

基于块方向预测和 Context 的图象无失真编码方法^{*}

赵德斌^{1,2} 陈耀强¹ 高文²

¹(香港城市大学计算机科学系 香港)

²(哈尔滨工业大学计算机科学系 哈尔滨 150006)

E-mail: dbzhao@vilab.hit.edu.cn

摘要 首先分析无失真图象编码技术,提出一种基于块方向预测和 Context 的自适应无失真编码方法,该方法主要使用块方向预测和基于 Context 的误差模型去除图象在空间上的相关性。在此方法中,一幅图象首先被分割成图象块,对图象的每一块自适应地选择一个使预测误差绝对值之和最小的块方向预测器;然后通过 Context 选择和误差反馈进一步降低信息熵;最后,采用快速而有效的 Rice 编码器对误差图象编码。实验结果显示,该方法的压缩效果明显优于 JPEG (joint of picture expert group) 无失真模式和 FELICS (fast and efficient lossless image compression),略好于 CB9 和 LOCO-I,甚至 UCM (universal context modeling)。

关键词 数据压缩,无失真编码,块方向性预测,Context,Rice 编码器。

中图法分类号 TP391

图象的无失真编码方法可分为 DPCM+熵编码^[1~6],HINT (hierarchical interpolation)^[7,8]和 LPL (lossy plus lossless)^[9,10]。图象无失真编码的目的是,对给定的图象尽量用较少的位数来表示,同时又不丢失任何信息。通常分两步实现:第 1 步我们称为解相关,图象在空间的冗余尽量被消除,从而得到误差图象,通常使用 DPCM (differential pulse code modulation) 方法实现。DPCM 解相关方法包括两个部分:一个是邻域函数,它用来确定在预测过程中使用哪几个已编码的邻接象素点。不同的研究人员在预测中使用不同的相邻象素点数^[11~13],一般使用的相邻象素点数为 3 或 4。在 JPEG (joint of picture expert group) 无失真模式中使用了 3 个相邻点。^[14]Nagumo 的结果显示,在 1、2、4、8 和 16 个相邻点数选择中,使用 4 个相邻点能够对任何一幅测试图象都取得最好的压缩效果;DPCM 解相关的另一个组成部分是指由邻域函数确定的相邻象素点如何在预测中使用,一般使用线性模型。第 2 步叫做编码。实际上,即使使用最复杂的方法对一幅图象进行解相关,误差图象仍然包含着图象的基本结构,为了有效地编码误差图象,需要构造模型来捕获解相关后的误差结构。这项工作经常被称为误差模型化,所构造的模型就叫做误差模型。误差模型实质上是驱动一个长度编码器来编码误差图象。

误差模型化的中心环节可以解释成混合源模型方法。Howard 和 Vitter^[2]使用层次编码,Todd,Langdon 和 Rissanen^[15]根据 Context 将预测误差模型化。Memon 和 Sayood^[16]将源分成子源,并将其有效地模型化为一个简单的模型。Rice 编码器^[17,18]针对不同熵值的 Laplacian 分布提出了一套优化 Huffman 码对误差块编码。

我们提出了基于图象块方向的自适应预测策略解除图象在空间上的相关性,并通过 Context 选择和误差反馈进一步降低信息熵,最后用 Rice 编码器对误差图象编码。

本文第 1 节详细讨论基于图象块方向的自适应预测策略;第 2 节介绍基于 Context 的误差模型和估计误差反馈;第 3 节介绍误差图象的自适应 Rice 编码器;最后给出实验结果和结论。

1 基于图象块方向的自适应预测策略

JPEG 无失真图象编码方法的问题在于,它有 8 种不同的预测模式,只有将这 8 种模式都尝试一遍,才有可能推断出哪一种模式对当前图象最有效。对于大容量图象的实时数据压缩,这种方法在存储和实现上显然是不实用的。如果

* 本文研究得到香港城市大学科研基金资助。作者赵德斌,1963 年生,副教授,主要研究领域为数据压缩,多功能感知机。陈耀强,1950 年生,博士,教授,主要研究领域为图象处理。高文,1956 年生,博士,教授,博导,主要研究领域为多功能感知机。

