

基于灰度纹理信息的图像压缩感知编码与重构

张晓咏^{1,2}, 熊承义¹, 胡开云¹, 时翔¹

(1. 中南民族大学 电子信息工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 中国科学院 深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055)

摘要: 引入了压缩感知(Compressed Sensing, CS)理论, 在分析图像 DCT 系数分布特性的基础上, 提出了一种基于灰度纹理信息的压缩采样方法。该方法通过提取图像分块离散余弦变换交流系数的能量, 进而对用于对测量过程进行加权修正, 充分利用代表图像细节纹理信息的交流分量系数, 基于图像轮廓纹理细节信息来分配测量维数, 最终实现对不同图像块有区别的压缩采样。比较同类研究结果表明, 提出的采样方法在有效减少测量维数或提高重构图像的峰值信噪比和主观视觉效果, 以及在降低计算复杂度方面均有更好的表现。

关键词: 压缩感知; DCT 稀疏投影; 交流分量; 灰度纹理信息

中图分类号: TP919.81

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2013)01-0047-04

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2013.01.012

Coding and Reconstruction of Image Compressed Sensing Based on Gray-scale Texture Information

ZHANG Xiao-yong^{1,2}, XIONG Cheng-yi¹, HU Kai-yun¹, SHI Xiang¹

(1. College of Electronic Information Engineering, South-central University for Nationalities, Wuhan 430074, China;

2. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

Abstract: It introduced the CS (Compressed Sensing) theory and proposed a novel gray-scale-texture compressive sampling method based on DCT coefficients distribution characteristics for image signals. This method extracts the energy of DCT alternating current coefficient in image block to use for weighted correction in measurement process, makes full use of alternating current component coefficient of representing image detail texture information to allocate the measuring dimension based on image contour texture detail information, and ultimately realizes the distinguishing compression sampling for different image blocks. Comparison results with the similar work demonstrate that the proposed compressive sampling method could not only efficiently reduce the computational complexity, but also considerably decrease measurement rate and/or enhance the recovery image quality in both PSNR and subjective visual quality.

Key words: compressive sensing; DCT sparse decomposition; AC coefficients; gray-scale texture information

0 引言

近两年诞生了一种新的理论——压缩感知(Compressive Sensing, CS)^[1~3], 也被称为压缩传感或压缩采样, 是一种利用可压缩信号进行信号重建的技术。压缩感知从 2006 年形成理论至今, 得到了国际学术界的广泛关注, 该方法在获取信号的同时, 就对数据进行适当压缩, 以减少采样数据, 节省存储空间, 但包含有足够的信息量, CS 理论与方法正成为现代信息论应用

研究中的热点^[4,5]。CS 理论与传统的奈奎斯特采样定理不同, 该理论表明, 在信号具有稀疏性或可压缩的条件下, 通过采集少量的信号投影值就可实现信号的近似或准确重构。这就突破了香农采样定理, 给图像信号采集获取方法带来一次新的革命。目前众多压缩感知理论的文献中^[6,7], 测量矩阵的设计并不考虑信号具有的先验特性, 不需要根据测量信号而自适应变化, 同等地对待信号的所有成分。尽管可能并不会预先知道大部分现实信号的结构, 然而对于大多复杂的图像信号, 却知道这些信号的某些特性, 诸如图像各频率成分的分布特征等^[8]。因此, 基于图像信号先验信息的压缩感知, 在提高压缩感知系统的性能方面具有重要作用。在基于分块的压缩感知系统中, 充分利用图像块所蕴含的信息来自适应分配该块的测量维数, 对于降低采样比率和提高重建图像质量是一种有效方

收稿日期: 2012-05-22; 修回日期: 2012-08-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60972081); 湖北自然科学基金(2009CDA139, 2010CDZ022)

作者简介: 张晓咏(1986-), 男, 河南濮阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理与传输、压缩感知; 熊承义, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为图像与视频编码、压缩传感。

