

一种离散色调图像无损压缩方法

刘雄恩¹, 黄晓阳^{2*}

(1. 福建农林大学计算机与信息学院, 福建 福州 350028; 2. 厦门大学信息科学与技术学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 针对离散色调彩色图像的数据冗余特点, 在游程编码(RLE)与字典编码的基础上, 提出一种混合编码方式, 对离散色调彩色图像进行无损压缩. 实验结果表明, 该方法可以取得 0.1~0.6 bits/pixel 的压缩后像素深度, 压缩率明显优于 JPEG2000 无损模式, 也在一定程度上优于其他适用于离散色调图像的压缩方法, 如 GIF 和 PNG 等.

关键词: 离散色调图像; 无损压缩; 游程编码(RLE); LZMA 算法; 混合编码

中图分类号: TP 391

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2014)01-0031-05

现有的图像压缩方法大多是针对连续色调图像而设计的, 连续色调图像的相邻像素通常具有相似的亮度和颜色, 在二维平面的不同方向上亮度和颜色在视觉上的变化基本是连续的. 采用离散余弦变换(DCT)和小波变换等编码方法, 在有损模式下通过选择性地丢掉视觉不敏感的信号分量, 可以达到很好的压缩效果^[1]. 由于离散色调图像具有相邻像素值相同或差异很大以及亮度或颜色变化常常是不连续的特点, 若仍采用基于 DCT 变换的 JPEG^[2] 或基于小波变换的 JPEG2000^[3] 对此类图像进行压缩编码, 无论是无损还是有损模式, 图像压缩效果都不好. 此外, 由于离散色调图像的任何信号分量都是敏感的, 有损压缩会明显地改变此类图像的质量, 因此往往采用无损压缩方式对其进行压缩.

目前流行的图像无损压缩标准包括联合图像专家组提出的 JPEG-LS 和 JPEG2000-LS; CompuServe 公司开发的 GIF 格式; W3C 组织提出的 PNG 格式和联合二值图像专家组提出的 JBIG 和 JBIG2 等. 针对离散色调图像的无损压缩方法的研究依然较少. 采用算术编码的 JBIG 和 JBIG2 是专门用于二值图像的渐进式无损压缩方法^[4-5], 它们是以相邻像素来估算当前像素的概率分布, 当这个概率分布极不均匀时可以获得紧致的压缩编码, 对于如传真之类的图像其压缩

效果较好, 而当多个位平面上存在相似结构时将导致编码冗余. 基于变形的 LZW 算法^[6] 实现的 GIF 图像压缩格式是针对离散色调图像而设计的, 但它只能处理不超过 256 色的图像^[7], 否则颜色失真, 且其一维编码仅消减了行内的数据冗余, 尽管它对于尺寸较小和 256 色以内的离散色调图像具有较高的压缩比. 基于块分解和搜索的正逆各向异性扩散模型(FABD)能消除图像的二维全局冗余而具有很高的压缩比, 其表现优于 JBIG^[8], 但其压缩率依赖于算法中对于 3 种块进行搜索计算的时间, 且速度较慢. 近年流行于网络应用的 PNG 图像压缩格式^[9] 采用 LZ77 算法与哈夫曼编码相结合的 DEFLATE 压缩算法, 能支持最高 48 位真彩色图像和 16 位灰度图像, 其压缩率不低于 GIF, 完全适用于离散色调彩色图像的无损压缩. 针对离散色调图像的冗余特点, 继文献[10]之后, 本文在游程编码(RLE)与字典编码的基础上, 再次提出一种新的混合编码方式, RLE 与 LZMA (Lempel-Ziv-Markov chain-algorithm) 的混合编码, 其对离散色调彩色图像的无损压缩效果明显较好.

1 RLE 与 LZMA 的混合编码

1.1 RLE 编码与解码

RLE 的基本原理是用一个符号值或串长代替具有相同值的连续符号, 使符号长度少于原始数据的长度. 只在各行或者各列数据的代码发生变化时, 一次记录该代码及相同代码重复的个数, 从而实现数据的压缩. RLE 是一种简单的无损压缩算法, 运算简单且压缩和解压缩都较为快速, 适用于图像中存在连续大量

收稿日期: 2013-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(61102137, 61271336, 61327001); 福建省自然科学基金(2011J01366)

* 通信作者: xyhuang@xmu.edu.cn

相同像素的情况.RLE 编码输出流是由如下所示的二元组组成的序列.

(像素值 1,重复数 1),(像素值 2,重复数 2),(像素值 3,重复数 3),...

像素值的位数取决于原始图像颜色的编码位数,如 24 位彩色图像该值以 3 字节表示,而对于黑白二值图像可以直接输出黑白交替的像素点重复数序列.

