框两条边的中心线及其斜率值 k_1 和 k_2 ,这 4 条直线包围的范围即为角点分布区域,由此可将前面检测出的棋盘范围之外的背景噪点滤除掉。

3.6 亚像素坐标解算

为了达到毫米级定位精度,引入 Forstner^[19]算子来实现亚像素级的角点定位。以下给出亚像素坐标的计算方法:

$$\begin{cases} x' = \frac{ce-bf}{d} \\ y' = \frac{af-be}{d} \end{cases}, \quad (5)$$

其中: (x', y') 是像素点 (x, y) 优化后的亚像素坐

标。各个中间变量的计算方法如下:

$$\begin{cases} a = \sum I_x^2 \\ b = \sum I_x I_y \\ c = \sum I_y^2 \\ d = ac - b^2 \\ e = \sum (I_x^2 \cdot x + I_x I_y \cdot y) \\ f = \sum (I_y^2 \cdot y + I_x I_y \cdot x) \end{cases}. \quad (6)$$

I_x 与 I_y 分别为像素点 (x, y) 在 x 向以及 y 向的灰度梯度。

4 角点排序算法

为了实现基于张正友方法的自动标定,需要在角点检测后进行自动排序研究。

4.1 角点原点的确定

指定图 1 中沙漏图形中心点始终为排序原点(如图 4 所示),其检测方法如下:

(1)如果检测到的角点总数小于 21,则放弃本次获取的图像,重新获取图像进行检测;

(2)如果角点总数大于 21,则说明还有非角点像素需要滤除,此时根据 2.5 节得到的斜率 k_1 和 k_2 对全部角点进行拟合,不在直线上的角点即可删除(此方法可以滤除图 5(e)所示的噪点);

(3)对 21 个角点进行拟合,可以得到 9 条直线。其中短边直线包含有 4 个角点,含有角点原点的长边直线包含有 6 个角点,其余长边直线均含有 5 个角点。由此可确定原点所在的长边直线 L ;

(4)不考虑直线 L 上的角点,计算其余角点的几何中心点坐标,再计算原点所在直线 L 的 6 个角点到中心点的距离,距离最大者即为原点。

4.2 角点排序

确定了角点排序的原点后,定义如图 4 所示的角点排列顺序,由此可得角点排序方法如图 4。

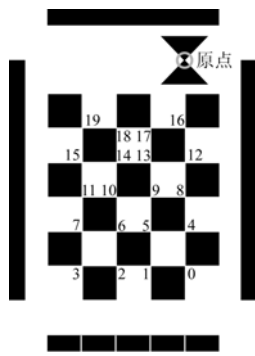


图 4 角点顺序定义

Fig. 4 Definition of corner order

(1)对长边直线 L 上的角点按照距离原点远近顺序分别标为 0 号、4 号、12 号、16 号;

(2)以这 4 个点为起点,按照距离长边直线 L 远近的顺序,进行短边直线上的角点排序。

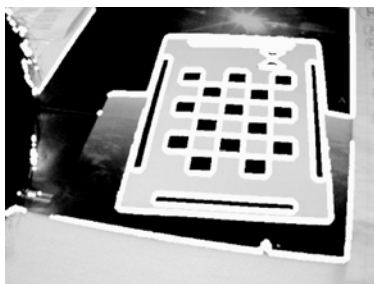
5 实验验证

实验采用的改进棋盘尺寸描述如下:

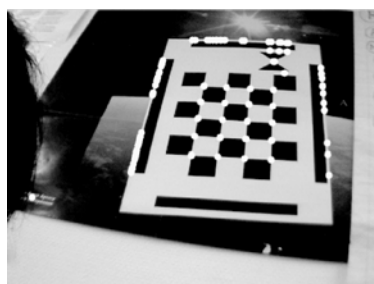
- (1)纸张大小:A3(297 mm×420 mm);
- (2)黑白方格大小:40 mm×40 mm;
- (3)沙漏图形边长:40 mm。