本文通讯联系人:赵德斌,哈尔滨 150006,哈尔滨工业大学计算机科学系

本文 1997-03-24 收到原稿,1997-09-19 收到修改稿

我们用小窗口观察一幅图象,一般地,图象的边缘总是呈现出一些方向特征,因此可以将图象分成块,根据图象块的方向自适应地选择预测器。

当前象素和其邻近象素的关系如图 1 所示,当前象素 x 的邻近象素点 a, c, b 和 d 分别位于 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 和 135° 方向,我们称它们为方向邻近象素,图象块被分为 7 个固定方向 ($0^\circ, 22^\circ, 45^\circ, 67^\circ, 90^\circ, 112^\circ, 135^\circ$) 和一个混合方向,每块都有其相应的预测器(见表 1),每块都隶属于 7 个固定方向或一个混合方向,我们设定的 7 个固定方向,覆盖了该块中以约 22° 为间隔的所有可能的方向。

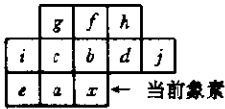


图1 当前象素和其邻近象素的偏位置关系

表 1 8 个方向预测器的预测系数

预测系数	方向							混合方向
	0°	22°	45°	67°	90°	112°	135°	
a_1	1	1/2	0	0	0	0	0	W_h
a_2	0	0	0	1/2	1	1/2	0	W_v
a_3	0	1/2	1	1/2	0	0	0	0
a_4	0	0	0	0	0	1/2	1	0

预测误差一般通过下式获得。

$$error = x - \hat{x}, \tag{1}$$

这里

$$\hat{x} = a_1a + a_2b + a_3c + a_4d. \tag{2}$$

a_1, a_2, a_3 和 a_4 是相邻象素的预测系数(见表 1), x 为当前象素, \hat{x} 是 x 的预测值, $error$ 是预测误差。注意,公式(2)并没有使用邻近象素 e, f, g, h, i 和 j , 它们将在 Context 中使用。

实验表明,对一般图象而言,在一些方向上,用 4 个相邻象素点的线性组合替代方向邻近象素能取得更好的效果。我们的预测模式是 4 个邻近象素点的特殊线性组合。

基于象素方向的特殊预测器是为预测混合边缘方向而设计的。

设

$$H = |x(i, j - 2) - x(i, j - 1)| + |x(i - 1, j - 1) - x(i - 1, j)|, \tag{3}$$

$$V = |x(i - 2, j) - x(i - 1, j)| + |x(i - 1, j - 1) - x(i, j - 1)|, \tag{4}$$

H 代表水平方向上的信息, V 代表垂直方向上的信息。如果当前被预测的象素在水平边缘方向上,那么 H 值小而 V 值大;如果当前被预测的象素在垂直边缘方向上,那么 V 值小而 H 值大。

设

$$W = H + V, W_h = 1 - H/W, W_v = 1 - V/W,$$

因为

$$V = W - H, H = W - V,$$

所以

$$W_h = V/W, W_v = H/W.$$

因此,基于象素方向的混合边缘预测器可以写成如下形式。

$$\hat{x}(i, j) = [W_h * x(i, j - 1) + W_v * x(i - 1, j)]. \tag{5}$$

W_h 和 W_v 也可以根据 H 和 V 的值为 0, 1 或 1/2, 换句话说,对于混合方向块中基于象素方向的预测,我们可以从 a, b 和 $(a+b)/2$ 之中选择一个预测器。8 个方向预测器中产生最小预测误差的预测器被选中,用来表示使用哪个方向预测器的每一个图象块的额外开销是 3 比特。预测系数被设置为 0, 1 或 2 的负幂次,因此所有的乘法都可以用移位代替并易于 VLSI(very large scale integration)设计。

2 基于 Context 的误差模型和估计误差反馈

尽管使用了块方向预测技术去掉图象的冗余,实际上,误差图象仍含有相当的相关性。为了进一步降低误差图象的信息熵,希望建立能够准确描述预测误差的模型。我们定义预测误差能量估计器 Δ 为

$$\Delta = \min(\alpha d_h, \beta d_v),$$

这里

$$d_h = |e - a| + |c - b| + |b - d| + |a - b|,$$

$$d_v = |c - a| + |f - b| + |g - c| + |h - d|,$$

α 和 β 为加权系数。为了降低模型的费用, Δ 被量化为 L 个等级。因为 Δ 是随机变量,可以使用标量量化对其量化,量

化器设计如下:

$$\Delta q = \begin{cases} 0 & \text{if } \Delta \leq 1 \\ i & \text{if } 2^i \leq \Delta < 2^{i+1}, \text{ 并且 } \Delta < 2^{L-1} \\ L-1 & \text{if } \Delta \geq 2^{L-1} \end{cases}$$

