

基于嵌入式的指纹预处理算法研究^①

A Fingerprint Pretreatment Algorithm Based on Embedded System

杨 慧 严盈富 张德平 文 辉 (南昌航空大学 计算机学院 江西 南昌 330063)

摘 要: 针对嵌入式系统需要满足实时性的要求, 提出了一种改进的指纹图像预处理算法。首先采用梯度法计算指纹的方向图, 并根据指纹纹线局部区域变化的特点, 提出了一种新的指纹方向校正法。该方法基于方向一致性分析, 结合 Poincare index 方法来区分出奇异区和噪声区域, 并利用邻域的方向信息对噪声区域进行平滑处理; 然后由指纹纹线方向选择相应的方向滤波模板对指纹图像进行滤波; 最后通过二值化、细化得到比较清晰的指纹点线图。实验表明, 文中算法能够有效地保持和恢复指纹图像的纹线结构, 且算法简单, 能满足嵌入式系统的要求。

关键词: 嵌入式系统 指纹预处理 方向图 方向校正法 滤波增强

1 引言

指纹识别技术由于其安全性、高效性及可靠性, 使得它在很多领域都有着很广泛的应用。特别随着指纹采集设备的性价比提高, 指纹识别技术已经逐渐走向民用市场, 应用到很多嵌入式系统中。目前很多指纹识别算法在计算机上已经达到很高的水平, 可是, 当这些算法移植到嵌入式系统时, 由于受处理器硬件性能的影响, 可能达不到理想的效果。因此, 提出一种适合于嵌入式系统的指纹识别算法很有必要。

指纹识别算法包括: 指纹预处理、指纹特征提取和指纹匹配三个部分。其中指纹预处理对于提高细节特征的准确率以及整个指纹识别系统的性能有着十分重要的意义。迄今为止, 已有不少文献对指纹预处理增强算法进行了研究^[1-3]。如文献[1,2]利用 Gabor 滤波器滤波, 该算法能够实现对图像在空间域和频域的调整, 而且又能较好地保存图像的细节特征, 但因其算法复杂, 运算量大, 速度慢, 并且对硬件条件要求高, 因此不宜用于嵌入式系统中。O'Gorman 等人^[3]提出设计一组方向滤波器, 通过根据图像脊、谷的周期性、灰度变化规律来消除原指纹图像中的噪声。该方法的速度比较快, 但只有当指纹方向信息比较准确时, 效果才十分明显。因此, 提取准确的指纹方向图是关键。目前计算指纹方

向图常用的方法有离散方向采样法^[4,5]和梯度法^[6,7]。离散方向采样法能方便地确定像素点的坐标, 但抗噪声能力较差, 离散方向不能取太多, 精度和方向准确性不高; 而梯度法是以一块图像为研究对象进行处理, 梯度的连续性保证了方向的连续性, 方向准确性较高, 但速度相对来说较慢。本文采用梯度法来计算方向图。目前常用的计算方法是先根据梯度法计算出方向图, 然后用低通滤波器对方向图进行平滑处理, 该方法具有较好的抗干扰能力, 但存在两个不足之处: 一是后处理环节的运算复杂度大, 速度比较慢; 二是平滑时只考虑到指纹纹线在局部区域内的连续性, 而忽略了纹线方向在奇异区会发生剧烈变化的特点。

本文针对嵌入式系统这一特定环境, 提出了一种改进的指纹预处理算法: 先就指纹方向图计算中存在的不足之处进行改进, 取得较为精确的指纹方向图; 然后采用 O'Gorman 等人的方法来进行滤波增强; 最后进行二值化、细化处理。

2 指纹图像规格化

图像规格化就是将原始指纹图像的灰度值的均值和方差调整到一个固定的级别上, 以减少沿脊和谷方向上的灰度级的变化。在原始灰度图像上, 采用公式(1)进行规格化处理:

^① 收稿时间:2008-10-13

$$G(i, j) = \begin{cases} M_0 + \sqrt{\frac{VAR_0(I(i, j) - M)^2}{VAR}}, I(i, j) > M \\ M_0 + \sqrt{\frac{VAR_0(M - I(i, j))^2}{VAR}}, I(i, j) \leq M \end{cases} \quad (1)$$

