

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2024.02.023

# 基于亚像素定位的图像边缘检测策略研究

刘浩<sup>1</sup> 任宏<sup>1</sup> 赵丁选<sup>2</sup> 孙海超<sup>1</sup> 姜金辰<sup>1</sup> 姜瑞凯<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004)

**摘要:** 针对图像处理与计算机视觉技术中低对比度、边缘模糊图像的边缘检测问题, 参考局部极值与梯度方向两种因素, 并结合图像边缘方向趋势, 提出了一种单像素边缘跟踪策略。相较于应用广泛的 Canny 算法, 该跟踪策略无需设置全局阈值, 实现方式更为简洁、高效; 提取的图像边缘连续、平滑、完整, 并有效地减少了图像边缘的冗余像素, 进而提升了图像后续处理的效率; 边缘跟踪方向抗干扰性强, 具有较强的鲁棒性。为了减小检测的图像边缘与真实图像边缘之间的偏差, 提高图像边缘检测的精度, 参考边缘像素点的相邻区域灰度, 以边缘像素点的梯度分布为依据对该像素点进行亚像素定位。经实验验证, 经过亚像素优化的图像边缘检测策略可用于检测边缘模糊、对比度低的图像, 检测的图像边缘完整、连续且平滑。该策略有效地消除了程序运算中引入的截断误差, 提升了图像边缘检测精度, 且适用于亮度 5 ~ 100 000 lx 的高动态成像场景中。

**关键词:** 图像处理; 边缘检测; 亚像素定位; 单像素跟踪; 鲁棒性; 高动态

中图分类号: TP751.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)02-0242-07

OSID:



## Image Edge Detection Strategy Based on Sub-pixel Location

LIU Hao<sup>1</sup> REN Hong<sup>1</sup> ZHAO Dingxuan<sup>2</sup> SUN Haichao<sup>1</sup> JIANG Jinchen<sup>1</sup> JIANG Ruikai<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China

2. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** Image edge detection is a technique that extracts mutation information from images and is widely used in the fields of image processing and computer vision. The effectiveness of image edge detection directly affects the accuracy of subsequent region information extraction, target recognition, and pose measurement. Taking into account two factors: local extremum and gradient direction, and combining with the trend of image edge direction, a single-pixel edge tracking strategy was proposed for the edge detection problem of low contrast and edge blurred images. Compared with the widely used Canny algorithm, this tracking strategy did not require setting a global threshold, and its implementation was more concise and efficient. The extracted image edges were continuous, smooth, and complete, effectively reducing redundant pixels at the image edges, thereby improving the efficiency of subsequent image processing. Edge tracking direction had strong anti-interference ability and robustness. In order to reduce the deviation between the detected image edge and the real image edge, and improve the accuracy of image edge detection, the adjacent gray values of edge pixels were referred to, and the gradient distribution of edge pixels was used as the basis for sub-pixel localization of that pixel. Through experimental verification, the sub-pixel optimized image edge detection strategy can be used to detect images with blurred edges and low contrast. The detected image edges were complete, continuous, and smooth. This strategy effectively eliminated truncation errors introduced in program operations, improved the accuracy of image edge detection, which was suitable for high dynamic imaging scenes with a brightness range of 5 ~ 100 000 lx.

**Key words:** image processing; edge tracking; sub-pixel location; single-pixel edge tracking; robustness; high dynamic

收稿日期: 2023-10-10 修回日期: 2023-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(U20A20332)

作者简介: 刘浩(1989—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事机器视觉研究, E-mail: liuhao@ciomp.ac.cn

通信作者: 任宏(1990—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事三维视觉测量研究, E-mail: renhong@ciomp.ac.cn

## 0 引言

图像边缘是图像中灰度急剧变化的区域,是承载图像信息的重要载体,是图像主要的低层视觉特征之一<sup>[1-4]</sup>。图像边缘检测作为一种重要的计算机视觉技术,提供了一种准确、快速的图像分析、识别方法,在机器人技术、农业生产、视觉导航与医学影像分析等领域中均得到了广泛应用。图像边缘检测的效果,直接影响后续的目标识别、姿态测量、区域信息提取等任务。目前,常用的图像边缘检测方法主要有 Sobel 算子法、Roberts 算子法与 Prewitt 算子法等<sup>[5-6]</sup>。对于对比度低、边缘模糊的图像,常用的图像边缘检测方法获取的图像边缘不平滑,且具有一定宽度,增大了后续图像处理难度。

此外,通过边缘检测法提取的边缘像素均以定点形式表示,这便引入了截断误差<sup>[7-8]</sup>,造成了提取的图像边缘与实际的边缘存在偏差。因此,需要对提取的图像边缘像素进行亚像素重定位。目前,亚像素定位的主要方法有插值法、拟合法与图像矩阵法<sup>[9-11]</sup>。其中,插值法受噪声的影响较大,无法得到广泛的应用。高世一等<sup>[12]</sup>根据 Zernike 矩的旋转不变性原理,提出了一种改进的 Zernike 正交矩方法。刘阳<sup>[13]</sup>提出了一种基于图像二维信息熵的自适应边缘像素定位算法,该算法计算输入图像的二维信息熵,以此为依据求解自适应边缘检测阈值,完成对边缘像素的提取与重定位。温卓漫<sup>[14]</sup>参考边缘像素邻域的灰度比例,对亚像素点拟合为一条直线,再通过计算边缘像素点到直线的距离获取亚像素定位。采用深度学习的方法检测图像边缘、对边缘像素进行重定位时可解释性不足。对于航空航天等数据样本较少的应用领域,深度学习算法容易出现欠训练的问题,且深度学习算法对计算资源需求较高。

