

# 图案矢量化技术在激光雕刻中的应用

孟 豪<sup>1</sup> 王磊磊<sup>1</sup>  
MENG Hao WANG Leilei

## 摘 要

针对激光雕刻加工中,对实物只能以扫描图形或实物生成位图,无法直接用于激光加工的问题,提出一种面向激光雕刻的图案矢量化算法。首先,对拍摄印花图案得到的位图采用L0梯度最小化模型进行预处理,在传统轮廓提取算法中加入图像分割,解决检测到离散边缘的问题,提高轮廓提取的精度;然后,使用角点检测算法选取图像轮廓的特征点;最后,使用三次B样条曲线拟合特征点完成矢量化操作。实例加工结果表明,所提出的方法相比传统矢量化工具,加工精度更高,有良好的检测效果。

## 关键词

激光雕刻;边缘轮廓;矢量化;曲线拟合;印花图案

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.08.016

## 0 引言

随着计算机技术的快速发展及广泛应用,与之相结合的激光雕刻加工技术被广泛应用于社会生产的诸多方面<sup>[1]</sup>。但对于一些无尺寸图片、具有复杂非参曲线的实物不能直接用于激光加工,只能通过相机拍摄的方式获取位图图像,然后将位图转为矢量图进行加工操作。一般通过矢量化工具生成矢量图,如Adobe Illustrator、CorelDRAW和PhotoShop等软件,使用软件对位图进行矢量化时,丰富的软件功能可以生成不同需求的矢量图,但是在输出矢量图时耗时较多,对复杂曲线进行矢量化的过程中会出现曲线丢失的问题。

针对上述问题,提出一种面向激光雕刻的图像矢量化方法:将位图图像利用图像预处理、聚类分割、边缘提取、角点检测和曲线拟合等多种图像处理技术,生成用于激光加工的矢量图。矢量化技术的高度精细化使得复杂图案的还原和传统纹样的精确切割成为可能,既保存了图案的细节,也增加了图案的再次创作的可行性。随着智能制造的推进,图案矢量化的自动化、智能化水平的提高将为激光加工行业带来新的发展机遇。

## 1 图像矢量化方法

在提取图像边缘轮廓时会受到图像噪声的干扰,因此需要使用图像预处理技术来消除图像噪声,这也使得图像预处理成为图像矢量化过程中的重要环节。图像平滑算法是图像预处理算法之一,能够淡化或消除图像噪声;图像增强算法能够提高图像边缘的可检测性,从而精准锁定图像边缘轮廓。使用边缘检测算法会得到离散的轮廓,离散的轮廓无法传递完整图像信息。在边缘检测算法中引入了聚类分割,可以得

到连续完整的边缘轮廓,使用边缘检测获取更精准的图像轮廓信息。然后对轮廓进行角点检测,通过角点将轮廓分段,最后通过求解高次多项式的方式,尽可能去逼近特征曲线来完成曲线拟合,最后生成用于激光雕刻的矢量图,图像矢量化流程图如图1所示。

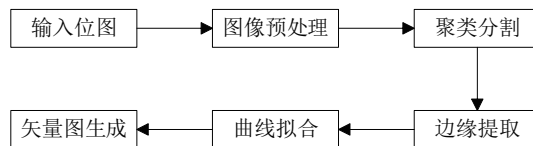


图1 矢量化流程图

## 2 图像预处理

### 2.1 图像平滑

图像在采集、成像和传输等过程中会受到各种因素的干扰,产生大量的随机噪声,使得获取图像的灰度值不能准确反映被测物体对应点的光强值,降低了图像的质量,对后续测量过程造成一定的影响。为了减少噪声的影响,必须对图像进行去噪处理。

