

一种新的棋盘格图像角点检测算法

刘阳成^{1), 2)} 朱 枫¹⁾

¹⁾ (中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016) ²⁾ (中国科学院研究生院, 北京 100080)

摘 要 鉴于棋盘格图案在摄像机标定中有着广泛的应用, 因此为了对边缘模糊的棋盘格图像进行在线标定, 针对目前棋盘格图像角点检测算法的局限性, 提出了一种可以自动实现的棋盘格图像角点检测算法, 该算法是利用周围图案对称和灰度值对比明显的独特性质, 设计了由对称算子 S 和方差算子 V 组合而成的角点检测算子——对称方差算子 (symmetry and variance), 简称 SV 算子。该算子不仅构思巧妙、易于实现、计算量小, 而且对棋盘格图像的旋转变换和亮度变换具有鲁棒性和抗噪能力强的优点。实验结果表明, 该算子对边缘模糊有良好的适应性, 适用于摄像机的在线标定。

关键词 棋盘格 角点检测 边缘模糊 摄像机标定 Harris 算子

中图法分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2006)05-0656-05

A New Algorithm for X-corner Detection

LIU Yang-cheng^{1), 2)}, ZHU Feng¹⁾

¹⁾ (Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016)

²⁾ (Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract X-corner patterns are most widely used in camera calibration. In order to do online calibration for blurred image, we propose a new algorithm for X-corner detection based on the special character of X-corners: the pattern is symmetrical and the gray contrast greatly with each other. In the algorithm the operator SV is designed to recognize X-corners which consists of symmetry operator S and variance operator V . The method is smart, easy to execute and robust to rotation, intensity change. It is also robust to image noise and edge blur where the intervention of man is not required. Experimental results show that the proposed algorithm can achieve excellent effects in X-corners detecting. in on line camera calibration.

Keywords X-corners, corner detecting, edge blur, camera calibration, Harris detector

1 引言

众所周知, 角点是图像中的强特征点, 其对图像处理、匹配、计算机视觉具有重要的作用^[1~4]。不同类型的角点有不同的特点, 但目前已有的大多数角点检测算法都是针对一般角点的通用算法^[1~3, 5], 而棋盘格角点作为一种特殊的角点, 也已被广泛地应用于摄像机标定中。由于对棋盘格角点的检测只是在通用角点检测算法的基础上, 进行了一些改进^[2, 6], 因此计算量通常比较大。实际应用中有另

一类算法虽计算速度较快, 但由于这些方法在实现过程中, 一般需要通过人机交互的方式输入一些信息, 例如在 Matlab 工具箱中, 要求指出棋盘格的最外面的 4 个角点, 因此仅适用于离线标定, 而对无法进行人工输入的在线标定则无能为力。

笔者通过仔细观察, 发现了棋盘格角点一些独特的性质, 同时跳出了经典角点检测思路, 并针对棋盘格角点提出了一种新的检测算法, 即 SV (symmetry and variance) 算法。该算法不仅原理简单、计算量小, 无需人工参与检测, 而且对旋转、尺度、灰度等变化具有鲁棒性, 同时能够抵抗噪声和边

基金项目: 国家高技术研究发展计划“863 计划”项目 (2002AA401001-4A)

收稿日期: 2005-05-10; **改回日期:** 2005-07-12

第一作者简介: 刘阳成 (1980 ~), 男。2003 年获河南大学学士学位, 现为中国科学院沈阳自动化研究所模式识别与智能系统专业硕士研究生。研究方向为图像处理、计算机视觉。E-mail: liuych@sia.cn

缘模糊现象,因而具有较高的实用价值。

本文首先分析了常用角点检测算法在检测棋盘格角点方面的局限性,然后介绍了SV算法的设计思路,同时分析了SV算法的性能,并和Harris角点检测算法进行了对比,最后给出了实验结果。