其中, M 和 VAR 分别为指纹图像的均值和方差, $G(i, j)$ 为规格化后的像素点 (i, j) 的灰度级。而 M_0 和 VAR_0 分别为常数, 其值由实验环境确定, 文中均取值为 100。

3 方向图的计算

方向图反映了指纹图像上纹线的方向, 其准确性直接影响图像增强的效果。方向图的计算分为两种: 一种是点方向图, 表示着原始指纹图像中每一像素点脊线的方向; 另一种是块方向图, 表示指纹在某一块区域的脊线的走向。点方向图具有连续性和渐变性的, 但对噪声的鲁棒性较差, 不能完全反映指纹脊线的真实走向。而块方向图比点方向图具有更强的抗噪性, 且块方向图的计算量较少。因此本文采用的是 Rao 等人^[6]利用梯度算子求取块方向图的方法, 算法如下:

第 1 步: 把归一化后的指纹图像分成大小的块。

第 2 步: 计算指纹图像各像素点上的梯度分量。

本文采用 3×3 大小的 Sobel 模板计算像素 (i, j) 处的梯度幅值。并用下式来获得窗口中心像素的方向。

$$V_x = \frac{i + w/2}{\sum_{u=i-w/2}^{i+w/2}} \frac{j + w/2}{\sum_{v=j-w/2}^{j+w/2}} 2\partial_x(u, v)\partial_y(u, v) \quad (2)$$

$$V_y = \frac{i + w/2}{\sum_{u=i-w/2}^{i+w/2}} \frac{j + w/2}{\sum_{v=j-w/2}^{j+w/2}} (\partial_x(u, v)^2 - \partial_y(u, v)^2) \quad (3)$$

$$\theta(i, j) = \frac{1}{2} \arctan \frac{V_x(i, j)}{V_y(i, j)} \quad (4)$$

所求的方向角, 这未能完全表示出指纹的所有纹线方向。因此需要按下面的公式(5)将 $\theta(i, j)$ 的范围映射到 $[-\pi/2, \pi/2]$ 。

$$\theta(i, j) = \begin{cases} \theta(i, j) + \pi/2 & V_y < 0 \\ \theta(i, j) + \pi & V_x < 0 \text{ 且 } V_y > 0 \\ \theta(i, j) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

由于噪声、叉连、模糊以及断裂等原因, 梯度信息所获得的方向图可能存在误差, 需要对指纹方向场进行平滑。常规方法是使用 Jain 等人^[7]提出的用低通滤波器对方向图进行全局平滑滤波。该方法考虑到指

纹具有脊线方向变化平缓的特性, 并且在一个小范围内具有相对稳定的变化趋势, 进行平滑处理后可以得到相对平滑的方向场。但这种方法有两个不足之处:

一是涉及大量的三角函数和反三角函数的运算, 对于微处理器来说, 非常影响执行效率; 二是该方法忽略了指纹在奇异区脊线方向变化较大的特性。针对指纹图像的纹线方向在奇异区变化较大, 而在非奇异区变化比较平缓的特点, 本文采用一种快速有效地方向场校正法: 通过对纹线方向的一致性判定, 找出突变的方向块进行平滑处理。而突变的方向块包括两种情况: 一种是由于奇异点的存在; 另一种是由于噪声引起的。对于奇异点区域, 方向发生突变是属于指纹固有特性; 而由噪声引起的方向突变, 则需要对其进行平滑处理。

具体算法如下:

①对图像方向图进行方向一致性判断。计算公式如下:

$$C(i, j) = \sqrt{\frac{\sum_{(i', j') \in D} |\theta(i', j') - \theta(i, j)|^2}{n}} \quad (6)$$

$$|\theta' - \theta| = \begin{cases} d & \text{if } d < 180 \\ d - 180 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$d = (\theta' - \theta + 360) \bmod 360 \quad (8)$$

其中, D 为以块 (i, j) 为中心的局部区域; n 为区域 D 内图像块的数目; $\theta(i', j')$ 、 $\theta(i, j)$ 分别为 (i', j') 块、 (i, j) 块的方向。如果 $C(i, j)$ 大于一个预先设定的阈值 T , 则认为所求得的方向信息不可靠。

