

基于段测试的 X 角点检测与亚像素定位

魏军^{1,2}, 刘达², 王田苗², 曹莉¹

(1. 济南大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250022; 2. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要: 针对 X 角点快速检测和精确定位要求, 提出了一种实时识别、定位 X 角点的方法: 首先, 根据 X 角点图像对称性和亮度分布特征, 筛选出候选 X 角点; 随后, 对候选 X 角点进行段测试, 确认候选 X 角点, 并检出测试段中位于图像边缘上的像素, 进行角点的亚像素定位。与 Harris 算法比较, 该方法能有效检测 X 角点并排除其他类型角点, 具有较高的定位精度和检测速度, 可在线实时处理 PAL 图像。

关键词: 角点检测; 亚像素定位; 立体视觉

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2011)-01-0097-05

Segment Test Based X Corner Detection and Sub-pixel Localization

WEI Jun^{1,2}, LIU Da², WANG Tianmiao², CAO Li¹

(1. School of Control Science and Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to achieve the ability of rapidly detecting and accurately locating X corners, a real-time method to locate X corner in sub-pixel is proposed. Firstly, the image is filtered to find X corner candidates according to symmetry and intensity distribution characteristics of X corner image, and then the segment test is performed for each X corner candidates to confirm it's a X corner, find edges and localize corner in sub-pixel. Experiments show that compared with Harris algorithm, the method can detect X corners and eliminate other corners, provides better positioning accuracy and higher detection speed, and has the capability to process PAL images on line and in real time.

Keywords: corner detection; sub-pixel localization; stereo vision

1 前言 (Introduction)

角点是图像中亮度变化剧烈的点或图像边缘上曲率取极大值的点。从形态区分, 角点包括: L、T、Y、X 和箭头型角点等^[1]。文[2-3]提出从检测能力、定位精度、复杂度、鲁棒性等方面比较角点检测算法性能。Mokhtarian^[4]对角点算法一致性和精确性指标评估进行了探讨; Zheng^[3]对常见算法进行了比较, 指出 Harris 算法^[5]、Kitchen-Rosenfeld 算法^[6]、Susan 算法^[7]和 CSS 算法^[2]具有最好的检测能力; 王志衡^[1]指出, 上述算法中 CSS 和 Harris 算法具有最好的定位精度。

机器人辅助外科系统要求能够同时对手术器械和机器人等目标进行实时跟踪定位, 以实现手术导航^[8], 需要综合考虑目标定位的快速性和精确度, 迅速准确获得图像特征。参考光笔测量仪使用光斑作

为图像特征的方法^[9], 手术器械和机械臂的图像特征可由 X 角点构造, 通过立体视觉系统进行识别、定位。与光笔测量仪比较, 这种图像特征无需电源, 可同时识别多个目标, 无需椭圆拟合等复杂运算来定位光斑中心。在手术导航应用中, 使用通常的算法对 X 角点进行检测存在以下不足: 运算复杂, 难以实现在线实时检测; 不能区别角点类型, 立体匹配困难; 定位精度一般是像素级, 难以满足精确定位要求。

针对需要兼顾角点检测复杂度和定位精度的应用特点, 本文提出了 X 角点段测试检测定位方法。在 X 角点图像特征分析的基础上, 设计模板对图像进行快速扫描, 找出候选 X 角点; 对候选角点建立测试像素段, 在段内进行测试计算, 确认角点为 X 角点, 同时检测角点图像边缘, 计算边缘交点确定角点位置, 实现角点的亚像素定位。

2 X 角点图像特征 (Characteristics of X corner image)

X 角点是两个暗块和两个亮块图案交替排列形成图案的公共点, 如图 1 所示。

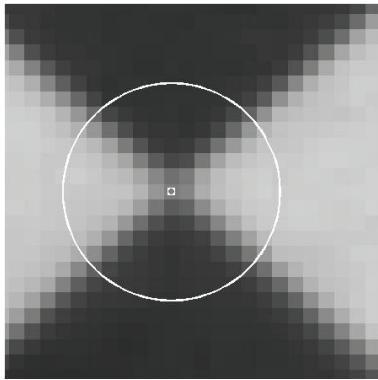


图 1 X 角点图像特征

Fig.1 Characteristics of X corner image

2.1 X 角点窗口图像特征

以 X 角点为中心的窗口图像具有以下图像特征:

- (1) 其中的任一像素有 3 种可能的位置分布: 在图块边缘上 (包括角点)、在亮块中、在暗块中;
- (2) 对其中的任意像素 p , 都能找到其关于 X 角点对称的像素, 该像素与 p 同时位于暗块或亮块;
- (3) 考虑视角、投影等因素, 组成 X 角点的任一图块的成像面积小于窗口面积的一半.

根据 X 角点窗口图像的特征 (1), 先进行完整图像的面积筛选, 对满足面积筛选的像素, 再依特征 (2) 进行对称性筛选, 可得到图像中的候选 X 角点.

2.2 测试像素段亮度特征

在位于以候选角点为中心、半径为 r 的圆周上, 提取像素组成首尾相连的像素段, 如图 1. 在 X 角点图像的测试像素段上, 像素的亮度及段内相邻像素亮度差 (梯度) 有图 2 曲线的分布特征.

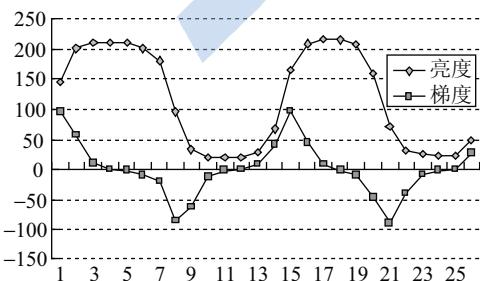


图 2 测试像素段中像素强度及其梯度曲线

Fig.2 Pixel intensity and gradient along the test segment

特征曲线反映了 X 角点测试像素段具有如下特点:

(1) 梯度曲线上有且仅有两个极大值和两个极小值; 位于亮块至暗块的边缘上的像素具有梯度极小值, 位于暗块至亮块的边缘上的像素具有梯度极大值.

(2) 所有测试像素中, 约一半像素位于两个极大值或极小值之间, 组成了连续的半个圆周.

(3) 在相邻的梯度极大值像素至梯度极小值像素间的圆周上的像素位于亮块, 在相邻的极小值像素至梯度极大值像素间的圆周上的像素位于暗块.

(4) 若像素位于亮块或暗块内部, 其对应的梯度值接近于 0.

根据上述特征, 对候选 X 角点进行确认, 排除伪角点; 同时, 检出位于图像边缘上的像素, 计算边缘交点就可以实现 X 角点的亚像素定位.

3 X 角点的快速筛选 (Rapid selection of X corner candidates)

设计如图 3 所示的模板, 进行 X 候选角点的快速筛选. 被标记像素 ($a \sim h, A \sim H$) 为模板检测用像素, 模板中心 P 位于当前进行快速筛选的图像像素处. 定义两个关于 P 对称分布的检测用像素构成一个对称像素对, 如 (A, a) 、 (E, e) 等, 图 3 筛选模板包含 8 个对称像素对; 定义两个垂直分布的对称像素对构成一个分布像素组, 如 (A, a, E, e) 等, 图 3 筛选模板中有 4 个分布像素组.

