

Canny与改进Legendre矩结合的无人机边缘检测

张明德¹, 王利强^{1,2}

¹天津职业技术师范大学电子工程学院, 天津

²天津市现场总线控制技术工程中心, 天津

收稿日期: 2026年9月7日; 录用日期: 2026年10月9日; 发布日期: 2026年10月16日

摘 要

针对无人机机载平台计算资源有限, 传统边缘检测算法存在精度不足、速度慢、边缘易断裂的问题, 提出一种融合Canny算法与Legendre矩的亚像素边缘检测方法。该方法先通过Canny算法完成像素级边缘粗定位, 再利用Legendre矩对边缘点进行亚像素精修, 通过预生成并复用Legendre基函数模板减少冗余计算、降低复杂度。实验结果表明, 该算法可有效提取无人机航拍图像完整边缘, 定位精度达亚像素级, 处理速度较Canny-Zernike算法提升约65%, 计算量较传统Legendre方法降低50%~60%。该算法兼具高精度与轻量化、低耗时的特性可为无人机目标识别提供技术支持。

关键词

无人机, 边缘识别, Legendre矩, Canny

UAV Edge Detection Using Canny and Improved Legendre Moments

Mingde Zhang¹, Liqiang Wang^{1,2}

¹School of Electronic Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin

²Tianjin Engineering Research Center of Fieldbus Control Technology, Tianjin

Received: September 7, 2026; accepted: October 9, 2026; published: October 16, 2026

Abstract

To address the limitations of constrained computing resources on UAV airborne platforms and the inherent shortcomings of traditional edge detection algorithms—including insufficient localization

accuracy, low processing efficiency, and frequent edge discontinuities—a subpixel edge detection method integrating the Canny algorithm and Legendre moments is proposed. Specifically, it first employs the Canny algorithm to perform pixel-level coarse edge localization, then applies Legendre moments to refine the detected edge points to subpixel precision. By pre-generating and reusing Legendre basis function templates, redundant computations are eliminated and the overall algorithmic complexity is significantly reduced. Extensive experimental results demonstrate that the proposed algorithm can effectively extract complete and continuous edges from UAV aerial images and achieves subpixel-level localization accuracy. Its processing speed is approximately 65% higher than that of the Canny-Zernike algorithm, and its computational load is reduced by 50%~60% compared with the conventional Legendre moment method. With the advantages of high accuracy, lightweight implementation, and low latency, the proposed algorithm can provide effective technical support for UAV-based visual target recognition.

Keywords

Unmanned Aerial Vehicle, Edge Detection, Legendre Moments, Canny Algorithm

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着无人机技术的快速发展,在农业、物流、救援、地质勘探等各个领域得到了广泛应用[1][2]。因无人机在图像采集方面具备灵活便捷、作业高效、使用安全且成本较低等特点[3],无人机拍摄图像已成为视觉数据获取的重要途径。但受限于无人机机载平台的搭载空间与计算性能[4],如何在有限的机载计算资源下提升图像边缘识别的精度与处理效率[5],已成为该领域亟待解决的关键问题[6]。

当前主流的边缘检测算子主要包括 Sobel 算子、Roberts 算子及 Canny 算法等[7]。传统 Sobel 算子所检测的边缘宽度较大,边缘精细化程度不足[8];Roberts 算子虽具备一定的边缘响应能力,但在图像边缘提取过程中易产生毛刺伪影[9];Canny 算子其鲁棒性和精度优于 Roberts、Sobel、Prewitt 早期一阶算子应用较为广泛[10][11]。但是 Canny 算子虽然可快速实现像素级边缘检测,但其对噪声具有较强敏感性,在图像模糊或低对比度场景中,易出现边缘断裂与定位偏差问题[12]。另一方面,Legendre 矩作为正交矩的典型代表,虽展现出优异的亚像素级边缘定位性能,但其计算复杂度偏高,导致运算耗时较长,难以满足资源受限场景的实时性需求[13]。

