

指纹图象小波压缩中子图信息的研究¹

王全义 王文渊

(清华大学自动化系 北京 100084)

摘 要 图象小波分解后, 各子图信息对图象恢复的质量有很大的影响。本文结合指纹图象的特点, 明确了各个子图在图象恢复中的重要性, 并提出了一种适用于纹理图象的压缩方法, 在保证较好的图象恢复质量和较大压缩比的情况下, 简化了算法, 加快了处理速度。

关键词 指纹图象, 小波变换, 图象压缩

中图分类号 TN911.73

1 引 言

指纹图象压缩是图象处理领域的一个重要分支。一般认为, 在当前运用高科技进行身份验证的各种方法中, 指纹自动识别是最可靠的一种, 因此对指纹图象的压缩和处理已成为国内外研究的热门课题。由于指纹验证潜在的应用领域极广, 许多部门正在或即将引进指纹处理技术。在建立指纹库时, 由于指纹图象的数据量很大, 所以其压缩方法就成为一项关键的技术。

在图象压缩方案中, 变换编码是研究得较多的一种方法。近年来出现的小波变换理论, 促进了变换编码的发展。在小波变换中著名的 Mallat 塔式分解算法^[1,2]具有适应性强、信息集中等特点而被广泛地采用。本文就是在该算法的基础上, 结合具体的应用场合而提出的新方法。

第 2 节对指纹图象进行频域分析, 总结其特点; 第 3 节简单介绍了 Mallat 塔式分解算法; 第 4 节提出了一种对各个子图进行不同处理的方法; 第 5 节通过对指纹图象和普通图象恢复结果所作的对比, 验证了算法的正确性; 第 6 节对这一方法进行总结。

2 指纹图象的频域特性

图 1 是一幅指纹图象。它是 128×128 点、256 灰度级的点位图。我们把各点的灰度值看作离散信号, 用快速 Fourier 变换方法对其进行频域分析, 得到了其在水平方向和竖直方向的频谱图, 如图 2 和图 3 所示, 其中横坐标为频率, 纵坐标为信号的幅度谱。

由图 2 和图 3 可见, 指纹图象的信息主要集中在中频段, 高、低频段信息量较少。

¹ 1997-05-04 收到, 1998-01-20 定稿



图 1 指纹图象

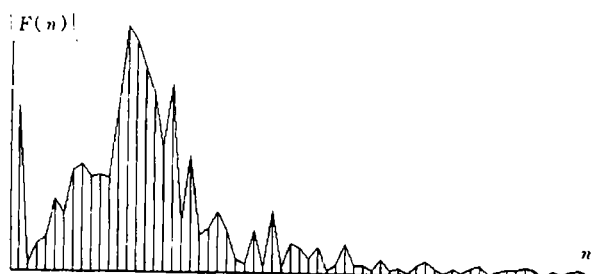


图 2 水平方向频谱图

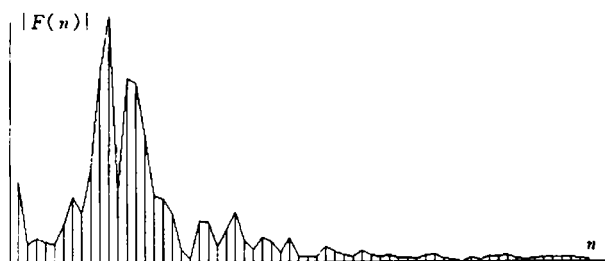


图 3 竖直方向频谱图

为了对比,我们再来分析一幅普通图象(如人物、风景等)的情况。图 4 是人物照片,它的水平和竖直方向的频谱如图 5 和图 6 所示。可见,这种图象的信息主要集中在低频段上。



