

基于小波分解的分形压缩图象增强

吴更石 梁德群 杨海军

(西安交通大学图象处理与识别研究所, 西安 710049)

摘要 讨论分形解码结果图象的特点, 基于分形码对图象的放大作用, 用小波提取放大图象中的高频信息, 再用小波图象融合方法增强图象细节, 同时用小波的局部极大值的 Lipschitz 指数调整方法去除结果图象的块效应, 直接提高压缩结果图象质量, 可用于改善高压缩比的分形压缩解码结果图象质量。

关键词 分形图象压缩 小波变换

0 引言

分形图象压缩基于 Barnsley 和 Hutchinson 提出的迭代函数系统^[1]。分形图象压缩研究图象分块间的自相似性以获得压缩映像 W , 首先对图象可作一个划分 $R_i, R_i \cap R_j = \phi, i \neq j, \cup R_j = I^2$, 称之为值域集, 并定义域集 $\{D_i\}_1^n$ 和映射集 $w_i: w_i(D_i) = R_i, w_i \in W$ 。定义域集及映射集按以下原则选取, 使满足: $\forall i, d(R_i, w_i(D_i))$ 较小。这样压缩基本点在于构造一收缩映射(算子) $W: F \rightarrow F$, 收缩算子 W 及其不动点 f_0 可写为:

$$W(f_0) = W(\cup R_i) = \cup w_i(D_i) = \cup (A_i D_i + b_i) = f_0 \quad (1)$$

这里, A_i 为线性算子, $b_i \in F$ 。对图象的划分可以采用四叉树、矩形、三角形和多边形的方法。

对于 I^2 上的固定图象 f , 若能找到压缩映像 W 使 $W(f)$ 与 f 足够接近, 那么 f_0 与 f 将也是接近的, 因而, 为了找到对给定图象 f 的一个足够好的近似, 只要得到映射 W 的参数信息就足够了, 从而实现压缩。

接近程度用均方根距离定义:

$$d_{rms}(t, g) = \|t - g\|_2 = \left(\int_{I^2} |t - g|^2 dx dy \right)^{1/2} \quad (2)$$

根据分形模型的原理, 我们不难知道解码图象的主要问题在于, 由分块带来的块效应, 即所谓“人工痕迹”(artifact), 以及高频信息(细节)的损失。事

实上对块效应的研究源于图象压缩之初, 如矢量量化, JPEG 等都需要对分块效应加以消除。现在对块效应的解决一般采用自适应平滑^[2], 通过对不同的块边缘采用不同的平滑模板, 对边缘的搜索使用一般的边缘算子, 如 Sobel 算子。这种分块附近的窗口平滑本身就会造成图象高频信息的损失, 同时也会因为窗口选取的不同而导致结果的不确定, 从而缺乏自适应性。对细节损失现在几乎没有好的方法。而小波分解有助于我们在不同的尺度上找到人工边缘, 同时结合分块信息, 在与值域块大小相比拟的小尺度上对边缘进行处理, 从而达到在保留细节的前提下去除块效应的目的。

对于高频信息的补偿, 我们应用了分形码的放大作用得到的高采样率的采样图象^[3]。根据多分辨率分析的原理, 我们知道高采样率的图象空间分辨率高, 而低采样率的图象频率分辨率高。如何将高空间分辨率的图象信息提取并应用到低采样率的图象中, 最后得到细节信息增强的结果图象, 我们用到了小波分解图象融合(merging)的方法。小波分解图象融合由 D. A. Yocky 提出并将其应用于彩色图象的增强^[4], 其基本原理是在不同尺度下将高采样率的灰度图象融入低采样率的彩色图象中, 采用的是直接将后者的小波系数用前者代替的方法。我们的方法是基于对两者(高低采样率图象)同一尺度下的小波系数的分析, 最后融合的方法, 较大程度地恢复了图象细节信息。下面首先对图象小波分解作简单回顾, 分别就去除块效应和细节增强算法作一说明, 最后给出结果讨论。