②对该块区域进行判断。可采用 Poincare Index 方法^[8]来判断是否存在奇异点。如果存在奇异点, 则保持不变进入步骤④; 如果不存在奇异点, 则说明该块区域为噪声, 转步骤③进行平滑处理。

③分别计算以该块为中心的上下、左右和对角块之间的方向角度差, 取最小角度变化的两块方向平均值作为该块的方向。

④对下一个子块区域按步骤①处理, 直到所有的子块区域处理完毕。

这样的平滑处理, 避免了对奇异区的方向信息进行平滑, 造成错误的校正, 减少了对大部分正确方向的冗余平滑计算。同时, 根据指纹图像的纹线方向在局部区域具有连续性的特性, 利用相邻块的相关性来对由噪声产生的方向误差进行校正, 使得整个指纹图

像的方向更为连续,并且提高了指纹方向图的精确度。

4 图像滤波增强

由于指纹图像质量及指纹压力不同等原因,采集到的指纹图像会存在一些破坏纹线的噪声,主要是断裂和叉连。在后续的指纹特征提取时,断裂会被当作是两个端点,而叉连可能被当作两个分叉点,因此这两种噪声必须清除。

根据指纹纹线具有较强方向性的特点,本文采用方向滤波器来进行图像滤波增强。方向滤波就是在局部小区域内沿着该区域的纹线方向对指纹图像滤波,使得指纹图像在沿纹线的方向上得到平滑,而在垂直于纹线方向上得到分离。因此,这个方向滤波器实际上是由平均滤波器和分离滤波器组合而成。这是因为平均滤波器可以很好地连接脊线中出现的断点,而分离滤波器可以分离叉连的纹线,这样可以同时达到消除断裂和叉连的效果。由此可知滤波模板的系数关系应同时满足平均滤波器和分离滤波器的系数关系: $u > x > y \geq 0, z > 0$ 且 $u + 2x + 2y - 2z = 0$ 。另外,为了避免破坏大曲率的纹线构型,每一行的系数由中间向两端很快地衰减。

选取水平方向滤波器作为基本算子,大小为 $n \times n$,其中 n 由指纹图像中脊线和谷线的宽度决定。经实验验证,当取 $n=7$ 时滤波效果最好。其滤波模板如图 1 所示。

$$\begin{bmatrix} -z/3 & -2z/3 & -z & -z & -z & -2z/3 & -z/3 \\ y/3 & 2y/3 & y & y & y & 2y/3 & y/3 \\ x/3 & 2x/3 & x & x & x & 2x/3 & x/3 \\ u/3 & 2u/3 & u & u & u & 2u/3 & u/3 \\ x/3 & 2x/3 & x & x & x & 2x/3 & x/3 \\ y/3 & 2y/3 & y & y & y & 2y/3 & y/3 \\ -z/3 & -2z/3 & -z & -z & -z & -2z/3 & z/3 \end{bmatrix}$$

图 1 水平方向滤波器模板

得到水平方向滤波器后,其它的方向的滤波器可由水平方向滤波器模板按公式(9)旋转相应的角度得到。

$$\begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i' \\ j' \end{bmatrix} \quad (9)$$

由此可得到除水平方向外的其余 7 个方向上的滤

波模板系数。在新方向的滤波器上,其系数需要用其周围点的系数进行内插得到。滤波时,在指纹图上根据每一像素点的方向,选用相应的滤波器模板进行卷积滤波运算。经过上述滤波处理后,一些断裂和叉连现象被消除,就可以得到脊谷清晰、对比度和亮度统一的指纹图像,为后续处理提供了有利的保证。

