

摄像机在线标定中的棋盘格角点自动检测方法

郝颖明^{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 100039)

摘要: 针对摄像机在线标定的特殊需要, 研究棋盘格角点的自动检测问题。利用棋盘格角点共面特点, 将平面到平面的变换引入到角点检测中, 实现了角点的自动粗定位。在粗定位窗口内, 通过角点检测算子与区域能量中心共同实现了角点精确定位。该算法将角点的检测与排序巧妙地结合起来, 不仅对全局和局部光照变化都具有较强的适应性, 还解决了图像中某些角点检测失败时, 其他角点的正确检测与排序问题。实验结果表明, 该方法不仅在鲁棒性和检测精度方面高于常用棋盘格角点检测方法, 而且全部处理过程可自动实现, 在摄像机在线标定中具有很高的实际应用价值。

关键词: 摄像机标定; 棋盘格角点; 亚像素

Automatic X-corners Detection for Online Camera Calibration

HAO Ying-ming^{1,2}, ZHU Feng¹

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

【Abstract】 This paper investigates the problem of automatic X-corners detection aiming at online camera calibration. Since X-corners are coplanar, a plane-to-plane transform is introduced and rough location of X-corners is realized. Within the area of rough location, X-corners detection operator and the energy center of the area to obtain the accurate location are utilized. This method is applicable in both whole and local illumination owing to integrating the extraction and arrangement of the corners. In addition, when some corners are unable to be detected, others can be detected and arranged correctly. The presented method is automatic, accurate and robust in automatic online camera calibration.

【Key words】 camera calibration; X-corners; subpixel

1 概述

摄像机标定作为视觉测量的首要条件, 旨在建立图像坐标系与空间坐标系间的变换关系。一般情况下, 摄像机标定可以离线进行, 对处理速度和自动化程度要求不高。但航空和水下等特殊领域则对摄像机标定提出了更高的要求, 不仅要全自动在线进行, 还要对各种环境变化具有很好的鲁棒性。

摄像机标定一般包括图像特征点的检测和摄像机参数求解 2 个步骤。棋盘格图像作为典型的标定图像, 在摄像机标定中得到了广泛的应用, 其角点检测也成为计算机视觉的热点问题之一。对于棋盘格图像来说, 图像特征点检测的任务不仅要提取出棋盘格图像中各角点的图像坐标, 还要在各图像角点与空间角点之间建立一一对应关系(简称排序)。目前, 棋盘格角点检测方法可分为两类: 直线检测法和角点检测算法。直线检测法先进行边缘提取、直线检测和拟合, 再通过两条直线交点求角点的精确坐标^[1]。其特征点排序简单, 但处理时间长, 且当镜头有畸变时, 检测结果会产生较大的误差。角点检测算法利用角点附近区域灰度变化的特点设计不同的角点检测算子, 如SUSAN算子和Harris算子^[2]等, 根据角点检测算子的响应值大小来确定角点, 但由于各种角点检测算子只能检测到像素级, 需要进一步进行亚像素角点提取。因此, 角点检测算法需同时解决角点检测算子、响应值的阈值、亚像素角点提取 3 个问题。在角点检测算子方面, Harris算子作为一种通用算子在定位性和鲁棒性上具有优势^[3], 但计算量较大。SV算子^[4]则是一种专用棋盘格角点检测算子, 具有计算量小、抗噪能力强的特点。在响应值阈值方

面, 最简单的方法是以模板的角点数来确定响应值阈值, 但如果图像照度不均或棋盘格出视场, 则会产生误识。通过直线求交点来确定角点初始位置的方法^[5]虽可避免误识, 但运算复杂度较高。在亚像素角点检测方面, Forstner算子^[5]的计算量较大, 二次多项式逼近法^[6]虽实现简单, 但精度不高。由此可见, 棋盘格角点检测方法虽有多种, 但都无法满足全自动在线检测的要求。本文针对全自动在线标定的需要, 提出了一种新的棋盘格角点检测方法。该方法首先选择专用角点检测算子——SV算子; 引入平面到平面的变换实现角点粗定位; 最后以区域能量中心作为角点精确位置, 将像素级角点检测和亚像素级角点检测合二为一。不仅减小了角点检测算子的计算量, 对不同的粗定位窗口还可以采用不同的阈值, 从而提高算法的鲁棒性。本文重点介绍该算法的实现技术和实验结果。

2 角点检测算子

本文采用专为棋盘格图像角点检测而开发的, 对棋盘格图像的旋转变换和亮度变换具有很好鲁棒性的检测算子——SV算子进行角点检测, 该检测算子在文献[4]中已有详细描述, 这里仅作简单介绍。