5.1 角点自动检测与排序实验

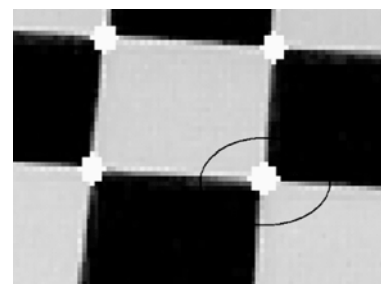
图 5 展示了算法执行过程中每一步的检测效果及其检测角点的个数。从图 5(a)可以看到,角点初选得到的备选角点中包含有非常多的非角点像素;对比图 5(b)可以发现,经过交叉熵筛选后,非角点像素大部分被剔除,证明了该方法非常有效,然而图 5(b)局部放大后,又发现小范围内包含有多个邻近角点;对比图 5(b)和图 5(d)及其检测角点个数的变化,说明非极大值抑制可以滤除小范围内非角点像素;从图 5(e)可以看到矩形边界筛选使得算法更加适用于复杂背景,然而其检测结果中靠近原点附近产生了一个难以滤掉的非角点;图 5(f)展示了最终排序结果,同图 4 中定义的角度顺序完全符合,并且滤除了图 5(e)中的噪点。由此可以说明算法执行结果正确。



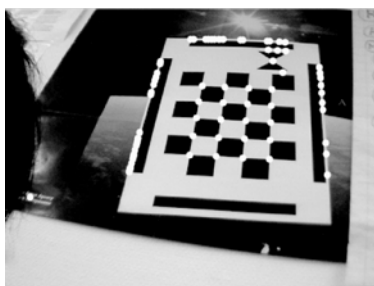
(a)角点初选结果(18 484 个)
(a) Results of crude selection



(b)交叉熵筛选结果(94 个)
(b) Results of cross entropy selection



(c)交叉熵筛选局部放大(邻近角点)
(c) Partial enlarged drawing of (b)



