

基于灰度指纹图像信噪特征的无损压缩算法

张 宁,章毓晋,刘青棣,林行刚

(清华大学电子工程系,北京 100084)

摘 要: 本文提出了一个有效的针对灰度指纹图像的无损压缩算法. 该算法通过将指纹图像的信噪特征融于新一代国际无损图像压缩标准的基本算法(基于上下文预测编码)而实现. 该算法主要包括三个特色技术:基于纹线局部走向的分类预测、体现指纹微观纹理的扩展上下文以及基于成像仪器的分类熵编码器概率模型初始化. 对一组真实数据及 ISO 标准图像的压缩结果表明该算法的压缩比居于国内外文献中的领先水平.

关键词: 无损压缩; 信噪特征; 指纹图像

中图分类号: TN919. 8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 04-0452-04

A Lossless Compression Algorithm Based on Signal-Noise Characteristic of Gray-Level Finger-Print Image

ZHANG Ning, ZHANG Yu-jin, LIU Qing-di, LIN Xing-gang

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In this paper, we propose an efficient algorithm for compressing gray-level finger-print image. This algorithm is implemented by combining signal-noise characteristic of finger-print image with context-based prediction coding, the baseline algorithm for next generation of international standard on lossless image compression. There are mainly three distinguishing features in our proposed algorithm: local direction-based prediction, extended context for micro texture and histogram initialization based on imaging apparatus. Experiments with real finger print images and ISO standard images show that the compression ratio of our method is among the best in the literature.

Key words: lossless image coding; signal-noise characteristic; finger-print image

1 引言

近五、六年来,图像压缩工作者们和国际标准化组织正致力于研究制定新一代的图像压缩标准. 最新的研究结果表明,在有损图像压缩方面 JPEG2000 将以小波变换、累进编码、视觉加权等为核心技术取代基于 DCT 变换的原 JPEG 标准^[1]. 这将在处理各种供人眼主观观察图像的压缩问题方面取得很大的进展. 同时,为了更好地处理另一类图像,即医学图像、遥感图像等并非供主观观察而是供高精度图像分析的压缩问题,ISO JBIG/JPEG 委员会于 1994 年开始广泛征集各种无损压缩方案,并提供了一组标准测试图像,包括航空、医学、视频、图形、扫描生成、文本与图片合成图等各种图像二十余幅^[2]. 经多次测试表明: CALIC 算法^[3]具有最高的平均压缩比,而 LOCO-I 算法^[4]在压缩比、编码速度、算法复杂度的综合性能方面领先. 最终 ISO 确定以基于上下文的预测编码技术作为新一代无损图像压缩的核心算法.

在 ISO 提供的标准测试图像中,有一幅灰度医学指纹图像,这充分表明了考虑新一代无损图像压缩算法时对指纹

图像压缩的关注. 事实上,由于指纹图像所含信息的重要性,在数字指纹图像的首次采集存储中,往往严格、保守地要求无损压缩(在指纹图像的后处理过程中不同识别系统可能接受不同策略的有损压缩算法). 在此背景下本文以 ISO JBIG/JPEG 委员会最新初步确立的基于上下文的预测编码技术为框架,结合指纹图像的信噪特征(宏观特征、微观纹理及噪声分布)实现了一个压缩性能优异的灰度指纹图像无损压缩算法. 下面首先简单介绍新一代基于上下文的预测编码技术的系统框图及算法流程,然后介绍所设计的基于该框架并考虑指纹特征后的改进算法,最后是该算法的实验结果、性能分析及总结展望.

2 基于上下文的预测编码(Context Based Predictive Coding)

在 ISO 征集的 9 种主要的无损压缩方案中,有 7 种算法不约而同地采用了基于上下文预测的图像编码技术,且比另 2 种基于变换的压缩算法具有明显性能优势^[5].

