

doi: 10.3788/gzxb20164512.1210001

基于指数律分布的图像快速盲复原算法

高伟哲¹, 邹建华^{1,3}, 张荣之², 王家松²

(1 西安交通大学 电信学院 系统工程研究所, 西安 710049)

(2 西安卫星测控中心, 西安 710043)

(3 广东西安交通大学研究院, 广东 佛山 528300)

摘要:针对现有图像盲复原迭代算法多存在耗时较长和难以保证收敛性等问题,提出一种改进的快速算法.首先根据指数律重建原始图像的频谱,然后利用原始图像和降质图像的频谱关系,采用多方向综合估计方法得到点扩散函数.多方向综合估计方法可降低估计误差,增加算法的稳定性.最后利用得到的点扩散函数和维纳滤波法进行图像重建.与现有算法的对比实验结果表明,针对适合大量成像系统的 G 类点扩散函数,本算法可以得到更准确的点扩散函数估计,且降低了振铃效应的影响,取得更好的图像复原效果.

关键词:图像处理;图像盲复原;指数律;点扩散函数估计;APEX 算法;振铃效应

中图分类号:TP751

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)12-1210001-8

Fast Blind Image Restoration Algorithm Based on Power Law

GAO Wei-zhe¹, ZOU Jian-hua^{1,3}, ZHANG Rong-zhi², WANG Jia-song²

(1 *Systems Engineering Institute, School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

(2 *Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China*)

(3 *Guangdong Xi'an Jiaotong University Academy, Foshan, Guangdong 528300, China*)

Abstract: Aiming at the problems that the existing iterative blind image restoration algorithms are mostly time-consuming and their convergence guaranteeing is difficult, a fast algorithm was proposed. Firstly, the spectrum of original image is reconstructed in accordance with the power law. Then, utilizing the relationship between the spectrums of the original and reconstructed images, the Point Spread Function (PSF) is estimated by the multidirectional comprehensive estimation, which can reduce the estimation error and enhance the stability. Finally, the restored image is obtained by using the estimated PSF and Wiener filter. The proposed algorithm was compared with the existing algorithms by experiments. The results show that for the class G PSFs which fit for the numerous imaging systems, the proposed algorithm can obtain more accurate PSF, and reduce the ringing artifacts, yielding restored images with higher quality.

Key words: Image processing; Image blind restoration; Power law; Point spread function estimation; APEX algorithm; Ringing artifacts

OCIS Codes: 100.0100; 100.3020; 010.1330

0 引言

图像复原是基于图像退化的原因,利用所观测到

的退化图像来恢复清晰的真实场景的技术,已被广泛用于天文观测、遥感、安全监控和医学成像等领域^[1-3].

多数情况下,图像退化的点扩散函数(Point Spread

基金项目:国家自然科学基金(No. 61303121)和广东省科技计划(No. 2012B090900017)资助

第一作者:高伟哲(1985-),男,博士研究生,主要研究方向为图像处理,图像复原. Email:gaoweizhe@163.com

导师(通讯作者):邹建华(1964-),男,教授,博士,主要研究方向为网络化控制理论与技术、复杂系统建模与分析、图像处理. Email:jzhou@sei.xjtu.edu.cn

收稿日期:2016-06-06;录用日期:2016-08-22

<http://www.photon.ac.cn>

Function, PSF)是未知的,因此通常采用盲复原算法进行图像复原。

典型的盲复原算法有迭代盲反卷积法^[4-5],约束递归滤波法^[6-7],总变分法^[8-10]等.这些算法本质上是迭代的,而迭代盲复原经常会出现局部收敛或者发散现象,即使迭代过程稳定,迭代次数也常高达上千甚至数千,非常耗时,难以满足实时图像复原的要求。

为满足图像盲复原实时性的需要,针对常见的G类点扩散函数引起的图像退化,Carasso提出了非迭代的APEX(Approximate PSF Examining)盲图像复原算法^[11-12].APEX算法根据退化图像的频谱信息估计出系统的PSF,然后采用连续边界慢演进(Slow Evolution of Continuation Boundary, SECB)^[11]复原方法对退化图像进行复原.APEX算法原理简单,没有迭代环节,可以在短时间内对一些模糊图像进行复原.但是,APEX算法用一个预设的常量值代替目标图像的频谱特征,这在物理意义上并不合理,难以匹配实际情况,估计误差较大;此外,算法使用SECB方法对图像进行重建,容易受到噪声的影响。