我们设计的 Context 由 8 个事件组成.

$$C = \{c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7\},$$

这里 $c_0 = i, c_1 = j, c_2 = 2c - g, c_3 = 2d - h, c_4 = f, c_5 = e, c_6 = 2b - f$ 和 $c_7 = 2a - e$.

同样,为了降低模型的费用,将 C 量化为二进制串 $Q_c(C) = b_7 b_6 \dots b_0$.

$$b_k = \begin{cases} 0 & \text{if } c_k \geq \hat{x} \\ 1 & \text{if } c_k < \hat{x} \end{cases}$$

设 $\bar{d}(\Delta q, Q_c(C))$ 是给定 Context $(\Delta q, Q_c(C))$ 的当前的平均误差值,可以将这一误差值反馈给当前的预测器 \hat{x} , 得到改进的预测值 \hat{x}' . 带误差反馈的预测器公式描述如下,

$$\hat{x}' = \hat{x} + \bar{d}(\Delta q, Q_c(C)). \tag{6}$$

一般地讲,通过第 2 级解相关可以提高编码效率 3~6%.

3 误差图象的自适应 Rice 编码

通过两级解相关后,我们得到误差图象,下一步的工作是对误差图象进行信息熵编码. 经验认为,误差通常呈 Laplacian 分布.^[19] 预测误差的编码方法一般为 Huffman 编码、Arithmetic 编码和 Lempel-Ziv-Welch 编码. 实验显示,对无失真编码而言,Lempel-Ziv-Welch 编码方法对于灰度图象工作效果不佳,Huffman 编码和 Arithmetic 编码从比特率的角度讲差别不大.^[16]

Rice^[18]给出了一种特殊的 Huffman 编码方法,这种编码不需要码表,却提供了与使用多个 Huffman 表相同的功能. 从我们的实验来看,Rice 编码对于无失真图象压缩是非常有效的. 在做 Rice 编码前,需要将误差图象映射到非负数空间,映射函数定义如下.

$$\delta_i = \begin{cases} 2\Delta_i & 0 \leq \Delta_i \leq \theta \\ 2|\Delta_i| - 1 & -\theta \leq \Delta_i \leq 0 \\ \theta + |\Delta_i| & \text{其他} \end{cases}$$

这里 Δ_i = 输入误差值, δ_i = 映射值, $\theta = \min(X_i, X_{\max} - X_i)$.

Rice 算法的两个主要组成部分是基本序列(FS)和劈分(Sample Splitting). FS 是这样一种逗号码,值 m 的码字由 m 个“0”和一个“1”组成. 例如,值 5 相应的编码是 5 个 0 后接一个“1”,即 000001(如图 2 所示). 因为每个代码字只需要知道其输入值就可以唯一地定义,所以就不需要代码表了. 劈分技术是假定一个块中每个输入的 k 个最低有效位都是随机的,因而不能压缩. 对于一个 N 位数据,首先对 $N - k$ 个最有效位使用 FS 进行编码,接着直接编码随机的 k 位,然后将使用 FS 编码后的结果与 k 位 LSB 相连形成 Rice 编码. k 有不同的范围. 如果 k 从 $[0, 1, 2, \dots, 7]$ 选择,则将有 8 个可用的编码路径(见表 2),产生最短编码字的编码路径被最后选定. 对于每个图象块,需要指明使用到哪个编码路径的额外开销是 3 比特:

表 2 Rice 码劈分方法

输入	FS 码	代码	F_0 的范围
0	0	0	$F_0 \leq 5J/2$
1	01	1	$5J/2 < F_0 \leq 9J/2$
2	001	2	$5J/2 < F_0 \leq 17J/2$
3	0001	3	$17J/2 < F_0 \leq 33J/2$
4	00001	4	$33J/2 < F_0 \leq 65J/2$
5	000001	5	$65J/2 < F_0 \leq 129J/2$
6	0000001	6	$129J/2 < F_0 \leq (128n - 831)J/2$
		7	$(128n - 831)J/2 < F_0$

图 2 基本序列

F_0 = FS 码总长度(表示块内值之和), J = 块大小, n = 样本位数.

