

基于离散 Tchebichef 矩和软决策量化的图像压缩

陆 刚 肖 斌 王 国 胤

(重庆邮电大学计算智能重庆市重点实验室 重庆 400065)

摘 要 图像压缩编码能有效地减少图像像素间的信息冗余,并同时能保证图像重构质量和较低的计算复杂度。基于变换域的图像压缩编码是目前最常用且性能最优的压缩技术之一,但基于离散正交矩的图像压缩方法还未被深入研究。在研究 JPEG 的编解码流程的基础上,提出了基于离散 Tchebichef 矩的图像压缩算法。通过 KS 测试统计的方法研究变换系数的分布规律,利用软决策量化设计最优的量化表近似码率和失真度,从而提升了重构图像质量;接着对量化结果进行熵编码,最终实现了基于离散 Tchebichef 矩的图像压缩和重建全过程。在 JPEG 顺序编解码的流程下,与主流的 DCT 图像压缩方法进行比较,实验结果表明,比特率大于 0.5bpp 时,该算法重构的图像的质量更高;当 PSNR 分别为 35dB,40dB,45dB 时,其压缩性能明显优于 DCT。同时,它们在编解码运行时间上接近。

关键词 离散 Tchebichef 矩,软决策量化, JPEG, 图像压缩,峰值信噪比

中图分类号 TP301.6 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.11.059

Image Compression Based on Discrete Tchebichef Moments and Soft Decision Quantization

LU Gang XIAO Bin WANG Guo-yin

(Chongqing Key Laboratory of Computational Intelligence, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract Image compression coding can not only effectively decrease the information redundancy among image's pixels, but also ensure its reconstruction quality and lower computation complexity. The transform domain based image compression coding is one of the most commonly used and the best performed compression technologies, but discrete orthogonal moments based image compression method has not yet been deeply studied. This paper studied the basis procedures of encoding and decoding of JPEG, and proposed an image compression algorithm based on discrete Tchebichef moments. We studied the distribution of the transformed coefficients by the approach of KS test statistic and designed the optimized quantization table by taking advantage of soft decision quantization to approximate the rate and the distortion for the purpose of improving reconstruction quality. Then, we encoded the results of quantization by using Huffman entropy coding. Finally, we realized the whole process of image compression and reconstruction based on discrete Tchebichef moments. Under the framework of JPEG baseline system, through comparing with the mainstream DCT image compression method, the experimental results show that the algorithm is of higher compression ratio when the bit ratio exceeds 0.5bpp. The compression performance of DTT is apparently superior to DCT when PSNR is 35dB, 40dB, 45dB respectively. Meanwhile, they are similar on the elapsed time in encoding and decoding.

Keywords Discrete Tchebichef moments, Soft decision quantization, JPEG, Image compression, Peak signal-to-noise ratio (PSNR)

1 引言

图像压缩作为数据压缩技术在数字图像中的应用,是数字图像处理领域中一个重要的学科分支^[1]。随着信息技术的进步,人类大数据的时代已经到来,其中很大一部分是视频和图像数据,图像数据洪水时代不可避免。目前,图像压缩和存储能力相对不足,因此对图像数据进行高效的压缩存储,为社会提供简洁有效的信息是异常重要的。

图像变换作为图像处理技术领域的一项重要基础理论,是图像视频处理中的研究热点,也是图像大数据压缩存储研究的有效手段。矩是一种重要的图像处理和分析工具,广泛

应用于计算机视觉、模式识别、图像压缩、数字水印和纹理检索等领域。常用的矩有几何矩、复数矩、旋转矩、正交矩等^[2]。而正交矩的变换形式简单,易于图像重建,且具有最小的冗余信息和对噪声的敏感性,正交矩具有以上显著优点,成为数字图像处理领域的研究热点。

离散正交矩由于其良好的正交性和信号可离散表示的原理,应用于图像分析和识别,如离散 Tchebichef^[3], Krawtchouk^[4], Racah^[5], Hahn^[6]和双 Hahn^[7],实验结果表明离散正交矩有着良好的图像描述能力和重建性能,被广泛应用于模式识别^[8]、机器视觉^[9]、数字水印^[10]等领域。最近,Prattipati^[11]等提出一种类似于 JPEG 顺序编码框架的基于整数离

