



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办：中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2015
03
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

非真实感图像处理 P437





第20卷第3期（总第227期）

2015年3月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

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

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@radi.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of

Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@radi.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

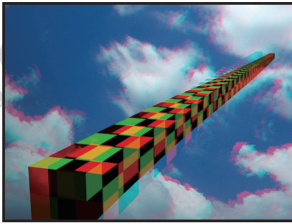
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

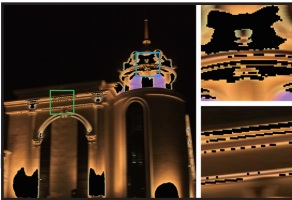
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

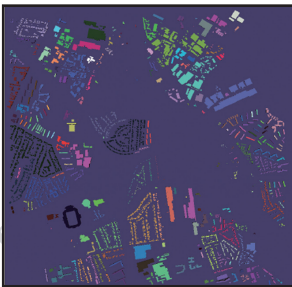
国内定价 50.00元



实时立体视觉系统中的深度映射(第0366页)



基于辐照度的运动模糊图像去模糊(第0395页)



面向智慧城市的3维城市在线可视化(第0445页)

综述

面向血管疾病诊断及预测分析的血流动力学模拟综述

徐梦佳, 杨金柱, 赵宏, 赵大哲 0297

图像处理和编码

多特征融合的车辆阴影消除

邱一川, 张亚英, 刘春梅 0311

图像分析和识别

基于局部时空特征方向加权的人体行为识别

李俊峰, 张飞燕 0320

对表情鲁棒的面部轮廓线3维人脸识别

常朋朋, 达飞鹏, 梅俊 0332

融合双层信息的显著性检测

姜霞霞, 李宗民, 匡振中, 刘玉杰 0340

面向动摄像机的高速运动目标检测

穆春迪, 谢剑斌, 闫玮, 刘通, 李沛秦 0349

匹配滤波在SAR目标单个散射部件检测中的应用

丁柏圆, 文贡坚, 钟金荣, 马聪慧 0357

图像理解和计算机视觉

实时立体视觉系统中的深度映射

李大锦, 白成杰 0366

遥感图像处理

GPU支持的SAR影像几何校正大规模并行处理

杨景辉, 程春泉, 张继贤, 黄国满 0374

基于正则化约束的遥感图像多尺度去模糊

谭海鹏, 曾炫杰, 牛四杰, 陈强, 孙权森 0386

第十届中国计算机图形学大会专栏

基于辐照度的运动模糊图像去模糊

方贤勇, 阚未然, 周健, 李黎, 郭延文 0395

对比度、颜色一致性和灰度像素保持的消色算法

王勋, 罗婷婷, 刘春晓, 彭浩宇 0408

结合因子图的多目的地地图布局优化

罗振珊, 张俊松, 范接鹏 0418

高阶连续的形状可调三角多项式曲线曲面

严兰兰, 韩旭里 0427

改进的自然图像铅笔画效果生成

黄志勇, 姚远, 张晶晶, 马凯, 任东 0437

面向智慧城市的3维城市在线可视化

潘斌, 郭小明, 陈明明, 陈为, 彭群生 0445

CONTENTS

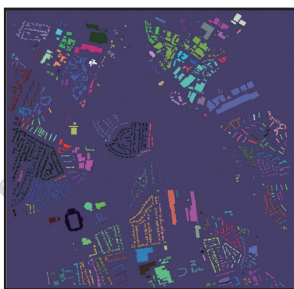
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Depth mapping in real-time stereoscopic systems (P0366)



Deblurring of motion blurred images based on the irradiance(P0395)



Online 3D city visualization for smarter cities(P0445)

Review

Survey of hemodynamics simulation for diagnosis and prediction in vascular disease

Xu Mengjia, Yang Jinzhu, Zhao Hong, Zhao Dazhe 0297

Image Processing and Coding

Vehicle shadow removal with multi-feature fusion

Qiu Yichuan, Zhang Yaying, Liu Chunmei 0311

Image Analysis and Recognition

Human behavior recognition based on directional weighting local space-time features

Li Junfeng, Zhang Feiyan 0320

Expression-robustness 3D face recognition based on facial profiles

Chang Pengpeng, Da Feipeng, Mei Jun 0332

Image saliency detection based on two-layer information fusion

Jiang Xiaxia, Li Zongmin, Kuang Zhenzhong, Liu Yujie 0340

Detecting high-speed moving targets in moving camera environments

Mu Chundi, Xie Jianbin, Yan Wei, Liu Tong, Li Peiqin 0349

The application of matched filter in detecting single scattering parts of SAR targets

Ding Boyuan, Wen Gongjian, Zhong Jinrong, Ma Conghui 0357

Image Understanding and Computer Vision

Depth mapping in real-time stereoscopic systems

Li Dajin, Bai Chengjie 0366

Remote Sensing Image Processing

GPU supported massively parallel processing for geometric correction of SAR imagery

Yang Jinghui, Cheng Chunquan, Zhang Jixian, Huang Guoman 0374

Remote sensing image multi-scale deblurring based on regularization constraint

Tan Haipeng, Zeng Xuanjie, Niu Sijie, Chen Qiang, Sun Quansen 0386

Column of Chinagraph'2014

Deblurring of motion blurred images based on the irradiance

Fang Xianying, Kan Weiran, Zhou Jian, Li Li, Guo Yanwen 0395

Decolorization with contrast, color consistency and grayscale pixel preservation

Wang Xun, Luo Tingting, Liu Chunxiao, Peng Haoyu 0408

Synthesizing multi-destinations map with factor graph

Luo Zhenshan, Zhang Junsong, Fan Jiepeng 0418

Higher-order continuous shape adjustable trigonometric polynomial curve and surface