基于图像边缘连续性的假设,本文结合图像边缘方向趋势提出一种单像素边缘跟踪策略,力求获取平滑、连续的边缘像素集合。在单像素边缘跟踪策略的基础上,参考边缘像素点相邻区域的灰度,以梯度方向为约束,提出一种快速、准确边缘亚像素重定位方法,力求提升图像边缘的拟合精度。

## 1 单像素边缘跟踪策略

图像边缘像素梯度方向的法向可定义为图像的边缘方向,自然界的物体边缘方向通常具有显著的连续性<sup>[15-16]</sup>。基于图像边缘方向连续性的假设,单像素边缘跟踪策略以局部锚点为初始点,沿图像边

缘延伸方向逐个连接边缘像素,最终获取宽度为单像素的平滑曲线集合。不同于经典的 Canny 算法,单像素边缘跟踪策略不需要设定阈值,更为高效、简洁。

为了更为准确地描述局部锚点选取过程与边缘跟踪的过程,需要引入内积能量的概念。取以边缘像素点  $p$  为几何中心的局部图像为该像素点的邻域,记为  $S(p)$ 。边缘像素点  $p$  的梯度可表示为

$$G(p) = (G_x(p), G_y(p)) \quad (1)$$

式中,  $G_x(p)$  为边缘像素点  $p$  的水平梯度,  $G_y(p)$  为边缘像素点  $p$  的垂直梯度。对于邻域  $S(p)$  内任一像素点  $q_i$ , 其梯度  $G(q_i)$  可表示为

$$G(q_i) = (G_x(q_i), G_y(q_i)) \quad (2)$$

将边缘像素点  $p$  的梯度与邻域内其他像素点的内积累加求和,定义为像素点  $p$  的内积能量  $IP(p)$

$$IP(p) = \sum_{q_i \in S(p)} \langle G(p), G(q_i) \rangle \quad (3)$$

选取恰当的局部锚点可有效过滤掉大量干扰边缘,提高后续工作效率。同时具备以下 2 个性质的图像边缘像素被定义为局部锚点: ①像素梯度方向上的相邻像素中内积能量值(该像素点梯度与其邻域内像素梯度的内积累加和)最大。②与边缘方向上的相邻像素具有相同的梯度方向。局部锚点的检测方法如图 1 所示,红色箭头为像素的边缘方向,蓝色箭头为像素的梯度方向,括号内的值为该像素点的内积能量值。图 1a 中点  $X$  不是像素梯度方向上内积能量值的极大值点,不可标记为锚点;图 1b 中点  $X$  邻域内边缘方向上像素的梯度方向不同,不可标记为锚点;图 1c 中点  $X$  满足以上 2 个性质,被标记为锚点。

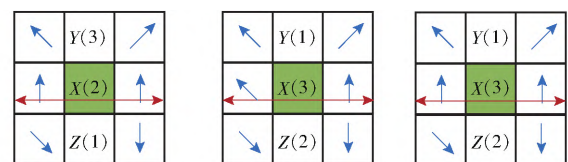


图 1 锚点检测方法示意图

Fig. 1 Diagrams of anchor detection method

局部锚点作为初始点,有 2 个方向相反且与梯度方向垂直的边缘跟踪方向。如图 2 所示,锚点  $X$  根据边缘延伸方向沿左右 2 个方向将离散的边缘点进行连接。锚点  $X$  左跟踪得到边缘  $E(X)_- = \{X, A, B, C\}$ , 向右跟踪得到  $E(X)_+ = \{X, D, E, F\}$ , 边缘  $E(X) = E(X)_+ \cup E(X)_-$ 。

初始锚点的边缘跟踪方向取决于该锚点的梯度方向,后续边缘像素点的跟踪方向取决于边缘像素点的边缘方向。为方便计算,将边缘跟踪方向离散化为 8 个方向,如图 3 所示,方向编码  $c$  的取值决定

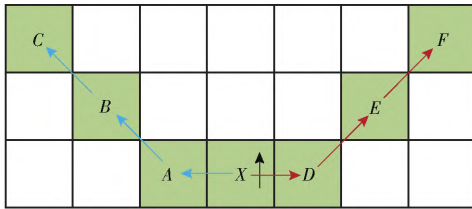


图2 完整边缘是锚点初始化两方向跟踪边缘的并集  
Fig.2 Complete edge as union of two-way trace edges initialized by anchor

