

文章编号:1007-2780(2017)10-0822-06

基于小波变换的 RL 湍流退化图像复原算法

徐晓睿^{1,2}, 戴 明¹, 尹传历¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了从湍流退化图像中准确有效地恢复出目标图像, 提出一种基于小波变换的 RL 湍流退化图像复原算法。该算法首先对湍流退化图像进行小波分解, 可得到不同分解尺度下, 不同频带的子图像。根据不同方向的高频子段的小波系数, 估计出各个高频子段噪声方差, 进而求得适用于各频段的自适应阈值, 以这些阈值为软阈值法的临界条件分别对各频段的小波系数进行收缩, 最后用 RL 算法去迭代小波重构后的图像来实现湍流退化图像的复原。为了验证该方法的有效性, 分别用这两种算法在不同噪声条件下, 对同一幅退化图像进行了仿真实验。改进后的算法使得两幅图像的峰值信噪比分别提高 5.894 3 dB 和 7.108 4 dB。结果表明, 本文的算法相比 RL 算法在复原效果上有一定的提高。

关键词: Richardson-Lucy 算法; 小波分解; 小波去噪; 软阈值法

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20173210.0822

RL turbulence degraded image restoration algorithm based on wavelet transform

XU Xiao-rui^{1,2}, DAI Ming¹, YIN Chuan-li¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

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

Abstract: In order to recover the target image accurately and effectively from the turbulence degraded image, a RL turbulence degraded image restoration algorithm based on wavelet transform is proposed. Firstly, the turbulence degraded image is decomposed by wavelet, and sub-images of different frequency bands can be obtained at different decomposition scales. According to the wavelet coefficients of the high frequency sub-segments in different directions, the noise variance of each high frequency sub-segment is estimated, and then the adaptive thresholds suitable for each frequency band are obtained. The critical conditions of these thresholds are the wavelet. And then the RL algorithm is used to iterate the reconstructed image to reconstruct the turbulence image. In order to verify the effectiveness of the method, the simulation results of the same degraded image are simulated by the two algorithms under different noise conditions. The improved method makes the peak signal to noise ratio of

收稿日期:2017-04-26; 修订日期:2017-06-14.

基金项目: 国家自然科学基金(No.61405191)

Supported by National Natural Foundation of China(No. 61405191)

* 通信联系人, E-mail: xuxiaorui92@sina.cn

the two images increase by 5.894 3 dB and 7.108 4 dB. The results show that the proposed algorithm has a certain improvement in the recovery effect compared with the RL algorithm.

Key words: Richardson-Lucy algorithm; Wavelet decomposition; Wavelet denoising; Soft threshold method

1 引言

大气湍流是大气中一种不规则的随机运动,由于湍流的干扰,使得探测器(如卫星成像装置,天文望远镜等)观测到的图像质量下降,至严重畸变,无法进一步解读和利用图像信息。且由于大气湍流是随机的、时变的,导致在复原图像的过程中很难获得湍流点扩散函数(Point Spread Function, PSF)的确定值,而且在实际问题中,湍流退化图像还含有噪声,这进一步加大了复原的难度。在先验知识未知的情况下,传统的图像复原如逆滤波、维纳滤波等方法,难以得到良好的复原效果,采用盲图像复原^[1-2]是一种比较好的方法。例如单帧迭代盲目去卷积方法(Iterative Blind Deconvolution, IBD)^[3],该算法计算复杂性较低。但对噪声较敏感,其复原结果过多的依赖于对图像的初始估计,因此在图像复原的过程中难以保证它的可靠性和稳定性。Richardson-Lucy (RL)^[4-6]算法,分别由 Richardson 于 1972 年及 Lucy 于 1974 年独立发现。它是一种非线性的盲复原算法,通过对降质图像的逐步迭代来逼近真实图像。在信噪比较高的情况下,复原出的图像效果较好。但是该算法在复原的过程中,迭代次数过多造成噪声放大。为此,人们提出了很多方法来约束 RL 算法,例如 Tikhonov-Miller^[7]提出的规整化 RL 算法,但它造成了图像边缘的过渡平滑。赵剡^[8]等对 RL 算法提出一种总变分规整化的方法。该方法对于图像细节的保存有较好的效果,但抗噪能力一般。