Yan Lanlan, Han Xuli 0427

Improved algorithm for natural image pencil drawing production

Huang Zhiyong, Yao Yuan, Zhang Jingjing, Ma Kai, Ren Dong 0437

Online 3D city visualization for smarter cities

Pan Bin, Guo Xiaoming, Chen Mingming, Chen Wei, Peng Qunsheng 0445

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)03-0386-09

论文引用格式: Tan H P, Zeng X J, Niu S J, Chen Q, Sun Q S. Remote sensing image multi-scale deblurring based on regularization constraint[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(3): 0386-0394. [谭海鹏, 曾炫杰, 牛四杰, 陈强, 孙权森. 基于正则化约束的遥感图像多尺度去模糊[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(3): 0386-0394.] [DOI:10.11834/jig.20150310]

基于正则化约束的遥感图像多尺度去模糊

谭海鹏, 曾炫杰, 牛四杰, 陈强, 孙权森

南京理工大学计算机科学与工程学院, 南京 210094

摘要: 目的 遥感成像过程中的图像降质严重影响了高分辨率成像与高精度探测, 为了改善遥感图像质量, 提出了基于正则化约束的遥感图像多尺度去模糊方法。方法 首先利用双边滤波器和冲击滤波对遥感图像进行预处理, 然后结合遥感图像模糊核的稀疏特性, 使用正则化方法迭代求解模糊核最优解, 最后利用基于梯度稀疏的非盲反卷积方法得到去模糊结果。此外, 针对图像模糊程度较严重的情况, 分析了尺度信息对去模糊结果的影响, 提出了多尺度迭代优化方法。结果 采用本文方法对大量遥感图像进行去模糊, 实验结果表明该方法能有效地去除遥感成像产生的模糊, 在保持图像边缘和细节的同时, 可有效抑制振铃效应。相比其他方法, 本文方法恢复图像的边缘强度平均提高 28.7%, 对比度平均提高 17.6%。结论 提出一种正则化约束的遥感图像多尺度去模糊方法, 主观视觉感受和客观评价指标都表明该方法可以有效提升遥感图像质量。

关键词: 遥感图像; 去模糊; 正则化; 模糊核; 多尺度

Remote sensing image multi-scale deblurring based on regularization constraint

Tan Haipeng, Zeng Xuanjie, Niu Sijie, Chen Qiang, Sun Quansen

School of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

Abstract: **Objective** Image degradation during remote photography severely affects high-resolution imaging and high-accuracy detection. To improve the quality of remote sensing images, a multi-scale image deblurring method for remote sensing via regularization constraints is proposed in this paper. **Method** At the beginning of deblurring, bilateral and shock filters are used to handle blurred images. Subsequently, a variational Bayesian iterative model is applied to determine the optimal solution by considering prior knowledge of the sparsity feature of the blur kernel. Finally, the deblurring result can be obtained by non-blind deconvolution based on gradient sparsity. In addition, the effect of scale information on the deblurring result is studied for the case of a serious blur, and a multi-scale iterative method is proposed. **Result** Our algorithm is implemented for deblurring numerous remote sensing images. Experimental results show that the proposed method can effectively remove fuzzy sections, maintain edges, and recover details of blurred images. Other methods are compared with the proposed algorithm. Indices such as entropy, contrast ratio (CR), edge strength level (ESL), and HSV (hue, saturation, value) model are used in the objective evaluation. The ESL average of the images increases by 28.7%, where as the CR average increases by 17.6% after using our method. **Conclusion** Subjective visual experience and objective evaluation

收稿日期: 2014-08-20; 修回日期: 2014-12-02

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金项目(30920140111004); 中国航天科技集团公司航天科技创新基金项目(CASC05131418); 国防 973(61321001)

第一作者简介: 谭海鹏(1990—), 男, 现为南京理工大学计算机应用技术专业硕士研究生, 主要研究方向为图像处理与计算机视觉。

E-mail: tan_haipeng@126.com

通信作者: 陈强, 副教授, E-mail: chen2qiang@njut.edu.cn

Supported by: Fundamental Research Funds for the Central Universities (30920140111004)

indices show that the proposed method can effectively improve the quality of remote sensing images.

Key words: remote sensing image; deblurring; regularization; blur kernel; multi-scale

0 引言

在光学遥感探测中,成像传感器中受到平台抖动、大气扰动、相机离焦、系统噪声等因素的影响,这些因素造成遥感图像的模糊和形变,严重影响了高分辨率成像与高精度探测。为了能够正确地识别地物特征,消除外界对遥感图像的影响,遥感图像去模糊研究变得尤为重要。

目前空间相机去模糊方法分为两类:一类为硬件实时探测加硬件实时补偿,另一类为硬件实时探测加事后数字图像处理^[1-2]。硬件补偿方案存在着质量、成本、功耗等多方面的制约,而且无法克服补偿带宽有限的技术瓶颈,而利用数字图像处理技术恢复模糊图像成为遥感领域的一个研究热点^[2]。第二类方法中事后处理所使用的模糊图像恢复技术大多属于盲反卷积方法,即在模糊核未知的情况下,仅利用观察到的降质图像来对模糊核进行准确的估计,同时复原出原始的清晰图像。实际上由于模糊核具有高度的不确定性,无法事先进行精确估计,因此准确估计模糊核是图像去模糊算法的关键。传统去模糊算法有逆滤波、维纳滤波、R-L(Richardson-Lucy)^[3-4]等方法,这些方法对噪声及模糊核的扰动较为敏感,恢复过程中会出现噪声放大和振铃效应。为了克服逆问题求解的病态性,出现了基于偏微分方程和正则化的去模糊方法^[5]。后来,许多研究者在基于正则化理论的图像去模糊方法上做了大量研究,并提出一系列改进方法,如Yuan等人^[6]使用双边滤波方法对原始图像噪声进行预处理,减少恢复过程中的噪声干扰;Joshi等人^[7]指出图像边缘结构对模糊核的估计至关重要,提出使用冲击滤波恢复图像的强边缘,提高了模糊核估计的准确性。随着各种理论发展,人们开始关注具有复杂运动的较大模糊问题,其中,基于稀疏先验知识和多尺度表示框架的方法受到人们的重视。Levin等人^[8-9]提出基于图像梯度稀疏先验约束的反卷积方法,在模糊核已知的情况下,该算法能够恢复出非常理想的效果,并有效地抑制了振铃效应;Fergus等人^[10-11]利用自然图像梯度的统

