

改进的 Sobel 算法和形态学小波变换 相融合的图像边缘检测方法

殷婷婷^{1,2}, 杨 忠¹, 孙瑞胜², 张 棋³

(1. 金陵科技学院智能科学与控制工程学院, 江苏 南京 211169; 2. 南京理工大学能源与动力
工程学院, 江苏 南京 210094; 3. 中国航天科工集团 8511 研究所, 江苏 南京 210007)

摘 要: 图像的边缘检测是图像处理领域的基本问题。针对小波变换模极大值法检出边缘不连续的问题, 引入形态学的处理方式, 增强边缘连续性。针对传统 Sobel 算法检测精度低且采用固定阈值的问题, 提出一种结合自适应阈值和增加检测梯度的改进方法。结合形态学小波变换和改进的 Sobel 算法的优点, 通过算法融合的方式, 提出了一种将两者融合的图像边缘检测方法。仿真结果表明, 该方法提高了边缘检测的精度和连续性, 更好地满足了图像边缘定位稳定可靠的要求。

关键词: 图像边缘检测; 模极大值; 小波变换; Sobel 算法; 形态学

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-755X(2022)02-0015-07

Image Edge Detection Method Based on Fusion of Improved Sobel Algorithm and Morphological Wavelet Transform

YIN Ting-ting^{1,2}, YANG Zhong¹, SUN Rui-sheng², ZHANG Qi³

(1. Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China; 2. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 3. 8511 Research Institute of China Aerospace Science and Industry Corporation, Nanjing 210007, China)

Abstract: Image edge detection is a fundamental problem in the field of image processing. Aiming at the problem of edge discontinuity detected by wavelet transform modulus maximum method, morphological processing method is introduced to enhance the edge continuity. For the problem of low detection accuracy and the use of fixed threshold of traditional Sobel algorithm, an improved method combining adaptive threshold and increasing detection gradient is proposed. Combining the advantages of morphological wavelet transform and improved Sobel algorithm, an image edge detection algorithm that combines the two is proposed by means of algorithm fusion. Simulation results show that the proposed method improves the accuracy and continuity of edge detection, better meeting the needs of stable and reliable image edge positioning.

Key words: image edge detection; modulus maximum; wavelet transform; Sobel algorithm; morphology

边缘是图像中灰度发生突变区域的所有像素的集合, 包含大量图像的有效参数^[1-2]。图像边缘检测通常作为图像分析和理解的预处理步骤, 通过提取不同区域的交界线达到分割图像的目的。在图像特征

收稿日期: 2022-03-11

基金项目: 金陵科技学院高层次人才科研启动基金项目(jit-b-202112)

作者简介: 殷婷婷(1992—), 女, 江苏南通人, 讲师, 博士, 主要从事非线性控制、信号处理、嵌入式开发等方面的研究。

提取、目标识别和跟踪等领域,图像的边缘检测发挥着重要作用^[3-4]。

边缘检测方法可分为空域检测和变换域检测^[5-6]。常用的 Robert、Prewitt、LOG、Canny、Sobel 等算法都属于空域检测,其中 Robert 和 Prewitt 的边缘定位精度较低,LOG 算子无法识别边缘的方向且对噪声敏感,Canny 算子功能优越但实现复杂,难以用于实时硬件系统中,而传统 Sobel 算法虽然需人为指定检测阈值,但有着检测原理简单、易于硬件实现等优点^[7-8]。

何文浩等采用梯度直方图的方法生成自适应阈值,取代人工指定阈值,但该方法计算量较大^[9]。基于小波变换的边缘检测属于变换域检测方法,具有良好的时频局域化特性和多尺度分析能力,成为边缘检测领域的研究热点^[10-11]。小波变换边缘检测效果好,对噪声具有一定的滤波作用,但该算法存在检出边缘不连续的问题^[12-13]。

