

控制图象灰度失真的高保真压缩算法

张浩

程子敬 周孝宽

(北京系统工程研究所, 北京 100083)

(北京航空航天大学宇航学院图象中心, 北京 100083)

摘要 为实现遥感图象的高保真压缩, 在借鉴 JPEG-LS 近无损压缩思想的基础上, 提出了 3 项改进措施, 设计与实现了比 JPEG-LS 压缩倍数高、图象恢复质量更好的视觉无失真压缩算法——“控制图象灰度失真的高保真压缩算法(LIGE)”。实验结果表明, 该算法既可限制图象最大灰度误差, 又能控制恢复图象的峰值信噪比, 从而有效地控制图象失真度, 压缩倍数为 4 时, 数据处理速度与图象恢复质量两方面, 均优于基于小波变换和嵌入式零树编码的 SPIHT 算法。该研究成果将对发展我国未来的高分辨率卫星、小卫星通信系统、星-天-地信息网提供有力的技术支持。

关键词 计算机图象处理(520·6040) 压缩 自适应 分块 预测 JPEG-LS

中图分类号: TN919.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2003)04-0398-05

High Fidelity Compression Algorithm Based on Limiting Image Grey Error

ZHANG Hao

(Beijing Institute of System Engineering, Beijing 100083)

CHENG Zi-jing, ZHOU Xiao-kuan

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Abstract In order to resolve the contradiction between the need of high image quality and low data rates in data transmission and storage in the fields of satellite remote sensing, a new idea of using adaptive block coding technique and multi-mode adaptive quantization technique to improve the JPEG-LS is proposed. As a result, a new visually loss-less coding algorithm—LIGE (Limiting Image Grey Error) is presented. The performance of this algorithm is much better than JPEG-LS. Contrast to the DWT based SPIHT, LIGE has the following outstanding characters: Given a threshold Q , the image distortion and the PSNR of the reconstructed image can be predicted in advance, which can guarantee the required reconstructed image quality and avoid excessive loss of original image information. There is no floating-point calculation and transform in the algorithm, so the compression speed of the coder is 3 times faster than that of SPIHT. At compression ratio 4:1, the PSNR of the reconstructed images of LIGE is higher than that of SPIHT, especially for the remote sensing image, the quality of the reconstructed image is even better. The result of this paper will be beneficial to the development of the communication system of Chinese satellites.

Keywords Computer image processing, Compression, Adaptive, Block, Prediction, JPEG-LS

0 引言

图象数据压缩一直是图象通信中的重点与难点, 尤其是在详查卫星遥感领域, 对图象质量要求

高, 但由于信道带宽限制, 又不得不减少数据量时, 压缩问题显得更加尖锐。此时, 压缩倍率固然要保证, 但减小图象失真度, 避免图象信息的过量丢失更为重要, 同时, 压缩算法必须简便、快捷, 易于硬件实现。

基金项目: 航天科技创新基金支持项目

收稿日期: 2002-06-07; 改回日期: 2002-11-18

1 算法构思

经典预测编码^[1~4]具有运算复杂度低、存储空间要求小、通信延时短等优点,但由于预测模式及预测误差处理不当,恢复图象的 PSNR 低,根本不能同 SPIHT 方法^[5]相比。针对预测编码的上述缺点,从 3 方面入手,加以改进:

(1) 引入多模式自适应分块编码与块大小自动调整技术,即把图象分割为 4×4 数据块,根据每个块的方差,将块分为平坦块与复杂块两类,前后相连的所有复杂块又被连接为一个条块,该条块大小不定,而从一个复杂块到整幅图象,不同条块之间以平坦块隔离。

(2) 优化预测模式 根据平坦块与复杂块的特征差异,采取不同的预测模式,并在复杂块预测模式中引入 JPEG-LS 算法中具有边缘检测功能的预测

模型。

(3) 分类自适应编码 利用上下文,对预测误差自动分类,不同类的误差采用不同的编码方案,利用图象高阶熵,进一步提高压缩效率。

经过以上改进,在借鉴 JPEG-LS^[6]的近无损压缩思想的基础上,设计与实现了比 JPEG-LS 压缩倍数高、图象恢复质量更好的视觉无失真压缩算法——控制图象灰度失真的高保真压缩算法(LIGE),该算法既可限制图象最大灰度误差,又能控制恢复图象的峰值信噪比(PSNR),从而有效地控制图象失真度,压缩倍数为 4 时,数据处理速度与图象恢复质量两方面,均优于基于小波变换和嵌入式零树编码的 SPIHT 算法。