法^[2,9]。文献[2]提出了基于图像块的显著性来自适应分配测量维数,但是这种方法由于需要计算图像信号对应的显著性图和每一图像块的显著性信息,存在计算量较大的缺点,以及存在判定的图像显著性区域与感兴趣区域不一致等问题。文中在分析了图像分块离散余弦变换系数分布特征的基础上,充分利用代表图像纹理细节信息的交流分量系数,提出了一种基于灰度纹理信息的压缩采样方法。该方法通过只需计算图像分块离散余弦变换交流系数的能量即可完成图像块测量维数的确定,能够有效降低系统实现的复杂度。大量实验结果表明:与同类方法比较,文中的基于灰度纹理信息的方法能够更加有效地降低压缩采样比率以及提高重构图像的主观和客观质量。

1 基于分块的图像压缩采样

1.1 压缩传感理论

不同于传统的均匀采样,压缩感知的核心是非相关测量过程。信号的可稀疏表示是压缩感知的先验条件,常见的自然信号在时域内几乎都是不稀疏的,但是它们能够在某些变换域 Ψ 稀疏表示。对于长度为 N 的一维离散时间信号 $\mathbf{x} \in R^N$,在正交稀疏变换下可表示为:

$$\mathbf{x} = \sum_{k=1}^N s_k \Psi_k = \Psi \mathbf{s} \quad (1)$$

上式中 \mathbf{s} 与 \mathbf{x} 是 $N \times 1$ 矢量, Ψ 是 $N \times N$ 矩阵。当信号 \mathbf{x} 在某个基 Ψ 上仅有 $K \ll N$ 个远大于零的系数时,称 Ψ 为信号 \mathbf{x} 的稀疏基。CS 测量过程可以表示为:

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x} = \Phi \Psi \mathbf{s} = \Theta \mathbf{s} \quad (2)$$

上式中 Φ 为 $M \times N$ 测量矩阵, $\Theta = \Phi \Psi$ 也称为 $M \times N$ 传感矩阵。在 CS 编码测量模型中,一般不是直接测量信号 \mathbf{x} 本身,而是将可稀疏信号 \mathbf{x} 投影到测量矩阵上,从而得到信号的投影值 \mathbf{y} ,由于 M 远小于 N ,所以信号的压缩感知采样的维数将远小于信号传统奈奎斯特采样的维数。

在压缩感知理论中,由于测量数量 M 远远小于原信号的长度 N ,即方程的个数少于未知数的个数,因此不得不面对求解欠定方程的问题。表面上看欠定方程组是无法求解的,然而由于式(2)中 \mathbf{s} 是 k 稀疏的,这个前提使得问题可解,当传感矩阵 Θ 满足有限等距性条件(Restricted Isometry Property, RIP)时可以保证长度为 N 的 \mathbf{x} 可以通过 $M \geq O(k \log N)$ 个测量值准确重构。为了保证算法收敛性,使得信号可以准确重构, Θ 需满足 RIP 等价准则,即测量矩阵 Φ 和稀疏表示的基 Ψ 不相干。实际观测中, Ψ 可能会因信号不同而改变, Φ 很大程度上和随机这个词相联系。目前,对于一维信号,用于压缩感知的测量矩阵主要有高斯随机

矩阵^[10],高斯矩阵的优点在能保证和任意稀疏基都不相干概率很高,类似矩阵还有二值随机矩阵(伯努力矩阵)^[10]。对于二维图像信号,测量矩阵主要有能快速计算随机扰动的傅立叶随机矩阵^[10,11],哈达玛矩阵等。

1.2 基于分块的压缩采样

现有大多数 CS 方法是针对整幅图像采样和重建,计算复杂度较高,且采样算子所需存储空间大,分块的压缩采样方法将图像分成多个等尺寸的图像块处理,能够实现较好的性能折衷^[12]。给出的分块图像 CS(Block Compressed Sensing)算法,类似于传统的图像压缩处理方法,每个块采用不同的采样算子进行独立的采样压缩感知。图像被分成大小为 $B \times B$ 的块,第 i 个块用向量 \mathbf{x}_i 表示。然后每个块应用独立的采样算子,得到每个图像块的观测向量。每一分块图像的测量过程可表示为 $\mathbf{y}_i = \Phi_i \mathbf{x}_i$,以及对整幅图像进行测量的等价测量算子可表示为由 Φ_i 构成的对角矩阵^[12]。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_1 & & & \\ & \Phi_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \Phi_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