计特性和变分贝叶斯估计方法,使用零均值混合高斯模型、连续分段函数来逼近自然图像的重拖尾分布特性;Xu等人^[12]提出了一种 L_0 的稀疏表示方法来实现模糊图像的盲复原,该方法主要是利用图像中幅值较大的边缘来实现对模糊核的估计的;Cho等人^[13]则采用多尺度方法对模糊核和图像进行估计,该方法对较大模糊图像去模糊效果尤为明显;Lin等人^[14]在Cho等人^[13]所提方法基础上,提出使用方向滤波器来处理图像去模糊过程中的噪声,并指出普通滤波器在处理噪声的同时会对模糊核进行滤波,该方法进一步改善模糊核估计质量。

在空间光学遥感成像模型中,与成像质量及图像复原密切相关的参量为模糊核和噪声,目前常用点光源响应、阶跃边缘响应、矩形脉冲响应^[2]来估计模糊核,这些传统方法都需要依赖地面靶标或建筑物等提供的先验信息。一些学者^[15]对遥感图像非盲反卷积去模糊展开研究,用高斯模型初始光学成像的模糊核,通过对该模糊核一次处理得出校正后的模糊核,但实际成像过程中真实的模糊核通常与校正后模糊核不符,还需根据遥感图像上靶标的成像情况来计算模糊核。针对传统的遥感图像去模糊成本高、靶标区域提取不便及单次运算而得的模糊核精度低等不足,本文提出一种正则化约束的遥感图像的多尺度去模糊方法,该方法多次迭代运算得到精度由低到高的模糊核。大量的实验结果表明,本文方法具有较强的鲁棒性和自适应性,且最终恢复图像清晰。

1 算法概述

一幅清晰图像的退化过程模型为

$$B = L * K + N \quad (1)$$

式中, B 表示模糊图像; L 表示清晰图像; K 是模糊核,又称点扩散函数(PSF); N 表示图像采集过程中引入的随机噪声。遥感图像去模糊的目标是从模糊图像 B 中估计出模糊核 K 和清晰图像 L ,这是一个严重的病态问题,本文在多尺度框架下采

用迭代优化的方法由粗到精得到最终解。算法流程如图1所示,首先建立模糊图像的金字塔层次模型,然后从最低层开始迭代,反复计算该层模糊

核和清晰图像直到满足迭代条件为止;接下来通过清晰图像上采样过渡到上层再次迭代,最终得到复原图像。

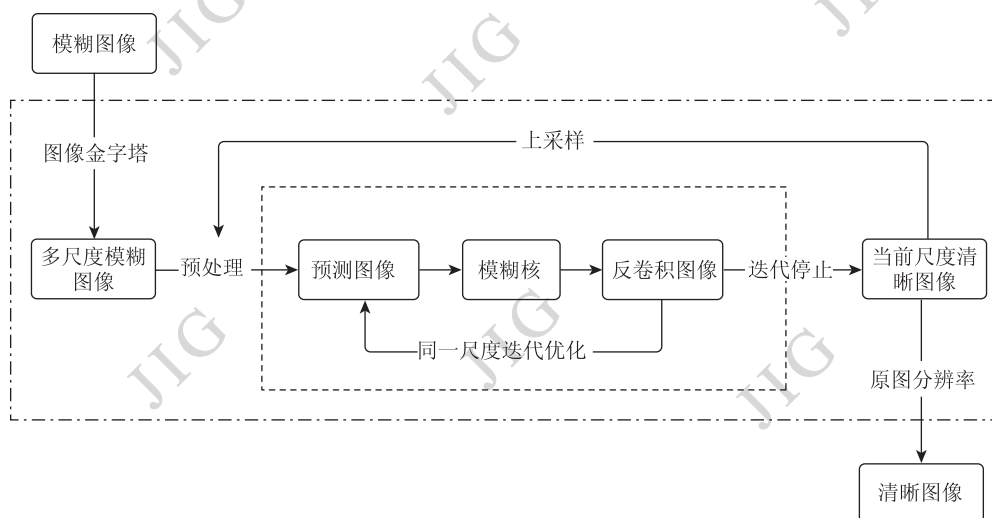


图1 本文算法流程图

Fig. 1 Flowchart of our algorithm

2 遥感图像盲去模糊

2.1 遥感图像预处理

在PSF未知的情况下,遥感图像去模糊问题转变为反盲卷积问题,其关键是计算出准确的PSF,之后再进行反非盲卷积。Joshi等人^[7]指出图像的显著边缘对于PSF的计算非常重要,图像中的平坦部分并不能影响PSF的估算。所以在每一次迭代计算PSF开始时,预测相对应清晰图像(上步迭代结果)的强边缘。由于冲击滤波器^[16]能够增强图像的边缘特征,使用该滤波器增强上一次迭代恢复的清晰图像的边缘。又因为冲击滤波器不仅增强了遥感图像的边缘特征,也增大了图像的噪声,因此需要在使用冲击滤波器前使用双边滤波器^[17]去除图像的纹理和噪声,这样可以获得可靠的清晰图像强边缘,并利用其计算PSF。

