

# 优化的 Canny 边缘检测算法在陶瓷碎片图案检测中的应用

21-2018213201-何步帷

## 一、 研究背景与动机

陶瓷发源于我国,经过上千年的传承和演变,陶瓷已经成为兼具实用性与观赏性的器具。古陶瓷作为古代人民巅峰手工技艺的充分体现,是现代人们研究历史的宝贵载体,具有重要的艺术价值和考古价值。江西景德镇,在宋代被授予年号“景德”,从此驰名;现景德镇以青花瓷器闻名世界,被誉为“瓷都”。历史上景德镇是御窑所在地,为满足宫廷需要,通常一次性烧制成百上千件器具,遴选出一件或几件作为贡品后,其余的全部打碎深埋,以防流入民间。陶瓷碎片在考古中具有重要作用,其溯源与修复是一个庞大的系统工程,全程需要大量的人力物力投入。本项目设计了基于计算机图像处理实现陶瓷碎片艺术特征识别的算法,准确提取碎片图像的艺术特征,从而帮助文物鉴定修复工作更加高效地进行。

## 二、 研究问题和挑战

本项目聚焦于对陶瓷碎片图案特征的提取:对输入的图片进行预处理后使用边缘检测算法提取图案轮廓。输入的待处理图片具有不可控的特点,图片的分辨率、对比度、亮度、饱和度和锐度等受拍摄方式和拍摄环境的影响十分显著。在传统 Canny 边缘检测算法[1]的基础上进行改进,在非极大值抑制中提出高阈值减半查找,提高边缘检测的稳定性和准确性。

## 三、 国内外相关工作

目前尚不存在高效的自动分拣技术,也没有系统性的针对古陶瓷碎片的识别算法。瓷器碎片的初步分拣要依据釉色、器型、纹饰来进行。随着分拣的进行,瓷片间的类同性越来越高,分拣的难度也会越来越大,只能通过不断地尝试试错。兵马俑与陶瓷一样同为中国古代辉煌文明的一张金字名片,但在兵马俑刚刚出土时,其大部分的形态因为年代久远以及历史原因已经成为了碎块,而兵马俑因其器型之大构造之复杂,极大地增加了人工分拣和匹配的难度,故近年来已经有专业人士通过人工智能算法,辅助匹配工作的进行。

边缘检测是图像处理领域关键的技术问题,其在诸多领域都有着重要的应用。现有的边缘检测算法可分为两类:传统方法和基于深度学习的方法,其中经典研究的出现时间如图 1 所示。

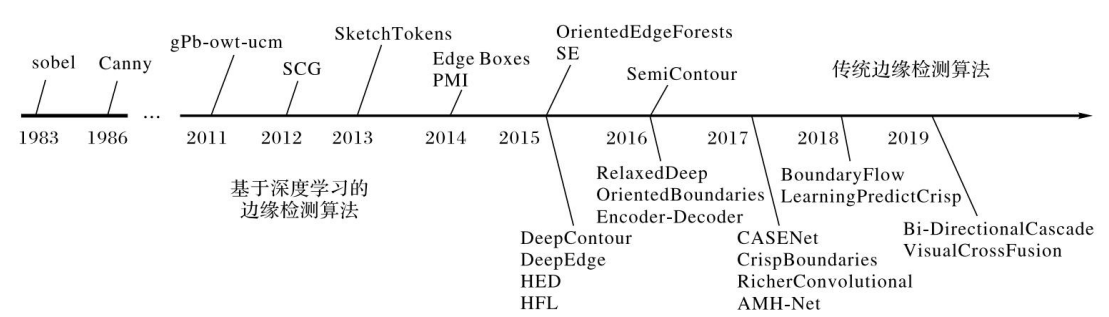


图 1 传统方法和基于深度学习的方法研究历程[2]