到稿日期:2015-10-06 返修日期:2016-02-02 本文受重庆市研究生科研创新项目(CYS15168),国家自然科学基金面上项目(61572092)资助。

陆 刚(1989-),男,硕士,主要研究方向为图像压缩编码, E-mail: 390221689@qq.com;肖 斌(1982-),博士,副教授,主要研究方向为图像压缩编码、图像增强与复原、图像分析与识别、信息隐藏, E-mail: xiaobin@cqupt.edu.cn (通信作者);王国胤(1970-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为计算智能、云计算智能软件与系统、智能信息处理及智能化软件。

散 Tchebichef 变换 (DTT) 的图像有损压缩算法, 指出 DTT 具有良好的压缩能力和低时间计算复杂度, 完全可以替代传统的基于 DCT 的图像压缩算法。但该方法只讨论了整数离散 Tchebichef 矩在图像压缩中的快速计算问题, 在决定图像压缩质量的量化设计方面并未进行深入讨论。

量化是提高压缩性能的有效方法, JPEG 标准中建议的量化表是从心理物理学的研究结果中得来的, 但由于 DCT 和 DTT 的变换矩阵不同, JPEG 中建议的量化表在本算法中不再适用。文献[12]假设 DCT 变换系数服从 Laplacian 分布, 码率通过数据统计来估计, 利用 JPEG 中的哈夫曼熵编码, 但由于码率误差较大未能优化量化表。为了解决以上问题, 文献[13]利用贪婪算法和最陡降算法, 以较高计算复杂度为代价进行实时编码, 最终优化了码率和失真度。为了避免实际反复编码, 文献[14]采用栅格方法和量化 DCT 变换系数的经验信息熵估计码率, 构建了码率失真最优量化表。以上都是利用硬决策方法来设计量化步长, 近些年来有学者提出软决策的量化方法^[16], 其原理是根据不同变换系数出现的频率建模, 以权衡码率和失真度。设计合理的系数概率分布是实现高效数据压缩编码的关键, 本文通过 KS 测试统计的方法研究非 DC 变换系数的分布规律, 利用 Laplacian 模型对 DTT 系数进行建模, 提出一种针对 DTT 的软决策量化方法, 实现基于 DTT 的最优量化表。

本文第 2 节介绍 Tchebichef 矩的数学模型及其正逆变换公式; 第 3 节利用 KS 测试统计的方法对 DTT 高频系数服从的分布规律进行了研究; 第 4 节给出软决策量化具体过程, 并设计了基于 DTT 的最优量化表; 第 5 节叙述了基于 DTT 的图像有损压缩编解码流程, 通过仿真实验将本文方法与传统图像压缩方法 DCT 作对比, 证明了该方法具有良好的重构性和压缩性, 在编解码时间复杂度上与传统 DCT 方法近似; 最后得出结论。

2 离散 Tchebichef 矩

离散 Tchebichef 矩是一种正交变换, 变换核各矢量间单位正交, 可以有效地去除图像像素间的相关性, 具有极高的压缩性能。 n 阶归一化离散 Tchebichef 多项式如下^[2]:

$$\bar{t}_n(i) = \frac{t_n(i)}{\sqrt{\rho(n, N)}} \quad (1)$$

其中, $t_n(i)$ 是最初的离散 Tchebichef 多项式, 定义为:

$$t_n(i) = n! \sum_{k=0}^n (-1)^{n-k} \binom{N-1-k}{n-k} \binom{n+k}{n} \binom{i}{k} \quad (2)$$

$\sqrt{\rho(n, N)}$ 是 $\bar{t}_n(i)$ 的平方规范, 即:

$$\begin{aligned} \rho(n, N) &= \frac{N(N^2-1)(N^2-2^2)\cdots(N^2-n^2)}{2n+1} \\ &= (2n)! \binom{N+n}{2n+1} \end{aligned} \quad (3)$$

