

指纹纹理判别中异向差度计算窗口大小对系统性能的影响

裴育

杭州八爪鱼微电子有限公司, 中国·浙江 杭州 310015

摘要: 采用方向性子窗口模板计算异向差度, 以区分有效纹理区域, 这种方法是指纹识别系统或其他纹理模式识别系统的一种有效方法。异向差度计算窗口大小的选择直接影响了系统性能的发挥。论文主要研究异向差度计算过程中, 选择不同的窗口规格对运算性能和计算效率的影响。通过选择不同规格的计算子窗口, 论文提出了一种量化的评估方法, 从准确度和运算量两个维度进行评估, 探究窗口规格对性能和效率影响的规律, 进而确定合适的窗口规格。期望该评估方法及结论能为相关从业者提供借鉴和参考。

关键词: 数字图像处理; 指纹识别; 生物识别; 指纹传感器; 指纹处理器

The Impact of Window Size on System Performance in Fingerprint Texture Discrimination Based on Heterodyne Difference Calculation

Yu Pei

Hangzhou Octopus Microelectronics Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310015, China

Abstract: Using directional sub window templates to calculate the heterodyne degree to distinguish effective texture regions is an effective method for fingerprint recognition systems or other texture pattern recognition systems. The selection of window size for calculating heterodyne directly affects the performance of the system. The main focus of this paper is to investigate the impact of selecting different window specifications on computational performance and efficiency in the process of heterodyne calculation. By selecting different specifications of computational sub windows, the paper proposes a quantitative evaluation method, which evaluates from the dimensions of accuracy and computational complexity, explores the impact of window specifications on performance and efficiency, and determines the appropriate window specifications. I hope that this evaluation method and conclusion can provide reference and guidance for relevant practitioners.

Keywords: digital image processing; fingerprint recognition; biometric identification; fingerprint sensor; fingerprint processor

1 异向差度计算的原理和方法

1.1 异向差度计算原理

在数字图像处理领域, 经常需要针对具有一定周期模式的纹理类图像进行处理。指纹图像就是此类纹理类图像的典型代表。正常成人的指纹图像, 其指纹纹理以脊线和谷线交叠周期性呈现。在标准的 508 DPI 分辨率的采集器基础上采集到的成人指纹图像, 其脊线和谷线交叠呈现的周期一般在 7~15 个像素。此外, 指纹图像在局部上纹理的方向大致趋于一致, 具有明显的方向性。因此, 从局部区间的不同方向来考察图像像素的分布规律会呈现很大的区别。相对于背景和自噪类型的图像, 指纹纹理图像在局部空间各个方向上的差异性会非常明显。异向差度 C_{ij} 是区分指纹纹理图像和背景自噪图像的有效指标。其本质是体现这种方向差异性的精简计算方法。因为在图像运算中, 基于图像像素点的运算一般要占用大量的运算资源。在计算系统中, 尤其是嵌入式计算系统应用场景下。一方面, 主频、内存等计算资源有限; 另一方面, 应用场景对实时性要求又很高。在这样的情况下,

异向差度采用方向模板对目标图像窗口进行提取计算, 并比较各个方向上计算值的差异性, 以区分不同方向的差异度, 从而以一种相对快速而有效的方式对纹理图像和背景自噪图像加以区分, 具有很强的实用价值和现实意义。

1.2 异向差度计算方法

异向差度的计算是针对局部图像进行的。一般需要将一幅完整的指纹图像切分成若干个正方形子图像, 论文将正方形子图像称为窗口。理论上, 窗口的大小设定是任意的, 但是根据实际计算目标的差异, 不同窗口规格会带来计算准确性和效率的差异。此外, 具体选取的考察方向, 是通过异向差度方向模板 C_{ij} 来描述的。理论上, 选取的相对方向角度和数量是可以任意设置的。但是, 为了计算方便和获得更好的执行效率, 一般采用的方向角度和数量要根据具体的应用进行设置。论文选取 45° 、 135° 、 225° 、 315° 四个方向来设置方向模板。具体的计算方法是:

首先, 对窗口矩阵和 45° 方向模板矩阵进行像素级乘加运算, 并加权平均。并依照同样的方法依次对其他三

个方向做运算。得到 4 个方向上的加权平均值 Per_035、Per_135、Per_225、Per_315。

其次,对 Per_035、Per_135、Per_225、Per_315 进行排序,并得到其中的最大值 MAX (Per_035、Per_135、Per_225、Per_315) 和最小值 MIN (Per_035、Per_135、Per_225、Per_315)。

