

基于遥感图像序列的运动去模糊算法研究

刘晨辉^{1,2*}, 尹增山¹, 高爽¹

¹中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 在遥感卫星运动成像过程中, 卫星相机的高速运动会导致遥感图像出现运动模糊。针对该问题, 基于一次拍摄过程中获得的不同积分时间遥感图像序列, 提出了一种新的去模糊算法。利用短积分时间图像中提取出的轮廓边缘信息来引导对相邻长积分时间图像模糊核的估计, 通过分段求解的思想简化了单次模糊核求解的复杂度; 然后使用卷积运算对分段模糊核进行无损重组, 极大地提高了模糊核估计的准确性。实验结果表明, 所提算法对模糊遥感图像去模糊后的清晰程度有显著提升。

关键词 遥感图像; 图像处理; 运动模糊; 模糊核; 去模糊

中图分类号 TN911.73

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0828001

Motion Deblurring Algorithm Using Remote Sensing Image Sequence

Liu Chenhui^{1,2*}, Yin Zengshan¹, Gao Shuang¹

¹Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract When remote sensing satellites capture images during movement, the high-speed motion of the satellite camera causes motion blur in the remote sensing images. To solve this problem, this paper proposes a new deblurring algorithm based on the remote sensing image sequence with different integration time obtained in one shooting process. This algorithm used contour edge information extracted from short integration time images to guide the estimation of the blurred kernel of the adjacent long integration time images. Furthermore, the algorithm simplified the complexity of the single blurred kernel estimation through the idea of segmented solution. Additionally, the algorithm used the convolution operation to reconstruct the segmented blurred kernel, which greatly improved the accuracy of the blurred kernel estimation. Experimental results show that the proposed algorithm effectively improves the accuracy of blurred kernel estimation and significantly improves the clarity of blurred remote sensing images after deblurring.

Key words remote sensing image; image processing; motion blur; blurred kernel; deblurring

1 引言

遥感卫星进行地面观测任务时, 其观测模式会对观测效能产生直接影响。传统遥感卫星的观测要求是卫星机动到位、姿态调整稳定后能成像, 无

法在卫星机动过程中成像, 导致卫星在机动到位、姿态调整期间常常会错过任务目标的最佳观测窗口, 无法及时掌握目标的短时特征变化信息^[1]。未来, 为应对突发自然灾害、军事侦察、海洋维权等应急任务, 遥感卫星短时感知响应的需求将进一步提

收稿日期: 2021-03-02; 修回日期: 2021-04-16; 录用日期: 2021-04-30

基金项目: 中国科学院国防科技创新重点部署项目(KGFZD-135-20-03)

通信作者: *lch6494@163.com

高,促使遥感卫星观测模式向超敏捷动中成像发展^[2]。遥感相机的高信噪比成像要求是保证一定的积分(曝光)时间。但是在遥感卫星相机积分时间不变的情况下,动中成像观测模式所得到的遥感图像不可避免地会带有运动模糊^[3]。因此,对遥感图像去模糊算法的研究具有重要意义。

图像去模糊是图像复原领域的一个重要课题。点扩展函数(PSF),也称为模糊核,是对模糊信息的一种量化,用以指导模糊图像的复原过程。根据模糊图像的点扩展函数是否已知,通常将模糊图像复原分为两类:非盲图像复原和盲图像复原^[4]。

非盲图像复原的模糊核在初始条件下是已知的。经典的非盲图像复原有维纳滤波^[5]、约束最小二乘方滤波^[6]、Richardson-Lucy(RL)去卷积^[7]等,然而使用这些算法进行模糊图像复原时,会由于图像中高频信息的丢失而产生振铃效应。Levin等^[8]通过向去卷积算法中加入稀疏性先验约束来缓解振铃现象。Donatelli等^[9]通过增添边界条件限制和重模糊步骤对振铃现象进行抑制。盲图像复原的模糊核信息是缺失的,由于缺乏先验知识的引导,盲图像复原会更加困难。Fergus等^[10]研究发现自然图像梯度符合某一特定的概率密度分布,以此作为先验信息引导模糊核的估计。Yuan等^[11]利用运动模糊图像对应的短曝光高噪声图像作为先验信息进行模糊核估计,是一种经典的多图去模糊方法。可以发现,盲图像复原研究的一个侧重点是通过引入新的先验信息来引导模糊核的估计,进而把问题转换为非盲图像复原。

为了进一步解决遥感卫星动中成像观测中出现的图像运动模糊问题,本研究在Yuan等^[11]和张广

明等^[12]工作的基础上,根据遥感相机积分时间可调的特点,通过在一次拍摄过程中的不同积分(曝光)时间点上成像,得到积分时间不同的模糊遥感图像序列;并基于该图像序列提出了一种新的去模糊方法。所提方法通过对相邻积分时间图像间模糊核的分段求解简化了单次模糊核求解的复杂度,对分段求得的模糊核进行卷积重组后,使用带增益控制的残差RL算法进行去卷积运算,得到清晰图像。实验结果表明,所提方法对图像去模糊后的清晰程度有显著提升。