归一化离散 Tchebichef 多项式有以下递推关系:

$$\bar{t}_n(i) = \frac{(a_1 i + a_2) \bar{t}_{n-1}(i) + a_3 \bar{t}_{n-2}(i)}{n} \quad (4)$$

其中,

$$\bar{t}_0(i) = \frac{1}{\sqrt{N}}, \bar{t}_1(i) = \frac{2i+1-N}{N} \sqrt{\frac{3}{N(N^2-1)}}$$

$$a_1 = \frac{2}{m} \sqrt{\frac{4m^2-1}{N^2-m^2}}, a_2 = \frac{1-N}{m} \sqrt{\frac{4m^2-1}{N^2-m^2}} \quad (5)$$

$$a_3 = \frac{1-m}{m} \sqrt{\frac{2m+1}{2m-3}} \sqrt{\frac{N^2-(m-1)^2}{N^2-m^2}}$$

对于二维输入图像 $X(i, j)$, 经过 DTT 后的变换系数 $Y(n, m)$ 为:

$$Y(n, m) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} \bar{t}_n(i) \bar{t}_m(j) X(i, j) \quad (6)$$

逆变换为:

$$X(i, j) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} Y(n, m) \bar{t}_n(i) \bar{t}_m(j) \quad (7)$$

其中, $i, n=0, 1, 2, \dots, N-1$; $j, m=0, 1, 2, \dots, M-1$ 。

同理, 对于大小为 $N \times N$ 的输入数据, 正变换和逆变换也可以替代式(6)和式(7)以矩阵的形式表示:

$$Y = A \cdot X \cdot A^T, X = A^T \cdot Y \cdot A \quad (8)$$

其中, $A^T = A^{-1}, A(i, j) = \bar{t}_i(j)$ 。

3 KS 测试统计

KS 测试统计^[15]是一种对比样本分布和参考概率分布的测试方法。对于给定的样本集 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 样本分布函数 $F_X(\cdot)$ 定义为:

$$F_X(y) = \begin{cases} 0, & y < x_1 \\ k/n, & x_k \leq y < x_{k+1}, k=1, 2, \dots, n-1 \\ 1, & y \geq x_n \end{cases} \quad (9)$$

其中, $x_k (k=1, 2, \dots, n)$ 是按从小到大重新排列的样本, $F(x)$ 为设定的分布函数, 则 KS 测试统计 t 定义为:

$$t = \max_{k=1, 2, \dots, n} |F_X(x_k) - F(x_k)| \quad (10)$$

KS 测试统计就是计算样本分布函数和参考分布函数在样本点 x_i 的最大距离。对于已设定的几种参考密度函数, 最小的 KS 测试统计意味着样本数据得到与参考分布函数较合理的分布规律。

以 8×8 的图像分块大小为例, 每一块进行 DTT 变换和 Zigzag 扫描后得到 64 个变换域系数 $X_i, 1 \leq i \leq 64$ 。当 $i=1$ 时, 由于 DC 系数分布不规则而难以建模, 因此把它们仅仅看作均匀随机信源分布^[16], 即 $X_1 = \{X_1(k)\}_{k=1}^n$ (n 为大小为 8×8 的块数, 即 $n = \frac{\text{图像长} \times \text{图像宽}}{64}$)。对于 AC 系数, 利用 KS 测试统计方法研究 DTT 中 AC 系数比较符合的分布规律。使用大小为 256×256 的灰度测试图像“aerial”和“mandrill”进行实验, 如图 1 所示。



(a) "aerial"

(b) "mandrill"

图 1 测试图像

本文仅考虑两种常见的分布形式, 即 Laplacian 分布和 Gaussian 分布, 研究 AC 系数 $X_i = \{X_i(k)\}_{k=1}^n (2 \leq i \leq 64)$ 较符合的分布规律。Laplacian 的概率密度函数为:

$$f(x_{i,k}) = \frac{1}{2\lambda_i} e^{-\frac{|x_{i,k}|}{\lambda_i}}, 2 \leq i \leq 64 \quad (11)$$

其中, 缩放因子 λ_i 可以通过最大似然 (ML) 估计计算。

$$\lambda_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |x_{i,k}|, 2 \leq i \leq 64 \quad (12)$$