SV算子定义为

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60575024)

作者简介: 郝颖明(1966-), 女, 副研究员, 主研方向: 图像处理, 计算机视觉, 三维测量; 朱枫, 研究员

收稿日期: 2007-04-24 E-mail: ymhao@sia.cn

$$SV = k * V - S \quad (1)$$

其中, k 为经验常数, 一般取 0.1~0.5; S 称为对称算子, 反映了棋盘格角点周围像素灰度分布的对称性, 如式(2)表示; V 称为和方差算子, 反映了棋盘格角点周围像素灰度值变化的剧烈程度, 如式(3)所示; 在棋盘格角点处, SV 算子的响应值最大。

$$S(i, j) = \left(\sum_{(i+p, j+q) \in w} |I(i+p, j+q) - I(i-p, j-q)| \right) / n \quad (2)$$

$$V(i, j) = \sum_{(i, j) \in w} (I(i, j) - \text{mean})^2 / (n-1) \quad (3)$$

其中, (i, j) 为中心像素的图像坐标; $I(i, j)$ 为其灰度值; w 为以其为中心的窗口; n 为 w 内像素数目; mean 为 w 内像素灰度均值。

3 角点精确定位

棋盘格角点 SV 算子的响应值在角点处最大, 在平坦处较小。如设一阈值 SV_{min} , 则棋盘格角点可以定义为 $SV > SV_{min}$ 的局部最大点。但这样只能将角点坐标的定位精度局限在像素级, 无法得到其精确位置。实际上, 在最大值的附近, SV 算子响应值的变化是一个渐进的过程。如把各点 SV 算子响应值作为图像的灰度值形成一幅图像(如图 1 所示), 则图像中每个棋盘格角点都对应一个明显的高亮度区域。

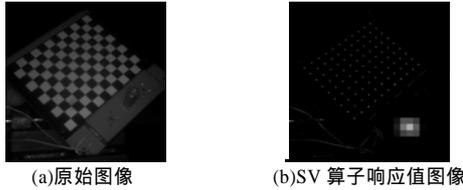


图 1 棋盘格图像的 SV 算子响应值图像

图 1(b) 在右下角给出了某一角点 SV 算子响应值图像的放大显示。从图中可以看出, 角点响应值在一个小的区域内较大, 因此计算角点精确位置不仅要考虑响应值最大的像素点的坐标, 还要考虑其邻域内其他像素的响应值和位置。如将 SV 算子响应值最大的像素位置作为角点的初始位置, 则在 SV 算子响应值图像中, 以该初始位置为种子点, 以 T_g 为阈值作区域生长, 就能得到一个角点区域 A 。根据统计特性, 该角点区域的能量中心可作为角点的精确位置。设角点区域 A 内任意点的图像坐标为 (i, j) , 响应值为 $C(i, j)$, 则角点精确位置为

$$\begin{cases} u = \frac{\sum_{(i, j) \in A} i \times C(i, j)}{\sum_{(i, j) \in A} C(i, j)} \\ v = \frac{\sum_{(i, j) \in A} j \times C(i, j)}{\sum_{(i, j) \in A} C(i, j)} \end{cases} \quad (4)$$

因此, 只要得到了 SV 算子响应值图像, 就可以通过图像处理的方法求出各角点精确位置。但对于实际的棋盘格图像, 由于噪声和各种干扰的存在, SV 算子响应值大的点只能作为棋盘格角点的候选点, 不一定就是棋盘格角点。如何在这些候选点中找到真正的棋盘格角点, 并在图像角点与实际的棋盘格角点之间建立一一对应关系, 这是在线自动识别必须解决的一个棘手问题。

4 角点初定位

为实现棋盘格角点的自动识别, 可利用棋盘格角点的共面约束, 将平面到平面间的变换引入到角点识别中, 自动计

算出所有角点可能出现的位置。

当不考虑摄像机畸变时, 棋盘格角点在模板平面上的空间坐标 (x_i, y_i) 和图像平面上的坐标 (u_i, v_i) 间满足

$$\begin{bmatrix} u_i t \\ v_i t \\ t \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, M 为 3×3 的变换矩阵, 在实际应用中, 常设 $m_{33} = 1$, 则 M 共有 8 个未知数。根据式(5), 每个角点可以写成 2 个关于 M 的线性方程, 为求解 8 个未知数, 必须同时已知至少 4 个角点的图像坐标和空间坐标。棋盘格角点的空间坐标可根据各角点在棋盘格模板上的位置直接写出, 由于相邻角点间的空间距离相等, 为简化计算假设该距离为 1, 则角点的空间坐标都为整数, 而图像坐标可通过图像处理得到。