边缘跟踪方向。下一个边缘像素点的搜索范围如图4所示  $A_0$  为前一个边缘像素点,  $A_1$  为当前边缘像素点。若当前边缘像素点的边缘方向编码为  $c$  ( $c = 7$ )。根据边缘像素点的边缘方向呈连续性假设, 则对后一个边缘像素点的搜索范围可表示为  $\{c, (c + 1) \& 0x7, (c - 1) \& 0x7\}$ , 即  $\{7, 0, 6\}$  3个跟踪方向, 获取了3个候选边缘点。从3个候选边缘点中选取下一个边缘点需参照以下规则: ①该候选边缘点内积能量幅值最大。②该候选边缘点是其邻域内的极大值点。③该候选边缘点与前一边缘点的边缘方向相同。单像素边缘跟踪策略赋予以上3种规则同等权重, 加权计算后得出候选边缘点的置信度, 选取置信度最大的候选点作为下一个边缘点, 并更新边缘方向。若无法选取出下一个有效边缘点, 则沿该方向的边缘跟踪结束, 沿另一个边缘方向进行边缘跟踪。

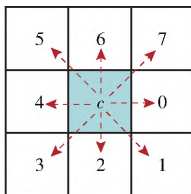


图3 8个跟踪方向示意图  
Fig.3 Schematic of eight tracking directions

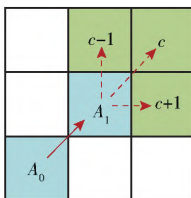


图4 下一个边缘点的搜索范围  
Fig.4 Search range for next edge point

图像的边缘跟踪过程如图5所示, 图5a给出了每个像素的梯度方向, 图5b给出了每个像素的内积能量, 可用于求解置信度, 虚线框内为边缘像素点的搜索范围。单像素边缘跟踪步骤为:

(1) 初始像素点  $P_0$  的梯度方向编码值为3, 则  $P_0$  的边缘方向为右下方向, 对应的搜索编码范围为  $\{0, 1, 2\}$ 。其中, 方向0与方向2对应的像素点不满足前文提出的3条规则, 方向0与方向2的置信

3 ↘	2 ↓	2 ↓	2 ↓	2 ↓	2 ↓
2 ↓	2 ↓	2 ↓	2 ↓	3 ↙	3 ↙
2 ↓	2 ↓	2 ↓	3 ↙	3 ↙	3 ↙
NAN	NAN	2 ↓	3 ↙	3 ↙	3 ↙

(a) 梯度方向

$P_0$ 10183	8843	5842	3688	2473	1298
9378	$P_1$ 10089	$P_2$ 9832	7540	4798	3096
3864	4378	7013	$P_3$ 8577	$P_4$ 8013	5479
0	0	873	1080	4092	$P_5$ 7201

(b) 内积能量

图5 局部最优策略边缘跟踪示意图

Fig.5 Sketch of local optimal policy edge tracking

度都为0; 方向1对应的像素点  $P_1$  的内积能量幅值最大, 又是邻域内的极大值点, 满足规则①和规则②, 置信度为2, 点  $P_1$  为下一个边缘点。

(2)  $P_1 - P_0$  边缘方向指向1(右下方向), 下一个边缘点的搜索编码范围为  $\{0, 1, 2\}$ 。方向1与方向2对应的像素点仅满足规则③, 置信度为1。方向0对应的像素点  $P_2$  的内积能量幅值最大, 又是邻域内的极大值点, 且与前一边缘点  $P_1$  的边缘方向相同, 置信度为3, 为下一个边缘点。

(3) 参照步骤(1)与步骤(2)的方法继续跟踪, 直至搜索编码范围内所有像素点的内积能量值均为0, 转至初始像素点  $P_0$  另一个边缘方向(左上方向)进行跟踪。最后, 将2个方向跟踪获取的边缘像素点组合, 得到完整的图像边缘。

## 2 亚像素定位策略

在检测图像边缘的过程中, 获取的边缘像素点通常是以整型形式表示的, 这便引入了截断误差。因此, 边缘跟踪获取的像素集合中每个像素与实际的图像边缘存在偏差<sup>[17]</sup>。为了提高图像边缘检测的精度, 需对每一个边缘跟踪获取的像素进行亚像素重定位。

图6描述了边缘像素点  $p$  与其邻域的梯度关系。选取点  $p$  作为亚像素重定位的起始点, 其邻域  $S(p)$  内的像素可分为低纹理区域像素点  $q_1, q_2$  与同边缘像素点  $q_0$ <sup>[18]</sup>。根据图像边缘方向呈连续性的假设, 点  $p$  和点  $q_0$  的边缘方向相同。因此, 向量  $l_{qp} = p - q_0$  与边缘像素点  $q_0$  的梯度方向垂直, 可表示为  $G(q_0) \cdot (p - q_0) = 0$ <sup>[19]</sup>。位于低纹理区域的像

素点  $q_1$  的梯度接近 0,  $G(q_1)(p - q_1) = 0$ , 点  $q_2$  同样成立。以上表述可以得出: 若点  $p$  为边缘像素, 其邻域  $S(p)$  内所有像素点均满足  $G(q_i)(p - q_i) = 0$ 。因此, 边缘像素点  $p$  的重定位过程就转换为: 当  $\sum_{q_i \in S(p)} G(q_i)(p - q_i)$  取最小值时, 计算亚像素重定位后坐标  $\hat{p}$  的过程。