为解决上述问题,国内外学者开展了相关研究:黄等[14]提出的改进 Canny 算法,通过基于邻域相似性的多级阈值非对称剪裁中值滤波替代高斯滤波,采用八方向卷积模板提取梯度向量提升了抗噪声能力,结合 Otsu 算法自适应计算阈值优化边缘检测自适应性。但边缘定位精度仍局限于像素级;张等[15]将双三次插值与 Zernike 算法融合,实现了亚像素检测,能较好地检测和高精度定位图像边缘,但计算效率不足处理流程繁杂难以快速处理;Du 等[16]在检测零件尺寸的应用中设计了一种基于 Canny-Zernike 子像素边缘检测和改进霍夫变换的方法,虽提高了像素精度与效率,但仅针对单一场景,无法适用于无人机之中。Sheng 等[17]对比了 Legendre 矩与 Zernike 矩、Chebyshev 矩在正交基定义(矩形域 vs 圆形域)、旋转不变性、模板复杂度上的差异,分析了 Legendre 与其他两种矩阵在目标检测中的优势[18]。为此,针对无人机机载平台计算资源有限的痛点,本文提出一种融合 Canny 算子与 Legendre 矩的边缘识别算法,通过 MATLAB 仿真验证算法在边缘定位精度、运行效率上的提升,为无人机机载边缘识别的工程

应用提供理论支撑。相较于 Canny 算法像素精度提升达到亚像素级别, 比 Canny-Zernike 算法处理速度提升 29%。

2. 传统 Canny 与 Legendre 矩原理

2.1. 传统 Canny 边缘检测算法及其原理

Canny 边缘检测算法由 John F. Canny 在 1986 年提出, 至今仍是计算机视觉领域最经典、最常用的边缘检测算法之一。它定义了评价一个边缘检测的算法好坏的三个标准: 良好的检测性能; 良好的定位性能; 清晰的响应。为实现这些目标具体需要 4 个步骤:

首先进行高斯滤波对图片进行平滑处理以降低噪声的影响, 表达式为

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

$$S = G \times I \quad (2)$$

式中 G 是由一个连续的二维高斯函数采样和离散化得到的高斯滤波器, σ 为高斯滤波器参数, S 是经过高斯滤波器平滑过后的图片; I 是待检测的原始图片。

对经过处理后的图像计算梯度幅值和方向用来找到图像灰度强度变化最剧烈的区域和方向; 计算梯度幅值与方向首先计算水平梯度 G_x 和垂直梯度 G_y 之后利用 G_x 和 G_y 合成梯度强度 G 和梯度方向 θ 。公式表示为:

$$G_x = K_x \times s \quad (3)$$

$$G_y = K_y \times s \quad (4)$$

式中 G_x, G_y 为梯度算子

梯度强度与方向公式表示为:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (5)$$

$$\theta = \arctan 2(G_y, G_x) \quad (6)$$

梯度强度表示边缘的强弱, 值越大边缘越明显; 梯度方向总是垂直于边缘本身, 表示边缘的针对图像的像素边缘, 以梯度方向为标准实行最大值抑制, 细化边缘, 只保留局部梯度最大的点, 从而得到一个精确的、单像素宽的边缘响应;

随后进行双阈值检测, 区分“强边缘”、“弱边缘”和“噪声”, 进一步消除因噪声或其他杂波造成的虚假边缘; 最后检查所有被标记为“弱边缘”的像素, 通过连接弱边缘来最终确定真正的边缘, 弥补因阈值设置不当造成的边缘断裂。

2.2. Legendre 矩原理

勒让德(Legendre)多项式是一类在数学、工程领域广泛应用的正交多项式, 是勒让德微分方程的标准解, 在区间 $[-1, 1]$ 上满足正交性, 即不同阶次的多项式之间相互独立、互不相关。其边缘识别的核心机理在于: 图像中的平滑区域、边缘结构、噪声干扰等不同成分, 在矩变换域中呈现出差异化的分布特征; 通过分析矩系数的变化规律或图像重构误差, 可有效区分并提取边缘区域。