如图 1 所示,基于上下文预测编码的基本算法框架及主

要流程为:图像中的各像素按光栅扫描的顺序依次处理. 处理当前像素 $I(x, y)$ 时, 根据缓存中已处理并存储下来的像素获取先验知识即各种上下文. 根据其功能这些上下文可以分为预测上下文、误差反馈上下文和熵编码上下文. 先根据预测上下文确定对当前像素的预测算法, 获得初步预测值 $\hat{i}(x, y)$; 然后通过误差修正上下文获得修正值 $\bar{\varepsilon}$, 并对初次预测误差 $i(x, y)$ 进行修正, 得到预测值 $\tilde{I}(x, y) = \hat{i}(x, y) + \bar{\varepsilon}$; 将残差 $\varepsilon = I(x, y) - \tilde{I}(x, y)$ 反馈(虚线所示)更新各类上下文, 同时经映射处理, 由熵编码上下文驱动, 分配到相应的熵编码器编码输出.

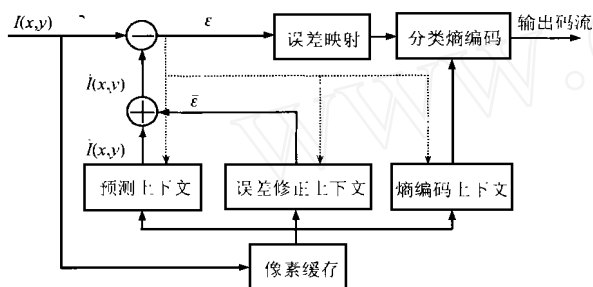


图1 基于上下文的预测编码技术算法框图

3 基于指纹图像信噪特征的无损压缩算法

ISO 确定了以基于上下文的预测编码为新的压缩标准, 但在具体技术细节的实现上(如上下文的选取、预测公式的确立、误差映射及熵编码器的选择等)仍保持着很大的开放性. Baseline 算法以 LOCO-I 的各项技术为主^[6], Advanced 版本融入了 CALIC 等其它技术^[7]. 而如何根据各种特定图像确定最优的算法设置以进一步提高压缩算法的性能, 是实践应用中普遍关心的问题.

在设计针对特定灰度指纹图像的无损压缩算法时, 我们以所处理图像的信噪特征为出发点, 利用指纹图像的宏观特征设计了分类线性预测器; 利用指纹的微观纹理选取了误差修正上下文; 同时将图像的噪声分布反映在分类熵编码器的直方图初始化之中, 最终实现了整个算法, 其基本流程图如图 2 所示, 具体技术细节讨论如下.

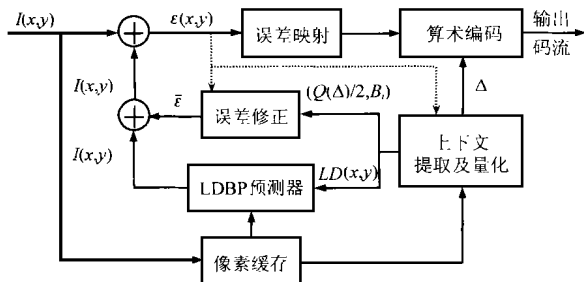


图2 灰度指纹图像无损压缩算法框图

3.1 指纹图像宏观特征的应用: 基于局部纹线走向的分类线性预测(Local Direction-Based Predictor)

作为一类特殊具体的图像, 指纹图像首先有着显著区别于其他图像的宏观特征. 灰度指纹图像很象一幅峰峦起伏的

地形图, 由交替出现的脊和谷组成. 在局部区域里脊和谷走向近似一致, 在整体上脊和谷走向又具有连续渐变的特点. 在指纹脊、谷处像素灰度变化有单调性突变, 而在脊和谷之间垂直于纹线走向的方向上, 像素灰度值近似分段线性变化, 可见图 3. 这些宏观特征非常适合采取利用相邻像素预测的方法进行逼近.

