



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405373

引用格式:张文君,赵雅彬,李德龙.基于识别局部最大值的自动化指纹纹线密度测量[J].科学技术与工程,2025,25(16):6841-6849.

Zhang Wenjun, Zhao Yabin, Li Delong. Automated fingerprint ridge density measurement based on the identification of local maxima[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(16): 6841-6849.

# 基于识别局部最大值的自动化指纹纹线密度测量

张文君,赵雅彬\*,李德龙

(中国人民公安大学侦查学院,北京100038)

**摘要** 在指纹识别技术应用范围内,指纹纹线密度作为指纹形态学特征之一,其研究价值日益凸显。针对现有测量方法存在的耗时、工作量大等问题,提出一种基于算法的自动化测量方法。该算法首先对指纹图像进行预处理,包括灰度化、边缘检测、降噪和纹线增强,以提高图像质量和清晰度;然后,通过强化指纹特征,数组转换、确定方向向量、峰值检测、最后绘制灰度值波动图,直观展示测量结果。实验结果表明:自动测量算法在效率和准确性上较好,同人工测量结果之间具有较高的一致性和显著的统计相关性,进一步证实了自动测量方法的科学性和有效性,为指纹识别的自动化和智能化提供了新的思路和方法。

**关键词** 纹线密度;自动化测量;图像增强;峰值检测;统计学分析

**中图分类号** TP391.4;

**文献标志码** A

## Automated Fingerprint Ridge Density Measurement Based on the Identification of Local Maxima

ZHANG Wen-jun, ZHAO Ya-bin\*, LI De-long

(Academy of Forensic Science, People's Public Security University of China, Beijing 100038, China)

**[Abstract]** In the field of fingerprint recognition technology, ridge density, as one of the morphological features of fingerprints, has demonstrated increasing research value. Aiming at the problems of time-consuming and labor-intensive existing measurement methods, an algorithm based automated measurement method was proposed. The algorithm first preprocessed fingerprint images, including grayscale conversion, edge detection, noise reduction, and ridge enhancement, to improve image quality and clarity. Subsequently, it strengthened fingerprint features, performed array transformation, determined directional vectors, detects peaks, and finally plotted a grayscale fluctuation diagram to visually present the measurement results. Experimental results show that the automated measurement algorithm performs well in terms of efficiency and accuracy, exhibiting high consistency and significant statistical correlation with manual measurements. This further validates the scientific robustness and effectiveness of the automated measurement method, providing new perspectives and approaches for the automation and intelligence of fingerprint recognition.

**[Keywords]** ridge density; automated measurement; image enhancement; peak detection; statistical analysis

指纹具备同一认定的形态学价值,在各类刑事案件调查和审理中发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。但在现实案件中,指纹条件并不处于理想情况,一些印痕反映出的宏观细节特征点较少,对指纹鉴定工作造成一定障碍。同时,技术人员对现场指纹图片进行处理时,存在遗漏比例尺的情况,这就需要技术人员根据经验判定单位距离约有多少条乳突纹线,将指纹图像矫正至原始大小。通过指纹能否挖掘其

他特征信息<sup>[2]</sup>,已成为指纹研究的热点问题,其中,中外学者对于纹线密度的相关研究关注度较高。

指纹纹线密度,作为指纹形态学特征之一,反映了指纹图案中单位面积内纹线的数量<sup>[3]</sup>。1999年,Acree<sup>[4]</sup>首次提出指纹纹线密度,设计一种估计高加索人和非裔美国人血统性别的方法,认为指纹单位面积上出现的脊数称为纹线密度,它可以通过检查乳突纹线宽度和纹线之间的距离两个参数来

收稿日期:2024-07-17; 修订日期:2025-03-09

基金项目:国家重点研发计划(2023YFC3303703-01)

第一作者:张文君(2000—),女,汉族,甘肃兰州人,硕士研究生。研究方向:刑事智能技术。E-mail:2360086050@qq.com。

\*通信作者:赵雅彬(1981—),女,汉族,甘肃兰州人,博士,教授。研究方向:法庭科学、刑事智能技术、痕迹检验技术。E-mail:20052172@pp-suc.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

确定。此后,文献[5-6]对纹线密度的测量,基本均是指纹中心区域选取 5 mm × 5 mm 内斜对角方向进行计数。卢海钊等<sup>[7]</sup>提出了一种基于改进的 Light-GBM(light gradient boosting machine)算法的室内定位算法用于解决室内定位中存在的问题。路畅等<sup>[8]</sup>提出了一种基于联合指纹的鲁棒性强的高精度室内定位算法获得了良好的定位效果。

纵观近年指纹纹线密度的研究,主要测量均采用人工测量方法。陈为民等<sup>[9]</sup>提出了一种基于灰度相似性的指纹纹线密度提取方法,但其主要是对指纹纹线的灰度进行增强,用这种图像处理方法以分析纹线流向及二级特征点位置。因此,纹线密度的测量依旧停留在人工计量上,耗时、工作量大。鉴于此,设计一种算法对指纹图像进行处理,以便对纹线密度的快速、准确测量,从而解决实际研究中耗时耗力的问题,并使指纹纹线密度测量样本的量级扩大,使统计结果更具普适化、精准化。