在实际应用中, 首先要识别出棋盘格图像中任意一个小方块的 4 个顶点的图像坐标 (u_i, v_i) , 并假设这 4 个顶点在模板平面上的空间坐标分别为 $\{(0,0), (0,1), (1,1), (1,0)\}$ 。利用式(5), 就可以求解出 M 矩阵的初始值。其中小方块的 4 个顶点的识别需要借助于棋盘格模板的约束, 包括相邻顶点间的距离范围约束、两对角线间的夹角约束等。由于摄像机畸变的影响, 用局部点计算得到的矩阵 M 很难适用于整幅图像, 但适用于 4 个种子点所在网格行和网格列。利用该初始值分别检测出 4 个种子点所在的网格行和网格列上所有角点的坐标, 可进一步求出矩阵 M 的精确值。

一旦求得 M 矩阵的精确值, 只要给定空间坐标, 就可由式(5)计算出棋盘格模板上任意点的图像坐标。在实际应用中, 首先假设图像 4 个顶点的坐标分别为 $\{(0,0), (0, N-1), (N-1, N-1), (N-1, 0)\}$, 其中 N 为摄像机的分辨率, 利用式(6)可求出这 4 个顶点的空间坐标 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)\}$, 再根据角点空间坐标为整数的假设, 计算出角点空间坐标的变化范围 (x_l, x_r) 和 (y_l, y_b) 。在空间平面的上述变化范围内, 令纵横坐标以 1 为步长变化, 得到一组网格点, 这组网格点就是棋盘格角点在空间平面上的可能位置。从而利用式(5)计算出各网格点的图像坐标, 作为图像平面上棋盘格角点的初定位位置。

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} u_i t \\ v_i t \\ t \end{bmatrix} \quad (6)$$

角点初始位置确定后, 可以只在以该初始位置为中心的一个小窗口内计算 SV 算子。并在该小窗口内求 SV 算子响应值的最大值, 如果该最大值小于某一给定阈值 T_{SV} , 则认为该窗口内没有角点, 否则有角点, 并进一步计算角点的精确位置。

由于角点的初始位置是根据棋盘格角点的空间坐标计算出来的, 其空间位置与图像坐标间的对应关系不受角点检测结果的影响, 因此无论角点是否能够全部检测到, 都不影响角点的正确排序。同时, 由于各角点的检测只局限于一个小的搜索窗口内, 不仅可以减少角点检测算子的计算量, 还可以针对不同的搜索窗口自动确定不同的阈值, 以便适应不同的光照条件。

5 实验结果

上述算法已经在实际工程项目中得以应用, 在 DSP 处理器上成功实现了摄像机内参数的在线自动标定。在 TMS320C30 处理器上, 检测一帧包含 99 个角点的 512×512

的棋盘格图像一般需要 30s,而在普通 PC 机上只需要 0.35s。

笔者对多种不同光照下的图像进行了角点检测实验,均取得了很好的检测结果,证实了该方法具有很好的鲁棒性。图 2 给出了部分实验结果。从图中可以看出,该算法不仅对整体光线的明、暗变化和标定板的倾斜具有很好的适应性(如图 2(a)~图 2(c)),对图像中局部光照的变化也有很好的适应性(图 2(d)~图 2(e))。当图像中某些角点无法检测时,其他角点仍能正确检测和排序,不影响摄像机的标定。图 2(e)给出了有部分角点没有检测到的情况,其中的圆圈表示没有检测到的角点,图 2(f)给出了棋盘格模板有部分出界的情况,这些情况下都能正确排序所有检测到的角点。

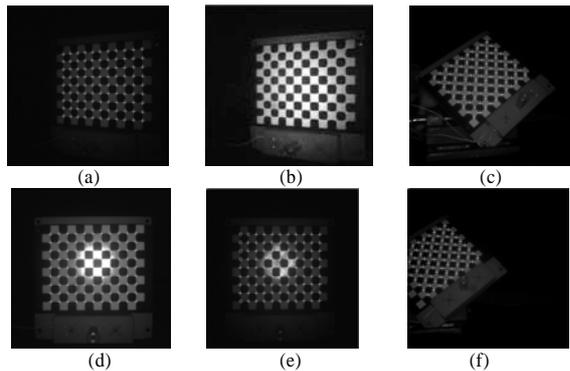


图 2 不同条件下的角点检测结果

为验证本检测算法的亚像素提取精度,笔者进行了仿真实验,并同文献[6]的多项式拟合法和文献[5]的 Forstner 算子法进行了比较。实验中,首先生成标准棋盘格图像,再对该图像进行平滑处理,得到接近于实际的图像。分别对这两幅图像用不同的亚像素检测方法进行角点检测,将角点坐标的检测值与理想值进行比较,可得到检测结果的误差。表 1 给出了利用 SV 算子时 3 种亚像素级检测方法的误差比较。从表中可以看到,无论对于理想图像还是模拟图像,本文提出的角点检测算法的精度都优于其他两种方法。

