

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 9
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9月 第17卷 第9期(总第197期)

目次

图像处理和编码

- 自适应阈值 HMRF 模型超分辨率重建 朱虹, 刘薇, 姚杰, 欧阳光振, 刘小乾(1049)
- 亮度补偿变换矩阵的颜色恒常性算法 袁兴生, 王正志(1055)
- 小波变换和稀疏冗余表示的混合图像去噪 李慧斌, 刘峰(1061)
- 基于运动信息自适应的快速运动估计算法 李子印, 杨齐(1069)
- 融合纹理特征的两阶段聚类分割算法 王改华, 李德华(1075)
- 利用纹理和边缘特征的 Criminisi 改进算法 任澍, 唐向宏, 康佳伦(1085)

图像分析和识别

- 激光焊接对接拼缝测量的微景深方法 王平江, 黄雅婷, 齐江飞, 彭芳瑜, 李斌, 唐小琦(1092)
- 基于码本模型和多特征的早期烟雾检测 姜明新, 王洪玉, 蔡兴洋(1102)
- 结合局部特征和全局信息的自适应活动轮廓模型 朱晓舒, 孙权森, 夏德深(1109)
- 高斯颜色模型在瓷片图像分类中的应用 郑霞, 胡浩基, 周明全, 樊亚春(1115)
- 区域生长的轮对图像分割 史倩, 吴开华(1122)
- 图像搜索结果的滑动窗口多标记传播聚类 谷瑞军, 陈圣磊, 陈耿, 汪加才(1128)

图像理解和计算机视觉

- 中介相似性量度的图像匹配 周宁宁, 吕文杰(1135)
- 自适应字典学习的多聚焦图像融合 严春满, 郭宝龙, 易盟(1144)
- 摄像机几何约束及人体定位 陶霖密, 于亚鹏, 邸慧军, 孙洛(1150)

虚拟现实与增强现实

针对层次式累进网格模型的动态评估与调整 王丹华, 卢威, 潘金贵(1158)

医学图像处理

结合形状与纹理特征的椎间盘退化辅助诊断..... 郝世杰, 蒋建国, 郭艳蓉, 詹曙, 李鸿(1168)

改进的核磁共振图像分割与偏移场恢复耦合模型

..... 王顺风, 冀晓娜, 张建伟, 陈允杰, 方林, 詹天明(1175)

遥感图像处理

光学遥感图像低可观测区域舰船检测 周伟, 关键, 何友(1181)

非下采样 Contourlet 变换与脉冲耦合神经网络相结合的 SAR 与多光谱图像融合

..... 金星, 李晖晖, 时丕丽(1188)

“计算机视觉前沿论坛”专栏征文通知 (1196)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 9 期

2012 年 9 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 ZTTXFZ 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. 9 September 2012

Contents

Image Processing and Coding

- Adaptive threshold HMRF model for super-resolution reconstruction
..... Zhu Hong, Liu Wei, Yao Jie, Ouyang Guangzhen, Liu Xiaoqian(1049)
- Color constancy algorithms with luminance-compensation transform matrix Yuan Xingsheng, Wang Zhengzhi(1055)
- Hybrid image denosing method based on wavelet transform as well as on a sparse and redundant representations model
..... Li Huibin, Liu Feng(1061)
- Fast motion estimation algorithm based on motion information adaptation Li Ziyin, Yang Qi(1069)
- Texture feature fusion-based two-stage clustering segmentation algorithm Wang Gaihua, Li Dehua(1075)
- Improved Criminisi algorithm with the texture and edge features Ren Shu, Tang Xianghong, Kang Jialun(1085)

Image Analysis and Recognition

- Seam measurement based on micro depth of field lens for laser welding
..... Wang Pingjiang, Huang Yating, Qi Jiangfei, Peng Fangyu, Li Bin, Tang Xiaoqi(1092)
- Early smoke detection based on codebook model and multiple features Jiang Mingxin, Wang Hongyu, Cai Xingyang(1102)
- Adaptive active contour model integrating global and local image fitting energy Zhu Xiaoshu, Sun Quansen, Xia Deshen(1109)
- Porcelain shard images classification based on Gaussian color model Zheng Xia, Hu Haoji, Zhou Mingquan, Fan Yachun(1115)
- Image segmentation for wheel set measurement based on region growing Shi Qian, Wu Kaihua(1122)
- Sliding window multi-label propagation clustering for searched images
..... Gu Ruijun, Chen Shenglei, Chen Geng, Wang Jiakai(1128)