为了综合不同边缘检测算法的优点,算法融合成为边缘检测的研究趋势之一。黄海龙等基于小波变换的原理将原始图像分解为高频和低频子图,针对高频和低频子图分别采用不同的处理算法,再通过小波逆变换生成边缘检测图像^[14]。余小庆等通过小波变换模极大值法和形态学算法分别得到边缘图像,再通过小波分解和多层融合的方式得到最终的边缘检测图像^[15]。目前基于 Sobel 算法的边缘检测方法在图像边缘检测硬件系统中得到了广泛的应用,考虑到算法后续的应用研究,本文选用 Sobel 算子并对其融合算法展开研究。为了弥补 Sobel 算子和小波变换模极大值法在边缘检测领域的局限性,本文引入形态学算法,增强检出边缘的连续性;另外,将 Sobel 算法中的梯度检测扩展至 8 个方向,并采用自适应阈值对算法获取边缘进行改进;最后,通过仿真结果验证方法的可行性和有效性。

1 边缘检测基本原理

1.1 传统 Sobel 算法

基于传统 Sobel 算子的图像边缘检测方法在应用 3×3 卷积模板对检测图像进行加权平均或邻域平均运算的基础上,结合一阶微分运算以捕捉待检测图像的边缘。传统 Sobel 算子作为一种梯度幅度检测算法,结构简单,实现难度低,适应性强,性价比高,在图像边缘检测领域得到了广泛的应用。

假设 $g(x, y)$ 为待检测的函数图像,该图像在点 (x, y) 处的梯度可以表示为如式(1)所示的矢量形式:

$$\nabla g(x, y) = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g}{\partial x} & \frac{\partial g}{\partial y} \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

其中 $\nabla g(x, y)$ 表示梯度矢量的模,可由式(2)解算得出:

$$\nabla g(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (2)$$

Sobel 算子中的 3×3 卷积模板的方向包括水平和垂直两种,如图 1 所示。

-1	0	1		-1	-2	-1
-2	0	2		0	0	0
-1	0	1		1	2	1
(a) 水平卷积模板				(b) 垂直卷积模板		

图 1 传统 Sobel 算子模板

综上,基于传统 Sobel 算子的图像边缘检测的具体流程阐述如下:1)以 Sobel 算子中的 3×3 水平方向卷积模板和 3×3 垂直方向卷积模板为基准,按照自左至右、自上而下的顺序遍历待检测图片,卷积模板的中心点与图片的每一个像素点对应。2)对图像 $g(x, y)$ 中每一个像素点构成的独立模板进行离散卷积运算。3)将两个模板离散卷积运算结果的最大值替换成图片中心像素点的灰度值,用 G_{\max} 表示。4)分析图片分布特征,选取合适的阈值 T 对离散卷积运算结果进行二值化处理:若 $G_{\max} \geq T$,则认为该像素点属于图像的边缘;若 $G_{\max} < T$,则认为该像素点属于图像的背景。

1.2 小波变换

定义一种光滑的二元小波基函数 $\varphi(x, y)$, 该小波基函数应符合以下特征:

$$\iint \varphi(x, y) dx dy = 1 \quad (3)$$

$$\lim_{x^2+y^2 \rightarrow 0} \varphi(x, y) \rightarrow 0 \quad (4)$$

在不同的小波分解尺度 k 上, 为了满足小波基函数与图像 $g(x, y)$ 进行卷积运算的要求, 基于平滑二元小波基函数定义小波所需的高斯平滑函数 $\varphi_k(x, y)$ 。

$$\varphi_k(x, y) = \frac{1}{k^2} \varphi\left(\frac{x}{k}, \frac{y}{k}\right) \quad (5)$$

其中, k 表示小波变换尺度因子, $k=2^m$ 。

在尺度 k 下, 经高斯平滑函数 $\varphi_k(x, y)$ 与图像 $g(x, y)$ 进行卷积运算处理, 解析出小波变换后的两个分量。如式(6)所示:

$$\begin{bmatrix} \zeta_k^x g(x, y) \\ \zeta_k^y g(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} (g * \varphi_k)(x, y) \\ \frac{\partial}{\partial y} (g * \varphi_k)(x, y) \end{bmatrix} = k \frac{\rightarrow}{2} (g * \varphi_k)(x, y) \quad (6)$$