## 四、 技术方案设计

本项目选择目前广泛采用的 Canny 算子实现对陶瓷碎片图像的边缘检测。

1. Canny 算法: John F. Canny 于 1986 年提出的一个多级边缘检测算法。

三个检测标准：

- 1) 低错误率，即不漏检不误检，
- 2) 高精度度，即得到的点尽可能落在真实边缘的中心，
- 3) 单一点响应，即减少单边缘的多响应和虚假边缘响应。

## 2. 方案概要设计

方案分为两个步骤：图像预处理，Canny 边缘检测。

- 1) 图像预处理
  - a) 将原始 RGB 图像转换二维灰度图像
  - b) 根据图片边缘对比度决定是否进行直方图均值化
- 2) Canny 边缘检测
  - a) 用高斯滤波器平滑处理原图像；
  - b) 用一阶偏导的有限差分进行计算梯度的幅值和方向；
  - c) 对梯度幅值进行非极大值抑制；
  - d) 用双阈值算法检测和连接边缘。

## 3. 方案详细设计

- 1) 图像预处理
  - a) 使用 `rgb2gray` 函数通过消除色调和饱和度信息，保留亮度信息，将 RGB 图像转换为灰度图像。
  - b) 对于边缘模糊的灰度图像，使用直方图均衡增强对比度。这一步骤会增强噪声和虚假边缘，需要调整后续算法参数（双阈值）以达到最佳输出。
- 2) Canny 边缘检测
  - a) 用高斯滤波器平滑处理灰度图像，消除高频噪声。高频噪声的变化率高，对于后续的梯度计算会带来较大的干扰。平滑化的目的是抑制图像中的噪音或其他小的波动；而同时平滑化也模糊了附带图像信息的细小尖锐边缘。实际工程经验表明，高斯滤波器可以在抗噪声干扰和边缘检测之间提供一个较好的折中方案。本实验使用标准差为 1 的二维高斯平滑核对灰度图像进行滤波。
  - b) **Sobel 卷积算子计算图像梯度的幅值和方向。**梯度运算旨在揭示图像灰度值发生快速变化的地方，这些位置的导数较大。图像梯度即当前像素点在水平（x 轴）与垂直（y 轴）方向的偏导数（式 1），图像梯度可以理解为灰度值的变化率。

$$\left\{ \begin{array}{l} G_x = \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{f(x + \varepsilon, y) - f(x, y)}{\varepsilon} \\ G_y = \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{f(x, y + \varepsilon) - f(x, y)}{\varepsilon} \end{array} \right. \quad (1)$$

本实验通过使用 Sobel 算子（式 2）和其转置算子分别与 a) 步骤后的图像矩阵卷积运算，获得垂直和水平方向的一阶导数  $G_x, G_y$ 。

$$\text{Sobel} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

所需梯度的幅值  $M$  是两个一阶导数的几何平均（式 3），梯度方向  $\theta$  则通过反正切得到（式 4）。另外，图像局部的边缘方向与梯度方向垂直。

$$M = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (3)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{G_x}{G_y}\right) \quad (4)$$

c) **对梯度幅值进行非极大值抑制**。步骤 b) 得到的梯度图像存在边缘粗宽、弱边缘干扰等众多问题，可以使用非极大值抑制来寻找像素点局部最大值，将非极大值所对应的灰度值置 0，这样可以剔除大部分非边缘的像素点。具体方法是：根据步骤 b) 得到的梯度方向（取值  $[-90, 90]$ ），将梯度方向分为四个区域  $[22.5, 67.5)$ ,  $[-22.5, 22.5)$ ,  $[-67.5, -22.5)$ ,  $[-90, -67.5) \cup [67.5, 90)$ ；如图 2：

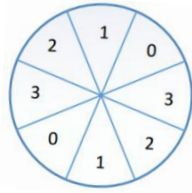


图 2 四个梯度方向区域[3]