### 1 基于图像增强和局部最大值算法对指纹纹线密度的测量应用

为保证纹线密度测量的准确性及高效性,设计的算法工作流程如图 1 所示,主要步骤涉及图像增强和纹线密度计算两部分。首先对指纹图像进行处理,包括灰度化、边缘检测、降噪和纹线增强,以提高图像质量和清晰度;然后,通过强化指纹特征,数组转换、确定方向向量、峰值检测、最后绘制灰度值波动图,直观展示测量结果。

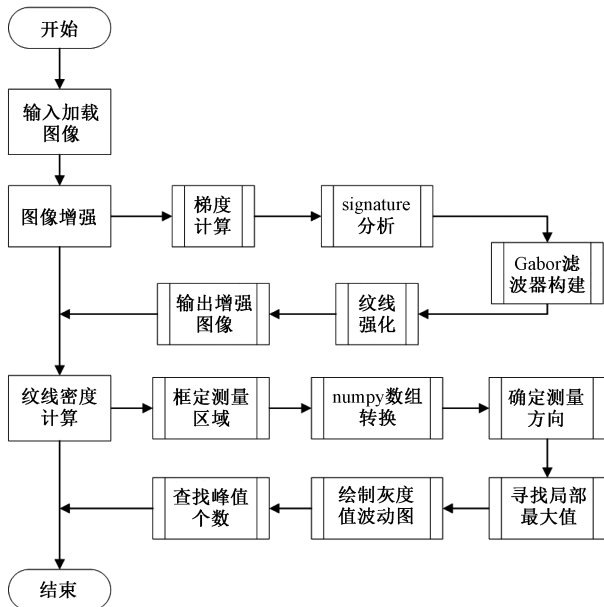


图 1 算法流程图  
Fig. 1 Algorithm flowchart

### 1.1 图像处理流程

#### 1.1.1 图像梯度计算

指纹图像主要用于反映乳突纹线特征的组成,这些线条平滑流动并共同构成一个独特的指纹图案。在学术研究中,这些特征被描述、量化,并通过图像处理技术和算法进行分析和匹配,以实现个人身份认证等应用<sup>[10]</sup>。

原始的指纹图像包含 RGB3 个颜色通道,对于指纹图像的颜色构成较为简单,将图像转化为灰度图像,使其保留一个亮度通道。这一步处理,在实现时使用一个预定义的权重矩阵将 3 个颜色的通道转化为灰度值,其计算公式为

$$G_{ray} = 0.2989R + 0.5870G + 0.1140B \quad (1)$$

式(1)中:主要运用加权平均灰度处理, $G_{ray}$ 为灰度处理之后的颜色; $R、G、B$ 分别为原始的红色、绿色、蓝色通道的像素值,由于人类的眼睛感官蓝色的敏感度最低,敏感最高的是绿色,因此将 RGB 按照 0.2989、0.5870、0.1140 比例,加权平均能得到较合理的灰度图像,完成灰度转化。

由于乳突纹线和小犁沟的分界处会有明显的灰度突变,进而边缘检测可应用索贝尔算子(Sobel-operator),计算梯度<sup>[11]</sup>。Sobel 算子是一种用于边缘检测的线性滤波器,它基于两个  $3 \times 3$  的卷积内核,如图 2 所示,图 2(a)用于计算图像在水平方向上的差异( $x$ 方向梯度),图 2(b)用于计算图像在垂直方向上的差异( $y$ 方向梯度),将之与图像作平面卷积,即可分别得出横向和纵向的亮度差分近似值。

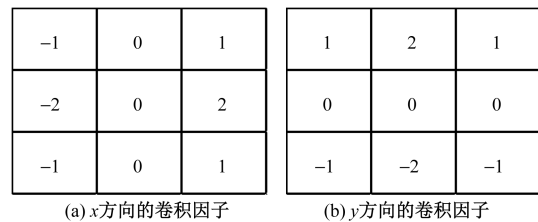


图 2 卷积因子  
Fig. 2 The convolution factor

如果以  $G$  代表处理后的灰度指纹图像, $G_x、G_y$  分别为经过横向及纵向边缘检测的图像灰度值,其计算公式为

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

计算出图像在每个像素点上的  $x$  方向和  $y$  方向的梯度值,然后结合这两个方向的梯度值计算出梯度大小(幅值),从而得到图像的梯度信息。通过梯度的幅度可以了解边缘的强度,而方向信息有助于确定指纹脊线的走向。

#### 1.1.2 x-signature 计算

针对纹线密度的测量,由人眼直接计数到计算

机计数,其处理信息的能力是有一定差异。典型的处理问题有:一是乳突纹线捺印是断断续续;二是皱纹、伤疤对乳突纹线连续性的影响;三是乳突纹线之间受挤压、擦蹭导致的模糊。

根据图像的梯度信息,对上述的典型问题需要进行图像的降噪处理,使用均值滤波方法进行平滑处理,它通过将每个像素周围的像素值的平均值替换当前像素值来减小噪声。对于处理的指纹图片,每一张的像素点数量恒定,通过调试,既减少图像中的噪声和不必要的细节,同时保留足够的指纹特征以便后续处理,选用  $5 \times 5$  大小的滤波器窗口遍历整个图像的每一个像素,并调用-1 参数保证目标图像的深度与源图像相同。为判定细节处理是否得当,计算沿着图像的  $x$  轴(水平方向)对每一个像素行进行求和操作。这可以通过遍历图像的每一行,并将每一行的像素值累加起来实现。最终,会得到一个长度与图像高度相同的一维数组,该数组就是  $x$ -signature,以便更直观地观察原始图像和增强图像在水平方向上的特征变化,保证增强效果。如图 3 所示,平滑后指纹图像更利于指纹纹线特征分析。

