

编者按:最近以来,由可视电话,远程遥视遥控为代表的一批图像技术逐渐投入实际使用,对图像压缩的要求越来越高,带动了这课题研究的蓬勃发展, JPEG、MPEG、小波压缩、分形压缩等都是这方面的最新成就。为了反映这课题的基本概况,我们邀请有关专家撰写了六篇文章编为一专栏,希望它们能在理论和实用两方面对读者有参考价值。

基于小波变换的静止图像数据压缩方案

高敬惠 (河北工业大学计算机系 300130)

王建亮 魏世泽 (河北科技大学中校区计算中心 050018)

摘要:本文根据人类视觉系统的特性提出了一种基于小波变换的图像有损压缩方案。用数学领域中的小波变换原理,把高频分量和低频分量分离。接着用我们改进过的 JPEG 的 DC/AC 系数分组原则进行分组处理,最后采用算术编码进行存储。

关键词:图像压缩 小波变换 DCT 变换 算术编码

由于图像数据之间存在着空域相关性,图像数据进行有损压缩时,常需对图像数据进行某种正交变换,以使图像的低频分量和高频分量分开,然后再进行量化和编码。

人类视觉系统的特点是对高频信息的变化不敏感,对低频信息的变化较敏感;对色度信息不敏感,对亮度信息比较敏感等等,这些特点逐渐受到图像处理研究人员的重视,并开始运用到各类图像压缩方案中。于是对恢复图像质量的评价越来越看重视觉效果,这使得在相同恢复图像质量下,压缩比可以大大提高。

小波变换是一种能把图像能量的高频成分与低频成分很好地分离的正交变换,使能量主要集中到低频部分,很好的适应了人眼的视觉特点,因此可对图像数据先实施小波变换,再进行量化。在同样的量化基础上,如果提高编码效率,对恢复图像质量没有损伤,同时又能提高压缩比。

基于上述原则,本文提出了一种基于小波变换的静止图像压缩编码方案。

一、小波变换介绍

小波分析与 Fourier 分析非常相似,其雏形形成于 50

年代初,在此后的 30 年中发展很慢,直到 80 年代中期, Elf-Aquitaine 公司的石油工程师 J. Morlet 在分析地质数据时首次引进和使用了小波(Wavelet)这一术语,“小”指其具有衰减性;“波”指它的波动性。随后,法国马赛大学的数学家 Y. Meyer 将 Morlet 和以前数学家的工作联系起来,形成了一个新的数学分支,这就是小波分析理论。Mallat 在 1989 年统一了具体小波基的构造方法,给出了快速小波变换算法,是小波理论的一大突破,使小波分析理论迅速推广应用。目前小波分析已被用于压缩图象数据,追踪股票市场以及从模糊的画面中恢复信息等。

小波,简单地讲是满足条件 $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) dx = 0$ 的函数 $\psi(x)$,通过伸缩和平移产生的函数组 $\psi_{a,b}(X)$ 。

$$\psi_{a,b}(X) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad a, b \in \mathbb{R} \quad a \neq 0$$

其中 a, b 分别为伸缩和平移因子。

令 $L^2(\mathbb{R})$ 为可测的、平方可积函数 $f(x)$ 的矢量空间, \mathbb{R} 为实数集,则函数 $f(x) \in L^2(\mathbb{R})$ 的连续小波变换定义为:

$$W_{a,b}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{a,b}(x) f(x) dx$$

由 $W_{a,b}$ 重构 $f(x)$ 的小波逆变换定义为

小波变换式可描述为函数 $f(x) \in L_2(\mathbb{R})$ 通过一带通滤波器的滤波输出,且有频率放大作用(放大系数为 a)。

$$\psi(x) = \frac{1}{W_h} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_{a,b} \psi_{a,b}(x) da db$$

其中 $W_h = \int_0^{\infty} \frac{|h(\omega)|}{|\omega|} d\omega$, $H(\omega)$ 是 $\psi(x)$ 的傅里叶变换
连续小波变换可通过对伸缩标度因子 a 和平移标度因子 b 的取样而离散化。 a, b 按如下规律取样:

$$a = a_0^m, b = nb_0 a_0^m$$

其中 $a_0 > 1, b_0 \in R, m, n$ 为整数, 则小波函数为

$$\psi_{m,n}(x) = a_0^{-m/2} \psi(a_0^{-m} x - nb_0)$$

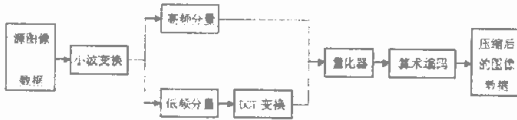
离散小波变换定义为

$$DW_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{m,n}(x) dx$$

这里 m 和 n 分别称为频率范围指数和时间步长变化指数。

二、基于小波变换的有损图像压缩编码方案流程图

本文采用的图像压缩编码流程图如下:



这种算法的特点是:

(1) 小波变换的低频部分集中了图像的大部分能量, 因此对高频分量的粗糙量化, 对恢复图像质量的视觉效果影响不大。

(2) 本文对 JPEG 系统中的系数分组方法进行了改进, 在略微增加二进制数据存储占用的比特数的同时, 提高了对组号进行算术编码的效率。

三、压缩方案的具体内容

1. 抽样

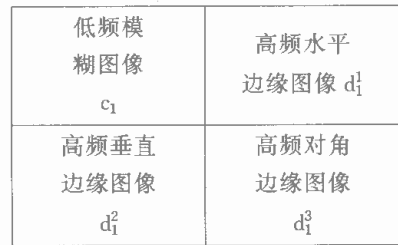
RGB 图像是以 R, G, B 三个独立分量来描述的, 先将图像数据由 RGB 坐标系转换到 YUV 坐标系。因为人眼对亮度较敏感, 对色度不敏感, 图像进行压缩之前, 先对色度值抽样[1], 抽样比率: $Y:U:V = 4:1:1$ 。即亮度数据矩阵不变, 色度矩阵划分为 2×2 的小块, 每一小块只保留左上角的值, 这样色度 U, V 矩阵的数据量为原来的 $1/4$, 即一个 U 一个 V 对应 4 个 Y 值。

2. 小波变换

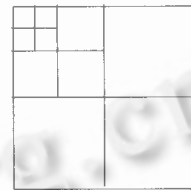
小波变换的公式如下:

$$\begin{cases} c_j(n, m) = 1/2 \sum_{k,l \in Z} c_{j-1}(k, l) h_{k-2n} h_{l-2m} \\ d_1^j(n, m) = 1/2 \sum_{k,l \in Z} c_{j-1}(k, l) g_{k-2n} h_{l-2m} \\ d_2^j(n, m) = 1/2 \sum_{k,l \in Z} c_{j-1}(k, l) h_{k-2n} g_{l-2m} \\ d_3^j(n, m) = 1/2 \sum_{k,l \in Z} c_{j-1}(k, l) g_{k-2n} g_{l-2m} \end{cases}$$

Z 为整数集合, k, l, m, n 分别为小波变换前后的矩阵行列位置, C_j 是 C_{j-1} 经小波变换后的低频成分, d_1^j, d_2^j, d_3^j 分别为 C_{j-1} 经小波变换后的水平边缘高频分量, 垂直边缘高频分量和对角边缘高频分量。 j 为小波变换的阶数。当 $j=1$ 时, C_0 为原图象数据。 C_1 是 C_0 进行一阶小波变换的低频分量。其分解示意图如下:



一阶小波变换



多层小波变换分解示意图

一幅图像的二维小波变换可简单的描述为原始图像信号被分解为一幅低分辨率的模糊图像(源图像的低频成分)和三幅包含了图像细节变化(如图像中的边缘和拐角等)的高频成分的图像。模糊图像还可以进一步分解为更低分辨率下的一幅模糊图像和三幅含有细节变化的高频图像。依此类推, 可以一直分解下去。这样源图像就分解为一幅含有源图像大部分信息的模糊图像和一组不同分辨率下的高频图像。

重构公式写为:

$$c_{j-1}(n, m) = 1/2 \left\{ \sum_{k,l \in Z} c_j(k, l) h_{n-2k} h_{m-2l} + \sum_{k,l \in Z} d_1^j(k, l) h_{n-2k} g_{m-2l} + \sum_{k,l \in Z} d_2^j(k, l) g_{n-2k} h_{m-2l} + \sum_{k,l \in Z} d_3^j(k, l) g_{n-2k} g_{m-2l} \right\}$$

其中 $g_k = (-1)^k h_{2M-k-1}$, h, g 为小波基的系数, 这里

$M=2$ 。

本文采用的是4阶 Daubechies 正交小波系^{[2][5]}, 其系数为:

$$h_0 = \frac{1}{4(1+\sqrt{3})} \quad h_1 = \frac{1}{4(3+\sqrt{3})} \quad h_2 = \frac{1}{4(3-\sqrt{3})}$$

$$h_3 = \frac{1}{4(1-\sqrt{3})}$$

UV分量可以作两次小波变换。

3. DCT 变换

小波变换后的低频分量, 能量很集中, 可通过 DCT 变换, 使能量进一步集中。本文采用了不定长的一维 DCT 变换^[3] 适合各种列数, DCT 变换的长度在 9~17 之间变化。根据小波变换后低频数据矩阵的列数大小, 在 9~17 之间寻找一个 N 值, 将一行数据分成等长的几组, 每一组数据分别进行 DCT 变换。如果不能找到能被列数整除的 N 值, 则采用余数 S (小于 4) 最小的值设为 N, 每一行的最后一组数据进行 N+S 长度的一维 DCT 变换, 变换后的系数只保留前 N 个, 这样量化时比较简单, 其余组数据进行长度 N 的 DCT 变换。