2 基于灰度纹理信息的压缩采样

传统压缩感知的测量矩阵的设计不依赖于信号的结构,其测量过程是一个非自适应线性测量过程,每一图像块均采用相同采样算子对图像信号采样。文献[2]提出一种基于图像显著性的压缩感知算法,对显著性图像区域分配较多的测量维数,对相对不显著的图像区域分配较少的测量维数对图像采样,其测量效率将优于在基于图像稀疏度的重构方法^[9]。但是,图像信号对应的显著性图计算过程具有较高的复杂度,并且机器识别的图像显著性区域并不一定就是图像的重要区域,存在判定的图像显著性区域与感兴趣区域不一致等问题。

如上所述,由于图像块经由 DCT 稀疏变换之后,大量值的系数分布在直流部分,小量值的系数分布在交流部分。图像块的 DCT 的交流系数很好地反映了该块的纹理细节特征,文中对图像块的交流系数的绝对值进行求和,得出的绝对值之和即作为纹理复杂度的参数。此参数的大小即可衡量每一图像块的纹理细节信息,参数越大反映该块的纹理信息量相对较大,给出的算法对纹理细节丰富的图像区域分配较多的测量维数,而对相对不丰富的图像区域分配相对较少的测量维数对图像采样。根据分块图像的纹理细节信息等

级优化压缩采样过程,对于提高压缩采样效率具有重要影响。图1是提出的算法的编解码流程图。

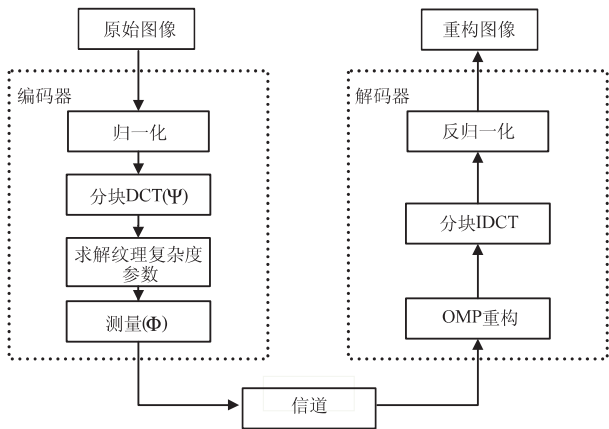


图1 基于灰度纹理信息压缩采样流程图

具体来说,假设输入一幅 $N = n_r \times n_c$ 个像素的自然灰度图像信号 \mathbf{x} ,那么 \mathbf{x} 首先被归一化到 $[0,1]$ 之间,经归一化之后的信号 \mathbf{x} 被分成 $B \times B$ 的块,每一个图像块分别作DCT变换。对变换后的图像块的交流分量系数取绝对值之后求和,则可求得图像块对应的纹理复杂度参数,如下式:

$$\mathbf{x}_i = \text{abs}(C(\mathbf{x}_i)) \tag{4}$$

$$g_i = \sum_{j \in B_i} p_j \tag{5}$$

其中, $\mathbf{x}_i, i = 1, \dots, n, n = N/B^2$ 是第 i 个块的向量, i 是块的下标, C 代表2维DCT变换, $\text{abs}(\cdot)$ 为取绝对值函数。公式(4)是对图像块的交流分量系数的绝对值进行求和, p_j 代表图像块 \mathbf{x}_i 中位置 j 处的交流系数的能量值,求得的 g_i 即是第 i 个图像块的纹理复杂度参数。得到每一图像块的纹理复杂度参数之后,则第 i 个图像块的相对纹理复杂度参数 ξ_i 可以由式(6)给出。

$$\xi_i = g_i / \sum_{i=1}^n g_i \tag{6}$$

文中给出的改进算法中解码端采用OMP重构算法,为了避免出现因图像块相对纹理复杂度参数过小,可能对图像块出现零维测量,而在解码端重构中出现错误的问题,给出的算法对每一图像块均预设测量维数。因此,第 i 个图像块的测量矩阵维数 M_i 可由以下公式给出:

$$M_i = \text{rnd}((n_r \times n_c * \text{SR} - \frac{n_r}{B} \times \frac{n_c}{B} \times R) * \xi_i + R) \tag{7}$$