Image Understanding and Computer Vision

- Image matching based on the medium similarity measure Zhou Ningning, Lv Wenjie(1135)
- Multi-focus image fusion using adaptive dictionary learning method Yan Chunman, Guo Baolong, Yi Meng(1144)
- Geometric constraints of locating cameras and people Tao Linmi, Yu Yapeng, Di Huijun, Sun Luo(1150)

Virtual Reality and Augmented Reality

- Dynamic evaluation and modification methods against aggressive mesh hierarchy models
..... Wang Danhua, Lu Wei, Pan Jingui(1158)

Medical Image Processing

- Computer aided diagnosis on intervertebral disc degeneration with shape and texture features
..... Hao Shijie, Jiang Jianguo, Guo Yanrong, Zhan Shu, Li Hong(1168)
- Improved coupled model for MR images segmentation and bias restoration
..... Wang Shunfeng, Ji Xiaona, Zhang Jianwei, Chen Yunjie, Fang Lin, Zhan Tianming(1175)

Remote Sensing Image Processing

- Ship detection from low observable regions in optical remote sensing imagery Zhou Wei, Guan Jian, He You(1181)
- SAR and multispectral image fusion algorithm based on pulse coupled neural networks and non-subsampled Contourlet transform
..... Jin Xing, Li Huihui, Shi Pili(1188)

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)09-1049-06

论文引用格式: 朱虹,刘薇,姚杰,欧阳光振,刘小乾. 自适应阈值 HMRF 模型超分辨率重建[J]. 中国图象图形学报,2012,17(9):1049-1054.

自适应阈值 HMRF 模型超分辨率重建

朱虹, 刘薇, 姚杰, 欧阳光振, 刘小乾

西安理工大学自动化与信息工程学院, 西安 710048

摘要: 针对 Huber-Markov 随机场作为图像先验进行 MAP 超分辨率重建时先验约束的有效性问题,通过分析重建过程中 Huber 惩罚函数与图像空间灰度变化分布特性的相互关系,提出一种根据图像空间灰度变化统计特性,在超分辨率重建迭代过程中动态确定 Huber 函数阈值的方法。实验结果表明,该方法可根据不同图像的边缘特性,自适应确定 Huber 惩罚函数阈值,在有效抑制噪声的同时,保持重建图像的边缘和细节信息。

关键词: 超分辨率重建; Huber-Markov 随机场; 自适应阈值; 高斯拟合

Adaptive threshold HMRF model for super-resolution reconstruction

Zhu Hong, Liu Wei, Yao Jie, Ouyang Guangzhen, Liu Xiaoqian

School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

Abstract: For the constraints validity problem of the Huber-Markov random field prior model in MAP super-resolution, an adaptive threshold HMRF model is proposed in this paper to make an adaptive choice of the threshold of the Huber edge penalty function. In iteration, by analyzing the relationship between the Huber penalty function and the distribution character of the image spatial gray level variation, statistical properties of the image spatial gray level variation is used as the basis for dynamically determining the threshold. Experimental results show that the proposed method can choose the threshold of Huber penalty function adaptively for images with different edge characteristics, restrain the noise, and preserve the edges details effectively.

Key words: super-resolution reconstruction; huber-Markov random field; adaptive threshold; Gaussian fitting

0 引言

超分辨率图像重建技术是利用同一场景的多幅互有位移降质图像来重建一幅高分辨率图像^[1-2]。在以泛函建模求解时,需根据图像的先验模型设置正则约束,引导递推求得正确解。因此,正则约束的确定是获得有效解的关键^[3-4]。

常用的正则约束模型包括 Tikhonov 正则项、Gauss-Markov 随机场模型(GMRF)、总变分模型(TV)、双边总变分(BTV)模型,以及 Huber-Markov 随机场模型(HMRF)。Tikhonov 与 GMRF 模型类似,其为各向同

性平滑,不能很好地保持图像细节^[5];TV 和 BTV 模型对陡立的局部梯度像素的处罚不严重,以此达到去噪的同时保持边缘的目的,但小尺度图像细节容易损失^[6]。HMRF 随机场先验模型中,Huber 函数分布的重尾特性使得其对图像边缘的惩罚较轻^[7],从而实现对图像边缘像素和非边缘像素分别处理,达到平滑非边缘像素、抑制噪声并保持图像边缘信息的目的,且该模型满足严格的凸性,从理论上严格保证了了解的全局收敛性,使其成为超分辨率重建中一种广泛使用的正则约束模型^[8-10]。然而 Huber 惩罚函数的阈值控制着对空间灰度变化惩罚的不连续性,阈值的选取直接关系到重建图像质量的好坏^[11]。