2 压缩流程

LIGE 压缩流程如图 1 所示。

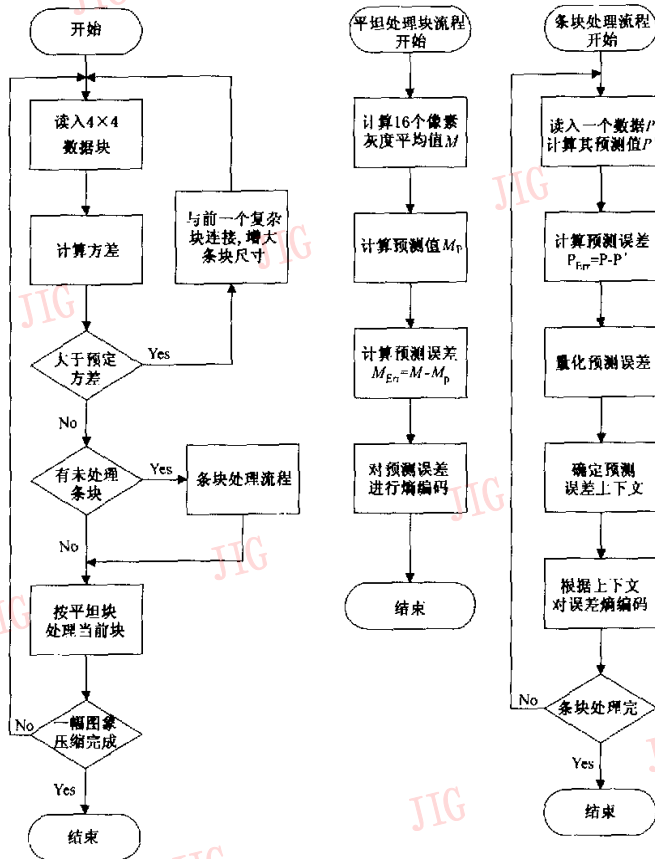


图 1 LIGE 压缩流程图

为与其他论文研究结果进行对比,以峰值信噪比 $PSNR$ 作为图象失真的衡量指标,这个指标虽不能全面反映图象的质量,但还是在绝大多数有关图象压缩的研究论文中被广泛采用. 设 $I(i, j)$ 为原图象像素灰度值, $F(i, j)$ 为恢复图象像素灰度值, i, j 为该像素坐标, N, M 分别为图象长度及宽度, 则均方误差

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} [I(i, j) - F(i, j)]^2 \quad (1)$$

峰值信噪比 $PSNR$ 与均方误差 MSE 有如下关系

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2}{MSE} \quad (2)$$

给定图象允许失真度(在本文中,就是要求恢复图象的峰值信噪比大于某一值),根据峰值信噪比与均方误差的函数关系(见式 2),可以计算得到此失真度情况下的均方误差 MSE . 如图 1 所示,压缩算法通过限制各 4×4 数据块的均方误差,来保证全局均方误差不大于 MSE , 从而控制图象失真度.

3 关键技术

在上述流程中,有几个重要的技术环节:

3.1 分块编码与块大小自动调整

把图象分割为 4×4 数据块,根据每个块的方差,将块分为平坦块与复杂块两类. 采用分块编码,可以充分利用图象局部数据相关性,并且按照块模式的不同,采用不同的量化编码方法,能够在提高压缩效率的同时,更好地保存图象细节.

前后相连的所有复杂块被连接为一个条块,该条块大小不定,从一个复杂块到整幅图象,不同条块之间是数量不等的平坦块. 在条块内部,打破复杂块与复杂块的界限,逐行按照从上到下,从左到右的顺序对数据进行编码,这样可以在更大范围内,利用数据相关性,提高预测准确性与熵编码效率.

3.2 预测模型

平坦块平均值预测模型如图 2 所示.

