

图 8.41 (a),(c)和(e)压缩率为 108:1 的小波编码结果,
(b),(d)和(f)压缩率为 167:1 的相似结果

小波选择

作为图 8.39 中正向和逆向变换基础的小波选择影响着小波编码系统的设计和性能的所有方面。它们直接影响着变换计算的复杂性和压缩及重构图像误差的可接受性。当变换小波带有一个尺度函数的时候,这种变换可以通过一系列数字滤波操作实现。滤波器抽头的数目等于非零小波和尺度向量系数的数目。小波将信息压缩为较少变换系数的能力取决于小波压缩和重构性能。

基于小波的压缩中最为广泛使用的展开函数是 Daubechies 小波和双正交的小波。后者允许将有用的分析特性融入分解滤波器,比如零矩的数目(见 7.5 节),而重要的综合特性,像重构的平滑度,则是融入重构滤波器。

例 8.24 小波编码中的小波基

图 8.42 包含了在图 8.23 中的妇女图像的 4 个离散小波变换。哈尔(Haar)小波是最简单且是此处研究的惟一不连续的小波,这种小波用做图 8.42(a)的展开或基函数。在图 8.42(b)中使用了应用最普遍的成像小波中的 Daubechies 小波。而图 8.42(c)中使用的对称小波(symlet)是具有增强的对称性的 Daubechies 小波的一种扩展。图 8.42(d)所用的 Cohen-Daubechies-Feauveau 小波用于说明双正交小波的性能。正如以前的这类例子一样,所有细节的系数都进行了标定以便能使重点强调的结构更为突出——灰度级 128 对应系数数值为 0。

正如在表 8.12 中看到的,从图 8.42(a)到(d)移动的过程中,图 8.42 中的变换所包含的对每个系数(在每个分解的等级上)进行乘法和加法计算的操作次数从 4 次增加到 28 次。所有 4 种变换都使用一种快速小波变换(也就是滤波器组)公式进行计算。注意,当计算的复杂性(也就是滤波器抽头的数目)增加的时候,信息压缩能力会更好。当使用哈尔小波和低于 1.5 的细节系数被舍入为 0 的时候,总变换系数的 46% 均被清零。对于更复杂的双正交小波,被清零的系数数目增加到 55%,增加的潜在压缩量近 10%。

表 8.12 当对图 8.42 中变换的截取低于 1.5 的时候,小波变换滤波器抽头和调零系数

小 波	滤波器抽头(尺度 + 小波)	调零系数
哈尔小波(见习题 7.10)	2 + 2	46%
Daubechies 小波(见图 7.6)	8 + 8	51%
Symlet 小波(见图 7.24)	8 + 8	51%
双正交小波(见图 7.37)	17 + 11	55%

分解等级选择

另一种影响小波编码计算复杂性和重构误差的因素是变换分解等级的选择。由于 P 尺度快速小波变换涉及 P 个滤波器组迭代,正向和反向变换计算操作的次数随着分解级别的提高而增加。再有,对逐渐增加的低尺度系数的量化导致更多的分解级别,影响着重构图像的逐渐增大的区域。在很多应用中(像搜索图像数据库,或对逐渐重构传送图像等),存储或传送图像的分辨率和最低可用近似图像的尺度通常决定了变换级别数。

例 8.25 小波编码中的分解级别

表 8.13 说明了根据图 8.23 中固定全局门限值为 25 的编码选择分解等级的影响。和以前的小波编码例子一样,只对细节系数进行舍入。表中列出了清零的系数的百分比和得到的 rms 重构误差。注意,初始时的分解是大多数数据压缩的原因。在 3 个分解等级上舍入的系数在数字上几乎没有差别。