Legendre 矩是建立在 Legendre 正交多项式基础上的一类重要的图像矩描述子。对于一幅定义在连续域上的灰度图像, 其中阶 Legendre 矩的数学定义为:

$$L_{pq} = \frac{(2p+1)(2q+1)}{4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_p(x) P_q(y) f(x, y) dx dy \quad (7)$$

其中, 和 $P_q(y)$ 分别表示阶和阶 Legendre 多项式。该定义确保了矩的正交性, 即不同阶次的矩之间互不相关。

然而, 在数字图像处理的实际应用中, 图像是以离散像素矩阵的形式存在的。因此, 必须将上述连续定义进行离散化。首先, 将大小为 $N \times N$ 的图像像素坐标 (i, j) 线性映射至 $[-1, 1]$ 的标准区间内:

基于此坐标映射, 离散化的 Legendre 矩计算公式如下:

$$L_{pq} = \frac{(2p+1)(2q+1)}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} P_p(x_i) P_q(y_j) f(i, j) \quad (9)$$

通过计算得到矩集 L_{pq} (其中 p, q 分别对应矩的行列阶数), 该矩集可用于对目标图像的整体特征进行近似表征。从矩的物理意义来看, 低阶矩(对应最大阶数 M 以内的矩)主要承载图像的全局轮廓信息与低频分量, 能够反映目标的整体形态、位置、尺寸等核心特征; 而高阶矩则聚焦于图像的局部精细细节与高频成分, 负责刻画边缘纹理、微小凸起等细微结构。

基于这一原理, 通过调控参与图像重构的矩的最高阶数 M , 可实现对图像信息的有损压缩与多尺度表达: 当 M 取值较小时, 仅利用低阶矩重构, 能以较小的数据量保留图像核心轮廓, 压缩比更高, 但会损失精细细节; 当 M 取值增大时, 引入高阶矩参与重构, 图像细节更丰富、还原度更高, 但数据量与计算复杂度会相应增加。

3. Canny 与改进的 Legend 结合

Canny 算法通过多步骤流程快速定位图像中的潜在边缘像素, 再二值化输出。输出后的图像再经过 Legend 矩处理提高边缘检测精度。

Legendre 矩亚像素边缘检测的核心是通过正交多项式基函数(如 0 阶 P_0 、1 阶 P_1 、2 阶 P_2)对边缘局部区域进行建模。传统方法在处理每个边缘点时, 需重复生成基函数, 导致大量冗余计算。Legendre 多项式基函数(以 1 阶和 2 阶为例)在归一化坐标 $x, y \in [-1, 1]$ 内定义为:

$$P_0(x, y) = 1, \quad P_1(x) = x, \quad P_1(y) = y \quad (10)$$

$$P_2(x) = \frac{3x^2 - 1}{2}, \quad P_2(y) = \frac{3y^2 - 1}{2} \quad (11)$$

本次实验选用 7×7 窗口尺寸, 是亚像素定位精度、灰度信息完整性、抗干扰能力与计算复杂度多维权衡的最优结果。该窗口的 49 个采样点可完整捕捉微波源阶跃边缘的灰度特征, 为二阶 Legendre 多项式拟合提供充足信息支撑, 保障亚像素偏移量的求解精度, 同时其尺度匹配阶跃边缘梯度的有效作用范围, 能精准覆盖边缘点邻域的有效灰度区域, 避免纳入背景噪声或相邻边缘的冗余信息导致矩计算偏差。 7×7 窗口的空间平滑效应可有效抑制图像中的低强度噪声, 提升多项式拟合的稳定性, 且 49 个元素的模板规模使预计算与矩计算的运算量处于极低水平, 契合模板复用的低冗余设计目标, 不会因运算量平方级增长抵消优化增益, 同时该窗口尺度与 Canny 粗检测的邻域尺度高度匹配, 能够实现粗定位与 Legendre 矩精修的无缝衔接, 避免尺度转换造成的边缘信息丢失。