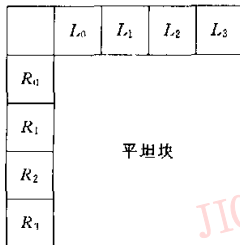


图 2 平坦块预测模型

$$M_P = \frac{(L_0 + L_1 + L_2 + L_3)/4 + (R_0 + R_1 + R_2 + R_3)/4}{2}$$

$$M_{Err} = M - M_P$$

其中, M 是平坦块 16 个像素灰度平均值, M_P 是该平均值的预测值, M_{Err} 是预测误差.

条块预测模型如图 3 所示.

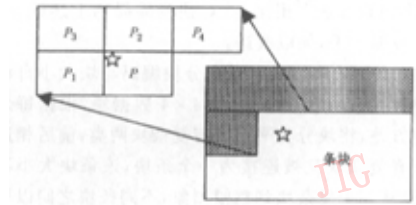


图 3 条块预测模型

$$P' = \begin{cases} \min(P_1, P_2) & \text{if } (P_3 \geq \max(P_1, P_2)) \\ \max(P_1, P_2) & \text{if } (P_3 \leq \min(P_1, P_2)) \\ P_1 + P_2 - P_3 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$P_{Err} = P - P'$$

P 为当前处理像素灰度值, P' 为其预测值, P_{Err} 为预测误差. 该预测模型根据 P_1, P_2, P_3 的关系, 从这 3 种预测模式中自适应地选择当前像素预测值: 在当前位置, 如果存在垂直边缘, 则预测值为 P_2 ; 存在水平边缘, 预测值为 P_1 ; 没有边缘, 预测值为 $P_1 + P_2 - P_3$. 由此可见, 该预测模型既不需要增加模式标志, 又具有水平及垂直边缘检测功能^[7].

3.3 预测误差量化

平坦块预测误差不量化.

复杂块预测误差量化公式为

$$Q_{P_{Err}} = \begin{cases} (P_{Err} + E_{max} \div (2 \times E_{max} + 1)) & \text{如果 } (P_{Err} > 0) \\ -((E_{max} - P_{Err}) \div (2 \times E_{max} + 1)) & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $Q_{P_{Err}}$ 为预测误差量化值, E_{max} 为条块像素允许的最大灰度误差, 与预定方差一一对应.

采取式(3)对 P_{Err} 进行量化, 能够限制条块像素最大灰度在 E_{max} 之内, 并保证整个条块恢复数据的 MSE 小于预定方差. 由于平坦块恢复方差一定小于预定方差, 所以整幅恢复图象的峰值信噪比将在指定的范围之内, 从而最终达到控制图象失真度的根本目的.

3.4 上下文的建立

利用上下文的目的是把预测误差分类, 不同类中, 预测误差的概率分布函数不同, 这样就可以采用不同的码表进行熵编码, 得到比单一码表好得多的压缩效果.

平坦块预测误差没有上下文,按同一种方式进行熵编码。

如图3所示,对于条块,建立如下的预测误差上下文: $C_1 = P_4 - P_2, C_2 = P_2 - P_3, C_3 = P_3 - P_1$ 。这些差值表现出当前像素周围的梯度变化,能够在一定程度上预测到当前像素 P 相对 P_1, P_2, P_3 的变化范围,具有部分描述 P_{Err} 分布函数的功能。例如,当 $P_1 = P_2 = P_3 = 0$ 时,则 P_{Err} 为 0 的概率极大, P_{Err} 的分布集中在 0 附近,嫡小;相反,若 C_1, C_2, C_3 的绝对值都远大于 0 时, P_{Err} 为 0 的概率就比较小, P_{Err} 分布比较平坦,嫡大^[7]。

根据这些误差的分布规律,有针对性的选用不同的 Huffman 码表,能够获得极佳的压缩效率。

3.5 熵编码

考虑到要尽可能地减少算法复杂度和计算量以提高压缩速度,所以没有使用算术编码,而是采用多码表 Huffman 编码算法。

4 对比实验

实验环境:硬件平台为 PC(P III 300MHz CPU, 128M 内存);操作系统为 Windows 98。实验使用遥感图象,同时还选用了一些常见测试图。