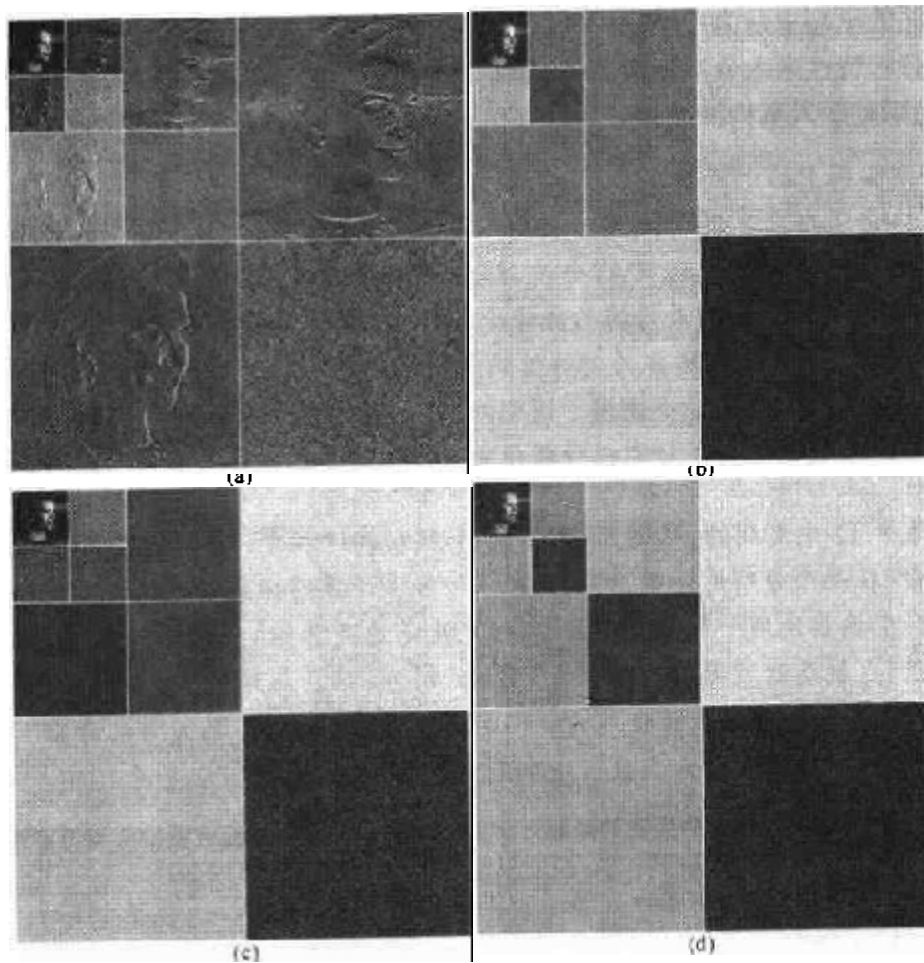


图 8.42 图 8.23 的小波变换。(a)使用哈尔小波,(b)使用 Daubechies 小波,(c)使用对称小波和(d)Cohen-Daubechies-Feauveau 双正交小波

表 8.13 对图 8.23 中 512×512 大小的图像进行小波编码时分解级别的影响

尺度和滤波器组迭代	近似系数图像	舍入的系数(%)	重构误差 (rms)
1	256×256	75%	1.93
2	128×128	93%	2.69
3	64×64	97%	3.12
4	32×32	98%	3.25
5	16×16	98%	3.27

量化设计

影响小波编码压缩和重构误差的最大因素是系数量化。尽管最广泛应用的量化器是均匀的,但量化的效果可以通过以下方法进一步改进:(1)引入一个以零为中心的扩大的量化间隔,这个间隔被称为死区,或(2)从一个尺度到另一个尺度自适应调整量化间隔的大小。不论哪种情况,选择的量化间隔都必须随着编码图像的比特流传送给解码器。这个间隔本身根据压缩的图像,通过不断的试探或自动的计算得到。例如,一个全局系数门限可以作为第一级细节系

数绝对值的中值,或作为舍去的零的数目和保留在重构图像中能量总量的函数计算得到。

例 8.26 在小波编码中的死区间隔选择

图 8.43 说明了与截尾的细节系数的百分比相关的死区间隔大小对图 8.23 中的妇女图像基于三尺度双正交小波编码的影响。当死区尺寸增大的时候,截尾系数的数目同样增大。在曲线拐点处的上方(即,横坐标 4.5 处),几乎没有增益。这是由于细节系数直方图在零的周围有很高的尖峰(见图 7.8 的例子)。

