

图象编码误差均匀分布压缩方法

肖自美

曾 潮

(中山大学无线电电子学系) (机械电子部电视和电声研究所)

摘 要

本文利用视觉特性的非相干压缩和图象编码误差均匀分布的观点,将MHT(M-Hadamard Transform)应用于图象数据压缩,获得了高压缩比和高质量恢复图象。在标量量化情况下,变换域能量分布分散的MHT具有优良变换性能,得出了与传统变换压缩理论和机理不相同的结果。

关键词 数据压缩, 图象编码, 误差均匀分布

1 引 言

图象数据压缩的理论基础:一是利用图象信号的统计相关特性,消除或减少信息冗余度称为相干压缩(Relevancy reduction);二是基于利用视觉心理生理特性的非相干压缩(Irrelevancy reduction)。相对来说,相干压缩无论在理论上或技术上的研究均有较长的历史,较为成熟。而非相干压缩的研究显得欠充分。近年来人们的注意力更多地转向利用视觉心理生理特性研究的新进展寻求图象压缩技术的新突破,所谓第二代图象编码的概念应运而生。

现有的高效压缩编码方法,包括各种类型的正交变换、向量量化、预测编码方法等,在编码率低于3bpp情况下,往往丢失较多的有用信息,造成图象主观评价质量的急剧下降,以致在分辨率和视觉特性要求较高的场合尚难于采用。

正交变换在高压缩比时,高空间频率分量的变换系数丢失较多,而高空间频率分量的变换系数代表了图象的边沿轮廓、方向以及纹理结构。它们是高质量图象的最重要特征。预测编码的大预测误差也往往产生在这些图象区域,导致了边沿轮廓模糊,位置变化,带来图象损伤。这表明现有的高效图象压缩编码方法的误差主要集中于边沿轮廓和纹理区域,因而如何保证图象边沿质量成为图象压缩编码中的一个关键问题^[1]。

目前在图象编码研究中,人们在探索编码误差均匀分布的压缩方法^[2]。如能寻求使编码误差分布在整个图象画面上,而图象边沿轮廓和图象特征的损伤很小的压缩编码方法,图象的主、客观评价质量将显著提高。这是当前图象编码研究中欲获得新突破的重要途径之一。

本文提出了一种特殊正交变换的误差均匀分布的压缩新方法,即MHT法(M-Hadamard Transform)。

本文1989年1月30日收到

2 图象编码误差均匀分布的压缩新方法——MHT法

2.1 图象变换的基本函数与误差函数

周期性离散函数 $x(jT)$, $j = 0, 1, \dots, N-1$ 的级数展开, 可通过维数为 N 的完备正交函数组 $\{Mi(jT)\}$ 来表示.

$$x(jT) = \sum_{i=0}^{N-1} y(i)Mi(jT) \quad y(i) = \sum_{j=0}^{N-1} x(jT)Mi(jT)$$

$Mi(jT)$ 称为变换基本函数. $\{Mi(jT)\}$ 称为变换基本函数系.

用矩阵表示变换过程有:

$$X = [M]Y \quad Y = [M]^t X$$

式中, N 维向量

$$X = \{X(jT)\}^t \quad j = 0, 1, \dots, N-1$$

$$Y = \{y(i)\}^t \quad i = 0, 1, \dots, N-1$$

t 表示矩阵的转置.

$$\text{变换矩阵 } [M] = \begin{pmatrix} M_0(0), \dots, M_0(jT) \dots \dots \dots M_0((N-1)T) \\ \dots \dots \dots \\ M_{N-1}(0), \dots, M_{N-1}(jT) \dots \dots \dots M_{N-1}((N-1)T) \end{pmatrix}$$

如果 $[M]$ 是正交对称矩阵, 则 $[M]^{-1} = [M]^t = [M]$

对于二维图象, 象素构成一个 $N \times N$ 阶空间域矩阵 $[X]$

$$[X] = \begin{pmatrix} X(0,0) \dots \dots \dots X(0,j) \dots \dots \dots X(0,N-1) \\ \dots \dots \dots \\ X(i,0) \dots \dots \dots X(i,j) \dots \dots \dots X(i,N-1) \\ \dots \dots \dots \\ X(N-1,0) \dots \dots \dots X(N-1,j) \dots \dots \dots X(N-1,N-1) \end{pmatrix}$$