Legendre 多项式基函数的形式仅与窗口尺寸相关, 与图像内容无关联, 因此可在边缘检测前一次性完成基函数模板的生成, 供所有边缘点计算时复用。将 7×7 窗口内像素坐标归一化至正交区间 $[-1, 1] \times [-1, 1]$ 。窗口内像素的行列索引:

$$(u, v) \in [1, W] \times [1, W] \quad (12)$$

归一化坐标 (x, y) 通过线性变换获得:

$$x = \frac{2(u-1)}{W-1} - 1, \quad y = \frac{2(v-1)}{W-1} - 1 \quad (13)$$

该变换将物理坐标映射为 $x, y \in [-1, 1]$ 均匀分布。以矩阵形式表示, 生成 $W \times W$ 的归一化坐标网格矩阵 x 和 y , 其中 $X(u, v) = x$, $Y(u, v) = y$ 。当 $W = 7$ 时 X 和 Y 为 7×7 矩阵, 元素从 -1 到 1 等间隔取值。

Table 1. Value of $X(u, v)$

表 1. $X(u, v)$ 取值

V (列索引)	1	2	3	4	5	6	7
$X(u, v)$	1	0.66667	0.33333	0	0.33333	0.66667	1

矩阵模板仅仅依赖窗口尺寸 W , 与图像内容无关, 可一次性生成并储存。基于表 1 中 X 的元素值代入式(9)中计算得到 $P_2(x)$ 的二阶矩阵:

$$P_{2x} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.167 & -0.333 & -0.500 & -0.333 & 0.167 & 1.000 \\ 1.000 & 0.167 & -0.333 & -0.500 & -0.333 & 0.167 & 1.000 \\ 1.000 & 0.167 & -0.333 & -0.500 & -0.333 & 0.167 & 1.000 \\ 1.000 & 0.167 & -0.333 & -0.500 & -0.333 & 0.167 & 1.000 \\ 1.000 & 0.167 & -0.333 & -0.500 & -0.333 & 0.167 & 1.000 \\ 1.000 & 0.167 & -0.333 & -0.500 & -0.333 & 0.167 & 1.000 \\ 1.000 & 0.167 & -0.333 & -0.500 & -0.333 & 0.167 & 1.000 \end{bmatrix}$$

4. 实验结果与分析

实验基于通用 PC 平台开展算法仿真验证, 硬件配置为 Intel Core i5-10400 处理器(2.90 GHz)、16 GB 运行内存, 未使用 GPU 并行加速。图片数据来自公开无人机航拍图像。后续通过 MATLAB Coder 可自动生成 C/C++ 代码, 无需手动改写即可部署到无人机机载嵌入式平台(如 Jetson Nano)。

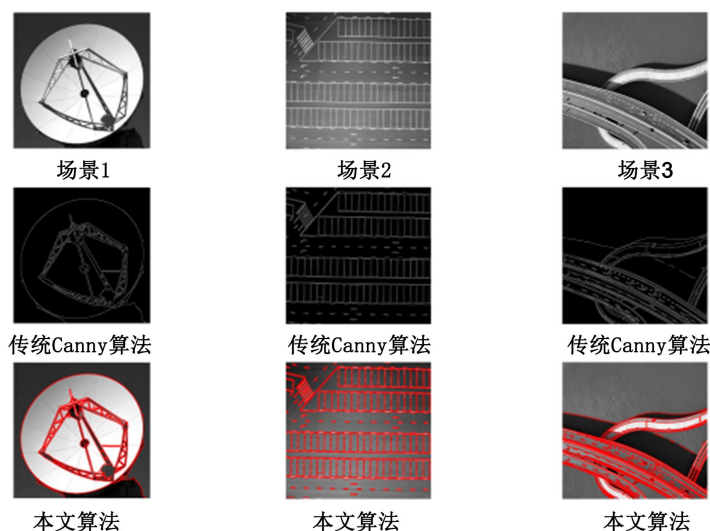


Figure 1. Comparison diagram of algorithms

图 1. 算法对比图

为全面验证本文所提 Canny-Legendre 矩亚像素边缘检测算法的实际应用性能, 选取无人机作业场景中三类极具代表性的航拍图像作为测试样本, 分别涵盖工业设施、设备巡检、城市交通三大典型应用场