收稿日期:2011-12-23;修回日期:2012-03-28

基金项目:国家国际科技合作专项(2011DFR10480)

第一作者简介:朱虹(1963—),女,教授,博士生导师,1999年于日本福井大学获电子信息工程专业工学博士学位,主要研究方向为模式识别与数字图像处理。Email:zhuhong@xaut.edu.cn

文献[8,12]采用遍历多个阈值进行重建,以得到最佳重建结果的阈值为最优阈值的方法,此类方法无疑会引入主观估计和计算复杂的缺点。另一类方法^[13-16]则建立在图像边缘或高低频谱具有特定比例的假设上。事实上,图像的边缘会随着迭代过程逐渐清晰,因此阈值也应是动态变化的。为了得到自适应调整的阈值,文献[11]设计了一种阈值选取分段函数,但仍引入了预设的边界。本文在最大后验概率估计(MAP)框架下,设计了一种自适应 Huber 惩罚函数阈值的选取方法,使其可根据图像空间灰度变化的统计特性,在迭代中自动确定阈值,提高重建的质量。

1 MAP-HMRF 超分辨率的数学模型

超分辨率的数学模型可表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

式中, \mathbf{y} 为低分辨率图像序列构成的列项量, \mathbf{x} 为理想高分辨率图像构成的列项量, \mathbf{n} 为随机噪声, \mathbf{H} 假设为一个线性算子,代表图像获取过程中的各种变换、模糊及降采样等。

MAP 超分辨率重建算法可描述为在已知低分辨率图像序列 \mathbf{y} 的前提下,使高分辨率图像 \mathbf{x} 出现的后验概率达到最大^[5],即

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \max_{\mathbf{x}} Pr(\mathbf{x} | \mathbf{y}) = \arg \min_{\mathbf{x}} \{ -\ln Pr(\mathbf{y} | \mathbf{x}) - \ln Pr(\mathbf{x}) \} \quad (2)$$

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} J(\mathbf{x}) = \begin{cases} \arg \min_{\mathbf{x}} \{ \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|_2^2 + \lambda \sum_{i=1}^4 (\mathbf{d}_c^i \mathbf{x})^2 \} & |\mathbf{d}_c^i \mathbf{x}| \leq \alpha \\ \arg \min_{\mathbf{x}} \{ \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|_2^2 + \lambda \sum_{i=1}^4 (2\alpha |\mathbf{d}_c^i \mathbf{x}| - \alpha^2) \} & |\mathbf{d}_c^i \mathbf{x}| > \alpha \end{cases} \quad (7)$$

式中, λ 为正则化参数,依据文献[3]对 λ 取值的推导,本文定义

$$\lambda_T = \frac{\|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}_{l-1}\|_2^2}{(1/\gamma) - \sum_{c \in \mathcal{C}} \rho_{\alpha_{l-1}}(\mathbf{d}_c^i \mathbf{x}_{l-1})} \quad (8)$$

$$\frac{1}{\gamma} = \|\mathbf{y}\|_2^2 + \sum_{c \in \mathcal{C}} \rho_{\alpha_{l-1}}(\mathbf{d}_c^i \mathbf{x}_{l-1}) \quad (9)$$

式中, l 为迭代次数。式(7)中目标函数可通过梯度下降法求解。

2 自适应确定 Huber 惩罚函数的阈值

2.1 阈值选取对重建的影响

由式(6)可见,使用 Huber 惩罚函数的鲁棒性

在零均值、 σ^2 为方差高斯白噪声条件下,条件概率 $Pr(\mathbf{y} | \mathbf{x})$ 描述了估计所得的低分辨率图像与实际低分辨率图像之间的误差信号分布,可认为其服从零均值高斯分布,即

$$Pr(\mathbf{y} | \mathbf{x}) \propto \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} (\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x})^T (\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}) \right\} \quad (3)$$