遍历所有像素，根据划分的梯度方向将其与周围右上和左下/垂直上下/左上和右下/水平左右的邻居像素比较灰度大小，如果小于邻居，则不是极大值，灰度值需要被抑制置零，否则保留灰度值。

d) **用双阈值算法检测二值化和连接边缘**。为了尽可能去除假边缘，保留弱边缘，选取高低两个阈值，高阈值一般为低阈值的两倍[4]。对于小于低阈值的像素直接舍弃，高于高阈值的像素标为边缘；介于高低阈值之间的像素，寻找其八邻域（图 3）是否存在高于高阈值的边缘，若有，标为边缘，若仍然没有，将具有低边缘敏感度的高阈值减半查找，以包含高敏感度结果中连通的边缘像素，这有助于填补检测到的边缘中的间断，但噪声较大时容易引入假边缘。[5]

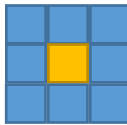


图 3 蓝色像素为黄色像素八邻域

## 五、实验方法和结论分析

为了验证算法的可行性，实验选取较有代表性的三张陶瓷碎片作为待处理图像，第一张是噪声小、边缘较清晰、对比度大的陶瓷碎片照片，第二张是噪声大、边缘较清晰、对比度中等的图片，第三张是噪声中等、边缘不清晰、对比度小的照片，通过 Matlab 程序将本项目算法与传统的 Canny 算子进行了比较。