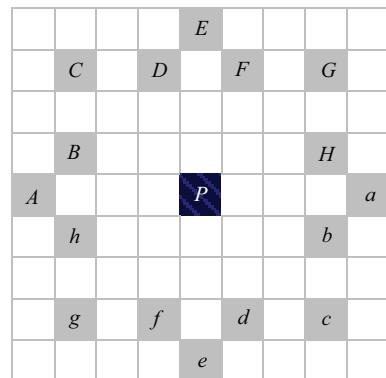


图 3 快速筛选模板

Fig.3 Candidates selection template

X 角点的筛选操作包括面积筛选和对称筛选: 首先依据组成角点的任一图块所占面积应小于窗口面积的一半进行面积筛选, 排除绝大部分背景区域; 然后根据 X 角点成像的对称性对面积筛选结果进行对称筛选, 得到检测图像中的候选 X 角点. 两种筛选操作过程如下:

面积筛选: 以当前被筛选像素为模板中心建立筛选模板, 计算 $A \sim G$ 像素中的亮度差的最大值,

若该值大于一个预先设定的阈值, 则进行对称性筛选操作; 否则认为这些像素不满足“组成X角点的任一图块的成像面积小于窗口面积的一半”这一特征, 当前筛选像素不是X角点, 进行下一个图像像素的筛选。满足面积筛选的像素位于图像边缘或角点附近, 合理选择筛选模板大小和筛选步长, 可使满足面积筛选条件的像素至边缘或角点的距离小于 k 个像素。使用图3模板, 隔行隔列筛选像素, 可使被筛选出的像素距离图像边缘的距离小于3个像素, 如图4(b)所示。

对称筛选: 取模板中某个分布像素组进行对称筛选, 如对于分布像素组 (A, a, E, e) , 计算像素 A, a, E, e 亮度的平均值记为 t_a ; 若像素 A, a 的亮度均大于 t_a 且像素 E, e 的亮度均小于 t_a , 或者像素



图4 X角点的快速筛选

Fig.4 The X corner candidates selection

4 X角点的段测试与亚像素定位 (Segment test and sub-pixel localization of X corner)

4.1 X角点的段测试

以候选X角点像素为测试段圆心, 在图像中提取测试段, 设测试段由 n 个像素组成, 记其中第 i 个像素为 p_i ($i = 1, 2, \dots, n$), 测试段可由向量 \mathbf{S} 表示

$$\mathbf{S} = (p_1, p_2, \dots, p_n, p_1) \quad (1)$$

测试段内相邻像素梯度为

$$\nabla \mathbf{S} = (e_1, e_2, \dots, e_n)' = \mathbf{S} \otimes (1, -1) \quad (2)$$

遍历 $\nabla \mathbf{S}$ 的所有元素, 找到其中的最大值 e_{\max} 和最小值 e_{\min} , 分别对应像素 p_{\max} 和 p_{\min} 。由图2中梯度曲线分析可知, 若当前被检测像素为X角点, 则测试段中与 p_{\max} 位于同一直径上的对称像素应具有局部梯度最大值 e'_{\max} ; 考虑到X角点图像的成像角度和投影变换引起的图像变化, 在以该像素为中心的相邻的 $n/8$ 个测试像素中寻找具有局部梯度最大值的像素 p'_{\max} 。同理可以找到 p_{\min} 对应的 p'_{\min} 。

A, a 的亮度均小于 t_a 且像素 E, e 的亮度均大于 t_a , 则记录当前筛选像素为候选X角点, 否则对其他分布像素组进行对称筛选; 若全部分布像素组均不满足对称筛选条件, 则当前被筛选像素不是X角点, 进行下一个图像像素的筛选。正确X角点附近有很多像素均满足筛选条件, 考虑到这些像素分布于X角点的 k 邻域内, 故可取当前像素为候选X角点, 并将以该角点为中心的 $k \times k$ 窗口内的其他候选角点清除。

图4给出了对实验图像进行X角点筛选的面积筛选结果和对称筛选结果(“O”标记处)。由图4可知, 筛选结果可作为X角点的像素位置, 但该位置并非X角点的最佳定位结果, 若需要精确定位, 可进行X角点的段测试亚像素定位。



测试过程中根据测试像素段的梯度曲线特征对X角点确认验证。

4.2 X角点的亚像素定位

大部分角点检测算法通常只具备像素级的定位精度。进行子像素定位通常可以采用求边缘交点、曲面鞍点和级数展开等手段。对X型角点采用曲面拟合求鞍点的方式能获得高质量的定位结果, 但是计算量较大。当角点较多时, 采用曲面拟合或级数展开的方法定位角点计算量很大, 难以满足实时定位的要求。