二维正反变换表示为

$$[Y] = [M][X][M] \quad [X] = [M]^{-1}[Y][M]^{-1}$$

如果 $[M]$ 是对称, 正交和实数矩阵, 则 $[M]^{-1} = [M]^t = [M]$, 故

$$[X] = [M][Y][M]$$

变换域矩阵之各元素即变换系数构成了空间频谱, 当一个系数为1, 其余均为零时, 该变换域矩阵所对应的原图象称为基本图象. 各种不同图象变换都是这些变换的基本图象的加权和, 而基本图象又由变换基本函数系所决定, 为简化起见, 我们以一维情况进行讨论, 显见它可推广到二维情况.

设空间频谱向量 Y 的量化误差为 q , 即

$$\hat{Y} = Y - q$$

\hat{Y} 为 Y 的量化值, 标量形式为

$$q(i) = y(i) - \hat{y}(i) \quad i = 0, 1 \dots N-1 \tag{1}$$

q 或 $q(i)$ 称为空间频谱的误差函数. 对应的恢复图象信号

$$\hat{X} = [M]\hat{Y} = [M](Y - q) = X - [M]q \tag{2}$$

图象误差函数

$$E = X - \hat{X} = [M]q \tag{3}$$

用 $M_0, M_1, \dots, M_i, \dots, M_{N-1}$ 表示变换矩阵的行向量, $M_i = \{M(jT)\} \quad j = 0, 1 \dots N-1$
 (3) 式可写为

$$E = \sum_{i=0}^{N-1} M_i q(i) = M_0 q(0) + M_1 q(1) + \dots + M_{N-1} q(N-1) \quad (4)$$

恢复图象的误差为 N 项迭加, 每项为变换基本函数系 $\{M(jT)\}$ 与空间频谱量化误差 $q(i)$ 之积, 变换基本函数系的性质对图象误差的分布有重大而明显影响, 寻找使图象误差呈均匀分布的变换基本函数系是一个关键问题。

2.2 MHT 及其特性

人眼的视觉特性对于有规则的图案(pattern)很敏感, 对于呈现噪声状的不规则图案有一种平均效应, 不敏感。因此视觉对均匀分布噪声状的误差可见性降低, 可见度阈值显著提高。如果采用伪随机函数作为变换基本函数, 可望得到呈噪声状的基本图象。

基于以上分析, 我们采用 M -Hadamard 矩阵作为变换矩阵, 记作 $[M-H]$ 。它是一种特殊的正规型矩阵, 除第一行、第一列外其余各行各列均是彼此循环移位等价的, 故又称为循环 Hadamard 矩阵。

一个 $N \times N$ 维 ($N = 2^n, n > 2$) 的 $[M-H]$ 元素构成规则如下:

$$m(i, j) = \begin{cases} +1 & i=1; \quad j=1(1)N \\ +1 & i=1(1)N; \quad j=1 \\ L(d) \operatorname{sgn}(d) & i=2(1)N; \quad j=2(1)N; \quad d=N+2-(i+j) \end{cases}$$

其中 L 表示勒让德(Legendre)符号 $d/N-1$, 它定义为

$$d/N-1 = \begin{cases} +1 & \text{If } d = a^2, \quad \text{mod}(N-1), \quad a \in N \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

且满足:
$$\sum_{k=1}^N m(i, k)m(j, k) = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

一个 $[M-H]_{8 \times 8}$ 的实例为

$$\begin{pmatrix} + & + & + & + & + & + & + & + \\ + & - & - & + & - & + & + & - \\ + & - & + & - & + & + & - & - \\ + & + & - & + & + & - & - & - \\ + & - & + & + & - & - & - & + \\ + & + & + & - & - & - & + & - \\ + & + & - & - & - & + & - & + \\ + & - & - & - & + & - & + & + \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} + = +1 \\ - = -1 \end{matrix}$$

用 $1/\sqrt{N} \times [M-H]$ 作为变换矩阵得到 MHT, 简称 $M-H$ 变换。

由 $[M-H]$ 结构可看到, 矩阵第一行和第一列概由 $+1$ 构成, 而剩余的 $(N-1) \times (N-1)$ 子矩阵是一个循环位移矩阵, 它的每一行(或列)是前一行(或左列)循环左(或上)移一位的结果, 该子矩阵正是最大周期(周期 $P = N-1$)位移寄存器序列即 m -序列的生成矩阵。

