

图像子波/分类矢量量化及其在指纹识别中的应用

阮志刚 王汝莹

(中国科学院上海技术物理研究所, 青年光电工程研究中心, 上海, 200083)

A **摘要** 提出了适用于子波变换系数的矢量量化方法——子波/分类矢量量化(W/CVQ), 以子波变换系数中对应于图像边缘信息的零交叉片段的具体情况为依据, 将子波变换图像矢量分为不同的类别, 然后为各类矢量建立码本, 初步实验结果表明, 该方法能克服传统矢量量化编码子波变换系数不能准确恢复有关边缘信息的缺点, 此结果在光学实时指纹识别系统中的应用表明, 它能够充分保留原始图像的信息, 保证识别系统的准确识别.

关键词 子波变换, 正交镜像滤波器阵列, 零交叉, 矢量量化. **指纹 图像识别**

引言

图像子波变换(WT)使原始图像信息在空域和频域得以局部化, 为进一步选择编码算法、降低图像数据率提供了有利的条件, 因而子波变换从一开始就被应用到图像压缩技术, T. Hopper 描述了由美国联邦调查局(FBI)提出的用一种具有自适应能力的标量量化器编码子波变换结果的方法^[1], 取得了很好的效果. 理论上, 矢量量化比标量量化具有更强的压缩编码能力, 但 M. Antonini 等描述矢量量化器编码子波变换结果的方法^[2]在保持图像边缘的精确性和完整性方面不够理想.

本文提出了适用于量子波系数的子波/分类矢量量化方法, 主要利用子波系数在空间上的一些特点, 达到既能保持图像知觉质量, 又能利用矢量量化方法降低数据率的目的.

1 子波变换和分类矢量量化

1.1 9-7 双正交二维离散子波变换

子波变换研究表明, 信号处理中的精确重构正交镜像滤波器(PR QMF)阵列与它有着深刻的联系^[3,4], PR QMF 阵列不仅可以用来实现离散子波变换和计算子波级数(也就是任一组连续子波基均可导出一个 PR QMF 阵列), 而且当滤波器满足一定条件时, 可以从中引出一组连续子波基. M. Antonini 等描述了一个用于图像编码的双正交 DWT 对应的 PR QMF, 如图 1 所示, 其中 $\tilde{g}_n = (-1)^n h_{n+1}$, $g_n = (-1)^n \tilde{h}_{-n+1}$, 式中 n, \tilde{h}_n 和 h_n 值如表 1.

这个二维 PR QMF 可以将一幅图像分解为 4 幅子图像, 然后将子图像作为输入进一步分解. 如果按照图 2 所示的结构进行分解就得到二级二维 DWT. 本工作就是在此基础上进行的.