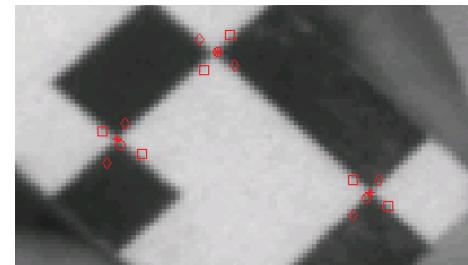


Fig.5 Segment test based X corner localization

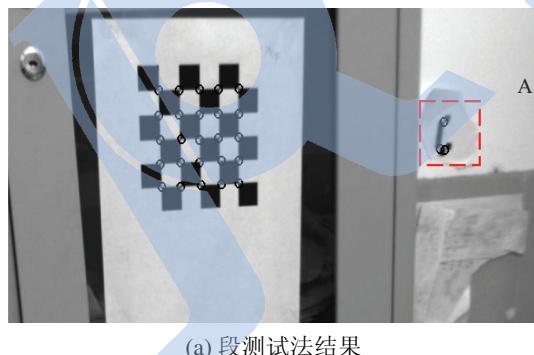
利用段测试所得X角点图像边缘像素, 求直线

$p_{\max}p'_{\max}$ 与 $p_{\min}p'_{\min}$ 的交点可获得子像素精度的 X 角点位置. 对图 4 实验图像的候选 X 角点进行段测试及亚像素定位的结果如图 5 所示, 其中“□”标记了 $p_{\max}p'_{\max}$ 位置, “◇”标记了 $p_{\min}p'_{\min}$ 位置, “O”为候选 X 角点位置, “*”为亚像素定位结果.

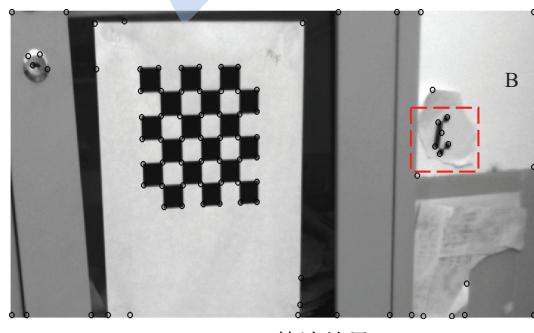
5 X 角点检测与定位实验 (Experiments of the X corner detection and localization)

使用经标定和畸变矫正的双目摄像机, 在不同距离和不同照明环境采集 5 组实验图像, 图像尺寸为 1024×768 像素. 实验图像中包括: 25 个 X 角点的棋盘图案, 黑白块边长均为 20 mm; 距离相机较远的 3 个 X 角点图案如图 6 所示. 文 [1,3] 指出, Harris 算法具有最好的角点检测性能. 因此, 选择 Harris 算法与本文算法进行了复杂度和定位精度对比实验. 在 Matlab 环境下, 使用经典 Harris 算法和本文算法对相同实验图像进行了对比试验. Harris 算法采用 3×3 模板, 算法阈值选择 7×10^6 , 以响应值 (corner response) 的 2 维顺序统计筛选 (2-D order-statistic filtering) 结果作为 Harris 算法的定位结果.

为比较角点定位精度, 在对所采集的双目相机图像进行 X 角点定位后, 人工配对, 利用双目相机标定参数, 计算采集图像中的棋盘格边长, 忽略摄像机标定误差, 以所测棋盘图像边长误差表征 X 角点定位精度. 实验结果如表 1 所示, 图 6 为相关实



(a) 段测试法结果



(c) Harris 算法结果

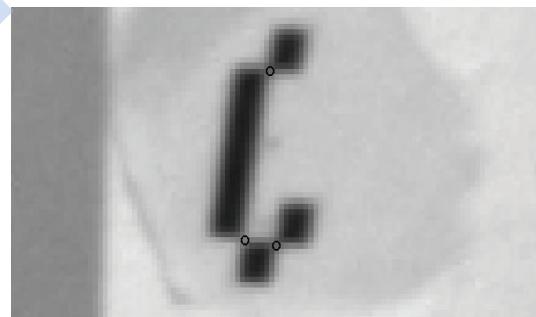
验图像. 表 1 中段测试法处理时间包括对图像的筛选处理和段测试定位时间.