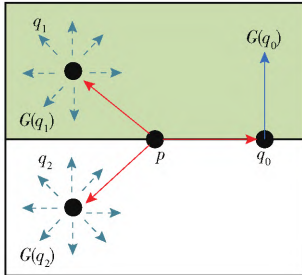


图 6 边缘像素及其邻域梯度关系

Fig. 6 Gradient relationship between edge pixels and their neighbors

采用最小二乘法求解上述方程过程中, 为防止得到不收敛的结果, 需要对  $\hat{p}$  的范围进行约束。图像边缘通常出现在边缘像素点  $p$  梯度方向上, 则重定位后像素坐标  $\hat{p}$  的搜索范围可限制在边缘像素点  $p$  法线上, 如图 7 所示。

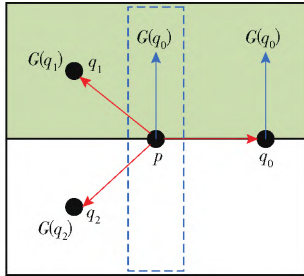


图 7 亚像素重定位边缘像素范围

Fig. 7 Sub-pixel repositioning of edge pixel range

设边缘像素点  $p(x_0, y_0)$  梯度为  $(g_x, g_y)$ , 则过点  $p$  的直线  $l$  表示为

$$y = kx + b \tag{4}$$

其中  $k = -g_y/g_x$   $b = y_0 - kx_0$   
 式中  $k$ ——直线  $l$  斜率  
 $b$ ——常数项截距

将  $\hat{p}$  限定在直线  $l$  上, 可表示为

$$kx_{\hat{p}} - y_{\hat{p}} = -b \tag{5}$$

式中  $x_{\hat{p}}$  与  $y_{\hat{p}}$  分别为像素点  $p$  重定位后的横、纵坐标。将式 (4) 转换为  $A\beta = B$  的形式, 则有  $A = (k, -1)$   $B = (-b)$ , 参数向量  $\beta = (x_p, y_p)^T$  ( $x_p, y_p$ ) 是像素点  $p$  的坐标。求解参数向量的问题为条件函数  $f(x) = 0$  约束下求  $g(x)$  极值的问题, 亚像素定位策略采用拉格朗日乘子法, 对该数学模型线性约束的最小二乘估计  $\operatorname{argmin} \sum_{q_i \in S(p)} (G(q_i)(p - q_i) + \lambda(A\beta -$

$B))$  进行求解。其中  $\lambda$  为拉格朗日乘子。

$$\text{设 } X = \begin{bmatrix} G(q_0) \\ \vdots \\ G(q_n) \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} G(q_0)q_0 \\ \vdots \\ G(q_n)q_n \end{bmatrix} \text{ 构造辅助函数}$$

可表示为

$$F(\beta, \lambda) = \|Y - X\beta\|^2 + 2\lambda(A\beta - B) = (Y - X\beta)^T(Y - X\beta) + 2\lambda(A\beta - B) \tag{6}$$

求解辅助函数  $F(\beta, \lambda)$  中  $\beta$  各分量的偏导数, 使  $\beta$  各分量偏导数等于 0, 式 (4) 可简化为  $-X^T Y + X^T X \beta + A^T \lambda = 0$ , 联立方程组可得

$$\begin{cases} -X^T Y + X^T X \beta + A^T \lambda = 0 \\ A\beta = B \end{cases} \tag{7}$$

方程组 (7) 中的第 1 个方程左乘  $(X^T X)^{-1}$ , 求解方程组 (7), 可得

$$\hat{\beta}_c = (X^T X)^{-1} X^T Y - (X^T X)^{-1} A^T \hat{\lambda}_c = \hat{\beta} - (X^T X)^{-1} A^T \hat{\lambda}_c \tag{8}$$

式中  $\hat{\beta}_c$  为有约束的最小二乘解, 无约束的最小二乘解  $\hat{\beta}$  可表示为

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \tag{9}$$

将式 (9) 代入  $A\beta = B$ , 可得

$$A(X^T X)^{-1} A^T \hat{\lambda}_c = A\hat{\beta} - B \tag{10}$$

式中, 参数矩阵  $A(X^T X)^{-1} A^T$  为 1 阶可逆矩阵,  $A$  的秩为 1, 可得

$$\hat{\lambda}_c = (A(X^T X)^{-1} A^T)^{-1} (A\hat{\beta} - B) \tag{11}$$

将式 (11) 代入式 (8), 即可获取边缘像素点  $p$  邻域内的亚像素定位后的坐标  $\hat{\beta}_c$

$$\hat{\beta}_c = \hat{\beta} - (X^T X)^{-1} A^T (A(X^T X)^{-1} A^T)^{-1} (A\hat{\beta} - B) \tag{12}$$

为了防止亚像素定位算法不收敛, 需设置原像素与亚像素定位后像素的距离阈值, 即  $|p - \hat{\beta}_c|$   $p$  为点  $p$  原坐标。当距离大于设置的阈值时, 判定该像素点亚像素定位失效, 保留原像素点  $p$  坐标。

### 3 实验

为了验证单像素边缘跟踪策略与亚像素定位算法的有效性, 搭建实验系统对上述算法进行实验验证。实验系统由非合作目标卫星、相机、照明灯、照度计组成, 如图 8 所示。相机为海康威视 MVCS060-10GC 型工业相机, 该相机像元尺寸为  $5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$ , 像元数量为  $2048 \text{ 像素} \times 2048 \text{ 像素}$ 。照度计为源恒通 TES-1339 型, 照明灯为南光公司的 FL-206 型, 照度范围为  $1 \sim 120000 \text{ lx}$ 。实验中涉及算法的运行环境如表 1 所示。