压缩方法:LIGE、JPEG-LS、SPIHT,其中,LIGE 和 JPEG-LS 软件使用 C 语言编制,没有经过速度优化,仅仅是压缩功能的实现;SPIHT 软件是通过互联网,下载得到(网址:www.ipl.rpi.edu)。

4.1 高分辨率遥感图象压缩实验

由表1可以看出,与 SPIHT 相比,LIGE 压缩速度是 SPIHT 的 3 倍以上;图象恢复质量, $PSNR$ 高出 SPIHT 0.4dB, E_{max} 比 SPIHT 低 1 个灰度;与 JPEG-LS 相比,LIGE 不但压缩速度提高近 50%,而且恢复图象的 $PSNR$ 高出 JPEG-LS 1 个 dB。

以下实验重点比较 LIGE 与 SPIHT 性能。

表1 高分辨率遥感图象实验结果

图象	LIGE			SPIHT			JPEG-LS			压缩时间比 (LIGE/SPIHT)	压缩时间比 (LIGE/JPEG-LS)
	压缩倍数	压缩时间 (s)	PSNR (dB)	压缩倍数	压缩时间 (s)	PSNR (dB)	压缩倍数	压缩时间 (s)	PSNR (dB)		
图象1	4.12	0.44	41.0	4.00	1.43	40.6	3.81	0.61	40.2	1:2.86	1:1.38
图象2	3.96	0.44	34.0	4.00	1.32	33.5	4.00	0.66	32.6	1:3.00	1:1.50
图象3	3.98	0.44	38.8	4.00	1.48	38.3	3.83	0.61	38.2	1:3.36	1:1.38
图象4	3.99	0.44	36.4	4.00	1.81	36.4	3.95	0.66	35.5	1:4.11	1:1.50
平均值	4.01	0.44	37.6	4.00	1.51	37.2	3.90	0.64	36.6	1:3.43	1:1.45

注:图象1~图象4是分辨率为1m的遥感图象,大小为512×512,灰度256级。

4.2 低分辨率遥感图象实验

图象5、图象6、图象7、图象8,是分辨率为100m的遥感图象,大小是512×512,灰度256级。

表2 低分辨率遥感图象实验结果

图象	LIGE			SPIHT		
	压缩时间 (s)	压缩比	PSNR (dB)	压缩时间 (s)	压缩比	PSNR (dB)
图象5	0.44	4.37	40.4	2.08	4.00	41.2
图象6	0.44	3.90	42.0	2.09	4.00	41.4
图象7	0.44	4.04	38.6	1.32	4.00	38.3
图象8	0.44	3.94	44.8	1.48	4.00	44.0
平均值	0.44	4.06	41.5	1.74	4.00	41.2

由表2可见,LIGE 压缩速度是 SPIHT 的 4 倍;图象恢复质量, $PSNR$ 高出 SPIHT 0.3dB。

4.3 常见测试图实验

图象为 Lena、Baboon、Goldhill,大小是 512×512,灰度 256 级。

由表3可见,LIGE 压缩速度是 SPIHT 的 3 倍

以上;图象恢复质量, $PSNR$ 高出 SPIHT 0.1dB, E_{max} 比 SPIHT 低 1 个灰度。

由表1~表3可见,在压缩倍数为4,图象大小为512×512的条件下,LIGE 压缩速度是 SPIHT 的 3 到 4 倍;对于遥感图象,LIGE 恢复图象的 $PSNR$ 比 SPIHT 高出 0.3 dB 以上, E_{max} 少 1~5 个灰度;对于普通景物图象,LIGE 与 SPIHT 性能相近,恢复图象 $PSNR$ 比 SPIHT 高 0.1 dB, E_{max} 少 1 个灰度,这个特点正好印证,LIGE 算法是针对遥感图象特征而设计的,因此,对遥感图象压缩,能够获得更好的性能提升。

4.4 控制失真度压缩实验

设定压缩参数,对任何图象的压缩,LIGE 均可获得具有特定 $PSNR$ 的恢复图象。由表4可见,在给定一个压缩参数后,LIGE 对所有图象都可以获得预定的 $PSNR$,该特性确保了在图象压缩前,就可以预知恢复图象的 $PSNR$,从而为控制图象的失真度,提供了至关重要的信息。