Zhang Jian-lin等^[13]通过引入图像功率谱特征模型来改善参量估计过程,但其涉及交互式参量输入,计算量大,且没有给出终止条件.谢盛华等^[14]使用模糊图像频谱内多条过中心的直线上的数据分别进行拟合,最后综合平均求取PSF值.Luo Y等^[15]提出了基于中频阈的方法,利用中频域估计图像的点扩散函数进行复原图像,但是由于图像的频谱和图像本身是相关的,图像的降质过程会影响到所有的频率,在求取中频域时,经常会出现中频域数据偏少的现象,大大影响PSF估计的准确性和稳定性.葛琪等^[16]提出了近似等腰三角形模型来代替理想图像的频谱,这种模型并不符合真实图像的频谱规律,在进行PSF估计时通常有较大的误差。

本文提出了一种基于指数律的图像快速盲复原算法.算法利用自然图像的指数律分布重建原始图像的频谱,从而得到更准确的PSF估计;采用多方向的综合估计代替单一方向估计来获取图像的退化PSF,以提高估计的稳定性;采用维纳滤波算法对模糊图像进行复原,抑制噪声对图像恢复的影响。

1 算法原理

1.1 图像退化和G类点扩散函数

图像的退化过程在数学上可以描述为

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

式中, $g(x, y)$ 为模糊图像, $f(x, y)$ 为原始图像, $h(x, y)$ 为点扩散函数, $n(x, y)$ 为噪声,*为卷积符号。

式(1)可以改写为频域的形式,即

$$G(\mu, \nu) = H(\mu, \nu)F(\mu, \nu) + N(\mu, \nu) \quad (2)$$

式中, $G(\mu, \nu)$, $H(\mu, \nu)$, $F(\mu, \nu)$, $N(\mu, \nu)$ 分别为 $g(x, y)$, $h(x, y)$, $f(x, y)$, $n(x, y)$ 的傅里叶变换。

G类点扩散函数在图像退化系统中占有很大的比例,例如天文观测、卫星探测、航空探测、电子显微扫描以及磁共振图像系统等^[11-12].G类点扩散函数是有限个二维放射状对称Lévy Stable概率密度函数的卷积^[11],其频域表达为

$$H(\xi, \eta) = - \int_{\mathbb{R}^2} h(x, y) \exp[-2\pi i(\xi x + \eta y)] dx dy = \exp[-\alpha(\xi^2 + \eta^2)^\beta] \quad \alpha > 0, 0 < \beta \leq 1 \quad (3)$$

式中, $\beta=1$ 时G类点扩散函数对应高斯密度,其在海底成像、计算机X射线断层扫描等方面有重要的应用; $\beta=5/6$ 时其对应长曝光大气湍流模糊,在天文观测、遥感等方面有重要应用; $\beta=1/2$ 时其对应洛伦兹(Lorentzian)密度函数,已经应用于医学成像中对X射线散射现象进行建模,在利用可变反射补偿湍流影响的大气自适应光学系统中,Lorentzian分布是最合适的经验点扩散函数^[17]。

1.2 自然图像的指数律分布

一般来说,图像的功率谱遵循指数律分布^[18-20],可近似描述为

$$E[|F(\mu, \nu)|^2] = E[P(f, \theta)] \approx A_s(\theta) / \omega^{\gamma_s(\theta)} \quad (4)$$

式中, $\omega = (\mu^2 + \nu^2)^{1/2}$, $\theta = \arctan(\nu/\mu)$; $A_s(\theta)$ 是与方向有关的强度因子, $\gamma_s(\theta)$ 是与方向有关的频域指数因子,两者共同决定着功率谱的形状.式(4)表明图像功率谱的期望具有指数律分布形式,在频域正比于 $1/\omega^{\gamma_s(\theta)}$,其中 $\gamma_s(\theta)$ 近似为2.进而可得

$$|F(\mu, \nu)| = E[|F(\mu, \nu)|] = A_r(\theta) / \omega^{\gamma_r(\theta)} \quad (5)$$