最后,求得最大值 MAX (Per_035、Per_135、Per_225、Per_315) 和最小值 MIN (Per_03、Per_135、Per_225、Per_315) 之差,也即异向差度 C_{ij} 。

具体计算方法如下:

$$Per_{035} = \frac{2}{(T+1)} \sum_{m=0}^{T-1} \sum_{n=0}^{T-1} MaskA[m][n] * Dij[m][n]$$

$$Per_{135} = \frac{2}{(T+1)} \sum_{m=0}^{T-1} \sum_{n=0}^{T-1} MaskB[m][n] * Dij[m][n]$$

$$Per_{225} = \frac{2}{(T+1)} \sum_{m=0}^{T-1} \sum_{n=0}^{T-1} MaskC[m][n] * Dij[m][n]$$

$$Per_{315} = \frac{2}{(T+1)} \sum_{m=0}^{T-1} \sum_{n=0}^{T-1} MaskD[m][n] * Dij[m][n]$$

$$C_{ij} = MAX (Per_{035}, Per_{135}, Per_{225}, Per_{315}) - MIN (Per_{035}, Per_{135}, Per_{225}, Per_{315})$$

其中,一般设置方向模板大小跟异向差度计算窗口的大小一致,取 $m=n=T$, T 为异向差度窗口大小。

2 异向差度计算结果准确性的评估方法

由前面论述可知,窗口规格 T 的选择跟目标纹理图像的特点有关。指纹图像的特点是,在局部尺度上,纹理具有明显的方向一致性。也就是说,在一个小范围的局部图像中,指纹纹理的趋向是大致一致的,呈现非常明显的方向一致性。但是如果在一个较大的范围来考察纹理的趋向,情况会变的复杂。因为在全局或较大窗口尺度,指纹纹理虽然仍然保持着分明的脊线和谷线的周期性变化,但是整体指纹纹理的方向却不再像局部图像那样,能够保持大致相同的方向性。此外,局部尺度也不能太小。这是因为一旦窗口的尺度太小,以至于小于脊线和谷线变化的周期,那么窗口内的所有像素值仅仅描述了一个很小范围的局部信息,甚至没有呈现一个完整的脊线谷线周期,也就不能很好地表达出纹理的周期性信息和方向性信息。因此,窗口规格 T 的选择,既不能太大也不能太小。 T 选择的过大,则会引入全局纹理的干扰,从而影响计算结果的准确度;而 T 选择的过小,则不能覆盖纹理的局部差异,造成评估结果失效。因此, T 指标的选择,决定了评估结果的准确性。

以指纹识别的指纹纹理图像为研究目标,为了衡量异向差度计算结果的准确性,论文设计了一种量化的评估方法,具体思路如下:

- 选择 1000 幅标准 508 DPI 分辨率的指纹图像形成样本库,以三位数字为编码,对每幅图像样本进行编码,第一

幅指纹图像编码为 000,第二幅指纹图像编码为 001,以此类推,直至编号为 999。

- 在每幅图像的背景区和纹理区分别预设 8 个固定的背景采样区和 8 个纹理采样区,采样区编号为 0~15。然后以计算机辅助的方法,为编号为 000~999 的每幅图像其每一个采样区标定其类型,也即确定每个采样区是属于纹理图像或是背景图像。

- 按照异向差度计算方法,以 $T=[7, 9, 11, 13, 15, 17, 19]$ 为窗口规格,对每幅图像的每个采样区分别计算异向差度值,并记录计算结果。

- 将 $T=[7, 9, 11, 13, 15, 17, 19]$ 不同窗口规格的异向差度值分别跟预先标定的采样区类型进行对照,统计正确的结果相对于计算总数的百分比,作为不同 T 值下的辨识准确率,从而确定最佳 T 值。

具体方法及注意事项如下:

背景区和纹理区为固定区域。为了反映更好的普遍性,论文采用的方法是背景区设定 8 个采样区,纹理区设定 8 个采样区,采取均匀分布的方式。8 个背景区的中心点坐标为 (32, 120)、(224, 120)、(32, 180)、(224, 180)、(32, 240)、(224, 240)、(32, 300)、(224, 300); 8 个纹理区的中心点坐标为 (96, 120)、(160, 120)、(96, 180)、(160, 180)、(96, 240)、(160, 240)、(96, 300)、(160, 300),具体的分布示例如图 1 所示。