式中, $\zeta_k^x g(x, y)$, $\zeta_k^y g(x, y)$ 分别为 $g(x, y)$ 在水平和垂直两个方向的梯度矢量分量, 即图像的边缘检测信息。基于该小波变换后的分量, 可提取得出如式(7)和式(8)所示的模值和梯度数据。

$$G_2^m g(x, y) = \sqrt{|\zeta_k^x g(x, y)|^2 + |\zeta_k^y g(x, y)|^2} \quad (7)$$

$$M_2^m g(x, y) = \arctan \frac{\zeta_k^x g(x, y)}{\zeta_k^y g(x, y)} \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可知, 局部图像边缘信息可以通过查找小波变换后系数的局部模极大值的方式获取, 最终图像的全部边缘信息为局部图像边缘信息即小波系数局部模极大值的集合。

基于小波变换的图像分解与重构的基本流程描述如下: 首先对图像自上而下以行为单位进行一维小波变换, 将图像分解为低通滤波 L 和高通滤波 H 两个分量; 其次对分解后的分量自左向右即以列为单位进行一维小波变换, 将 L 和 H 进一步分解为 LL 、 LH 、 HL 、 HH 共 4 个分量。二维小波函数有 3 个, 对应不同方向上的高/低通滤波特性, 如式(9)所示:

$$\begin{cases} \omega^1(x, y) = \omega(x)\omega(y), LH \\ \omega^2(x, y) = \omega(x)\omega(y), HL \\ \omega^3(x, y) = \omega(x)\omega(y), HH \end{cases} \quad (9)$$

图像分解时, 在 2^m 层次有 4 个分量, 包括 $A_m g$ 逼近和 3 个细节信号 $D_m^1 g, D_m^2 g, D_m^3 g$ 。所以每增加一层分解, 近似图像分解为 4 个分量。若分解总层数为 J , 则可分解得到子图像 $3J+1$ 幅。基于小波变换的图像分解与合成过程可以表示为:

$$\text{分解: } A_{m+1} g \rightarrow (A_m g, (D_m^1 g, D_m^2 g, D_m^3 g)) \quad (10)$$

$$\text{合成: } A_{m+1} g = A_m g + D_m^1 g + D_m^2 g + D_m^3 g \quad (11)$$

2 算法模型描述

本文在传统 Sobel 算子和小波变换模极大值法的基础上, 设计一种改进的 Sobel 算法, 同时引入形态学算法对小波变换模极大值法进行改进。

2.1 改进的 Sobel 算法

传统 Sobel 算法的梯度值由水平梯度和垂直梯度获得, 未考虑到其他方向, 导致边缘信息不全面。针对该问题, 本文在考虑计算效率的前提下, 增加 45° 和 135° 方向上的梯度计算, 并对 4 个方向的梯度取绝对值后再进行梯度合成, 扩展梯度检测至 8 个方向, 可获得更多图像边缘信息, 改进后的边缘检测算子如下:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

将 4 个边缘检测算子分别于图像目标点及其邻域(F_{ij})进行卷积运算,求得梯度值 G_0 、 G_{45} 、 G_{90} 和 G_{135} :

$$\begin{cases} G_0 = (F_{31} + 2F_{32} + F_{33}) - (F_{11} + 2F_{12} + F_{13}) \\ G_{45} = (F_{23} + 2F_{33} + F_{32}) - (F_{12} + 2F_{11} + F_{21}) \\ G_{90} = (F_{13} + 2F_{23} + F_{33}) - (F_{11} + 2F_{21} + F_{31}) \\ G_{135} = (F_{12} + 2F_{13} + F_{23}) - (F_{21} + 2F_{31} + F_{32}) \end{cases} \quad (12)$$

梯度矢量为 $[M(x, y), G(x, y)]$, 其中 $M(x, y)$ 为梯度方向, $G(x, y)$ 为 $[G_0, G_{45}, G_{90}, G_{135}]^T$ 的无穷范数, 可由式(12)求得:

$$\|G\|_{\infty} = \max_1 \sum_{j=1}^4 |G_{1j}| = \max\{|G_0|, |G_{45}|, |G_{90}|, |G_{135}|\} \quad (13)$$