2 去模糊算法

2.1 去模糊算法模型

遥感卫星动中成像观测模式中,相机运动生成带运动模糊图像的过程^[6]可以表示为

$$B = n[(I \otimes K)], \quad (1)$$

式中: B 代表模糊图像; I 代表理想的清晰图像; K 代表模糊核; \otimes 为卷积运算符; n 表示噪声。一般认为模糊图像中的噪声属于加性噪声,以 n_a 表示加性噪声,(1)式也可以写为

$$B = I \otimes K + n_a. \quad (2)$$

由此可以看出,图像去模糊问题的本质是在已知 B 的情况下,求解 I 和 K 的问题。求解过程可以表示为:图像预处理去除噪声,利用模糊图像进行模糊核估计,对模糊核与模糊图像进行去卷积计算,从而恢复原始的清晰图像。

遥感相机可以在一次拍摄的不同积分时间点上进行多次成像,由此能够获得图1所示的模糊遥感图像序列,左上角为模糊图像的模糊核。

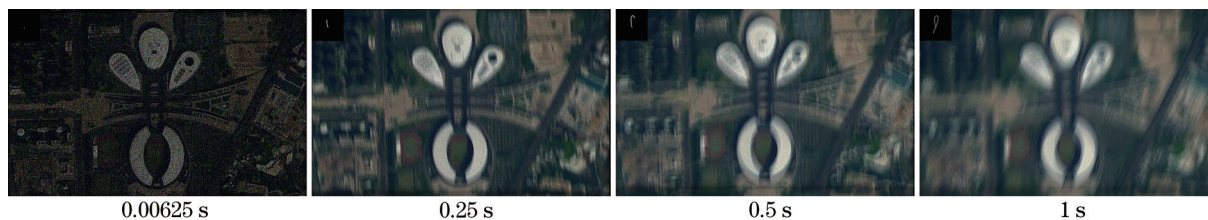


图1 不同积分时间下的遥感图像序列

Fig. 1 Remote sensing image sequences with different integration time

在遥感相机运动成像的过程中,随着积分时间的增加,图像模糊核复杂程度随之提高。通过对比相邻积分时间的两张图片可以发现:相邻短积分时间图像具有信噪比低、模糊程度低的特点,但是包含了图像的细节信息与清晰边缘;而相邻长积分时间图像信噪比高、模糊程度高,包含了更加丰富的图像运动、色彩等信息。所提算法将模糊图像序列

两两分组,利用相邻短积分时间图像中较为清晰的边缘来引导相邻长积分时间图像的模糊核估计,再对分段求解得到的模糊核进行卷积重组,得到该次拍摄的全局模糊核信息。最后利用全局模糊核对模糊图像进行去卷积,得到清晰图片。

基于不同积分时间遥感卫星图像序列的去模糊算法流程如图2所示。

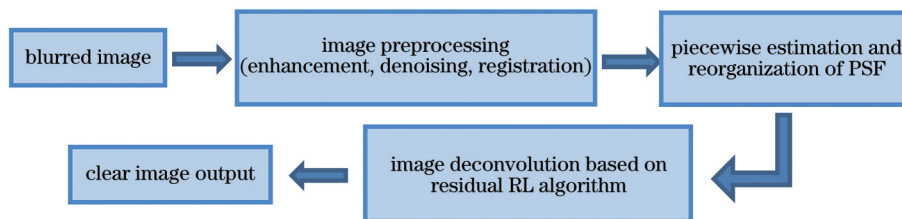


图 2 基于不同积分时间遥感卫星图像序列的去模糊算法流程

Fig. 2 Flow chart of deblurring algorithm based on remote sensing image sequences with different integration time

2.2 图像预处理

在上述图像序列中,部分图像由于具有积分时间过短、亮度低、信噪比低的问题,在图像预处理时需要对其进行图像增强与去噪,以便进行后续处理。

所提算法首先使用一种含对数曲线的灰度变

换函数来对图像对比度进行调整,达到图像增强的效果。但是,图像整体的增强也会带来图像噪声的增强。为了提高图像信噪比,还采用了一种基于均值滤波和小波变换的图像去噪方法^[13]来对增强后的图像进行去噪。图像增强、去噪后的效果对比如图 3 所示。

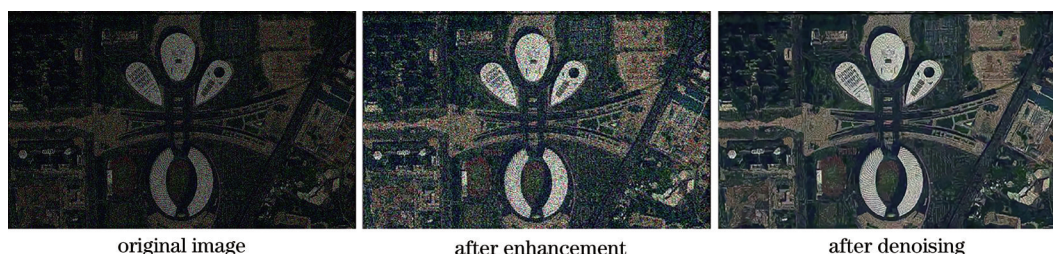


图 3 短积分时间图像增强、去噪后效果对比

Fig. 3 Comparison of short integration time image after enhancement and denoising

此外,由于遥感卫星在运动成像过程中处在高速运动的状态,不同积分时间点成像的图像存在画幅内容不完全匹配的问题,所以还需要对图像序列进行配准。Speeded up robust features(SURF)算法是一种经典而可靠的图像配准算法,它能够精确配准经过亮度变化、视角变化、仿射变换、噪声污染后的图像。使用了一种基于改进 SURF 算子的彩色图像配准算法^[14]对图像序列进行配准,通过求解图像间的投影变换矩阵,可以将图像投影到目标图像的空间坐标下,得到场景坐标完全匹配的图像序列。

