

基于局部边缘和变化率检测的无损图像压缩方法^{*}

A Lossless Image Compression Algorithm Based on Detection of Local Edge and Variance Ratio

赵军^{1,2} 王国胤¹ 吴中福² 吴渝¹ 李华²

(重庆邮电学院计算机科学与技术研究所 重庆400065)¹

(重庆大学计算机科学与工程学院 重庆400044)²

Abstract In this paper, a new predictive coding algorithm is presented for lossless image compression. This algorithm considers both the local edge and the variance ratio of pixel value in prediction process. It further reduces the entropy of the predictive error image with error feedback technology. Simulation results show that the performance of this algorithm is better than not only the standard algorithm (LOCO-I) provided by JPEG-LS, but also CALIC, which is the state-of-art in the literature of image compression.

Keywords Image, Lossless compression, Edge, Variance ratio

1 引言

图像是一种重要的信息表达载体,其表达力强,但数据量庞大,因此图像数据的存储和传输都要求对数据进行有效的压缩。一些实际的应用要求这种压缩是无损的,比如医学图像、遥感图像、图像存档等。如何在保证无损的前提下尽可能提高图像的压缩效率,对于这些与图像有关的应用(尤其是基于 Internet 或其它广域网的应用)而言,具有非常重要的意义。

图像无损压缩的理论框架一直是基于图像局部统计特征、具有自适应能力的预测编码方法^[1]。这种压缩方法的压缩过程分两步进行:第一步:解相关,这一步利用相邻像素之间的相关性,采用预测技术来消除图像在空间的冗余信息。为了得到好的预测效果,要求预测模型能够根据图像的局部特征进行自适应调整。第二步:编码,这一步采用熵编码方法对预测误差进行有效的压缩和表达。

文献报道的预测模型的自适应策略比较简单,总的说来有以下几种方式:或者根据图像沿水平方向和垂直方向的边缘信息、或者根据像素值的变化趋势、或者根据前一像素的预测结果来对预测函数进行自适应调整^[2,5~10]。我们提出的压缩算法在解相关阶段充分

利用了图像的局部特征,不但检测和利用了图像沿水平方向和垂直方向的局部边缘信息,而且增加了对沿斜方向边缘信息的检测和利用;并且算法在预测过程中,定义并利用了相对变化率来提高预测精度;最后,算法再结合像素值的变化趋势对预测结果进行进一步修正。在编码阶段,算法采用误差反馈技术来进一步降低误差图像的信息熵。对标准图像集合的仿真测试结果表明,本算法的性能显著优于 JPEG-LS 提供的标准算法—LOCO-I,也明显优于文献报道的压缩效果最佳^[2~4]的算法 CALIC。

本文给出算法的技术细节,重点讨论算法的预测模型;并给出算法的仿真实验结果,最后是本文的结论。

2 基于局部边缘和变化率检测的图像无损压缩算法

2.1 预测模型

预测模型只能利用已经编码的像素作为预测当前像素值的依据,否则将无法实现镜像的解码操作,预测模型所采用的像素构成预测邻域。图1中给出了二维图像中,相邻像素之间位置关系的标记方法。其中: $[i, j]$ 表示当前像素的位置;W表示西(West),N表示北

^{*} 本文得到国家863计划“多媒体数据动态压缩及其应用研究”(编号:863-317-04-18-99)、重庆邮电学院科技基金“图像无损压缩技术研究”(编号:A2001-25)资助。赵军 讲师、博士生,王国胤 博士、教授,主要研究领域为知识获取、数据挖掘、Rough集、神经网络、多媒体处理等。吴中福 教授、博导,主要研究领域为计算机网络与通信、现代远程教育技术等。吴渝 博士、副教授,主要研究领域为小波分析、数据挖掘、多媒体处理等。李华 高工,主要研究领域为计算机网络通信、现代远程教育技术等。

(North),即 W 表示位置 $[i, j-1]$, N 表示位置 $[i-1, j]$,其余类推。坐标为 $[i, j]$ 的像素的值记为 $I[i, j]$,其预测值记为 $\hat{I}[i, j]$,预测误差记为 $e[i, j]=I[i, j]-\hat{I}[i, j]$ 。

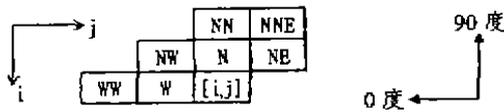


图1 相邻像素位置关系标记方法

2.1.1 变化率的定义 变化率对像素值的变化趋势具有较强的表征作用;变化率的符号预示了像素值的增减,变化率的绝对大小预示了像素值的变化快慢,研究表明,只有当像素值具有显著的、确定的变化趋势时,定义变化率才具有实际意义,并且,所定义的变化率不但应该能够反映一定的物理意义,而且必须保证具有适当的取值幅度,若变化率的幅度过小,它对预测结果的调节能力过弱,将不能取得好的预测结果;若变化率的幅度过大,同样将会使预测结果偏离像素的实际值。在实验研究的基础上,本算法采用如下方式来定义变化率:

