

基于 Canny 与 RANSAC 算法的边缘直线检测改进方法

苏伟君¹, 江吉彬², 吕鑫平³

- (1. 黎明职业大学 航空学院, 福建 泉州 362000;
2. 福建理工大学 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118;
3. 锐捷网络股份有限公司, 福建 福州 350118)

摘要: 为了提高触摸屏直线检测的精度和实时性, 提出了基于 Canny 算法与 RANSAC 算法相结合的边缘直线检测方法。引入自适应 Canny 边缘检测算法, 通过双边滤波、综合应用 Sobel 算子和 Scharr 算子计算图像梯度。利用最大类间方差法去除噪声、抑制伪边缘并确定阈值, 实现了高精度的触摸屏边缘检测并提取了最优的边缘直线。通过改进的 RANSAC 算法对触摸屏边缘点进行直线拟合, 在保证直线检测精度的前提下, 满足了系统的实时性要求。在触摸屏贴合系统实验平台上的测试结果表明, 该方法的边缘直线检测准确性高、实时响应良好, 可以满足预期检测要求。

关键词: Canny 算法; 边缘直线检测; RANSAC 算法; 直线拟合

中图分类号: TP301.6

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)01-0064-07

Improved edge straight-line detection using Canny and RANSAC algorithms

SU Weijun¹, JIANG Jibin², LYU Xinping³

- (1. School of Aviation, Liming Vocational University, Quanzhou 362000, China;
2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
3. Ruijie Networks Co., Ltd., Fuzhou 350118, China)

Abstract: To enhance the precision and real-time performance of straight-line detection in touchscreens, an edge straight-line detection method combining the Canny algorithm with the RANSAC algorithm is proposed. The adaptive Canny edge detection algorithm is introduced, which calculates image gradients through bilateral filtering and the comprehensive application of Sobel and Scharr operators. By employing the maximum inter-class variance method to remove noise, suppress false edges, and determine thresholds, high-precision touchscreen edge detection is achieved, along with the extraction of optimal edge lines. The improved RANSAC algorithm is utilized for straight-line fitting of touchscreen edge points, satisfying real-time system requirements while ensuring detection accuracy. Experimental results on the touchscreen alignment system platform demonstrate that this method exhibits high accuracy in edge straight-line detection and excellent real-time responsiveness, meeting expected detection requirements.

Keywords: Canny algorithm; edge straight-line detection; RANSAC algorithm; straight-line fitting

边缘检测是触摸屏对位贴合过程中的重要项目, 边缘直线检测的准确率将直接影响角点定位的精度, 从而影响最终触摸屏对位贴合系统的实时响应性能和贴合精度^[1-2]。受工艺技术、检测

方法以及设备精度等因素的影响, 当前的触摸屏自动贴合技术还存在图像边缘检测不到位、不清晰、不准确等问题, 从而降低了触摸屏对位贴合的精度及准确率。

收稿日期: 2024-07-01

基金项目: 福建省中青年教育科研项目(科技类)(JAT201303)

第一作者简介: 苏伟君(1990—), 男, 福建泉州人, 硕士, 助教, 研究方向: 机器视觉检测技术、先进制造技术。

在触摸屏自动贴合过程中引入机器视觉,可以提升触摸屏贴合的效率、准确性以及产品的良品率^[3-4]。许多学者利用改进的边缘检测算法对触摸屏视觉引导系统的对位贴合、边缘直线检测和拟合方法开展了研究。例如,张振亚^[5]利用改进型 RANSAC (random sample consensus) 算法对图像边缘进行直线拟合,实现了对位贴合位置偏差的调整。李俊蒂等^[6]提出了一种基于小波变换和霍夫直线检测算法的机器视觉自动标定方法,使检测的图像误差率小于 2%。苏鹭梅等^[7]利用双重角点检测算法来改进图像采集的准确率,提高了对位贴合的精度。张建国等^[8]提出了一种具有保边特性的加权最小二乘法滤波器对边缘图像进行降噪,解决了传统 Canny 算法易受噪声干扰的问题。于新善等^[9]提出了二维扩展与离散采样的改进型 Canny 算法,解决了图像受椒盐噪声干扰严重的问题,提高了图像的峰值信噪比。YU 等^[10]对传统 Canny 算法进行改进,利用基于形态学的开闭运算实现了对待测对象的边缘检测。

