

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **6**
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年6月 第17卷 第6期(总第194期)

目次

综述

- 人脸图像的年龄估计技术研究 王先梅, 梁玲燕, 王志良, 胡四泉(603)
- 图像统计模型参数估计中的期望最大值算法 李旭超(619)

图像处理和编码

- 鲁棒的梯度驱动图像修复算法 叶学义, 王靖, 赵知劲, 陈华华(630)
- 快速去块效应的线性规划方法 金剑秋, 刘春晓, 王勋, 章志勇(636)
- DWT-SVD 域全盲自嵌入鲁棒量化水印算法 叶天语(644)
- Mean-shift 滤波和直方图增强的图像弱边缘提取 冀峰, 高新波, 谢松云(651)

图像分析和识别

- 梯度点对约束的结构化车道检测 王永忠, 王晓云, 文成林(657)
- 多水平外区抑制的轮廓检测 闫超, 张建州(664)
- 基于局部投影与块 LBP 特征的图像检索 邹彬, 潘志斌, 胡森(671)

图像理解和计算机视觉

- 视觉陌生度驱动的增量自主式视觉学习算法 瞿心昱, 姚明海, 顾勤龙(678)
- 霍夫空间中多足球机器人协作目标定位算法 许家铭, 解仑, 王志良, 倪善超(687)

计算机图形学

- 虚拟 CCD 线阵星载光学传感器内视场拼接 张过, 刘斌, 江万寿(696)

“第八届数字电视与无线多媒体通信国际论坛”会议专栏

追踪盗版者的抗共谋数字指纹 李晓强, 张煌, 赵洋洋, 汪晶晶(702)

LBP 与鉴别模式结合的热红外人脸识别 谢志华, 伍世虔, 方志军(707)

电影中复杂事件的检索与识别 杜吉祥, 郭一兰, 翟传敏(712)

方向特征和网格特征融合的离线签名鉴别 杨丹凤, 吕岳(717)

视觉关注度的立体图像质量评价 张艳, 安平, 张秋闻, 张兆杨(722)

低开销的异构数据交换 赵凯, 赵正德(726)

灵活的多视点视频编码预测结构 张艳, 蔡灿辉(730)

跨层反馈在无线视频自适应编码中的应用 王垚中, 郑世宝, 张重阳, 刘勃(736)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 6 期

2012 年 6 月 16 日出版

主管单位 中国科学院
主 办 中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所
主 编 李小文
编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会
北京 9718 信箱 邮编 100101
电子信箱:jig@irsa.ac.cn
电话:010-64807995 010-82614429
网 址:www.cjig.cn
印刷装订 北京北林印刷厂
广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
(中国国际书店)
(北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,
CAS China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational
Mathematics
Chief editor LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board
of Journal of Image and Graphics
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)
E-mail:jig@irsa.ac.cn
Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers
and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading Corporation
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)
Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 6 June 2012

Contents

Review

- Age estimation by facial image: a survey Wang Xianmei, Liang Lingyan, Wang Zhiliang, Hu Siqian(603)
Expectation maximization method for parameter estimation of image statistical model Li Xuchao(619)

Image Processing and Coding

- Robust gradient driving image inpainting method Ye Xueyi, Wang Jing, Zhao Zhijing, Chen Huahua(630)
Fast image de-blocking by linear programming Jin Jianqiu, Liu Chunxiao, Wang Xun, Zhang Zhiyong(636)
Perfectly blind self-embedding robust quantization-based watermarking scheme in DWT-SVD domain Ye Tianyu(644)
Weak edge detection using Mean-shift filtering and histogram enhancement Ji Feng, Gao Xinbo, Xie Songyun(651)

Image Analysis and Recognition

- Gradient-pair constraint for structure lane detection Wang Yongzhong, Wang Xiaoyun, Wen Chenglin(657)
Contour detection based on multilevel inhibition Yan Chao, Zhang Jianzhou(664)
Image retrieval method based on local projection and block LBP feature Zou Bin, Pan Zhibin, Hu Sen(671)

Image Understanding and Computer Vision

- Visual novelty driven incremental and autonomous visual learning algorithm Qu Xinyu, Yao Minghai, Gu Qinlong(678)
Target localization algorithm for cooperative multi-soccer robots based on Hough space
..... Xu Jiaming, Xie Lun, Wang Zhiliang, Ni Shanchao(687)