离散色调图像在水平或垂直方向上具有大量相同颜色像素线段,采用逐行或逐列扫描像素的 RLE 编码方式,以达到消减水平或垂直方向的冗余.本文采用逐行且上下行不间断的扫描方式进行游程编码.传统 RLE 算法中重复数参数的取值范围是固定的,由于重复数的取值范围变化较大,采用固定范围表示时可能存在空间浪费或溢出的问题.本文在传统 RLE 算法中对重复数参数采用变长编码的方式,以某一字节的最高位是否为 1 表示该字节是否为重复数变量的最后一个字节.算法如下.

1.1.1 RLE 编码算法

- 1) 读取图像首行的第 1 个像素值,赋予 $d1$;令 count 为 0;
- 2) 读取下 1 个像素值,赋予 $d2$;count 加 1;
- 3) 若 $d1$ 与 $d2$ 相等且未至图像末尾,重复步骤 2);否则,继续步骤 4);
- 4) 若 $d1$ 与 $d2$ 相等,count 加 1;
- 5) $d1$ 入队列;
- 6) 令 val 为 count 的低 8 位与 7FH 的值,count 右移 7 位;若 count 不为 0,再令 val 为 val 位或 80H 的值;val 入队列;
- 7) 若 count 不为 0,重复步骤 6);否则,继续步骤 8);
- 8) 令 $d1$ 为 $d2$,令 count 为 0;
- 9) 若已扫描至图像末尾,则结束;否则,转向步骤 2),重复执行.

1.1.2 RLE 解码算法

- 1) 出队列获取 1 个像素值,赋予 d ;令 count 为 0,num 为 0;
- 2) 出队列 1 个字节,赋予 val;count 加上 val 位与 007FH 且左移 num 个 7 位的值;num 加 1;
- 3) 若 val 位与 80H 的值不为 0,重复步骤 2);否则,继续步骤 4);
- 4) 连续输出 count 个像素值 d ;
- 5) 若队列已空且至 LZMA 解码末尾,则结束;否则,转向步骤 1),重复执行.

1.2 LZMA

LZMA 是 DEFLATE 和 LZ77 算法改良和优化后的压缩算法,开发者是 Igor Pavlov,它使用类似于 LZ77 的字典编码机制,在一般的情况下压缩率比 bzip2 为高^[11].LZMA 的编码流程和 DEFLATE 算法类似^[12-13],首先运用改进的 LZ77 字典编码算法生成字典索引和下一字节的二元组序列,然后对这个序列进一步采用统计编码进行二次压缩,基本流程参见图 1.与采用哈夫曼编码的 DEFLATE 算法不同,LZMA 采用算术编码并以动态马尔可夫过程来预测下一字节出现的概率,其压缩性能显著提升.LZMA 中的算术编码是以二进制的方式实现的,编码过程中频繁的整数除法以移位的方式进行,由此形成快速的编码过程.

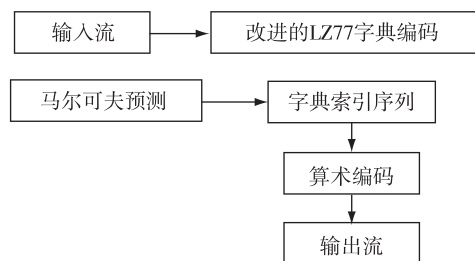


图 1 LZMA 压缩编码流程

Fig. 1 Flow chart of LZMA encoding

1.3 基于 RLE 与 LZMA 的混合编码算法

采用 RLE 压缩编码离散色调图像,仅能揭示像素在一维水平方向上的相关性和减小行内的冗余度,却完全没有考虑垂直方向上的相关和冗余,其压缩效果有限^[10].单独使用基于字典编码方法的 LZMA,逐行扫描图像,同样对于垂直方向上像素间的相关性未予直接考虑,且因离散色调图像相同颜色的像素的连续而重复出现,字典会迅速膨胀,而当前字典中许多前缀词条后续不再利用或者很少利用,使字典索引标识过早加长,因此也难于取得好的压缩效果.典型的离散色调图像在水平和垂直 2 个方向上同时存在相关和冗余,或者存在多个相同或相似的二维局部区域,由上述 RLE 生成的像素值与重复数二元组构成的序列,不仅在一定程度上消除了原图像在水平方向上的冗余,而且很好地压缩并保留了垂直方向的相关信息,一次压缩所得到的二元组序列的冗余特性十分适宜采用基于字典编码的方法,如 LZW 算法或 LZMA,对其进行二次压缩.LZMA 的基本原理是基于字节序列的字典匹配,通过 RLE 编码后相同的像素值已得到高度聚合并使得二维图像压缩成一维的线性序列,

这使得 LZMA 的匹配更加便利,从而使得二次压缩能够得到理想的效果.