2 棋盘格图像与角点检测

棋盘格图像是进行摄像机标定时最常用的图像,由黑白相间的正方形组成,并以角点作为特征点。典型的棋盘格图像如图1所示。

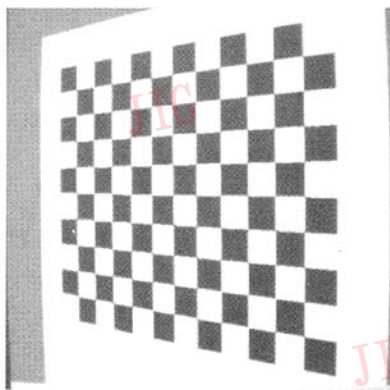


图1 棋盘格图像

Fig.1 The X-corners image

角点被认为是物体边界曲线上的曲率极大值点。由于早期的角点检测算法主要是根据该定义,通过计算检测边缘的离散曲率,以边缘方向改变的剧烈程度来评估角点的可能性大小,因此其性能需依赖于边缘检测的效果。在图像不是特别复杂的情况下,这种方法经过改进还是能够取得较好效果的^[7]。随后又发展了基于图像亮度对比的方法,主要有SUSAN (smallest univalue segment assimilating nucleus) 角点检测算法和Harris角点检测算法^[3],近年来又发展了基于小波^[8]以及形态学的角点检测算法。

SUSAN算法提出了吸收核同值区的概念,即在图像上移动的圆形模板,若模板内的像素灰度与模板中心的像素灰度差值小于给定的门限,则认为该点与中心点是同值的,而由满足这样条件的像素组成的区域则叫做吸收核同值区USAN (univalue segment assimilating nucleus)^[1]。SUSAN角点检测算法的核心思想是:平坦区域像素点的USAN值最大,边界点次之,角点最小,而且角点越尖,吸收核同值区越小

(如图2所示)。在棋盘格图像中,边界点与棋盘格角点的USAN都约为圆形模板的一半大小,这就给棋盘格角点的识别带来了困难(如图2所示)。

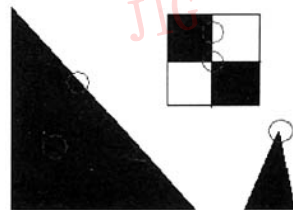
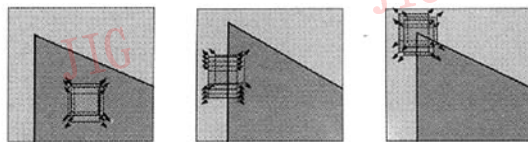


图2 SUSAN算法原理及其缺陷

Fig.2 The SUSAN algorithm and it's limitation

Harris角点检测算法的基本思想是^[3]:通过移动一个小窗口观察窗口内像素灰度变化来识别角点,这种窗口对于平坦区域,在任意方向都没有灰度变化(图3(a));对于边界点,沿边界方向也没有灰度改变(图3(b));而对于角点,则在任意方向移动窗口均会发生较大的灰度改变(图3(c))。



(a) 平坦区域

(b) 边界点

(c) 角点

图3 Harris角点检测原理示意图

Fig.3 Harris corner detector

Harris角点检测算法利用差分及实对称矩阵的性质,推导出的移动窗口灰度变化仅与由窗口内各点处的梯度组成的二阶矩阵有关,而且通过该二阶矩阵的特征值和迹即可识别角点。Harris算子的窗口一般取高斯窗口。Harris算子由于要涉及到高斯滤波、计算梯度,以及计算矩阵行列式和迹^[3],因此计算量较大。

3 本文提出的角点检测算法

由于棋盘格图像在摄像机标定中的重要作用,为此本文提出了一种针对棋盘格角点的检测算法——SV棋盘格角点检测算子。其设计思路如下:棋盘格角点周围,关于棋盘格角点中心对称的像素点灰度值都比较接近,而边界点和非棋盘格角点,其关于中心点对称的像素点的灰度值则有较大差异。如图4所示,图中A与 $\hat{A}$ 关于B对称。由此可引出