Computer Graphics

- Inner FOV stitching algorithm of spaceborne optical sensor based on the virtual CCD line
..... Zhang Guo, Liu Bin, Jiang Wangshou(696)

Special Issue of the IFIC' 2011

- Anti-collusion fingerprinting scheme capable of tracing pirate Li Xiaoqiang, Zhang Huang, Zhao Yangyang, Wang Jingjing(702)
Infrared face recognition using LBP and discrimination patterns Xie Zhihua, Wu Shiqian, Fang Zhijun(707)
Recognize and retrieval complex events in real movies Du Jixiang, Guo Yilan, Zhai Chuanmin(712)
Off-line signature verification based on combination of direction feature and grid feature Yang Danfeng, Lv Yue(717)
Stereo image quality assessment based on visual attention Zhang Yan, An Ping, Zhang Qiuwen, Zhang Zhaoyang(722)
Low overhead of heterogeneous data exchange Zhao Kai, Zhao Zhengde(726)
Flexible prediction structure for multi-view video coding Zhang Yan, Cai Canhui(730)
Cross-layer feedback based adaptive coding for wireless video transmission
..... Wang Yaozhong, Zheng Shibao, Zhang Chongyang, Liu Bo(736)

中图法分类号: TP919.8 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)06-0636-08

论文引用格式: 金剑秋, 刘春晓, 王勋, 章志勇. 快速去块效应的线性规划方法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(6): 636-643.

快速去块效应的线性规划方法

金剑秋, 刘春晓, 王勋, 章志勇

浙江工商大学 计算机与信息工程学院, 杭州 310018

摘要: 许多现有的图像压缩算法在高压缩比下会产生恼人的块效应, 消除块效应的后处理方法一直以来都是图像处理领域的重要研究方向。消除块效应可以认为是从不准确的采样数据出发, 尽可能恢复原始图像, 这也是压缩传感理论所做的。因此利用压缩传感理论, 给出了一种新的去块效应方法, 将去块效应问题归结为一个无需调校任何其他参数的线性规划问题, 最终采用GPU实现, 得以快速求解。大量的实验结果表明, 该方法能快速有效地去除块效应, 改善了图像的视觉效果, 同时提高了图像的PSNR。

关键词: 去块效应; 压缩传感理论; 图形处理单元(GPU); 曲线变换; 线性规划

Fast image de-blocking by linear programming

Jin Jianqiu, Liu Chunxiao, Wang Xun, Zhang Zhiyong

School of Computer Science and Information Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China

Abstract: Compressed images may have block artifacts at low bit rates in many image compression algorithms. Post-processing methods for image de-blocking are the most practical solution for removing block artifacts, since this does not require any changes to the existing standard codecs. Image de-blocking can be considered as recovering the ground-truth image from inaccurate samples. It is exactly what compressive sensing does. According to this, we take advantage of compressive sensing theory to remove block artifacts. As a result, we convert the image de-blocking problem to a linear programming problem in which no parameters are required to be tuned. Finally, our approach can be performed fast using a GPU implementation. Our experiments show our approach can effectively remove block artifacts from compressed images, improving the visual quality and PSNR.

Key words: block artifact reduction; compressive sensing; graphics processing unit (GPU); curvelet transform; linear programming

0 引言

目前主流的图像与视频压缩算法仍是采用对图像(视频)分块变换, 之后量化压缩, 如得到广泛采用的JPEG和H. 264压缩标准等。这样的分块压缩方

法在高压缩比的情况下, 容易导致恼人的块效应。近些年来, 已有许多学者提出大量的消除块效应的方法, 主要分为前处理和后处理两类^[1]。前处理方法实际上是修改压缩方法, 从根本上消除块效应, 但这种方法与现有的压缩标准不相容。而后处理方法是在解码端对解码图像进行处理以改善图像质量, 这个过

收稿日期: 2011-04-15; 修回日期: 2011-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(60873218, 61003188); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB320801); 浙江省自然科学基金重点项目(Z1080232); 浙江省科技厅项目(2009C03015, 2010C33150); 浙江省教育厅项目(Y201119715)