图 4 三张待处理陶瓷碎片图像

实验一：不需进行直方图均值化，选取较低的低阈值（30）。

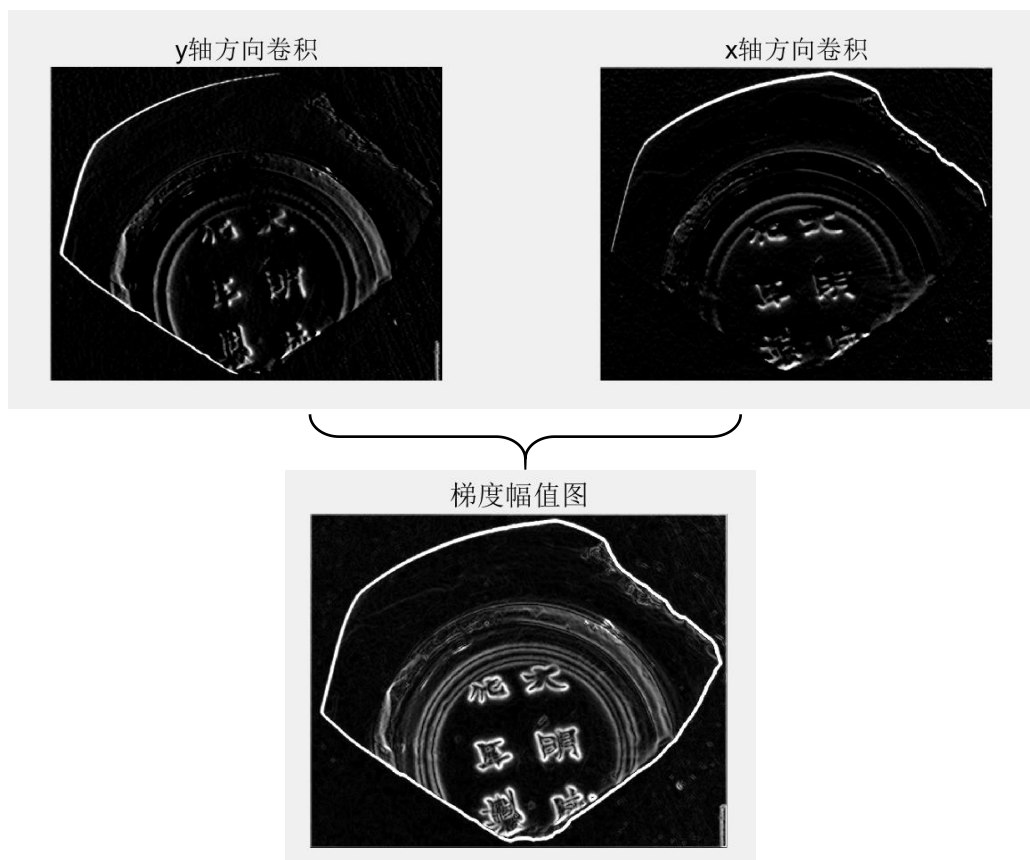


图 5 垂直与水平方向的一阶导数处理结果与梯度图像

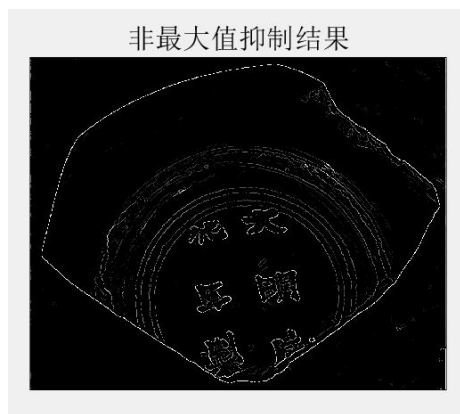


图 6 非最大值抑制

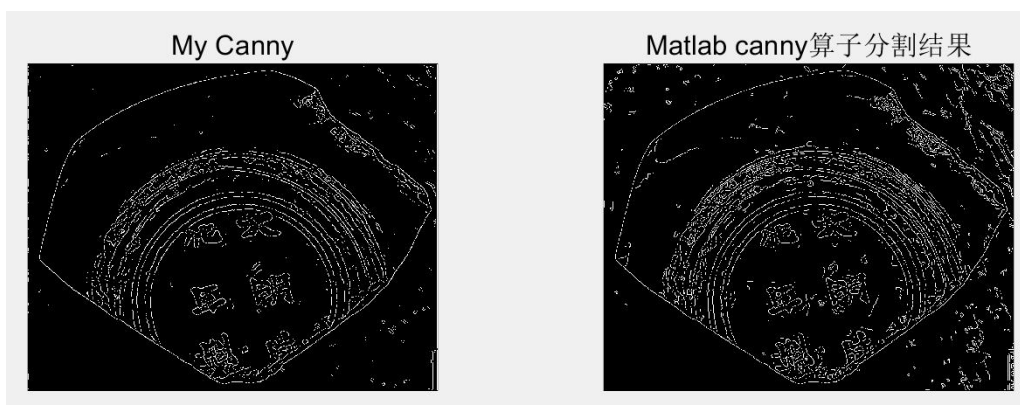


图 7 图 4(a)的边缘检测结果-本项目算子与经典 Matlab Canny 算子



图 8 细节部分

观察整体图 7，本项目算法消除了更多的假边缘和噪声；观察局部图 8，Matlab 的 Canny 算子在处理尖端边缘中断有明显优势（图中红圈部位）。

实验二：不需进行直方图均值化，选取较低的低阈值（30）。由于噪声较大，不进行高阈值减半查找，代价是放弃一些边缘细节。

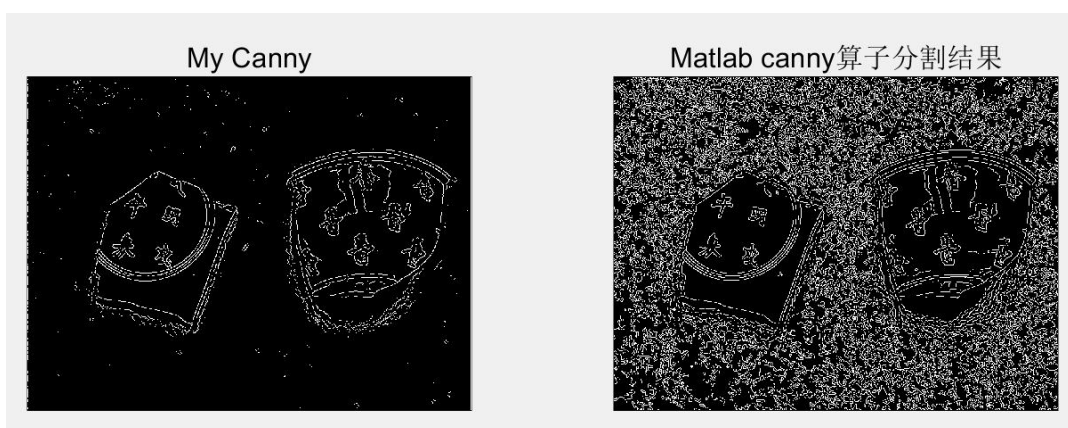


图 9 图 4(b)的边缘检测结果-本项目算子与经典 Matlab Canny 算子

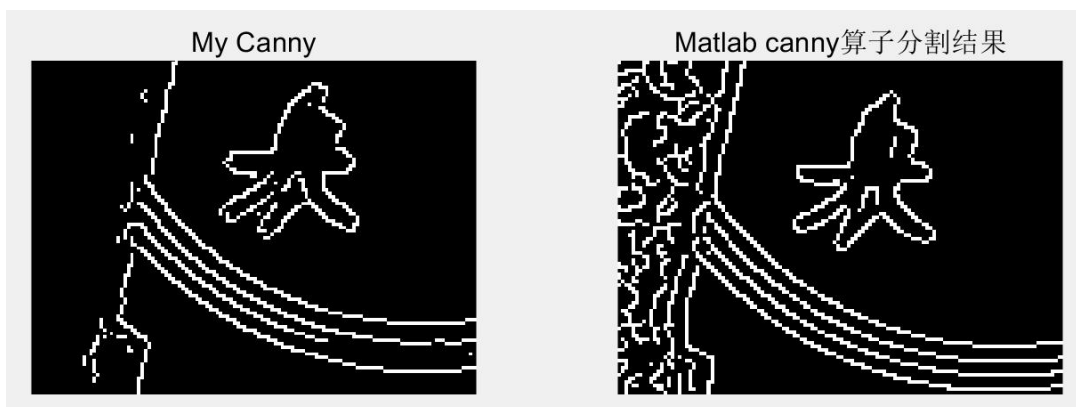


图 10 细节部分

观察整体图 9，本项目算法消除了大量的噪声；观察局部图 10，Matlab 的 Canny 算子保留了完整的图像边缘细节。

实验三：为了使边缘清晰，选择使用直方图均值化提高图像对比度、高阈值减半查找，同时增加低阈值（80）减少均值化带来的大量假边缘。



图 11 图 4(c)的边缘检测结果-本项目算子与经典 Matlab Canny 算子



图 12 细节部分