与图 8.43 中死区门限对应的 rms 重构误差在门限 4.5 处从 0 增加到 1.77 个灰度级,并在门限为 18 的地方增加到 2.79 个灰度级。在门限为 18 的地方的零系数数目达到了 96.43%。如果每个细节系数都被消掉,这个百分比将上升 1.5%,但重构误差会增加到 7.6 个灰度级。

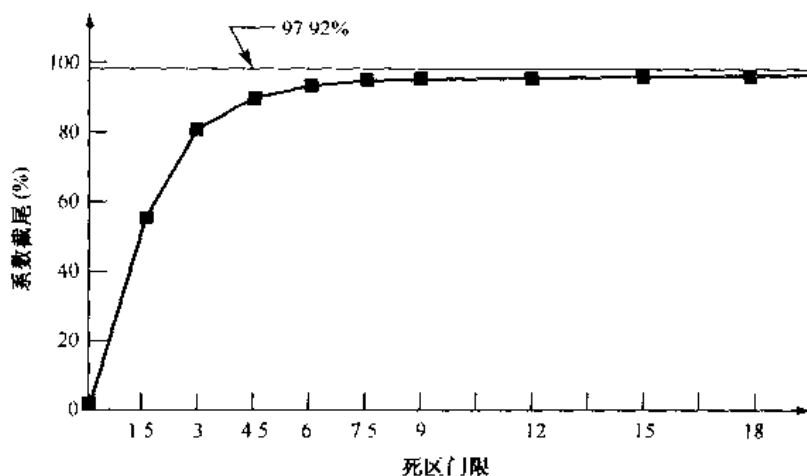


图 8.43 关于小波编码的死区间隔选择的影响

8.6 图像压缩标准

迄今为止讨论的许多有损和无误差压缩方法在广泛使用的图像压缩标准中起着重要作用。在本小节中,对其中的几种标准进行一些分析,并使用这些标准说明一下前面提到的压缩方法。讨论的大多数标准都是得到国际化标准组织(ISO)和国际电话与电报咨询委员会(CCITT)认可的。这些标准适用于二值图像和连续色调(单色的和彩色的)图像的压缩,同时也适用于静止画面和视频图像(即,连续帧)。

8.6.1 二值图像压缩标准

两种应用最为广泛的图像压缩标准是用于二值图像压缩的 CCITT 第三组和第四组标准。尽管它们现在应用于多种计算机应用领域,但它们最初是为了使用传真(FAX)编码方法通过电话网络传输文件而设计的。第三组标准应用非自适应的 1 维行程编码技术,在这种技术中,对每组 K 条线($K=2$ 或 4)的最后 $K-1$ 条线用二维方式进行可任意选择的编码。第四组标准是第三组标准进行简化和流水线化得到的版本,在该标准中,只允许存在二维编码。两组标准使用同样的非自适应的二维编码方法。这种方法与 8.4.2 节中描述的相对地址编码(RAC)

技术非常相似。

在建立 CCITT 标准的过程中,有八种典型的“测试”文件被选择作为评估不同的二值压缩方案的基准。用现存的第三组和第四组标准对这些包括打印和手写内容(使用几种不同的语言)以及少量线条的文件进行比率约为 15:1 的压缩。然而,由于第三组和第四组标准是以非自适应技术为基础的,所以有时候会导致数据膨胀(如对半色调图像即是如此)。为了克服这种现象以及出现的相关问题,联合二值图像专家组(JBIG)——这是一个 CCITT 和 ISO 的联合委员会——已经采用和/或建议了几种其他的二值压缩标准。这其中包括 JBIG1 标准,一种自适应算术压缩技术,这是目前可用的处理最一般情况和最坏情况下的二值压缩的技术,还有 JBIG2 标准(现在还是一份委员会的最终草案)。使用这种标准得到的压缩效果通常是使用 JBIG1 标准得到的效果的 2 到 4 倍。这些标准可以同时应用于二值图像和高达 6 灰度编码比特/像素的灰度级图像(以一个位平面为基础)的压缩。