普通的时空域的低通滤波器,在像素空间完成滤波以后导致图像的边缘部分模糊,图像边缘细节丢失。双边滤波器(bilateral filter)是一种可以在保持图像边缘的前提下平滑图像的非线性滤波器,可以有效地去除图像的噪声和细纹理。双边滤波器中,输出的像素值依赖于邻域像素的值

的加权组合,即

$$g(i,j) = \frac{\sum_{k,l} f(k,l) \omega(i,j,k,l)}{\sum_{k,l} \omega(i,j,k,l)} \quad (2)$$

式中, $g(i,j)$ 表示双边滤波输出值, $f(k,l)$ 表示 (i,j) 邻域像素值, $\omega(i,j,k,l)$ 表示像素值 $f(k,l)$ 的权重系数。权重系数 $\omega(i,j,k,l)$ 取决于定义域和值域核的乘积,即

$$\omega(i,j,k,l) = d(i,j,k,l) \times r(i,j,k,l) \quad (3)$$

式中

$$d(i,j,k,l) = e^{-\frac{(i-k)^2 + (j-l)^2}{2\sigma_d^2}} \quad (4)$$

$$r(i,j,k,l) = e^{-\frac{\|f(i,j) - f(k,l)\|^2}{2\sigma_r^2}} \quad (5)$$

冲击滤波器是一种可以显著的增强图像特征的滤波器,它可以从模糊的阶跃信号中恢复强边缘,本文是用它来增强清晰图像 L 的强边缘,冲击滤波通常表示如下

$$I_{t+1} = I_t - \text{sgn}(\Delta I_t) \parallel \nabla I_t \parallel dt \quad (6)$$

式中, I_t 为当前时刻的图像, I_{t+1} 为下一时刻的图像, ΔI_t 和 ∇I_t 分别为 I_t 的拉普拉斯算子和梯度。

2.2 模糊核估计

令 B, L, K 分别为模糊图像、清晰图像、模糊核的矩阵表示,对模糊核和清晰图像进行正则化约束的代价函数为

$$K' = \arg \min_K \{ \|B - L * K\| + \vartheta \cdot \rho_K(K) \} \quad (7)$$

$$L' = \arg \min_L \{ \|B - L * K\| + \beta \cdot \rho_L(L) \} \quad (8)$$

式中,迭代方程第1项 $\|B - L * K\|$ 是保真项,它保证方程解符合原问题的物理要求,一般用 L_2 范数计算;第2项 $\vartheta \cdot \rho_L(L)$ 和 $\beta \cdot \rho_K(K)$ 是正则化项(或约束项),利用先验知识对清晰图像 L 和模糊核 K 进行约束,解决解的不适定性; ϑ 和 β 为正则化参数,用于权衡保真项和约束项之间的比重。

遥感图像的退化过程相比自然图像更加复杂,卫星姿态、相机焦距、大气等多种因素都会导致传感器采集的图像降质,精确地为模糊核 K 建模是非常困难的,因此本文使用高斯模型来对 PSF 的稀疏性进行约束,即假设

$$p(K) = \prod_{(x,y)} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_K}} e^{-\frac{K^2(x,y)}{2\sigma_K^2}} \quad (9)$$

对式(9)两边取负对数,得到 PSF 的能量约束函数,即

$$E(K) = -\log(p(K)) \propto \sum_{(x,y)} \|K(x,y)\|_2 = \|K\|_2 \quad (10)$$

所以由式(7)(10)可以得到关于模糊核 K 的迭代方程

$$K' = \arg \min_K \{ \|B - L * K\|_2^2 + \alpha \cdot \|K\|_2 \} \quad (11)$$

式中, $\|\cdot\|_2$ 为 L_2 范数, α 为正实数约束系数,其值越大,表示对 K 的平滑作用越强。对于式(11)可以用多种迭代法求解 K ,如 Landweber 迭代、最速下降法、共轭梯度法(CG)等,由于共轭梯度法计算简单,收敛较快,且通常能够得到较好的结果,本文选用共轭梯度法求解。

2.3 基于梯度稀疏分布的反卷积

在 PSF 已知的情况下,恢复清晰图像的问题转换为非盲去模糊问题。目前存在一些传统的非盲去模糊方法,如维纳滤波, Richardson-Lucy^[3,4] 等方法,这几类方法虽然简单,但对 PSF 精确程度非常敏感、参数调节困难、恢复出来的图像带有比较明显的噪声和振铃效应。在图像恢复研究中,图像的一些统计特征作为重要的先验知识,对恢复图像特征起着非常重要的作用,上面几种反卷积方法没有对自然图像特征进行很好地约束,所以恢复出来的图像

失真比较严重。

许多研究表明,图像的梯度服从一种大尾巴分布^[10-11],即自然图像具有很强的局部连续性,即图像中的一个像素和其周围的像素往往差别不大,只有图像的边缘才会有较大的跳跃,遥感图像的这种特征可以用其梯度的统计数据来描述,即一幅遥感图像的梯度值大部分为零或接近于零,梯度值接近于零的概率大,远离零的概率小。

图像梯度稀疏先验约束的思想是,用所期望的图像梯度特征(遥感图像的稀疏分布)来约束式(8)中的代价函数,符合约束的解能够使代价函数值更小,迭代更接近于最优解;而违背约束的解使得代价函数更大,也就是不符合期望的解。本文使用 Levin 等人^[8]提出的梯度稀疏约束的反卷积方法进行清晰图像的计算。