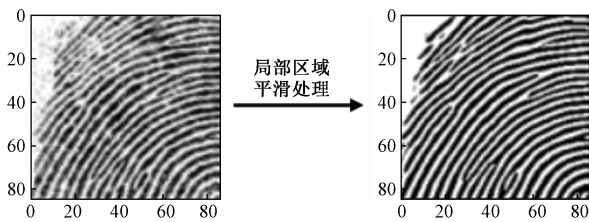


图 3 原图处理后的结果

Fig. 3 The result of processing the original image

### 1. 1. 3 Gabor 滤波器构建

根据  $x$ -signature 数组的变化,以及一系列的梯度方向,使用设计的 Gabor 滤波器对原始图像进行滤波处理,从而增强指纹图像中的特征信息,包括乳突纹线特定的方向和频率特性。Gabor 是一个用于边缘提取的线性滤波器,Gabor 滤波器是一个正弦波调制的高斯核,能够在频域和空域上都达到最佳的定位。Gabor 滤波器的基本形式通常定义为二维函数,是高斯包络(envelope)和正弦波的乘积,可表示为

$$g(x, y; \lambda, \theta, \varphi, \sigma, \psi) = \exp\left(-\frac{x^2 + \gamma^2 y^2}{2\sigma^2}\right) \cos\left(2\pi^2 \frac{x'}{\lambda} + \psi\right) \quad (3)$$

式(3)中: $\lambda$  为正弦波的波长(对应于频率的倒数); $\theta$  为 Gabor 核函数的方向; $\psi$  为相位偏移(通常设为 0); $\sigma$  为高斯因子的标准差(决定 Gabor 滤波器的带宽); $\gamma$  为空间纵横比,决定滤波器的椭圆率; $x', y'$  为通过

旋转角度得到的坐标,其计算公式为

$$\begin{cases} x' = x \cos \theta + y \sin \theta \\ y' = -x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases} \quad (4)$$

经过平滑处理和 signature 在水平方向的特征变化,核计算了局部位置的乳突纹线出现次数平均值;同时,创建一个包含 8 个不同方向( $0 \sim \pi$ ,步长为  $\pi/8$ )的 Gabor 滤波器组。波长  $\lambda$  和方向  $\theta$  是两个关键参数,定义滤波器在频域上的选择性,波长是滤波器的空间周期,即滤波器重复其模式的最优化距离,这意味着每个滤波器都将专注于检测特定方向和频率的脊线特征。 $\sigma$  也由纹线周期来调整,使得滤波器的带宽与脊线周期相适应,并确保滤波器覆盖了足够的空间以捕捉脊线特征。 $\gamma$  设置为 1,表明滤波器在  $x$  和  $y$  方向上具有相同的尺度因子,综合使得每个像素选择最佳的滤波器响应来组合最终图像。图 4 为 Gabor 滤波器对图像处理的示意图。

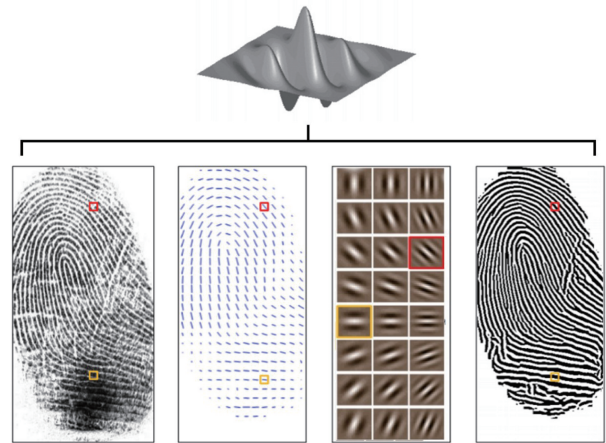


图 4 Gabor 滤波器对图像的作用

Fig. 4 Effect of Gabor filter on images

### 1. 1. 4 纹线强化

增强图像主要进行了像素值裁剪、掩模应用、二值化处理以及颜色反转步骤,从而共同作用于提升指纹纹线的可见度和图像质量。

像素值裁剪是一种规范化操作,旨在确保图像像素值位于  $0 \sim 255$  的显示与处理标准范围内。通过限定像素值,可以消除数值异常,从而避免后续处理中的计算误差或显示异常。

掩模应用则是一种基于特定条件选择性处理图像的技术。通过设计一个与原图像具有相同维度的掩模矩阵,其中元素值为 0 或 1,可以对图像的某些区域进行保护,而抑制其他区域。在指纹图像增强的背景下,掩模通常用于强调指纹特征区域,同时忽略非指纹区域,从而为后续分析提供清晰的指纹特征。

二值化进一步简化了图像的结构,设定固定阈值,将图像中的像素划分为前景和背景两部分。在指纹图像增强中,二值化有效地分离了指纹纹线和背景,增强了脊线的对比度。最后,颜色反转将图像中的像素颜色转换为其补色,调整图像的视觉效果,主要目的是将纹线颜色从白色变为黑色,与背景明显区分。处理完成后,输出增强图像,如图5所示,以便更好计算纹线密度。