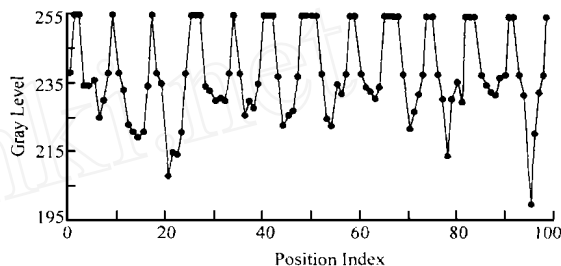


图3 垂直于纹线走向方向上像素灰度变化示意图

实验中用局部纹线走向标识纹线特征, 将其走向均匀量化为 8 个方向, 由此产生 8 种不同的宏观特征基元. 研究表明, 这 8 种不同特征基元中相邻像素间的相关性是有很大差别的, 如图 4 所示. 根据这一特点, 本文设计了基于局部纹线走向的分类线性预测算法. 对于当前像素 $I(x, y)$ (边缘像素除外), 在其正上方选择图像子块, 计算该图像块的主方向^[7]并量化为 8 类, 作为当前像素点所在纹线走向的预测值 $LD(x, y)$ (其值为 0 到 7). $I(x, y)$ 的预测值 $\hat{i}(x, y)$ 由周围 6 个像素 $I_w, I_n, I_{nw}, I_{ne}, I_{sw}, I_{se}$ 的线性组合求得(各下标含义见图 5). 根据 $LD(x, y)$ 选用不同的预测公式, 预测系数 $a_w, a_n, a_{nw}, a_{ne}, a_{sw}, a_{se}$ 经脱机训练求得共 8 组, 即:

$$\hat{I}_{LD(x,y)}(x,y) = a_{w,LD(x,y)} I_w + a_{n,LD(x,y)} I_n + a_{nw,LD(x,y)} I_{nw} + a_{ne,LD(x,y)} I_{ne} + a_{sw,LD(x,y)} I_{sw} + a_{se,LD(x,y)} I_{se} \quad (1)$$

图 4 展示了 8 种宏观特征基元中相邻像素间相关性的示意图。每个子图 (a) 到 (h) 代表一个方向，图中显示了当前像素 c 及其周围的 6 个像素 (w, n, nw, ne, sw, se) 的相对位置。图中数字表示该相邻像素与 c 的相关性强度，数字越小表示相关性越强。

图4 8 种宏观特征基元中相邻像素间相关性示意

c 为当前像素, 圈中数字越小表示该相邻像素与 c 相关性越强

3.2 指纹图像微观纹理特征的应用: 基于上下文的误差反馈

对于指纹图像微观邻域的凹凸起伏等非线性特征, 通过构造反映微观纹理和误差能量的上下文, 并用该上下文自适应地对分类线性预测值进行修正的方式来体现. 分类线性预测的误差大小主要与该像素所处的位置的线性平滑程度有关, 这种平滑程度可以通过该点的局部梯度以及周围像素的预测误差来反映, 在具体实现上下文构造时, 本文采用扩展 CALIC 上下文结构^[3], 误差能量函数设为(下标含义见图 5):

$$\Delta = Ad_h + Bd_v + C|e_w| + D|e_n| + E|e_{nw}| + F|e_{ne}| \quad (2)$$

其中:

$$d_h = |I_w - I_{nw}| + |I_n - I_{nw}| + |I_{ne} - I_n|$$

$$d_v = |I_w - I_{sw}| + |I_n - I_{nn}| + |I_{ne} - I_{nne}|$$

$$e = I - \hat{I}$$

系数 A, B, C, D, E, F 通过脱机线性回归的方法, 最小化 $\Delta - |e|$ 求得, 为简化运算近似取 $A = B = C = D = 1, E = F = 0.5$. 实际编码时用周围像素的修正后误差 $\varepsilon = I - \hat{I}$ 取代式(2)中的各首次预测误差 $e = I - \hat{I}$, 最终的误差能量函数为:

$$\Delta = d_h + d_v + |\varepsilon_w| + |\varepsilon_n| + |\varepsilon_{nw}| / 2 + |\varepsilon_{ne}| / 2 \quad (3)$$