令式(8)中正则化项为

$$\rho_L(L) = \|\nabla L\|^{0.8} \quad (12)$$

所以由式(8)(12)得到关于清晰图像 L 迭代方程

$$L' = \arg \min_L \{ \|B - L * K\|_2 + \beta \cdot \|\nabla L\|^{0.8} \} \quad (13)$$

式中, $\|\nabla L\|^{0.8} = \sum_{(x,y)} |\nabla L(x,y)|^{0.8}$, β 为正实数约束系数,其值越大,表示对梯度的平滑作用越强。结合式(11)(13),将模糊图像 B 、经过双边滤波和冲击滤波处理的模糊图像(初始清晰图像 L)作为算法的输入参数,交替最小化迭代计算可以得到恢复图像。

2.4 多尺度迭代优化

当遥感图像模糊尺度较大时,原有的双边滤波和冲击滤波不能预测潜在清晰图像的强边缘,而强边缘是估计模糊核的关键,此时估算的模糊核往往与真实值存在较大误差,因此常规的迭代算法很难恢复出理想的清晰图像。Cho 等人^[13]提出模糊图像的多尺度复原方法步骤如下:1)建立模糊图像的金字塔模型,如图2(a)倒三角所示。通过对模糊图像降采样得到金字塔的每层, B_0 代表金字塔最高层, B_4 代表金字塔最低层。由于金字塔低层的图像相比原图像分辨率降低,其对应的模糊程度相应收缩,从而更容易预测对应尺度清晰图像强边缘。2)使用上文方法计算最低层 B_4 尺度上的最优模糊核 K_4 。3)低层模糊核上采样得到高层尺度初

始模糊核(除 B_4 层)。4)使用上文方法迭代该尺度模糊核。5)重复步骤3)4)计算出 $B_3 - B_0$ 尺度的最优模糊核 $K_3 - K_0$ 。6) B_0 层反卷积得到最终清晰图像。多尺度迭代算法利用了逐步逼近的思想,初始模糊程度较大时,试图一次性求解模糊核往往失败,将模糊图像降采样之后模糊程度相应收缩,求解的模糊核准确性大大增大。

对 Cho 等人^[13]方法进行了改进,上文中原方法金字塔低层向高层过渡是通过低层模糊核上采样为高层模糊核初始值进行的,如图 2(a)所示。本文将低层计算的清晰图像上采样为上一层的初始清晰图像,再迭代运算该层上的最终清晰图像,层间过渡是通过低层清晰图像上采样为高层初始清晰图像进行的,如图 2(b)所示。对比图 2(a)(b)可以看到两种方法的本质区别在于层间过渡方式不同,由于采样操作使得图像质量受到影响,而迭代算法对模糊核的扰动相当敏感,对模糊核的采样对最终恢复结果

影响更大,因此本文选择对低层的清晰图像进行上采样运算,这样影响更小。

改进后算法实现细节:假设 B 表示模糊图像,图像大小为 $[M, N]$,建立图像 B 的图像金字塔 $\{B_0, B_1, B_2, B_3, B_4\}$,其中 B_0 为原始分辨率 $[M, N]$,即 $B_0 = B$ 。 $B_1 - B_4$ 为通过对 B 采用双线性插值下采样的结果,图像分辨率依次为 $[0.8 \times M, 0.8 \times N]$ 、 $[0.6 \times M, 0.6 \times N]$ 、 $[0.4 \times M, 0.4 \times N]$ 、 $[0.2 \times M, 0.2 \times N]$ 。然后每层迭代求解清晰图像,最终会依次得到分辨率由低到高的清晰图像序列 $\{L_4, L_3, L_2, L_1, L_0\}$, L_0 就是最终去模糊结果。本文使用预先设置的迭代次数 ($It = 5$) 作为金字塔每层迭代终止条件,另外也可以设置前后两次模糊核差量小于预设值时终止,例如 $\|K_i - K_{i+1}\|_2 \leq T_0$ 时停止迭代,或者是清晰图像某个评价指标(如边缘强度 ESL)大于预设值时终止,例如 $ESL(L_i) \geq E_0$ 时停止迭代。

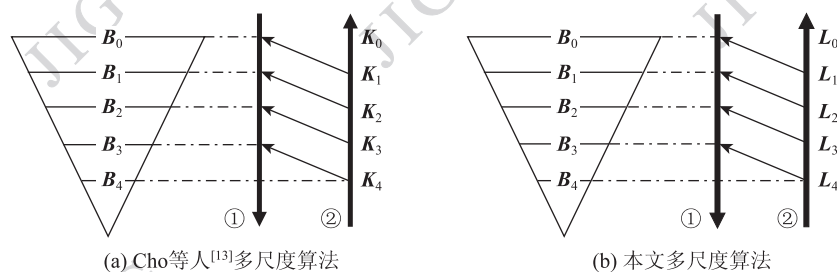


图 2 多尺度迭代算法

Fig. 2 Multi-scale iterative algorithm

3 实验与分析

3.1 实验对比

实验测试图像来自高分一号卫星、资源三号卫星拍摄的真实图像。实验对比了维纳滤波复原方法、Li 等人^[15]提出的 SSR (scalable sample rate) 遥感图像去模糊方法、本文提出的基于正则化约束的多尺度盲去模糊方法。图 3—图 5 为 3 组实验对比,图 3(a)为分辨率 500×500 像素的高分一号卫星图像,图 4(a)为分辨率 700×700 像素的资源三号卫星图像,图 5(a)为分辨率 800×800 像素的资源三号卫星图像。