当图像退化的PSF是G类点扩散函数时,可得

$$|G(\mu, \nu)| = |F(\mu, \nu)H(\mu, \nu) + N(\mu, \nu)| = \left| \frac{\exp[-\alpha(\mu^2 + \nu^2)^\beta] A_r(\theta)}{(\mu^2 + \nu^2)^{(1/2)\gamma_r(\theta)}} + N(\mu, \nu) \right| \quad (6)$$

图像退化系统中,噪声的能量远小于真实图像的能量,因此噪声 $n(x, y)$ 满足

$$\int_{\mathbb{R}^2} n(x, y) dx dy \leq \int_{\mathbb{R}^2} f(x, y) dx dy = F(0, 0) = \sigma > 0 \quad (7)$$

使用 σ 对 $G(\mu, \nu)$, $F(\mu, \nu)$ 和 $N(\mu, \nu)$ 进行归一化处理,得 $G^*(\mu, \nu)$, $F^*(\mu, \nu)$, $N^*(\mu, \nu)$ 。

当系统的PSF为G类点扩散函数时,对式(7)两边进行归一化取对数,得

$$\ln|G^*(\mu, \nu)| = \ln|F^*(\mu, \nu)H(\mu, \nu) + N^*(\mu, \nu)| = \ln \left| \frac{\exp[-\alpha(\mu^2 + \nu^2)^\beta] A_r^*(\theta)}{(\mu^2 + \nu^2)^{(1/2)\gamma_r(\theta)}} + N^*(\mu, \nu) \right| \quad (8)$$

忽略噪声项,得

$$\ln|G^*(\mu, \nu)| \approx \ln|H(\mu, \nu)| + \ln|F^*(\mu, \nu)| = -\alpha(\mu^2 + \nu^2)^\beta - \frac{1}{2}\gamma_r(\theta)\ln(\mu^2 + \nu^2) + \ln A_r^*(\theta) \quad (9)$$

因为点扩散函数呈放射状对称,所以在频域 (μ, ν) 平面上任意一条过原点的直线上的点都能满足式(9). 特别地,假设 $\mu=0$,则有

$$\ln |G^*(0, \nu)| \approx \ln |H(0, \nu)| + \ln |F^*(0, \nu)| = -\alpha |\nu|^{2\beta} - \gamma \ln |\nu| + \ln A^* \quad (10)$$

APEX 算法中对应的公式^[12]为

$$\ln |G^*(0, \nu)| = -\alpha |\nu|^{2\beta} - A \quad (11)$$

其中常量 A 无法反映自然图像的频谱特征,且对 A 值的选取需要多次尝试,很难取得合适的值;而本文算法反映了自然图像的指数律分布规律,针对 γ 对图像频域幅度谱进行粗略建模,通过对大量图像频域幅度谱统计研究可知, γ 一般取 $0.9 \sim 1.0$,在复原过程中不需要大量的试算.

2 算法实现

根据自然图像频谱的指数律分布规律,重建清晰图像的归一化频谱.由 G 类点扩散函数导致的图像退化,图像频谱低频部分几乎不变,中频和低频部分则显著减小,如图 1. 实际上退化图像在高频段的图像信息已经很少,这里的能量主要是由于系统误差和截断误差引起的.因此,可以在低频段用 $\ln |G^*(0, \nu)|$ 代替 $\ln |F^*(0, \nu)|$ 的值,而在中频和低频段根据频谱与频率的双对数线性关系来估计 $\ln |F^*(0, \nu)|$ 的值.