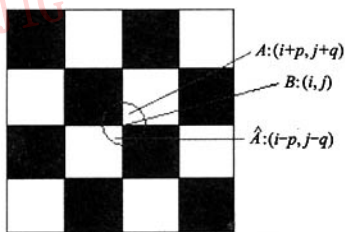


图 4 棋盘格角点对称示意图

Fig. 4 The pattern is symmetrical around X-corners

用于棋盘格角点检测的第 1 个算子,本文称之为对称算子(symmetry operator)。对于每个像素 $I(i, j)$,将以该像素为中心的窗口记为 W ,该窗口可以是方形、圆形甚至是正多边形,定义对称算子的响应值为窗口 W 中关于 (i, j) 对称的每一对像素的灰度差绝对值的均值,其用公式表达如式(1)所示。 n 为窗口 W 中像素的数目。实际计算时,式(1)中的求和项只需计算一半即可。

$$C^S(i, j) = \left(\sum_{(i+p, j+q) \in W} |I(i+p, j+q) - I(i-p, j-q)| \right) / n \quad (1)$$

对于棋盘格角点,对称算子响应值 C^S 较小;而对于边界点,由于边界一边像素灰度值大,另一边像素灰度值小,故在边界点的对称算子响应值 C^S 比较大。 C^S 反映了以该像素为中心的小窗口像素灰度分布的空间对称性。

但仅靠 C^S 还不能识别出棋盘格角点,因为在平坦区域像素的对称算子响应值也比较小,故又引出用于棋盘格角点检测的第 2 个算子,称为方差算子(variance operator)。方差算子主要用于剔除平坦区域的像素点,由于这些像素点所在的窗口内像素灰度的方差比较小,故可以设计方差算子的响应值为反映周围像素灰度值变化剧烈程度的灰度方差,其用公式表达如式(2)所示。

$$C^V = \sum_{(i, j) \in W} (I(i, j) - \bar{I})^2 / (n - 1) \quad (2)$$

其中, $\bar{I}$ 为窗口 W 中像素的灰度平均值, n 为窗口 W 中像素的数目。对于平坦区域的像素,其方差算子的响应值 C^V 较小,而边界点和棋盘格角点的方差算子响应值 C^V 则较大。

然后根据对称算子响应值和方差算子响应值即可识别出棋盘格角点:棋盘格角点为对称算子的响应值较小,但方差算子的响应值较大的点。至此就可以得到本文提出的检测棋盘格角点的 SV 算子,

SV 算子响应值定义为 $C^{SV} = k \times V - S$, k 为经验常数,一般取 0.1~0.5。设定阈值 C_{min}^{SV} ,则棋盘格角点为 $C^{SV} > C_{min}^{SV}$,且是 C^{SV} 值局部最大的点。

4 SV 棋盘格角点检测算法的实现、分析、改进及实验结果

根据第 3 节的叙述,算法的实现流程描述如下:

(1)遍历计算图像中每个像素点的 SV 算子的响应值 C^{SV} 。

(2)遍历图像中的像素,如果 $C^{SV} > C_{min}^{SV}$ 且 C^{SV} 局部最大,那么该点为棋盘格角点。

关于算法的两点说明:

①窗口 W 要小于图像中上下左右 4 个相邻棋盘格的大小,即窗口最多覆盖 4 个棋盘格。窗口 W 适当较大,虽然可以提高检测精度,但会增大计算量,一般取 3×3 到 7×7 即可。

②计算 S 时,若取窗口 W 的宽度为奇数,则窗口中心点 (i, j) 为整数,此时直接按照式(1)计算即可;若取窗口 W 的宽度为偶数,则窗口中心点 (i, j) 不为整数。此时应用式(1)计算时,由于计算的不是与某个像素点对应的对称算子的响应值,而是滑动窗口的中心点 (i, j) 的对称算子的响应值,因此只要求式(1)中 $(i+p, j+q)$, $(i-p, j-q)$ 为整数即可。