本文 1995 年 7 月 6 日收到, 修改稿 1995 年 9 月 22 日收到

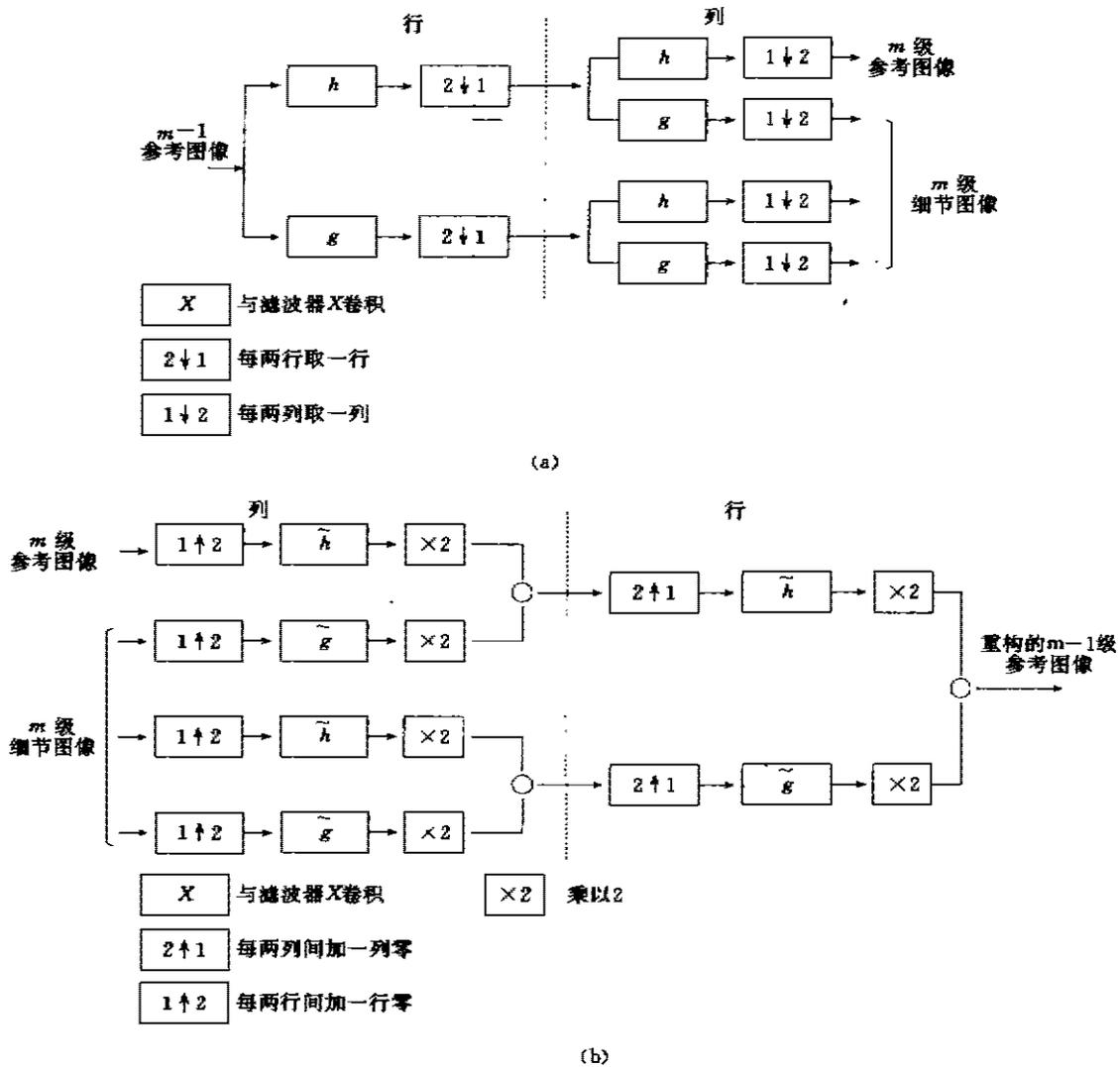


图 1 实现二维DWT的单元信号流程图

(a)多尺度图像分解单元, (b)多尺度图像重建单元

Fig. 1 Single unit signal flow graph of implementation of the 2-D discrete wavelet transform (DWT) (a) single unit of a multiscale image decomposition, (b) single unit of a multiscale image reconstruction

表 1 n, \tilde{h}_n 和 \tilde{h}_n 值

Table 1 The values of $n, \tilde{h}_n, \tilde{h}_n$

n	± 0	± 1	± 2	± 3	± 4
\tilde{h}_n	0.602 949	0.266 864	-0.078 223	-0.016 864	
\tilde{h}_n	0.557 543	0.295 636	-0.028 772	-0.045 636	0.026 749

1.2 分类矢量量化

B. Ramamurthi 等曾提出用分类矢量量化(CVQ)^[5]解决图像中景物的边缘不能被很好

复现的问题,他们将含有边缘信息的矢量与其它矢量分开处理,为不同类别的矢量分别建立码本,在实际量化矢量时,首先将矢量分类,然后在其对应的分码本中寻找最匹配的矢量,传送这个最佳矢量在由各分码本合并成的统一码本中的编号,在接收端就可根据此编号重建编码矢量.由于为每个矢量寻找最佳匹配矢量只在相应的分码本中进行,这样,使用 CVQ 的另一个优点就是降低了编码运算复杂性.图 3 为 CVQ 的实现框图.