图 4 人物图象

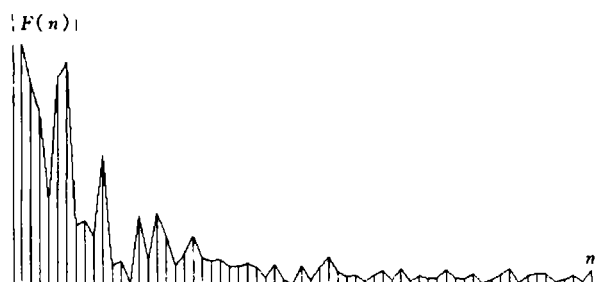


图 5 水平方向频谱

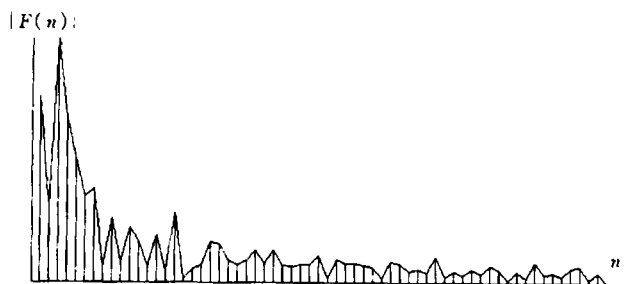


图 6 竖直方向频谱

3 Mallat 塔式算法简介

在二维情况下, 对图象 $f(x, y)$ 进行小波表示, 令 $\Phi(x, y)$ 为尺度函数, 则有

$$\Phi(x, y) = \varphi(x)\varphi(y),$$

其中 φ 为一维多分辨率分析 $\{V_j\}$, $j \in \mathbb{Z}$ 的实值尺度函数. 令 ψ 为小波函数, 则可确定三个二维小波函数

$$\Psi^1 = \varphi(x)\psi(y),$$

$$\Psi^2 = \psi(x)\varphi(y),$$

$$\Psi^3 = \psi(x)\psi(y).$$

设 $f(x, y) \in V_{J_1}^2$, 则有阵列 $\{C_{J_1}; k_1, k_2\} (k_1, k_2) \in \mathbb{Z}^2$ 使

$$f(x, y) = A_{J_1} f(x, y) = \sum_{k_1, k_2 \in \mathbb{Z}} C_{J_1; k_1, k_2} \Phi_{J_1; k_1, k_2}(x, y).$$

因

$$\langle \varphi_{J_1, k}, \varphi_{J_1+1, m} \rangle = \bar{h}_{k-2m},$$

$$\langle \varphi_{J_1, k}, \psi_{J_1+1, m} \rangle = \bar{g}_{k-2m},$$

故

$$f(x, y) = A_{J_1} f(x, y) = A_{J_1+1} f + D_{J_1+1}^1 f + D_{J_1+1}^2 f = D_{J_1+1}^3 f,$$

其中

$$A_{J_1+1} f = \sum_{m_1, m_2 \in \mathbb{Z}} C_{J_1+1; m_1, m_2} \Phi_{J_1+1; m_1, m_2},$$

$$D_{J_1+1}^n f = \sum_{m_1, m_2 \in \mathbb{Z}} D_{J_1+1; m_1, m_2}^n \Psi_{J_1+1; m_1, m_2}^n, \quad (n = 1, 2, 3),$$

且

$$\begin{aligned}
 C_{J_1+1;m_1,m_2} &= \sum_{k_1,k_2 \in Z} h_{k_1-2m_1} h_{k_2-2m_2} C_{J_1;k_1,k_2}, \\
 D_{J_1+1;m_1,m_2}^1 &= \sum_{k_1,k_2 \in Z} h_{k_1-2m_1} g_{k_2-2m_2} C_{J_1;k_1,k_2}, \\
 D_{J_1+1;m_1,m_2}^2 &= \sum_{k_1,k_2 \in Z} g_{k_1-2m_1} h_{k_2-2m_2} C_{J_1;k_1,k_2}, \\
 D_{J_1+1;m_1,m_2}^3 &= \sum_{k_1,k_2 \in Z} g_{k_1-2m_1} g_{k_2-2m_2} C_{J_1;k_1,k_2}.
 \end{aligned}$$

这就是小波变换 Mallat 塔式算法的分解公式。其重构算法为

$$\begin{aligned}
 C_{J_1;k_1,k_2} &= \sum_{m_1,m_2 \in Z} \bar{h}_{k_1-2m_1} \bar{h}_{k_2-2m_2} C_{J_1+1;k_1,k_2} + \sum_{m_1,m_2 \in Z} \bar{h}_{k_1-2m_1} \bar{g}_{k_2-2m_2} D_{J_1+1;k_1,k_2}^1 \\
 &+ \sum_{m_1,m_2 \in Z} \bar{g}_{k_1-2m_1} \bar{h}_{k_2-2m_2} D_{J_1+1;k_1,k_2}^2 + \sum_{m_1,m_2 \in Z} \bar{g}_{k_1-2m_1} \bar{g}_{k_2-2m_2} D_{J_1+1;k_1,k_2}^3
 \end{aligned}$$