传统 Sobel 算法将图像卷积结果与人为指定的全局阈值进行比较,以获得图像的边缘,该方式对光线和噪声比较敏感。针对该问题,引入中值滤波的思想,自动生成图像的局部阈值。中值滤波算法采用数量为奇数的窗口对图像进行扫描,按照灰度值对扫描结果进行排序,将排序得到的中值作为窗口中心所在像素点的灰度值。

为减少计算量,本文采用 3×3 窗口对图像进行扫描和排序,求得扫描窗口内的最大值 $\max(F_{ij})$ 、中值 $\text{med}(F_{ij})$ 和最小值 $\min(F_{ij})$, 并将 $\max(F_{ij})$ 、 $\text{med}(F_{ij})$ 和 $\min(F_{ij})$ 的均值作为扫描窗口中心像素点的自适应局部阈值。对于目标像素点 (x, y) , 自适应局部阈值 $T(x, y)$ 可定义为:

$$T(x, y) = [\min(F_{ij}) + \text{med}(F_{ij}) + \max(F_{ij})] / 3 \quad (14)$$

2.2 引入形态学的小波变换模极大值法

形态学属于非线性处理方法,基本运算包括膨胀运算、腐蚀运算、开启运算和闭合运算四种。定义集合 M 和结构元素 N , N_x 为结构元素 N 移位 x 后的结果。膨胀运算属于元素间或运算,可填补图像分割后的空洞部分,扩大目标,表示为 $M \oplus N$; 腐蚀运算属于元素间与运算,可消除图像分割后的孤立点,缩小目标,表示为 $M \ominus N$; 开启运算为先腐蚀后膨胀的级联组合运算,可在不明显改变图像目标体积的前提下,消除细小对象或细长孤立点,表示为 $M \circ N$; 闭合运算为先膨胀后腐蚀的级联组合运算,可对边界附近临近目标点进行连接,并可填充图像内部的细小孔洞,表示为 $M \bullet N$ 。运算方法如式(15)所示。

$$\begin{cases} M \oplus N = \{x: \hat{N}_x \cap M \neq \emptyset\} \\ M \ominus N = \{x: N_x \subseteq M\} \\ M \circ N = (M \ominus N) \oplus N \\ M \bullet N = (M \oplus N) \ominus N \end{cases} \quad (15)$$

针对小波变换模极大值法获得的边缘不连续、目标存在空洞的问题,本文对小波变换模极大值处理后的边缘进行闭合运算,进一步丰富目标边缘信息。

2.3 改进的 Sobel 算法和形态学小波变换相融合的图像边缘检测方法

结合改进的 Sobel 算法和引入形态学的小波变换模极大值法的优点,利用小波变换方法对两种算法进行融合,以获得更好的图像边缘(图 2)。具体步骤如下:

1) 通过小波变换模极大值法、形态学算法获得边缘图像 Q 。

2) 用改进的 Sobel 算法获得边缘图像 P 。

3) 选用适当的小波基函数对两幅边缘图像 P/Q 分别进行小波分解,分别得到分解后的低频、高频水平、高频垂直、高频对角 4 幅子图像。本文实验中小波变换分解的基函数为 Harr 小波,分解层数为 2 层。对该两组子图像采用系数法进行融合,可以获取融合后的 4 幅子图像。

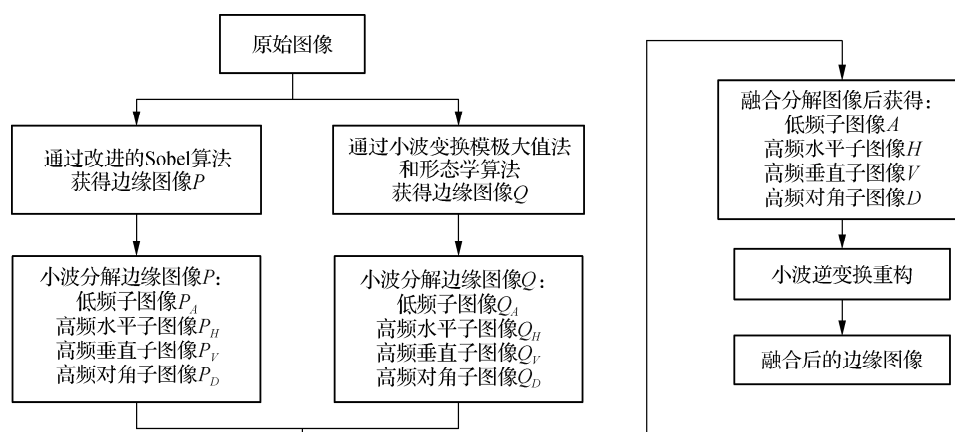


图 2 融合边缘检测算法流程

基于系数法的算法融合机理表述如下:

$$\begin{cases} A = \alpha_1 P_A + (1 - \alpha_1) Q_A \\ H = \alpha_2 P_H + (1 - \alpha_2) Q_H \\ V = \alpha_3 P_V + (1 - \alpha_3) Q_V \\ D = \alpha_4 P_D + (1 - \alpha_4) Q_D \end{cases} \quad (16)$$

式中: α_1 、 α_2 、 α_3 和 α_4 分别为 4 幅子图像融合的加权因子, 将图像对应的像素点进行加权运算后即可得到融合后的子图像。

4) 对融合后的 4 幅子图像采用小波逆变换方法进行重构, 即可通过改进的 Sobel 算法和形态学小波变换相融合的图像边缘检测方法获取边缘图像。

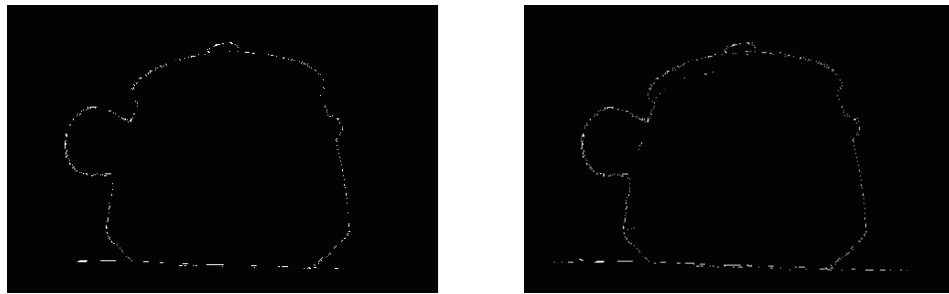
3 实验结果与分析

通过仿真的方式对本文提出的边缘检测方法的性能进行验证。原始图像如图 3 所示, 传统 Sobel 算法和改进的 Sobel 算法的边缘检测结果如图 4 所示。通过图 3 和图 4 可以看出, 传统 Sobel 算法检出的边缘定位较准确, 但壶体与壶盖以及把手交界处的边缘信息丢失严重, 并对光线比较敏感, 存在噪点, 体现为对壶体放置平面左右两侧的亮度变化区域的边缘检测结果较差。改进的 Sobel 算法丰富了图像的边缘信息, 采用自适应局部阈值, 对光线噪声具有一定的滤除作用, 能够准确地识别出壶体与壶盖以及把手交界处的部分边缘信息, 同时能够检测出壶体放置平面左右两侧亮度变化区域的部分边缘, 但仍然存在壶体与壶盖以及把手交界处边缘信息部分丢失的情况。



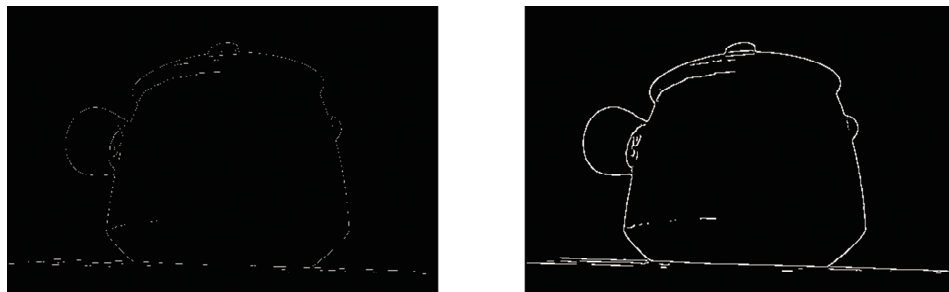
图 3 原始图像

小波变换模极大值法和引入形态学的小波变换模极大值法检测结果如图 5 所示。通过图 5 可以看出, 小波变换模极大值法检出的边缘信息较丰富, 但存在边缘不连续、对光线干扰敏感的问题, 表现为壶体边缘不闭合且检测的壶体放置平面边缘存在噪点; 引入形态学方法后, 增强了边缘的连续性, 壶体边缘清晰且闭合, 但对光线的干扰仍无法滤除。