表3 常见测试图象实验结果

图象	LIGE				SPIHT			
	压缩时间 (s)	压缩比	PSNR (dB)	E_{max}	压缩时间 (s)	压缩比	PSNR (dB)	E_{max}
Lena	0.44	4.00	45.2	6	1.32	4.00	45.1	7
Baboon	0.44	4.01	34.6	24	1.76	4.00	35.0	26
Goldhill	0.44	3.99	42.5	9	1.92	4.00	42.0	9
平均值	0.44	4.00	40.8	11	1.66	4.00	40.7	12

表4 控制失真度压缩实验结果

预定 PSNR(dB)	50.0				38.0				29.0	
压缩参数	1.0				5.0				20.0	
实际值	PSNR(dB)	E_{max}	压缩比	PSNR(dB)	E_{max}	压缩比	PSNR(dB)	E_{max}	压缩比	
图象 1	50.0	1	2.39	39.4	13	4.61	30.2	47	11.2	
图象 2	49.9	1	1.77	38.4	13	2.92	29.0	45	6.10	
图象 3	49.9	1	2.15	38.8	12	3.97	29.5	45	9.52	
图象 4	49.9	1	1.96	38.6	13	3.42	28.9	47	8.02	

5 结论与展望

LIGE 算法使用自适应分块编码技术来改进 JPEG-LS, 在 4 倍压缩比情况下, 提高了 JPEG-LS 压缩速度, 改善了图象恢复质量. 与 SPIHT 相比, LIGE 算法有三大突出特点:

(1) 当给定压缩参数后, 原图象失真度和恢复图象的 PSNR 可以预知, 这就保证了恢复图象的质量, 避免信息过量丢失.

(2) 压缩算法中没有浮点数计算, 不进行空间域到频率域的变换, 因此计算量少, 压缩速度比 SPIHT 快 3 倍以上.

(3) 在压缩倍数为 4 倍时, LIGE 恢复图象 PSNR 高于 SPIHT, 尤其对遥感图象, 压缩效果更好. LIGE 算法在压缩过程中没有空间域到频域的变换, 并且数据处理中只有简单的整数运算, 因此使得算法简便、快捷, 不但压缩速度快, 且易于数字逻辑电路和专用芯片的高速实现. 该算法可以较好地保护图象边缘和变化剧烈的细节, 有利于图象判读与目标识别. 研究成果将对发展我国未来的高分辨率卫星、小卫星通信系统、星-天-地信息网提供有力的技术支撑.

实验结果表明, LIGE 算法优于其他一些方法, 但如何从理论上解释这个结果, 甚至在数学上进行可靠的证明, 将成为今后研究的重点.

参考文献

- 1 Merhav M Feder. Relations between entropy and error probability [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1994, 40(1): 259~266.

- 2 Rissanen J, Langdon G G. Universal modeling and coding [J]. IEEE Trans. on Information Theory, 1981, 27(1): 12~23.
- 3 Rissanen J. Universal coding, information, prediction, and estimation [J]. IEEE Trans. on Information Theory, 1984, 30(4): 629~636.
- 4 Weinberger M J, Rissanen J, Arps R. Applications of universal context modelling to lossless compression of gray scale images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(4): 575~586.
- 5 Said S, Pearlman W A. A new fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Tech., 1996, 6(1): 243~250.
- 6 ISO-14495-1/ITU-T. 87 [S]. Lossless and near-lossless compression of continuous-tone still images.
- 7 Weinberger M J, Seroussi G, Sapiro G. LOCO-I: A low complexity, context-based, lossless image compression algorithm [A]. In: Proceedings Data Compression Conference [C], Snowbird, Utah, USA, 1996: 140~149.



张浩 1972 年生, 1998 年获国防科技大学电子工程学院工学硕士学位, 现为总装备部系统工程研究所五室工程师, 并在国防科技大学航天与材料工程学院攻读博士学位. 研究领域为图象处理.



程子敬 1972 年生, 2001 年获北京航空航天大学计算机应用技术专业工学博士学位, 现在北京航空航天大学航空宇航科学与技术博士后流动站从事遥感信息并行处理技术研究.

周孝宽 1936 年生, 北京航空航天大学教授, 博士生导师. 重要研究领域为数据压缩、图象处理、模式识别.