1 图象的多尺度小波分解

Mallat 为了将 Canny 边缘检测方法和多尺度小波边缘检测方法更好地结合起来,提出了基于双正交的二次 B 样条基的非抽样小波分解方法,证明了小波分解系数的局部模极值点与 Canny 边缘检测算子的等价性,这种边缘检测方法的优点是能用快速算法得到不同尺度上的边缘分布,同时非抽样算法保证了局部极值点和原边缘位置上的对应。设 $\theta(x, y)$ 是二次 B 样条函数, Mallat 定义了两个方向的母小波函数 $\psi^1(x, y)$ 和 $\psi^2(x, y)$ 为:

$$\begin{aligned} \psi^1(x, y) &= \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial x} \\ \psi^2(x, y) &= \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial y} \end{aligned} \tag{3}$$

尺度 j 上二进小波函数为 $\psi_j^1(x, y) = 2^{-2j} \psi^1(2^{-j}x, 2^{-j}y)$, $\psi_j^2(x, y) = 2^{-2j} \psi^2(2^{-j}x, 2^{-j}y)$, 令 $f(x, y) \in L^2(R^2)$ 在尺度 j 上的小波变换具有两个分量, 定义为

$$\begin{aligned} W_j^1(x, y) &= f * \psi_j^1(x, y) \\ W_j^2(x, y) &= f * \psi_j^2(x, y) \end{aligned} \tag{4}$$

$$\left[\dots \left[\frac{1}{2} \left(\left[\frac{1}{2} (W_h + W_g + W_p - 1) \right] + W_h + W_g - 1 \right) \right] + \dots \right] \tag{5a}$$

其中符号 $\lceil \cdot \rceil$ 表示取不小于 x 的整数。对于不抽样 (undecimated) 的二进小波变换通过分解后的 J 尺度下的小波系数支撑不大于

$$\sum_{j=1}^J (2^{j-1}(W_h + W_g) + W_p - 1) - 1 \tag{5b}$$

上面结论可以通过卷积性质简单推出。对于不抽样的二进小波变换, 边缘可通过小波变换后系数的局部模极值 (modulus maximum) 得到, 但是如果离散滤波器 $h(n)$ 和 $g(n)$ 的支撑不是关于零点对称时, 其分解结果上的局部模极值位置会有偏移, 对于二次 B 样条, 容易得到这个偏移在 J 尺度下是左偏 2^{J-2} 。对于阶跃边缘, 小波变换后的近似函数的边缘会逐渐平缓, 但一直存在, 实验证明, 对于二次 B 样条二进小波分解在尺度 3 以后可认为足够平滑。

分形解码结果图象中的块效应产生是因为分块匹配时我们求的是式(2)最小, 这样造成在某些个别点上的过分差异, 如果这些差异产生在分块处, 则造成块效应。当然在分块处也可能有原图的边缘, 这里我们通过计算 α 来判断该点的边缘是否块效应造成

Mallat 证明尺度 j 上的图象 Canny 边缘由两个方向的分量 $W_j^1(x, y)$ 和 $W_j^2(x, y)$ 的模极值得到, 同时给出了小波分解的快速算法^[5]。

2 分形解码图象块效应去除

在 Hölder 空间 C^α 中, 小波分解系数因信号的不同, Lipschitz 指数 α 随分辨尺度的增加有不同的变化规律。对于阶跃边缘 ($\alpha=0$), 其小波分解系数在不同尺度下保持不变。利用这个性质, 我们可以方便地从小波系数比较中找到阶跃边缘。

对于块痕迹, 其起源是在分形编码时强行分块造成的分块边缘的灰度不平衡, 这是一种阶跃边缘, 它的小波系数局部在不同尺度上会呈现一种近似不变的性质。

我们首先讨论边缘通过分解后其小波系数支撑, 设小波分解的低通平滑滤波器 $H(\omega)$ 的支撑 $supp_{h(\omega)} = W_h$, 高通滤波器 $G(\omega)$ 的支撑 $supp_{g(\omega)} = W_g$, 对于抽样 (decimated) 的二进小波变换, 设边缘模式的宽度为 W_p , 通过分解后的 J 尺度下的小波系数支撑不大于

的阶跃边缘, 然后, 利用平滑边缘 Lipschitz 指数 α 大于 0 的原理, 对小尺度的边缘系数进行小窗口、大比例的压缩, 对大尺度的边缘系数进行大窗口小比例的压缩。使得结果的小波系数在不同尺度上的幅度变换成为随尺度增大而变大, 使原来的阶跃边缘成为平滑边缘, 从而保护了图象的原有细节不变。

算法总结如下(块效应消除算法):