2.3 基于不同积分时间图像序列的模糊核估计

所提算法首先将模糊图像序列两两分组,然后进行模糊核的分段估计,利用相邻短积分时间图像中较为清晰的边缘来引导相邻长积分时间图像的模糊核估计,再对分段求解得到的模糊核进行卷积重组,得到该次拍摄的全局模糊核信息。

相比于原始图像,梯度图像中的边缘信息更加清晰,所以利用图像梯度图来引导模糊核的求解。给定图像水平和垂直梯度算子,分别为 $\nabla_x=[1, -1]$ 和 $\nabla_y=[1, -1]^T$,则相邻长积分时间模糊图像 B

和去噪后的相邻短积分时间图像 N_d 的梯度图可表示为 $\nabla B=[\nabla_x B, \nabla_y B]$ 和 $\nabla N_d=[\nabla_x N_d, \nabla_y N_d]$ 。结合(2)式可得:

$$\nabla B = \nabla I \otimes K. \quad (3)$$

由于去噪后的图像 N_d 总体边缘清晰,可以将其视作理想清晰图像 I 的等效替代。通过 $\nabla I = \nabla N_d$ 来对 ∇I 进行初始化,能够将原本的模糊核估计问题转换为已知 ∇B 和 ∇I 的非盲去卷积问题。

(3)式表示梯度图像卷积过程,令 \mathbf{A} 为 ∇I 的矩阵形式, \mathbf{b} 和 \mathbf{k} 分别为 ∇B 和 K 的向量形式,可得(3)式的矩阵-向量形式:

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{k}. \quad (4)$$

接下来使用 Tikhonov 正则化方法^[15]对非盲去卷积问题进行转换。由(4)式可得 Tikhonov 正则化问题中的最小化损失函数:

$$\min_k \|\mathbf{A}\mathbf{k} - \mathbf{b}\|^2 + \lambda^2 \|\mathbf{k}\|^2, \quad k_i \geq 0 \cap \sum k_i = 1, \quad (5)$$

式中: $\|\mathbf{A}\mathbf{k} - \mathbf{b}\|^2$ 为理想清晰图像与算法所得图像之差,该项的缩小代表算法估计图像对清晰图像的逼近; $\lambda^2 \|\mathbf{k}\|^2$ 是一个 L_2 范数的正则项,正则项的存在能够抵抗图像噪声干扰,提高模糊核估计的鲁棒性。

Tikhonov 正则化问题可以使用 Landwber 迭代法^[16]进行求解,求解步骤如下:

- 1) 初始化 $k_0 = \delta$ 为 delta 函数;
- 2) 更新 $k^{n+1} = k^n + \beta [A^T b - (A^T A + \lambda^2 \nabla I) k^n]$;
- 3) 若 $k_i^{n+1} < 0$, 则令 $k_i^{n+1} = 0$;
- 4) 归一化 $k_i^{n+1} = k_i^{n+1} / \sum k_i^{n+1}$ 。

步骤中, β 参数用于控制算法收敛程度, 当两次迭代结果之差小于设定阈值 ϕ 时, 算法停止迭代, 得到模糊图像序列中相邻两幅图像间的模糊核 k_i 。

在由 N 幅不同积分时间模糊图像 B 组成的图像序列中, 第 j 幅图像可以由第 $j-1$ 幅图像与模糊核 k_j 卷积得到:

$$B_j = B_{j-1} \otimes k_j, 0 < j \leq N. \quad (6)$$

因此, 图像序列总体的模糊核 K 可由分段求解得到的模糊核 k_j 卷积重组得到:

$$K = k_1 \otimes k_2 \dots \otimes k_{N-1}. \quad (7)$$

2.4 增益控制残差图像去卷积

在获得模糊核信息 K 后, 需要对模糊核与模糊图像进行去卷积运算, 复原清晰图像 I 。去卷积运算的一个经典算法是 RL 算法, 但直接使用 RL 算法进行去卷积运算时常常会导致结果图像上出现波纹状的振铃效应, 这是运算过程中图像高频信息的丢失导致的。为缓解振铃效应的出现, 根据不同积分时间图像序列的特点, 采用了一种基于残差图像的带增益控制系数的去卷积算法。

通过对相邻短积分时间图像进行增强、去噪后, 得到了含有清晰边缘结构信息的图像 N_d , 但是图像 N_d 由于积分时间短, 且经过了去噪处理, 损失了平滑区域的细节信息。以幅残差图像 ΔI 表示图像 N_d 缺失的图像细节信息, 获得 ΔI 的表达式为

$$\Delta I = I - N_d. \quad (8)$$

由 RL 算法^[17], 可得 ΔI 求解的迭代公式为

$$\Delta I_{n+1} = \left[K * \frac{\Delta B + 1}{(\Delta I_n + 1) \otimes K} \right] \cdot (\Delta I_n + 1) - 1, \quad (9)$$

式中: ΔB 为残差模糊图像, 可由 (2) 式和 (8) 式结合得到; $*$ 表示 RL 算法中相关处理。

振铃效应的出现来源于去卷积运算中图像高频信息的丢失, 而图像高频信息主要集中在图像中锐利的边缘区域, 图像中平滑区域通常很少出现振铃效应。因此, 在反卷积过程中有针对性地对两种区域进行处理会取得更好的效果。