观察到本项目算法得到的瓷片外部边缘更为完整，但难以避免地带来了噪声。

## 六、 总结

图像识别技术辅助陶瓷碎片识别与分拣,需要获得研究对象的艺术特征,本项目从陶瓷碎片的图案艺术特征入手,使用改进的 Canny 算子进行边缘检测,在图像预处理阶段进行直方图均值化提高灰度图片对比度,在双阈值算法中加入高阈值减半查找,以包含高敏感度结果中连通的边缘像素,部分提高了边缘检测准确度。准确选取高低阈值是边缘检测的关键,阈值的合适与否决定了真假边缘的比例,是需要在后续研究解决的问题。

## 七、 参考文献

- [1] Canny J . A Computational Approach to Edge Detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, PAMI-8(6):679-698.
- [2] 李翠锦,瞿中. 基于深度学习的图像边缘检测算法综述 [J]. 计算机应用, 2020, 40(11):3280-3288.
- [3] <https://blog.csdn.net/humanking7/article/details/46606791>
- [4] 薛丽霞,李涛,王佐成. 一种自适应的 Canny 边缘检测算法 [J]. 计算机应用研究, 2010, 27(09):3588-3590.
- [5] [https://ww2.mathworks.cn/help/images/ref/edge.html?s\\_tid=doc\\_ta#References](https://ww2.mathworks.cn/help/images/ref/edge.html?s_tid=doc_ta#References)