分别记沿0度、90度45度和135度方向的变化率为 R_w, R_n, R_{nw}, R_{ne} :

定义沿0度、90度的三个梯度分量 $G_{w1}, G_{n1}(i=1, 2, 3)$:

$$G_{w1}=I_w-I_{ww}; G_{w2}=I_n-I_{nw}; G_{w3}=I_{ne}-I_n$$

$$G_{n1}=I_n-I_{nn}; G_{n2}=I_w-I_{nw}; G_{n3}=I_{ne}-I_{nne}$$

定义沿0度、90度方向的梯度 G_w, G_n :

$$G_w=abs(G_{w1})-abs(G_{w2})+abs(G_{w3})$$

$$G_n=abs(G_{n1})+abs(G_{n2})+abs(G_{n3})$$

记 $2I_w+3I_n-2I_{nw}+2I_{ne}+I_{ww}+I_{nn}+I_{nne}$ 为

M

定义沿0度、90度方向的变化率 R_w, R_n :

若 G_w 的三个分量均大于零,则 $R_w=G_w/M$
 否则若 G_w 的三个分量均小于零 $R_w=-G_w/M$
 否则 $R_w=0$;
 若 G_n 的三个分量均大于零,则 $R_n=G_n/M$
 否则若 G_n 的三个分量均小于零 $R_n=-G_n/M$
 否则 $R_n=0$;

定义沿45度方向和135度方向的变化率 R_{nw}, R_{ne} ,这两个方向的变化率由0度和90度方向的变化率合成:

$$R_{ne}=(-R_w+R_n)/2; R_{nw}=(R_w+R_n)/2$$

2.1.2 预测函数 预测函数一方面通过使用变化率来提高预测的准确度,另一方面在图像中沿水平和垂直方向均不存在边缘时,进一步检测沿斜方向的边缘,并根据检测结果来调整预测模型。这样,预测函数对那些局部区域中存在沿斜方向边缘的图像将可以取得更精确的预测结果。

基本预测函数:

$$\hat{I}[i, j]=(I_n*(1+R_n)+I_w*(1+R_w))/2+(I_{ne}*(1+R_{ne})-I_{nw}*(1+R_{nw}))/4$$

根据边缘检测结果对预测结果进行修正,使预测值尽可能沿局部边缘取值,记 G_n-G_w 为tmp:

若tmp大于8,则边缘沿0度方向,记 $I_w*(1+R_w)$ 为tPx1

否则若tmp小于(-8),则边缘沿90度方向,记 $I_n*(1+R_n)$ 为tPx1

若tmp的绝对值大于80,则边缘非常明显, $\hat{I}[i, j]$ 直接取值 tPx1

否则若tmp的绝对值大于32,则边缘较明显,对基本预测结果进行沿边缘方向的修正,修正量较大: $\hat{I}[i, j]=(\hat{I}[i, j]+tPx1)/2$

否则若tmp的绝对值大于8,则边缘较弱,对基本预测结果进行沿边缘方向的修正,修正量较小: $\hat{I}[i, j]=(3\hat{I}[i, j]+tPx1)/4$

否则沿0度和90度方向均不存在边缘,但如果沿0度或90度方向的梯度值均大于160,则沿45度或135度方向可能存在强边缘:

如果 (I_n-I_{nw}) 与 (I_w-I_{nw}) 同号,则沿45度方向存在强边缘, $\hat{I}[i, j]=I_{nw}*(1+R_{nw})$

否则如果 $(I_{ne}-I_n)$ 与 $(I_{ne}-I_{nne})$ 同号,则沿135度方向存在强边缘, $\hat{I}[i, j]=I_{ne}*(1+R_{ne})$

进一步根据像素值的变化趋势对预测结果进行修正:统计 G_w, G_n 中小于零的分量个数,结果存于nMinus中

统计 G_w, G_n 中大于零的分量个数,结果存于nPlus中记nMinus-nPlus为tmp

若tmp小于6且大于2则 $\hat{I}[i, j]=(8\hat{I}[i, j]+min(I_n, I_w))/9$

否则若tmp大于(-6)且于小(-2)则 $\hat{I}[i, j]=(8\hat{I}[i, j]+max(I_n, I_w))/9$

对于tmp等于±6的情形,在预测时已经通过变化率加以考虑,故此处予以排除,阈值2和系数8乃通过对大量图像集合的离线学习而得,具有与具体图像特性基本无关的性能。

2.2 三元算术编码

只有当图像的像素值变化具有连续特性时,预测结果才可能有较高的准确度,才可能通过对预测误差进行编码的方式有效地压缩数据,对那些像素值变化很快的图像或者图像中的局部区域,为了能够取得同样好的压缩效果,在算法中引入三元算术编码模块。