在残差 RL 方法的基础上进一步引入针对边缘区域的增益控制系数 $I_{\text{Gain}} (\leq 1)$, 其大小由图像边缘

占比和 RL 算法权值控制。 I_{Gain} 表示为

$$I_{\text{Gain}} = (1 - \alpha) + \alpha \cdot \sum_i \|\nabla N_d\|, \quad (10)$$

$$\Delta I'_{n+1} = I_{\text{Gain}} \cdot \Delta I_{n+1}, \quad (11)$$

式中: α 为 RL 算法中用于调节迭代影响程度的标量; ∇N_d^l 为去噪图像 N_d 在高斯金字塔第 l 层的梯度分布。 I_{Gain} 在图像边缘处值较大而在平滑区域较小, 通过引入增益控制系数能够更好地抑制 RL 算法去卷积时的振铃效应。

至此, 所提算法完成了对不同积分时间模糊图像序列的预处理、模糊核估计、去卷积等一系列操作, 得到了复原后的清晰图像。

3 实验结果与分析

为了检验所提算法的有效性与泛化能力, 分别引入卫星遥感图像与生活场景图像进行去模糊测试。在对去模糊结果进行评价时, 采用了定性与定量两种评价方式, 其中定量评价包括图像峰值信噪比 (PSNR) 和图像结构相似度 (SSIM) 两种计算指标。此外, 还引入了其他三个先进的去模糊算法进行比较实验: Zhu 等^[18] 使用两张关于同一场景的模糊图像进行模糊核精炼, 得到复原图像; Yuan 等^[11] 使用一组模糊/噪声图像进行去模糊, 二者都属于多图去模糊算法; Zhang 等^[19] 结合了 TV-l2 模型和超拉普拉斯模型的优点, 使用边缘掩码和平滑约束提取图像显著结构进行去模糊, 是一种可靠的单图去模糊算法。为确保对比实验的公平性, 所有实验均在同一软硬件环境下完成, 实验比较的各个算法参数按照原作者论文描述设置, 仅根据实验实际进行微调。此外, 为探究不同的积分时间组合对去模糊效果的影响, 还进行了对于不同积分时间设置的模糊图像序列去模糊结果对比实验。

3.1 去模糊定性评价

图 4~7 为各算法进行图像去模糊的实验结果图, 其中第一行图片为去模糊整体结果, 右上角附上了各算法去模糊过程中得到的模糊核, 第二行图片为去模糊结果图中方框区域的放大。

图 4、5 均为为高景一号卫星所拍摄的遥感图像, 图像大小为 600×375 , 图像经 Boracchi^[20] 等设计的运动模糊/噪声生成模型处理得到, 模糊核尺寸分别为 31×31 , 36×36 , 图像序列积分时间分别为 0.00625, 0.25, 0.5, 1 s。由实验结果可以看出: Zhu 等^[18] 算法对模糊核的估计不够精确, 使得复原图像仍带有部分模糊; Zhang 等^[19] 算法通过提取图

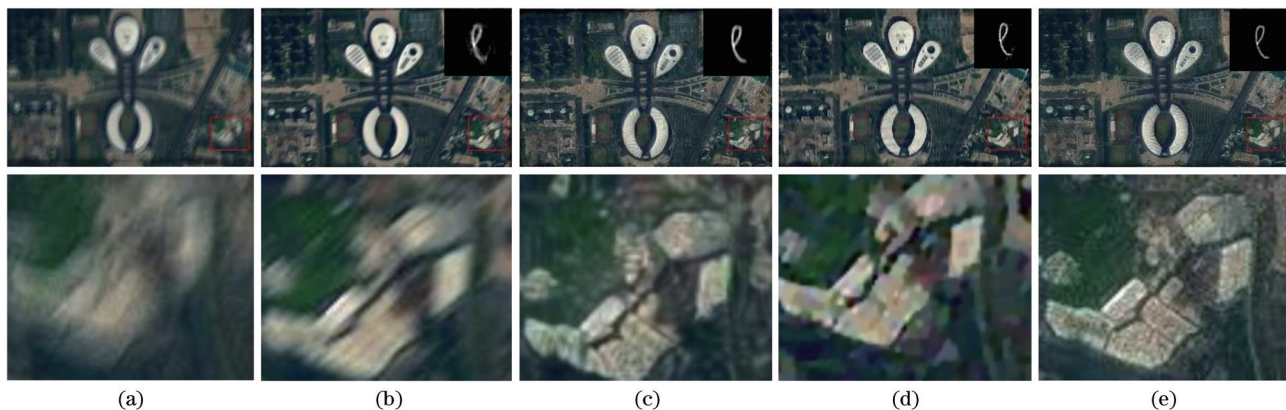


图 4 卫星遥感图像 1 的去模糊结果。(a)原始模糊图像;(b)文献[18]算法;(c)文献[11]算法;(d)文献[19]算法;(e)所提算法
Fig. 4 Deblurring results of satellite remote sensing image 1. (a) Original blurred image; (b) algorithm in Ref. [18]; (c) algorithm in Ref. [11]; (d) algorithm in Ref. [19]; (e) proposed algorithm