Gaussian 的概率密度函数为:

$$f(x_{i,k}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} e^{-\frac{(x_{i,k}-\lambda_i)^2}{2\sigma_i^2}}, 2 \leq i \leq 64 \quad (13)$$

其中,方差 σ_i^2 的计算公式为:

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_{i,k} - \lambda_i)^2, 2 \leq i \leq 64 \quad (14)$$

图像“aerial”和“mandrill”的部分 AC 系数如 X_2, X_3, X_4 的 KS 测试结果如图 2 和图 3 所示。

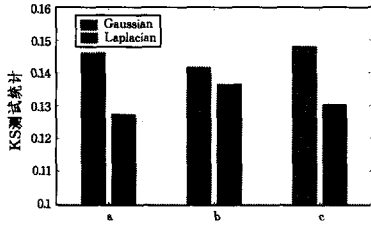


图 2 图像“aerial”的 KS 测试统计(a, b, c 分别表示变换系数 X_2, X_3, X_4)

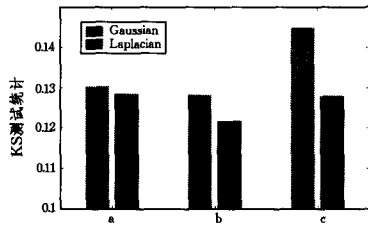


图 3 图像“mandrill”的 KS 测试统计(a, b, c 分别表示变换系数 X_2, X_3, X_4)

从图 2 和图 3 的 KS 测试结果可以看出,在点 X_2, X_3, X_4 , Laplacian 的统计结果小于 Gaussian 的统计结果,这表明 DTT 高频系数更符合 Laplacian 分布。

4 软决策量化

考虑到重构图像的质量,不同频域系数可看成独立分布的信源,采用香农下界近似每个信源的码率失真函数。对大量图像进行变换得到变换后的系数,根据大数定理确定变换系数的分布情况。基于新的设计原则,应用有效的统计模型设计基于正交变换的量化表,从而极大地提高了图像重构质量,改善了压缩性能。

图像经 DTT 变换后,DC 系数服从随机分布,因此,得到 $D(X, q_1) = q_1^2/12, q_1$ 是 DC 系数上的量化步长。经过第 3 节的讨论,AC 系数服从 Laplacian 分布。

预先决定最大整数量化步长 $q_{max} = 46, q_i \in \{1, 2, \dots, q_{max}\}, 2 \leq i \leq 64$, 相应的死区范围 s_i 为:

$$s_i = q_i - \lambda_i + \frac{q_i}{e^{q_i/\lambda_i}} \quad (15)$$

关于死区范围 s_i 和缩放因子 λ_i 的死区量化失真 $D_{Lap}(\lambda_i, q_i)$ 的定义为:

$$D_{Lap}(\lambda_i, q_i) = 2\lambda_i^2 - \frac{2q_i(\lambda_i + s_i - 0.5q_i)}{e^{s_i/\lambda_i}(1 - e^{-q_i/\lambda_i})} \quad (16)$$

若预置失真度 d 的值大于信源方差 $\sigma_i^2 (2 \leq i \leq 64)$, 则直接快速量化所有的频域系数为 0, 即对应的量化系数 $q_i^* = q_{max}$, 否则量化系数 q_i^* 采用二分法选取, 如式(17)所示:

$$q_i^* = \begin{cases} \min\{\lfloor \sqrt{12d} \rfloor, q_{max}\}, & i=1 \\ \max\{q_i : D_{Lap}(\lambda_i, q_i) \leq d\}, & 2 \leq i \leq 64 \end{cases} \quad (17)$$

基于 Laplacian 模型的 DTT 最优量化表设计的具体流程如图 4 所示。

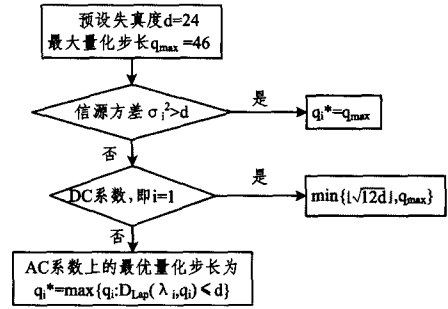


图 4 基于 Laplacian 模型的 DTT 最优量化表的设计流程图

灰度图像大小为 256×256 的“Cameraman”用于计算 DTT 的量化表, 预设失真度 $d=24$, 得到基于 DTT 的大小为 8×8 的量化矩阵, 如表 1 所列。