对于高分辨率图像,其 HMRF 随机场先验概率分布模型可描述为

$$Pr(\mathbf{x}) \propto \frac{1}{Z} \exp \left\{ -\frac{1}{2\beta} \sum_{c \in \mathcal{C}} \rho_{\alpha}(\mathbf{d}_c^i \mathbf{x}) \right\} \quad (4)$$

式中, Z 为归一化常数, β 为 Gibbs 分布的温度系数, c 表示一个邻域系统的簇, \mathcal{C} 表示簇 c 的全体, $\mathbf{d}_c^i \mathbf{x}$ 描述了图像的空间灰度变化,图像对角、反对角、水平、垂直 4 个方向的空间灰度变化用二阶差分描述为

$$\begin{cases} \mathbf{d}_c^1 \mathbf{x} = 0.5x_{i-1,j-1} - x_{i,j} + 0.5x_{i+1,j+1} \\ \mathbf{d}_c^2 \mathbf{x} = 0.5x_{i+1,j-1} - x_{i,j} + 0.5x_{i-1,j+1} \\ \mathbf{d}_c^3 \mathbf{x} = x_{i,j-1} - 2x_{i,j} + x_{i,j+1} \\ \mathbf{d}_c^4 \mathbf{x} = x_{i-1,j} - 2x_{i,j} + x_{i+1,j} \end{cases} \quad (5)$$

Huber 边缘惩罚函数定义为

$$\rho_{\alpha}(u) = \begin{cases} u^2 & |u| \leq \alpha \\ 2\alpha |u| - \alpha^2 & |u| > \alpha \end{cases} \quad (6)$$

式中, α 为 Huber 惩罚函数的阈值。

将式(3)(4)(6)代入式(2),整理得到 MAP-HMRF 超分辨率重建的目标函数

在于:阈值 α 会对图像空间灰度变化作出不同程度的惩罚。对于灰度变化平坦区域,即 $(|\mathbf{d}_c^i \mathbf{x}| \leq \alpha)$,作平方惩罚,从而平滑小尺度噪声;而对灰度变化较强的图像边缘 $(|\mathbf{d}_c^i \mathbf{x}| > \alpha)$ 线性惩罚则可以对其保持。因此若 α 选取过小,对噪声的抑制作用不足;反之则对图像边缘过度惩罚。图 1 显示了 α 选取不当超分辨率重建效果。图 1(b) 为对原始高分辨率图像 Lena 施加 5×5 (像素) 均值模糊,零均值、方差为 8 高斯噪声后,以降采样因子为 2 得到的序列低分辨率图像。图 1(c)(d) 给出了不同 α 取值下,迭代所得 $\hat{\mathbf{x}}_l$ 对角方向灰度变化 $|\mathbf{d}_c^i \mathbf{x}|$ 值的统计曲线,实验得出其他方向 $|\mathbf{d}_c^i \mathbf{x}|$ 亦满足相同分布。可见,迭代初始时 ($l=0$),图像对角方向灰度变化 $|\mathbf{d}_c^i \mathbf{x}|$ 值主

要分布在0~10,因此选取 $\alpha=1$ 和 $\alpha=10$ 两极端的阈值,来验证 α 选取不当时期的重建效果,如图1(e)(f)所示。对于图1(e), α 选取过小,虽然迭代过程中图像逐渐清晰,但噪声被放大;而图1(f)中, α 选取过大,迭代使其的清晰效果显然有限。同时,图1(c)(d)中曲线随迭代而变化也说明图像边缘随着迭代逐渐清晰,因此需要动态设定阈值 α 。