在进行预测之前,首先检测预测邻域中像素的取值是否只有两种或一种可能。若是,则进入三元算术编码模块对当前像素值直接编码输出。

三元算术编码的工作方式是:设 I_w 为 s_1 , 另一像素值(若存在)为 s_2 , 则 $I[i, j]$ 可以映射为三种情况之一:

$$T = \begin{cases} 0 & I[i, j] = s_1 \\ 1 & I[i, j] = s_2 \\ 2 & \text{Otherwise} \end{cases}$$

三元算术编码模块直接对映射结果 T 编码,若映射结果为2,算法转入预测模块。

2.3 误差模型化和误差反馈

尽管使用了较为复杂的技术来进行预测,但误差图像中仍然存在一定的相关性,仍然存在冗余信息,为了降低误差图像的信息熵,需要建立适当的误差模型。

定义误差能量估计器:

$$\Delta = G_w + G_n + 2(I[i, j-1] - \hat{I}[i, j-2])$$

将 Δ 量化为8级,量化阈值为:5, 15, 25, 42, 60, 85, 140, 量化结果记为 Δ_q 。

构造上下文。上下文由预测邻域内的像素值或其运算构成:

$$C = \{X_2, X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7\} = \{I_n, I_w, I_{nw}, I_{ne}, I_{nn}, I_{ww}, 2I_n - I_{nn}, 2I_w - I_{ww}\}$$

为消除“稀疏上下文”问题^[12-13],将上下文映射为8bit 整数 $B = b_0 b_1 \dots b_7$, 其中:

$$b_k = \begin{cases} 0 & X_k \geq \hat{I}[i, j] \\ 1 & X_k < \hat{I}[i, j] \end{cases} \quad 0 \leq k < 8$$

为进一步使预测误差趋近于零,求出当前像素所对应的上下文 (Δ_q, B) 中的平均预测误差值 \bar{e} , 并将其反馈给预测模块,对预测结果进行修正: $I[i, j] = \hat{I}[i, j] + \bar{e}$

2.4 预测误差的算术编码

对预测误差采用自适应算术编码器进行编码。算术编码器是一种熵编码器,具有极高的编码效率,而且可以直接从 Internet 上获得代码。

2.5 算法复杂性分析

由于本算法与 CALIC 采用了同样的预测邻域,因此对空间的要求也同于 CALIC。为了实现快速预测,同样需要能够存储三个原始像素行的缓冲区。与 CALIC 相比,本算法的空间复杂度略有增加,但二者的差别是微不足道的。

从预测过程来看,本算法也比 CALIC 略复杂,但所增加的处理均为条件运算或者简单的算术运算,用软件或硬件都很容易实现,其时间复杂度与 CALIC 完全相同。

3 算法的仿真实验结果

我们实现了本文提出的算法,并对一套标准测试

图像集^[14]进行了无损压缩实验。表1对几种算法的压缩效果进行了对比。从仿真实验结果可以看出,本文提出的压缩算法显著优于 LOCO-I,也优于 CALIC。

表1 算法压缩结果比较表(bpp)

Image	LOCO-I	CALIC	PROPOSED
Bird	3.47	3.40	3.40
Lenna	4.58	4.45	4.44
Barb	4.73	4.50	4.49
Boat	4.25	4.18	4.17
Goldhill	4.71	4.65	4.64
Lenna2	4.24	4.13	4.12
Washsat	4.13	3.65	3.65
Zelda	4.01	3.88	3.87
Circles	0.15	0.10	0.09
Crosses	0.39	0.16	0.13
Horiz	0.09	0.06	0.04
Montage	2.72	2.77	2.75
Slope	1.56	1.65	1.56
Squares	0.08	0.02	0.02
Text	1.63	0.54	0.44
France	1.41	1.13	1.13
Average	2.63	2.46	2.43

结论 本文介绍了一种新的无损图像压缩算法。该算法在预测阶段充分利用了图像的局部统计特征,既检测和利用图像局部区域中可能存在的沿0度、90度、45度和135度的边缘信息,又利用了像素值的变化率信息来提高预测精度,并根据像素值的变化趋势对预测结果进行修正。在此基础上,引入误差反馈技术进一步降低误差图像的信息熵,并使用算术编码器来对误差图像进行压缩和表达。在比 CALIC 算法略微增加复杂性的基础上,压缩效果显著优于 LOCO-I,明显优于 CALIC。