一维 DCT 变换公式如下:

$$F(u) = a_0 C(u) \sum_{i=0}^{N-1} f(i) \cos \frac{(2i+1)u\pi}{2N} \quad u=0, 1, \dots, N-1$$

(DCT 变换)

$$F(i) = a_1 \sum_{u=0}^{N-1} c(u) F(u) \cos \frac{(2i+1)u\pi}{2N} \quad u=0, 1, \dots, N-1$$

(逆 DCT 变换)

其中 $a_0 a_1 = \frac{2}{N}$, N 为一维 DCT 变换的长度。

4. 量化

量化采用了自适应量化方案, 即根据图像内容调整量化参数, 使量化失真尽可能最小。DCT 变换后的系数, 采用基于视觉特性的均匀量化器, 量化公式如下:

$$C(U, V) = \frac{[F(U, V) \pm Q(U, V)/2]}{Q(U, V)}$$

式中 $C(U, V)$ 量化器的输出, $F(U, V)$ 是量化器的输入, $Q(U, V)$ 是量化器的步长。

当 $F(U, V)$ 是正数时, 取“+”; 当 $F(U, V)$ 是负数时, 取“-”。可以看到, 当输入处于 $(-Q(U, V)/2, Q(U, V)/2)$ 时, 输出为 0, 当输入在 $(Q(U, V)/2, 3/2 Q(U, V))$ 时, 输出为 1, 依此类推。恢复图像时逆量化公式如下:

$$F(U, V) = C(U, V) \times Q(U, V)$$

式中 $C(U, V)$ 是逆量化的输入。

量化步长公式如下^[4]:

$$q_j = q_0 = q_k \times j \quad j=0, 1, \dots, k \quad (k \text{ 为一维 DCT 变换的}$$

长度), 式中 q_j 为量化步长, q_0 为最小量化步长, q_k 为相对零点位置变化的步长幅度。在自适应量化时, q_0 与 q_k 都可作为调整参数。

小波变换后的高频分量, 采用等步长均匀量化器量化 (即都采用相同的量化步长)。

由于 Y, U, V 分量的频率特性不同, 对彩色静止图像的 Y 分量和 UV 分量采用了不同的量化表。

5. 分组及编码

量化后的 DC/AC 系数 (DCT 变换的低频和高频系数) 一起参照 JPEG 标准中的分组方法进行分组。小波变换后的高频分量的 0 值个数非常可观, 本文提出了一种, 将连续 0 值的数目和不为 0 的高频系数一起进行分组的新分组方案。对不为 0 的系数进行分组的同时, 统计连续 0 的个数, 对于连续 0 的数目, 也参照 JPEG 标准中的分组表进行分组, 附加的标识位以二进制的形式和不为零的系数的标识位一起存储, 组号则和不为零的系数的组号一起传给后面的算术编码进行编码。因为系数值的二进制的高位都是“1”, 因此, 零数日以二进制进行传输时只需在高位多传输一位“0”即可。

这种方法可以突破 JPEG 标准中, 游程编码对 0 值游程长度的限制。在恢复图像质量要求不高, 压缩比较大, 和对彩色图像的 UV 高频分量进行处理, 以及处理尺寸比较大的图像时, 由于连续 0 的个数非常多, 这种分组方案非常有效。同时, 组号最多只有 31 个 (长整数范围内), 31 个字符在进行算术编码时, 能较快的接近图像的概率模型, 编码效率较高。

最后组号采用算术编码进行编码。

四、实验结果

实验图像 model.tif (8bits/pixel/色) RGB 图像 图像尺寸 320×256

实验结果见附图。

从实验结果可以看到:

恢复图像在压缩比 30 以下 (0.8bbp 以上) 时, 几乎与原图像一样;

压缩比在 30-50 (0.8bbp~0.28bbp) 之间时, 失真不明显, 视觉效果可以接受。

压缩比在 50 以上 (0.28bbp 以下) 时, 失真较明显。



源图像

Cr=18.80

Cr=34.45

Cr=46.30

参考文献

- [1] William B. Pennebaker 著, JPEG 静止图像数据压缩标准, 学苑出版社, 1996

- [2] Daubechies, I. : Orthonormal bases of compactly supported wavelets, Comm. Pure and Appl. Math. 41 (1988), 909 - 996
- [3] 高文 著, 多媒体数据压缩技术, 电子工业出版社, 1994
- [4] Chen W H, Pratt W K. IEEE Trans. on COM, 1982, COM - 32(3); 37 - 43.
- [5] 田捷 沙飞 张新生 编著, 实用图像分析与处理技术, 电子工业出版社, 1995

(来稿时间: 1998 年 4 月)