2 图像子波/分类矢量量化

2.1 子波/分类矢量量化的提出

子波理论已经表明墨西哥帽(Mexican-hat)函数(如图 4) $h(x) = (1 - x^2/\sigma^2)\exp[-x^2/(2\sigma^2)]$ 是一个子波原型函数,信号的子波变换结果为: $W_n f(x) = f * h_s(x) = f * (s^2 d^2 G_s/dx^2)(x)$,其中, $G_s = (1/s)G(x/s) = (1/s)\exp[-x^2/(2s^2\sigma^2)]$.

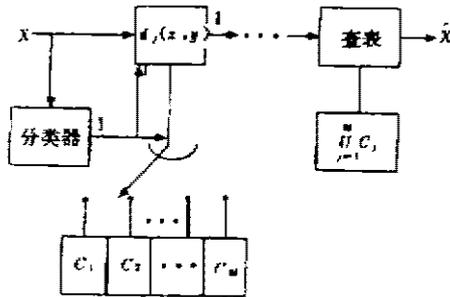


图 3 分类矢量量化(CVQ)原理框图
Fig. 3 Schematic diagram of classified vector quantization

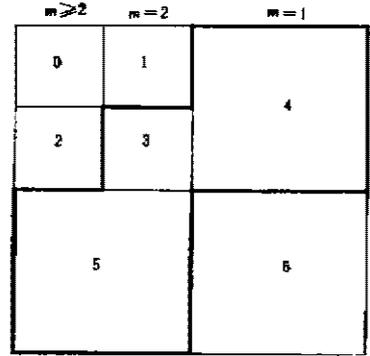


图 2 二级二维 DWT 子带结构
Fig. 2 Two-scale 2-D DWT subband structure

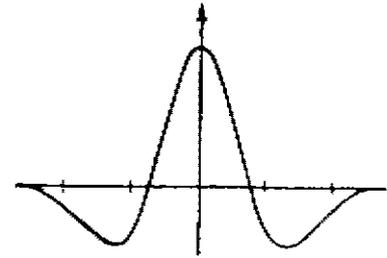


图 4 墨西哥帽函数
Fig. 4 Mexican-hat function

这就是 Marr 的检测信号强度变化零交叉方法^[6].二维子波变换结果中的 3 幅细节子图像分别为: $W_{n1}f = f(x, y) * \{s^2[d^2G_s(x)/dx^2]G_s(y)\}$, $W_{n2}f = f(x, y) * \{s^2[G_s(x)d^2G_s(y)/dy^2]\}$, $W_{n3}f = f(x, y) * \{s^2[d^2G_s(x)/dx^2][d^2G_s(y)/dy^2]\}$.这 3 幅图像就分别对应着横向搜索、纵向搜索和纵横都搜索的零交叉图.

实际应用中一般不选择墨西哥帽函数作为子波原型,这是因为它的空域和频域的局部化特性不够好.前文提到的 9-7 双正交子波的局部化性能要优良得多.而且我们还可以看到,9-7 双正交连续子波原型与墨西哥帽函数十分类似,也可以看作一个平滑函数的二次导数,如图 5 所示.

根据前文对子波变换图像的分析,3 幅图像分别为垂直、水平和对角方向边缘对应的零交叉图.零交叉图有如下特点:均值趋于零,总的信号能量很低,只在对应于原始图像中有信号突兀变化处(即零交叉的位置)有较大能量,然而在图像中为数不多的零交叉对理解图像

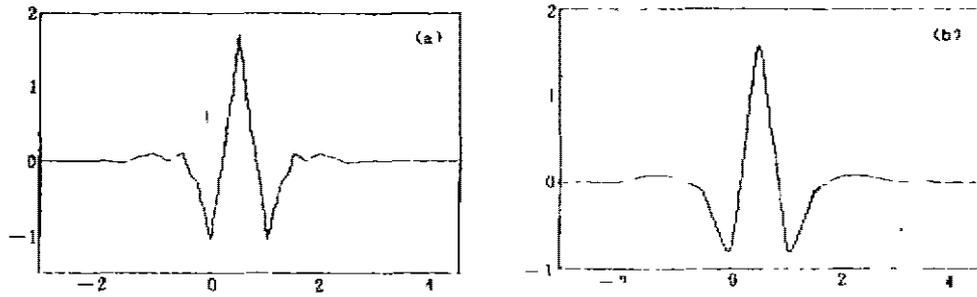


图 5 9-7 双正交子波 (a) 分析子波 Ψ , (b) 综合子波 $\tilde{\Psi}$

Fig. 5 9-7 biorthogonal wavelet (a) analysis wavelet Ψ , (b) synthesis wavelet $\tilde{\Psi}$