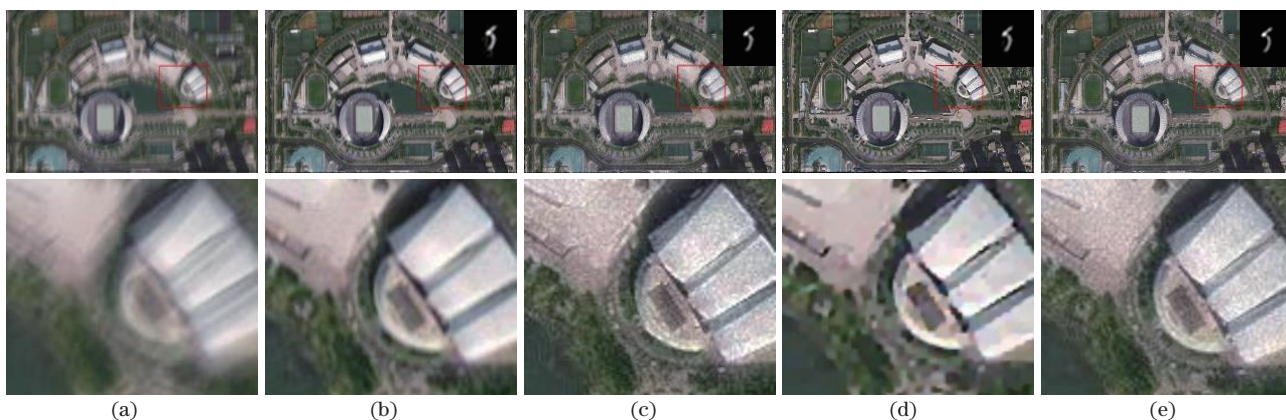


图 5 卫星遥感图像 2 的去模糊结果。(a)原始模糊图像;(b)文献[18]算法;(c)文献[11]算法;(d)文献[19]算法;(e)所提算法
Fig. 5 Deblurring results of satellite remote sensing image 2. (a) Original blurred image; (b) algorithm in Ref. [18]; (c) algorithm in Ref. [11]; (d) algorithm in Ref. [19]; (e) proposed algorithm

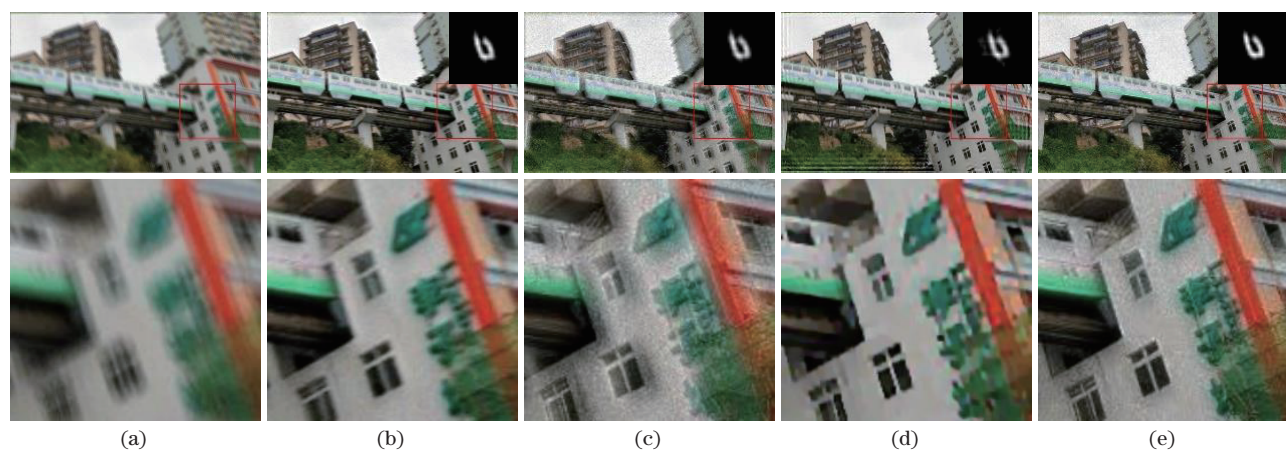


图 6 生活场景图像 1 的去模糊结果。(a)原始模糊图像;(b)文献[18]算法;(c)文献[11]算法;(d)文献[19]算法;(e)所提算法
Fig. 6 Deblurring results of common scene image 1. (a) Original blurred image; (b) algorithm in Ref. [18]; (c) algorithm in Ref. [11]; (d) algorithm in Ref. [19]; (e) proposed algorithm