图5 指纹图像处理后的效果

Fig. 5 Effect of fingerprint image processing

## 1.2 纹线密度计算

### 1.2.1 确定测量区域

针对纹线密度的测量,国际上的主流方式主要以指纹中心点为中心点,左右各框定一个正方形范围,边长为5 mm,具体测量范围如图6所示。

这个范围(图6)是指纹图像最清晰、较不易变形、国际主流的测量区域。对于中心点的确定,由于指纹纹型不同、中心纹线的复杂性,需要在代码实现中进行互动确定。因此,该部分提供了Tkinter,它是一个GUI工具包,即提供图形用户界面,从而允许使用Python代码来创建和管理窗口、按钮、复选框、列表框、滚动条、画布、菜单等多种控件和组件,使用户与程序进行交互操作。定义3个全局变量, *img*、*img\_tk* 和 *output\_dir*。其中, *img* 用于存储前期已经增强的指纹图像对象, *img\_tk* 用于存储Tkinter兼容的图像对象, *output\_dir* 用于点击中心点后框定测量范围图像的保存目录,从而实现指纹图像的打开、显示、裁剪及保存的功能。

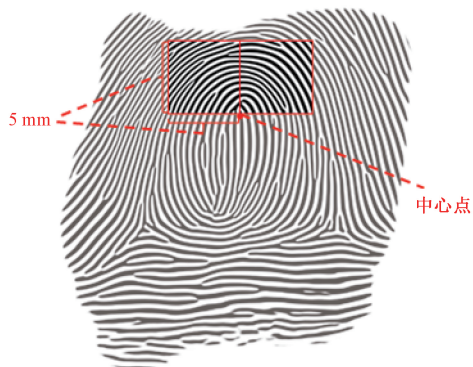


图6 测量范围

Fig. 6 Measurement range

通过功能的调用,用户在窗口内显示的图片上点击中心点位置,会输出中心点位置的坐标,并启动事件循环,使得在该窗口下批量图片的中心点标记,并储存需要测量纹线密度的两部分,这两部分图像以原图像格式保存到指定的输出路径。

### 1.2.2 NumPy 数组转换

虽然Python提供了array模块,但其只支持一维数组,不支持多维数组,也没有各种运算函数。因而不适合数值运算。对于一幅指纹图像,其包含R、G、B 3个颜色通道,每个通道代表图像中相应颜色的强度。每个像素点的颜色值由这3个通道的值组合而成,通常范围在0~255。为测量纹线密度,指纹图像被表示为一个矩阵,其中矩阵的行和列对应于图像的高度和宽度,矩阵的元素是像素值。每个像素值是一个元组,包含3个整数,分别对应于该像素点的红、绿、蓝颜色通道的值。因此,使用NumPy库将图像对象转换为NumPy数组,并定义pixels,它是一个三维数组,其形状为(*H*, *W*, *C*),其中,*H*为图像的高度(行数),*W*为图像的宽度(列数),*C*为颜色通道数(对于RGB图像,*C* = 3)。

针对图像矩阵,每个元素代表图像中第*i*行第*j*列的像素点,其值是一个包含3个整数的元组,分别对应于红、绿、蓝颜色通道的强度值。像素点(*x*, *y*)的颜色值可表示为

$$P_{ixel(x,y)} = (R_{x,y}, G_{x,y}, B_{x,y}) \quad (5)$$

它为NumPy提供了所有像素点构成的多维数组,从而便于分析每个像素点的信息,并将这些信息有序串联。

### 1.2.3 确定测量方向

如图7所示,以中心点为基准,在框定的5 mm × 5 mm 范围内,根据实验需要测量5个方向(*a*、*b*、*c*、*d*、*e*)的纹线密度。

对于图像中纹线的分析,人眼能够直接识别图像中5个方向的特征,而计算机则需要借助向量的概念来定义和分析这些方向。在图像处理中,若要分析图像中从某个中心点出发的特定方向,需首先定义方向向量。方向向量是一个数学概念,它具有大小(模)和方向,用于表示从起点到终点的向量空

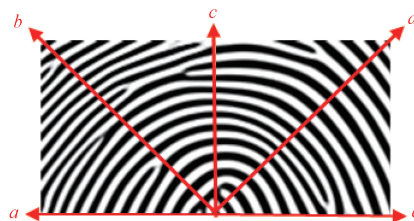


图7 测量纹线密度的5个方向

Fig. 7 The five directions for measuring ridge density

间中的一个点。在二维图像空间中,方向向量可以表示为一个有序对  $\mathbf{v} = (v_x, v_y)$ , 其中  $v_x$  和  $v_y$  分别为向量  $\mathbf{v}$  在  $x$  轴和  $y$  轴上的分量。

对于图像中心点,在确定图像测量区域时,已经得知了图像的坐标,同时也保存了测量区域的局部位图,无论时原始坐标,还是局部位图的边缘点,都可以定义该5个方向的方向向量,利用方向向量  $\mathbf{v}$ ,程序可以沿着该方向遍历经过的像素点,并索引到之前转换的 NumPy 数组,也是对特定行像素的分析。

#### 1.2.4 寻找局部最大值

计算经过向量每个像素点的灰度信息,这些信息在 NumPy 数组处理时已经进行了记录。因此调用 find peaks 算法<sup>[12]</sup>,自动检测这些连续像素点的信号峰值点。