第一作者简介: 金剑秋(1977—), 男, 副教授, 2005年于浙江大学获应用数学专业博士学位, 主要研究方向为图像处理、小波理论与应用。E-mail: jqjin@mail.zjgsu.edu.cn

通讯作者: 王勋, Email: wx@mail.zjgsu.edu.cn

程不需要修改图像(视频)的编码过程。因此,后处理方法得到了国内外研究人员的更多的关注。

图像去块效应的后处理方法大致分为两大类,基于图像增强的方法和基于图像恢复的方法。前者着重对图像块与块之间的平滑处理,通常是首先检测图像的哪些区域存在块效应,之后对这些区域进行低通滤波^[2],或插值处理^[3],或将图像分成平缓区、纹理区和边缘区,然后对平缓区作低通滤波以消除块效应^[4];也有利用相邻块之间 DCT(离散余弦变换)系数的相关性对系数进行加权滤波^[5]。后者将去块效应看作从劣化图像中尽可能地恢复原始图像,本文将要提出的方法就属于这一类,对该类算法进行较为详细的回顾。

基于图像恢复的方法中比较有影响的有两类:凸集投影法(POCS)和最大后验概率估计方法(MAP),两者都是利用图像的先验信息尽可能地恢复图像。POCS 图像去块效应算法最早见于文献[6],该文献认为自然图像都是带宽有限的(bandlimited),而图像块与块之间的不平滑过度(这就是块效应)在一定程度上破坏了带宽有限这一性质;于是他们给出图像的两个约束,分别是带宽有限约束,和图像的分块 DCT 变换的每一个系数必须在指定的量化区间内;这两个约束都构成了闭凸集,根据凸集投影理论,如果它们的交集非空,将图像交替地投影到这两个闭凸集上最终会收敛到它们的交集上。如果有多种先验信息,可以构造多个闭凸集,凸集投影理论也能保证这种凸集投影迭代算法的收敛性。之后许多研究人员提出了各种各样的描述图像某种特性的先验信息,并将之表达为闭凸集^[7-9]。这类算法的效果取决于选择合适的图像先验信息,如果选取不当,会使得图像细节丢失,图像变得模糊;另外如果选择多个凸集交替轮流投影,可能会大大减慢算法的收敛速度,增加算法的计算复杂度。

最大后验概率估计方法也称为贝叶斯(Bayesian)估计方法,首先假定图像信号满足某种特定的先验概率分布,再通过测量得到带噪声的或劣化的信号样本信息,根据噪声模型计算信号的后验概率,最后将信号的恢复问题归结为一个最优化问题——最大化后验概率。可以直接运用 MAP 方法进行图像去块效应:根据图像的先验信息,设定先验概率分布,而噪声模型则都是压缩过程中量化引起的量化噪声。文献[10]利用马尔科夫随机理论,选择以像素邻域方差为能量函数的 Gibbs 分布作为

图像的先验概率分布,之后运用 MAP 方法,最终得到图像去块效应的迭代算法。该方法由于能量函数的约束,可以使得块与块之间变得光滑,但同时也可能使得图像细节变得模糊。在这篇的文献的基础上,后人提出了各种马尔科夫随机场模型用于图像去块效应,如 TD-MRF(transform-domain Markov random field)^[11]、TSD-MRF^[11]等。由于整合入更多的先验信息,这些方法通常会有更好的去块效应效果,但复杂的马尔科夫随机场会导致最后的优化求解更加困难,大大增加时间计算复杂度。

上述的这些基于最大后验概率估计方法和凸集投影法最终都归结为求解一个大规模的非线性规划问题,需要优化的参数包括图像的所有像素,数据量很大,迭代计算收敛缓慢;而且在设定图像先验信息时,通常需要设定多个参数,这给算法的应用带来了麻烦。本文为此将基于压缩传感理论^[12]的图像去块效应方法,最终归结为一个线性规划问题,并结合 GPU(graphic processing units)实现,得以快速求解,并且该方法无须设定任何参数。

1 压缩传感理论

压缩传感理论是 Candes 和 Donoho 等人在 2006 年正式提出的新的信号采样重构理论^[13-14],该理论突破了传统香农采样理论要求采样频率必须达到信号截止频率两倍的限制,它指出如果信号是稀疏的,则只需少量的采样数据,通过一个非线性优化方法即可精确重构原始信号。具体地:

如果信号 \mathbf{x} 是稀疏的(\mathbf{x} 中非零元素的个数远远小于它的长度),或在变换 Ψ 下是稀疏的, \mathbf{y} 是 \mathbf{x} 在观察矩阵 Φ 下的观察集合 $\mathbf{y} = \Phi\mathbf{x}$,则 \mathbf{x} 有很高概率可以通过求解下列最优化问题精确重建:

$$\begin{aligned} \operatorname{argmin}_{\mathbf{x}} \|\mathbf{x}\|_1 \quad \text{s. t.} \quad \Phi\mathbf{x} = \mathbf{y} \quad \text{或} \\ \operatorname{argmin}_{\mathbf{x}} \|\Psi\mathbf{x}\|_1 \quad \text{s. t.} \quad \Phi\mathbf{x} = \mathbf{y} \end{aligned} \quad (1)$$

举例说明, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^N$ 是一个 K -稀疏(\mathbf{x} 中非零元素的个数为 K 个)信号,随机地在 \mathbf{x} 的频域(Fourier 变换域)采样 M 个 Fourier 系数,即 Φ 是一个部分 Fourier 变换;如果

$$M \geq C_p(\log N)K \quad (2)$$

式中的 C_p 是一个依赖于准确度参数 p 和测量矩阵 Φ 的常量,则式(1)的解就是原始信号 \mathbf{x} 的概率为 $1 - O(N^{-p})$ 。不过在许多实际问题中,我们不能假

设信号是严格稀疏的,而通常是可压缩的,即 \mathbf{x} 满足 $|\mathbf{x}|_{(n)} = hn^{-1/p}$ (或 \mathbf{x} 在 Ψ 变换下的系数),这里的 h, p 均大于 0, $|\mathbf{x}|_{(n)}$ 表示 \mathbf{x} 各元素绝对值的次序统计量。这种情况下,文献[15]也给出了类似的结果说明 x 可以通过下面的非线性优化过程近似重建

$$\begin{cases} \operatorname{argmin}_{\mathbf{x}} \frac{1}{2} \|\Phi \mathbf{x} - \mathbf{y}\|^2 + \lambda \|\mathbf{x}\|_1 & \text{或} \\ \operatorname{argmin}_{\mathbf{x}} \frac{1}{2} \|\Phi \mathbf{x} - \mathbf{y}\|^2 + \lambda \|\Psi \mathbf{x}\|_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\lambda > 0$ 为正则参数,是为了平衡拟合项和正则项。由于压缩传感有着广泛的应用,并且与 Basis Pursuit 紧密相关,为此众多学者提出了许多数值算法,如 NESTA^[16]、TwIST^[17]、FPC^[18] 和基于贪婪迭代的 Regularized OMP 算法^[19]等。

需要指出的是,并不是所有的 Ψ 和 Φ 都适合于压缩传感。压缩传感理论倾向于 Ψ 和 Φ 之间具有较小的相关性^[13]。为了进一步细化采样点数目 M 和 K (式(2))之间的关系,Emmanuel Candes 等人在文献[2]中给出 RIP(restricted isometry property)条件,它更为细致地刻画了测量矩阵 Φ 、稀疏程度 K 、变换矩阵 Ψ 和采样点数目 M 之间的关系。

从上述介绍中可以看到,压缩传感是从部分的或不准确的测量采样数据中尽可能地恢复原始信号,这一点与图像去块效应不谋而合。

2 基于压缩传感理论的图像去块效应方法

本节着重讨论 JPEG 压缩图像的去块效应算法,但该方法也容易推广到其他图像压缩算法。记 \mathbf{x} 为原始图像, \mathbf{y} 是图像经 BDCT(分块 DCT)变换,再经量化(量化算子记为 Q_H ,其中 H 为量化步长矩阵)后的系数,即

$$\mathbf{y} = Q_H(\text{BDCT}(\mathbf{x})) \quad (4)$$

不妨假设图像 \mathbf{x} 在某个冗余字典(Dictionary) $\Psi = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_M) \in \mathbf{R}^{NM}$ (N 为图像像素个数, M 为基函数个数, $M > N$) 上具有稀疏合成表示,即

$$\mathbf{x} = \sum_i a_i \psi_i = \Psi \mathbf{a}, \text{ 且向量 } \mathbf{a} \text{ 是稀疏的} \quad (5)$$