像显著结构有效复原了图像轮廓,但细节部分不够清晰;Yuan等^[11]算法与所提算法均有效去除了运动模糊,并在一定程度上还原了图像细节,但复原结

果带有图像噪声。综合比较之下,所提算法的去模糊结果图像更加清晰,在对模糊遥感图像去模糊的实验中表现更加优秀。

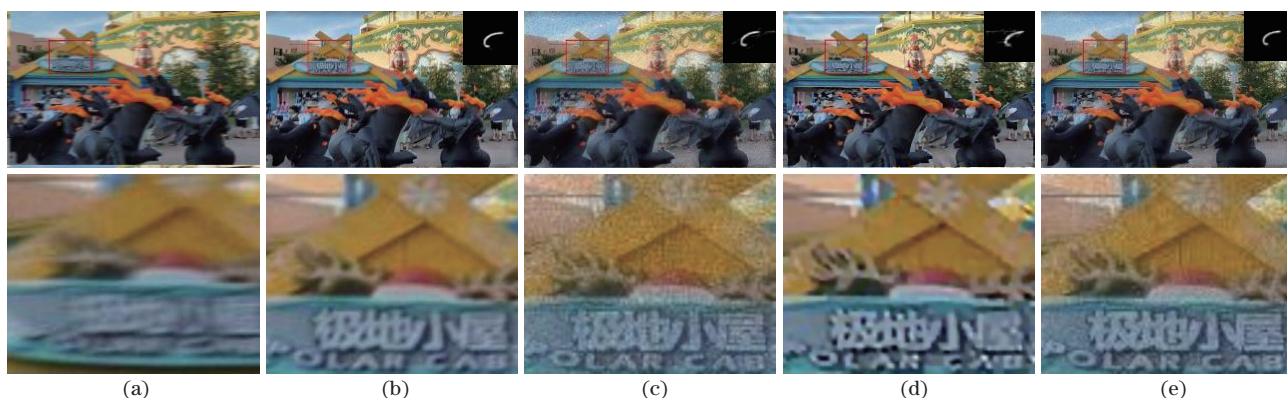


图 7 生活场景图像 2 的去模糊结果。(a)原始模糊图像;(b)文献[18]算法;(c)文献[11]算法;(d)文献[19]算法;(e)所提算法
Fig. 7 Deblurring results of common scene image 2. (a) Original blurred image; (b) algorithm in Ref. [18]; (c) algorithm in Ref. [11]; (d) algorithm in Ref. [19]; (e) proposed algorithm

图 6、7 是相机实拍的生活场景图像,图像大小为 550×344 ,模糊核尺寸分别为 $23 \times 23, 27 \times 27$,图像序列积分时间分别为 0.008, 0.3, 0.6, 1 s。在本次实验结果中,各个算法均复原出了清晰的结果图像,图 6 中窗口边缘清晰可见,图 7 放大处的文字能够被较好辨认。其中 Zhang 等^[19]算法复原的结果图边缘处出现振铃效应且仍存在细节上的不清晰,这也是单图去模糊的不足之处。Zhu 等^[18]算法得到的去模糊后的图像仍带有少量模糊,但观感较佳。Yuan 等^[11]算法与所提算法的结果图清晰但存在噪声,前者较为严重,对细节处的辨认有所影响,所提算法在有轻微噪声的情况下较好地复原了图像细节,在对生活场景图像去模糊的实验上同样表现良好,说明所提算法在遥感图像之外的场景去模糊中也具有应用价值。

图 8、9 为不同积分时间设置的模糊图像序列

去模糊结果对比,其中图 8(b)~(e)和图 9(b)~(e)所对应的模糊图像序列积分时间组合分别为 0.006 s, 0.2 s, 0.4 s, 1 s / 0.006 s, 0.4 s, 0.6 s, 1 s / 0.006 s, 0.6 s, 0.8 s, 1 s / 0.006 s, 0.333 s, 0.666 s, 1 s。前三个时间组合依次代表了非均匀积分时间设置且中间图像积分时间偏短/居中/偏长的情况,最后一组代表均匀积分时间设置的情况。由图 8、9 中去模糊效果对比可知:对均匀积分时间设置的模糊图像序列进行去模糊后,去模糊效果相比于非均匀积分时间图像序列的去模糊结果更优;而在非均匀积分时间设置的模糊图像序列去模糊结果中,中间图像积分时间居中的图像序列去模糊结果更优。该实验结果表明,应用所提算法进行去模糊时,遥感相机在一次拍摄时采用多次且均匀积分时间进行成像时能够得到更优的去模糊效果。

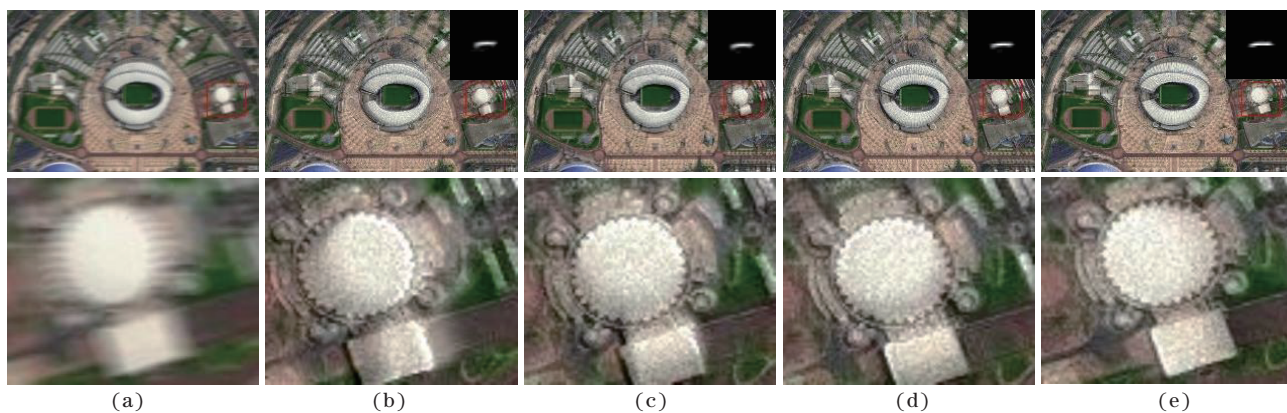


图 8 不同积分时间组合的去模糊效果比较 1。(a)原始模糊图像;(b)去模糊图像 1;(c)去模糊图像 2;(d)去模糊图像 3;(e)去模糊图像 4

Fig. 8 Comparison 1 of deblurring effects of different integration time combinations. (a) Original blurred image; (b) deblurred image 1; (c) deblurred image 2; (d) deblurred image 3; (e) deblurred image 4