上述研究对边缘检测直线算法都做了一定的优化和改进,提升了检测精度,但其检测到的图像边缘信息存在可能失真、不清晰、边缘细节丢失等问题,可能会提取到虚假的边缘信息。

综上,本研究综合考虑边缘信息的准确性、清晰度和细节保留等需求,提出一种基于 Canny 算法与 RANSAC 算法的边缘直线检测改进方法,在有效抑制噪声干扰、保留边缘细节的同时对边缘信息进行精确的直线拟合,实现边缘直线的二次验证,以提高直线检测的精度以及算法的鲁棒性。

1 传统 Canny 边缘检测算法

传统的 Canny 边缘检测算法^[11]主要包括高斯模糊、计算梯度幅度和方向、非最大信号抑制、高低阈值处理和边缘连接等步骤。

1.1 高斯模糊

使用高斯滤波器对输入图像进行平滑处理,去除微小的点,以减少图像噪声,如式(1)和(2)所示。

$$I'(x, y) = G(x, y) \cdot I(x, y) \quad (1)$$

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

式(1)中, $I(x, y)$ 表示原始图像; $I'(x, y)$ 表示经过

高斯滤波后的图像; $G(x, y)$ 表示高斯核。式(2)中, σ 表示高斯尺度参数。

1.2 计算梯度幅度和方向

对高斯滤波后的图像进行灰度转换,检测图像的水平、垂直和对角边缘,计算图像边界的梯度幅度和方向,如式(3)~(6)所示。

$$u_x(x, y) = \frac{\partial I'(x, y)}{\partial x} \quad (3)$$

$$u_y(x, y) = \frac{\partial I'(x, y)}{\partial y} \quad (4)$$

$$\nabla u(x, y) = \sqrt{u_x^2(x, y) + u_y^2(x, y)} \quad (5)$$

$$\theta(x, y) = \arctan\left(\frac{u_y(x, y)}{u_x(x, y)}\right) \quad (6)$$

式(3)(4)中, $u_x(x, y)$ 、 $u_y(x, y)$ 分别表示图像在 x 和 y 方向上的梯度。式(5)(6)中, $\nabla u(x, y)$ 、 $\theta(x, y)$ 分别表示图像梯度大小和方向,其中,梯度方向为从 $-\pi$ 到 π 。

1.3 非最大信号抑制

边缘检测得到的信号可能很强、宽度较大,但是边缘有且仅有一个准确的响应。因此需要对非边缘的像素进行非最大信号抑制,去除那些不是边缘中心的点,即沿着梯度方向将不是最大值的数值全部置为 0。为了使得到的结果更为准确,可比较 3×3 邻域内的梯度值来确定其是否为边缘点,如图 1 所示,将领域内像素梯度分为 8 个方向。

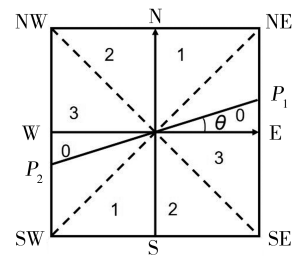


图 1 梯度方向分割

Fig.1 Gradient direction splitting

图 1 中,假设像素 P 的梯度方向是 θ ,在该梯度上可以找到两个像素 P_1 和 P_2 ,则像素 P_1 和 P_2 的梯度线性插值为:

$$|\nabla u(P_1)| = (1 - \tan\theta) |\nabla u(E)| + \tan\theta |\nabla u(NE)| \quad (7)$$

$$|\nabla u(P_2)| = (1 - \tan\theta) |\nabla u(W)| + \tan\theta |\nabla u(SW)| \quad (8)$$

式中, $\nabla u(E)$ 、 $\nabla u(NE)$ 、 $\nabla u(W)$ 、 $\nabla u(SW)$ 分别表

示 0° 、 45° 、 180° 、 -135° 对应的 4 个方向的梯度。

如果像素点 P 的梯度幅度大于 P_1 、 P_2 , 则保留该像素梯度, 否则将其设置为 0。因此, 经过非最大信号抑制可以显著减少错误检测的边缘点, 同时保留边缘的连续性。