一维压缩

在一维 CCITT 第三组压缩方法中,图像^①的每一条线都可以用一系列变长编码码字编码,这些码字代表从左到右扫描线条过程中,白色和黑色交替的行程长度。码字本身分两类。如果行程长度小于 63,则使用表 8.14 中修正的霍夫曼编码得到的一个终结编码。如果行程长度大于 63,则根据表 8.15 得到最大可能出现的组成编码(不超过行程长度),将它与一个终结编码一起使用进行编码,终结编码用于表示组成编码和实际行程长度之间的差异。这个标准要求每条线都从一个白色行程长度码字开始,事实上它们可能是 00110101,这个编码表示一个零长度的白色行程。最后,唯一的行尾(EOL)码字 00000000001 用于结束每一行,同时标记每幅新图像的第一行。一个图像序列的结尾使用 6 个连续的 EOL 标记。

表 8.14 CCITT 终结编码

扫描宽度	白色码字	黑色码字	行程长度	白色码字	黑色码字
0	00110101	0000110111	32	00011011	000001101010
1	000111	010	33	00010010	000001101011
2	0111	11	34	00010011	000011010010
3	1000	10	35	00010100	000011010011
4	1011	011	36	00010101	000011010100
5	1100	0011	37	00010110	000011010101
6	1110	0010	38	00010111	000011010110
7	1111	00011	39	00101000	000011010111
8	10011	000101	40	00101001	000001101100
9	10100	000100	41	00101010	000001101101
10	00111	0000100	42	00101011	000011011010
11	01000	0000101	43	00101100	000011011011
12	001000	0000111	44	00101101	000001010100
13	000011	00000100	45	00000100	000001010101

① 在标准中,图像被看做是页,而图像序列被看做文件。

(续表)

码 字		码 字	
1792	0000001000	2240	00000010110
1856	0000001100	2304	00000010111
1920	0000001101	2368	00000011100
1984	00000010010	2432	00000011101
2048	00000010011	2496	00000011110
2112	00000010100	2560	00000011111
2176	00000010101		

二维压缩

为 CCITT 第三组和第四组标准所采用的二维压缩方法采用的是逐线方法,这种方法在每个黑色转白色或白色转黑色的扫描转换位置上均参考基准元素 a_0 进行编码,基准元素 a_0 被设定在当前的编码线上。前面提到的编码线称为基准线;对每幅新图像的第一条线设定的基准线是一条虚构的白色线条。

图 8.44 显示了对一条单扫描线的基本编码过程。注意,这个过程的初始步骤在于对几个关键的转换或变化元素的定位: a_0, a_1, a_2, b_1 和 b_2 。变化元素定义为在同一条直线上与前一个像素值不同的像素。最重要的变化元素是 a_0 (基准元素),这个元素被设定在虚构的白色变化元素的位置上,而这个虚构变化元素的位置在每条新编码线的第一个像素的左边,或者 a_0 可以根据以前的编码模式确定。在 a_0 的位置确定了之后, a_1 作为在当前编码线上 a_0 右边的下一个变化元素的位置, a_2 作为在当前编码线上 a_1 右边的下一个变化元素的位置, b_1 作为具有(a_0 的)相反值的变化元素,位于基准线(或前一条线)上 a_0 的右边。 b_2 作为下一个变化元素位于基准线上 b_1 的右边。如果这些变化元素中的任何一个没有被检测到,则这些元素被设定在适当线上最后一个像素右边的一个虚构像素位置上。图 8.45 给出了在不同变化元素之间一般关系的两种说明。