根据 Mallat 的多尺度边缘提取算法, 先用二次 B 样条进行离散二进小波分解, 将图象分解至 $J=4$ 尺度; 根据图象值域块分区信息(二叉树), 在尺度 1 上的 x, y 两个方向块边缘处分别搜索局部极值, 若有极值点, 记录其位置 x_i, y_i 和大小 Mx_i 和 My_i ; 在尺度 2, 3, 4 上按照一定偏移(见文献[5])搜索 x, y 两个方向极值, 将结果分别与比较, 如果差别小于一定值 T , 认为这个边缘为块效应造成的阶跃边缘; 记录其位置为 $\{x_i, y_i\}_{j=1,4}$; 根据比例系数 $a \times j$ ($j=1,4$) 在式(5.40)决定的尺度 j 的窗口内对小波系数进行压缩; 最后进行小波变换重建得到消除块效应的图象。

3 分形解码图象细节增强

根据前面的分形编码方法,定义域和值域块的映射中包括一个收缩映射的操作,一般采用的收缩尺度为 2,如果在映射中不用这个收缩操作,总体映射后会得到一个比原图尺寸大的图,一般称之为分形放大^[2],如果收缩尺度为 2,则一次放大的倍数也是 2。一般认为,分形放大方法比线性插值方法好,这是因为理论上图象是分形码的不动点,分形放大方法较少地引入块效应并引入了一些高频信息,有助于高频信息的恢复^[3]。

小波分解的图象融合方法首先是用于多谱段(multispectral)图象的增强,其方法是利用全色(panchromatic)图象的空间高分辨率,用全色图象的小波分解系数代替需要增强的多谱段(彩色)图象的系数,从而增强了多谱段图象的细节。这提示我们可以通过修改图象分解的小波系数达到增强图象细节的目的。当然,如何修改小波分解系数正是我们要研究的。这里需要有另外的信息量以修正小波系数。利用分形码放大的图象小波分解系数正好充当这个角色。

从 Marr 的视觉理论 LOG 算子边缘提取,到 Canny 边缘,再到 Mallat 对多尺度边缘的刻画,无疑说明了边缘在图象中的重要性,事实上,仅根据边缘位置本身就可以重建图象^[5]。根据多尺度边缘理论,边缘点位于小波系数的局部方向极值处,这与一阶导数极值点是一致的。另外,因为分形码放大后的图象是原图的两倍(见图 1),原来的局部极值检验成为(b),对(b)模板的每四点可看成原图的一点,这样对原图中某一点是否局部极值的模板(a)的检验,可以变更成模板(b)的检验,其具体方法是对原图中一点的检验,变成相应四点的检验,同样检验中用到的相邻点分别以 8 个邻域中每邻域内有 4 点,如果检验到最大的局部极值,则用这一组极值系数代替原来的小波系数。这种融合方法实际上通过增加局部极值点的方法增多了图象边缘,最后增大了图象细节。

具体算法总结如下(细节增强算法):

应用多尺度边缘算法对原图和分形码放大图象进行小波尺度分解;在每个尺度上,从右上角开始逐点对两幅图分别计算模极大值和边缘点;用具有边缘点情况的局部模极大值的点组合代替原图的小波系数,具体替代方法见图 1;应用多尺度重建算法对原图重建,用重建图象作为增强的解码结果。

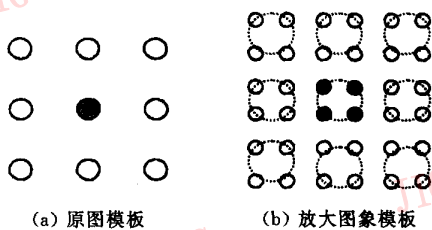


图 1 多尺度局部极值抽取模板

4 结果讨论

对于块效应消除,图 2 显示了一幅压缩 89 倍的 Lenna 图象的块效应和经过块效应消除算法处理后的结果图象,其信噪比由 24.55dB 提高到 25.51dB,近 1dB,从结果图象可以看出结果图象很好地去除了块效应,同时保留了图象原有的细节,这种基于小波变换的算法是在不同尺度上采用不同窗口(小尺度细节用小窗口,大尺度时用大窗口),对小波变换后的系数进行 Lipschitz 指数的调整而非一般平缓,严格地说,这种处理是非线性的,同时是在值域块分区信息的引导下,因此可以在保留细节的结果下得到较理想的去除块效应结果。同时我们认为这种块效应消除方法同样可以用于其它压缩方法(如 JPEG)造成的块效应。