考虑到在利用小波变换^[9-13]的时频特性和多分辨特性进行去噪时,具有保持图像特征和边缘信息的优点,因此本文提出用小波变换的方法对 RL 算法进行约束。本文先对退化图像进行小波变换,变换后能量主要集中在低频段(LL),而另外

3 个子频段(LH、HL、HH)包含的是噪声及高频细节。因此在高频段着重于去除噪声,选取适当的阈值对不同尺度、不同方向下的小波系数进行软阈值处理,最后用 RL 算法去迭代小波重构后的图像来实现湍流退化图像的复原。这样,不但对噪声(加性高斯白噪声)起到抑制作用,还使得一些有用的高频边缘信息被保留下来。

2 图像退化原理与 RL 算法

2.1 图像退化原理

目标图像经湍流退化后,其退化的模型可表示为

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y) + n(x, y), \quad (1)$$

式中: $f(x, y)$ 表示理想的、没有退化的原始图像, $g(x, y)$ 是退化(所观察到的)图像, $h(x, y)$ 是 PSF, $n(x, y)$ 是噪声。则退化模型如图 1 所示。

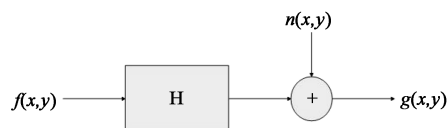


图 1 退化模型

Fig.1 Degradation model

2.2 Richardson-Lucy 算法

RL 算法是目前普遍应用于图像复原的一种迭代算法,它假定观测到的湍流退化图像、PSF 以及原图像都遵循泊松分布的规律,每一次的迭代,都可以提高解的似然性,随着迭代次数不断增加,最终会收敛于具有最大似然性的解处。

当 PSF 未知,用交替迭代的方法可以同时估计出原始图像和 PSF。则经过 n 次迭代后的原始图像估计为 $f^n(x, y)$ 和 PSF 为 $h^n(x, y)$, 则第 $(n+1)$ 次的迭代表达式为:

$$h^{n+1}(x, y) = \left\{ \left[\frac{g(x, y)}{h^n(x, y) * f^n(x, y)} \right] * f^n(-x, -y) \right\} h^n(x, y), \quad (2)$$

$$f^{n+1}(x, y) = \left\{ \left[\frac{g(x, y)}{f^n(x, y) * h^{n+1}(x, y)} \right] * h^{n+1}(-x, -y) \right\} f^n(x, y), \quad (3)$$

通过交替迭代式(2)(3),最终可以得到 PSF 和图像的估计。这就是常用的 RL 反卷积算法,该方法没有提供迭代终止条件,随着迭代次数 n 的不断叠加,复原的图像不断逼近原始的清晰图像。但是随着迭代次数的增加上式得到的解会由于噪声放大而面目全非,本文通过在小波域控制噪声的放大,来提高 RL 算法的复原效率。

3 小波变换的 RL 算法

在小波域中,图像的降噪问题可以表示为:

$$y = w + n, \quad (4)$$

式(4)中 y 表示式(1)中观测到的退化图像 $g(x, y)$ 所对应的小波系数, w 是去除噪声后的图像所对应的小波系数, n 表示加性噪声。目的就是通过软阈值小波去噪从 y 中估计出 w 。

软阈值方法就是将较小的小波系数置零,但对较大的小波系数向零做收缩

$$\hat{w} = \begin{cases} w \cdot (|w| - T) & |w| \geq T \\ 0 & |w| < T \end{cases}, \quad (5)$$