这样,就可以得到如下的压缩传感优化问题

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{a}} \|\mathbf{a}\|_1 \text{ s. t. } \text{BDCT}(\Psi \mathbf{a}) \in Q_H^{-1}(\mathbf{y}) \quad (6)$$

式中, Q_H^{-1} 是 Q_H 的逆运算,由于 Q_H 是多对一的运算,所以 $Q_H^{-1}(\mathbf{y})$ 的结果是一个集合。式(6)所表示

的优化问题事实上是一个线性规划问题:令 $\mathbf{a} = \mathbf{u} - \mathbf{v}, u_i, v_i \geq 0$ 。考虑下面的线性规划问题

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{u}, \mathbf{v}} \sum_i (u_i + v_i) \quad \text{s. t.}$$

$$\text{BDCT}(\Psi(\mathbf{u} - \mathbf{v})) \in Q_H^{-1}(\mathbf{y}) \quad (7)$$

根据线性规划问题的极值点必定在边界点上达到,则 $\forall i, u_i$ 和 v_i 必定有一个为 0,此时就有 $\|\mathbf{a}\|_1 = \sum_i (u_i + v_i)$,所以式(6)可以转化为式(7)所表示的线性规划问题来求解,可以运用具有多项式时间复杂度的内点算法^[20]求解。

至此,我们已经将图像去块效应问题转化为式(7)表示的线性规划问题,并且,一旦 Dictionary Ψ 给定,整个方法无须调校任何参数。接下来需要考虑选择合适的 Ψ 。根据压缩传感理论, Ψ 的选择需要考虑两个因素,一要使得图像在 Ψ 上的合成表示尽可能稀疏,二是 BDCT。 Ψ 的自相关性(mutual-coherence)^[21]尽可能小。从第一个角度出发,我们应当选择 Curvelets 变换^[22]和局部余弦变换^[23]的并集。这是因为一幅图像含有卡通和纹理两个成分,其中卡通成分在 Curvelet 变换下具有合成稀疏表示,而纹理成分则在局部余弦变换下是合成稀疏的。但从第二个角度出发,由于局部余弦变换与 JPEG 压缩中使用的余弦变换有着很高的自相关性,故我们舍去局部余弦变换。这样,最终选择 Curvelet 变换作为 Ψ 。

3 内点算法实现

虽然求解大规模线性规划问题的内点算法是多项式时间复杂度的算法,但式(7)的问题规模十分惊人,以一幅 512×512 的灰度图像为例,该式中有 $2 \times 512 \times 512 = 524288$ 个待优化的变量,有 $2 \times 512 = 1024$ 个不等式约束。实验发现,直接的 CPU 实现不能满足快速去块效应的要求。我们希望能利用 GPU 来加速计算,文献[24]虽然提供了一种内点算法的 GPU 实现,但该方法在求解内点算法的 KKT 系统中采用了 Cholesky 分解,这需要将线性规划问题中的约束部分写成显式的矩阵表达式,而在我们的问题中, Ψ 为 Curvelet 变换,却难以写成矩阵形式。因此,文献[24]的 GPU 实现方法不适用于我们的问题。所幸的是,共轭梯度方法十分合适,一方面,它能适用于求解大规模稀疏线性方程组,且无须显式的矩阵表达式,另一方面,它的求解过程都是向量运算^[25],非常适合于 GPU 实现。为了完整性,简

述内点算法如下:

令

$$z = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} \Phi & -\Phi \\ -\Phi & \Phi \end{pmatrix}$$

$$b = \begin{pmatrix} p \\ -q \end{pmatrix} \quad c = -1$$

式中, $\Phi = BDCT \cdot \Psi$, $p = y \times H + H/2$, $q = y \times H - H/2$,这里的 \times 运算是逐元素相乘,则式(7)就写成线性规划标准形式

$$\max_z c^T z \text{ s. t. } Az \leq b, z \geq 0 \quad (8)$$

通过式(8),可以得到下面的主对偶对称形式(primal-dual symmetric form),也称之为式(8)的KKT系统,即

$$\begin{cases} Az + w = b \\ A^T \lambda - \theta = c \\ Z\Theta e = \mu e \\ \Lambda W e = \mu e \end{cases} \quad (9)$$