在常用滤波算法中,高斯滤波<sup>[2]</sup>对图像进行线性平滑处理可以很好地消除高斯噪声,降低色彩不均匀对图像的影响,但会导致无法全面提取出图像边界特征,从而影响图像矢量化精度。双边滤波算法的最大优势在于它能够提取出平滑图像中的细微特征信息,但是在处理任意尺度特征信息时效果不佳,尤其在图像色差变化较大时,经双边滤波算法处理后的图像失真严重。加权最小二乘法通过多尺度图像分解,检验图像分解后与原始图像的误差可控,然后对图像执行平滑处理。

使用  $L_0$  梯度最小化模型对位图进行平滑处理<sup>[3]</sup>, 通过稀疏梯度统计来增强图像边缘特征, 在图像平滑处理方面收效明显。从数学角度来说,  $L_0$  梯度最小化模型尽可能地让一阶偏导数 (梯度) 为 0 的数量最多, 由此强化了图像边缘的对比度, 同时模糊了图像中的噪声, 最终达到对图像进行平滑处理的效果。

设定输入图像  $I$ 、平滑处理后的输出图像  $S$ 、 $\partial_x \partial_p$  和  $\partial_y \partial_p$  分别表示像素  $p$  与在  $x$  和  $y$  方向上相邻像素的颜色梯度, 在计算过程中, 考虑彩色图像的 RGB 三个通道的值之和, 求解算式为:

$$C(S) = \# \{ p \mid \|\partial_x \partial_p\| + \|\partial_y \partial_p\| \neq 0 \} \quad (1)$$

由于  $c(f)$  不依赖梯度的幅值, 当任意边缘对比度改变时, 不会受其影响。

推导出能量函数为:

$$\min_p \left\{ \sum_p (S_p - I_p)^2 + \lambda \cdot C(S) \right\} \quad (2)$$

为了控制  $k$  值, 能量函数加入  $\lambda$  作为平滑函数, 直接控制  $c(f)$  的权重,  $\lambda$  越大平滑处理后图像边缘越少。

从应用效果来说,  $L_0$  梯度最小化算法可以提取出图像的全局特征信息。该模型还能够减少平滑处理后图像提取边缘时产生的误差。此外, 该方法能够有效保留边缘特征, 但处理纹理和细节较多的图像仍会出现边缘模糊现象。为了消除这个不足, 通过使用 Laplacian 算子锐化图像, 增强图像的边缘特征来提高检测的准确性。最终平滑效果如图 2 所示。

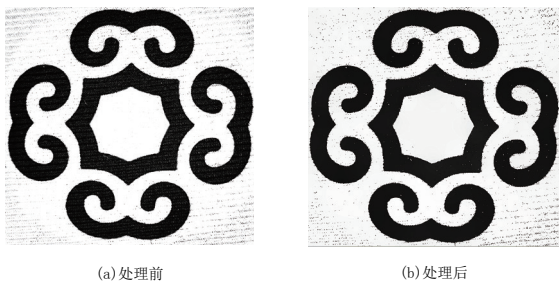


图 2 图像平滑效果图

## 2.2 聚类分割

基于聚类的图像分割过程较为便捷, 整体的运算量不大, 能够达成图像分割的目的<sup>[4-5]</sup>。Mean Shift 聚类<sup>[6]</sup>指的是对图像像素进行分类统计, 在对图像像素进行聚类时, 提取图像中具有相同特征的像素, 并将它们归为一类, 同类像素组成一个区域, 在整体上将图像分割出多个区域。根据聚类中心的差异, 将样本点拆分成多个类别。通常选用平方差方法来度量聚类中心, 算式为:

$$c^i := \min_j \|x^i - \mu_j\|^2 \quad (3)$$

式中:  $c^i$  为聚类中心, 包含  $k$  类,  $x^i$  表示像素点,  $c^i$  为  $x^i$  相似的类别。

Mean Shift 聚类原理是将样本特征作为概率密度函数, 对每个数据点进行滑窗密度估计, 然后根据局部密度的梯度找出密度最大的位置。在具体实现过程中<sup>[7]</sup>, 第一步是选择一个区域和内核函数, 将区域中所有数据点作为初始的质心; 第二步是对每一个质心, 通过内核函数计算得到初始质心的均值, 将计算得到的质心更新为当前区域的质心; 第三步是重复上述过程, 直到所有的质心都不再改变。