在数字信号处理和图像分析领域,峰值检测是一项关键技术,用于识别数据中的局部最大值点。在灰度图像分析中,峰值通常表示亮度的局部变化,本文中图像中的乳突纹线与小犁沟边缘分界相对应。在数学上,局部最大值是指在某个邻域内比周围点都大的点。对于一维灰度值序列  $f(x)$ ,如果存在  $x_0$  得对于某个小的正数  $\delta$ , 有

$$f(x_0) \geq f(x), \quad \forall x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta) \setminus \{x_0\} \quad (6)$$

式(6)中: $\setminus$ 为集合差集(即“排除”),表示邻域内除  $x_0$  之外的所有  $x$ 。

则称  $x_0$  为  $f(x_0)$  的一个局部最大值点。在处理指纹图像5个向量上的信号中,峰值通常指局部最大值,且该值高于或等于某个阈值,因此,其对应的就是乳突纹线的信号信息。通过设置高度阈值和峰值之间保证每一个像素距离均最小,find peaks 能够全面地检测出灰度值序列中的所有峰值,包括边缘峰值。因此,它特别适用于对指纹图像乳突纹线计数的提取,因为它不遗漏任何可能的局部最大值,从而为后续的图像分析提供了丰富的信息。

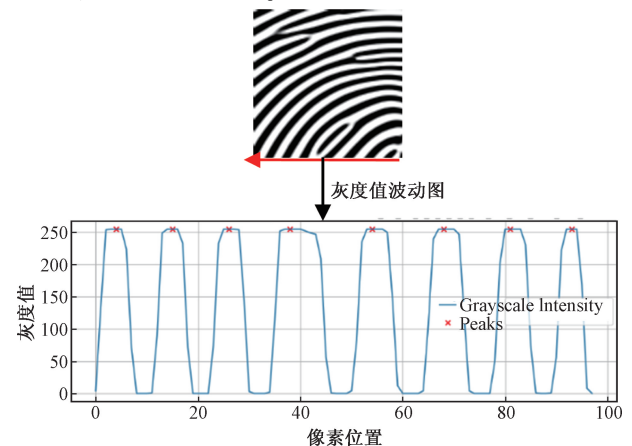
#### 1.2.5 绘制灰度值波动图及峰值个数输出

为分析和展示峰值检测的结果,采用 Matplotlib 库来绘制灰度值序列随像素位置变化的波动图,可为峰值检测提供可视化平台,同时显示出图像中关键特征点的分布情况。

在绘制的波动图中,灰度值的变化趋势通过折线图的形式展现出来,其中, $x$ 轴为像素位置, $y$ 轴为对应的灰度值。检测到的峰值在图8中以红色“x”标记,以提示帮助观察者迅速识别图像中的重要特征点。为了进一步提升图表的可读性和信息传递效率,对图表进行标注和美化,横坐标标签  $x_{label}$  为像素位置,纵坐标标签  $y_{label}$  为灰度值。此外,为图

表添加标题,提供图像和分析的简要描述,使图表主题一目了然。添加网格线增强图表的可读性,以便于观察者对数据点进行精确的观察和比较。

完成峰值检测后,将每个图像文件名与检测到的峰值数量进行记录,并输出。通过打印每个图像文件名以及对应的峰值数量,能够快速了解每个图像的特征点分布情况,实现了对图像特征点的准确定量。选取一张已经处理的指纹图像,纹线密度的测量结果如图8所示。



Grayscale Intensity 为灰度强度;Peaks 为峰值

图8 中心点左侧水平方向纹线密度测量结果示例

Fig. 8 Example of measurement result of horizontal stripe density on the left side of the center point

通过上述所有步骤,实现对指纹图像的增强以及纹线密度的测量工作,而且通过可视化手段,使得检测结果得到了直观的展示和验证。

## 2 测量效果分析

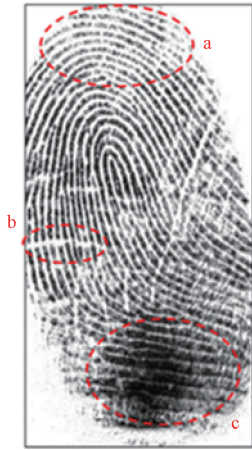
### 2.1 指纹图像增强情况

实验环境为 13th Gen Intel(R) Core i7-13700H, Python 3.12。实验样本来自 10 名志愿者(5 名男性,5 名女性)接触式滚动捺印的十指指纹图像,共计 100 张指纹图像,并确保所有指纹图像的清晰度为 500 dpi,测量区域为指纹中心点左右两个面积为  $25 \text{ mm}^2$  的正方形区域。

由于指纹在捺印时,无法保证每张指纹图像乳突纹线十分清晰,通过大量的指纹图像分析,典型的增强处理问题有:一是乳突纹线捺印是断断续续;二是皱纹、伤疤对乳突纹线连续性的影响;三是乳突纹线之间受挤压、擦蹭导致的模糊;如图9所示。