式中, $z, w, \lambda, \theta \geq 0, Z, W, \Lambda, \Theta$ 都是对角矩阵,其对角线上元素分别是 z, w, λ, θ, e 为单位矩阵。当 μ 设置为0时,式(9)的解就是式(8)的最优解。求解式(9)通常采用 path-following 方法,即从任意的 z, w, λ, θ (但要求大于零)出发,采用如下方法迭代更新式(9)中的各个变量:

- 1) 估计一个合适的 μ 值 (μ 会随迭代逐步变小,趋近于0);
- 2) 计算一个方向 $\Delta z, \Delta w, \Delta \lambda, \Delta \theta$, 使得 $z + \Delta z, w + \Delta w, \lambda + \Delta \lambda, \theta + \Delta \theta$ 满足式(9);
- 3) 计算一个合适的迭代步长 t , 让 $z = z + t\Delta z, w = w + t\Delta w, \lambda = \lambda + t\Delta \lambda, \theta = \theta + t\Delta \theta$ 。

比较耗时的是其中的步骤2),它需要求解一个大规模线性方程组,其中 $\Delta \lambda$ 可通过求解式(10)得到。

$$-(\Lambda^{-1}W + AZ\Theta^{-1}A^T)\Delta \lambda = b - AZ - \mu\Lambda^{-1}e - AZ\Theta^{-1}(c - A^T\lambda + \mu Z^{-1}e) \quad (10)$$

而其余的 $\Delta z, \Delta w, \Delta \theta$ 可由 $\Delta \lambda$ 方便得到。如之前所述,采用共轭梯度法求解式(10)表示的线性方程组。整个内点算法虽然是一种迭代算法,但其迭代步骤中绝大部分都是向量运算,它适合于 GPU 实现。

4 实验

为了简化实验过程,模拟 JPEG 的压缩与解压缩过程:首先对图像分块,每块的大小为 8×8 ,对每块作

DCT-II 变换,使用 JPEG 标准^[26]提供的标准量化表。

$$S = \begin{bmatrix} 16 & 11 & 10 & 16 & 24 & 40 & 51 & 61 \\ 12 & 12 & 14 & 19 & 26 & 58 & 60 & 55 \\ 14 & 13 & 16 & 24 & 40 & 57 & 69 & 56 \\ 14 & 17 & 22 & 29 & 51 & 87 & 80 & 62 \\ 18 & 22 & 37 & 56 & 68 & 109 & 103 & 77 \\ 24 & 35 & 55 & 64 & 81 & 104 & 113 & 92 \\ 49 & 64 & 78 & 87 & 103 & 121 & 120 & 101 \\ 72 & 92 & 95 & 98 & 112 & 100 & 103 & 99 \end{bmatrix}$$

以及设定的全局量化参数 r ,最终的量化表为 $r \cdot S$,对每一块的 DCT 系数量化。由于量化之后的熵编码过程是无损的,所以,并不进行 JPEG 压缩中的熵编码过程,而是直接由量化后的 DCT 系数解量化,之后分块 DCT 逆变换得到最终的 JPEG 解压缩图像。图1给出了几种不同全局量化参数的 JPEG 压缩图像,当 r 大于等于4时, JPEG 图像有明显的块状效应。



(a) $r=2$, PSNR=33.51 (b) $r=4$, PSNR=31.78 (c) $r=5$, PSNR=31.30

图1 JPEG 压缩图像

Fig. 1 JPEG compression images

以图1(c)为例,执行去块效应方法,实验结果如图2所示,为了比较,同时给出了文献[8,11]的实验结果。可以看到本文方法较好地消除了块效应,与另外两种方法相比更好地保留了图像的细节,改善了图像的视觉效果。在图3中,给出了另外3个图像实例,相比文献[8]的方法,本文方法的结果