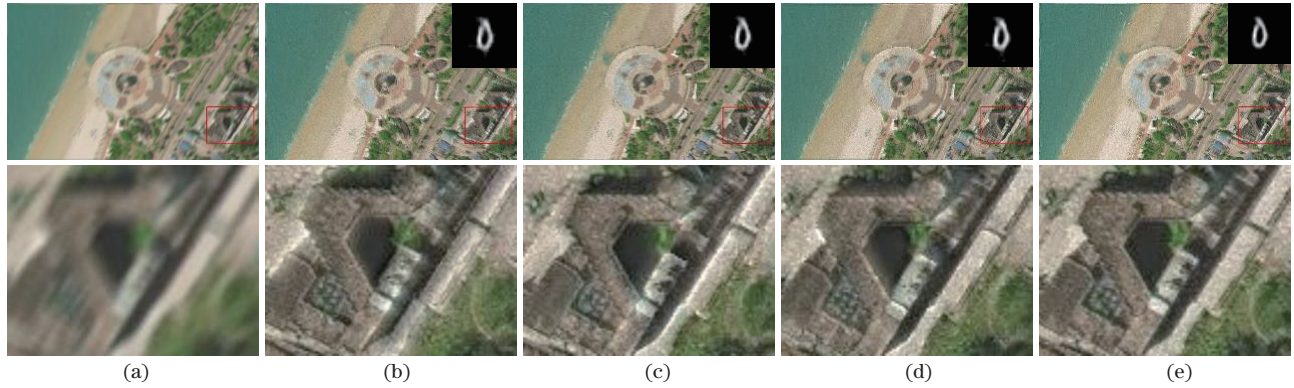


图 9 不同积分时间组合去模糊效果比较 2。(a)原始模糊图像;(b)去模糊图像 1;(c)去模糊图像 2;(d)去模糊图像 3;(e)去模糊图像 4

Fig. 9 Comparison 2 of deblurring effects of different integration time combinations. (a) Original blurred image; (b) deblurred image 1; (c) deblurred image 2; (d) deblurred image 3; (e) deblurred image 4

3.2 去模糊定量评价

在图像去模糊定量评价中,采用图像峰值信噪比(PSNR)、图像结构相似度(SSIM)及算法运行时间(RT)三种指标。其中 PSNR 是一个衡量图像失真或是噪声水平的客观标准,常作为图像劣化程度的客观评价。图像结构相似度计算了两幅图像结构信息的相似性,也是检测图像质量好坏的常用指标。

表 1 为图像去模糊质量评价结果。可以看出,尽管作为对比实验的各个算法间指标互有高低,所提算法在卫星遥感图像与生活场景图像两组实验中的图像峰值信噪比与图像结构相似度指标均优于其他算法,同时所提算法去模糊的平均运行时间也在对比实验中排名第二,以上指标在客观上说明了所提算法在图像去模糊实验上表现优异。表 2 为不同积分时间组合的去模糊质量评价结果,数据客

表 1 图像去模糊质量评价结果

Table 1 Image deblurring quality evaluation results

Test image	Parameter	Algorithm in Ref. [18]	Algorithm in Ref. [11]	Algorithm in Ref. [19]	Proposed algorithm
Fig. 4	PSNR /dB	20.42	22.35	21.92	23.14
	SSIM /dB	0.51	0.57	0.61	0.69
	RT /s	50.32	25.61	78.12	34.06
Fig. 5	PSNR /dB	29.75	29.12	27.33	30.59
	SSIM /dB	0.71	0.62	0.64	0.81
	RT /s	52.68	26.91	79.05	36.74
Fig. 6	PSNR /dB	23.39	24.06	22.73	25.14
	SSIM /dB	0.63	0.51	0.59	0.68
	RT /s	46.34	24.83	72.09	31.93
Fig. 7	PSNR /dB	28.34	25.49	26.33	28.79
	SSIM /dB	0.77	0.67	0.62	0.86
	RT /s	45.98	24.29	73.51	31.54

表 2 不同积分时间组合的去模糊质量评价结果

Table 2 Evaluation results of deblurring quality under different integration time combinations

Test image	Parameter	Deblurred image 1	Deblurred image 2	Deblurred image 3	Deblurred image 4
Fig. 8	PSNR /dB	25.34	26.15	25.69	26.44
	SSIM /dB	0.79	0.82	0.74	0.84
Fig. 9	PSNR /dB	21.23	22.02	21.57	22.13
	SSIM /dB	0.57	0.63	0.58	0.66

观上佐证了均匀积分时间设置的模糊图像序列的去模糊结果优于非均匀积分时间图像序列的去模糊结果,且在非均匀积分时间设置的模糊图像序列去模糊结果中,中间图像积分时间居中的图像序列去模糊结果更优。