在对当前基准元素和与之相联系的变化元素进行辨别之后,就要执行两种测试,以便从三种可能的编码模式中选择一种。这三种编码模式分别为:通过模式、垂直模式和水平模式。对应于图 8.44 中流程图的第一分支节点的初始测试比较 b_2 相对 a_1 的位置。对应于图 8.44 中第二个分支点的第二个测试是计算 a_1 和 b_1 位置之间的距离,并将此距离与 3 进行比较。依靠这些检测的输出,将进入图 8.44 中的三个编码框图中的一个,并执行相应的编码程序。然后,设置一个新的基准元素,如流程图中画的一样,开始准备下一次重复编码。

表 8.16 定义了被三种可能的编码模式用到的特定编码。在通过模式中很明显地排除了 b_2 直接位于 a_1 上方的情况,而只需要通过模式的码字 0001。如图 8.45(a)所示,这种模式识别与当前的白色或黑色编码线的扫描没有重叠的白色或黑色基准线扫描段。在水平编码模式中,从 a_0 到 a_1 和从 a_1 到 a_2 的距离必须按与表 8.14 和表 8.15 中的终结和组成编码相关的方式编码,并且要附加到水平模式码字 001 上。表 8.16 中由符号 $001 + M(a_0 a_1) + M(a_1 a_2)$ 对这种模式进行了说明。这里 $a_0 a_1$ 和 $a_1 a_2$ 分别代表从 a_0 到 a_1 和从 a_1 到 a_2 的距离。最

后,在垂直模式中,六个特定的变长编码之一被分配给 a_1 和 b_1 之间的距离。图 8.45(b)说明了在水平和垂直模式编码中用到的参数。在表 8.16 的底部,扩展模式码字用于选取一种可选的传真编码模式。例如,编码 0000001111 用于初始化一种传输的非压缩模式。