两种算法都检出了棋盘图案中所有 X 角点, 段测试法具有较大的尺度范围, 能同时检出成像面积小的 X 角点 (图 6(b)), Harris 算法漏检了距离较远的 X 角点 (图 6(d)); 与 Harris 算法比较, 段测试法基本排除了非 X 角点, 保留了所有 X 角点. 段测试法比 Harris 算法具有更快的处理速度, 采用 C 语言编写的段测试算法, 对 1024×768 分辨率的灰度图像的处理速度达到 $22 \sim 35$ 帧. 棋盘格边长检测实验数据说明段测试法具有更高的 X 角点定位精度.

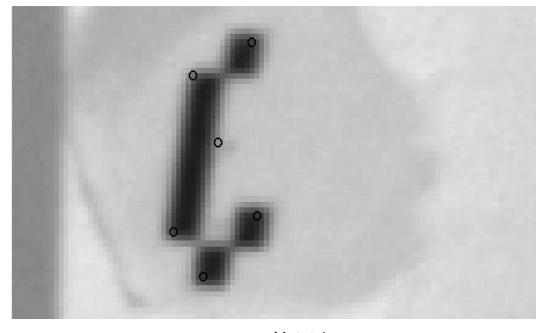
表 1 X 角点定位时间和定位精度实验结果
Tab.1 Time and accuracy results of X corner localization experiment

	处理时间 /s	距离误差范围 /mm	平均误差 /mm
Harris	$2.0 \sim 2.3$	$0.01 \sim 1.51$	0.63
段测试法	$0.5 \sim 0.6$	$0.02 \sim 0.71$	0.20

为检验噪声对本文算法性能的影响及算法的各向同性, 对旋转后的噪声图像进行了角点定位实验. 将图 6 中包含 25 个 X 角点的棋盘图案旋转 (双线性差值) 后, 用段测试法得到 X 角点位置, 作为角点位置约值, 记为 L_i ($i = 1, 2, \dots, 25$). 对旋转后图像加入标准差为 δ 的零均值高斯白噪声生成噪声图像. 在定位噪声图像中的 X 角点时, 使用 3×3 模板、



(b) A 的局部



(d) B 的局部

图 6 X 角点定位实验

Fig.6 The X corner localization experiments

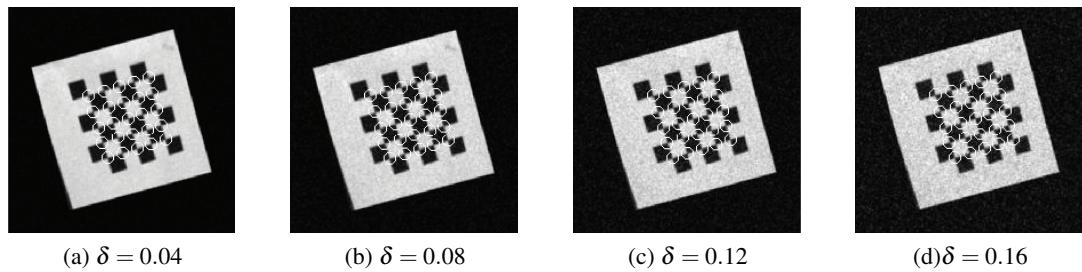


图7 高斯白噪声图像定位实验
Fig.7 Localization experiment on images with Gaussian white noise

偏差为3的低通高斯滤波进行降噪。对不同噪声水平的图像进行滤波后,采用段测试法进行角点定位,记噪声图像X角点定位结果为 l_i ($i = 1, 2, \dots, 25$)。将噪声图像的定位结果与无噪声图像的定位结果进行比较,分析噪声对段测试法定位精度的影响。定义

$$\delta_n = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|L_i - l_i\|^2}, \quad n = 25 \quad (3)$$