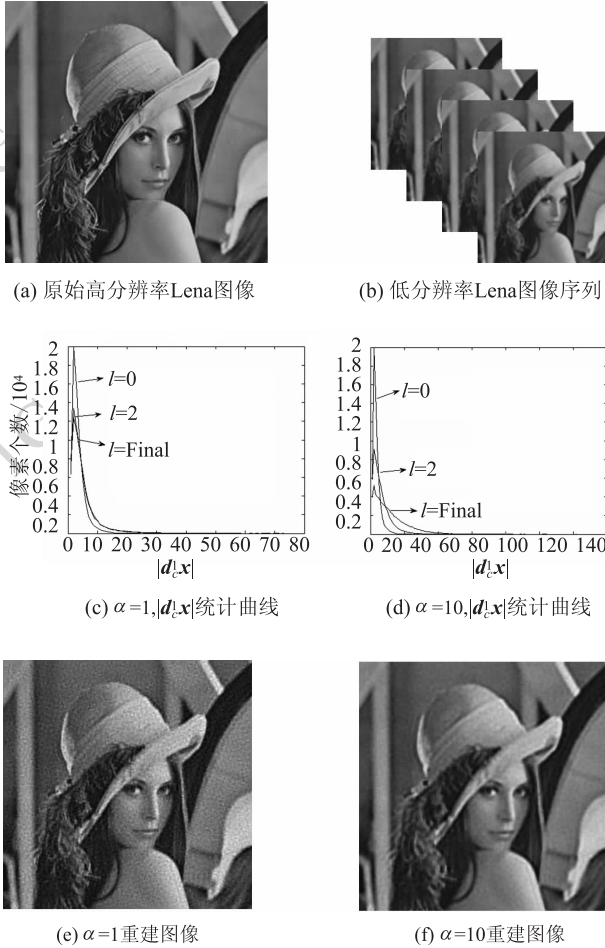


图1 α 取值对重建结果的影响

Fig. 1 SR results of Lena under different thresholds

2.2 自适应阈值的获取

图1(c)(d)显示,迭代过程中, $|d_c^l x|$ 值较小的图像平滑区域以统计峰值形态呈现,而 $|d_c^l x|$ 较大的边缘区域统计值较小,以曲线拖尾形态呈现。

基于 $|d_c^l x|$ 统计曲线峰值区域的类高斯分布特性,在迭代过程中采用高斯曲线拟合来建立曲线变化的特征描述,用以动态设定阈值 α 。

定义 $|d_c^l x|$ 统计曲线上点为 $(|d_c^l x|_i, c_i)$, $(i=1, 2, \dots, p, \dots, K)$,纵坐标 c_i 为像素统计个数。 p 为曲线峰值点,则该点坐标为 $(|d_c^l x|_p, c_p)$,其中

$$c_p = \max(c_i) \quad (10)$$

对 $|d_c^l x|$ 统计曲线主峰进行高斯拟合,为避免拖尾部分对拟合的不利影响,选取曲线峰值附近若干点作为有效拟合点。以 p 点为起始中心,分别沿其左、右方向计算相邻点统计值之差 Z ,用以描述峰值的下降程度,如沿右方向有

$$Z = |c_{p+\tau} - c_{p+\tau-1}| \quad (\tau=0, 1, 2, \dots) \quad (11)$$

获取图像后,便可得到 $|d_c^l x|$ 统计曲线分布的先验信息,依据该信息可预设曲线下降程度门限值 Z_e ,若 $Z < Z_e$,则认为该点已属于曲线拖尾部分,无法反映曲线的类高斯特性,反之则为有效拟合点。所有有效拟合点的个数为 N 。

由于高斯概率分布在其均值点处达到最大值,故其均值为

$$\mu = |d_c^l x|_p \quad (12)$$

方差为

$$\sigma_c^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [(|d_c^l x|_i - \mu)^2 \cdot c_i]}{\sum_{i=1}^N c_i} \quad (13)$$

迭代初始,图像退化严重,边缘信息损失,故曲线峰值尖锐;随着迭代次数增加,图像的边缘细节部分被复原,峰值锐度降低,曲线形态逐渐逼近真实高分辨率图像的曲线形态,表现为 c_p 逐渐减小且 σ_c^2 逐渐增大。在此过程中,阈值 α 应随曲线形态变化而增大,以区分图像平滑和非平滑区域。因此可得到 α 在迭代中的变化规律: α 应随 c_p 的减小而增大,随 σ_c^2 的增大而增大。

依据上述规律,定义曲线变化特征量为

$$r = \sigma_c^2 / \left(c_p / \sum_{i=1}^N c_i \right) \quad (14)$$

式中, $c_p / \sum_{i=1}^N c_i$ 为 p 点的概率,其变化特性与 c_p 一致,故 r 反映了曲线随迭代的变化。

综上分析,阈值 α 应为曲线变化特征量 r 的函数,即 $\alpha=f(r)$, f 为函数关系。为了确定 f ,首先测试其是否为线性关系,即 $\alpha=kr$ 是否成立, k 为比例系数。

图2测试了Lena图像在零均值,不同方差 σ_n^2 高斯噪声下, r 值随迭代的变化曲线。从图中各曲线间的非平行关系可知, r 与 σ_n^2 间为非线性关系。由于 α 的选取应适应不同图像及不同程度的退化,因此若 $\alpha=kr$ 成立,则意味着 α 无法适应不同程度的噪声。因此,函数 f 应为非线性,方能满足阈值的自适应选取。此外,图2中显示出 r 的增量 Δr 随迭