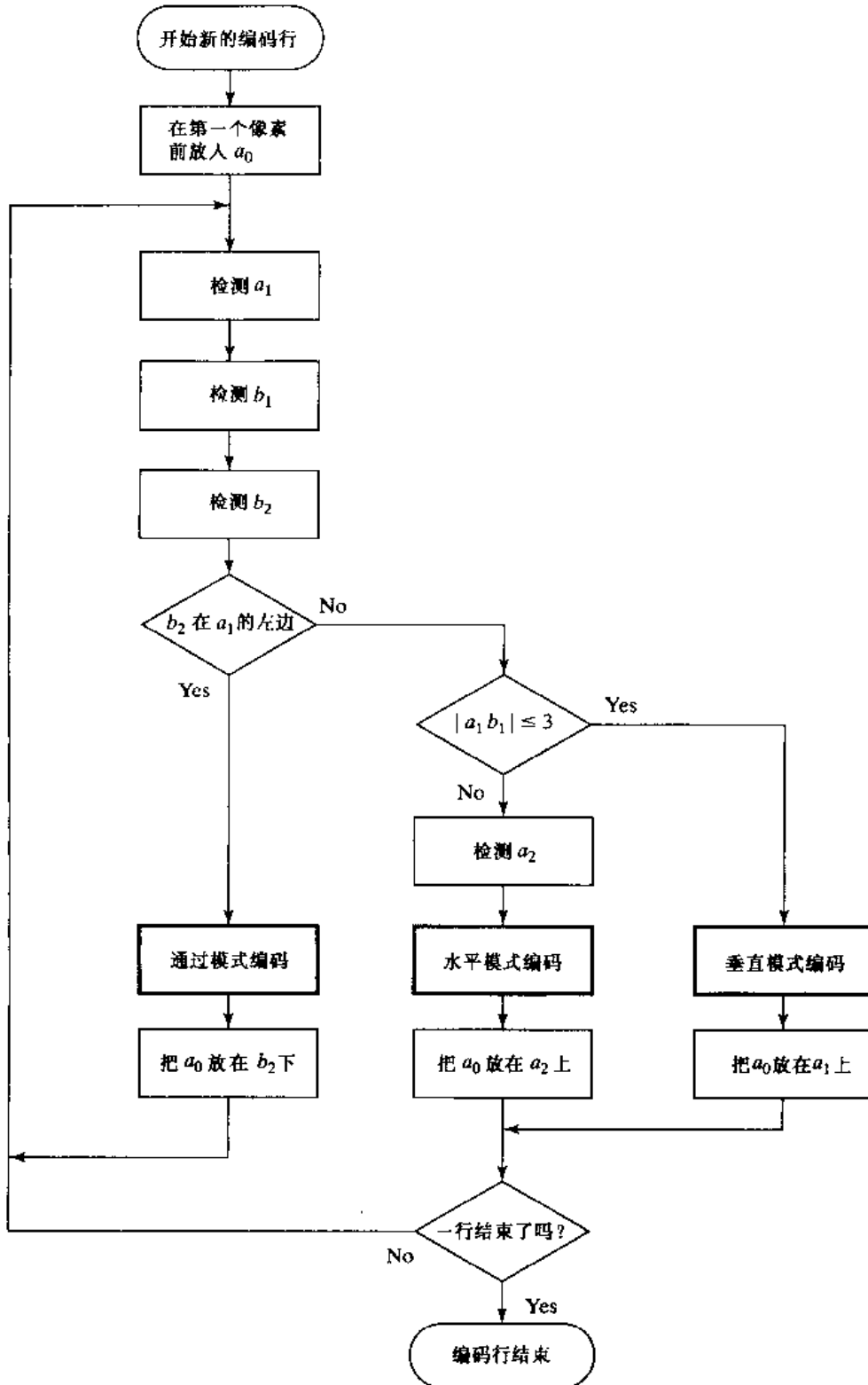


图 8.44 CCITT 二维编码流程。符号 $|a_1 b_1|$ 代表变化元素 a_1 和 b_1 之间距离的绝对值

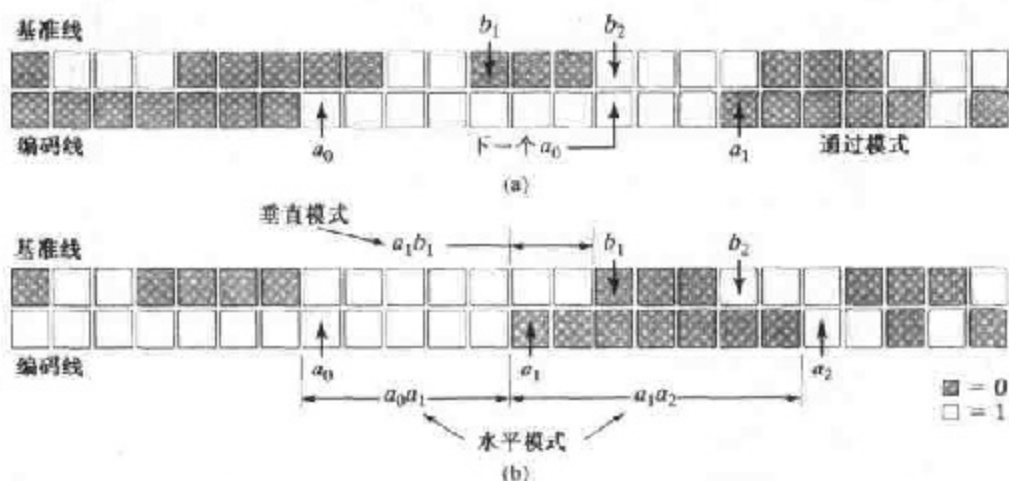


图 8.45 CCITT(a)通过模式和(b)水平模式与垂直模式编码参数

表 8.16 CCITT 二维编码表

模 式	码 字
通过	0001
水平	$001 + M(a_0 a_1) + M(a_1 a_2)$
垂直	
a_1 在 b_1 之下	1
a_1 在 b_1 右边相距一个像素的地方	011
a_1 在 b_1 右边相距两个像素的地方	000011
a_1 在 b_1 右边相距三个像素的地方	0000011
a_1 在 b_1 左边相距一个像素的地方	010
a_1 在 b_1 左边相距两个像素的地方	000010
a_1 在 b_1 左边相距三个像素的地方	0000010
扩展	0000001 × × ×