缩比 89.86, PSNR24.55dB

PSNR25.51dB, 消除了块效应

图 2 块效应消除算法的实验结果

块效应消除后会对图象造成一定的模糊,本文再利用细节增强算法进行图象细节增强。通过实验,算法中用到的多尺度分解一般只用到三阶,更多的阶数已对细节的增强无太大作用,另外也可以加上迭代进一步提高细节(如图 3),这种迭代方法一般次数不超过 5 步(迭代细节增强算法)。实验用到了一幅图象细节较多的 Baboon 图象,图 4 显示了压缩 47.18 倍的复原的 Baboon 图象,和通过细节恢复后与原图大小一致的图象。通过计算图象信噪比由 23.15dB 提高到了 24.95dB,图象中的细节明显得到的增强,特别是狒狒的毛发部分。

通过对上面两种分形解码图象增强方法的讨论,可以看到这里讨论的两种图象增强算法事实上都是利用了小波分解系数性质的讨论结果,根据先验信息,通过在小波变换域的系数修正,达到解码图象增强的目的。这种思想是普遍适用的。最后可以根据两种算法总结出分形解码图象增强算法如下:

- (1) 应用分形码得到解码结果图象 f_0 和放大图象 Af_0 ;
- (2) 应用块效应消除算法;
- (3) 应用细节增强算法得到增强结果图象 f_n ;
- (4) 对图象应用分形码得到放大图象 Af_n ,用公式计算 Af_n 和 Af_{n-1} 的距离,当小于预定门限时,得到结果图象 f_n ,否则返回(2)。

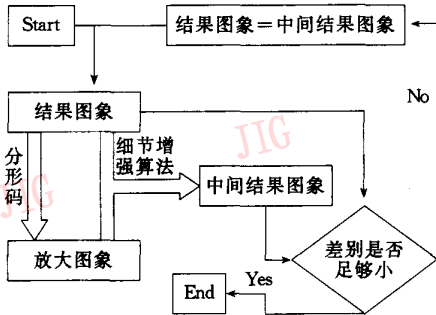
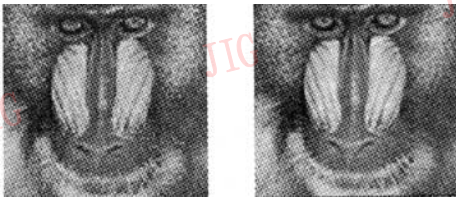


图3 迭代细节增强流程图



缩比 47.18, PSNR23.15dB PSNR24.95dB

图4 算法 5.5 处理 Baboon 的结果

我们应用增强算法对一系列静止分形解码图象进行了增强,其结果如表 1,一般提高信噪比 2dB 左右,同时经过主观评价,一般提高了将近一个等级(从 3 级到 4 级)。



梁德群 1966年毕业于西安交通大学工企专业,1967至1997年在西安交通大学任教,现为大连海事大学教,博士生导师。主要研究方向为图象处理与模式识别,特别是在图象检测的硬件结构和软件设计方面有独特的研究兴趣与成果。



吴更石 1991年毕业于华中理工大学电信系,1994年获得西安交通大学模式识别与智能控制专业硕士学位,现为西安交通大学通信与电子系统专业博士研究生。主要研究方向为分形信号,图象处理的理论和应用,数字通信和 ASIC 设计。



杨海军 1994年毕业于西安交通大学应用物理专业,1997年获得西安交通大学模式识别与智能控制专业硕士学位,现为西安交通大学通信与电子系统专业博士研究生。主要研究方向为图象检测,图象理解,神经网络以及人工智能。

表 1 增强算法对一些压缩结果图象的增强效果

图名	遗传搜索法的压缩结果		增强效果 (dB)
	压缩效率	PSNR(dB)	
Finger	54.18	22.13	25.03
Miss	95.11	23.52	27.66
Swim	63.82	24.87	25.98
Woods	43.25	23.10	24.36
Slr	52.35	25.14	26.25
S. Frans.	55.18	24.19	26.03
Pso	48.17	22.52	24.46
Peppers	52.18	26.10	27.25
Baboon	41.78	23.15	24.95
Lenna	89.86	24.55	25.51