代增幅较小,而 α 对应 Δr 的增幅应较大,才能适应对图像灰阶的调整。

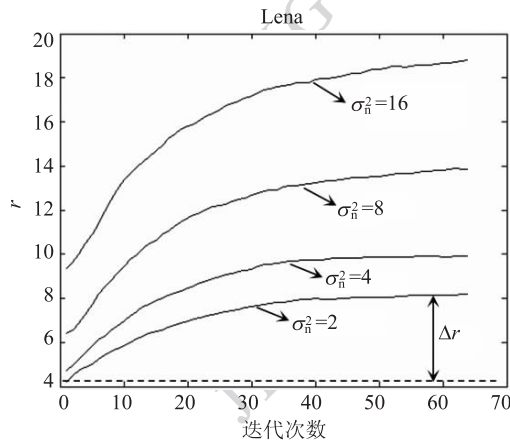


图 2 r 值随迭代的变化曲线

Fig. 2 Relationship between r and iterations

综上所述,本文选择指数函数建立 α 与 r 之间的关系,以 μ 和 r 作为曲线随迭代变化的特征描述,得到阈值自动选取公式

$$\alpha_l = \mu_l + [e^{\omega r_l} - 1] \quad (15)$$

式中以均值 μ_l 为基准, ω 取常数 0.1,用以限定计算结果在图像灰阶范围内。

综上,超分辨率重建算法的步骤如下:

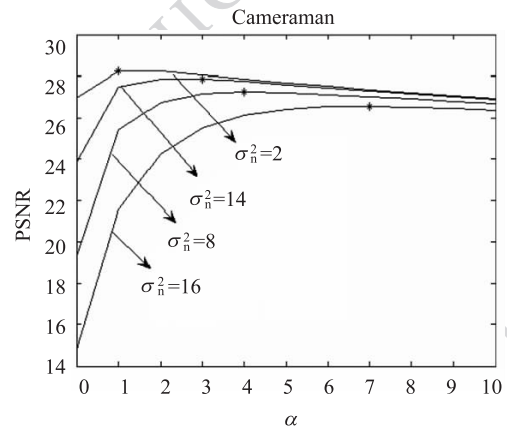
- 1) 低分辨率图像参考帧进行双立方插值得到高分辨率图像估计初值 \hat{x}_l , 迭代次数 $l=0$;
- 2) 对 \hat{x}_l , 依据式(15)计算阈值 α_l ; 依据式(8)(9)计算 λ_l ;
- 3) 求解目标函数负梯度 $-\nabla J(\hat{x}_l)$;
- 4) 迭代更新高分辨率图像, $\hat{x}_{l+1} = \hat{x}_l - \tau_l \nabla J(\hat{x}_l)$, 式中 τ_l 为迭代步长;
- 5) 给定迭代收敛阈值 ε , 若有 $\|\hat{x}_{l+1} - \hat{x}_l\| / \|\hat{x}_l\| \leq \varepsilon$, 则终止迭代, \hat{x}_{l+1} 即为所求解。否则,转向步骤 2)。

3 实验结果及分析

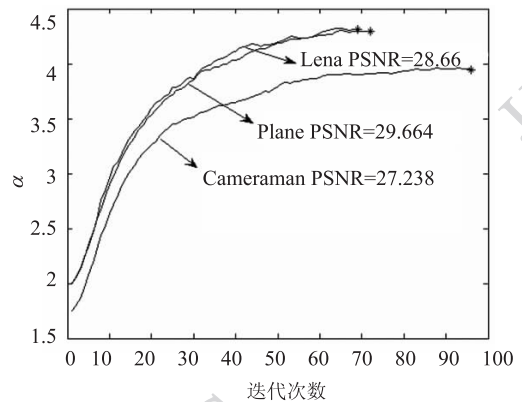
为测试算法有效性,分别对标准测试图及实际拍摄图像进行测试,对比了多次取值择优、文献[14]设定图像高低频比例、文献[17]基于统计的 MAD (median absolute deviation) 法及本文方法的重建结果。