其中“-”表示滤波器系数的转置, 即 $\bar{h}_0 = h_N, \dots, \bar{h}_N = h_0$ 。

如果我们分别采用双正交低通滤波器和双正交高通滤波器^[3,4]作为上式中的 h 和 g , 并用 H 表示低通滤波器作用的结果, 用 G 表示高通滤波器作用的结果, 则 Mallat 算法的一级分解结果如图 7 所示, 其中 HG 表示水平方向为低通滤波结果, 竖直方向为高通滤波结果, 其余类似。从图中可见, 低频部分主要集中在左上角的子图, 而高频部分则主要集中在右下角的子图。将上一级分解图的低频子图再进行分解, 就得到如图 8 所示的塔式结构, 因此称之为塔式算法。本文对指纹图象进行三级分解, 相应于图 1 的指纹分解图为图 9。为以后叙述方便, 对各子图用 0-9 编号。

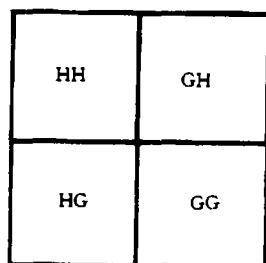


图 7 Mallat 算法一级分解

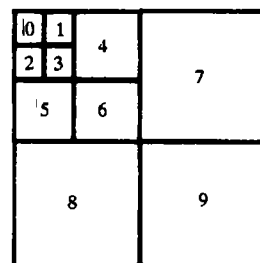


图 8 Mallat 塔式算法示意图

指纹图象有许多重要的细节特征点, 用 Fourier 变换或离散余弦变换等不能对其进行很好的描述。而小波变换具有良好的时、频域特性, 能“聚焦”到任意细微处, 并且能把信号在不同频段的成份都提取出来, 因此很适合于指纹图象的压缩。

4 分解图象各子图信息的分析

由第 2 节的频域分析可知, 指纹图象的信息量主要集中在中频段上, 相应于 Mallat 分解图的 1-6 号子图。而低频和高频段上的信息量较少, 分别相应于分解图的 0 号和 7、8、9 号子图。

在用计算机进行指纹图象识别时,除了要参照它的频域特性外,还应参照人眼对于指纹图象的视觉特性。为此,需要对它进行深入的研究。现在我们进一步考虑指纹图象的特点。它主要是由黑白相间的条纹构成,分别称为“谷”和“脊”。在研究指纹图象的过程中,我们研究了很多试验者观察不同质量指纹图象的情况,发现人们在观察和比较指纹图象时,通常对其中的条纹信息比较关心,而对局部亮度变化的信息则不大注意。实际上,前者对应于中频子图(1-6号子图)的信息,而后者对应于低频子图(0号子图)的信息。众所周知,在计算机识别指纹图象时,先进行图象预处理和特征提取,再通过对比特征来进行识别。参照上述原理,由于特征提取主要来源于指纹图象的条纹信息(中频, 1-6号子图),故可把局部亮度变化的信息(0号子图)予以忽略,仅记录其均值,以便使恢复图象与原图象具有视觉上相同的亮度。在具体处理时,也是用动态域值的二值化方法将低频信息去掉的。另外,高频部分(7、8、9号子图)基本上是由指纹图象条纹的“毛刺”等噪声形成的,故也可将其忽略。

根据以上的分析,我们提出了一种压缩方法,就是将低频子图(0号子图)和高频子图(7、8、9号子图)的数据忽略,仅记录其均值,只对中频子图进行处理。这样可以在保证图象恢复质量的前提下达到更高的压缩比。由于忽略(即仅取均值)的部分占全部数据量的 $49/64$,因此运算量减少,加快了处理速度。需要说明的是,这种方法适用于指纹图象等频率特征较强的纹理图象的压缩。对于普通图象(频率特征不明显的图象)则不宜采用。因此,它属于一种专门的图象压缩方法。

5 实验结果分析

下面通过实例对第4节提出的方法进行验证。图9是图1经过3级分解得到的图象,图10是由图9未加任何处理而恢复的图象,图11是将图9的0、7、8、9号子图用其均值代替后的图象,图12是由图11恢复的图象。对比图1、图10和图12可以看出,通过本文提出的方法恢复的图象不仅保留了原图的特征信息,而且使图象局部亮度趋于均匀,具有自然平滑的效果。

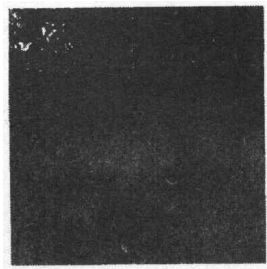


图9 图1经3级分解的图象



图10 图9的恢复图象

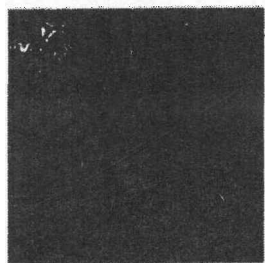


图 11 图 9 的 0789 号子图用其均值代替



图 12 图 11 的恢复图象

为了进行比较,我们对图 4 也作如上方法的处理,得到图 13 和图 14。可见,图 14 与原图(图 4)相比有明显的失真。这是由于普通图象各个频段的信息都非常丰富,尤其是 0 号子图包含的信息最为重要。在传统的处理方法中,尤其是处理普通图象时,不能忽略 0、7、8、9 号子图。所以本文提出的方法与传统的方法相比较,能够在指纹图象压缩中大幅度地提高压缩比。