4 实验结果和结论

我们使用 JPEG 标准委员会提供的数字化为 8bpp 的 9 幅灰度图象来测试所提出的无失真编码方法。图象分辨率为 720×576 。表 3 给出了使用我们的方法对测试的图象进行压缩后的 bpp (bits per pixel) 对比,所有的附加信息都包括在所报告的 bpp 中。表 3 中,第 2 列 Proposed 为本文所提出的方法。UCM 方法由 Weinberger 等人^[5](HP)提出,使用全局 Context 模型,大多数研究人员认为这是图象无失真编码的极限。但是,该方法具有很高的计算复杂性,因此不可能成为一个实际应用系统。为此,Weinberger 等人又进一步简化模型,提出了一个具有较低计算复杂性的系统 LOCO-I。^[6]CB9^[4]是 Sunset 家族的最新版本,由 IBM 的 Langdon 等人提出,该系统使用 Context 作为高阶二进制算术编码的条件熵。由于 Langdon 等人在二进制算术编码方面的杰出贡献(著名的 Q-Coder 在二值图象压缩中已得到成功的应用),因此,CB9 在信息熵编码部分取得了很突出的成果。FELICS 由 Duke 大学的 Howard 和 Vitter 提出^[3],该系统被认为是到目前为止最简单的图象无失真编码系统。表 3 最后一列为 JPEG 无失真模式,使用 JPEG 建议的 8 个预测器中最好的一个预测器和静态 Huffman 表。最好的图象无失真编码系统的信息熵编码器一般都使用算术编码方法(例如 UCM 和 CB9 等),本文所提出的方法使用 Rice 编码器,试图与算术编码器抗衡,这是因为:一方面,我们认为 Rice 编码器简单快速,而算术编码器有较高的计算复杂性,至少在软件实现时如此;另一方面,Rice 编码器在编码效率上也较接近算术编码器;再者,使用 Rice 编码器不涉及专利问题。

表 3 无失真压缩结果及与其他方法比较 (bpp)

图象	Proposed	UCM	LOCO-I	CB9	FELICS	JPEG
balloon	2.83	2.81	2.90	2.89	3.21	3.17
board	3.58	3.57	3.64	3.72	4.03	4.18
zelda	3.76	3.80	3.87	3.79	4.17	4.15
girl	3.76	3.81	3.90	3.90	4.35	4.26
boats	3.84	3.85	3.92	3.99	4.37	4.46
hotel	4.31	4.28	4.35	4.48	4.71	4.93
gold	4.45	4.45	4.47	4.60	4.75	4.85
barb1	4.30	4.44	4.65	4.64	5.22	5.29
barb2	4.60	4.57	4.66	4.71	5.18	5.23
平均	3.94	3.95	4.04	4.08	4.44	4.50

表 3 的实验结果显示,本文所提出方法的压缩效率明显高于 JPEG 无失真模式和 FELICS,略好于 CB9 和 LOCO-I,甚至于 UCM,而其计算复杂性较低。

由此可见,本文提出基于块方向预测和 Context 的图象无失真编码方法能够非常有效地压缩图象,同时具有较低的计算复杂性,并易于 VLSI 实现。

参考文献

- Arps R, Truong Thomas. Comparison of international standard for lossless still image compression. *Proceedings of the IEEE*, 1994, 82(6):889~899
- Howard P, Vitter J. New methods for lossless image compression using arithmetic coding. In: Storer J A, Cohn M eds. *Proceedings of the International Conference on Data Compression Conference*. Snowbird, Utah: IEEE Computer Society Press, 1991. 257~266
- Howard P, Vitter J. Fast and efficient lossless image compression. In: Storer J A, Cohn M eds. *Proceedings of the International Conference on Data Compression Conference*. Snowbird, Utah: IEEE Computer Society Press, 1993. 351~360
- Langdon G, Heidnyak C. Experiments with lossless and virtually lossless image compression algorithms. In: *Proceedings of Still-Image Compression Conference of SPIE*, Vol 2418. San Jose, California: SPIE Optical Engineering Publisher, 1995. 21~27
- Weinberger M J, Rissanen J J, Arps R B. Applications of universal context modeling to lossless compression of gray-scale images. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, 5(4):575~586
- Weinberger M J, Seroussi G, Sapiro G. LOCO-I—a low complexity, context-based, lossless image compression algorithm. In: Storer J A, Cohn M eds. *Proceedings of the International Conference on Data Compression Conference*. Snowbird, Utah: IEEE Computer Society Press, 1996. 140~149