(上接第 212 页)

6 结束语

根据区域边界的 Freeman 链码,定义了一种新的边界点分类表,把图形学中的栅栏算法移植到链码的填充算法中,发展了一种新的基于链码的填充算法。算法不需对边界点进行标记,不需用辅助的内存空间和额外的标志色,对区域内边界也能填充。实验验证,本文给出的算法对任意复杂图像区域都能正确填充,具有容易实现、速度快等优点,所以,本算法具有较广泛的用途。

参考文献

- 1 Pavlidis T. Filling Algorithms for Raster Graphics[J]. Computer Graphics Image Process, 1979, 10(2): 126-141.
- 2 Pavlidis T. Algorithms for Graphic and Image Processing[M]. Rockville, MD: Computer Science Press, 1982.
- 3 Freeman H. On the Encoding of Arbitrary Geometric Configuration[J]. IRE Trans. on Electronic Computer, 1961, 10(2): 260-268.
- 4 Chang L W, Leu K L. A Fast Algorithm for the Restoration of Images Based on Chain Codes Description and Its Application[C]//Proc. of Computer Vision & Graphic Image Processing Conference. 1990: 296-307.
- 5 Shih F Y, Wong W T. An Improved Fast Algorithm for the

表 1 不同方法的亚像素级检测误差比较

图像检测	本文方法	多项式拟合法	Forstner 算子法
理想图像检测最大误差像素	0.000	0.090	0.500
模拟图像检测最大误差像素	0.010	0.052	0.210

6 结论

本文以空间和水下等特殊领域的摄像机在线标定为背景,提出了一种可以全自动实现的棋盘格角点检测方法。该方法以平面到平面的变换确定角点初始位置,以 SV 算子实现像素级精度检测,并将区域能量中心的概念引入到角点检测中,实现了角点位置的精确计算。该算法已成功地应用于工程项目的摄像机在线标定中,取得了很好的效果。实验证明,该算法不仅计算速度快,还能适应不同光照的变化,具有很强的鲁棒性,检测精度也高于常用的算法。特别是,当图像中某些角点检测失败时,其他角点仍能被正确检测并排序。该算法不仅可以用于棋盘格角点的检测,其基本思想还适用于其他标定模板的特征点检测,对于摄像机在线标定具有很高的实际应用价值。

参考文献

- 1 袁 萍,袁政鹏. 一种应用于视觉测量标定的亚像素级特征点提取算法[J]. 现代机械, 2003, (4): 14-15.
- 2 Harris C, Stephens M. A Combined Corner and Edge Detector[C]//Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference, Manchester, England. 1988: 147-151.
- 3 Tissainayagam, Suter D. Assessing the Performance of Corner Detector for Point Feature Tracking Applications[J]. Image and Vision Computing, 2004, 22(8): 663-679.
- 4 刘阳成,朱 枫. 一种新的棋盘格图像角点检测算法[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(5): 656-660.
- 5 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.
- 6 梁志敏,高洪明,王志江,等. 摄像机标定中亚像素级角点检测算法[J]. 焊接学报, 2006, 27(2): 102-104.

Restoration of Images Based on Chain Codes Description[C]//Proc. of Computer Vision & Graphic Image Processing Conference. 1994: 348-351.

- 6 Tang G Y. Region Filling with the Use of the Discrete Green Theorem[C]//Proc. of Computer Vision & Graphic Image Processing Conference. 1988: 297-305.
- 7 Ren M, Yang W, Yang J. A New and Fast Contour-filling Algorithm[J]. Pattern Recognition, 2005, 38(12): 2564-2577.
- 8 李 华,朱光喜,朱耀庭. 一种利用方向链码重建二值图像的新方法[J]. 中国图象图形学报, 2000, 5(6): 474-478.
- 9 Cai Z. Restoration of Binary Images Using Contour Direction Chain Codes Description[C]//Proc. of Computer Vision & Graphic Image Processing Conference. 1988: 101-106.
- 10 Tang G Y. A Discrete Version of Green's Theorem[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1982, 4(3): 242-250.
- 11 陈传波,陆 枫. 计算机图形学基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 127-128.
- 12 Freeman H. Computer Processing of Line-drawing Images[J]. Computing Surveys, 1974, 6(1): 57-97.