1.4 高低阈值处理和边缘连接

经过非最大信号抑制之后, 得到图像的边缘像素, 对于连接在一起的边缘和大于最高阈值的像素进行保留, 对小于最低阈值的像素则进行舍弃。对处于高低阈值之间的像素需要进行阈值连接操作。如果该像素值有与其相连接更高阈值的像素, 可根据高阈值像素相连必须大于最小像素值进行判断, 保留需要的边缘像素; 最后和高阈值像素连接成一条线, 完成边缘连接, 得到二值图像并输出。

1.5 传统 Canny 边缘检测算法的不足

传统的 Canny 边缘检测算法中, 高斯核的尺度和阈值缺少自适应特性, 其数值大小会影响边缘提取的结果, 若取值不当将导致假边缘和噪声的产生。此外, 传统的 Canny 边缘检测对细边缘或低对比度边缘的检测不够敏感, 导致其被噪声掩盖或在非极大值抑制步骤中丢失, 导致目标边缘轨迹或者裂纹丢失。利用传统 Canny 算法对触摸屏贴合边缘直线进行检测, 如图 2 所示。

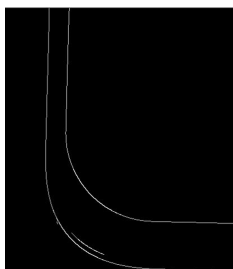


图 2 传统 Canny 算法图像处理

Fig.2 Traditional Canny algorithm image processing

2 改进的 Canny 边缘检测算法

2.1 双边模糊

利用双边模糊平滑图像进行降噪处理, 用像素周围的加权平均值来替换原有的像素值, 其中, 权重由像素之间的距离和像素之间的灰度差异共同决定^[12]。在边缘检测中应用双边模糊可以降低噪声、保边, 避免边缘信息的丢失, 提高边缘检测的准确性。

首先, 通过双边滤波器对图像进行平滑处理以实现降噪, 将每个像素值替换为其周围像素的

加权平均, 其中权重由相邻像素间的空间距离及灰度差异共同决定, 如式 (9) 所示。双边滤波的这一特性使其在降低图像噪声的同时保留边缘信息, 增强了边缘检测的精确度。

$$g(x, y) = \frac{\sum_{(k, l)} f(k, l) \omega(x, y, k, l)}{\sum_{(k, l)} \omega(x, y, k, l)} \quad (9)$$

式中, $g(x, y)$ 表示双边滤波的结果; $f(k, l)$ 表示滤波前的像素值; $\omega(x, y, k, l)$ 表示根据像素点计算的权值, 其值由定义域核和值域核决定, 计算过程如式 (10) 所示。

$$\omega(x, y, k, l) = d(x, y, k, l) \cdot r(x, y, k, l) \quad (10)$$

式中, $d(x, y, k, l)$ 和 $r(x, y, k, l)$ 分别表示定义域核和值域核, 计算如式 (11) (12) 所示。

$$d(x, y, k, l) = \exp\left(-\frac{(x-k)^2 + (y-l)^2}{2\sigma_d^2}\right) \quad (11)$$

$$r(x, y, k, l) = \exp\left(-\frac{\|f(x, y) - g(x, y)\|^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (12)$$

式中, σ_d 为空间域的标准差; σ_r 为值域标准差。

2.2 综合 Sobel 算子和 Scharr 算子的梯度计算策略

传统的 Sobel 算子利用一对卷积核分别对图像进行横向和纵向的边缘探测, 进而计算出梯度的大小和方向^[13], 如式 (13) 和 (14) 所示。然而, 传统的 Sobel 算子对图像噪声的敏感性较高, 容易误检出非真实边缘, 对低对比度边缘检测不够敏感, 图 3 所示为 Sobel 算子边缘检测的结果。

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix}, G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$M = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}, \theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (14)$$



图 3 Sobel 算子边缘检测结果

Fig.3 Sobel operator edge detection results

在 OpenCV 中,为了增强边缘梯度,可以使用改进版本的 Scharr 算子函数^[14]。该函数通过特定的卷积核设计,对图像的水平 and 垂直梯度进行计算,如式(15)所示。

$$\mathbf{K}_{\text{Scharr}X} = \begin{bmatrix} -3 & 0 & +3 \\ -10 & 0 & +10 \\ -3 & 0 & +3 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_{\text{Scharr}Y} = \begin{bmatrix} -3 & -10 & -3 \\ 0 & 0 & 0 \\ +3 & +10 & +3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