例 8.27 CCITT 垂直模式编码实例

尽管图 8.45(b)对水平和垂直模式编码都有参数注释,但实际上描绘的情况是垂直模式编码的情况。即,当 b_2 在 a_1 的右边时,图 8.44 中的第一种(或通过模式)检测无法通过。第二个测试决定是垂直还是水平编码模式进入。这个检测表明应该使用垂直模式编码,因为从 a_1 到 b_1 的距离小于 3。根据表 8.16,正确的码字为 000010,这意味着 a_1 在 b_1 左边相距两个像素的位置上。在下一步重复编码的准备过程中, a_0 移动到 a_1 的位置上。

8.6.2 连续色调静止图像压缩标准

CCITT 和 ISO 已经定义了几种连续色调(与二值相对应)图像压缩标准。这些在不同程度上被认可的标准都是用于处理单色和彩色图像压缩的标准。与 8.6.1 节中描述的二值压缩标准相反,连续色调标准主要以 8.5.2 节和 8.5.3 节的有损变换编码技术为基础。为了进一步研制这些标准,CCITT 和 ISO 委员会向很多公司、大学和研究实验室征求算法建议。根据图像

的品质和压缩的效果从提交的方案中选择最好的算法。这样得到的标准展示了在连续色调图像压缩领域的现有水平。这其中也包括原来的基于 DCT 的 JPEG 标准,最近提出的基于小波的 JPEG 2000 标准以及 JPEG-LS 标准。JPEG-LS 标准是一种无损到接近无损的自适应预测方案,它包括对平面区域检测和行程编码(ISO/IEC[1999])的机理。

JPEG

使用最为普遍且易于理解的连续色调静止帧压缩标准是 JPEG 标准。这种标准定义了三种不同的编码系统:(1)一种有损基本编码系统,这个系统是以 DCT 为基础的并且足够应付大多数压缩方面的应用;(2)一种扩展的编码系统,这种系统面向的是更大规模的压缩,更高的精确性或逐渐递增的重构应用系统;以及(3)一种面向可逆压缩的无损独立编码系统。为了实现 JPEG 的兼容性,产品或系统必须包含对基本系统的支持。没有规定特殊的文件格式、空间分辨率或彩色空间模型。

在经常被称为连续基准系统的基准系统中,输入和输出数据的精度限制为 8 比特,而量化的 DCT 值限制为 11 比特。压缩过程本身包括三个连续的步骤:DCT 计算,量化以及变长编码分配。图像首先被细分为 8×8 的像素块。这些像素块进行从左到右,从上到下的处理。当对每个 8×8 的块或子图像进行了处理之后,通过减去 2^{n-1} 对 64 个像素进行层次移动, 2^n 是灰度级的最大数目。然后计算块的二维离散余弦变换,根据式(8.5.40)进行量化并重排。使用图 8.36(d)的 z 形模式形成一个量化系数的一维序列。

由于在图 8.36(d)中的 z 形模式下生成的一维重排阵列是根据递增的空间频率定性地排列的,所以 JPEG 编码程序的设计可以充分利用根据重排得出的零的长扫描段优点。特别是非零的 AC^① 系数是使用规定了系数值和处在前面位置的零的个数的一种变长编码进行编码的。DC 系数相对于前面子图像的 DC 系数进行不同的编码。表 8.17、表 8.18 和表 8.19 给出了对亮度图像默认的 JPEG 霍夫曼编码。JPEG 推荐的亮度量化阵列在图 8.37(b)中给出,并且可以依比例的不同而提供多种压缩等级。尽管对亮度和色度处理提供了默认的编码表和证明过的量化阵列,但用户可以自由地构造自定义的表格和/或阵列,这样可以更好地适应被压缩图像的特点。

例 8.28 JPEG 基准编码和解码

考虑下列 8×8 子图像,使用 JPEG 基本标准进行压缩和重构:

52	55	61	66	70	61	64	73
63	59	66	90	109	85	69	72
62	59	68	113	144	104	66	73
63	58	71	122	154	106	70	69
67	61	68	104	126	88	68	70

① 在标准中,AC 项表示除了零或 DC 系数的所有系数。