微观纹理用以下 3 组上下文同时体现:

$$\begin{aligned} B_0 &= \{b_{00}, b_{01} \dots b_{09}\} = \{I_n, I_w, I_{nw}, I_{ne}, I_{nn}, I_{ww}, 2I_n - I_{nn}, \\ &\quad 2I_w - I_{ww}, I_{nnw}, I_{nnw}\} \\ B_1 &= \{b_{10}, b_{11} \dots b_{19}\} = \{I_n, I_w, I_{nw}, I_{ne}, I_{nn}, I_{ww}, 2I_n - I_{nn}, \\ &\quad 2I_w - I_{ww}, I_{nne}, I_{nee}\} \\ B_2 &= \{b_{20}, b_{21} \dots b_{29}\} = \{I_n, I_w, I_{nw}, I_{ne}, I_{www}, 2I_{nw} - I_{nnww}, \\ &\quad \varepsilon_w, \varepsilon_n, \varepsilon_{nw}, \varepsilon_{ne}\} \end{aligned}$$

上下文量化策略:

$$Q(b_{ik}) = \begin{cases} 1, & \text{if } b_{ik} = \hat{I}(x, y) \text{ for } 0 \leq ik \leq 25 \\ \text{OR if } b_{ik} < 0 \text{ for } 26 \leq ik \leq 29 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

最终得到 3 组量化后的合成上下文 $C_i(Q(\Delta)/2, B_i) i = 0, 1, 2$.

2. 设当前像素所处的上下文为 $C_i(\delta, \beta_i)$, 各上下文中误差 $\varepsilon = I - \hat{I}$ 的均值设为 $\bar{\varepsilon}_i(\delta, \beta_i)$, 那么当像素预测值修正为:

$$\bar{\varepsilon} = P(C_0) \bar{\varepsilon}_0(\delta, \beta_0) + P(C_1) \bar{\varepsilon}_1(\delta, \beta_1) + P(C_2) \bar{\varepsilon}_2(\delta, \beta_2)$$

其中 $P(C_i)$ 由 3 种上下文的出现频率 N_i 决定: $P(C_i) = N_i / \sum_{i=0}^2 N_i$, 所以最终预测结果为:

$$\hat{I}(x, y) = \hat{I}(x, y) + \bar{\varepsilon}$$

3.3 成像仪器噪声特性的应用: 熵编码分类及直方图初始化

为了在熵编码时进一步缩小预测误差的动态范围, 将预测误差按能量大小分类送入熵编码器. 在选择熵编码上下文时, 将误差能量 Δ 量化为 8 级, 即 $Q(\Delta) = 0, 1, \dots, 7$, 量化阈值 $q_0, q_1, \dots, q_8$, 通过脱机动态规划的方法最小化

$$- \sum_{d=0}^8 \sum_{q_d \leq \Delta \leq q_{d+1}} p(e|\Delta) \log_2(p(e|\Delta))$$

求得. 训练后的量化阈值为:

$$\begin{aligned} 0 &= q_0 < q_1 = 7 < q_2 = 17 < q_3 = 28 < q_4 \\ &= 46 < q_5 = 65 < q_6 = 91 < q_7 = 148 < q_8 = \infty \end{aligned}$$

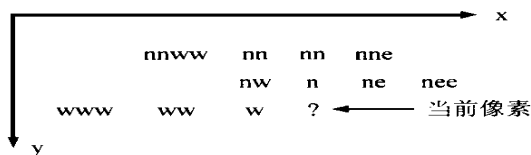


图5 像素相邻关系示意

表1 新算法与其它无损压缩算法对 ISO 标准测试图像 Finger 的压缩率比较 (bits/pixel)

方法	NEW	CLARA	CALIC	LOCO-A	SPIHT _{S+P}	LOCO-I	JPEGLS	CREW	PNG	LJPEG	ALCM	JPEG	PELIC
比特率	5.37	5.46	5.47	5.50	5.51	5.63	5.66	5.66	5.81	5.85	5.94	5.95	6.11

第二组实验数据为日本一家公司提供的 10 幅由 Ink-and-Paper 方式经数字扫描仪扫描得到的真实灰度指纹图像 (典型

实验中进一步发现, 由于 $\hat{I}(x, y)$ 已经在极大程度上对 $I(x, y)$ 进行了逼近, 残差 $\varepsilon = I(x, y) - \hat{I}(x, y)$ 中成像仪器噪声已占相当成分. 在分类熵编码器的 8 组统计概率模型的直方图中, 不同指纹图像的残差最终呈现相似的统计分布. F01、F03 (图 6) 是由同一成像仪器生成的两幅不同的指纹图像, 如图 7 所示, 它们残差的分布规律非常相似, 这在很大程度上是因为它们受到来自同一成像仪器的相同性质成像的噪声的影响. 编码时将这些分布输入熵编码器作为初始概率模型, 加快了熵编码器对特定图像的学习适应进程, 进一步减小了编码冗余.