由于 m 序列的元素是 $+1$ 和 -1 , 因此它是伪随机序列, $M-H$ 变换具有如下重要性质⁽⁸⁾:

(1) 与其他正交变换一样, 经 MHT 后空间域与变换域的能量和熵保持不变。

(2) MHT 频谱的第一个系数, 反映了输入变量 X 的均值, 即图象的平均亮度, 称为变换系数的直流分量, 所有其它空间频率的系数称为 Y 的交变分量, 又称交变频谱

函数。可以证明：交流分量 $y(i)$ 的统计参量与输入周期性函数 $X(iT)$ 的统计参量相等。

$$\text{均值 } \mu_x = \mu_y \quad \text{方差 } \sigma_x^2 = \sigma_y^2$$

自相关函数 $p_x(iT) = p_y(i)$ 。因而功率密度谱也相等。这一性质表明：MHT 并不导致能量的集中和去相关，传统的图象正交变换一般情况下变换域中能量多集中于零空间频率或低空间频率对应的变换系数，而 MHT 与这一能量分布规律相悖。

(3) 变换基本函数系 (Basis Function System) 是由伪随机 m 序列构成。它对应的基本图象具有明显的空间均匀分布的噪声状结构。

(4) MHT 的交变频谱具有以下特点：①相邻变换系数一般相差较小。②大部分相邻系数具有相同的符号。③大部分交变系数值接近于零。

(5) $[M-H]$ 是对称正交的。 $[M-H]^{-1} = [M-H]^t = [M-H]$ 。正反变换矩阵完全相同。可应用同一算法和相同的硬件实现。

(6) MHT 存在快速算法。

(7) $[M-H]$ 由循环位移矩阵构成，可用位移寄存器的移位操作实现变换，因而算法极其简易。

3 MHT 误差图象结构分析

将(4)式推广到二维图象，设 $[M-H]$ 为 $N \times N$ 阶变换矩阵，

$$[Q] = \begin{pmatrix} q(0,0) & \dots & q(0,N-1) \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ q(N-1,0) & \dots & q(N-1,N-1) \end{pmatrix} \quad [E] = \begin{pmatrix} e(0,0) & \dots & e(0,N-1) \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ e(N-1,0) & \dots & e(N-1,N-1) \end{pmatrix}$$

$[Q]$ 为 $N \times N$ 阶变换域空间频谱量化误差矩阵。 $[E]$ 为 $N \times N$ 阶误差图象矩阵，其各元素值为原始图象与恢复图象对应象素之差值，则有

$$[E] = [M-H][Q][M-H]^t \tag{5}$$

用 $\overline{M-H}(j)$ 表示 $[M-H]$ 各列所组成的向量。

$$[M-H] = [\overline{M-H}(0), \overline{M-H}(1), \dots, \overline{M-H}(N-1)]$$

有

$$[E] = [\overline{M-H}(0), \overline{M-H}(1), \dots, \overline{M-H}(N-1)][Q] \begin{pmatrix} \overline{M-H}(0)^t \\ \dots \\ \overline{M-H}(i)^t \\ \dots \\ \overline{M-H}(N-1)^t \end{pmatrix} \tag{6}$$

将 $[Q]$ 写成求和形式，故有

$$[E] = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} q(i,j) \overline{M-H}(i) \overline{M-H}(j) \tag{7}$$

$\overline{M-H}(i)$, $\overline{M-H}(j)$ 是正交变换矩阵中第 i 列向量构成的矩阵与第 j 行向量构成的矩阵的外积，即第 (i,j) 个基本图象，对于 $N \times N$ 阶变换矩阵共有 $N \times N$ 个基本图象，而每个基本图象有 $N \times N$ 个元素。

由(3)式，误差图象是 MHT 基本图象以变换域系数量化误差 $q(i,j)$ 加权的迭加组合，图 1 示出了 $[M-H]_{8 \times 8}$ 的基本图象。