SV 算法综合运用了对称算子 S 和方差算子 V ,由于对称算子 S 可以显著地把平坦区域像素点和棋盘格角点检测出来,而方差算子 V 又能够有力地剔除掉平坦区域像素点,因此 SV 算法对棋盘格角点有较好的识别能力。由于 SV 算法本身利用的是对称性,因此天然具有旋转不变性,而且由于其利用的是统计信息,因此还可增强抗噪声能力。另外,对于图像整体灰度的变化: $I(i, j) \rightarrow I(i, j) + b$,根据式(1)和式(2)可知,SV 值保持不变,即 SV 算法对图像整体明暗程度的变化具有鲁棒性。

实际成像时,边缘和角点处可能发生模糊。仿真实验表明:在这种情况下,本文提出的 SV 算子比 Harris 算子能够更加准确地定位棋盘格角点。实验图像中含有 32×32 的棋盘格,实验时,首先对图像进行 3×3 的均值滤波,然后通过叠加均值为 0,方差为 0.001 的高斯白噪声来得到模糊图像。图 5 为模糊图像的一部分,实际角点位置在 A 点,而用 Harris 算法进行角点检测的结果是 A_1 点或者 A_2 点的响应最大,同时检测出 A_1 和 A_2 或者仅检测出一个,这都不符合

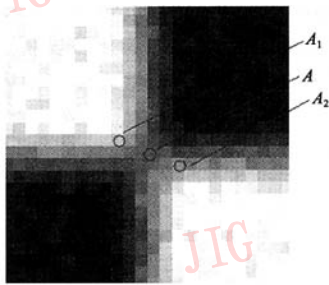


图 5 Harris 定位精度

Fig.5 The precision of Harris algorithm

要求。而 SV 算法则可以保证检测结果在 A 点附近 (误差小于一个像素)。表 1 ~ 表 3 给出了对左上角

坐标为(60,60),右下角坐标为(69,69)的局部图像及处理结果数据。其中,表 1 为局部图像像素灰度值,灰度分为 256 个灰度级。理想角点位置在表 1 中 4 个加粗斜体下划线数字所在的区域的中心。表 2 为按照 Harris 算法计算的 Harris 响应值(缩小了 10^5 倍)。表中与 4 个加粗斜体的数字对应的像素为 Harris 算法响应值最大的 4 个点。Harris 角点检测算法认为,算法响应值大的点具有较大的角点可能性。表 3 为按照 SV 算法计算的 SV 响应值($C^{SV} = k \times V - S, k = 0.35$,表 3 中的数据缩小了 10^3 倍)。表 3 中 4 个与加粗斜体下划线的数字对应的像素为 SV 算法响应值最大的 4 个点。与表 2 对比可知,SV 算法检测的角点更接近实际角点。

表 1 局部图像灰度值

Tab. 1 The gray of local image

	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
60	251	255	248	215	171	124	88	68	59	45
61	247	251	255	208	171	140	101	74	42	44
62	255	242	245	201	166	120	95	76	56	61
63	208	213	201	179	174	133	105	91	88	102
64	176	186	168	159	144	142	148	141	138	113
65	119	119	121	144	135	153	153	169	187	186
66	102	89	98	105	136	152	188	211	210	214
67	68	72	63	94	127	163	198	241	255	233
68	48	62	55	78	124	168	221	240	236	253
69	58	43	56	71	134	177	195	243	255	244