(a) 文献[9] (b) TSD-MRF^[12] (c) 本文方法

图2 几种去块效应算法的实验结果

Fig. 2 Experimental results of several algorithms

在视觉上有明显改善;相比 TSD-MRF^[11]的方法,本文方法更好地保持了图像对比度和细节,为了更好地显示这一点,局部放大 Couple 这幅图像,(图 4),

仔细观察图 4 中男人的鼻子部分,可以看到图 4(a) (TSD-MRF 的结果)中鼻子已经被过度光滑了,而图 4(b) (本文算法的结果)则要好得多。



图 3 更多实验结果

Fig. 3 More experimental results

对比 JPEG 压缩图像在各种去块效应算法前后的 PSNR,结果如表 1 所示。可以看到本文的方法明显提高了图像的 PSNR,而其他方法有时却降低了 PSNR,对照而言,本文的方法有着明显的优势。同时在表 1 中,

对本文算法执行所花费的时间做了统计。实验在 Intel Q8300(Core2 Quad 2.5 G)和 Nvidia GTX465 的硬件平台下,采用 CUDA 实现,所有图像大小为 512×512 像素,均在 10 s 内完成计算,具体结果如表 1 所示。



(a) 图3(l)的局部放大图

(b) 图3(o)的局部放大图

图 4 局部放大图

Fig. 4 Close-up views

表 1 几种去块效应算法的 PSNR 比较,以及本文方法的时间开销

Table 1 PSNR comparison among several algorithms on JPEG images, and time cost of our method

图像	r	PSNR/dB				时间开销/s
		JPEG	POCS ^[7]	TSD-MRF ^[12]	本文方法	
Lena	3.0	32.16	31.20	32.23	33.31	8.1
	4.0	31.78	30.14	32.05	32.44	8.2
	5.0	31.30	29.32	31.17	32.05	8.8
	6.0	30.39	28.73	30.17	31.32	9.1
Barbara	3.0	29.86	26.85	29.93	30.08	9.0
	4.0	28.08	25.76	28.65	29.05	8.7
	5.0	27.16	24.92	26.93	28.31	8.7
	6.0	27.11	24.54	26.15	27.48	9.2
Boat	3.0	30.51	29.21	31.28	31.63	7.8
	4.0	30.19	28.25	29.93	30.72	8.2
	5.0	29.40	27.68	29.31	29.96	8.3
	6.0	28.32	26.93	28.69	28.88	8.3
Couple	3.0	31.12	29.60	32.77	32.56	7.9
	4.0	30.33	28.05	31.23	31.08	8.9
	5.0	29.50	27.28	28.69	30.79	9.5
	6.0	28.41	26.97	27.35	29.23	9.6

5 结 论

本文利用压缩传感理论给出了一种只需求解一个线性规划问题的图像去块效应算法。本文算法的优点是:1) 无需调校任何参数;2) 时间复杂度是多项式的,并且适合于 GPU 实现。大量实验结果表明,本文方法有效地去除了 JPEG 压缩的块效应,提高了图像的 PSNR,同时具有较快的执行速度。

本文主要讨论了 JPEG 压缩图像的去块效应问题,但事实上,本文方法很容易推广到其他压缩方法,如基于小波变换的新一代图像压缩标准 JPEG2000 和 MPEG4 与 H. 264 等视频压缩方法。只是需要重新确定 Dictionary Ψ ,而针对 JPEG 压缩中的 DCT 变换而选择的 Curvelet 变换未必适合其他压缩方法。

近一两年来,压缩传感理论又有了新的进展——结构压缩传感(model-based compressive sensing)^[27],它在信号重建时,不仅考虑了信号的稀疏性,还挖掘了信号的结构特征,使得信号重建所需的采样数据更少。对自然图像,其小波系数中幅值较大的系数呈树状结构分布,利用这样的结构特征,可以大幅度地提高图像的重建效率^[28]。因此,今后将结合结构压缩传感理论进一步提高图像去块效应的质量和算法的运行效率。

参考文献 (References)