从式(5)中可以看出,去噪的关键是阈值的选取,Donoho 等人^[14]提出了全局阈值法,该方法计算简单,但忽略了不同频段的噪声特性不完全一致,造成了对部分小波系数的过度抑制,导致重构后的图像模糊。Lakhwinder Kaur 等^[15]针对 Donoho 阈值的缺点进行改进,提出了 Normal Shrink 阈值法,估计公式如下:

$$T_{ij} = \frac{\beta \sigma^2}{\sigma_h}, \quad (6)$$

$$\beta = \sqrt{\log \left[\frac{L_K}{j} \right]}, \quad (7)$$

其中 $i=1,2,3$ 分别代表水平、竖直、对角三个方向, j 是分解层数, β 代表每一级尺度参数, σ^2 是从高频子带 HH 估计出的方差。 σ_h 代表 $1 \sim j$ 层的高频系数的标准方差, L_k 为 k 级子带的长度。随着 j 的改变,每一级的尺度参数会自适应改变。但该方法中对噪声方差的估计仍然是全局的,将一个固定的阈值应用于所有子带可能是理想的,但是对于至少一个子带可能是非理想的。

因此,假设 w_{ij} 是对应 3 个高频带在不同分解层数下的小波系数,分别计算出他们在不同分解层数下的噪声方差为

$$\hat{\sigma}_w^2 = \frac{1}{N} \sum w_{ij}^2, \quad (8)$$

式中: N 是小波系数 w_{ij} 在子带中的个数,而原本的 σ^2 是仅从 HH 中估计出的方差,现对 HL、LH 的方差也进行估计

$$\hat{\sigma}_i^2 = \left[\frac{\text{median}(|Y_{ij}|)}{0.6475} \right]^2$$

$$Y_{ij} \in \text{subbandHH}_j, \text{HL}_j, \text{LH}_j, \quad (9)$$

最终得出了 $\hat{\sigma}_{\text{image } i}^2$

$$\hat{\sigma}_{\text{image } i}^2 = \sqrt{\max |\hat{\sigma}_i - \hat{\sigma}_w^2|}, \quad (10)$$

这样就体现了不同尺度下图像的各个高频子段的噪声特性,使这种噪声估计更有针对性。为每一尺度的每一个方向都确定一个与其更加匹配的阈值,然后将式(10)带入(6)中就可以得到各个尺度,各个方向上的阈值 T_{ij} 。之后对不同尺度下不同方向的高频系数进行软阈值处理,最后将阈值化后的小波系数进行小波重构就可得到去噪后的图像 $\hat{g}(x, y)$ 。这样改进后的 RL 算法为:

$$h^{n+1}(x, y) = \left\{ \left[\frac{\hat{g}(x, y)}{h^n(x, y) * f^n(x, y)} \right] * f^n(-x, -y) \right\} h^n(x, y), \quad (11)$$

$$f^{n+1}(x, y) = \left\{ \left[\frac{\hat{g}(x, y)}{f^n(x, y) * h^{n+1}(x, y)} \right] * h^{n+1}(-x, -y) \right\} f^n(x, y). \quad (12)$$

4 实验结果及分析

为了验证本文方法的有效性,选取处理器为 Interl 酷睿 i5(4590U),主频 3.30 GHz,内存容量 4 GB 的计算机,应用 MATLAB2016 平台对图像进行了仿真实验。采用的小波基为‘sym4’,分解尺度为 2,并用客观指标均方误差(Mean Squared Error,MSE)及峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio,PSNR)恢复后图像的质量进行比较,均方误差及峰值信噪比公式定义如下:

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{0 \leq i < N} \sum_{0 \leq j < M} (f_{ij} - f'_{ij})^2, \quad (13)$$

$$PSNR = 10 \times \lg \frac{L \times L}{MSE}, \quad (14)$$

式中: $M \times N$ 为图像的大小, f_{ij} 表示原始图像的像素值, f'_{ij} 表示降质后图像的像素值, $\hat{f}_{ij}$ 代表估计图像的数据, L 表示为图像数据中的量化级数。