表 1 基于 DTT 的量化矩阵

16	16	16	16	16	16	16	16
16	16	16	16	16	16	16	16
16	16	16	16	16	16	16	16
16	16	16	16	16	16	16	16
16	16	16	16	16	16	17	19
16	16	16	16	16	17	19	26

5 实验及性能评价

5.1 图像压缩编解码流程

JPEG 是应用广泛的一种标准有损图像压缩方法。本文将借鉴 JPEG 编码和解码的具体流程^[18] 来实现基于 DTT 的数字图像压缩。

基于 DTT 的图像压缩编码和解码框架类似于基于 DCT 的 JPEG 顺序编、解码流程, 包括 Zigzag 扫描、量化、熵编码等。不同的是, 在编码过程中正向 DTT 替代了正向 DCT, 解码过程中逆向 DTT 替代了逆向 DCT, 为了提高压缩性能和图像重构质量, 利用软决策方法重新设置了新的量化步长。其编码和解码流程如图 5 所示。

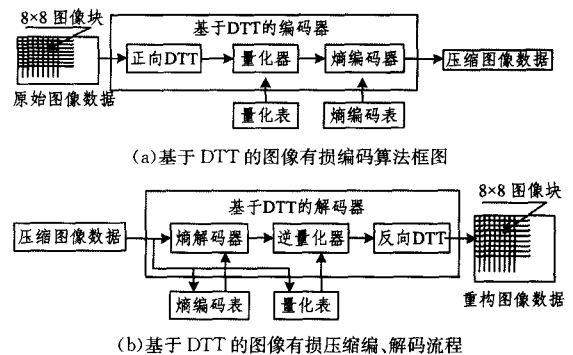


图 5 基于 DTT 的图像有损压缩、解码流程

5.2 与离散余弦变换(DCT)比较

将大小为 512×512 ^[18] 的灰度图像“Lena”和大小为 768×512 或 512×768 ^[18] 的灰度图像分别用于分析和比较 DCT 和 DTT 的重构图像的质量和压缩性能。在比特率一定的情况下, 通过微调量化矩阵的乘数因子比较峰值信噪比 (PSNR)

和均方根误差(RMSE)。乘数因子越大,量化步长越大,图像信息损失越严重,则重构图像的质量越低。较低的 RMSE 意味着接收端通过解码之后得到了更高质量的重构图像。码率 (bpp) 表示平均每个像素的比特数。

从图 6 可以看出,图像“Kodim06”在码率为 0.25bpp 时,提出方法的 PSNR 大于传统方法的 PSNR,其 RMSE 小于 DCT 的 RMSE,其压缩性能优于 DCT 的;其余测试结果表明,一般当码率不大于 0.5bpp 时,传统 DCT 方法的 PSNR 大于 DTT 方法的,DCT 方法的 RMSE 小于 DTT 方法的。此时,重构图像存在严重的方块效应,不宜被人类视觉接受。当码率大于 0.5bpp 时,本文所提方法的 PSNR 和 RMSE 要优于传统 DCT 方法的,重构图像质量更高,DTT 的压缩性能一致好于 DCT。经验表明,PSNR 值为 40dB 左右时,重构图像的质量被认为是可以接受的。因此接下来研究当 PSNR 值分别为 35dB,40dB,45dB 时 DCT 和 DTT 的码率,8 幅灰度测试图像的大小均为 256×256 ^[19],结果如表 2 所列。

从表 2 可以看出,当 PSNR 一定时,提出方法相比 DCT 方法编解码后的比特率均有所降低。当 PSNR 为 35dB 时,比特率平均减少了 0.25bpp;当 PSNR 为 40dB 时,比特率平均减少了 0.49bpp;当 PSNR 为 45dB 时,比特率平均减少了 0.20bpp。结果表明,当 PSNR 分别为 35dB,40dB,45dB 时,使用 DTT 和优化量化方法的压缩性能优于传统 DCT,因此节省了大量存储空间和传输时间。