不同亮度下 Canny 算法与单像素边缘跟踪策略检测结果如图 9 所示, 在较低光照条件下 ( $5 \text{ lx}$ ),

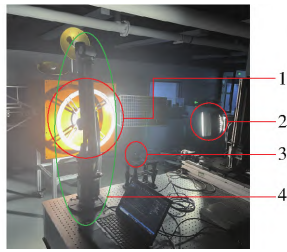


图8 实验系统

Fig. 8 Experimental system

1. 非合作卫星 2. 照明灯 3. 相机 4. 照度计

表1 算法运行环境

Tab. 1 Algorithm running environment

序号	项目	型号/版本
1	操作系统	Ubuntu 20.04.5 LTS
2	CPU	AMD Ryzen Threadripper Pro 3955WX 16-cores × 32
3	GPU	Nvidia A5000
4	开发环境	QT Creator 5.0.2
5	编程软件	Python 3.8

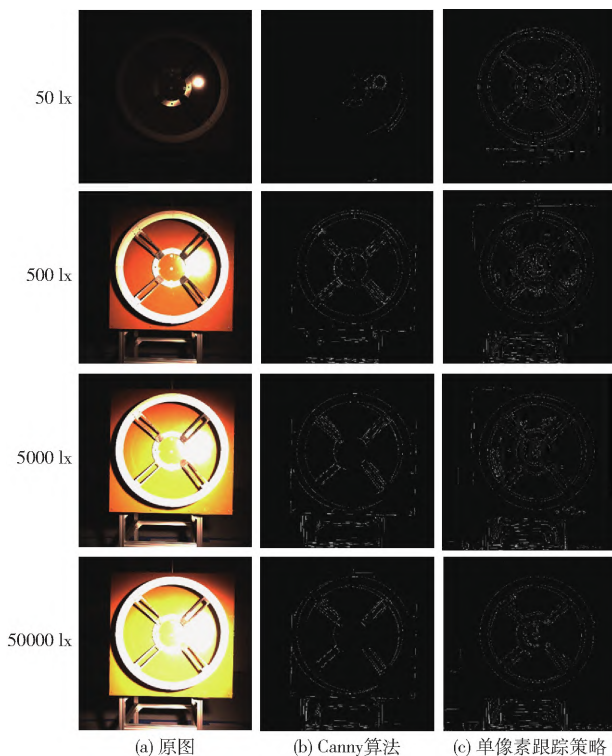


图9 不同亮度下 Canny 算法与单像素边缘跟踪策略检测结果

Fig. 9 Results of Canny algorithm edge detection and single-pixel edge tracking strategy under different brightnesses

Canny 算法无法提取完整的图像边缘,这是 Canny 算法设定的全局阈值过高导致的。Canny 算法通常采用固定不变的全局阈值提取图像边缘,因此,在亮度变化较大的场景中,Canny 算法需根据环境亮度的不同设定不同的全局阈值来提取图像边缘,增大了算法的复杂度。相较于 Canny 算法,单像素边缘跟踪策略更为高效、简洁。

环境照度为 500、5 000、50 000 lx 的条件下,Canny 算法提取图像边缘存在大量断点,边缘跟踪过程中获取了较多长度较短的边缘,这是 Canny 算法未参考图像边缘轨迹的趋势所导致的。与 Canny 算法相比,单像素边缘跟踪策略参考了梯度方向与局部极值,边缘跟踪方向抗干扰性更强,具有更强的鲁棒性,检测的图像边缘更为连续、完整。

提取图像边缘中双像素边缘点的数目,是衡量图像边缘检测算法的重要指标。双像素边缘点的数目越少,图像后续处理的效率就越高,边缘检测的准确率越高。除去 2 个边缘方向的连接像素点,在边缘像素点的邻域内若存在冗余的连接像素点,可将该像素点定义为双像素边缘点。理想的图像边缘内不存在双像素边缘点,仅存在单像素边缘点。Canny 算法与单像素边缘跟踪策略检测结果细节如图 10 所示,Canny 算法检测的图像边缘存在较多的双像素边缘点,占有所有图像边缘像素点的 42%,单像素边缘跟踪策略检测的双像素边缘点占比为 9%。因此,单像素边缘跟踪策略显著地减少了边缘冗余像素的数目,提高了图像后续处理的效率。