图 3(a) 为采用多次取值择优方法进行重建时 PSNR 随阈值的变化曲线,该方法需要遍历多个 α

进行重建,最终以获得最高 PSNR 的 α 为最优阈值。图中对标准测试图 Cameraman 施加退化为 5×5 (像素) 均值模糊,零均值不同方差 σ_n^2 高斯噪声,降采样因子为 2。图 3(a) “*” 标识出最优阈值对应的 PSNR, 其值见表 1。图 3(b) 为采用本文方法对标准测试图 Lena、Cameraman 及 Plane 进行重建时, α 随迭代的变化曲线。其中施加退化为 5×5 (像素) 均值模糊,零均值 $\sigma_n^2 = 8$ 高斯噪声,降采样因子为 2。可见本文方法无需多次重建,且 α 可在迭代中自适应调整。图 3(b) 中 “*” 为迭代收敛时的 α 取值,并标记出迭代收敛时重建结果的 PSNR 值。



(a) 多次取值择优 PSNR 曲线



(b) 本文自动选取阈值曲线

图 3 多次取值择优与本文方法的对比
Fig. 3 Comparison of optimal multi-threshold and our proposed method

将上述几种阈值选取方法的重建数据对比,结果如表 1 所示,其中均施加零均值噪声。数据显示,相比于文献[14]方法和 MAD 法,多次取值择优方法能够得到更高的 PSNR 值,而本文方法的 PSNR 值则略高于多次取值择优方法,这是因为图像细节

的恢复反映在 PSNR 值上仅为较小的提升,可见本文方法能得到更好的重建结果,且避免了多次取值的比较选择过程。当图像退化严重时,重建迭代收敛的速度降低,本文方法相较于多次取值择优方法的计算效率优势更加明显。

图4给出了表1中 Cameraman 图像 $\sigma_n^2 = 2$ 和 $\sigma_n^2 = 16$ 时,多次取值择优和本文方法的重建结果,可见本文自适应阈值算法能够适应不同退化情况,

得到更好的重建效果。

图5为实拍视频图像序列的重建结果。取视频中连续6帧图像,截取 126×94 像素大小的日历部分进行实验,重建图像的分辨率提高一倍。由于没有原始高分辨率图像用以计算 PSNR 值,多次取值择优方法难以适用。对比文献[14]方法、MAD法和本文方法的重建结果,图5(b)表明本文方法重建后的数字和汉字更为清晰,验证了算法的有效性及其适用性。

表1 重建图像的 PSNR 值
Table 1 PSNR of reconstruction images

图 像	方 法	$\sigma_n^2 = 2$	$\sigma_n^2 = 4$	$\sigma_n^2 = 8$	$\sigma_n^2 = 16$
Lena	多次取值择优	29.659($\alpha = 2$)	29.248($\alpha = 3$)	28.630($\alpha = 5$)	27.970($\alpha = 8$)
	文献[14]方法	29.647	29.235	28.516	27.396
	MAD法	29.364	29.085	28.622	27.970
	本文方法	29.678	29.250	28.660	27.991
Cameraman	多次取值择优	28.240($\alpha = 1$)	27.861($\alpha = 3$)	27.210($\alpha = 4$)	26.430($\alpha = 7$)
	文献[14]方法	28.214	27.870	27.182	26.277
	MAD法	27.922	27.657	27.135	26.523
	本文方法	28.255	27.880	27.238	26.540
Plane	多次取值择优	30.870($\alpha = 2$)	30.381($\alpha = 3$)	29.557($\alpha = 5$)	28.753($\alpha = 8$)
	文献[14]方法	30.848	30.362	29.372	28.098
	MAD法	30.581	30.217	29.621	28.754
	本文方法	30.900	30.430	29.664	28.860