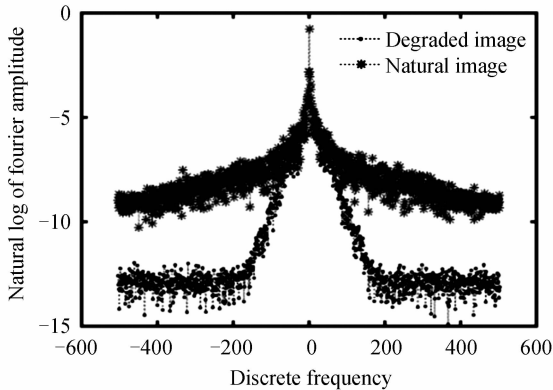


图 1 模糊图像与原始真实图像的频域对比

Fig. 1 Spectra of the blurred image and natural image

以 $\mu=0$ 这条直线为例,根据重建的目标图像的频谱特性来求取 $\ln |F^*(0, \nu)|$ 的值,即

$$\ln |F^*(0, \nu)| = \begin{cases} \ln |G^*(0, \nu)| & |\nu| < n \\ g_1 + \gamma \times \ln |n| - \gamma \times \ln |\nu| & n \leq \nu \leq N-1 \\ g_1 + \gamma \times \ln |n| - \gamma \times \ln |\nu| & -N \leq \nu \leq -n \end{cases} \quad (12)$$

式中, γ 为预估的清晰图像的斜率, γ 取值为 $0.9 \sim 1.0$, n 取值为 $6 \sim 10$.同时,由于 $\ln |G^*(0, \nu)|$ 是振荡的,所以 g_1, g_2 分别取 $\ln |G^*(0, n)|, \ln |G^*(0, -n)|$ 在 $\ln |G^*(0, \nu)|$ 上的加权平滑值.清晰图像的归一化频谱拟合如图 2.

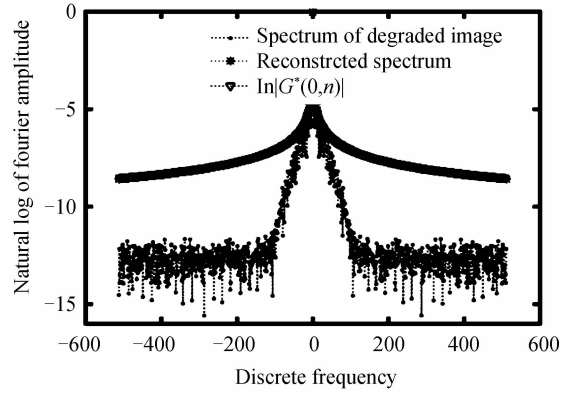


图 2 由退化图像频谱重建的原图像频谱

Fig. 2 The original image spectrum reconstructed by the degraded image spectrum

将 $\ln |F^*(0, \nu)|$ 的值代入式(10),可以求出 $-\alpha |\nu|^{2\beta}$ 的值,计算结果如图 3.

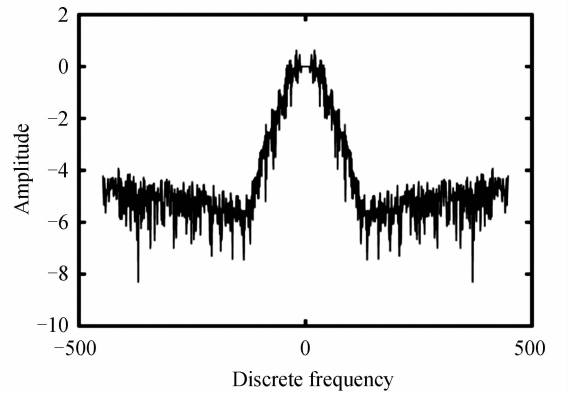


图 3 计算出的 $\alpha |\nu|^{2\beta}$ 值

Fig. 3 Calculated result of $\alpha |\nu|^{2\beta}$

由于 β 固定后 $-\alpha |\nu|^{2\beta}$ 是钟形的,在 $-N \leq \nu \leq 0$ 范围内曲线单调递增,在 $0 \leq \nu \leq N$ 范围内曲线单调递减.因此,并不是图 3 中的所有数据都能用于估计成像系统的点扩散函数,只有原点附近的数据估计点扩散函数时最有效.此处设定一个阈值 T 且 $T < N$,将 $\nu \in [T, -T]$ 范围内的数据从 $-\alpha |\nu|^{2\beta}$ 中提取出来,如图 4,要求 T 能使所取的点都在两个“波谷”的范围之内.