图1的基本图象与通常的图象正交变换基本图象存在显著差别,呈现出明显的不规则噪声状空间分布,不仅高空间频率对应的基本图象如此,即使低空间频率对应的基本图象也如此。

非相干压缩的准则是使图象误差函数 $e(i,j)$ 处于观察者可见度阈值之下,通过变换基本函数系的选择,其对应的基本图象的可察觉误差的影响可以消除。

对于恢复图象误差结构的不可忽略的影响是作为加权系数的空间频谱误差函数 $q(i,j)$ 。误差 $q(i,j)$ 通过与基本图象相乘,反变换到空间域由于基本图象呈现随机噪声状分布, $q(i,j)$ 被均匀分散地分布在 $N \times N$ 元素上,因而消除了大误差的影响,进一步减小 $q(i,j)$ 应根据图象局部区域特性,按照视觉特性对不同图象区域在变换域系数量化时实施不同的量化方案,从而达到图象误差均匀分布,图象主观客观评价质量提高之目的。

4 计算机模拟结果

我们选择 $M-H$ 序列作为变换基本函数系应用于图象压缩编码,进行了计算机模拟实验,编码的大致步骤如下:在变换域,系数量化首先进行归一化取整处理^[1],再将归一化取整处理后的相邻量化系数经过差运算,得差值量化谱,归一化参量和差值量化谱分别编码,传输。具体编码方法在另文讨论。

计算机模拟实验结果由表1给出。

图2是用于计算机模拟的一幅标准原始图象及经 MHT 处理后的恢复图象,图3是标准图象 Stroh 的误差结构图象。

由表1及图2可见,当采用一维 MHT, 编码率小于 2.4bpp; 采用二

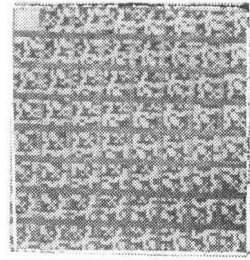


图1 $(M-H)_{8 \times 8}$ 基本图象
Fig.1 $(M-H)_{8 \times 8}$
basic image

表1 计算机模拟实验结果

Tab.1 Experimental result

图象名称	子方块大小	信噪比 (SNR,dB)	编码率 (bpp)
Stroh	1 × 63	33.932	2.275
Beach	1 × 63	39.171	2.314
Stroh	16 × 16	37.518	1.804
Each	16 × 16	40.204	1.828
Stroh	8 × 8	38.334	1.790
Beach	8 × 8	40.898	1.640

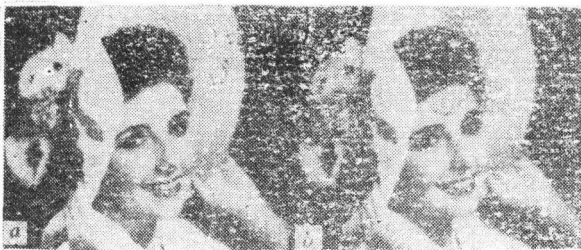


图2 用于计算机模拟的原始图象和恢复图象
Fig.2 Original and coded image
a. Stroh 512 × 512 × 8bits
b. 8 × 8 MHT 恢复图象 编码率: 1.790bpp

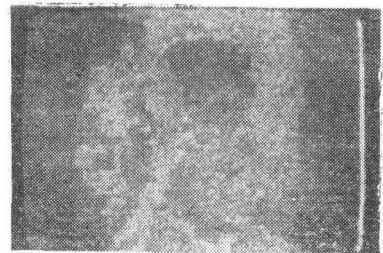


图3 图象Stroh的误差结构图象
(误差放大4倍)
Fig.3 Error image of Stroh
(error amplification factor 4)

维MHT, 编码小于1.8bpp时, 恢复图象与原始图象的主观质量难以察觉区别, 尤其对景物的边沿和纹理等细节丰富部位, 有优良的恢复图象质量。

对于公认难于处理的分辨率测试卡 (Resolution Chart), 采用著名的 DPCM 方法^[5]压缩到1bpp的误差图象和采用MHT 压缩到3.66bpp 的误差图象示于图4。