由于遥感图像较大,为了进一步观察恢复图像

的细节部分,实验结果展示了特征区域的细节图。从细节图可以看出,本文算法算法总体恢复效果最好,细节部分清晰。例如,对比图 3(f)(g)(h),本文算法恢复结果各区域轮廓清晰,纹理细腻。对比图 5(f)(g)(h),本文算法对比度明显,但仔细观察发现区域目标轮廓出现了锯齿效应,其他两种算法也出现了不同程度的锯齿效应。具体原因是,一方面是原图目标轮廓已存在少量锯齿结构,另一方面原图经算法处理后增强了这种负面效应。

3.2 图像质量评价

虽然本文算法处理结果主观视觉上更清晰、对比度明显,由于人类视觉极限,一些细微的差别人眼并不能察觉,所以使用一些参数^[18-20]来比较使用不同去模糊算法复原图像的质量。

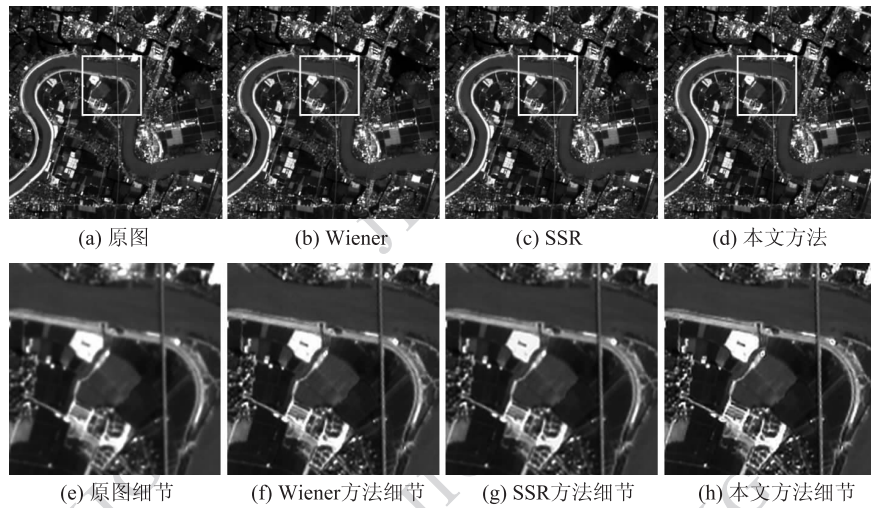


图 3 高分一号卫星图像(500 × 500)实验对比

Fig. 3 The restoration comparison for a GF-1 satellite image (500 × 500)

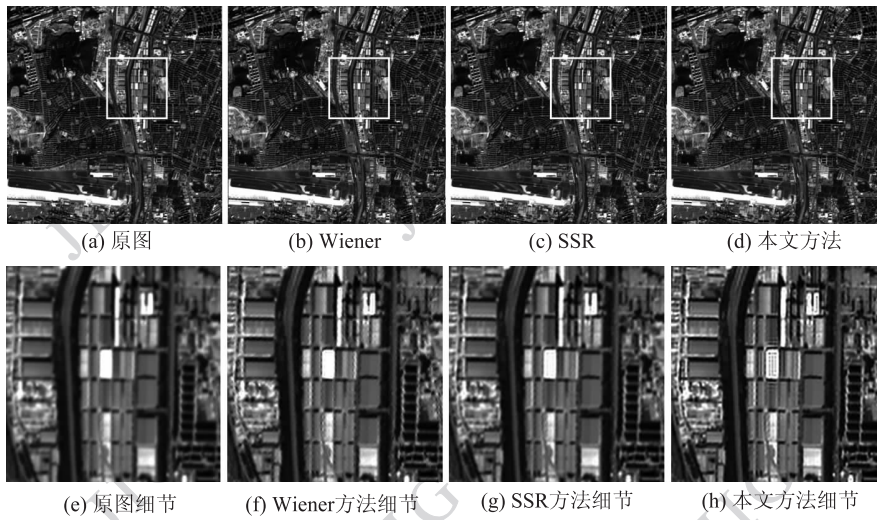


图 4 资源三号卫星图像(700 × 700)实验对比

Fig. 4 The restoration comparison for a ZY-3 satellite image(700 × 700)

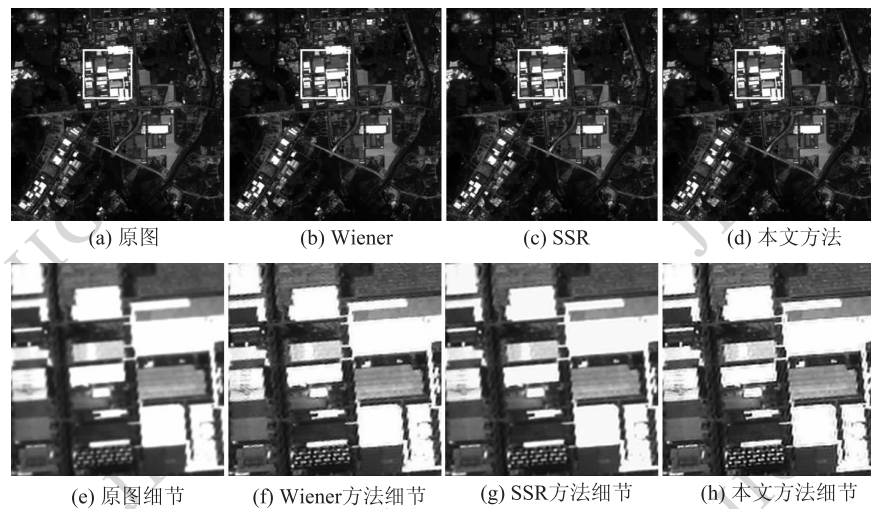


图 5 资源三号卫星图像(800 × 800)实验对比

Fig. 5 The restoration comparison for a ZY-3 satellite image (800 × 800)