图 2(a)为清晰的目标图像,(b)为将(a)经湍流退化后的图像,它们的大小为 170×170 。

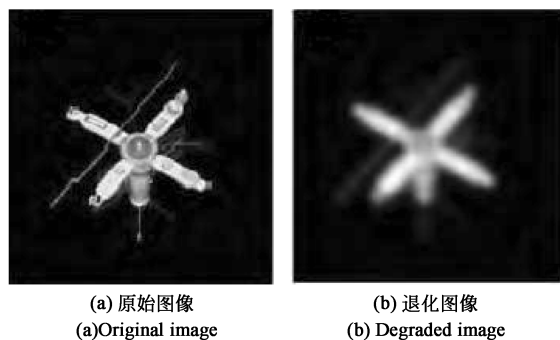


图 2 原始图像与退化图像

Fig.2 Original image and degraded image

实验过程中,分别在不同噪声条件下用 RL 算法与本文改进算法对湍流退化图像进行复原操作,得到的结果如图 3,图 4 和表 1。

图 3(a)是在图 2(b)所示的湍流退化图像上添加方差为 0.001 的高斯噪声后的图像。

图 3 中(b)为直接用 RL 算法复原的结果图,(c)而用为本文算法的复原结果,可看出在噪声小的时候,两种算法都能恢复出图像,但本

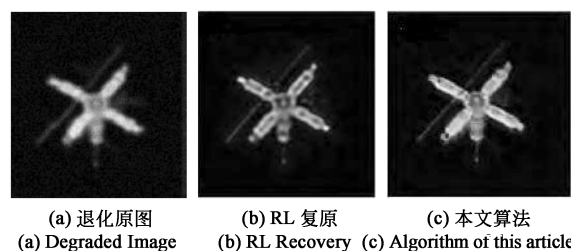


图 3 RL 算法与本文算法的复原结果(噪声 0.001)

Fig.3 Results of the restoration between RL algorithm and algorithm (noise 0.001)

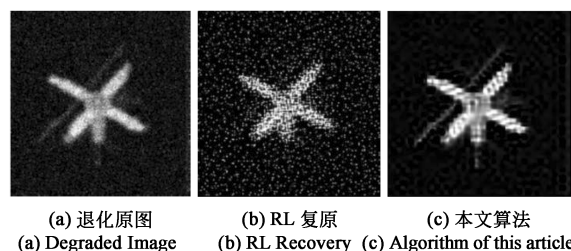


图 4 RL 算法与本文算法的复原结果(噪声 0.01)

Fig.4 Results of the restoration of RL algorithm and algorithm (noise 0.01)

文的算法使噪声得到了较好的抑制,图像质量也有所提高。

图 4 中(a)是在图 2(b)所示的湍流退化图像上添加方差为 0.01 的高斯噪声后的图像。在强噪声的情况下,RL 算法并不适用,它复原过程中不断地迭代,使得噪声放大,目标图像已完全无法辨认,而本算法还能恢复出目标的基本轮廓。

这两种算法在不同噪声条件下,所获得的峰值信噪比(PSNR)见表 1。

表 1 RL 算法与改进 RL 算法的 PSNR 比较结果

Tab.1 Comparison of PSNR between RL algorithm and Improved RL algorithm

方法	PSNR/dB	
	噪声 0.001	噪声 0.01
RL 算法	31.721 7	26.898 2
RL 改进算法	37.619 0	34.006 6

由表 1 可以看出,在图像复原效果上,本文改进后的算法,在不同噪声条件下都有明显的提高。且 PSNR 越大,图像复原效果就越好,说明本文

的算法是有效的。

5 结 论

在湍流 PSF 未知的情况下,为了有效地从湍流退化图像中恢复出原始目标图像,本文提出了一种基于小波域改进的 RL 湍流退化图像复原算法。此算法保持了 RL 算法的原有优点,它不需要任何关于 PSF 尺寸的先验信息。在复原过程中,通过将图像进行小波分解,然后根据不同的分

解尺度,与不同方向下高频段的噪声特性,确定适合各自的最优阈值,利用软阈值方法对图像的小波系数进行收缩,达到抑制噪声的目的。从而使得 RL 算法处理的图像尽可能为无噪声的湍流退化图像,这样复原过程中就不会因为多次的迭代而导致噪声放大。仿真结果表明,改进后的算法使两幅模糊图像的 PSNR 分别提高了 5.894 3 dB 和 7.108 4 dB,验证了本文的算法是具有可行性和有效性的,且该算法对湍流退化图像有较好的复原效果。