PSNR 分别为 35dB,40dB,45dB 时,对表 2 中的图像分别进行 DCT 和 DTT 编解码操作,得到的平均运行时间如表 3 所列。当 PSNR 为 35dB 和 40dB 时,提出方法的运行时间少于 DCT 方法的;当 PSNR 为 45dB 时,提出方法的运行时间长于 DCT 方法的,但差别不大。因此,DTT 和 DCT 在编、解码运行时间上接近。

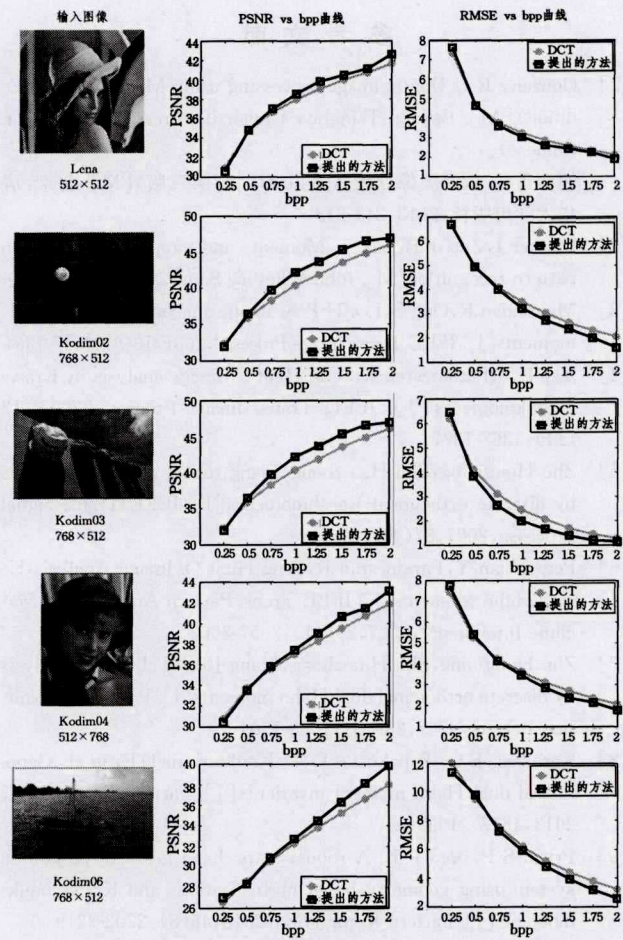


图 6 比特率分别为 0.25bpp,0.5bpp,⋯,2bpp 时,对图像 Lena、Kodim02、Kodim03、Kodim04、Kodim06 分别进行 DCT 和 DTT 编、解码后对应的 PSNR 和 RMSE 曲线

表 2 PSNR 值分别为 35dB,40dB,45dB 时,对应 DCT 和 DTT 编解码后的比特率

灰度图像	Lena		Kodim02		Kodim03		Kodim04		Kodim06		Kodim06	
	DCT	DTT	DCT	DTT	DCT	DTT	DCT	DTT	DCT	DTT	DCT	DTT
PSNR (dB)												
35	2.78	2.36	1.80	1.66	1.63	1.53	1.60	1.41	1.32	1.05	0.63	0.56
40	4.04	3.33	2.92	2.48	3.04	2.49	2.71	2.18	2.14	1.76	1.28	0.96
45	4.70	4.47	3.80	3.62	3.64	3.49	3.53	3.31	3.06	2.83	2.23	1.86

灰度图像	Kodim02		Kodim03		Kodim04		Kodim06		Kodim06		Kodim06	
	DCT	DTT	DCT	DTT	DCT	DTT	DCT	DTT	DCT	DTT	DCT	DTT
PSNR (dB)												
35	1.11	0.97	1.82	1.60	3.44	2.90	3.57	3.17	2.01	1.84	2.36	2.02
40	2.38	1.92	3.27	2.75	4.48	4.02	4.49	4.07	3.45	2.92	3.57	3.07
45	3.22	3.04	3.79	3.61	5.01	4.79	4.96	4.84	4.19	4.02	4.17	4.01