3.2.1 图像信息熵

信息熵的大小反映了图像携带的信息量的多少。通常情况下,图像的信息熵越大,其信息量就越丰富,质量也就越好。

$$E(p) = - \sum_{i=0}^{255} p_i \cdot \log p_i \tag{14}$$

式中, p_i 表示灰度值为 i 的像素点数占图像总像素点数的比例。

3.2.2 图像对比度

图像对比度是一幅图像中明暗区域最亮的白和最暗的黑之间不同亮度层级的测量,即指一幅图像灰度反差的大小。

$$C = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{(k,l)} [f(i,j) - f(k,l)]^2} \tag{15}$$

式中, $S = 4 \times (m - 2) \times (n - 2) + 3 \times [2 \times (m - 2) + 2 \times (n - 2)] + 4 \times 2$ 表示公式(15)中相减的平方项数, $f(i,j)$ 是像素点 (i,j) 的灰度值, $f(k,l)$ 是像素点 (i,j) 四邻域灰度值。

3.2.3 图像边缘强度

遥感图像中一些微小目标常常和其他目标模糊混叠在一起,这使得许多重要的纹理信息被削弱或隐藏。遥感图像去模糊需要增强微小目标的细节信息。因此,边缘强度(ESL)可以用来定量分析各种去模糊算法边缘复原效果。

$$ESL = \sqrt{\frac{\sum_{edge} \nabla g_{i,j}}{N_{edge}}} \tag{16}$$

式中, $g_{i,j}$ 表示边缘点, N_{edge} 表示边缘区域的像素个数,本文使用 Canny 算子进行边缘检测。边缘强度越大,图像边缘越清晰,细节更丰富。

3.2.4 基于 HSV 模型的评价方法

上面几种评价参数操作简单、计算量小,但只是简单的计算统计意义上的像素分布,计算结果有时与人眼的视觉系统感知通常不一致,而基于人眼视觉(HVS)模型的评价方法^[20]可以从人眼的实际感知角度出发来评价图像效果。设 f 为原始图像, g 为复原图像,定义恢复前后两幅图像对比值为

$$\eta = 2\sigma_f \cdot \sigma_g / (\sigma_f^2 + \sigma_g^2) \tag{17}$$

式中, σ_f 和 σ_g 分别为 f 和 g 的对比度估计,使用式(15)给出的计算方法。 η 取值范围是(0.5,1),数值越小说明恢复图像与模糊图像差距越大,一定范围内恢复效果越好。

3.2.5 实验数据

选取 8 组实验结果进行定量分析,对应图像大小分别是 500×500 、 800×800 、 $2\,000 \times 2\,000$ 、 600×600 、 $2\,000 \times 2\,000$ 、 700×700 、 500×500 、 700×700 。表 1—表 4 列出了具体评价参数。

表 1 信息熵对比

Table 1 Comparison of entropy

方法	sample1	sample2	sample3	sample4	sample5	sample6	sample7	sample8	平均
Wiener	7.396 9	7.204 2	7.328 9	7.282 0	7.420 3	7.535 3	7.717 3	7.708 9	7.449 2
SSR	7.403 1	7.203 5	7.328 2	7.257 6	7.414 3	7.535 2	7.732 9	7.712 1	7.448 4
本文	7.372 8	7.200 2	7.362 8	7.323 5	7.437 0	7.521 4	7.740 3	7.697 2	7.456 9

表 2 对比度对比

Table 2 Comparison of contrast

方法	sample1	sample2	sample3	sample4	sample5	sample6	sample7	sample8	平均
Wiener	27.321 8	20.904 5	13.977 5	14.136 5	16.700 3	23.854 3	27.681 4	18.133 4	20.338 7
SSR	23.660 3	15.863 8	11.178 6	11.223 2	15.009 7	22.200 2	25.202 8	16.355 4	17.586 7
本文	33.302 0	22.488 0	15.565 0	15.290 2	23.131 1	34.865 0	40.276 2	24.485 7	26.175 4

表3 边缘强度对比

Table 3 Comparison of ESL

方法	sample1	sample2	sample3	sample4	sample5	sample6	sample7	sample8	平均
Wiener	49.545 3	35.402 2	26.480 6	22.390 3	30.100 1	39.141 0	41.463 0	35.847 7	35.046 3
SSR	47.082 6	31.590 3	24.660 9	21.629 2	28.781 9	37.483 7	39.354 8	34.062 3	33.080 7
本文	54.558 4	37.719 4	29.837 1	27.761 2	36.491 9	49.133 3	51.833 3	42.263 1	41.199 7

表4 HVS 对比

Table 4 Comparison of HSV index

方法	sample1	sample2	sample3	sample4	sample5	sample6	sample7	sample8	平均
Wiener	0.939 8	0.872 3	0.931 5	0.911 9	0.956 2	0.974 2	0.960 0	0.956 2	0.937 8
SSR	0.977 9	0.967 4	0.987 7	0.979 3	0.981 3	0.987 7	0.981 5	0.980 7	0.980 4
本文	0.864 0	0.840 0	0.891 4	0.880 8	0.831 1	0.839 3	0.814 6	0.842 7	0.850 5

由表1可知,8组实验中,本文方法有4组信息熵高于其他两种去模糊方法,并且信息熵均值本文方法最高,由此说明本文方法总体上能够提高恢复图像质量,以及图像的信息量;表2和表3中,本文方法计算参数均优于其他两种方法,说明本文方法在退化图像边缘恢复及视觉体验上比另外两种方法更有效;表4中,8组HSV对比实验,本文方法计算值最小,说明恢复图像与模糊图像差距越大,一定范围内恢复效果越好。