## 2.3 边缘提取

对印花图案进行聚类操作后, 可以得到图案基元的轮廓区域。边缘检测原理是利用图像中相邻像素的灰度值变化情况识别图像边界, 将灰度变化比较明显的像素点作为一个集合, 以识别不同区域之间的分界线。通常利用一阶或二阶的梯度检测算子执行卷积运算, 提取出边缘特征。针对不同应用场景和要求, 存在多种边缘检测算子可供选择。每种算子都具有不同的特点和适用性。常用的边缘检测算子有 Roberts 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子、LoG 算子和 Canny 算子。相比于其他算子, Canny 算子<sup>[8]</sup>广泛应用于图像边缘检测领域, 具备良好的抗噪性能, 可以准确辨识图像弱边界。

基于 Canny 算子的边缘提取过程如下。

(1) 遵照人对图像的感知规律, 对 RGB 三通道执行加权平均, 算式如下:

$$G = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (4)$$

(2) 采用高斯平滑函数来消除图像中的噪声, 其数学表达式为:

$$K = \frac{1}{2\pi d^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2d^2}} \quad (5)$$

(3) 采用一阶有限差分方法对图像的边缘特征进行增强处理, 生成包括图像在水平方向  $x$  和垂直方向上  $y$  的偏导数矩阵, 相应的模板如图 3 所示。

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$$

图 3 一阶差分卷积模板

(4) 通过非极大值抑制方法遍历图像中像素点的局部最大值, 结合图像梯度幅值直方图, 采取双阈值筛选机制, 把符合阈值要求的点串联成线。

对聚类分割得到的图使用 Canny 算子与其他常见边缘检测算子进行轮廓提取, 边缘提取效果如图 4 所示。从效果图可以看出, 由于 Canny 算子采用非极大值抑制的方法, 得到

的图像边缘更为准确,符合人眼视觉标准,强调图像的边缘特征,同时忽略了不必要的背景边缘。

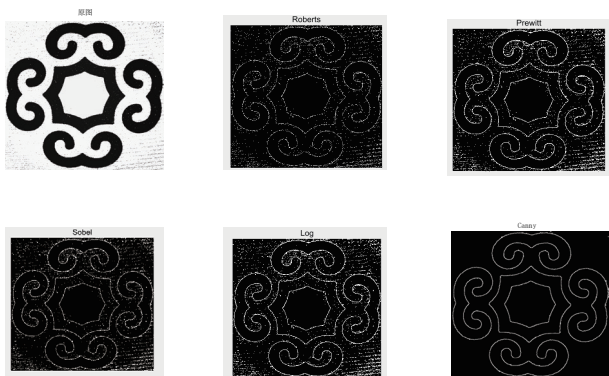


图4 边缘提取效果图

### 3 图像矢量化

#### 3.1 角点检测

角点没有明确的定义,通常指的是图像中亮度突变的点或者图像边缘曲率极大值的点。在图像处理中经常会利用角点作为特征点,这是因为多个角点勾画出了图像轮廓,角点反映了图像的轮廓特征,利用角点进行图像处理,能够减少代入的数据量。

诸如 Harris 算子、Susan 算子、Moravec 算子<sup>[9]</sup>均可针对灰度图像进行角点检测,这类算法是根据图像中点的梯度变化或曲率变化来锁定角点的。Schmid 以重复率和邻近区域涵盖信息量两项指标对各类算子进行性能评比,发现 Harris 算子的应用效果最佳<sup>[10]</sup>。Harris 算子的实现过程如下。

(1) 求解出像素点在水平方向、垂直方向上的梯度,并构成矩阵  $M$ :

$$M = \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $I_x = \frac{\partial I}{\partial x} = I \otimes (-1, 0, 1)$ ,  $I_y = \frac{\partial I}{\partial y} = I \otimes (-1, 0, 1)$ 。 $\otimes$  代表卷积符号。