图 1 背景采样区和纹理采样区的设定

采样区设定之后,分别取 $T=[7, 9, 11, 13, 15, 17, 19]$,对 1000×16 个采样区分别计算异向差度 $DIS[a,m,n]$ 。

考虑 T 值从 7 开始作为研究对象的原因在于,标准的指纹图库均是采用 508 DPI 分辨率的采集器采集得到的。在该分辨率下,成人指纹的脊线谷线周期是 7~15 个像素,如果选择 T 值为 7 的窗口,刚刚覆盖到上述周期下限。

考虑 T 值以 19 结束的原因在于,在 508 DPI 分辨率条

件下，T=19 不仅可以覆盖成人指纹的脊线谷线周期上限，而且可以考查在大尺度窗口条件下，全局纹理的弯曲变化趋势对异向差度指标的影响。

以 T=7 为例，具体的计算过程如下：

首先在 T=7 尺度下分别计算 45°、135°、225°、315° 四个方向上的每个像素的加权均值。

$$Per_{035} = \frac{1}{4} \sum_{m=0}^6 \sum_{n=0}^6 MaskA[m][n] * Dc[m][n]$$

$$Per_{135} = \frac{1}{4} \sum_{m=0}^6 \sum_{n=0}^6 MaskB[m][n] * Dc[m][n]$$

$$Per_{225} = \frac{1}{4} \sum_{m=0}^6 \sum_{n=0}^6 MaskC[m][n] * Dc[m][n]$$

$$Per_{315} = \frac{1}{4} \sum_{m=0}^6 \sum_{n=0}^6 MaskD[m][n] * Dc[m][n]$$

将上述 4 个方向的加权均值排序，并取得最大值 MAX (Per) 及最小值 MIN (Per)。

计算出该窗口的异向差度：

$$DIS[a,m,n]=MAX(Per) - MIN(Per)$$

将图像库中所有图像的所有采样区，依此计算得到相对应的异向差度，统计所有正确结果的百分比，最终计算得到准确率 Ta。

$$Ta = \left\{ \frac{1}{1000 \cdot 16} \sum_{m=0}^{999} \sum_{n=0}^{15} (DIS[a,m,n] > DisHold) \right\} * 100\%$$

其中，角标 a 代表窗口规格类型，其取值范围是 [7, 9, 11, 13, 15, 17, 19]；m 代表图像库样本编号，其取值范围是 0~999；n 代表采样区编号，其取值范围是 0~15。DisHold 为预设的控制阈值，用于区分背景区和纹理区。论文所述方法在实现过程中，通过对指纹库所有图像的每个像素值进行统计，取得其最大值和最小值，设定 DisHold 值为上述最大值和最小值的中间值。也就是取考察对象所有图像的灰度值分布均值作为控制阈值。

针对选取不同窗口规格（即 T=[7, 9, 11, 13, 15, 17, 19]），经过详细计算并统计，可以得到如下采用不同窗口规格的条件下的异向差度结果准确率 Ta 值（见表 1）。

表 1 不同窗口规格 [7~19] 的判断准确度分布

	a=7	a=9	a=11	a=13	a=15	a=17	a=19
Ta	87.70%	95.30%	99.10%	98.30%	94.50%	88.20%	84.40%

测试数据显示，当在计算异向差度取窗口规格为 11 时，异向差度区分背景区和纹理区的准确度最高；随着窗口规格逐渐增大，准确度逐渐降低，随着窗口规格逐渐减小，准确度也呈下降趋势。子窗口规格过小或过大都会降低判断的准确度，尤其是当窗口规格小于 9 或大于 15 时，判断的准确度明显下降。数据也揭示了，异向差度窗口的规格对准确度的

影响本质上跟指纹图像脊线谷线的周期变化以及方向趋同性具有关联。选择过大的窗口规格并不能提升计算的准确度，反而会由于全局信息的干扰进一步降低异向差度的准确率。

3 异向差度计算结果时效性的评估方法

异向差度的计算量取决于窗口规格的大小。虽然异向差度计算方法已经将计算的维度从二维矩阵简化到仅仅四个方向的单一维度，但是窗口的大小仍然影响着异向差度计算的计算量。较大的窗口规格，所需要的计算量就越大，时效性越差。而在实际应用中，完成整个功能实现，往往需要大量的异向差度计算。这时，如果选择了不合适的窗口规格，那么计算所有异向差度值所需的时间就很长，这对于实际应用是不现实的。因此，异向差度窗口规格 T 指标的选择就显得尤为重要。