(a)传统 Sobel 算法 (b)改进的 Sobel 算法

图 4 传统 Sobel 算法与改进的 Sobel 算法的边缘检测结果

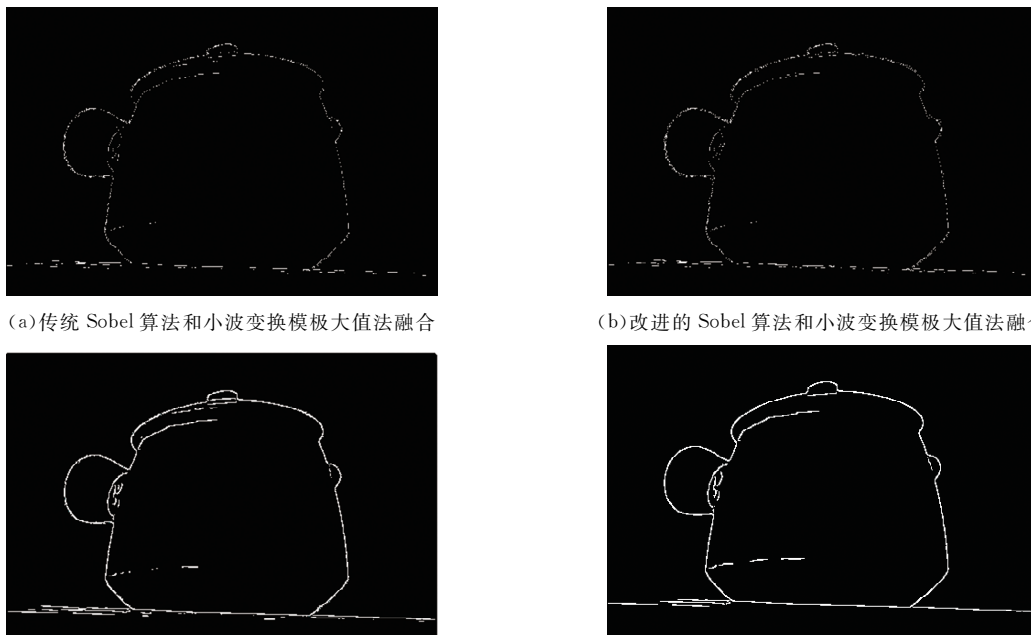


(a)小波变换模极大值法 (b)引入形态学的小波变换模极大值法

图 5 小波变换模极大值法与引入形态学的小波变换模极大值法的边缘检测结果

分析图 4 和图 5 可以得出,单一的图像边缘检测方法及基于单一检测方法的改进方法都存在一定的局限性,检测结果的连续性和准确性都难以满足边缘检测的应用需求。

根据本文所提出的融合方法,将传统 Sobel 算法、改进的 Sobel 算法分别与小波变换模极大值法、引入形态学的小波变换模极大值法融合,结果如图 6 所示。将图 6(a)与图 4(a)、图 5(a)进行对比后可看出,融合后的算法相对于单一算法,边缘信息和细节信息的丰富度和准确性都得到了较大提升。通过直观对比图 6 中 4 种边缘检测结果的准确度和连续性,对本文提出的改进的 Sobel 算法和基于形态学的小波变换模极大值法相融合的边缘检测方法的可行性和有效性进行分析。