表 3 PSNR 值分别为 35dB,40dB,45dB 时,对应 DCT 和 DTT 的平均编解码运行时间(s)

PSNR (dB)	方法	
	DCT	DTT
35	1.49	1.38
40	1.92	1.77
45	2.16	2.26

结束语 本文提出了一种新的基于离散 Tchebichef 矩进行图像有损压缩及重建的有效算法,利用 KS 测试统计方法证明了 DTT 高频系数近似服从 Laplacian 分布,通过 Lapla-

cian 分布建模 AC 系数,联合优化了码率和失真度,得到了最优的量化表。实验表明,当码率大于 0.5bpp 时,DTT 方法所重构图像的质量好于 DCT 方法。当 PSNR 分别为 35dB,40dB,45dB 时,使用软决策和 DTT 方法的压缩性能一致好于 DCT 方法,因此节省了大量存储空间和传输时间;同时,DTT 和 DCT 在编、解码运行时间上接近。由于 DTT 具有良好的去相关性、快速的迭代计算、完美的重构性,因此在图像视频压缩领域取代传统 DCT 方法是可行的。然而,为了达到符合 DTT 的最大压缩性能,应该深入研究并设计基于 DTT 的量化表。

参考文献

- [1] Gonzalez R C. Digital image processing using MATLAB(3rd Edition)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013; 211 (in Chinese)
冈萨雷斯. 数字图像处理 MATLAB 版(第三版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013; 211-213
- [2] Flusser J, Zitova B, Suk T. Moments and moment invariants in pattern recognition[M]. John Wiley & Sons, 2009
- [3] Mukundan R, Ong S, Lee H P A. Image analysis by Tchebichef-moments[J]. IEEE Trans. Image Process., 2001, 10(9): 1357-1364
- [4] Yap P T, Paramesran R, Seng-Huat O. Image analysis by Krawtchouk-moments [J]. IEEE Trans. Image Process., 2003, 12(11): 1367-1377
- [5] Zhu Hong-qing, Shu Hua-zhong, Liang Jun, et al. Image analysis by discrete orthogonal Racah-moments[J]. IEEE Trans. Signal Process., 2007, 87(4): 687-708
- [6] Pew-Thian Y, Paramesran R, Seng-Huat O. Image Analysis Using Hahn Moments[J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(11): 2057-2062
- [7] Zhu Hong-qing, Shu Hua-zhong, Liang Jun, et al. Image analysis by discrete orthogonal dual Hahn moments[J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(13): 1688-1704
- [8] Karakasis E G, Papakostas G A, Kouliouriotis D E, et al. Generalized dual Hahn moment invariants[J]. Pattern Recognition, 2013, 46(7): 1998-2014
- [9] Priyal S P, Bora P K. A robust static hand gesture recognition system using geometry based normalizations and Krawtchouk-moments[J]. Pattern Recognition, 2013, 46(8): 2202-2219
- [10] Zhang Li, Qian Gong-bin, Xiao Wei-wei, et al. Geometric invariant blind image watermarking by invariant Tchebichef-moments [J]. Optics Express, 2007, 15(5): 2251-2261
- [11] Prattipati S, Ishwar S, Swamy M N S, et al. A fast 8×8 integer Tchebichef transform and comparison with integer cosine transform for image compression[C]// 2013 IEEE 56th International Midwest Symposium on Circuits and Systems(MWSCAS). Columbus: IEEE Press, 2013; 1294-1297
- [12] Hung A C, Meng H Y. Optimal quantizer step sizes for transform coders[C]// 1991 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. IEEE, 1991; 2621-2624
- [13] Wu S W, Gersho A. Rate-constrained picture-adaptive quantization for JPEG baseline coders[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. IEEE, 1993; 389-392
- [14] Ratnakar V, Livny M. An efficient algorithm for optimizing DCT quantization[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(2): 267-270
- [15] Reininger R, Gibson J D. Distributions of the Two-Dimensional DCT Coefficients for Images[J]. IEEE Transactions on Communications, 1983, 31(6): 835-839
- [16] Yang En-hui, Sun Chang, Meng Jin. Quantization table design revisited for image/video coding[J]. IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2014, 23(11): 4799-4811