参 考 文 献:

- [1] 曹雷,陈洪斌,邱琪,等.盲图像复原研究现状[J].中国光学,2014,7(1):68-78.
CAO L, CHEN H B, QIU Q, *et al.* Research status of blind image restoration [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 68-78. (in Chinese)
- [2] 朱瑞飞,魏群,王超,等.基于随机点扩散函数的多帧湍流退化图像自适应复原方法[J].中国光学,2015,8(3): 368-377.
ZHU R F, WEI Q, WANG C, *et al.* Adaptive restoration method of multi-frame turbulence-degraded images based on stochastic point spread function [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 368-377. (in Chinese)
- [3] AYERS G R, DAINTY J C. Iterative blind deconvolution method and its applications [J]. *Optics Letters*, 1988, 13 (7): 547-549.
- [4] RICHARDSON W H. Bayesian-based iterative method of image restoration [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1972, 62(1): 55-59.
- [5] LUCY L B. An iterative technique for the rectification of observed distributions [J]. *Astronomical Journal*, 1974, 79: 745-754.
- [6] SCHULZ T J. Multiframe blind deconvolution of astronomical images [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1993, 10(5): 1064-1073.
- [7] SHEPPARD C J R, COGSWELL C J. Three-dimensional image formation in confocal microscopy [J]. *Journal of Microscopy*, 1990, 159(2): 179-194.
- [8] 赵剡,张怡,许东.基于总变分正则化的湍流退化图像复原 RL 算法[J].中北大学学报:自然科学版,2007,28(1): 69-73.
ZHAO Y, ZHANG Y, XU D. Restoration of turbulence-degraded images based on RL algorithm with total variation regularization [J]. *Journal of North University of China: Natural Science Edition*, 2007, 28(1): 69-73. (in Chinese)
- [9] ZHU X, MILANFAR P. Removing atmospheric turbulence via space-invariant deconvolution [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(1): 157-170.
- [10] 洪汉玉,张天序.基于小波分解的湍流退化图像的快速复原算法[J].红外与毫米波学报,2003,22(6):451-456.
HONG H Y, ZHANG T X. Fast restoration algorithm for turbulence degraded images based on wavelet decomposition [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003, 22(6): 451-456. (in Chinese)
- [11] 刘成云,陈振学,马于涛.自适应阈值的小波图像去噪[J].光电工程,2007,34(6):77-81.
LIU C Y, CHEN Z X, MA Y T. Adaptive wavelet thresholding method for image denoising [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(6): 77-81. (in Chinese)
- [12] XIONG R Q, DING W P, MA S W, *et al.* A new image deblurring algorithm with less ringing artifacts via error variance estimation and soft decision [C]//2011 18th IEEE International Conference on Image Processing. Brussels: IEEE, 2011: 701-704.

- [13] 江洁,邓琼,张广军.基于小波变换的正则化盲图像复原算法[J].光学 精密工程,2007,15(4):582-586.
JIANG J, DENG Q, ZHANG G J. Regularization algorithm for blind image restoration based on wavelet transform [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(4): 582-586. (in Chinese)
- [14] DONOHO D L, JOHNSTONE I M. Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1995, 90(432): 1200-1224.
- [15] KAUR L, GUPTA S, CHAUHAN R C. Image denoising using wavelet thresholding [C]//*Proceedings of the Third Indian Conference on Computer Vision, Graphics & Image Processing*. Ahmadabad, India: Allied Publishers Private Limited, 2002: 1522-1531.

作者简介:徐晓睿(1992—),女,吉林长春人,硕士研究生。2015 年于吉林大学获得学士学位,主要从事图像处理方面的研究。E-mail:xuxiaorui92@sina.cn

戴明(1965—),男,湖北潜江人,研究员,博士生导师,主要从事对地实时观测系统信号获取、图像处理及控制工程等方面的研究。E-mail:daiming@ciomp.ac.cn