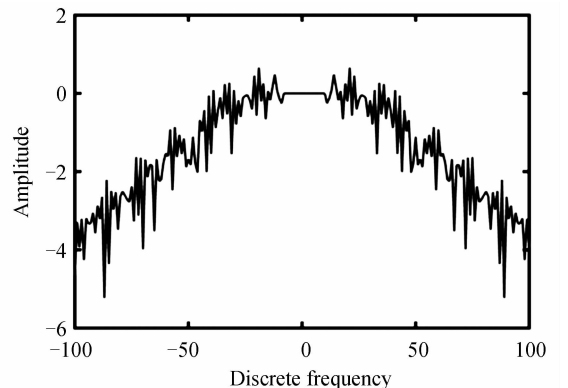


图 4 从图 3 显示的 $-\alpha |\nu|^{2\beta}$ 值中,截取合适的数据

Fig. 4 Proper data extracted from $-\alpha |\nu|^{2\beta}$ shown in Fig. 3

获得合适的的数据后采用非线性最小二乘法对 $-\alpha|\nu|^{2\beta}$ 进行拟合,从拟合的结果中能够得到 α 和 β 的值,进而得到导致图像退化的点扩散函数.对 $-\alpha|\nu|^{2\beta}$ 的拟合结果如图 5.

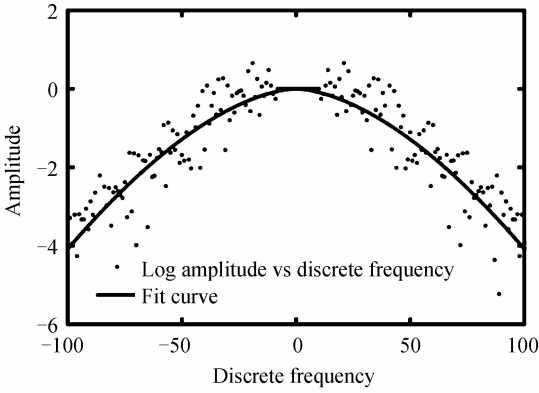


图 5 点扩散函数拟合结果
Fig. 5 PSF fitting result

在现实的退化图像中,由于退化因素及其他随机因素的影响,一帧实际的退化图像的频谱信息不可能在 $\Omega = \{(\mu, \nu) | \mu^2 + \nu^2 \leq \omega^2\}$ 范围内完全满足辐射对称条件,只能在一定程度上逼近或近似满足辐射对称.因此,在 Ω 平面上选取过原点的不同直线,对对数频谱曲线进行拟合得出的值是不同的,从而导致点扩散函数估计的不稳定性.当所选取直线的方向受随机因素(如系统噪声、截断误差等)影响较大时,可能导致 APEX 算法的失效,难以估计出合理的 α 和 β 值.本文选择 $\mu=0, \nu=0, \mu=\nu, \mu=-\nu$ 四条直线方向分别估计,对 α 求取算数平均值,由于 β 体现的是点扩散函数的指数特征,所以对 β 求取几何平均值,这样可得到合理的 α 和 β 值,避免在单一方向上估计失真.

采用 Wiener 滤波法(最小均方差滤波)进行图像重建. APEX 算法通常采用 SECB 方法进行反卷积图像复原. SECB 方法是针对 G 类点扩散函数无限可分的特点而提出的,但需要对参量进行交互调节,相对耗时,且复原结果的噪声较明显. Wiener 滤波通过最小化原始图像和复原图像之间的均方误差来获得恢复图像,可以看作 SECB 方法的一个特例,具有更强的去噪效果. Wiener 滤波复原的计算公式为

$$F^*(\mu, \nu) = \left[\frac{1}{H(\mu, \nu)} \frac{|H(\mu, \nu)|^2}{|H(\mu, \nu)|^2 + S} \right] G(\mu, \nu) \quad (13)$$

式中, S 为模糊图像的信噪比.