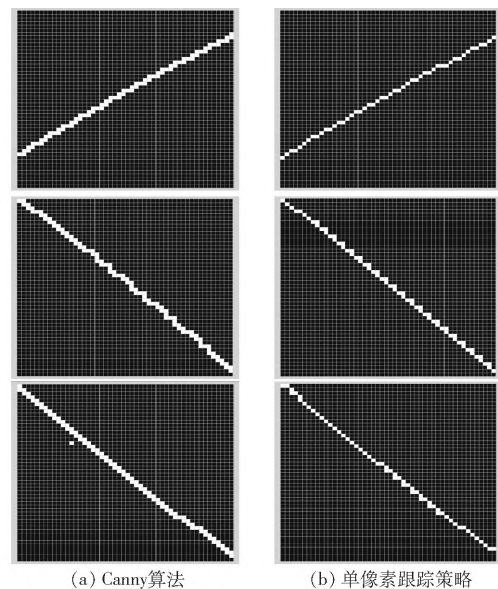


图10 边缘检测结果细节对比

Fig. 10 Detailed comparisons of edge detection results

为了验证亚像素定位策略的有效性,采用亚像素优化的单像素跟踪、未优化的单像素跟踪、经典霍夫圆算法、文献[13]中的自适应边缘像素定位算法与文献[14]中参考邻域灰度比例的亚像素定位算法 5 种算法,分别对对比度不同的 500 幅图像进行边缘检测,得到的对接环边缘像素采用最小二乘法进行圆拟合。取 500 幅图像的圆心坐标、半径的平均值为真值。

计算拟合圆的圆心坐标、半径与真值的偏差,以此评估 5 种算法的边缘检测准确度。5 种算法

检测的圆心横坐标、圆心纵坐标、半径的箱形图分别如图 11 ~ 13 所示,自适应边缘像素定位算法在图中标注为算法 A,参考邻域灰度比例的亚像素定位算法在图中标注为算法 B。霍夫圆算法检测的圆心坐标与半径数据离散程度最高,其次为自适应边缘像素定位算法。霍夫圆算法的原理是基于霍夫变换的一种检测几何图形的算法,该算法受噪声影响较大,通常需要进行图像预处理。自适应边缘像素定位算法需要根据图像的二维信息熵来设置检测阈值,该算法对外部噪声较为敏感,检测的数据离散程度较高。

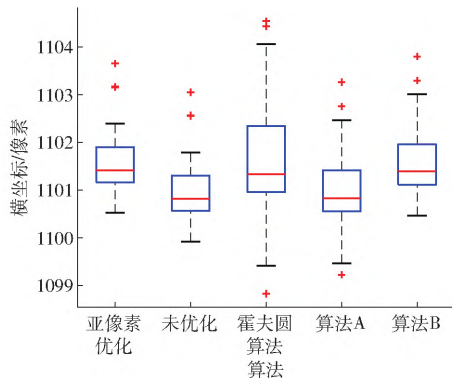


图 11 5 种算法检测圆心横坐标箱型图

Fig. 11 Five algorithms for detecting box-plots with center horizontal coordinates

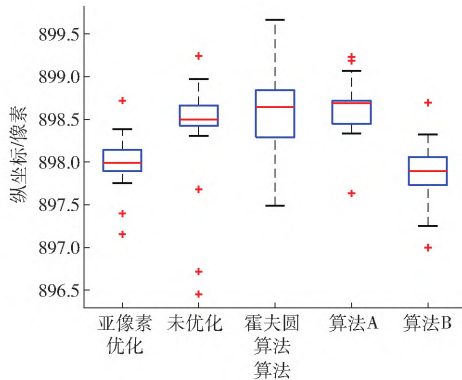


图 12 5 种算法检测圆心纵坐标箱型图

Fig. 12 Five algorithms for detecting box-plots with vertical coordinates

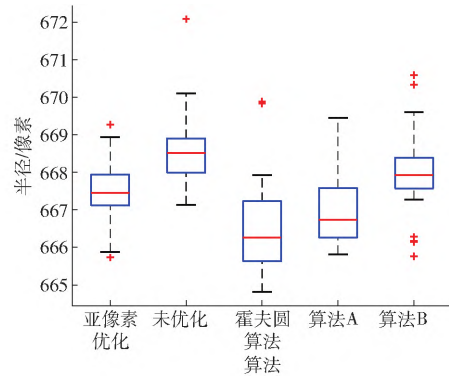


图 13 5 种算法检测半径箱型图

Fig. 13 Five algorithms for detecting radius box-plots

由图 11 ~ 13 可知,亚像素优化的单像素边缘跟踪策略与未经亚像素优化的单像素边缘跟踪策略检测的数据均较为收敛。结合了局部极值与梯度方向的单像素边缘跟踪策略抗干扰性较强,边缘跟踪方向不会受噪声影响轻易地发生突变,因此,这 2 种算法检测的数据收敛性好。

5 种算法的拟合误差如表 2 所示,  $\Delta r$  为拟合圆的半径误差,  $RMS$  为拟合圆的圆心坐标误差均方根,  $\Delta c$  为拟合圆的圆心坐标误差,可表示为

$$\Delta c = \sqrt{(x_c - \bar{x}_c)^2 + (y_c - \bar{y}_c)^2} \quad (13)$$

式中  $x_c, y_c$  —— 拟合圆圆心的横坐标与纵坐标

$\bar{x}_c, \bar{y}_c$  —— 拟合圆圆心的横坐标真值与纵坐标真值

根据表 2 中的数据可以得出,经过亚像素优化的单像素边缘跟踪策略提取的边缘准确率更高。单像素边缘跟踪策略、霍夫圆算法与自适应边缘像素定位算法(表 2 中算法 A)提取的边缘像素点都是以整型形式表示,存在截断误差,且后 2 种算法受噪声的影响较大,故 3 种算法获取的像素集合中每个像素与实际的图像边缘存在较大偏差。本文提出的经过亚像素优化的单像素边缘跟踪策略有效地减小了边缘检测误差,准确率更高。