5 二值化和细化

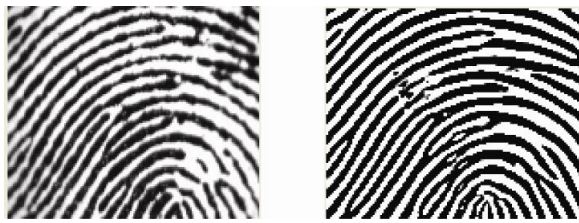
二值化作为指纹预处理过程的一部分,是进行指纹图像细化处理的基础。二值化就是通过设定阈值,将指纹图像变成只有 0、1 两个灰度级的图像。阈值的设定有很多方法,主要分为全局阈值法和局部阈值法。全局阈值法是对整个图像采用一个阈值进行划分,例如固定阈值二值化、基于灰度直方图的阈值法等,算法比较简单,但是没有考虑到图像的不均匀性,因此对有缺省的指纹图像处理效果不太好,具有一定的局限性。而局部阈值法是将图像分成一些子块,对于每一块选定一个阈值,如动态阈值法,这种方法充分考虑了图像的不均匀性,处理效果较好。根据图像在某一区域的像素灰度值具有高度相关性,本文采用动态阈值法进行图像的二值化,即对指纹图像进行分块处理,每一块的灰度均值作为对该块进行二值化的阈值。这样二值化后的图像基本保持了原指纹图像的纹线走向。

在二值化的基础上,对指纹图像进行细化处理。细化的目的是得到单像素的纹线,同时去掉大量的冗余信息,且能保留指纹的拓扑连接关系,以利于后续的指纹特征提取。细化算法应保证纹线的连接性、方向性和特征点的不变性,且算法应简单有效。常用的细化算法有快速细化算法和改进的 OPTA 细化算法[9,10]。快速细化算法的运行速度很快,但是对纹线细化不彻底;改进的 OPTA 算法能很好地满足细化算法的要求,但是需要经过较多的迭代次数才可使细化结果稳定到单像素宽度,大大增加了处理时间。本文采用文献[10]中提到的将快速细化法和 OPTA 法有机结合的一种新的细化算法,在运算速度和细化结果上取得了很好地效果。

6 实验结果和结论

采用上文所述的方法对指纹图像进行预处理,实验结果如图 2 所示。其中 a 为原始的指纹图像, b 是滤波增强后的结果, c 是细化处理后。从实验结果可以看到采用文中所述的方法使得图像得到很好的滤波

增强,同时,细化后的指纹图像保证了纹线的连续性。



a 原图

b 滤波增强后



c 细化处理后

图2 实验结果图

指纹图像预处理是指纹识别技术的关键,对提高整个系统处理效率有很大影响。本文针对嵌入式系统提出了一种改进的指纹图像预处理算法。首先充分考虑指纹纹线变化的特征,提出了一种新的指纹方向校正法,保证了奇异区方向信息不被冗余平滑,同时校正了由噪声引起的方向误差,提高了方向图提取的准确性。方向图的准确提取,保证了方向滤波增强取得很好的效果,有效地去除噪声干扰,保持了纹线的清晰连贯。本文算法能有效地恢复和提取指纹纹线,较好地实现指纹图像预处理的目的,同时降低了算法的复杂度,适合用于嵌入式系统中。

参考文献

- 1 Hong L, Wang Y, Jain A. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation. *IEEE PAMI*, 1998,20(8):777-789.
- 2 尹义龙,詹小四,谭台哲,等.基于加博函数的指纹增强算法及应用. *软件学报*, 2003,4(3):486-489.
- 3 O'Gorman L, Nickerson JV. An approach to fingerprint filter design. *Pattern Recognition*, 1989,22(1):29-38.
- 4 韩伟红,黄子中,王志英.指纹自动识别系统中的顶处理技术. *计算机研究与发展*, 1997,34(12):913-920.
- 5 琛立潮,王宇,刘佳,张伟,张力.基于方向图的指纹图像预处理算法. *计算机研究与发展*, 2007,17(9):85-91.
- 6 Rao C, Black K. Type classification of fingerprints: a syntactic approach. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1980,2(3):223-231.
- 7 Jain A, Hong L, Bolle R. On-line fingerprint verification. *IEEE Tran. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997,19(4):302-313.
- 8 Kawagoe, Masahiro, Tojo, Akio. Fingerprint pattern classification. *Pattern Recognition*, 1984,17(3):295-303.
- 9 梁广民,蔡学军. OPTA 算法的改进及其在指纹图像细化中的应用. *计算机工程与设计*, 2006,27(23):4607-4609.
- 10 肖晓丽,王柯玲,李振.一种改进的指图像细化算法. *计算机应用*, 2008,(28):465-467.