根据图像增强处理步骤,这三大问题都进行有效解决,选取 3 张代表性较强的局部图片,展示处理结果如图10所示。

图10(a)针对指纹乳突纹线本身的断续情况,这类问题主要在女性手指或者捺印压力不足条件



a、b、c 区域分别对应三类典型问题  
图 9 捺印对乳突纹线连续性的影响

Fig. 9 Impact of ink impression on the continuity of papillary ridge lines



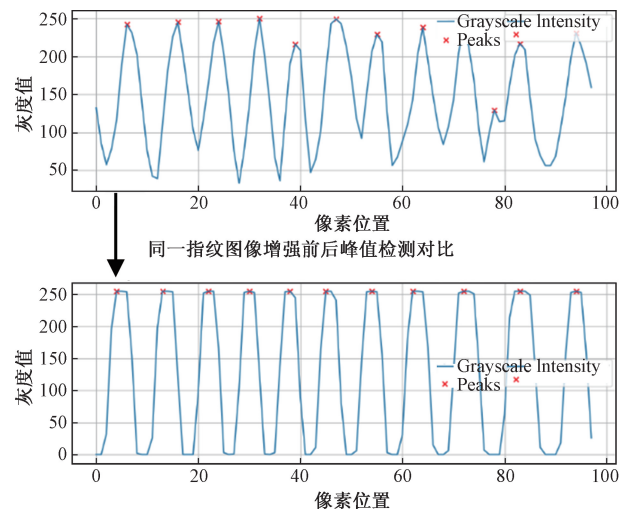
图 10 三大典型问题增强效果

Fig. 10 Enhancement effect of three typical problems

下出现。此类问题通过纹线强化,可以使乳突纹线流向更为平滑、连续,能够有效地改善指纹图像的质量,且不会破坏指纹本身的特征信息,保证后续测量的准确性。图 10(b)针对指纹捺印下呈现的皱纹形态,由于它是皮肤的张弛和堆积活动所形成的细小沟纹,在每个人的手指上几乎都有。在捺印时“切割”乳突纹线,多呈窄而短的空白线条,流向多

与乳突纹线交叉,因此在增强时不会对乳突纹线流向进行较大干扰,并根据乳突纹线的特征信息,对这些皱纹进行识别和去除,从而使得乳突纹线在图像中更为清晰、连续,处理效果较好。图 10(c)针对指纹捺印时的挤压变形。这种挤压变形通常是由于滚动捺印过程中手指的滚动和旋转所导致的,在指纹边缘区域,由于受到的挤压力较大,很容易造成乳突纹线的模糊和变形。纹线增强根据其周边信息对这部分模糊效果进行处理,尝试恢复这些区域的乳突纹线形态,使得整个指纹图像更为清晰、连续。但指纹变形极为严重或者大片纹线融合一块,纹线增强效果较差。在指纹处理过程中,由于测量区域主要集中在中心点附近,这类影响对测量正确性没有较大影响。

指纹的增强处理是确保纹线密度测量准确性的重要步骤。如图 11 所示,对指纹图像进行增强处理会提高灰度值波动中峰值检出的准确性。若不进行增强处理,小峰峰值可能会干扰并影响最终的纹线密度测量结果。



Grayscale Intensity 为灰度强度;Peaks 为峰值

图 11 增强对波峰波动的影响

Fig. 11 Enhancement effect on peak fluctuation

### 2.2 测量准确性分析

所测量的是划定区域的 5 个测量方向,计算每个方向的指纹纹线密度是取峰值个数作为该方向的计数结果,这种方法在自动化处理上展现出了极高的效率。对同一方向的测量,5 张局部区域所用时间一般为 2.40 ~ 3.60 s,这意味着即便是在处理大量指纹图像时,也能保持较快的处理速度。然而,人眼测量,即使仅针对一张图的一个方向所用时间,就为 6.28 ~ 9.42 s。因此,当处理指纹图像数量从几十张到百张、千张甚至更庞大时,人工测量的工作量将呈几何倍数增加,这种增长不仅会导致

测量效率低下,更会造成人力成本的急剧上升。同时,由于人工测量存在主观性和疲劳因素的影响,测量结果的准确性和一致性也难以保证。这可能会导致数据质量下降,甚至影响后续的分析和决策。

为了更深入地评估和展示所提方法的测量精确性,挑选一位具有指纹检验技术理论知识和实践经验的志愿者参与实验。该志愿者在进行测量时,确保了选取中心点的位置与自动测量系统保持一致,以减少因操作者不同而带来的误差,确保比较的公正性和准确性。

测量结果的对比情况通过图表形式进行了直观展示,如图 12 所示,展示了每个方向上自动测量与人工测量的一致性和差异性。对比分析可知,5 个方向上测量的准确度均超过 95%。这一结果证明自动测量算法的高效性和可靠性。只有极少数情况,自动测量与人工测量之间存在微小的差异,这些极个别的差异可能是由于测量过程中的微小变动或是对测量标准的主观理解差异造成的。

根据图 12 所示的 12 个测量不同值,开展了一轮额外的自动测量和人工测量复核工作,以进一步验证测量结果的一致性,复核结果如表 1 所示。在复核结果中,算法自动测量结果同第一次保持一致,而人工测量与第一次有一定偏差,并且再次测量后,人工测量同自动测量结果有 9 个结果一致。