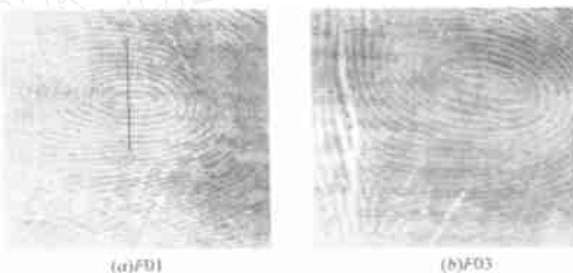


图6 典型实验用指纹图像及图3采样位置示意 (见 (a) 中竖直黑线)

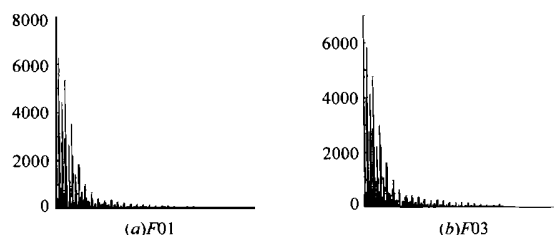


图7 同一成像仪器生成的不同指纹图像残差分类直方图的相似性示意

4 灰度指纹图像无损压缩算法的性能

为检测新算法 (NEW) 的性能, 将其与一些文献中较多见的无损算法进行了实验比较. 参与比较的各算法的具体细节请参见本文和文 [8] 中的参考文献部分, 其中 LJPEG 指 Cornell 大学研制的 JPEG 无损压缩算法, JPEG 为采用 Huffman 编码的老一代国际标准算法, 而 JPEGLS 是现行的新一代国际标准算法 [5].

第一组实验数据为 ISO 标准测试图像 Finger (医学指纹图像 $512 \times 512, 8\text{bit}$), 结果见表 1, 其中除 SPIHT_{S+P} 为下载执行外 (目前基于小波变换的最优无损压缩算法之一 [9], 其执行程序通过 ipl.rpi.edu/SPIHT 获得), 其它均来自各算法的技术报告. 由表 1 可见新算法的压缩比高于文献中所见的其它无损压缩算法.

图像参见图 6). 图像中纹线一般约为 8 个像素宽 (含一个脊一个谷), 选择 16×16 的图像子块作为宏观特征基元. 对该组

实验图像的压缩结果表明(见表 2),新算法对 8 幅参与参数训练的图像平均压缩比可比 CALIC 提高 5.5%,高于 SPIHT_{S+p} 12.6%,高于 LOCO-I 11.1%;对另 2 幅未参与训练的图像,新算法的平均压缩比高于 CALIC 4.9%,高于 SPIHT_{S+p} 10.3%,高于 LOCO-I 11.6%。

表 2 新算法与几个当前最优秀无损压缩算法对一组真实指纹图像的压缩率比较(bits/pixel)

(a) 对参与参数训练的 8 幅图像的压缩结果

Image	LOCO-I	SPIHT _{S+p}	CALIC	NEW
F01	3.991	4.001	3.774	3.607
F02	4.256	4.250	4.022	3.838
F03	4.088	4.118	3.812	3.615
F04	3.962	3.951	3.686	3.504
F05	4.346	4.215	3.980	3.713
F06	3.833	3.973	3.600	3.429
F07	4.392	4.470	4.128	3.938
F08	4.591	4.605	4.302	4.089
Average	4.182	4.198	3.913	3.717

(b) 对未参与参数训练的 2 幅图像的压缩结果

Image	LOCO-I	SPIHT _{S+p}	CALIC	NEW
F09	4.764	4.723	4.459	4.273
F10	4.593	4.432	4.257	4.004
Average	4.679	4.578	4.358	4.139