(2) 计算角点的响应函数 CRF:

$$CRF = \text{Det}(M) - k^* \text{Tr}^2(M) \quad (7)$$

式中:  $\text{Det}(M) = I_x^2 * I_y^2 - (I_x * I_y)^2$ ,  $\text{Tr}(M) = I_x^2 + I_y^2$ 。 $k$  为常量,通常取 0.04。

(3) 选取 CRF 函数中的局部区域极值点,即 Harris 特征点。通过设定需要选取的阈值,可以得到定量的角点。

#### 3.2 曲线拟合

曲线拟合是用求解多项式的方式表示位图的线条,选定适当的曲线,按照求解解析函数的方法逼近特征点。在现实场景中,曲线拟合过程很少只是利用同一种简单曲线进行拟合,因此通常选用高次多项式来逼近特征曲线。

B 样条曲线<sup>[11]</sup>是对 Bézier 曲线<sup>[12]</sup>的优化结果,其突出优势在于线段连接方式更加简洁,曲线数值更加精准,算式为:

$$P_{i,n}(t) = \sum_{k=0}^n P_{i-k} F_{k,n}(t), t \in [1, 0] \quad (8)$$

$$F_{k,n}(t) = \frac{1}{n!} \sum_{j=0}^{n-k} (-1)^j C_{n+1}^j (t+n-k-j)^n, C_n^r = \frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (9)$$

式中:  $t \in [0, 1]$ ,  $k \in [0, n]$ 。由以上公式可得三次 B 样条曲线的表达式为:

$$P(t) = \sum_{k=0}^3 F_{k,3}(t) P_{i+k} \quad (10)$$

公式的矩阵表达如下:

$$P(t) = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 \\ t \\ t^2 \\ t^3 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

三次 B 样条曲线可以精确地逼近以角点为特征点的曲线形状<sup>[13-14]</sup>。在角点检测过程中,每个可以标记轮廓走向的强角点都被标记下来,通过三次参数样条曲线的拟合,可以较真实地还原原图案基元,矢量化效果较为理想,如图 5 所示。

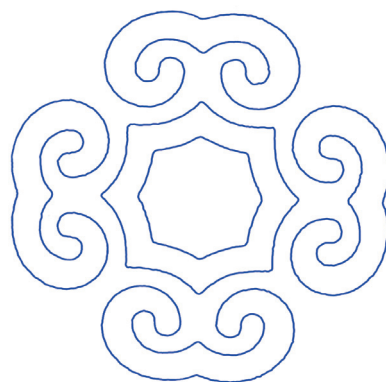


图5 曲线拟合效果

#### 3.3 矢量图文件格式

矢量图像可选的文件格式主要有 AI、SVG、DXF 等。具体来说, AI 格式是由 Adobe Illustrator 软件生成的矢量图格式,它具有读取高效、文件小等优势。SVG 格式是 W3C 联盟开发的一款标准格式,具有兼容性好的特点。SVG 格式是由直线、折线、曲线、圆形、多边形、椭圆形等六种基本形状所构成的,在此基础上能够构造出任意形状的边缘结构。SVG 颜色是通过定义标签中的属性来实现的,可进行单色填充、渐变色填充以及图案填充。DXF 格式是一种在 AutoCAD 与其他软件进行数据交换时会用到的矢量化文件格式。AutoCAD 软件应用十分广泛,使得 DXF 格式也成为



一种标准的数据接口文件,在应用中表现出可读性好、绘图方便等优势特点。在激光加工方向,通常将加工文件保存为 DXF 格式。

#### 4 实例加工

##### 4.1 实验设备

加工设备为 CO<sub>2</sub> 激光雕刻机,输出功率为 100 W。上位机软件为 RDWorksV8。

##### 4.2 加工流程

在加工前,需要启动相应的辅助工具。激光是由 CO<sub>2</sub> 激光管经过一系列反应生成,这一过程会产生大量的热,需要水箱构建水循环进行散热。加工过程中,由于激光雕刻是去材加工,会产生加工废料,为了不让废料影响加工结果,使用鼓风机吹除加工表面产生的废料。