本文采用 RLE 与 LZMA 相结合的混合编码压缩方法的基本流程如图 2 所示.压缩混合编码的步骤是:1) 首先启动一个线程,逐行且上下行不间断地扫描原始图像像素,以前文所述的 RLE 编码并输出至一个共享队列存储;2) 当队列长度达到一定阈值时启动另一并行的线程,它以队列的出队数据作为 LZMA 的输入流,以 LZMA 编码并输出最终的压缩码流.解压步骤是一个大致相反的过程,首先启动一个线程,它以 LZMA 解码压缩码流并输出到一个共享队列,当队列长度达到一定阈值时启动另一并行的线程,此线程以出队数据作为 RLE 解码过程的输入流,最终输出和恢复图像数据.

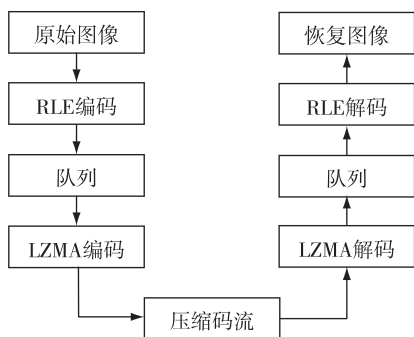


图 2 RLE 与 LZMA 混合编码的压缩与解压流程
Fig. 2 Flow chart of compression & decompression with hybrid encoding by RLE & LZMA

2 压缩与解压实验

2.1 测试图像

针对离散色调彩色图像无损压缩的研究较少,其标准测试图像相应缺乏.本文用于测试的图像除少数来自文献,如图 3 和表 1 所列的具代表性的 9 幅离散色调图像中,G.5 摘自文献[1],screendump 来自文献[7],text、editor、blueprint 和 RGB 等 4 幅取自文献[10],webpage 截自科学松鼠会页面([http:// songshuhui.net/archives/76501](http://songshuhui.net/archives/76501)),其余 53 幅均由本文收集和制作,尺寸详见表 1.

2.2 实验结果与分析

本文选择 JPEG2000-LS、GIF256 色(GIF 的上限)和 24 位色的 PNG 等图像压缩格式与本文提出的 RLE 与 LZMA 的混合编码压缩方法,分别对上述 60 幅离散色调彩色图像进行压缩与解压测试.部分测试

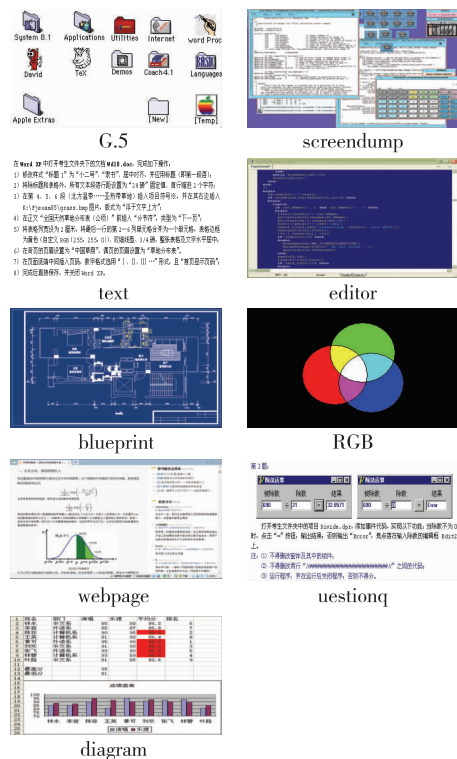


图 3 部分压缩测试图像
Fig. 3 Some images for compression test

结果如表 1 和图 4 所示,其中压缩率为压缩图像尺寸与未压缩图像尺寸的比值,压缩后图像平均每个像素所需位数用 bpp 表示.

4 种压缩方法对 60 幅离散色调图像压缩测试的统计结果如表 2 所示.

4 种图像压缩的 ratio 和 bpp 对比清晰地表明:对于连续色调图像具有很高的压缩率的 JPEG2000-LS 在对离散色调图像的无损压缩中表现不佳,其 bpp 值数倍至 10 倍于其他 3 种压缩格式;GIF 与 PNG 的压缩比几乎不相上下,但 GIF 对于 24 位彩色图像的压缩存在颜色失真而非无损压缩,从这个意义上看,PNG 对离散色调高分辨率彩色图像的无损压缩要优于 GIF;本文提出的 RLE 与 LZMA 混合编码方法的压缩率最高,压缩后图像每像素所需位数最低.测试图像 RGB 中相同颜色的区域较大且集中,压缩后的 bpp 仅有 0.090.