5 总结与展望

本文提出了将特定图像的宏观特征、微观纹理、噪声特性分别与新一代 JPEG 无损压缩算法中的预测器、误差修正、熵编码驱动模型相结合设计高效专用无损压缩算法的基本思想和实现方法。实验表明本文提出的灰度指纹图像无损压缩算法由于更好地把握了指纹图像的信噪特征因而在压缩比方面优于其它压缩算法。根据文献[11]中的无损压缩极限估计方法可知,在本文实验结果的基础上无损压缩很难再有明显超过 0.2 比特/像素的进一步进展。

由于成像仪器的信噪能力所限,在图像采集中不可避免地会混入各种随机噪声,无损压缩算法只能为无失真保存这些噪声而付出巨大代价。为此我们正在进行利用仪器测量微观特征的准无损图像压缩算法的研究,并设计了 L_{∞} 准则约束下的高质量灰度指纹图像压缩算法,以期在保证指纹识别的前提下进一步提高压缩率。

致谢 加拿大 Western Ontario 大学武筱林教授为本研究提供了参考文献、ISO 标准测试图像以及 CALIC 算法程序;微软中国研究院李劲博士帮助提供了 JPEG-LS 程序,作者在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] ISO/IEC JTC1/SC29/WG1. JPEG 2000, Part 1: Final Committee Draft Version 1.0 [S]. ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 Document: N1646R, 2000.
- [2] ISO/IEC JTC1/SC29/WG1. Call for Contributions-Lossless Compression of Continuous-Tone Still Pictures [S]. ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 Document: N41, 1994.

- [3] Xiaolin Wu and Nasir Memon. Context-based, adaptive, lossless image coding [J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(4): 437-444.
- [4] Weinberger, M.J., Seroussi, G. and Sapiro, G. LOCO-I: New Developments [S]. ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 Document: N245, 1995.
- [5] ISO/IEC 14495-1 ITU Recommendation T.87. Information Technology-Lossless and Near-Lossless Compression of Continuous-Tone Still Pictures [S]. 1999.
- [6] Weinberger, M.J., Seroussi, G. and Sapiro, G. LOCO-A: An Arithmetic Coding Extension of LOCO-I [S]. ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 Document: N342, 1996.
- [7] 沈学宁. 数字图像的若干局部性质及其在指纹描述信息提取中的应用 [J]. 北京大学学报, 1996, (3): 38-51.
- [8] Nasir Memon and Xiaolin Wu. Recent Developments in context-based predictive techniques for lossless image compression [J]. Computer Journal, 1997, 40(2/3): 127-136.
- [9] Amir Said and William A. Pearlman. An image multiresolution representation for lossless and lossy compression [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(9): 1303-1310.
- [10] Ning Zhang, Yujin Zhang, Qingdi Liu and Xianggang Lin. Method for estimation lossless image compression bound [J]. Electronics Letters, 1999, 35(22): 1931-1932.
- [11] 张宁, 章毓晋, 刘青棣, 林行刚. L_{∞} 准则约束下的高质量灰度指纹图像压缩算法 [J]. 清华大学学报, 2000, 40(9): 28-32.

作者简介:



张 宁 1970 年出生。1994 年和 1999 年于清华大学电子工程系分别获学士学位和博士学位。现为加拿大 Western Ontario 大学计算机科学系博士后研究员。研究方向主要为图像编码和计算机视觉。



章毓晋 教授, 博士生导师。1989 年获比利时列日大学应用科学博士学位, 从 1989 年至 1993 年在荷兰德夫特大学作博士后及研究工作。1993 年到清华大学工作, 现为图像图形研究所副所长。研究领域主要在其倡导的图像工程(图像处理、图像分析、图像理解及其技术应用)学科, 已发表 150 余篇研究论文, 著书三本——《图像工程(上册): 图像处理和分析》, 《图像工程(下册): 图像理解与计算机视觉》和《图像分割》。现为中国图像图形学会学术委员会副主任, 《中国图像图形学报》副主编, 《Pattern Recognition Letters》和《电子与信息学报》编委, 2000 年召开的第一届国际图像图形学术大会程序委员会共同主席, IEEE 高级会员。