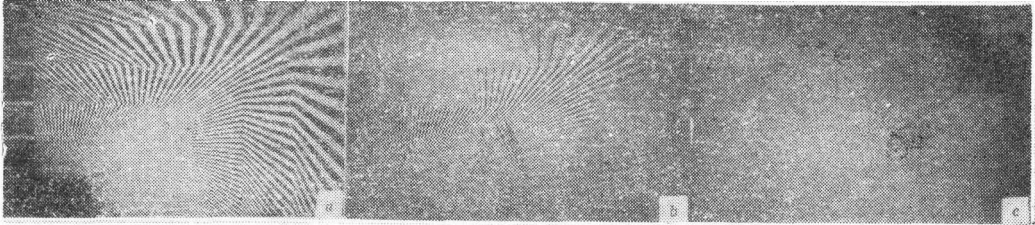


图4 Resolution Chart 图象和不同方法处理后的误差图象

Fig.4 Resolution chart and error image by different coding method

(a)原始图象,(b)DPCM 处理后误差图象,(c)MHT处理后误差图象

由这些误差图象可见, 经过 MHT 处理的图象误差均匀地分布在图象的整个画面上, 对于图象灰度变化剧烈的区域, 没有集中的大误差存在, 说明 MHT 的伪随机特性在非相干信息压缩中的有效性, 它是达到误差均匀分布而保持图象边沿等细节特征损伤很小的十分有效的压缩方法。

5 小结与讨论

从充分利用视觉特性的非相干信息压缩, 使图象编码误差均匀分布的概念出发, 选择伪随机 $M-H$ 序列构成的变换基本函数系应用于图象数据压缩在高压比和高质量恢复图象两方面均得到了满意的结果。

众所周知, 变换编码技术是图象压缩中一种已广泛应用的高效方法, 变换编码的机理是变换域中能量的非均匀分布, 不同变换具有不同能量分布, 传统的变换理论认为^[6]变换的收敛速度愈快, 也就是说变换域中能量愈集中于低列率分量, 图象变换编码的性能愈好, 人们普遍认为Karhunen-Loeve(K-L)变换是最佳变换, 由于 K-L 变换核 (Transform Kernel)不可分离, 又没有快速算法, 实际应用最广的是性能接近于K-L变换的离散余弦变换DCT。

与上述传统观点相悖, MHT 是一种能量分布分散的新型数学变换, 它的基本图象与其它图象变换具有完全不同的结构特征, 却具有变换压缩编码的优良性能, 这一结果是与传统结论不相符合的。

作者十分高兴地看到, 最近有人从不同角度也提出了类似问题, 1987年底P.C.Chang和R.M.Gray等人^[7]指出, 人们普遍相信 K-L变换是最佳变换这一结论是值得怀疑的, 但他们未给出进一步研究结果和回答这一问题。叶雷在他富有创见的论文中得到了在矢量量化中过分集中能量并无好处且对提高性能不利的结论^[1]。

我们的计算机模拟实验是在标量量化情况下进行的, 从标量量化的角度得到了变换

1) 叶雷, 矢量量化及其在图象编码中的应用, 西安电子科技大学博士论文, 1988年6月

域能量分布分散的MHT亦可获得优良变换性能的结果,而P. C. Chang 和叶雷等人从矢量量化角度也得出了类似结论。因此传统的变换压缩理论和机理需要重新认识,怎样从标量量化和矢量量化的统一观点去重新认识传统理论?这是一个值得深入探索的具有重大理论意义和应用价值的问题。

可以想象,MHT与矢量量化相结合,期望能得到更高压缩比和更优良的系统性能,这是一个值得研究的课题。

参 考 文 献

- [1] 姚庆栋,电视编码的进展,通信学报, 7(1986),6
- [2] Habibi A et al., *IEEE Trans on COM.*, COM-22(5), 1974
- [3] Hammer B, *Ph.D.Dissertation Technical Univ. Aachen*, 1981
- [4] Zeng Chao et al., *Scene Adaptive Transform Coding ICCT'87*, 914~917
- [5] Pirsch, *IEEE Trans on COM*, COM-29(6), 1981
- [6] Gonzalez R C et al., *Digital Image processing*, 1977
- [7] Chang P C et al., *Fourier Transform Vector Quantization for Speech Coding*, *IEEE Trans on COM*, COM-35(10), 1987

Compression Method of the Error Homogeneous Distribution in Image Coding

Xiao Zimei* Zeng Chao

Abstract

M-Hadamard Transform (MHT) is applied to data compression based on irrelevancy reduction of visual properties and a viewpoint of the error homogeneous distribution for image coding, and a high compression ratio and excellent quality of coded image are obtained. In scalar quantization case, the energy distribution of the MHT in transform domain is dispersive, but it possesses excellent transform performances. The obtained result is different from that of the conventional theory and function of transform compression.

Keywords data compression, image coding, error homogeneous distribution

* Department of Radio and Electronics