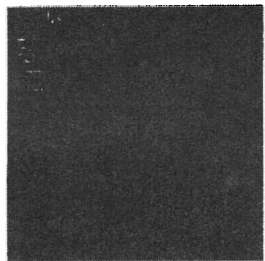


图 13 图 4 分解后 0789 号子图代以均值

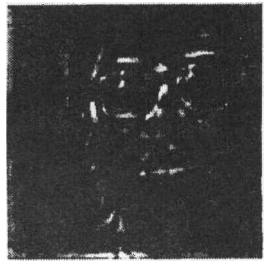


图 14 图 13 的恢复图象

补充说明一点,本文所提出的方法是指纹图象压缩过程初期的一个非常重要的处理环节。此方法本身就可以把数据量压缩到传统方法的 15/64。它还可以与自适应标量量化或各种矢量量化方法结合起来使用。我们知道,一种压缩方法最终的压缩比等于压缩过程中的每个环节压缩比的乘积。如果用不对各频段子图进行忽略的方法处理,压缩比仅为十几倍;而本文使用如下的双正交小波滤波器组^[5,6]对指纹图象进行三级分解:

$$\begin{aligned}
 H = & \{0, -0.002, -0.003, 0.006, 0.006, -0.013, -0.012, 0.030, 0.023, -0.078, -0.035, 0.307, \\
 & 0.542, 0.307, -0.035, -0.078, 0.023, 0.030, -0.012, -0.013, 0.006, 0.006, -0.003, -0.002, 0\}, \\
 G = & \{0, 0, 0.002, -0.003, -0.006, 0.006, 0.013, -0.012, -0.030, 0.023, 0.078, -0.035, -0.307, \\
 & 0.542, -0.307, -0.035, 0.078, 0.023, -0.030, -0.012, 0.013, 0.006, -0.006, -0.003, 0.002\},
 \end{aligned}$$

并采用与加权相关矢量量化结合的方法,可以将一幅 128×128 点的 256 级灰度指纹图象压缩到 1/64。如果对彩色图象进行压缩,压缩比还会达到更高。

6 总 结

本文通过对指纹图象特点的分析,提出了一种适用于纹理图象的高效的压缩方法。另外,由于恢复图象消除了观察和识别时无用的低频信息,使得在后续的动态二值化过程中

在不影响识别性能的前提下减小窗宽,从而降低运算量,使指纹图象计算机识别的处理速度得到较大的提高。

参 考 文 献

- [1] Mallat S G. Multifrequency channel decompositions of images and wavelet models. IEEE Trans. on ASSP, 1989, ASSP-37(12): 2091-2110.
- [2] Mallat S G. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. IEEE Trans. on PAMI, 1989, PAMI-11(7): 674-693.
- [3] 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994, 45-53.
- [4] 杨福生. 信号的时间-频率分析. 维格纳分布与小波变换. 北京: 清华大学出版社, 1994, 81-111.
- [5] Cohen A, Daubechies I, Feauveau J C. Biorthogonal bases of compactly supported wavelets. Comm. Pure Appl. Math, 1992, 45(5): 486-560.
- [6] Bruneau J M, Mathieu P. Image representation using biorthogonal wavelet transforms. Optical Engineering, 1994, 33(7): 2378-2384.

STUDIES ON SUB-IMAGE INFORMATION IN FINGER PRINT IMAGE COMPRESSION USING WAVELET DECOMPOSITION

Wang Quanyi Wang Wenyuan

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Sub-image information of the wavelet decomposed finger print image is essential to the quality of reconstructed image. This paper describes the importance of the sub-images according to the features of finger print images, and provides a new method that can be used to compress texture images. It can simplify and accelerate the algorithm with a better reconstructed image quality as well as a larger compress ratio.

Key words Finger print image, Wavelet transform, Image compression

王全义: 男, 1971 年生, 硕士, 助理工程师, 曾在指纹识别研究小组中从事指纹预处理、指纹图象压缩等方面的研究工作, 并参加了指纹自动识别系统的开发研制过程。现为清华同方股份有限公司的工程技术人员。

王文渊: 男, 1941 年生, 教授, 主要从事信号处理、模式识别和数字通信等方面的研究工作。