表 2 Harris 算子响应值

Tab.2 The response of Harris detector

	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
60	0.634 5	0.944 1	1.081 3	0.998 7	0.893 7	0.925 1	0.979 3	0.875 0	0.617 3	0.348 8
61	0.975 2	1.469 2	1.721 1	1.656 7	1.535 2	1.561 6	1.578 6	1.352 3	0.917 1	0.488 1
62	1.142 2	1.759 7	2.093 8	2.055 5	1.939 1	1.973 3	1.965 2	1.642 5	1.068 0	0.516 0
63	1.061 4	1.708 9	2.078 0	2.071 1	1.980 3	2.040 6	2.044 7	1.696 1	1.064 8	0.457 7
64	0.922 8	1.559 8	1.951 1	1.982 8	1.924 0	2.014 0	2.053 1	1.724 2	1.082 0	0.450 5
65	0.903 3	1.531 5	1.946 5	2.012 2	1.970 8	2.067 2	2.123 4	1.815 0	1.176 9	0.535 2
66	0.917 8	1.502 1	1.896 2	1.958 1	1.905 5	1.975 9	2.021 9	1.745 0	1.167 8	0.582 7
67	0.795 6	1.254 9	1.548 4	1.561 6	1.486 0	1.524 5	1.562 0	1.358 9	0.928 8	0.491 1
68	0.540 6	0.822 9	0.973 3	0.928 5	0.846 0	0.873 2	0.922 4	0.821 8	0.573 9	0.314 6
69	0.284 9	0.410 5	0.441 5	0.361 3	0.290 9	0.324 5	0.394 9	0.383 0	0.280 0	0.158 6

表 3 SV 算子计算的响应值

Tab.3 The response of SV detector

	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
60	-0.437 5	-0.706 5	-1.216 7	-1.602 7	-1.719 6	-1.678 6	-1.509 5	-1.214 8	-0.860 6	-0.549 0
61	-0.721 9	-0.811 4	-1.140 4	-1.516 0	-1.600 9	-1.513 8	-1.418 6	-1.200 8	-0.946 3	-0.732 3
62	-0.983 8	-1.051 9	-1.191 0	-1.315 0	-1.302 2	-1.199 6	-1.184 6	-1.122 4	-1.072 7	-1.022 7
63	-1.273 4	-1.211 2	-1.138 0	-0.952 4	-0.681 3	-0.587 5	-0.824 4	-1.027 5	-1.154 5	-1.191 7
64	-1.297 5	-1.254 9	-1.052 5	-0.606 4	0.079 4	0.292 3	0.398 1	-0.908 9	-1.237 7	-1.328 0
65	-1.272 2	-1.184 4	-0.966 9	-0.492 7	0.142 6	0.089 3	-0.516 7	-1.004 9	-1.222 8	-1.344 5
66	-1.215 7	-1.167 2	-0.992 6	-0.873 6	-0.640 1	-0.759 7	-0.993 5	-1.116 5	-1.174 0	-1.135 7
67	-1.055 7	-1.054 1	-1.055 8	-1.192 6	-1.252 7	-1.390 2	-1.318 9	-1.178 1	-1.031 9	-0.921 7
68	-0.711 7	-0.884 5	-1.074 3	-1.455 9	-1.583 1	-1.623 3	-1.509 9	-1.163 7	-0.842 8	-0.700 2
69	-0.480 0	-0.799 5	-1.106 5	-1.494 4	-1.720 3	-1.692 6	-1.585 4	-1.167 5	-0.742 3	-0.491 7

由上述数据可以看出,在图像发生模糊的情况下,用 SV 算法检测棋盘格角点的效果比用 Harris 算法更加准确和稳定。

SV 算法的改进:SV 算法在具体实现过程中,还可以通过适当的改进来提高运算速度,即可以首先计算 C^s ,当 $C^s < C_{\max}^s$ 时才计算该点的 C^v 和 C^{sv} ,或者先计算 C^v ,当满足 $C^v > C_{\min}^v$ 时,才计算 C^s 和 C^{sv} 。 $C_{\max}^s$ 与 $C_{\min}^v$ 为设定的两个阈值。在计算 C^v 时,可以利用前一个像素的计算结果,以加快计算速度。若在本算法的基础上加以改进,则可以检测亚像素精度的棋盘格角点。改进的方法是,首先对检测出的棋盘格角点周围的一个小窗口内的像素进行插值,然后对插值后的局部图像再进行本算法的棋盘格角点检测,即可检测出亚像素精度的棋盘格角点。实验结果如图 6 所示。