将矢量化工具生成的矢量图与图案矢量化得到的矢量图导入雕刻软件,选用亚克力板为加工材料。将加工速度设置为 150 mm/s,加工功率设置为 50%。对应加工结果如图 6 所示。



本文算法矢量图

Adobe Illustrator矢量图

Vector magic矢量图

图 6 加工效果图

#### 5 结语

为了实现面向激光雕刻的图像矢量化方法,对矢量化方案的技术选择与效果对比进行描述。最终确定的矢量化方案可划分为四个部分:图像预处理、图像分割、边缘提取及图像矢量化,分步完成图案矢量化操作。对矢量化结果进行实例加工后,认为其具有较高的可行性和加工精度,提高了激光雕刻的生产效率。本研究还存在一些可改进或深入研究的内容:拍摄印花图案实物得到的位图受拍摄环境与实物厚度的影响,将直接影响矢量化效果,矢量化方案没有考虑对图像中阴影部分处理。在今后的研究中,应该重点考虑这些问题,使矢量化过程更为完善。

#### 参考文献:

- [1] 张德翔,郝传柱,于智超.探析激光雕刻机曲面雕刻的技术方案[J].现代信息科技,2020,4(8):154-155+158.
- [2] 李坚,吴佳,任启.基于特征识别与云边协同的安全智能检测技术研究[J].电子设计工程,2024,32(10):78-82.
- [3] 李孟航,高珊珊,韩慧健,等.结合 L\_0 优化与拉普拉斯算子的图像平滑方法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2021,33(7):1000-1014.
- [4] 王欣艺,景超,张浩宇,等.基于计算机视觉技术的指针式仪表智能识别方法[J].电子技术与软件工程,2022(7):172-177.
- [5] 潘沛鑫,潘中良.结合显著性的主动轮廓图像分割[J].计算机工程与应用,2021,57(8):225-230.
- [6] 蔡植善,王朝阳,阮秀沧,等.基于机器视觉的导流片图像识别定位方法[J].自动化应用,2023,64(16):198-200+203.
- [7] 李世银,王小明,陈炜翰,等.基于 Mean-Shift 和加权 K 近邻的 UWB 指纹定位算法[J].传感器与微系统,2020,39(2):105-108.
- [8] 陈利利,李斌,梁晓晴.基于 Canny 边缘检测的红枣识别算法研究[J].信息技术与信息化,2024(3):25-28.
- [9] 叶欣悦,朱磊,王文武,等.互补特征交互融合的 RGB-D 实时显著目标检测[J].中国图象图形学报,2024,29(5):1252-1264.
- [10] ALKAABI S, DERAVID F. A new approach to corner extraction and matching for automated image registration[C]// IGARSS 2005: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vols 1-8, Proceedings. Piscataway: IEEE, 2005, 5:3517-3521.
- [11] 冯治煜,李亚娟,邓重阳.隐式 B 样条曲线拟合的加权 PIA 算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2023,35(12):1887-1893.
- [12] 张亚林,李晓松.改进 AOA 结合贝塞尔曲线平滑的机器人路径规划[J].计算机工程与设计,2023,44(10):3170-3178.
- [13] 陈庆光,刘强,张竞成,等.多视角三维视觉成像的苹果果形测量与分类[J].杭州电子科技大学学报(自然科学版),2022,42(4):34-41+56.
- [14] 施法中.计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条[M].北京:高等教育出版社,2013.

#### 【作者简介】

孟豪(1998—),男,河南周口人,硕士研究生,研究方向:图像处理。

王磊磊(1979—),男,河南漯河人,博士,教授,研究方向:动力机械及工程。

(收稿日期:2024-05-27)