- [17] Xiao Bin, Lu Gang, Wang Guo-yin, et al. Image Compression Based on Discrete Hermite Polynomials[J]. Computer Science, 2015, 42(11A): 140-141, 154 (in Chinese)
肖斌, 陆刚, 王国胤, 等. 基于离散 Hermite 多项式的图像压缩[J]. 计算机科学, 2015, 42(11A): 140-141, 154
- [18] Kodak; 24 PNG images[OL]. <http://r0k.us/graphics/kodak>
- [19] CVG-UGR image database[OL]. <http://decsai.ugr.es/cvg/d-bimágenes/g256.php>
-
- (上接第 271 页)
- [2] Lu Feng-shun, Song Jun-qiang, Yin Fu-kang, et al. Survey of CPU/GPU Synergetic Parallel Computing[J]. Computer Science 2011, 38(3): 5-9 (in Chinese)
卢风顺, 宋君强, 银福康, 等. CPU/GPU 协同并行计算研究综述[J]. 计算机科学, 2011, 38(3): 5-9
- [3] He J, Zhang S, He B. In-Cache Query Co-Processing on Coupled CPU-GPU Architectures[J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2014, 8(4): 329-340
- [4] Albutiu M C, Kemper A, Neumann T. Massively parallel sort-merge joins in main memory multi-core database systems[J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2012, 5(10): 1064-1075
- [5] Balkesen C, Alonso G, Teubner J, et al. Multi-core, main-memory joins; Sort vs. hash revisited[J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2013, 7(1): 85-96
- [6] He B, Lu M, Yang K, et al. Relational query coprocessing on graphics processors[J]. ACM Transactions on Database Systems (TODS), 2009, 34(4): 2939-2965
- [7] Fang R, He B, Lu M, et al. GPUQP: query co-processing using graphics processors[C]// Proceedings of the 2007 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. ACM, 2007; 1061-1063
- [8] Heimel M, Saecker M, Pirk H, et al. Hardware-oblivious parallelism for in-memory column-stores [J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2013, 6(9): 709-720
- [9] Chen S, Ailamaki A, Gibbons P B, et al. Improving hash join performance through prefetching[J]. ACM Transactions on Database Systems (TODS), 2007, 32(3): 116-127
- [10] Zhou J, Cieslewicz J, Ross K A, et al. Improving database performance on simultaneous multithreading processors[C]// Proceedings of the 31st international conference on Very large data bases. VLDB Endowment, 2005; 49-60
- [11] Peters H, Schulz-Hildebrandt O, Luttenberger N. Parallel Processing and Applied Mathematics[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2010; 403-410
- [12] Hardavellas N, Pandis I, Johnson R, et al. Database servers on chip multiprocessors; Limitations and opportunities[C]// Proceedings of the Biennial Conference on Innovative Data Systems Research. 2007; 79-87
- [13] He B, Yang K, Fang R, et al. Relational joins on graphics processors[C]// Proceedings of the 2008 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. ACM, 2008; 511-524
- [14] Rentzsch J. Data alignment; Straighten up and fly right[R/OL]. (2005-02-08). <https://www.ibm.com/developerworks/library/pa-dalign/pa-dalign-pdf.pdf>
- [15] Chen Hu, Chen Si-tong, Li Guan-zhao, et al. Column-Storage database parallel query on heterogeneous computing platforms[J]. Journal of Computer Research and Development, 2012, 49(Suppl.): 65-71 (in Chinese)
陈虎, 陈思桐, 李观钊, 等. 异构计算平台上列存储数据库的并行查询技术研究[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(Suppl.): 65-71
- [16] Gaster B R, Howes L, Kaeli D R, et al. OpenCL 异构计算[M]. 张云泉, 张先轶, 龙国平, 等译. 北京: 清华大学出版社, 2012; 42-44