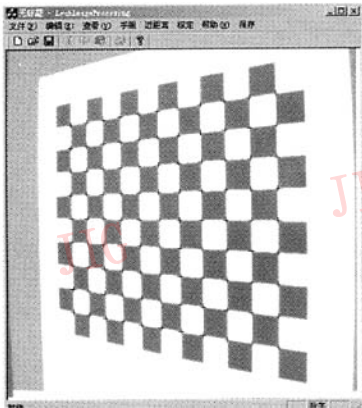


图 6 实际检测效果

Fig. 6 The result of SV X-corner detector

5 结 论

SV 算法构思巧妙、计算量小,不仅对旋转变换、亮度整体变化具有不变性,而且抗噪声效果好、定位准确。当然它也有一些缺陷,主要是通用性差和会对某些图案产生误检。由于 SV 算法是针对棋盘格角点的,故不能检测其他类型的角点。另外,SV 算法在棋盘格图案中也不能检测出外围的角点,但由于这部分角点仅占全部角点的一小部分,且由于远离图像中心的部分畸变更加明显,因此对应用影响

不大。另外,图像中如果有类似图 7 的情况,则也会误认为是棋盘格角点。但由于在实际棋盘格图像中这类图案较少,因此 SV 算法在实际中还是可行的。

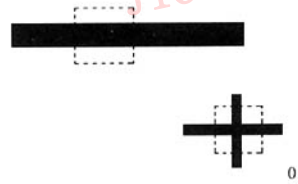


图 7 误检情况

Fig. 7 The case of error detectin

参考文献 (References)

- 1 Yang Hao-jun, Zhang Gui-lin. Feature correlation tracking algorithm using SUSAN operator[J]. Infrared and Laser Engineering, 2000, 29(4): 34 ~ 37. [杨焯均, 张桂林. 利用 SUSAN 算子的特征复合相关跟踪算法[J]. 红外与激光工程, 2000, 29(4): 34 ~ 37.]
- 2 Hu Hai-feng, Hou Xiao-wei. A new algorithm for automatically detecting chessboard corners [J]. Computer Engineering, 2004, 30(14): 19 ~ 21. [胡海峰, 侯晓微. 一种自动检测棋盘角点的新算法[J]. 计算机工程, 2004, 30(14): 19 ~ 21.]
- 3 Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector[A]. In: Proceedings of the Fourth Alvey Vision Conference [C], Manchester, England, 1988: 147 ~ 151.
- 4 Zhang Peng-lin, Zhang Chun-lin, Guan Ze-qun, et al. Corner finder of digital image without threshold[J]. Computer Engineering, 2004, 30(14): 22 ~ 23. [张鹏琳, 张春林, 关则群等. 数字映像中目标角点定位的无阈值算法[J]. 计算机工程, 2004, 30(14): 22 ~ 23.]
- 5 Chen Da-zhi, Zhang Guang-jun. A new sub-pixel detector for X-corners in camera calibration targets[A]. In: WSCG 2005 Short Papers proceedings [C]. Plzen-Bory, Czech Republic: UNION Agency-Science Press, 2005: 97 ~ 101.
- 6 Wang Jian-qi, Deng Yan-ping, Li Jie-gu. An improved approach for corner detection[J]. Journal of Shanghaijiaotong University, 2000, 34(7): 913 ~ 916. [王建琦, 邓雁萍, 李介谷. 一种改进的角点提取方法[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(7): 913 ~ 916.]
- 7 Qiao Yu, Huang Xi-yue, Chai Yi, et al. Corner point detection based on adaptive line approximation [J]. Journal of Chongqing University, 2003, 26(2): 29 ~ 31. [乔宇, 黄席越, 柴毅等. 基于自适应直线拟合的角点检测[J]. 重庆大学学报, 2003, 26(2): 29 ~ 31.]
- 8 Peng Xiao-ming, Zhang Qi-heng. An angular point extracting method based on wavelet transform[J]. Opto-Electronic Engineering, 2000, 27(1): 48 ~ 51. [彭晓明, 张启衡. 一种基于小波变换的角点提取方法[J]. 光电工程, 2000, 27(1): 48 ~ 51.]