PNG 的解码特点使得其图像显示是渐进式,因此 PNG 图像数据在网络传输过程中支持快速预览,图像显示由粗及细,这也是 PNG 图像格式在网络迅速流行的原因.由于 RLE 与 LZMA 混合编码的特点导致解码过程是逐行恢复图像的,这一点不如 PNG,但其更小的图像像素深度使得存储离散色调彩色图像所需空间更小,且网络传输所需的时间更少.

表 1 9 幅测试图像的压缩率对比
Tab.1 Comparisons of compression ratio and bpp for 9 images

图像类	图像大小	JPEG2000-LS		GIF		PNG		RLE+LZMA	
		压缩率/%	bpp	压缩率/%	bpp	压缩率/%	bpp	压缩率/%	bpp
G.5	315×173	17.38	4.187	3.26	0.786	2.84	0.683	2.19	0.527
screendump	1 152×900	15.39	3.695	2.01	0.482	1.58	0.380	0.81	0.195
text	569×229	17.66	4.240	2.29	0.549	2.61	0.627	1.92	0.462
editor	694×585	11.11	2.668	1.39	0.335	1.34	0.322	0.81	0.196
blueprint	708×508	15.08	3.621	1.49	0.357	1.15	0.276	0.64	0.154
RGB	320×198	7.80	1.874	1.26	0.302	0.65	0.156	0.37	0.090
webpage	1 024×637	13.77	3.306	2.45	0.588	3.25	0.781	2.25	0.540
question	569×250	14.41	3.462	2.01	0.483	1.55	0.372	1.06	0.255
diagram	539×495	10.73	2.581	1.90	0.456	1.39	0.335	0.77	0.185

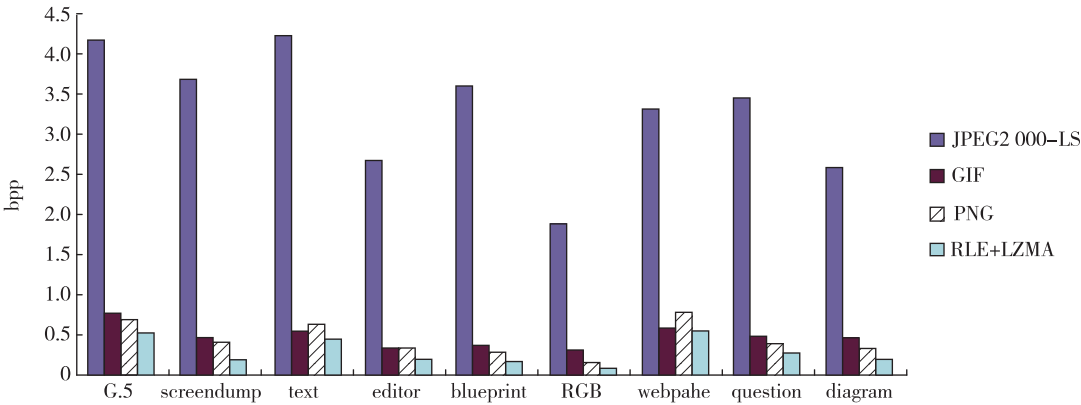


图 4 9 幅测试图像 4 种压缩格式的 bpp 值对比图
Fig.4 Chart of bpp values of 9 images in four formats

表 2 60 幅测试图像的 4 种压缩统计结果
Tab.2 Statistical results of compression rates for 60 discrete-tone images in four formats

方法	压缩率/%	bpp
JPEG2000-LS	14.54±5.76	3.492±1.385
GIF	2.38±0.96	0.572±0.230
PNG	2.48±1.30	0.595±0.313
RLE+LZMA	1.62±0.94	0.389±0.225

表 3 9 幅测试图像的压缩与解压执行时间
Tab.3 Time consume of compression & decompression for 9 images s

图像类别	压缩时间	解压时间
G.5	0.484	0.640
screendump	5.094	9.797
text	1.062	1.391
editor	1.859	3.718
blueprint	1.828	3.312
RGB	0.390	0.516
webpage	3.672	6.344
question	0.875	1.375
diagram	1.547	2.578

为实际检测 RLE 与 LZMA 混合编码法压缩与解压的速率,本文采用与文献[10]完全相同的运行环境进行压缩与解压缩测试,部分测试图像的混合编码压缩和解压所耗费的时间如表 3 所示.测试结果表明,本文所提出的方法具有较高压缩与解压速率.