表 2 5 种算法拟合圆形精度

Tab. 2 Five algorithms for fitting circular accuracy

算法	横坐标	纵坐标	半径	$\Delta c$	$\Delta r$	RMS
霍夫圆算法	1 101. 656	898. 692	666. 498	0. 591	1. 221	0. 418
算法 A	1 100. 986	898. 626	666. 876	0. 544	0. 976	0. 385
算法 B	1 101. 567	897. 898	667. 990	0. 275	0. 427	0. 194
单像素边缘跟踪策略(未优化)	1 100. 974	898. 499	668. 549	0. 463	0. 830	0. 327
亚像素优化的单像素边缘跟踪策略	1 101. 455	898. 014	667. 504	0. 216	0. 215	0. 153

环境照度为 5、5 000、100 000 lx 的条件下,采用亚像素优化的单像素边缘跟踪策略对非合作目标卫星圆环进行图像边缘检测,检测结果如图 14 所示,

亚像素优化的单像素边缘跟踪策略检测的圆环边缘连续、平滑。因此,亚像素优化的单像素边缘跟踪策略可有效地检测边缘模糊、对比度低的图像,且适用

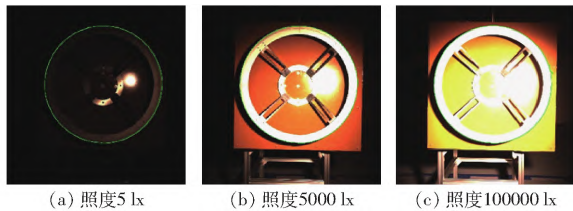


图 14 不同亮度下亚像素优化的单像素边缘跟踪策略的图像边缘检测结果

Fig. 14 Image edge detection results of sub-pixel optimized single-pixel edge tracking strategy at different brightnesses

于高动态范围(5 ~ 100 000 lx) 成像场景。

## 4 结论

(1) 针对边缘模糊、对比度低的图像边缘检测问题,结合图像边缘方向趋势,参考梯度方向与局部极值两种因素,提出了一种单像素边缘跟踪策略。

与经典的 Canny 算法相比,该跟踪策略无需设置全局阈值,更为高效、简洁。实验结果表明单像素边缘跟踪策略显著地减少了边缘冗余像素,提高了图像后续处理的效率。检测的图像边缘更为连续、完整,边缘跟踪方向抗干扰性强,具有较强的鲁棒性。

(2) 经单像素跟踪策略获取的图像边缘与真实的边缘通常存在一定偏差。为了减小图像边缘检测的误差,以边缘像素梯度方向为约束,提出了一种亚像素定位策略。实验验证可知,亚像素定位策略可有效地减小图像边缘检测偏差,并消除了程序运算中引入的截断误差,提高了边缘检测准确度。

(3) 在环境照度变化较大的场景中,亚像素优化的单像素边缘跟踪策略检测的图像边缘连续、平滑。该策略可用于边缘模糊、对比度低的图像边缘检测,并适用于高动态范围(5 ~ 100 000 lx) 成像场景。

## 参 考 文 献

- [1] BETSAS T, GEORGOPOULOS A. 3D edge detection and comparison using four-channel images [J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2022, 48: 9 - 15.
- [2] 段恩泽, 方鹏, 王红英, 等. 基于深层卷积神经网络的肉兔图像分割与体重质量估测 [J]. *农业机械学报*, 2021, 52(6): 259 - 267.  
DUAN Enze, FANG Peng, WANG Hongying, et al. Meat rabbit image segmentation and weight estimation model based on deep convolution neural network [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(6): 259 - 267. (in Chinese)
- [3] XU Dingyu, HE Shanshan, ZHOU Junxiao, et al. Goos-Hanchen effect enabled optical differential operation and image edge detection [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(21): 211103.
- [4] 李敏花, 柏猛, 吕英俊. 自适应阈值图像边缘检测方法 [J]. *模式识别与人工智能*, 2016(2): 177 - 184.  
LI Minhua, BAI Meng, LÜ Yingjun. Adaptive thresholding based edge detection approach for images [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2016(2): 177 - 184. (in Chinese)
- [5] 吴琼, 马雷. 一种基于 LoG 算子的量子图像边缘检测算法 [J]. *量子电子学报*, 2022, 39(5): 720 - 727.  
WU Qiong, MA Lei. A quantum image edge detection algorithm based on LoG operator [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2022, 39(5): 720 - 727. (in Chinese)
- [6] YU Yongbin, YANG Chenyu, DENG Quanxin, et al. Memristive network-based genetic algorithm and its application to image edge detection [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2021, 32(5): 1062 - 1070.
- [7] LI Xiaojin. Image texture analysis and edge detection algorithm based on anisotropic diffusion equation [J]. *Advances in Mathematical Physics*, 2021, 2021(3): 9910882.
- [8] 任宏. 基于数字散斑立体视觉的非合作卫星位姿测量关键技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2023.  
REN Hong. Research on key technologies of non-cooperative satellite pose measurement based on digital speckle stereo vision [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2023. (in Chinese)
- [9] 张悦庭, 尹忠科, 王建英. 一种新的图像边缘检测方法 [J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(6): 1295 - 1299.  
ZHANG Yueting, YIN Zhongke, WANG Jianying. A new image edge detection scheme [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(6): 1295 - 1299. (in Chinese)
- [10] 谷留涛, 张卫平, 卢浩琳, 等. 基于边缘提取的 MEMS 谐振器谐振模式识别算法 [J]. *中国惯性技术学报*, 2023, 31(5): 490 - 494.  
GU Liutao, ZHANG Weiping, LU Haolin, et al. Resonant mode identification algorithm for MEMS resonators based on edge extraction [J]. *Journal of Chinese Inertial of Technology*, 2023, 31(5): 490 - 494. (in Chinese)
- [11] YU Yongbin, TANG Haowen, FENG Xiao, et al. Design of multilayer cellular neural network based on memristor crossbar and its application to edge detection [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2023, 34(3): 641 - 649.
- [12] 高世一, 赵明扬, 张雷, 等. 基于 Zernike 正交矩的图像亚像素边缘检测算法改进 [J]. *自动化学报*, 2008, 34(9): 1163 - 1168.  
GAO Shiyi, ZHAO Mingyang, ZHANG Lei, et al. Improved algorithm about subpixel edge detection of image based on Zernike orthogonal moments [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34(9): 1163 - 1168. (in Chinese)