基于指数律的图像快速盲复原算法中,输入退化图像 $g(x, y)$ 和预想的图像频谱斜率 γ , 输出复原图像 $f(x, y)$, 流程为:

1) 对 $g(x, y)$ 进行快速傅里叶变换得到 $G(\mu, \nu)$, 对 $G(\mu, \nu)$ 进行归一化和中心化得到 $|G^*(\mu, \nu)|$, 进而计算出 $\ln|G^*(\mu, \nu)|$;

2) 从 $\ln|G^*(\mu, \nu)|$ 中提取出 $\ln|G^*(0, \nu)|$;

3) 利用式(12)重建 $\ln|F^*(0, \nu)|$;

4) 利用式(10)计算出 $-\alpha_1|\nu|^{2\beta_1}$, 并从 $-\alpha_1|\nu|^{2\beta_1}$ 中选择合适的的数据, 利用非线性最小二乘法估计 α_1 和 β_1 ;

5) 在直线 $\nu=0, \mu=\nu$ 和 $\mu=-\nu$ 上重复 2)~4), 得到 $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \beta_2, \beta_3$ 和 β_4 ;

6) $\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)/4, \beta = \sqrt[4]{\beta_1\beta_2\beta_3\beta_4}$, 得到退化图像的点扩散函数 $H(\mu, \nu) = \exp[-\alpha(\mu^2 + \nu^2)^\beta]$;

7) 利用维纳滤波法, 根据所获得的点扩散函数进行图像复原.

3 评价指标

实验采用归一化均方误差(Normalized Mean Square Error, NMSE), 峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR), 拉普拉斯梯度模(Laplacian Sum, LS) 和振铃评价值(Ringing Metric, RM) 作为客观评价计算准则.

NMSE 归一化均方误差用来计算复原图像与理想图像的偏差, NMSE 的值越小, 表明图像复原效果越好, 其表达式为

$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i, j) - g(i, j)]^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i, j)^2} \quad (14)$$

式中, $f(i, j)$ 为原始图像, $g(i, j)$ 为重建图像.

PSNR 的值越大表明图像质量越好, 其表达式为

$$PSNR = 10 \lg \frac{255^2}{MSE} = 10 \lg \left[\frac{255^2 \times M \times N}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i, j) - g(i, j)]^2} \right] \quad (15)$$

LS 反映图像的轮廓特征, 图像越清晰, 轮廓越鲜明, 则每一像素附近的灰度值变化越大, LS 值越大, 其表达式为

$$LS = \frac{1}{(M-2)(N-2)} \cdot \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \left| \begin{array}{c} 8g(i, j) - g(i, j-1) - g(i-1, j) \\ -g(i+1, j) - g(i, j+1) \\ -g(i-1, j-1) - g(i-1, j+1) \\ -g(i+1, j-1)g(i+1, j+1) \end{array} \right| \quad (16)$$

振铃效应评价利用观测图像和复原图像的边缘轮廓来分离复原产生的振铃^[21]. 利用 Canny 算子检测退化图像的边缘, 将该边缘记为 E_{ref} , 对 E_{ref} 使用 $r \times r$ 的结构元素进行膨胀处理, 创建一个二值的边缘蒙板 E_{Mref} , r 为从边缘开始使边缘蒙板覆盖全部振铃的像素宽度, 其值由振铃效应严重程度确定; 检测复原图像的边缘轮廓, 将其记为 E_n ; 对 E_{Mref} 和 E_n 做与操作来选择边缘及振铃, 并将结果记为 $E_{n(masked)}$. 复原图像保留了退化图像的边缘, 退化图像边缘附近产生的新的边缘则主要代表了复原图像中的振铃, 振铃效应的评价准则为

$$RM = \left[\sum_i \sum_j E_{n(\text{masked})} - \sum_i \sum_j E_{\text{ref}} \right] / \sum_i \sum_j E_{\text{ref}} \quad (17)$$

4 实验及结果分析

分别采用文献[14]~[16]中所提的算法及本文算法对遥感图像、航拍图像与汽车图像进行图像复原对

比实验.

4.1 遥感图像

图 6(a)遥感图片来源于 NASA^[22],是理想遥感图像(受到可忽略湍流影响),为 8 位灰度图像,大小为 480×480 . 图 6(b)为受到剧烈湍流模糊影响的图像,退化参量为 $\alpha=0.0025$,在估计 PSF 时,固定 $\beta=5/6$.