实验数据见表2,图7为实验图像。

表2 高斯白噪声图像的实验结果

Tab.2 Experiment results on images with Gaussian white noise

噪声标准差 δ	0.04	0.08	0.12	0.16
定位误差均值/pixel	0.17	0.19	0.24	0.24
δ_n	0.0606	0.0588	0.0989	0.0989

段测试法定位精度随图像噪声的加强而有所下降,与未加入噪声图像的定位结果比较,当噪声标准差小于0.12时,因噪声引起的角度定位误差在0.2个像素以内。实验数据表明,算法具有各向同性;对噪声较强的图像,需要进行滤波处理,滤波后的角度定位误差控制在较低水平,能够满足机器人辅助外科应用的鲁棒性要求。

6 结论 (Conclusion)

本文提出了一种基于快速筛选的段测试X角点检测定位方法。该方法具有以下特点:仅提取X角点,能排除其他类型的角度,为特征识别提供更确切的信息;可以利用检测识别的结果直接完成角度的子像素定位,具备较高的角度定位精度;可以结合具体的应用情况调整筛选模板和测试像素段的大小,以取得更高的角度定位精度或更快的角度检测速度。实验表明,算法能基于Windows平台实时处理 1024×768 分辨率的灰度图像,无需借助硬件便可实现在线实时X角点检测,应用于立体视觉系统,可获得0.2 mm的定位精度。

本文方法也存在一些不足:在进行全图筛选时,计算量受图像纹理多少的影响,对具有大量直线边缘的图像进行处理时造成筛选计算量增加而影响处理速度;由于采用求边缘交点的方式进行角度定位,算法的鲁棒性和定位精度易受图像噪声影响,需对噪声图像进行滤波处理。

参考文献 (References)

- [1] 王志衡, 吴福朝, 王旭光. 基于局部方向分布的角度检测及亚像素定位[J]. 软件学报, 2008, 19(11): 2932-2942.
Wang Z H, Wu F C, Wang X G. Corner detection and sub-pixel localization based on local orientation distribution[J]. Journal of Software, 2008, 19(11): 2932-2942.
- [2] Mokhtarian F, Suomela R. Robust image corner detection through curvature scale space[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(12): 1376-1381.
- [3] Zheng Z Q, Wang H, Teoh E K. Analysis of gray level corner detection[J]. Pattern Recognition Letters, 1999, 20(2): 149-162.
- [4] Mokhtarian F, Mohanna F. Performance evaluation of corner detectors using consistency and accuracy measures[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2006, 10(1): 81-94.
- [5] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector[C]//4th Alvey Vision Conference. 1988: 147-151.
- [6] Kitchen L, Rosenfeld A. Gray-level corner detection[J]. Pattern Recognition Letters, 1982, 1(2): 95-102.
- [7] Smith S M, Brady J M. SUSAN – A new approach to low level image processing[J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 23(1): 45-78.
- [8] Zamorano L, Li Q, Jain S, et al. Robotics in neurosurgery: State of the art and future technological challenges[J]. International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 2004, 1(1): 7-22.
- [9] 张广军. 视觉测量 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 42-70.
Zhang G J. Vision measurement[M]. Beijing: Science Press, 2008: 42-70.

作者简介:

- 魏军 (1974-), 男, 硕士, 副教授。研究领域: 医疗机器人技术, 图像处理。
刘达 (1972-), 男, 博士, 副教授。研究领域: 医疗机器人技术。
王田苗 (1960-), 男, 博士, 教授, 博士生导师。研究领域: 仿生机器人, 医疗机器人, 嵌入式系统。