(下转第 294 页)

- [15] ZHANG Q, LIU X Y, FU J L. Neural networks incorporating dictionaries for Chinese word segmentation [C]//Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2018.
- [16] DEVLIN J, CHANG M W, LEE K, et al. Bert: pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding [C]//Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, 2019: 4171–4186.
- [17] 刘新亮, 张梦琪, 谷情, 等. 基于 BERT-CRF 模型的新鲜蛋供应链命名实体识别 [J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 519–525.  
LIU Xinliang, ZHANG Mengqi, GU Qing, et al. Named entity recognition of fresh egg supply chain based on BERT-CRF architecture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 519–525. (in Chinese)
- [18] DU J L, MI W, DU X L. Chinese word segmentation in electronic medical record text via graph neural network-bidirectional LSTM-CRF model [C]//2020 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM). IEEE, 2020: 985–989.
- [19] GAO W, ZHENG X, ZHAO S. Named entity recognition method of Chinese EMR based on BERT-BiLSTM-CRF [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1848(1): 012083.
- [20] WANG S, PANG M, PAN C, et al. Information extraction for intestinal cancer electronic medical records [J]. IEEE Access, 2020, 8: 125923–125934.
- [21] 俞士汶, 段慧明, 朱学锋, 等. 北京大学现代汉语语料库基本加工规范 [J]. 中文信息学报, 2002, 16(5): 49–64.  
YU Shiwen, DUAN Huiming, ZHU Xuefeng, et al. The basic processing of contemporary Chinese corpus of Peking University specification [J]. Journal of Chinese Information Processing, 2002, 16(5): 49–64. (in Chinese)
- [22] DAI Z, WANG X, NI P, et al. Named entity recognition using BERT BiLSTM CRF for Chinese electronic health records [C]//2019 12th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI). IEEE, 2019: 1–5.
- [23] CHEN J W, CHEN J G, WANG C B, et al. Research on segmentation of geological mineral text using conditional random fields [J]. China Mining Magazine, 2018, 27(9): 69–74, 101.
- [24] WEI D, LIU Z, XU D, et al. GeoBERTsegmenter: word segmentation of Chinese texts in the geoscience domain using the improved BERT model [J]. Earth and Space Science, 2022, 9(10): e2022EA002511.

(上接第 248 页)

- [13] 刘阳. 面向星箭对接环的视觉位姿测量方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.  
LIU Yang. Research on visual pose measurement for adapter ring [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022. (in Chinese)
- [14] 温卓漫. 复杂场景下合作靶标的准确快速识别与定位 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.  
WEN Zhuoman. Accurate and fast identification and localization of a cooperative target in complex background [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2017. (in Chinese)
- [15] SADIQ H A, ABD R R, BASHEERA M M, et al. Image edge detection operators based on orthogonal polynomials [J]. International Journal of Image and Data Fusion, 2017, 8(1/4): 293–308.
- [16] 任栋宇, 李晓娟, 林涛, 等. 基于 Kinect v2 传感器的果树枝干三维重建方法 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 2): 197–203.  
REN Dongyu, LI Xiaojuan, LIN Tao, et al. 3D reconstruction method for fruit tree branches based on Kinect v2 sensor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2): 197–203. (in Chinese)
- [17] 叶应辉. 基于深度学习的卫星遥感图像边缘检测方法 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(10): 39–44.  
YE Yinghui. An edge detection method of satellite remote sensing image based on deep learning [J]. Computer Measurement and Control, 2022, 30(10): 39–44. (in Chinese)
- [18] 周小军, 谭薇. 一种改进 Canny 算子芯片图像边缘检测方法 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2022(4): 91–94.  
ZHOU Xiaojun, TAN Wei. An improved algorithm for chip image edge detection based on Canny [J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2022(4): 91–94. (in Chinese)
- [19] SUN Zhaohui, YANG Feng, GUO Peng, et al. Flash-based in-memory computing for stochastic computing in image edge detection [J]. Journal of Semiconductors, 2023, 44(5): 159–164.