- [1] Zhao Y Y, Qin Z G. The status quo of the research on de-blocking algorithms in image communications [J]. Computer Engineering and Science, 2008, 30 (5): 37-40. [赵永耀, 秦志光. 图像通信中去块效应方法研究现状 [J]. 计算机工程与科学, 2008, 30 (5): 37-40.]
- [2] Ramamurthi B, Gersho A. Nonlinear space-variant postprocessing of block coded images [J]. IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1986, 34 (5): 1258-1268.
- [3] Hsieh C H, Huang R H. Block effect reduction by the 1-D gray polynomial interpolation [J]. Digital Signal Processing 2010, 20 (5): 1424-1438.
- [4] McDonnell J D, Shorten R N, Fagan, A D. An edge classification based approach to the post-processing of transform encoded images [C] // Proceedings of IEEE International conference on Acoustics, Speech, and Signal. Adelaide, South Australia, Australia: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 1994: 329-332.
- [5] Luo Y, Ward R K. Removing the blocking artifacts of block-based DCT compressed images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12 (7): 838-842.
- [6] Zakhor A. Iterative procedures for reduction of blocking effects in transform image coding [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1992, 2 (1): 91-95.
- [7] Yang Y, Galatsanos N P, Katsaggelos A K. Regularized reconstruction to reduce blocking artifacts of block discrete cosine transform compressed images [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1993, 3 (6): 421-432.
- [8] Zhao C G, Chen W F. Between-block prediction based algorithm for block effect removal [J]. Journal of Image and Graphics, 1999, 4 (A) (8): 627-630. [赵晨光, 陈武凡, 基于块间预测的图像块效应消除 [J]. 中国图象图形学报, 1999, 4 (A) (8): 627-630.]
- [9] Zou J J, Yan H. A deblocking method for BDCT compressed images based on adaptive projections [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2005, 15 (3): 430-435.
- [10] O'Rourke T P, Stevenson R L. Improved image decompression for reduced transform coding artifacts [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1995, 5 (6): 490-499.
- [11] Li Z, Delp E J. Block artifact reduction using a transform-domain Markov random field model [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2005, 15 (12): 1583-1593.
- [12] Candes E, Wakin M. An introduction to compressive Sampling [J]. Signal Processing Magazine, IEEE, 2008, 25 (2): 21-30.
- [13] Candes E J, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52 (2): 489-509.
- [14] Donoho D L. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52 (4): 1289-1306.
- [15] 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.
- [16] Stephen B, Jérôme B, Candès E. NESTA: a fast and accurate first-order method for sparse recovery [R]. California: California Institute of Technology, 2009.
- [17] Bioucas-Dias J M, Figueiredo M A T. A New TwIST: two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16 (12): 2992-3004.
- [18] Elaine T H, Yin W T, Zhang Y. A fixed-point continuation method for ell-1 regularized minimization with applications to compressed sensing: CAAM Technical Report TR07-07 [R]. Houston, Texas, U S A: Rice University, Department of Computational and Applied Mathema, 2007.
- [19] Needell D, Vershynin R. Uniform uncertainty principle and signal recovery via regularized orthogonal matching pursuit [J]. Foundations of Computational Mathematics, 2009, 9 (3) :

- 317-334.
- [20] Vanderbei R. Linear Programming: Foundations and Extensions. [M]. 3rd ed. German: Springer Press, 2008.
- [21] Elad M. Optimized projections for compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing 2007, 55(12):5695-5702.
- [22] Candes E J, Donoho D L. New tight frames of curvelets and optimal representations of objects with piecewise C^2 singularities [J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 2004, 57(2):219-266.
- [23] Mallat S. A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way [M]. 3rd ed. America: Academic Press, 2008.
- [24] Jung J H, O'Leary D P. Implementing an interior point method for linear programs on a CPU-GPU system [J]. Electronic Transactions on Numerical Analysis Electron, 2007, 28(8): 174-189.
- [25] William H P, Saul A T, William T V, et al. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing, [M]. 3rd ed. Britain: Cambridge University Press, 2007.
- [26] Joint Photographic Experts Group. ISO/IEC IS 10918-1 ITU-T Recommendation T. 81 [S]. International Organization for Standard, 1994.
- [27] Baraniuk R G, Cevher V, Duarte M F, et al. Model-based compressive sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(4):1982-2001.
- [28] Duarte M F, Wakin M B, Baraniuk R G. Wavelet-domain compressive signal reconstruction using a Hidden Markov Tree model[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Las Vegas, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2008:5137-5140.