论文以子窗口规格范围为 [7, 9, 11, 13, 15, 17, 19] 为例，对窗口规格影响计算效率的规律进行分析。论文后续实验及结论是设定在标准 32 位 ARM-COTEX 内核处理器平台条件下，以计算异向差度所需周期数为依据，评估异向差度运算在不同子窗口规格条件下的时效性，具体思路如下：

- 对异向差度运算程序进行汇编优化分解，目的是准确计算程序体运行的指令周期。同时在程序设计时，使用汇编语言安排分支跳转指令的使用，尽力减少循环体周期开销，从而使结果更接近真实的运算开销，从而获得更准确的评估结果。

- 统计每条指令所需的周期开销。在实际操作过程中，程序将图像数据和窗口模板安排在固定的内存区，保证加载内存数据的加载周期一致。

- 进行实际程序执行，对统计的周期数开销进行时间评估，从而确定执行周期数。

下面给出按照上述方法统计得到的周期数（见表 2）。

表 2 不同窗口规格 [7~19] 的计算周期数统计

	a=7	a=9	a=11	a=13	a=15	a=17	a=19
Cycles	39	47	55	63	71	79	87

从数据可知，随着窗口规格的增大，计算周期数基本上呈线性增加趋势。该结果完全符合异向差度计算方法的预期。二维矩阵的点阵运算开销是跟窗口大小平方成正比，随着窗口大小的增加，计算量会迅速增加。采用异向差度的计算方法，本质上将二维矩阵的点阵运算简化为 4 个方向的单维度计算，计算量随着窗口大小的增加是线性增加的。即便如此，在需要大量使用异向差度计算的应用中，尽量采用较小的窗口规格仍然是提高运算效率的重要举措。

4 综合分析及总结

一方面，异向差度计算的准确性，对于采用该方法区分纹理区和背景区的应用至关重要，是系统性能的重要影响因素；另一方面，异向差度计算的周期开销则对系统的时效

性有重要的影响。在实际的系统设计中,只有综合平衡两者的关系,才能使指纹识别系统更好地发挥性能并取得更好的使用体验。

因此,我们需要从计算的准确性和时效性两者结合的角度,综合考虑窗口规格的选择,以平衡两者的关系。从实验数据来看,对于 508 DPI 的指纹图像,选取子窗口大小为 9、11、13、15 时,准确度满足常规指纹识别系统的性能要求。尤其是取窗口规格为 11 时,可以获得更好的指标。从时效性角度来看,取子窗口大小为 7、9 时,系统的时效性较好。对于准确度和时效性的平衡,设计者还应该考虑到系统设计所选用的处理器运算能力、系统功能的侧重点以及系统的使用场景等综合因素。如果系统采用了主频较快,性能较好的处理器平台,那么在程序设计时可以考虑采用规格为 11 的子窗口进行异向差度的计算,这样可以取得较好的准确度。同时,利用处理器平台的优势来保证高速的计算能力,从而保证系统的时效性。

总之,在实际系统的设计中,需要综合考虑硬件资源、软件环境、性能追求的重点方向等多方面因素。而论文探究的结论为系统设计过程中综合权衡准确度和时效性提供了评估方法和参考依据。

5 结语

论文首先介绍了异向差度的计算原理和方法,其次重

点讨论了采样窗口规格对异向差度计算的影响。从准确度和时效性两个方面,对异向差度计算过程中的子窗口选择方法进行了详细分析。同时,通过指纹识别的应用案例,按照论述的方法进行了相关的实验并给出了测试数据和分析结论。最后,从实际系统设计的角度出发,介绍了平衡准确度和时效性的方法。论文将不同窗口规格下的实际测试数据加以对比,比较直观地揭示了不同窗口规格条件下,异向差度计算准确度和时间开销的差异及变化规律。论文介绍的方法、实验过程及结论对于异向差度计算的实际应用具有现实的参考意义。希望论文论述的方法和结论可以为相关工程技术人员在实际的系统设计工作中提供参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 卢朝阳,张岗山,刘琳.“指纹识别系统性能评价方法”[J].西安电子科技大学学报,2002.
- [2] 李文静,白雪冰,张伟.“指纹识别预处理算法的研究”[J].森林工程,2009,25(2):41-44.
- [3] 祝思.自动指纹识别技术[D].长沙:国防科技大学出版社,2006.

作者简介:裴育(1979-),男,满族,中国吉林磐石人,硕士,高级工程师(副高),从事芯片系统设计,图像、视频分析及模式识别,嵌入式系统芯片级驱动设计,系统级安全加密设计和半导体传感器芯片及驱动设计研究。