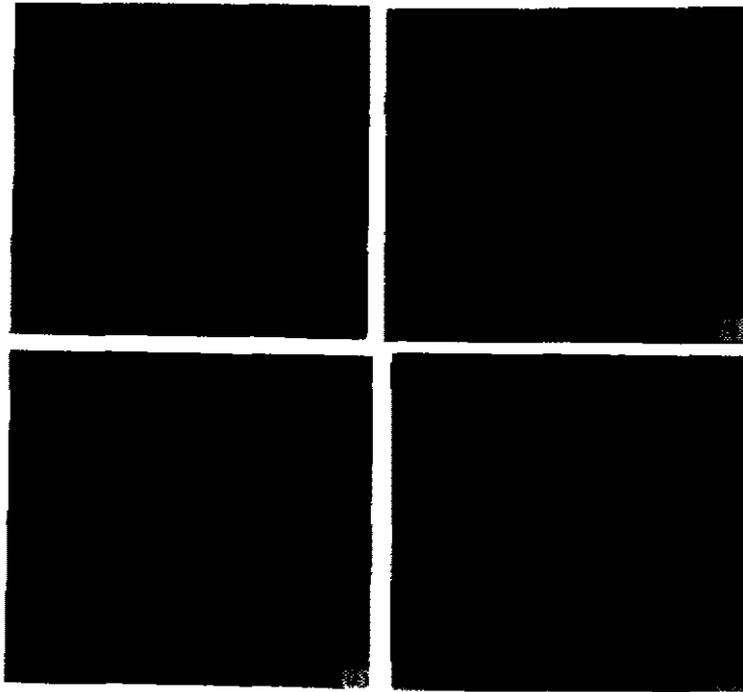


图 6 用子波/分类矢量量化编码图像的结果

(a) 原始指纹图像, (b) 原始指纹图像的子波变换,

(c) 编码后的子波变换, (d) 重建的指纹图像

Fig. 6 Results of image coding by wavelet/classified vector quantizer (W/CVQ)

(a) initial fingerprint image, (b) wavelet transform of initial fingerprint image,

(c) coded wavelet transform result, (d) reconstructed fingerprint image

有着重要的意义. 文献[2]没有考虑这些因素, 只是笼统地对每幅细节图像进行 VQ 编码, 即使获得了较好的信噪比, 也会因为不符合人们理解图像的方式而产生较大的知觉失真. 对此, 我们提出一种称为子波/分类矢量量化 (W/CVQ) 方法. 其基本思想是在对于子波细节图像编码时, 将含有对应于边缘信息的零交叉片段矢量和一般矢量分别建立码本, 确保零交叉

片段在方向、位置和连续性上的恢复. 这样我们既可以获得 VQ 编码所具有的高效性和自组织性, 又可保证子波变换结果中对视觉信息处理过程有重要意义的信息被准确恢复.

2.2 子波/分类矢量量化中的分类算法

对每一幅细节图像, 我们把其中的矢量分为边缘、噪声和一般信号 3 类, 判断一矢量是否属于边缘类的依据就是矢量中零交叉的分布情况, 因此分类的第一步就是检测矢量中的零交叉. 我们沿水平方向搜索零交叉的算法为:

设 $P1 = x(k, l) * x(k, l+1)$, $P2 = x(k, l) * x(k, l+2)$, 当 $P1 < 0$, $P3 = |x(k, l) - x(k, l+1)| >$ 阈值时, 或 $P1 = 0$, $P2 < 0$, $P3 = |x(k, l) - x(k, l+2)| >$ 阈值时, 点 (k, l) 处就有对应于强度突变的零交叉. 类似地, 我们也可得到沿垂直方向搜索零交叉的方法.