景。通过多场景下的边缘检测结果可视化对比，直观分析传统 Canny 算法与本文改进算法在边缘定位精度、细节提取能力及复杂环境适应性上的差异如图 1 所示。与此同时，本文设计十组对照实验，分别记录不同测试样本下各算法的完整运行耗时，以定量方式对比两种算法的运算效率如表 2 所示。最终从检测精度与运行效率两个核心维度，完成算法综合性能的客观评估与对比分析。

Table 2. Processing time table (Unit: s)
表 2. 时间处理表(单位: 秒)

图像编号	本文算法	Canny-Zernike	Legendre
1	0.367	1.177	0.778
2	0.424	1.247	1.112
3	0.487	1.352	1.256
4	0.556	1.684	1.356
5	0.614	1.657	1.462
6	0.720	2.162	1.705
7	1.234	3.427	3.092
8	1.357	3.866	3.109
9	1.498	4.205	3.216
10	1.655	4.483	3.323

Table 3. Quantitative comparison of evaluation metrics for edge detection algorithms
表 3. 不同边缘检测算法定量评价指标对比

算法	Precision	Recall	F1	平均亚像素误差
Canny	0.723	0.653	0.687	0.46
本文	0.940	0.913	0.927	0.07

由图 1 可知本文算法达到亚像素精度高于传统 Canny 算法像素精度，由表 2 可知本文算法的处理时间约为 Canny-Zernike 算法的 35%，相对减少了 65%；约为传统 Legendre 算法的 42%，相对减少了 58%。由表 3 可知相较于传统 Canny 算法，本文所提融合 Canny 与 Legendre 矩的亚像素检测方法精确率提升约 30%、召回率提升近 40%，边缘平均定位误差由 0.46 像素降低至 0.07 像素，定量验证该算法在航拍图像中可实现更完整的轮廓提取、更少的伪边缘干扰，同时具备更高的亚像素定位精度。综上，本文算法在保证像素精度的同时，处理速率上比传统的 Canny-Zernike 和 Legendre 算法分别降低了 65%和 58%优于传统算法。

5. 结论

本文提出了一种融合 Canny 与 Legendre 矩的改进边缘检测算法，通过与传统 Canny 算法、Canny-Zernike 算法、传统 Legendre 矩算法进行对比，针对无人机航拍图像边缘检测中存在的边缘断裂、定位精度低、计算量大、实时性差等问题，采用 Canny 粗定位 + Legendre 矩亚像素精修的两级检测结构，有效保留并提升了图像边缘信息；通过预生成 Legendre 基函数模板并复用，避免重复计算，大幅降低算法复杂度；采用亚像素级边缘定位，显著提升无人机目标边缘的检测精度与完整性；经过与传统 Canny、Canny-Zernike、Legendre 算法在检测精度、运行时间、边缘连续性等方面的对比，本文算法在亚像素精度、处