- 7 Huang L, Bijaoui A. An efficient image compression algorithm without distortion. *Pattern Recognition Letters*, 1991, 12(2): 69~72
- 8 Roos P, Viergever M. Reversible image data compression based on HINT decorrelation and arithmetic coding. In: *Medical Image V: Image Capture, Formatting, and Display of SPIE*, Vol 1444. San Jose, California: SPIE Optical Engineering Publisher, 1991. 283~290
- 9 Mandyam G, Ahmed N, Magotra N. A DCT-based scheme for lossless image compression. In: *Proceedings of SPIE*, Vol 2418. San Jose, California: SPIE Optical Engineering Publisher, 1995. 474~477
- 10 Takamura S, Takagi M. Lossless image compression with lossy image using adaptive prediction and arithmetic coding. In: Storer J A, Cohn M eds. *Data Compression Conference*. Snowbird, Utah: IEEE Computer Society Press, 1994. 166~174
- 11 Kuo C H, Li C, Lu C C. Conditional entropy coding of image using high-order statistics. In: Namazi N M ed. *Proceedings of the IASTED (International Association of Science and Technology for Development) International Conference on Signal and Image Processing*. Las Vegas, Nevada: ACTED-ACTA Press, 1995. 410~413
- 12 Nagumo H, Lu M, Watson K. Modifying LZ77 coding for gray-scale image compression. In: Namazi N M ed. *Proceedings of the IASTED (International Association of Science and Technology for Development) International Conference on Signal and Image Processing*. Las Vegas, Nevada: ACTED-ACTA Press, 1995. 383~386
- 13 Wallace G. The JPEG still picture compression standard. *Communications of the ACM*, 1991, 34(4): 30~40
- 14 Pennebaker W, Mitchell J. *JPEG still image data compression standard*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993
- 15 Todd S, Langdon G, Rissanen J. Parameter reduction and context selection for compression of gray scale images. *IBM Journal of Research and Development*, 1985, 29(2): 188~193
- 16 Menon N, Sayod K. Lossless image compression; a comparative study. In: *Proceedings of SPIE*, Vol 2418. San Jose, California: SPIE Optical Engineering Publisher, 1995. 8~20
- 17 Rice R, Plaunt J. An adaptive variable length coding for efficient compression of spacecraft television data. *IEEE Transactions on Communications and Technology*, 1971, COM-19 (Part 1): 889~897
- 18 Rice R, Yep P, Miller W. Algorithms for a very high speed universal noiseless coding module. Jet Propulsion Laboratory, JPL Publication 91-1, 1991
- 19 Howard P, Vitter J. Error modeling for lossless image compression. In: Storer J A, Cohn M eds. *Proceedings of Data Compression Conference*. Snowbird, Utah: IEEE Computer Society Press, 1992. 269~278

Lossless Image Coding Method Based on Block Direction Prediction and Context

ZHAO De-bin^{1,2} CHEN Yao-qiang¹ GAO Wen²

¹(Department of Computer Science City University of Hong Kong Hong Kong)

²(Department of Computer Science Harbin Institute of Technology Harbin 150006)

Abstract In this paper, lossless image coding techniques are discussed first, then a lossless image coding method based on block direction prediction and context is presented. It removed the redundancy of the image in spatial domain by block direction prediction and context-based error modeling. In the proposed method, an image is first partitioned into blocks. Then, a direction predictor that results in minimum prediction error is adaptively selected for each block. After that, context selection and error feedback are applied to further reduce the entropy. A fast and efficient Rice coder is applied finally for the residual image coding. The experimental results show that the proposed method significantly outperforms over JPEG (joint of picture expert group) lossless mode and FELICS (fast and efficient lossless image compression), and it obtains comparison ratio superior to CB9, LOCO-I, even UCM.

Key words Data compression, lossless coding, block direction prediction, context, Rice coder.