相较于传统的 Sobel 算子,改进的 Scharr 算子的边缘检测能力更强,对边缘的方向变化更敏感,能够更好地适应各种图像特征和噪声水平。利用 Scharr 算子进行边缘检测的图像处理结果如图 4 所示。分析图 4 可知,虽然 Scharr 算子的边缘响应更强,但是也会检测到无关的边缘线,算法效率也有欠缺。

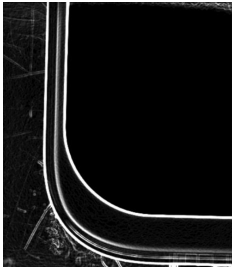


图 4 Scharr 算子边缘检测结果

Fig.4 Scharr operator edge detection results

为了克服 Sobel 算子和 Scharr 算子的局限性并捕获更精细的边缘细节,本研究提出了一种综合梯度计算策略,通过旋转 Sobel 算子的水平和垂直卷积核计算出对角线方向的核,同时结合 Scharr 算子的水平和垂直梯度求出总的梯度幅度。Sobel 对角线方向梯度如式(16)所示。

$$\mathbf{K}_{\text{Sobel}45^\circ} = \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & +1 \\ 0 & +1 & +2 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_{\text{Sobel}135^\circ} = \begin{bmatrix} 0 & +1 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

根据式(15)(16)可以计算出总的梯度幅度 M ,如式(17)所示。

$$M = \sqrt{(\mathbf{K}_{\text{Sobel}45^\circ} \cdot I)^2 + (\mathbf{K}_{\text{Sobel}135^\circ} \cdot I)^2 + (\mathbf{K}_{\text{Scharr}X} \cdot I)^2 + (\mathbf{K}_{\text{Scharr}Y} \cdot I)^2} \quad (17)$$

式中, I 表示原始图像。

通过融合 Sobel 算子在对角线方向上的敏感度以及 Scharr 算子在边缘识别上的显著响应和优

越的抗干扰能力,实现触摸屏边缘梯度和方向更为精确稳定的边缘检测效果。

2.3 最大类间方差确定高低阈值

边缘检测时,选择恰当的高低阈值对于检测结果的准确性至关重要。高阈值设置得较低虽然能够保留较多的边缘信息,但也可能增加了假边缘;高阈值设置得较高有助于减少假边缘,但可能会丢失一些重要的细节。低阈值设置较低有助于收集更丰富的边缘信息并维持边缘的连贯性,同时也可能伴随噪声点的增多;而低阈值设置较高则会导致边缘不连续,从而产生断裂现象。通过精细调节高低阈值,在保留边缘信息和抑制噪声之间找到平衡点,从而优化边缘检测的性能。为了在边缘检测中得到合适的高低阈值,本研究采用最大类间方差法对阈值进行自适应计算,自动找到最优阈值,以提高边缘检测的准确性和鲁棒性。

3 基于 RANSAC 算法的边缘直线拟合

3.1 触摸屏边缘直线特征点的提取

在边缘检测中,对可能构成触摸屏边缘直线的边缘点进行提取,采取设定阈值的策略,将所得的边缘映射转换成二值图像,其中边缘点被醒目地标记为白色,而背景中的非边缘区域则以黑色呈现,从而形成了鲜明的视觉对比,这些边缘点也是进行直线拟合的候选点集。

利用优化后的算法对边缘点进行处理,可以减少误检和漏检,提高边缘直线检测的准确率。此外,为了更好地处理异常值,提高直线拟合的准确性,本研究试图寻找一种改进型的 RANSAC 算法,通过迭代计算,逐步逼近最优解,从而精确地定位边缘点。该算法适用于边缘数据点中包含异常值或噪声点,同时又需要较高拟合精度的应用场景,能够更好地应对复杂的数据环境,实现更加精确和可靠的直线拟合。

3.2 基于 RANSAC 算法的边缘直线拟合

直线拟合常用的方法有 RANSAC 算法和最小二乘法^[15]。RANSAC 算法鲁棒性较好,即使数据处理过程中存在较大比例的异常值或噪声时,也能够保持较高的拟合精度,但计算效率相对较低、成本也较高。最小二乘法计算效率较高,在数据点近似线性且噪声水平较低时,能够快速准确地找到最佳拟合直线;但在面对大量