3 结 论

针对离散色调彩色图像数据的冗余特性,本文提出一种 RLE 与 LZMA 算法相结合的混合编码方法.该算法能够有效地消除此类图像中的水平相关和垂直相关.与常见无损压缩模式的 JPEG2000-LS、GIF 和 PNG 的对比测试结果表明,该方法对于离散色调彩色图像可以取得 0.1~0.6 bits/pixel 的压缩后像素深度,优于其他常见图像无损压缩格式,且图像中相同颜色的区域越大,其压缩性能更加显著.同时,由于 LZMA 具有极高的解压速率,使得 RLE 与 LZMA 混合编码的解压的整体速率表现良好.

此外,本文还对一些背景单一的图像,如常见的 CT 图像等医学图像进行了测试,结果表明,本文算法的压缩率优于 PNG,但不如 JPEG2000-LS,分析其原因在于这类医学类图像的背景虽然单一,但其主体是连续色调的.本文提出的混合编码方法仅适用于典型的离散色调图像的无损压缩,即图像背景和主体都由离散色调组成.再者,本文算法的解压过程是逐行复原的模式,在应用的视觉效果上不如 PNG 的渐进式模式.这些不足都在一定程度上限制了本文算法的应用范围,但鉴于典型的离散色调图像中单一颜色的区域在整幅图像中常占有相当的比重,本文算法正如测试结果所示其压缩比优于现有的无损压缩方法.当离散色调图像垂直方向上的相关性和冗余度高于水平方向时,逐行扫描方法可能不是最有效的 RLE 编码方式,分块的搜索与逐行扫描相结合的 RLE 方法值得进一步的探索.

参考文献:

[1] Salomon D. Data compression: the complete reference

[M].London:Springer,2007.

- [2] Pennebaker W B, Mitchell J L. JPEG: still image data compression standard[M].Amsterdam:Kluwer Academic Publishers,1993.
- [3] ISO/IEC. Internationalstandard IS 15444-1, information technology-JPEG2000 image coding system[S].Geneva: ISO,2000.
- [4] Arps R B, Truong T K. Comparison of international standards for lossless still image compression [J]. Proceeding of the IEEE,1994,82(6):889-899.
- [5] Pennebaker W B, Mitchell J L, Langdon G G, et al. An overview of the basic principles of the Q-coder adaptive binary arithmetic coder[J]. IBM Journal of Research and Development,1988,32(6):737-752.
- [6] Philips D. LZW data compression [J]. The Computer Application Journal,1992,27:36-48.
- [7] Murray J D, William V R. Encyclopedia of graphics file format[M].Sebastopol:O'Reilly Association,1994.
- [8] Gilbert J M, Broderson R W. A lossless 2-D image compression technique for synthetic discrete-tone images[EB/OL]. [1998-05-17]. <http://infopad.eecs.berkeley.edu/gilbert>.
- [9] W3C(MIT,ERCIM,Keio). Portable network graphics (PNG) specification (second edition) [EB/OL]. [2003-11-10]. <http://www.w3.org/TR/2003/REC-PNG-20031110/>.
- [10] 刘雄恩. 离散色调彩色图像的无损压缩方法[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(增刊): 920-921.
- [11] Igor P. LZMA SDK ver 9.22 beta (software development kit) [EB/OL]. [2011-01-19]. <http://www.7-zip.org/sdk.html>.
- [12] 涂宗劼. 一种基于 JPEG2000 和 LZMA 的无损编码方法[D]. 上海: 复旦大学, 2008.
- [13] Deutsch P. DEFLATE compressed data format specification version 1.3 [EB/OL]. [1996-05-13]. <http://tools.ietf.org/html/rfc1951#section-7>.

A Lossless Compression Method for Discrete-tone Images

LIU Xiong-en¹, HUANG Xiao-yang^{2*}

(1.School of Computer & Information,Fujian Agriculture & Forestry University,Fuzhou 350028,

2.School of Information Science & Engineering,Xiamen University,Xiamen 361005,China)

Abstract: Based on the features of data redundancy in discrete-tone color images, using the run-length encoding (RLE) and dictionary encoding, a hybrid encoding method which can be used in lossless compression for discrete-tone color images was proposed in this text. The experimental results have shown that the method can achieve 0.1 bits/pixel to 0.6 bits/pixel for typical discrete-tone color images, its compression ratio is obviously superior to JPEG2000-LS and better than other lossless compression methods such as GIF and PNG.

Key words: discrete-tone image; lossless compression; run-length encoding (RLE); Lempel-Ziv-Markov chain algorithm; hybrid encoding