然后我们就可以根据一个矢量中零交叉的分布情况来判断它是否属于边缘类, 当它不属于边缘类时, 再判断是否属于其它类. 以下是对含纵向边缘的细节图像矢量进行分类的具体作法(设矢量大小为 $P \times P$): (1) 根据不同图像特性选择水平搜索零交叉时所用的阈值. 制作 $P \times (P-1)$ 位图表, 此表中每一项与矢量中的一点对应, 只是矢量中的最后一列在表中没有相应的点. (2) 对矢量中的 $P \times (P-1)$ 点, 用上述水平方向搜索零交叉的方法判断是否存在零交叉, 如果是, 表中相应位置置 1, 否则置 0. (3) 逐列清点位图表中“1”的个数, 如果某一列中“1”的个数大于或等于 $P-1$, 就认为此矢量属于边缘类, 返回类别号. 否则继续分类判断. (4) 如果矢量的能量小于一能量阈值, 则将其归入噪声类, 在恢复时以零矢量代替, 返回类别号. (5) 其它归入中间类.

对含横向边缘的细节图像矢量进行分类的方法与此类似. 在含对角方向边缘的细节图像矢量分类时, 我们在水平、垂直两个方向搜索零交叉, 只有同时为水平和垂直零交叉的点才是可以在位图表相应位置置“1”的点. 最后, 我们共获得 5 类矢量: 噪声矢量、含纵向边缘的矢量、含横向边缘的矢量、含对角方向边缘的矢量和中间矢量.

2.3 子波/分类矢量量化的实现

噪声矢量在恢复时一概用零矢量代替, 所以对噪声类矢量不必再做其它处理, 这是子波变换结果中细节图像均值趋于零的有利之处. 接着我们讨论余下的 4 类矢量. 对每一类我们都采用传统的 LBG 方法产生码本, 并且为所有的边缘类设置相同的码本大小.

最后将零矢量和其它各类矢量对应的分码本合并成一个统一的码本, 编码和解码按图 3 所示的 CVQ 原理进行.

表 2 图 6(b) 中矢量分类结果
Table 2 Classification result of vectors in Fig. 6 (b)

子图\类别	垂直边缘	水平边缘	对角边缘	噪声类	中间类	总计
一级垂直	1380	0	0	1656	1060	4096
一级水平	0	854	0	2373	869	4096
二级对角	0	0	273	463	288	1024
总计	1380	854	273	4492	2217	9216

3 实验与初步结果

中国科学院上海技术物理所青年光电工程研究中心近几年一直在开展指纹识别的应用研究^[7], 对指纹图像的传输和存储要求在保证指纹识别率的前提下大大降低数据率.

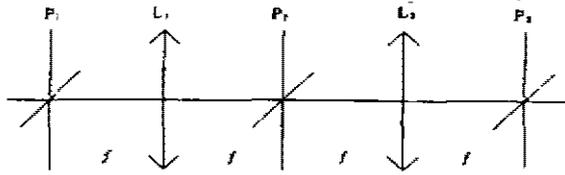


图 7 光学实时指纹识别系统原理
Fig. 7 Principle of real-time optical
fingerprint recognition system

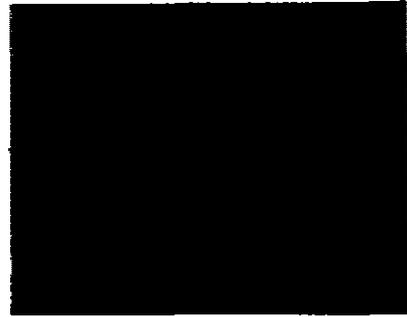


图 8 相关结果立体图
Fig. 8 3-D graph of correlation result

3.1 用子波/分类矢量量化编码子波系数的方法和结果

我们已经在前面仔细讨论了 W/CVQ, 这里我们把它应用于图 2 中标号为 3、4、5 的子波变换子图像, 矢量大小为 4×4 。

首先将子波系数中 4×4 矢量加以分类, 形成垂直边缘、水平边缘、对角边缘和中间类 4 个训练集, 表 2 给出了图 6(b) 中 4×4 矢量分类的情况, 用 4 个训练集分别形成码本, 4 个分码本的大小分别为 64、64、64 和 63, 加上零矢量, 共获得了 5 类矢量的分码本, 然后将各分码本合并成为统一的码本, 并记录下各分码本在统一码本中的位置, 在训练集外取一幅指纹图像做子波变换, 然后根据已获得的 4×4 矢量码本编码子波变换结果中相应的 3 幅细节图像(即一级水平方向、一级垂直方向、二级对角方向), 将解码结果做反变换就可得到重建的图像, 图 6 给出了个实验结果, 其中 4 幅图像分别对应于原始图像、原始子波变换图像、编码后子波变换图像及重建图像, 用 W/CVQ 编码子波变换图像时, 基本保证了其中的边缘结构, 这就使得重建图像边缘基本上保持了原始图像中边缘的形状。