异常值或噪声数据时会受到显著影响,导致拟合精度下降。

为了克服上述两种算法存在的问题,同时针对触摸屏贴边边缘直线检测特点,本研究结合 RANSAC 算法和最小二乘法提出一种改进型的 RANSAC 算法。该算法利用 RANSAC 算法的鲁棒性,通过迭代随机选择数据点集,构建初始直线模型;计算所有数据点到该直线的距离,识别并排除异常值,寻找最优模型,确定内点集合。然后,采用最小二乘法对这些内点集进行直线拟合。由于最小二乘法在处理近似线性、噪声较低的数据时具有较高的效率和精度,因此在内点集合上应用最小二乘法对直线模型进行优化,能够得到更加精确的边缘直线。

改进型的 RANSAC 算法流程如图 5 所示。

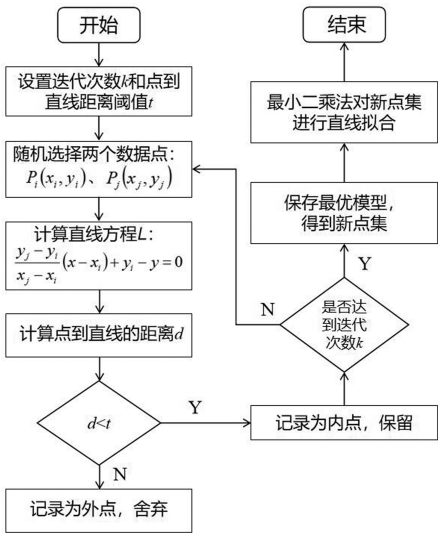


图 5 改进型的 RANSAC 算法流程

Fig.5 Improved RANSAC algorithm flow

算法过程中的迭代次数 k 可通过式 (18) ~ (21) 推导得出^[16-17]。

$$\omega = \frac{n_{\text{内点}}}{n_{\text{外点}} + n_{\text{内点}}}$$

(18)

式中, ω 为内点在数据点集中的比例, $n_{\text{内点}}$ 和 $n_{\text{外点}}$ 分别表示在数据点集中的内、外点的数量。

每次计算模型需要 n 点时,选取的点至少有一个为外点的概率为 $1-\omega^n$ 。在迭代 k 次计算模型都至少采样一个外点的概率为 $(1-\omega^n)^k$ 。则可以采样到正确的 n 个内点去计算出模型的概率 P 如式(9)所示。

$$P = 1 - (1 - \omega^n)^k$$

(19)

对式(19)变换,得到:

$$1 - P = (1 - \omega^n)^k$$

(20)

对式(20)两边取对数,得到:

$$k = \frac{\log(1 - P)}{\log(1 - \omega^n)}$$

(21)

为了达到筛选的目的,本研究设置最大迭代次数为 500,阈值为 3,对数据点集进行拟合筛选。

对左侧边缘直线应用改进型 RANSAC 算法得到最优模型和拟合直线,如图 6 所示。RANSAC 算法、最小二乘法以及改进型 RANSAC 算法直线拟合方法的求解时间如表 1 所示,用相应算法运算 5 次,得到运算时间 T_1 至 T_5 ,最后求得平均运算时间 $T_{\text{平均}}$ 。

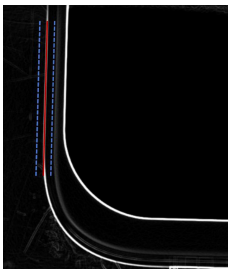


图 6 改进型 RANSAC 算法拟合直线

Fig.6 Improved RANSAC algorithm for fitting straight lines

表 1 直线拟合算法改进前后的求解时间对比

Tab.1 Comparison of solution time before and after the improvement of straight-line fitting algorithm

算法	T_1/s	T_2/s	T_3/s	T_4/s	T_5/s	$T_{\text{平均}}/s$
RANSAC	0.156	0.152	0.149	0.153	0.151	0.152 2
最小二乘法	0.081	0.079	0.082	0.081	0.079	0.080 4
改进型 RANSAC	0.116	0.112	0.112	0.109	0.111	0.112