参考文献

- 1 Wu X. Lossless Compression of Continuous-Tone Images via Context Selection, Quantization, and Modeling. IEEE Trans on Image Processing, 1997, 6(5): 656~664
- 2 Wu X, Memon N. Context-Based, Adaptive, Lossless Image Coding. Trans. on Communications, 1997, 45(4): 437~444
- 3 Memon N, Wu X. Recent Development in Context-Based Predictive Techniques for Lossless Image Compression. The Computer Journal, 1997, 40(2/3): 127~136
- 4 Memon N, Sayood K. Lossless Image Compression—a Comparative Study, 1995, In Still Image Compression, SPIE Proc. 2418: 8~20
- 5 Howard P, Vitter J. Error Modeling for Hierarchical Lossless Image Compression. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, Proc. Data Compression Conf., 1992, 269~278
- 6 Weinberger M, Seroussi G, Sapiro G. LOCO-I: New Development. ISO Working Document ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 N245, 1995
- 7 Memon N, Sayood K, Magliveras S. Lossless Image Compression with a Codebook of Block Scans. IEEE J. Select. Areas Commun., 1995, 13: 24~31

(下转第29页)

3 试验结果与结论

设大小为 $M \times N$ 的原始图像为 $f(x, y)$, 简记为 f , 经过 Gaussian 噪声污染之后的图像为 $f'(x, y)$, 简记为 f' , 则含噪图像的信噪比定义为

$$SNR = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (f - \bar{f})^2}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (f - f')^2} \right] \quad (10)$$

其中 \bar{f} 表示图像 $f(x, y)$ 的均值, 该图像的均方差为

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (f - \bar{f})^2 \quad (11)$$



(a) 原始 Lenna 图像

(b) 加 Gaussian 噪声的图像

(c) 去噪之后的 Lenna 图像

图1 Lenna 图像的去噪结果

小波变换多尺度分解的思想在信号与图像去噪中有着重要的应用, 由于信号与噪声的幅值在小波变换下有不同的传播特性, 因此大多数去噪算法都是基于小波系数的幅值特性。然而对于信噪比 SNR 较低的图像来讲, 在小尺度的小波变换域内, 图像的真实信息往往被噪声所淹没^[9]。因此本文研究了信号与噪声的相位在小波变换下的不同特性, 然后提出一种对幅度不敏感的小波相位滤波算法, 该算法适于强噪声的去除。从本文的试验结果可以看出, 该算法不仅有效, 而且较以往的方法体现了极大的优越性。

参考文献

- Nowak R D, Baraniuk R G. Wavelet-domain filtering for photon imaging systems. IEEE Trans. on IP. , 1999, 8(5): 646~678
- Donoho D L. De-noising by soft-thresholding. IEEE Trans. on IT , 1995, 41(3): 613~627
- Daubechies I Ten lectures on wavelets. Philadelphia: SIAM, 1992
- Mallat S, Zhong S. Characterization of signals from multi-scale edges IEEE Trans. on PAMI, 1992, 14(7): 710~732
- Chang S G, Yu B, Vetterli M. Spatially adaptive wavelet thresholding with context modeling for image denoising. IEEE Trans. on IP, 2000, 9(9): 1522~1531
- Chang S G, Yu B, Vetterli M. Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression. IEEE Trans. on IP, 2000, 9(9): 1532~1546
- 赵瑞珍, 宋国乡. 一种基于小波变换的白噪声消噪方法的改进. 西安电子科技大学学报, 2000, 27(5): 619~622
- 许雷, 郑筱祥, 陈兴灿. 一种基于小波相位滤波及视觉非线性性的医学图像自适应增强新方法. 电子学报, 1999, 27(9): 121~123
- Gandhi B, Honsinger C, et al. A Proposal Submitted in Response to Call for Contributions for JTC 1. ISO Working Document ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 N204, 1995
- Rissanen J, Langdon G. Universal Modeling and Coding. IEEE Trans. Inform. Theory, 1981, IT-27: 12~22
- Todd S, Langdon G, Rissanen J. Parameter Reduction and Context Selection for Compression of Grayscale Images. IBM J. Res. Develop. , 1985, 29: 188~193
- 可通过下述方式获得: ftp://links.uwaterloo.ca/pub/bragzone. http://links.uwaterloo.ca/bragzone_base.html

(上接第32页)

- 赵德斌, 陈耀强, 高文. 基于块方向预测和 Context 的图像无失真编码方法. 软件学报, 1998, 9(10)
- Speck D. Proposal for Next Generation Lossless Compression of Continuous-tone Still Pictures: Activity Level Classification Model (ALCM). ISO Working Document ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 N198, 1995
- Ueno I, Ono F. CLARA: Continuous-tone Lossless Coding with Edge Analysis and Range Amplitude Detection. ISO Working Document ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 N197, 1995