图4 Cameraman 重建结果

Fig. 4 SR results of Cameraman

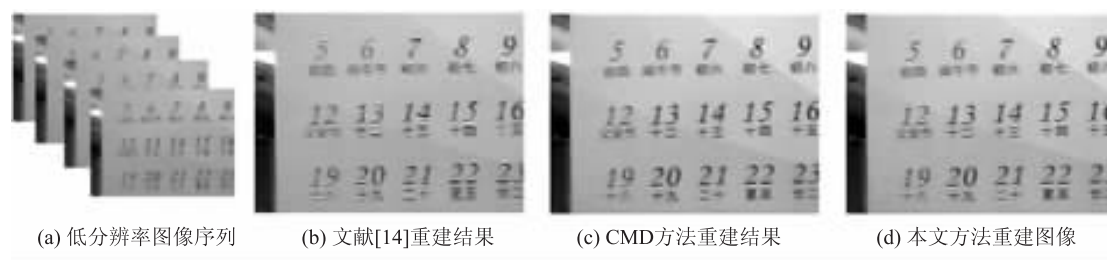


图 5 实拍图像重建结果

Fig. 5 SR results of real images

4 结 论

针对 MAP-HMRF 的超分辨率重建中, Huber 惩罚函数阈值的选取问题, 提出了在迭代中依据图像的空间灰度变化统计特性, 动态自适应确定 Huber 函数阈值的方法, 以更好地平滑非边缘、抑制噪声并保持边缘信息。模拟图像和实拍图像序列的实验结果表明, 本文方法不仅实现了 Huber 惩罚函数阈值的自动选取, 且对不同图像以及不同程度退化具有一定的适应性, 得到更好的重建效果。

参考文献 (References)

- [1] Farsiu S, Robinson D, Elad M, *et al.* Advances and challenges in super-resolution[J]. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 2004, 14(2):47-57.
- [2] Protter M, Elad M, Milanfar P. Generalizing the nonlocal-means to super-resolution reconstruction [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(1):36-51.
- [3] Han Y B, Wu L N, Zhang D Q. Super-resolution reconstruction based on regularization[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(7):1713-1716. [韩玉兵, 吴乐南, 张冬青. 基于正则化处理的超分辨率重建[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(7):1713-1716.]
- [4] Yuan Q Q, Shen H F, Li P X, *et al.* Adaptively regularized multi-frame image super-resolution reconstruction[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2010, 15(12):1720-1727. [袁强强, 沈焕锋, 李平湘, 等. 自适应正则化多幅影像超分辨率重建[J]. *中国图象图形学报*, 2010, 15(12):1720-1727.]
- [5] Milanfar P. *Super-resolution Imaging*[M]. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2010:1-3.
- [6] Shao W Z. Image modeling based regularized multi-frame super-resolution reconstruction [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008. [邵文泽. 基于图像建模理论的多幅图像正则化超分辨率重建算法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.]
- [7] Pickup L C, Capel D P, Roberts S J, *et al.* Bayesian methods for image super-resolution [J]. *The Computer Journal*, 2007, 52(1):101-113.
- [8] Li Z, Han G Q, Xiao S, *et al.* MAP-based single-frame super-resolution image reconstruction for license plate recognition[C]// *Proceedings of the 2009 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering Computational Intelligence and Software Engineering*. Wuhan, China: IEEE, 2009:1-5.
- [9] Shen H F, Ng M K, Li P X, *et al.* Super resolution reconstruction algorithm to MODIS remote sensing images[J]. *The Computer Journal*, 2009, 52(1):90-100.
- [10] Zhang L P, Yuan Q Q, Shen H F, *et al.* Multiframe image super-resolution adapted with local spatial information[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, 28(3):381-390.
- [11] Wang Y P, Huang X S, Yan Y Z, *et al.* A new method for motion-blurred image blind restoration based on Huber Markov Random field[C]// *Proceedings of the 5th International Conference on Image and Graphics*. Xi'an, China: IEEE, 2009:51-56.
- [12] Capel D, Zisserman A. Computer vision applied to super resolution[J]. *IEEE Signal Processing*, 2003(5):75-86.
- [13] Zhang Y, Wang T, Xu Q, *et al.* HBE satellite image super-resolution reconstruction with HMRF prior model [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(7):589-592. [张艳, 王涛, 徐青, 等. 基于 HMRF 先验模型的 HBE 卫星遥感图像超分辨率重建[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2007, 32(7):589-592.]
- [14] Zhang H T. Super-resolution based on the image of vehicle license plate[D]. Xi'an: Xidian University, 2010. [张洪涛. 基于车牌图像的超分辨率重建[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.]
- [15] Soccorsi M, Gleich D, Datcu M. Huber-Markov model for complex SAR image restoration[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(1):63-67.
- [16] He H, Kondi L P. Choice of threshold of the Huber-Markov prior in MAP-based video resolution enhancement[C]// *Proceedings of the 2004 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. Canadian: IEEE, 2004, 2:801-804.
- [17] Suo F, Hu F Y, Zhu G. Robust super-resolution reconstruction based on adaptive regularization[C]// *Proceedings of the 2011 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing*. Nanjing, China: IEEE, 2011:1-4.