参考文献

- 1 Barnsley M F. Fractal Everywhere. Boston, MA: Academic Press, 1988.
- 2 Lee Y L, Kim H C, Park H W. Blocking effect reduction of JPEG images by signal adaptive filtering. IEEE Trans Image Processing. 1998, 7(2): 229~234.
- 3 Fisher Y. Fractal Compression: Theory and Application to Digital Images. New York: Springer-Verlag, 1994.
- 4 Yocky D A. Image merging and data fusion by means of the discrete two-dimensional wavelet transform. J Opt Soc Am A, 1995, 12(9): 1834~1845.
- 5 Mallat S G. Characteristics of signals from multiscale edges. IEEE Trans on Pattern Anal Machine Intell, 1992, 14(7): 710~732.

Fractal Compression Image Enhancement Using Wavelet Decomposition

Wu Gengshi, Liang Dequn and Yang Haijun

(Image Processing Centre, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract The method of improving the PSNR in fractal compression is studied. Based on the magnification effect of fractal code for image, the algorithm extracts the high frequency information in the zooming out image by wavelet transform, then merges the information into the decoded image by wavelet transform. A modification method of Lipschitz exponent of wavelet coefficients local module maximum is also investigated in order to get rid of the blocking effect in the result image. This kind of method is used to improve the PSNR of result image in low-bits-rate image compression.

Keywords Fractal image compression, Wavelet transform

刘旦先生在联想与 Diamond 公司合作签约仪式上的讲话

尊敬的各位来宾、Diamond 公司刘亮先生、沈培基先生及业界各位同仁:

大家好!我是联想电脑公司台式电脑产品部的副总经理刘旦,首先请允许我代表联想公司欢迎各位媒介朋友和合作伙伴的光临。很高兴能有机会表达我们与 Diamond 公司合作的真诚愿望,以及我们对工作站市场发展的看法。

Diamond 公司是经营业务广泛的国际知名大公司,尤其在娱乐、游戏卡、专业显示卡等领域成绩斐然,令人瞩目。其定位于中端专业市场的 Fire GL1 专业显示卡,在今年 6 月份《个人电脑》杂志的 3D 图形卡测试中,以令人惊异的高分当之无愧地夺得专业产品桂冠,显示出 Diamond 公司在这一领域非凡的实力。

此次 Diamond 公司与联想签约合作,体现了 Diamond 公司明智的中国市场策略。同时,也符合联想电脑公司的总体发展战略。

世纪之交,Internet 大潮为计算机用户带来了新的应用需求,也给厂商带来了新的挑战。对此,联想电脑的战略是:成为因特网全面产品和服务的供应商,我们将根据面向因特网的功能、应用需求,构筑联想电脑的产品和业务。联想补天工作站是因特网时代的专业创作工具,我们相信,目前的单机计算将转化为未来的网络计算。

以“结联世界,着想中国”为座右铭的联想,致力于“让中国人用得更好”。自 1997 年第一台补天工作站问世以来,联想不断推陈出新,为广大用户提供“高性能、专业化、用得起”的产品,一方面倡导技术的进步,一方面推动应用的普及和深化,以更优秀的产品创造出更高的生产效率。到目前为止,联想已形成了包括补天 1100、2200、3000 在内的低、中、高档完整的产品系列。

这次与 Diamond 公司合作的主要产品联想补天 2200,是联想目前主推的面向专业用户和专业应用的中高档工作站。该款产品采用业界最新技术,主机系统性能强大,运行稳定,兼容性好,可以满足大型应用软件对系统资源和安全的苛刻要求。

补天 2200 工作站配备了 Diamond 公司的 Fire GL1(32M)专业显示卡。通过该产品的特殊支持,双 CPU 工作站具有了广泛的应用价值。这两款互补性极强的产品的相互搭配,使二者的性能都得到了充分的发挥。

产品的互补性是联想与 Diamond 合作的客观基础,而双方对中国工作站市场和工作站技术发展的共识将保证合作的成功。这次联想与 Diamond 公司的合作是工作站厂商与专业显示卡厂商的强强联手,相信双方都将从合作中获益,而中国用户更能从中获益。

最后,再次感谢大家的光临,预祝联想与 Diamond 公司合作圆满成功!谢谢大家!

1999 年 9 月 9 日于香格里拉