3.2 子波/分类矢量量化应用于指纹识别系统

如前所述, 本文讨论指纹图像压缩的目的是要为指纹识别系统提供压缩编码方法, 作为初步实验, 我们将 3.1 中得到的结果用于指纹识别系统, 光学实时指纹识别系统的原理如图 7 所示, 此系统将得到的指纹图像放在一个凸透镜的焦平面上, 在另一侧的焦平面上放置存储指纹图像的傅里叶变换谱, 这样得到两幅图像傅里叶变换谱的乘积, 再利用一个凸透镜进行傅里叶变换, 便得到两幅图像的相关图, 如果两幅图像相同或者很相似, 相关图中就会产生十分锐利的相关峰, 利用相关图可以进行指纹识别。

我们将 W/CVQ 应用于上述指纹识别系统, 将 3.1 原始图像的傅里叶变换谱作为指纹库中的一幅图像, 将经过编码、解码的重建图像作为输入, 用计算机模拟此过程得到的相关结果如图 8 所示, 可以看出系统完全可以识别重建图像, 也就是说, 经过编码、解码过程的重建图像充分保留了原始图像的信息。

4 结语

本文分析了子波变换细节图像的特点, 指出细节图像中对应于原始图像不同尺度边缘

的信息就是其中的零交叉片段. 为达到有效保留这些信息的目的, 提出用 W/CVQ 编码子波细节图像, 并给出了此方法的详细描述. 初步的实验结果表明, W/CVQ 能够克服使用传统矢量量化编码子波细节图像时不能准确恢复有关边缘信息的缺点, 为进一步利用矢量量化方法高效压缩子波变换系数提供了有效的手段. 此结果用于光学实时指纹识别系统, 表明该方法能够充分保留原始图像的信息, 保证识别系统准确识别.

致谢 陈鲁林在算法方面给予有益讨论, 王君在实验过程中给予积极帮助, 谨在此致谢.

参考文献

- 1 Hopper T. *Proc. SPIE*, 1994, **2242**: 180~187
- 2 Antonini M, Barlaud M, Daubechies I. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1992, **1**(2): 205~220
- 3 Vetterli M. *IEEE Trans. on SP*, 1992, **40**(9): 2207~2232
- 4 Rioul O. *IEEE Trans. on SP*, 1993, **41**(8): 2591~2606
- 5 Ramamurthi B, Gersho A. *IEEE Trans. on Com.*, 1986, **COM-34**(11): 1105~1115
- 6 马尔[美]著, 姚国正, 刘 磊, 汪九云译. *视觉计算理论*, 北京: 科学出版社, 1988
- 7 王 君, 王汝笠, 华铁钧, 等. *红外与毫米波学报*, 1996, **15**(1): 55

IMAGE WAVELET/CLASSIFIED VECTOR QUANTIZATION AND ITS APPLICATION IN FINGERPRINT RECOGNITION

Ruan Zhigang Wang Ruli

(*Optoelectronic Engineering Research Center, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

Abstract A novel Vector Quantizer (VQ), which is suited for Wavelet Transform (WT) coefficients, named Wavelet/Classified Vector Quantizer (W/CVQ) is proposed. It is proved that the information related to image edges is the zero-crossing segment in image WT result. According to zero-crossing segments in vectors, vectors can be classified into several classes, and a subcode book corresponding to each class is generated, respectively. Primary experimental results show that W/CVQ can overcome the shortcoming of traditional VQ that information related to edges in WT coefficients can not be preserved perfectly. The applicatoin of the results to real-time optical fingerprint recognition system shows that this method can preserve information enough to make sure the correctness of recognition of the system.

Key words wavelet transform, quadrature mirror filter array, zero crossing, vector quantization.