分析拟合效果和数据可知,通过改进型的 RANSAC 算法直线拟合方法能够处理数据点中的异常值或噪声点,在保持算法鲁棒性的同时,也能提高直线拟合的准确性和效率,其直线拟合效率比传统的 RANSAC 算法提升了 26.4%。

4 实验与分析

为了验证改进算法的可行性和有效性,在测试平台进行了触摸屏贴边边缘直线检测和拟合等测试。实验在 Visual Studio2017 和 OpenCV4.2.0

下基于 C++ 编程语言完成,运行环境为 64 位 Win10 操作系统,Intel(R) Core(TM) i5-5200U, 2.2 GHz,内存 8 G。

对待测图样分别使用传统 Canny 算法、Sobel 算子、Scharr 算子、Laplace 算子以及阈值二值化处理进行边缘处理,并和所提的改进的 Canny 边缘直线检测算法对比,如图 7 所示。

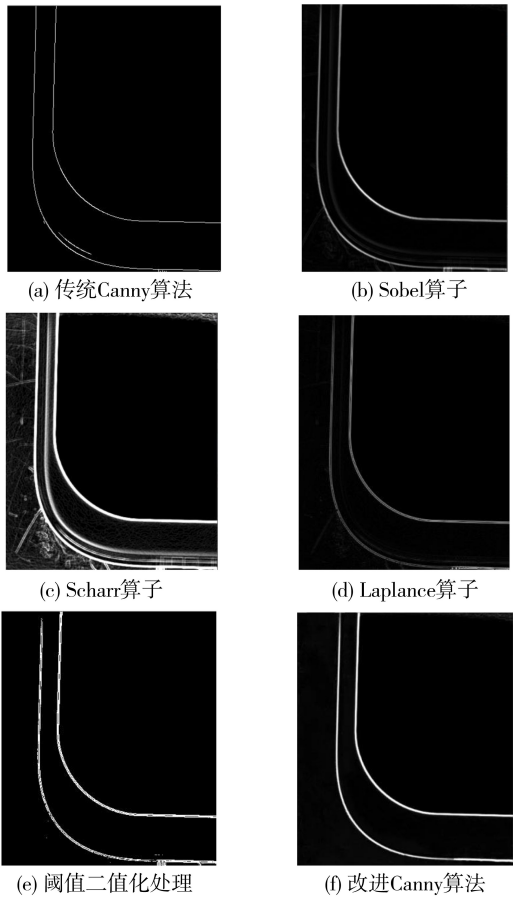


图 7 不同算法比较图

Fig.7 Comparison chart of different algorithms

分析可知,相较于其他边缘检测算法,改进 Canny 算法在去除干扰噪声的同时,能更有效地保留边缘信息,加强了对边缘细节的捕捉能力,提取到了最优化的边缘信息。

紧接着,利用改进型 RANSAC 算法进行边缘直线的拟合,并和经典的霍夫直线检测算法作比较,两种算法拟合效果如图 8 所示。

图 8(a)中霍夫直线检测算法能够有效地抵抗图像中的噪声干扰,表现出优越的抗噪性能,但其检测出来的直线会有离散的线段,导致直线拟

合的准确性降低。图 8(b)采用改进型 RANSAC 算法,先用 RANSAC 算法确定内点区间,排除较大的干扰信号,再用最小二乘法得到拟合的直线,最后将拟合直线和样品边缘进行匹配,更加准确地确定了触摸屏贴合的边缘直线特征。

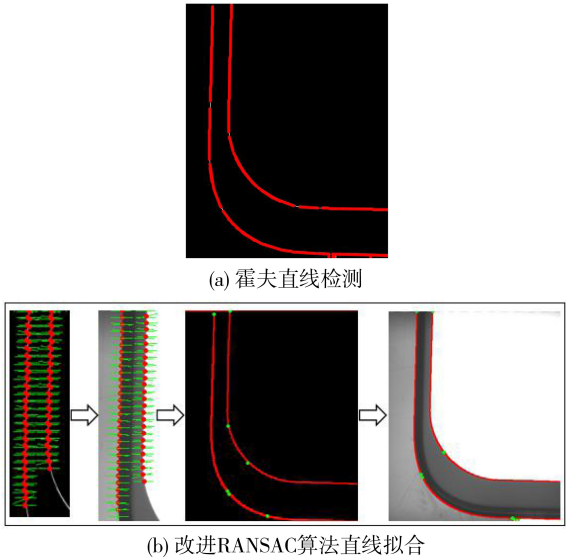


图 8 直线拟合效果对比

Fig.8 Comparison of straight-line fitting effects

5 结论

为了解决传统算法在触摸屏边缘检测中存在的假边缘、噪点、边缘丢失等问题,提高触摸屏直线检测的精度及准确率,本研究提出了一种基于 Canny 与 RANSAC 算法的边缘直线检测改进算法,结论如下:

- 1)该算法通过双边滤波技术有效降低了图像噪声,同时融合 Sobel 和 Scharr 算子进行图像梯度计算,增强边缘识别能力;通过最大类间方差算法确定阈值大小,实现了对触摸屏贴合边缘的高精度检测,提取出了最优化的边缘直线。
- 2)该算法引入了改进型 RANSAC 算法,首先筛选出数据点中的最优内点,接着在内点上应用最小二乘法进行直线拟合,从而获得更为精确的触摸屏边缘直线,有效提升了直线拟合的准确性。
- 3)所提的边缘直线检测与拟合方法,为触摸屏贴合工艺提供了一种更为可靠和精确的技术手段。

参考文献:

- [1] 张俊升. FOG 贴合工艺中图像处理技术的应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2016.
- [2] ZHOU L Y,HUANG X W,FU Q,et al. Fine edge detection in single-pixel imaging[J]. Chinese Optics Letters,2021,19(12):121101.
- [3] 肖逸. 触摸屏的 UVW 平台自动对位系统开发[D]. 广州:广东工业大学,2021.
- [4] 张仕强,张仕刚,舒成业,等. 双层 LCD 触摸显示屏贴合工艺及应用[J]. 上海轻工业,2023(2):137-139.
- [5] 张振亚. 基于机器视觉的平板电脑 LCD 对位贴合系统设计与开发[D]. 广州:广东工业大学,2014.
- [6] 李俊蒂,徐敏,苏鹭梅,等. 一种基于机器视觉的自动标定贴屏实现方法[J]. 厦门理工学院学报,2016,24(1):47-51.
- [7] 苏鹭梅,张辑,薛勇,等. 视觉引导触摸屏高精度自动贴合系统[J]. 厦门理工学院学报,2017,25(1):44-49.
- [8] 张建国,季甜甜,莘明星,等. 涂胶缺陷检测中的边缘提取方法[J]. 船舶工程,2021,43(2):128-133.
- [9] 于新善,孟祥印,金腾飞,等. 基于改进 Canny 算法的物体边缘检测算法[J]. 激光与光电子学进展,2023,60(22):221-230.
- [10] YU X K,WANG Z W,WANG Y H,et al. Edge detection of agricultural products based on morphologically improved canny algorithm[J]. Mathematical Problems in Engineering,2021(3):6664970.1-6664970.10.
- [11] 黄怡静,胡小平,彭向前,等. 改进 Canny 算子的图像边缘检测算法[J/OL]. 机械科学与技术,1-11 [2024-10-22]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230297>.
- [12] 包从望,胡才梦,张彩红,等. 基于改进 Canny 算子的齿轮缺陷检测边缘检测算法[J]. 组合机床与自动化加工技术,2023(1):83-86,91.
- [13] 张红霞,王灿,刘鑫,等. 图像边缘检测算法研究新进展[J]. 计算机工程与应用,2018,54(14):11-18.
- [14] 姚昱,郑洋,程子焱,等. 基于 Scharr 算子的计算鬼成像边缘提取技术[J]. 激光与光电子学进展,2024,61(10):137-144.
- [15] 罗成文,黎东,聂胜,等. 一种稳健的激光点云拟合空间圆柱面方法[J]. 测绘地理信息,2024,49(3):31-34.
- [16] 冯宝凤,杨剑锋,严可,等. 融合 RANSAC 与 GMS 图像特征的匹配算法[J]. 智能计算机与应用,2023,13(9):74-79.
- [17] 宫金良,孙科,张彦斐,等. 基于梯度下降和角点检测的玉米根茎定位导航线提取方法[J]. 农业工程学报,2022,38(13):177-183.

(责任编辑:方素华)