(d)非极大值抑制结果(71 个)
(d) Results of non-maximum suppression



(e)矩形边界筛选结果(22 个)
(e) Results of rectangle bound selection



(f)角点排序结果(20 个)
(f) Final corner sorting results

图 5 角点自动检测与排序结果

Fig. 5 Results of automatic corner detection and sorting

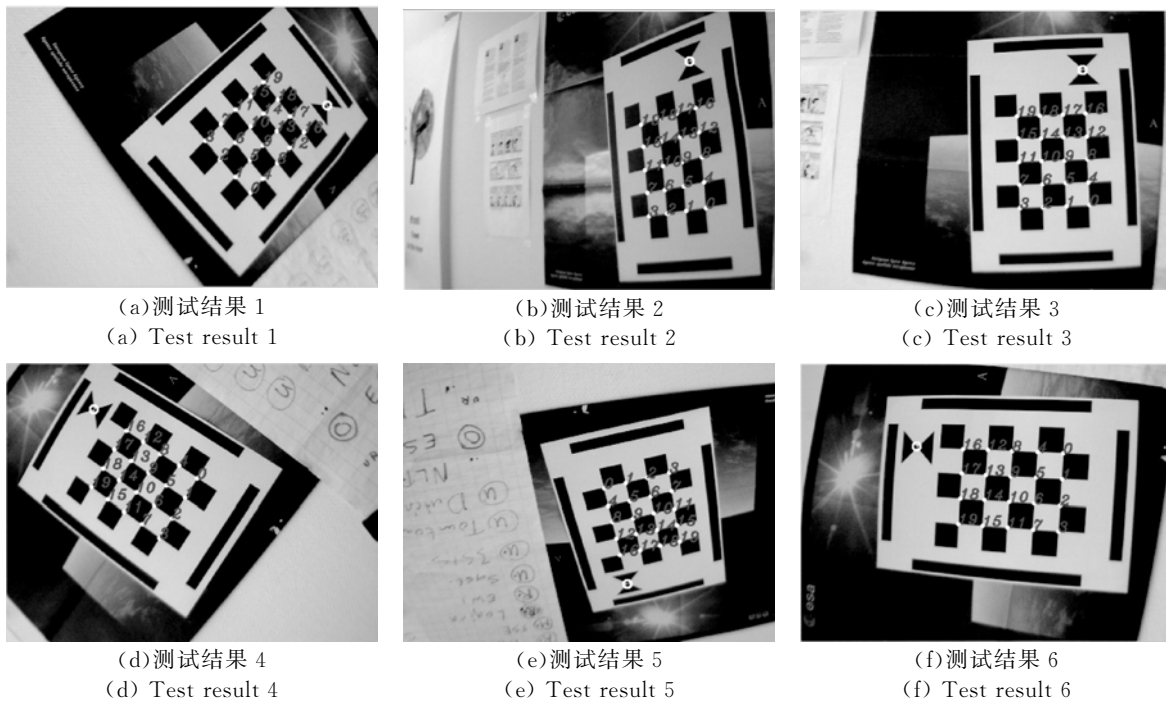


图 6 不同旋转角度下的角点检测与排序结果

Fig. 6 Detection and sorting results with different pattern rotation angles

5.2 角点排序对模板旋转的适应性实验

本文设计的标定模板原理上具有旋转-排序适应性,选取不同旋转角度的标定模板图像对其进行测试,检测与排序结果如图 6 所示。可以看出,对于 $0\sim 360^\circ$ 内的典型旋转场景,本文所提出的角点检测与排序算法均能唯一确定棋盘角点的排列顺序。这样就可以方便地开展相机自动标定。通过在线拍摄不同角度、不同方向的图像,并进行角点排序,再结合张正友方法即可实现相机参数的解算,这即是本文成文的初衷。

5.3 角点检测精度对比试验

对同一幅图像分别采用本文提出的方法和 Matlab 标定工具箱进行角点检测,得到的亚像素坐标如表 1 所示。

对表 1 中所得的 20 对角点的误差距离分别进行计算,其误差绝对值如图 7 所示。由图 7 可知,最大误差不超过 0.8 pixel,由此证明了检测算法的正确性。如果要进一步提高检测精度,可以考虑选用其他高精度的亚像素坐标解算方法^[20],限于篇幅本文未对这部分内容展开研究。

表 1 亚像素坐标对比

Tab. 1 Comparison of sub-pixel coordinates

	本文算法	Matlab 标定工具箱
1	(455.877 1, 257.962 1)	(455.845 9, 257.779 9)
2	(409.813 3, 255.930 2)	(409.669 2, 255.336 7)
3	(364.016 3, 253.114 1)	(363.749 9, 252.491 2)
4	(317.684 8, 250.978 4)	(318.033 7, 250.251 8)
5	(457.321 1, 225.138 5)	(456.745 8, 225.625 0)
6	(412.800 7, 223.198 4)	(412.291 6, 223.065 7)
7	(367.626 7, 220.154 5)	(367.869 9, 219.977 6)
8	(324.035 2, 218.041 4)	(323.954 0, 217.498 1)
9	(457.901 4, 194.989 4)	(457.915 0, 194.934 1)
10	(415.308 0, 192.125 9)	(414.768 6, 192.233 3)
11	(372.013 1, 189.955 8)	(372.058 1, 189.634 0)
12	(330.238 8, 186.794 6)	(330.487 3, 187.376 9)
13	(458.903 7, 166.075 4)	(458.681 4, 165.849 0)
14	(417.699 8, 163.251 7)	(417.383 3, 163.626 2)
15	(375.896 7, 161.002 7)	(375.871 1, 160.792 3)
16	(334.183 6, 158.691 7)	(334.584 1, 158.430 7)
17	(459.993 9, 138.053 0)	(459.650 3, 137.787 5)
18	(419.969 1, 135.845 8)	(419.462 6, 135.937 3)
19	(379.107 8, 133.855 5)	(379.384 7, 133.770 3)
20	(339.966 3, 131.795 3)	(339.525 3, 131.832 5)

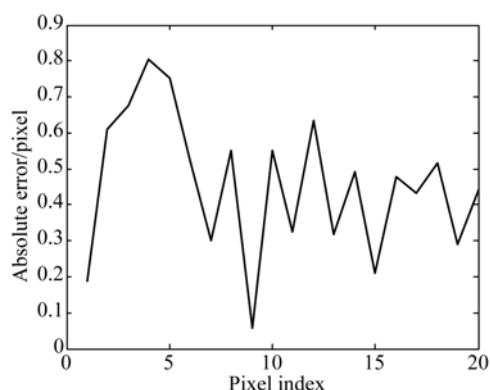


图 7 两种方法的亚像素坐标误差

Fig. 7 Sub-pixel errors of two methods

参考文献:

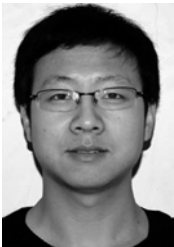
- [1] OSUMAN A. *Multi-robot tested for distributed space system* [D]. The Netherland: Delft University of Technology, 2012.
- [2] ZHAO B, GUO J, GILL E K A. A Camera-based positioning system for the formation flying tested [C] *Proc 63rd International Astronautical Congress*, 2012: 8325- 8333.
- [3] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(10): 1330-1334.
- [4] 张丹,段锦,顾玲嘉,等. 基于图像的模拟相机标定方法的研究 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36 (增): 293-297.
- ZHANG D, DUAN J, GU L J, *et al.*. Method of camera calibration based on image processing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36 (Supp.): 293-297. (in Chinese)
- [5] 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 and Displays*, 2013, 28(6): 939-942. (in Chinese)
- [6] 王飞宇,邱男,贾平. 结合尺度空间 FAST 角点检测器和 SURF 描绘器的图像特征 [J]. *液晶与显示*, 2014, 29(4): 598-604.
- WAGN F Y, DI N, JIA P. Image features using scale-space FAST corner detector and SURF descriptor [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(4): 598-604. (in Chinese)
- [7] 牛海涛,赵勋杰. 采用棋盘格模板的摄像机标定新方法 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40 (1): 133-137.
- NIU H T, ZHAO X J. New method of camera calibration based on checkerboard [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (1): 133-137. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] BOUGUET J. *Visual methods for three-dimensional modeling* [D]. Pasadena: California Institute of Technology, 1999.
- [10] BRADSKI G, KAEHLER A. *Learning OpenCV* [M]. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc., 2008: 370-430.
- [11] SHI X F, HONG N, CAI T F. An automatic and robust chessboard corner extraction [J]. *Transaction on Edutainment VI*, 2011, 6758: 49-56.
- [12] YU C, PENG Q. Robust recognition of checkerboard pattern for camera calibration [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(9): 093201.
- [13] 梁力,尹东斐,王川. 高精度摄像机标定模板的设

6 结 论

本文通过增加长方形边界和“沙漏”状原点,对传统黑白标定模板进行了改进。在此基础上提出了适合相机在线标定的基于交叉熵的角点自动检测算法及相应的自动排序算法。实验结果表明:(1)交叉熵角点检测方法可以有效滤除大量的错误角点,加入矩形框可以有效滤除背景区的噪点;(2)通过指定排序原点,可以使模板在不同旋转角度下,保证排序结果的一致性;(3)亚像素角点检测结果与 Matlab 相机标定工具箱比较误差小于 0.8 pixel,证明了检测算法的正确性。

- 计及识别算法 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(4): 82-85.
- LIANG L, YIN D F, WANG CH. Design and detection methods for accurate camera calibration targets [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, 45(4): 82-85. (in Chinese)
- [14] 王崴, 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)
- [15] LI C, LEE C. Minimum cross entropy thresholding [J]. *Pattern Recognition*, 1993, 26(4): 617-625.
- [16] CANNY J. A computational approach to edge detection [J]. *IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, PAMI-8(6): 679-698.
- [17] 贾平, 徐宁, 张叶. 基于局部特征提取的目标自动识别 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(7): 1898-1905.
- JIA P, XU N, ZHANG Y. Automatic target recognition based on local feature extraction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1898-1905. (in Chinese)
- [18] 黎志华, 李新国. 基于 OpenCV 的红外弱小运动目标检测与跟踪 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2561-2565.
- LI ZH H, LI X G. Infrared small moving target detection and tracking based on OpenCV [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2561-2565. (in Chinese)
- [19] 黄宣达. 摄像机标定中亚像素级角点检测算法 [J]. 计算机与数字工程, 2008, 222(4): 137-139.
- HUANG X D. Sub-pixel corner detection algorithm in camera calibration [J]. *Computer & Digital Engineering*, 2008, 222(4): 137-139. (in Chinese)
- [20] 陈阔, 冯华君, 徐之海, 等. 亚像素精度的行星中心定位算法 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(7): 1881-1890.
- CHEN K, FENG H J, XU ZH H, *et al.*. Sub-pixel location algorithm for planetary center measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1881-1890. (in Chinese)

作者简介:



赵斌(1986—),男,陕西周至人,博士,讲师,2007年,2011年于西北工业大学航天学院分别获得学士、博士学位,主要从事飞行器制导控制及半实物仿真方面的研究。E-mail: b.zhao_npu@hotmail.com



周军(1966—),男,江苏常州人,博士,教授,博士生导师,1988年,1993年于西北工业大学分别获得学士、博士学位,1995年于中国空间技术研究院一站博士后出站,1997年于西北工业大学二站博士后出站,现为陕西省微小卫星工程实验室主任,主要从事飞行器制导控制及先进控制理论的研究。E-mail: Zhoujun@nwpu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)