4 结 论

为了解决遥感图像成像过程中造成图像的模糊和变形,本文提出一种基于正则化约束的遥感图像多尺度去模糊方法。主要步骤包括遥感图像预处理,模糊核估算,模糊图像反卷积。首先建立遥感图像的金字塔模型,从低尺度遥感图像中估算出模糊核后,使用基于梯度稀疏先验的反卷积方法,得到当前去模糊图像,接下来在高尺度上重复“预处理—模糊核估计—反卷积”迭代计算,最终得到遥感图像去模糊结果。对实际遥感图像进行大量的实验,得到的去模糊后的图像不仅主观上具有较好的视觉效果,而且大部分定量参数优于其他去模糊方法,能有效改善空间光学遥感图像的质量。由于部分实验结果存在锯齿效应,目前消除恢复图像边缘的振铃效应仍是当前去模糊领域的研究难点和热点,接下来将针对这个问题进一步研究。

参考文献(References)

- [1] Li Q, Dong W D, Xu Z H, et al. Motion blur suppression method based on dual mode imaging for remote sensing image[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2013, 34(4):86-92. [李奇,董文德,徐之海,等.一种基于双模式成像的遥感图像去运动模糊方法[J].航天返回与遥感,2013,34(4):86-92.][DOI:10.3969/j.issn.1009-8518.2013.04.012]
- [2] Xu H P, Fu W X, Ma J, et al. Vibration blur restoration method of remote sensing image[J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech: Natural Science Edition, 2013, 42(3):28-32. [徐沪萍,付文兴,马杰,等.一种遥感图像振动模糊复原方法[J].华中科技大学学报:自然科学版,2014,42(3):28-32.][DOI:10.13245/j.hust.140307]
- [3] Richardson W H. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. Journal of the Optical Society of America, 1972, 62(1):55-59. [DOI:10.1364/JOSA.62.000055]
- [4] Lucy L B. An iterative technique for the rectification of observed distributions[J]. The Astronomical Journal, 1974, 79(6):745-754. [DOI:10.1086/111605]
- [5] Tikhonov A N, Arsenin V Y. Solutions of Ill-posed Problems[M]. Washington, DC: Winston, 1977:240-242.
- [6] Yuan L, Sun J, Quan L, et al. Progressive inter-scale and intra-scale non-blind image deconvolution[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3), 74:1-10. [DOI:10.1145/1399504.1360673]
- [7] Joshi N, Szeliski R, Kriegman D. PSF estimation using sharp edge prediction[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage, AK: IEEE, 2008:1-8. [DOI:10.1109/CVPR.2008.4587834]
- [8] Levin A, Fergus R, Durand F, et al. Image and depth from a

- conventional camera with a coded aperture[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 1-9. [DOI: 10.1145/1239451.1239521]
- [9] Liu W H, Mei L, Cai X. Regularized image restoration algorithm on sparse gradient prior model[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17(12): 1485-1491. [刘伟豪, 梅林, 蔡烜. 稀疏梯度先验模型的正则化图像复原[J]. *中国图象图形学报*, 2012, 17(12): 1485-1491.] [DOI: 10.11834/jig.20121204]
- [10] Fergus R, Singh B, Hertzmann A, et al. Removing camera shake from a single photograph[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 787-794. [DOI: 10.1145/1141911.1141956]
- [11] Shan Q, Jia J, Agarwala A. High-quality motion deblurring from a single image [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 1-10. [DOI: 10.1145/1360612.1360672]
- [12] Xu L, Zheng S C, Jia J. Unnatural L0 sparse representation for natural image deblurring[C]//*Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Portland, OR: IEEE, 2013: 1107-1114. [DOI: 10.1109/CVPR.2013.147]
- [13] Cho S, Lee S. Fast motion deblurring[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(5): 1-8. [DOI: 10.1145/1618452.1618491]
- [14] Lin Z, Cho S, Metaxas D, et al. Handling noise in single image deblurring using directional[C]//*Proceeding of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Portland, OR: IEEE, 2013: 612-619. [DOI: 10.1109/CVPR.2013.85]
- [15] Li Y, Clarke K C. Image deblurring for satellite imagery using small-support-regularized deconvolution [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 85: 148-155. [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.08.002]
- [16] Osher S, Rudin L I. Feature-oriented image enhancement using shock filters[J]. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1990, 27(4): 919-940. [DOI: 10.1137/0727053]
- [17] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images[C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*. Bombay: IEEE, 1998: 839-864. [DOI: 10.1109/ICCV.1998.710815]
- [18] He Z X, Wang M F, Yang S H, et al. Research on objective quality assessment of remote sensing image[J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2011, 6: 47-52. [何中翔, 王明富, 杨世洪, 等. 遥感图像客观质量评价方法研究[J]. *工程图学学报*, 2011, 6: 47-52.] [DOI: 10.3969/j.issn.1003-0158.2011.06.009]
- [19] Shao Y, Sun F C, Li H B. No-reference remote sensing image quality assessment method using visual properties[J]. *J Tsinghua Univ: Sci & Tech*, 2013, 53(4): 550-555. [邵宇, 孙富春, 李洪波. 基于视觉特性的无参考型遥感图像质量评价方法[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2013, 53(4): 550-555.]
- [20] Wang B, Jiang Z G, Zhao D P. Research on technologies and quality evaluation for restoring remote sensing motion-blurred image[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2009, 30(2): 18-25. [王彪, 姜志国, 赵丹培. 遥感图像运动模糊恢复方法及评价标准研究[J]. *航天返回与遥感*, 2009, 30(2): 18-25.] [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2009.02.003]