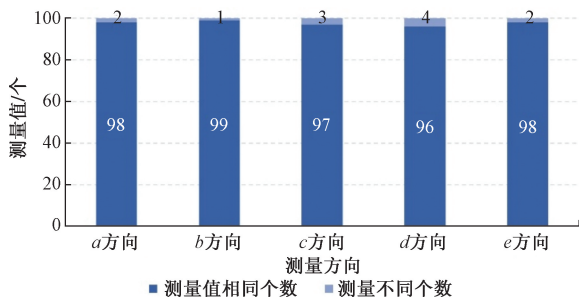


图 12 测量结果异同

Fig. 12 Differences and similarities in measurement results

表 1 复核结果对比

Table 1 Comparison of review results

方向	初次测量结果		复核结果	
	自动测量	人工测量	自动测量	人工测量
a 方向 (不同个数:2)	11,12	10,13	11,12	11,13
b 方向 (不同个数:1)	14	15	14	14
c 方向 (不同个数:3)	10,13,10	11,12,11	10,13,10	10,12,10
e 方向 (不同个数:4)	16,20,14,15	15,21,13,14	16,20,14,15	16,21,13,15
d 方向 (不同个数:2)	10,12	9,13	10,12	10,12

复核结果(表 1)可得到如下结论。

(1)自动测量的一致性。算法使用在复核中展示出了较强的稳定性,其结果与初次测量完全一致,这证明了自动测量方法的可靠性和重复性。

(2)人工测量的可变性。与自动测量的稳定性相比,人工测量在复核中显示出了一定的波动。这些变化可能源于人为因素,例如测量时的疲劳、误数或遗漏。当处理的指纹图像数量增加时,这些误差有可能被放大,不同测量者之间的主观判断差异也可能导致结果的不一致。

(3)复核后的一致性增强。经过复核,人工测量与自动测量结果的一致性得到了显著提升。在 12 个复核案例中,有 9 个案例的人工测量结果与自动测量达成了一致,这表明经过再次审查和测量,人工测量在很大程度上认可了自动测量的结果。

(4)剩余差异分析。与自动测量结果的稳定性相比,人工测量在复核中显示出一定的变化。由于人眼观察计数,这些变化源于计数时的主观性,或是对纹线的细微差异的不同解读。其中,a 方向测量的结果是由于在该方向上出现了一处交汇,即两条乳突线并为一条且交汇点刚好位于该方向上,因此导致的两种测量方法的误差;c 和 d 方向的两处差异是对于框选范围边界上经过的乳突纹线计数进行的取舍所致。综上可知,复核结果不仅证实了自动测量系统的稳定性,也揭示了人工测量在主观判断上的不稳定性。同时,它也肯定了自动测量与专业人员在测量准确度上能够达到高度一致性,为自动测量系统的进一步应用和发展提供了有力的支持。

为进一步验证算法使用的科学性,根据自动测量和人工测量的匹配数据进行相关性分析。使用斯皮尔曼等级相关系数和配对样本 T 检验两种统计学分析方法检验两者是否存在显著差异。

测量的纹线密度数据之间没有线性关系,但仍然是数值型,因此,斯皮尔曼等级相关系数可以衡量自动测量和人工测量两者之间的等级相关性,而不是线性相关性。分析结果如表 2 所示。可以看出,自动测量与人工测量之间的斯皮尔曼 Rho 值为 1.000,表明两者之间呈正相关。Sig. (双尾)在探索关联关系时,显著性水平为 0.000,远低于 0.01 的显著性水平标准,这表明观察到的相关性显著,可以排除这种高度相关性是由随机因素引起的。N 则反映结果的可靠性,即样本量在较大情况下,结果更为稳定。因此两种方法的结果具有极高的一致性,并且这种关系在统计上显著,表明算法的自动测量可以作为可靠的工具来替代人工测量结果。

两种测量都是针对相同的指纹和相同的方向测量的,这样的两种方法结果的来源可以映射到同一个体,因此每个算法测量的值都可以与相应的人工测量值进行配对。配对样本  $T$  检验适用于这种情况,因为它可以检验两组配对观测值之间是否存在显著差异。分析结果如表 3 ~ 表 5 所示。由检验分析结果可知,自动测量和人工测量在平均值、标准偏差和标准误差方面表现出较高的一致性;两者之间的相关性达到了统计学上的显著性标准;配对样本  $t$  检验的结果表明,两种测量方法的平均值之间没有显著差异。因此,可以认为自动测量方法在这项研究中是一个可靠和有效的工具,能够代替人工测量。

表 2 斯皮尔曼等级相关性分析

Table 2 Spearman's rank correlation analysis

测量方式	指标	自动测量	人工测量
斯皮尔曼 Rho	相关系数	1.000	0.999**
	自动测量 Sig. (双尾)	—	0.000
	$N$	500	500
	相关系数	0.999**	1.000
人工测量	Sig. (双尾)	0.000	—
	$N$	500	500

注:\*\*表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著; $N$  为测量数值数;Sig. 表示显著性水平标准。

表 3 配对样本统计

Table 3 Paired sample statistics

测量方式	平均数	个案数	标准偏差	标准误差平均值
自动测量	11.60	500	5.382	0.241
人工测量	11.60	500	5.381	0.241

表 5 配对样本检验

Table 5 Paired sample test

指标	配对差值				$t$	自由度	Sig. (双尾)	
	平均值	标准偏差	标准误差平均值	差值 95% 置信区间				
				下限				上限
自动-人工测量	0.002	0.161	0.007	-0.012	0.016	0.277	499	0.782

## 参 考 文 献

- [1] Ahmed A A, Osman S. Topological variability and sex differences in fingerprint ridge density in a sample of the Sudanese population [J]. Journal of Forensic and Legal Medicine, 2016, 42: 25-32.
- [2] 董学新. 通过现场指印检验判断女性犯罪嫌疑人[J]. 刑事技术, 2017, 42(2): 171-172.  
Dong Xuexin. Judging female criminal suspects through on-site fingerprint examination[J]. Forensic Science and Technology, 2017, 42(2): 171-172.
- [3] Salvador R, García-León M Á, Fera-Raposo I, et al. Fingerprints as predictors of schizophrenia: a deep learning study[J]. Schizophrenia Bulletin, 2023, 49(3): 738-745.