其中 $\text{rnd}(\cdot)$ 是取整函数,SR代表图像的采样率, R 是图像块预设测量维数,提出的算法中 R 取16。

3 实验结果及分析

本节将给出的方法和文献[2]方法及传统方法进行

行了比较。实验选取服从 $(0,1/N)$ 分布的高斯矩阵和2D-DCT作为测量矩阵和稀疏基,采用OMP算法为重构算法,选取10幅标准 512×512 的灰度图像lenna,peppers等作为测试图像。综合考虑压缩能力和去相关效果,块大小选择 16×16 的块。

表1是5幅 512×512 的标准灰度图在各采样比率 $\text{SR} = 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5$ 下三种方法的PSNR性能比较结果,图2是10幅 512×512 的标准灰度图在各采样比率 $\text{SR} = 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5$ 下三种方法的平均PSNR性能比较结果,其中Proposed代表改进后的方法,Saliency和Conventional分别代表文献[2]所提出的方法和传统方法。实验结果证明,改进算法重建质量要优于传统知算法和文献[2]的算法,且编码器设计简单,从而降低计算量,采用10幅标准图像测试,较之文献[2]的算法时间平均减少了4.606511s,减少了时间复杂度,易于硬件实现。

表1 PSNR性能比(单位/dB)

Sample rate		0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
Lenna 16×16	Proposed	26.5	29.1	30.4	31.4	32.4	33.1	33.9
	Saliency	24.1	28.6	29.8	31.1	32.0	32.8	33.6
	Conventional	24.4	25.6	26.8	27.9	28.6	29.5	30.5
Peppers 16×16	Proposed	26.7	28.3	29.5	30.3	31.1	31.7	32.3
	Saliency	23.0	26.9	28.3	29.6	30.3	31.2	31.8
	Conventional	23.8	25.4	26.8	28.1	28.6	29.6	30.1
Lostlake 16×16	Proposed	22.6	23.7	24.5	25.3	26.1	26.7	27.4
	Saliency	22.6	23.6	24.4	25.2	25.9	26.5	27.2
	Conventional	21.3	22.0	22.8	23.5	24.0	24.7	25.4
Indians 16×16	Proposed	22.1	23.4	24.3	25.2	26.0	26.7	27.4
	Saliency	21.2	23.0	24.0	25.0	25.8	26.4	27.1
	Conventional	20.6	21.5	22.4	23.3	23.8	24.6	25.1
Mill 16×16	Proposed	17.6	18.7	19.6	20.6	21.5	22.3	23.1
	Saliency	17.5	18.4	19.4	20.4	21.3	22.1	22.8
	Conventional	16.7	17.5	18.3	19.0	19.7	20.4	21.0

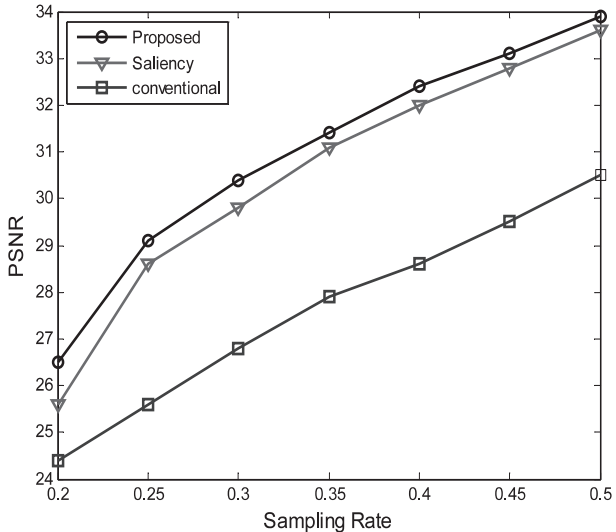


图2 10幅标准测试图像平均PSNR性能比(单位/dB)