4 结 论

针对遥感卫星运动成像工作模式下出现遥感图像运动模糊的问题,提出了一种基于不同积分时间遥感图像序列的去模糊算法。该算法以遥感相机在一次拍摄过程中的不同积分时间点上成像所得到的模糊遥感图像序列为输入,在模糊核估计阶段,通过对潜在清晰图像的等效替代将原本的模糊核估计问题转换成了非盲去卷积问题,利用分段求解的思想简化了单次模糊核求解的复杂度,使得模糊核的估计更加准确;在图像去卷积阶段,使用带增益控制的残差 RL 去卷积算法有效抑制了振铃效应的出现,最终复原出清晰图像。实验结果表明,相比于其他算法,所提算法获得的模糊核更加精确,获得的去模糊结果图像主观上的视觉效果更佳,客观指标上得分更高。在实际应用所提算法进行遥感图像去模糊时,建议均匀设置遥感相机积分时间,使其在一次拍摄时进行多次且均匀的成像,这样能够得到更加清晰的图像。

虽然所提算法取得了很好的去模糊效果,但是在丰富图像细节的过程中,始终会给去模糊结果图像引入部分噪声,因此未来工作中还需要对结果图像噪声的去除展开进一步研究。此外,针对遥感卫星运动成像时出现图像运动模糊的问题,加入其他一些如卫星运动速度、方向以及拍摄目标气象情况等先验信息,也可能对遥感图像的去模糊有所帮助。

参 考 文 献

- [1] Cheng S Y, Yang M, Jiang H J, et al. Theoretical analysis of super agile high resolution remote sensing satellite for maneuvering imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(11): 1125002.
程少园, 杨沐, 姜宏伟, 等. 超敏捷中成像高分辨率遥感卫星成像理论分析[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(11): 1125002.
- [2] Zhang X W, Dai J, Liu F Q. Research on working mode of remote sensing satellite with agile attitude control[J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(4): 32-38.
张新伟, 戴君, 刘付强. 敏捷遥感卫星工作模式研究[J]. *航天器工程*, 2011, 20(4): 32-38.
- [3] Qi Q, Guo J C, Chen S J. Blind image deblurring based on image edge determination mechanism[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(24): 241022.
祁清, 郭继昌, 陈善继. 基于图像边缘判别机制的盲图像去模糊方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(24): 241022.
- [4] Chen C, Xu J X, Wei C H, et al. Multi-scale image blind deblurring based on salient intensity and a priori gradient[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(4): 041505.
陈晨, 许金鑫, 危才华, 等. 基于显著性强度和梯度先验的多尺度图像盲去模糊[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(4): 041505.
- [5] Hu Y B, Jiang H, Li L B. The research of application in image restoration based on Wiener filtering[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2013, 278: 1232-1236.
- [6] Shruthi S, Satheeshkumar K G. Constrained least squares filtering followed by denoising of decomposed images using wave atom and wavelet transform[J]. *Procedia Computer Science*, 2017, 115: 526-532.
- [7] Fouad A, M'barek N, Mimoun M. An improved Richardson-Lucy algorithm based on genetic approach for satellite image restoration[J]. *The International Arab Journal of Information Technology*, 2018, 15(4): 715-720.
- [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): 70.
- [9] Donatelli M, Estatico C, Martinelli A, et al. Improved image deblurring with anti-reflective boundary conditions and re-blurring[J]. *Inverse Problems*, 2006, 22(6): 2035-2053.
- [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.
- [11] Yuan L, Sun J, Quan L, et al. Image deblurring with blurred/noisy image pairs: US8184926B2[P]. 2007-12-20.
- [12] Zhang G M, Gao S, Yin Z S, et al. Remote sensing image restoration based on blurred and noisy image pairs[J]. *Electronic Design Engineering*, 2017, 25(18): 82-86.
张广明, 高爽, 尹增山, 等. 基于模糊图像和噪声图

- 像的遥感图像运动模糊复原方法[J]. 电子设计工程, 2017, 25(18): 82-86.
- [13] Yan B, Wang J H, Zhao J. Research of image denoising technology based on mean filtering and wavelet transformation[J]. Computer Technology and Development, 2011, 21(2): 51-53, 57.
颜兵, 王金鹤, 赵静. 基于均值滤波和小波变换的图像去噪技术研究[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(2): 51-53, 57.
- [14] Ren K Q, Hu M Y. Color image registration algorithm based on improved SURF[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(5): 748-756.
任克强, 胡梦云. 基于改进SURF算子的彩色图像配准算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(5): 748-756.
- [15] Tikhonov A N, Arsenin V Y. Solution of ill-posed problems[J]. Mathematics of Computation, 1978, 32(144): 491.
- [16] Wang B X, Hu K X, Wang Z W. Advances in research in Landweber iterate method for inverse problems and its application[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(9): 2583-2586.
王兵贤, 胡康秀, 王泽文. 反问题的Landweber迭代法及其应用研究进展[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(9): 2583-2586.
- [17] Chen D, Xiao H F, Xu J W. An improved Richardson-Lucy iterative algorithm for C-scan image restoration and inclusion size measurement[J]. Ultrasonics, 2019, 91: 103-113.
- [18] Zhu X, Šroubek F, Milanfar P. Deconvolving PSFs for a better motion deblurring using multiple images [M]//Fitzgibbon A, Lazebnik S, Perona P, et al. Computer vision-ECCV 2012. Lecture notes in computer science. Heidelberg: Springer, 2012, 7576: 636-647.
- [19] Zhang X X, Wang R G, Tian Y H, et al. Image deblurring using robust sparsity priors[C]//2015 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), September 27-30, 2015, Quebec City, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2015: 138-142.
- [20] Boracchi G, Foi A. Uniform motion blur in poissonian noise: blur/noise tradeoff[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(2): 592-598.