(a)传统 Sobel 算法和小波变换模极大值法融合 (b)改进的 Sobel 算法和小波变换模极大值法融合

(c)传统 Sobel 算法和形态学小波变换模极大值法融合 (d)改进的 Sobel 算法和形态学小波变换模极大值法融合

图 6 不同算法融合后的检测结果

对比图 6(a)和图 6(b),改进的 Sobel 算法对边缘细节信息的增强和对光线噪声的滤波作用,在算法融合后同样有效,主要体现在壶体与平面的边缘细节更为丰富,壶盖上边缘信息更为准确。对比图 6(a)和图 6(c),经本文算法融合后,形态学的处理方法增强了边缘的连续性,图像边缘检测结果即壶体形状轮廓和结构交界处更为清晰,壶体整体元素闭合,但仍然存在光线噪声较大、边缘信息冗余的问题。结合图 6(d)可以看出,本文的方法融合了 Sobel 算法、小波变换模极大值法和形态学算法的优点,检测出的边缘完整清晰,定位准确,具备较好的连续性,且对光线噪声具有较好的滤除作用。

通过以上对比,本文提出的改进的 Sobel 算法和形态学小波变换模极大值法相融合的图像边缘检测方法,能够弥补传统 Sobel 算法在边缘细节信息和光线噪声敏感方面的不足,同时利用形态学法提升了基于模极大值法的边缘检测连续性。

4 结 语

本文设计了一种基于改进的 Sobel 算法和形态学小波变换的图像边缘检测方法,在小波变换模极大值法的基础上引入形态学处理方法,结合自适应阈值和增加检测梯度改进 Sobel 算法,并通过小波变换的方式对算法进行融合。仿真结果表明,本文方法能够较好地滤除光线噪声,在边缘检测连续性和准确性方面能够满足更高的应用要求,具有较高的可行性和有效性。目前该方法还停留在仿真实验的阶段,后续将对算法在现场可编程阵列(FPGA)平台的实现及基于该检测算法的图像边缘实时检测系统的性能展开进一步研究。

参考文献:

- [1] KANOPOULOS N, VASANTHAVADA N, BAKER R L. Design of an image edge detection filter using the Sobel operator[J]. *IEEE Journal of Solid-state Circuits*, 1988, 23(2): 358 - 367
- [2] 马苗, 樊养余, 谢松云, 等. 基于灰色系统理论的图像边缘检测新算法[J]. *中国图象图形学报*, 2003, 8(10): 1136 - 1139
- [3] ZHAI L, DONG S P, MA H L. Recent methods and applications on image edge detection[C]//2008 International Workshop on Education Technology and Training & 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing. Shanghai: IEEE, 2008: 332 - 335
- [4] 王晓丹. 深度图像边缘检测和区域分割的算法研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009
- [5] 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
- [6] 李鹏, 彭宗举, 李持航, 等. 基于纹理特性与空域相关的高效视频编码帧内分级快速算法[J]. *计算机应用*, 2016, 36(4): 1085 - 1091
- [7] 张棋, 贾方秀, 殷婷婷. 基于改进 Sobel 算法的实时图像边缘检测系统设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2018(2): 101 - 104, 108
- [8] PAVITHRA E, POONKODI P, MADHUMITHA V, et al. VLSI implementation of Sobel edge detection[J]. *Digital Image Processing*, 2019, 11(3): 193 - 199
- [9] 何文浩, 原魁, 邹伟. 自适应阈值的边缘检测算法及其硬件实现[J]. *系统工程与电子技术*, 2009, 31(1): 233 - 237
- [10] 田菲, 孙忠民. 关于视觉图像的复合小波变换显著性检测方法[J]. *计算机仿真*, 2020, 37(11): 427 - 430, 469
- [11] FENG Y Y, YANG T, NIU Y F. Subpixel computer vision detection based on wavelet transform[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 88273 - 88281
- [12] 王瑞, 姚爱琴, 杨瑞, 等. 基于小波变换模极大的多尺度图像边缘检测在烟雾图像中的应用[J]. *国外电子测量技术*, 2020, 39(9): 63 - 67
- [13] 宫睿, 王小春. 基于可协调经验小波变换的多聚焦图像融合[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(2): 201 - 210
- [14] 黄海龙, 王宏. 一种基于小波变换和数学形态学的边缘检测算法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2011, 32(9): 1315 - 1318
- [15] 余小庆, 陈仁文, 唐杰, 等. 融合小波变换和新形态学的含噪图像边缘检测[J]. *计算机科学*, 2018, 45(S2): 194 - 197

(责任编辑: 湛 江)