图 3 给出了采样率为 0.4 时的 lenna 重建图像的主观视觉效果比较。可以看出,在相同的采样比率下,文中给出的方法可以更好地保留图像的重要细节信息,更好地重建图像质量,并且具有较少的重建噪声。



(a) 原始图像

(b) 传统方法



(c) 基于图像显著性的方法

(d) 改进方法

图 3 重建图像质量比较 (SR=0.4)

4 结束语

在分析图像 DCT 系数分布特性的基础上,提出了一种基于灰度纹理信息的压缩采样方法。该方法通过提取图像分块离散余弦变换交流系数的能量,充分利用代表图像细节纹理信息的交流分量系数。细节纹理信息比较丰富的图像块分配相对较多的测量维数,纹理细节不太丰富的图像块分配相对较少的测量维数对图像压缩采样。

大量实验结果表明:相对于同类方法,该方法在保留图像纹理细节的同时,不仅能够有效提高图像的重建质量,而且能够更好地降低采样比率和有效降低系统的计算复杂度。

参考文献:

- [1] Donoho D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [2] Yu Ying, Wang Bin, Zhang Liming. Saliency-based Compressive Sampling for Image Signals[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(11): 973-976.
- [3] Ji Shihao, Xue Ya, Carin L. Bayesian compressive sensing[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2008, 56(6): 2346-2356.
- [4] 李树涛, 魏 丹. 压缩传感综述[J]. 自动化学报, 2009, 35(11): 1369-1377.
- [5] 石光明, 刘丹华, 高大化, 等. 压缩感知理论及其研究进展[J]. 电子学报, 2009, 37(5): 1070-1081.
- [6] Li Lin, Kong Lingfu, Lian Qiusheng. Image compressed sensing reconstruction based on contourlet Wiener filtering[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(10): 2051-2056.
- [7] Lian Qiusheng, Gao Yanyan, Chen Shuzhen. Compressed sensing image reconstruction based on two-step iterative shrinkage and complex wavelet[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(7): 1426-1431.
- [8] Stnkovic V, Stnkovic L, Cheng S. Compressive video sampling[C]//16th Eur. Signal Processing Conf. [s. l.]: [s. n.], 2008.
- [9] Stnkovic V, Stnkovic L, Cheng S. Compressive video sampling with side information[C]//IEEE Int. Image Processing. [s. l.]: [s. n.], 2009: 3037-3040.
- [10] Candes E J, Tao T. Near optimal signal recovery from random projections; universal encoding strategies[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(12): 5406-5425.
- [11] Jing Zou, Gilbert A C, Strauss J, et al. Theoretical and experimental analysis of a randomized algorithm for sparse Fourier transform analysis[J]. Journal of Computational Physics, 2006, 211(2): 572-595.
- [12] Gan L. Block compressed sensing of natural images[C]//International Conference on Digital Signal Processing. [s. l.]: [s. n.], 2007: 403-406.

(上接第 46 页)

- [5] 毛德操, 胡希明. Linux 内核源代码情景分析[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001.
- [6] Stallings W. 操作系统-精髓与设计原理[M]. 第 5 版. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [7] 王继刚, 顾国昌, 谢世波, 等. 一种改进的优先级继承协议及其算法研究[J]. 计算机工程, 2007, 33(8): 41-44.
- [8] 王亚军. 优先级继承运用于 Linux 内核信号量的研究与实现[J]. 计算机系统应用, 2010(11): 203-207.
- [9] Goodenough J B, Sha L. The Priority Ceiling Protocol: A Method for Minimizing the Blocking of High Priority Ada Tasks

[C]//Proc. of the 2nd International Workshop on Realtime. [s. l.]: [s. n.], 1987.

- [10] 胡国珍, 范生凯. 嵌入式 RTOS 优先级天花板研究[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(8): 1893-1895.
- [11] Labrosse J J. 嵌入式实时操作系统 UCOS-II[M]. 邵贝贝译. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [12] River W. VxWorks Kernel Programmer's Guide[M]. Alameda, USA: Wind River Systems, Inc., 2003.