理速度、资源占用上均优于传统算法, 边缘更完整、噪点更少、定位更准、效率更高, 从而证实了本文算法在无人机边缘检测任务中的有效性与优越性。

基金项目

本研究受天津市科技计划项目(项目编号: 25KPKJRC00050)支持。

参考文献

- [1] Zhang, H., Wang, L., Tian, T. and Yin, J. (2021) A Review of Unmanned Aerial Vehicle Low-Altitude Remote Sensing (UAV-LARS) Use in Agricultural Monitoring in China. *Remote Sensing*, **13**, Article No. 1221. <https://doi.org/10.3390/rs13061221>
- [2] Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., *et al.* (2019) Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **21**, 2689-2714.
- [3] Ramachandran, A. and Sangaiah, A.K. (2021) A Review on Object Detection in Unmanned Aerial Vehicle Surveillance. *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*, **2**, 215-228. <https://doi.org/10.1016/j.ijcce.2021.11.005>
- [4] Xia, X., Fattah, S.M.M. and Babar, M.A. (2023) A Survey on UAV-Enabled Edge Computing: Resource Management Perspective. *ACM Computing Surveys*, **56**, 1-36. <https://doi.org/10.1145/3626566>
- [5] Abrar, M., Ajmal, U., Almohaimeed, Z.M., Gui, X., Akram, R. and Masroor, R. (2021) Energy Efficient UAV-Enabled Mobile Edge Computing for IoT Devices: A Review. *IEEE Access*, **9**, 127779-127798. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3112104>
- [6] Hoque, M.U., Kumar, D., Audet, Y. and Savaria, Y. (2022) Design and Analysis of a 35 GHz Rectenna System for Wireless Power Transfer to an Unmanned Air Vehicle. *Energies*, **15**, Article No. 320. <https://doi.org/10.3390/en15010320>
- [7] Sun, R., Lei, T., Chen, Q., Wang, Z., Du, X., Zhao, W., *et al.* (2022) Survey of Image Edge Detection. *Frontiers in Signal Processing*, **2**, Article ID: 826967. <https://doi.org/10.3389/frsip.2022.826967>
- [8] 王梓权, 张博, 王卓, 等. 基于 Sobel 滤波的光存储图像检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(8): 294-299.
- [9] Tariq, N., Hamzah, R.A., Ng, T.F., Wang, S.L. and Ibrahim, H. (2021) Quality Assessment Methods to Evaluate the Performance of Edge Detection Algorithms for Digital Image: A Systematic Literature Review. *IEEE Access*, **9**, 87763-87776. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3089210>
- [10] Abdullah, H.-A.T., Mahmood, R.Z., Alhaj Zber, S.M., Mohammed, R.A., Ahmed, M.R. and Talab, A.W. (2024) FPGA-Based Three Edge Detection Algorithms (Sobel, Prewitt and Roberts) Implementation for Image Processing. *Przegląd Elektrotechniczny*, **100**, 29-33. <https://doi.org/10.15199/48.2024.02.05>
- [11] Ramnarayan, R., Saklani, N. and Verma, V. (2019) A Review on Edge Detection Technique “Canny Edge Detection”. *International Journal of Computer Applications*, **178**, 28-30. <https://doi.org/10.5120/ijca2019918828>
- [12] 刘宇涵, 闫河, 陈早早, 等. 强噪声下自适应 Canny 算子边缘检测[J]. 光学精密工程, 2022, 30(3): 350-362.
- [13] Bustacara-Medina, C. and Ruiz-García, E. (2023) Accuracy of Legendre Moments for Image Representation. *Computer Science Research Notes*, **3301**, 249-257. <https://doi.org/10.24132/CSRN.3301.29>
- [14] 黄怡静, 胡小平, 彭向前, 黄泓. 改进 Canny 算子的图像边缘检测算法[J]. 机械科学与技术, 2025, 44(9): 1612-1621.
- [15] 张喜民, 詹海生. 基于双三次插值与 Zernike 矩的图像亚像素边缘检测算法[J]. 计量学报, 2025, 46(7): 989-995.
- [16] Du, B., Hao, Z.Q. and Wei, X.T. (2021) Roundness Detection of End Face for Shaft Workpiece Based on Canny-Zernike Sub Pixel Edge Detection and Improved Hough Transform. *Proceedings of the 2021 IEEE 11th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication*, Beijing, 18-20 June 2021, 1-4. <https://doi.org/10.1109/iceiec51955.2021.9463822>
- [17] Sheng, Y., Liu, J. and Wang, Z. (2022) A Review of Orthogonal Moments in Image Processing and Computer Vision. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **18**, 7093-7108.
- [18] Zhang, S., Wang, F., Wu, X. and Gao, K. (2023) MTF Measurement by Slanted-Edge Method Based on Improved Zernike Moments. *Sensors*, **23**, Article No. 509. <https://doi.org/10.3390/s23010509>