表 4 配对样本相关性

Table 4 Correlation of paired samples

测量方式	个案数	相关性	显著性
自动测量 & 人工测量	500	1.000	0.000

## 3 结 论

针对指纹纹线密度自动测量中的图像质量优化与特征提取难题,提出一种基于多尺度特征融合的指纹纹线密度测量算法。得出如下结论。

(1)在复杂指纹图像处理场景下,该算法有效解决了传统人工测量方法存在的效率低下和主观偏差问题,实现了指纹纹线密度的精准量化分析。首先构建多阶段图像增强网络,通过引入自适应直方图均衡化与方向场引导的 Gabor 滤波技术,对低质量指纹图像进行分层处理。该设计有效保留了纹线细节特征,增强了对模糊区域和噪声干扰的鲁棒性,为后续密度测量奠定了可靠的图像基础。在空间域和频域并行提取纹线特征,通过建立空间注意力引导的纹线跟踪模块与频域小波系数分析模块的协同工作,显著提升了纹线检测的连续性,特别是在指纹核心区域处的测量精度得到明显改善。

(2)实验验证基于数据集开展多方向采样测试,结果表明,所提算法较人工提升 2.6 ~ 3.9 倍,百张级处理效率增益将倍数增长;通过 12 组双盲复核与统计学验证,证实所提算法测量准确度超 95%,边界误差 < 1.2 条/mm,且结果稳定性达 100%,显著优于人工测量复核一致性。

- [4] Acree M A. Is there a gender difference in fingerprint ridge density? [J]. Forensic Science International, 1999, 102: 35-44.
- [5] Sharma S, Shrestha R, Krishan K, et al. Sex estimation from fingerprint ridge density: a review of literature[J]. Journal of Anatomy, 2021, 92(5): 49-56.
- [6] Roberts M A, Tom K R, Knorr K B. Publication trends in forensic science research: friction ridge discipline[J]. Forensic Science International: Synergy, 2020, 2: 76-81.
- [7] 卢海钊, 张烈平, 王守峰, 等. 基于改进 LightGBM 的室内指纹定位算法[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(15): 6306-6312.  
Lu Haizhao, Zhang Lieping, Wang Shoufeng, et al. Indoor fingerprint localization algorithm based on improved LightGBM[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(15): 6306-6312.
- [8] 路畅, 崔英花. 基于改进支持向量回归的联合指纹定位算法

- [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(18): 7809-7815.
- Lu Chang, Cui Yinghua. Joint fingerprint localization algorithm based on improved support vector regression[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(18): 7809-7815.
- [9] 陈为民, 徐东霞. 一种基于灰度相似性的指纹纹线密度提取方法[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2006, 28(2): 122-126.
- Chen Weimin, Xu Dongxia. A method for extracting fingerprint ridge density based on grayscale similarity[J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition), 2006, 28(2): 122-126.
- [10] 马常昊, 胡文惠, 钟海超, 等. 融合 Sobel 算子的 SAR 图像结构优化方法[J]. 探测与控制学报, 2024, 46(2): 119-124.
- Ma Changhao, Hu Wenhui, Zhong Haichao, et al. SAR image structure optimization method incorporating Sobel operator [J]. Journal of Detection & Control, 2024, 46(2): 119-124.
- [11] 张宜尧, 徐银森, 李健儿, 等. 基于梯度法的指纹方向场的 FPGA 实现[J]. 电子设计工程, 2022, 30(20): 23-27, 33.
- Zhang Yiyao, Xu Yinsen, Li Jian'er, et al. FPGA implementation of fingerprint orientation field based on gradient method[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(20): 23-27, 33.
- [12] 深动科技(北京)有限公司. 基于局部最大值的候选目标检测方法: CN201910237024.1[P]. 2021-10-22.
- Shendong Technology(Beijing) Co., Ltd. Candidate target detection method based on local maxima: CN201910237024.1[P]. 2021-10-22.
- [13] 宋焕庭, 唐玮, 张丽梅, 等. 指纹与年龄相关性的量化分析[J]. 人类学学报, 2022, 41(6): 1047-1057.
- Song Huanting, Tang Wei, Zhang Limei, et al. Quantitative analysis of the correlation between fingerprints and age[J]. Journal of Anthropology, 2022, 41(6): 1047-1057.
- [14] 田润之, 赵雅彬. 基于指纹形态特征的人群年龄刻画研究[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2023, 29(1): 11-20.
- Tian Runzhi, Zhao Yabin. Research on portraying the age of people based on fingerprint morphological characteristics[J]. Journal of Chinese People's Public Security University (Natural Science Edition), 2023, 29(1): 11-20.