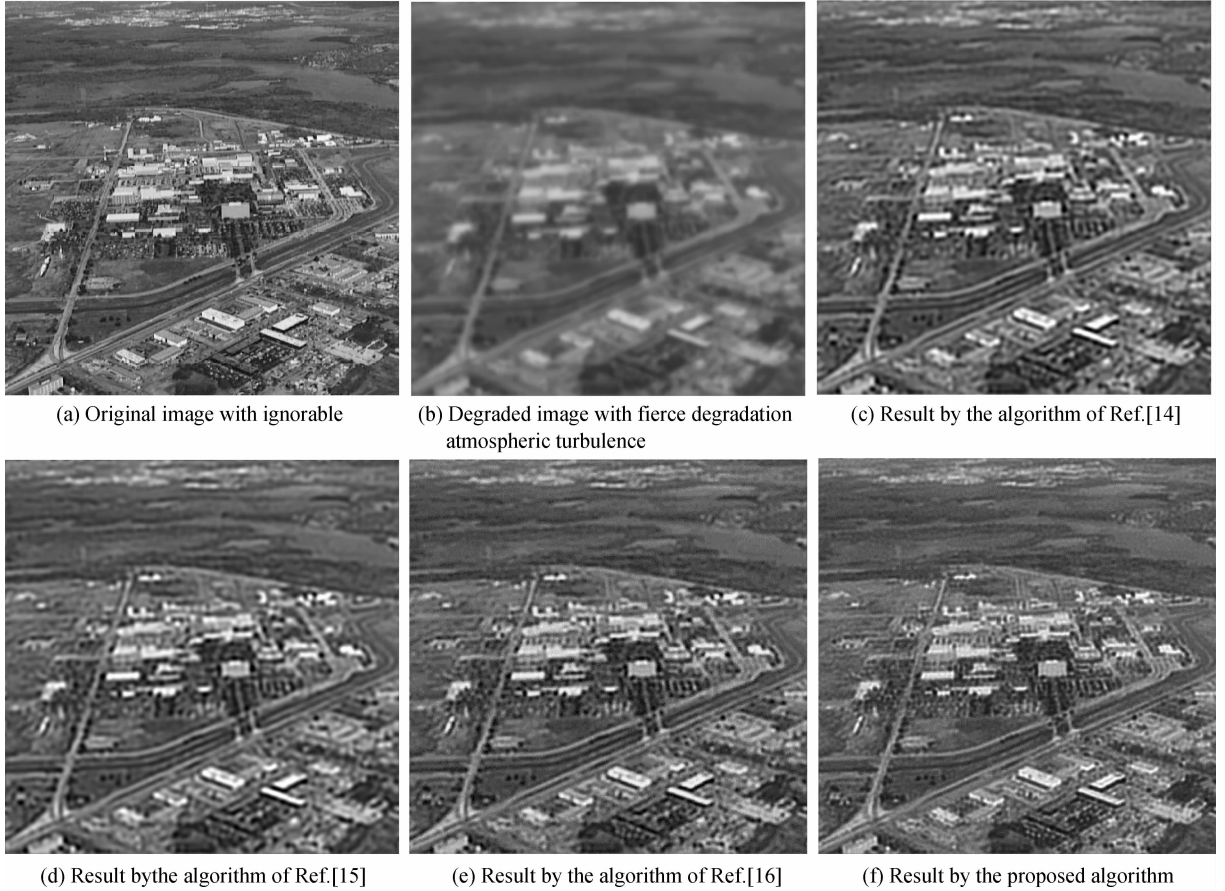


图 6 不同算法对湍流模糊退化的遥感图像的复原结果比较

Fig. 6 Comparison of different algorithms for restoration of the remote sensing image degraded by atmospheric turbulence

对比图 6(c)~(f)可以看出,本文算法较好地复原出了湍流模糊图像中的细节;文献[14]的算法虽然同样恢复出了图像的细节,但图像中如建筑物和道路附近都出现了明显的振铃效应;文献[15]算法的振铃效应更加明显.由表 1 可知,本文算法的 NMSE 和 RM 值最小,PSNR 值最大.与其他三个复原结果比较,图 6

(f) 的 NMSE 值分别减小了 43.4%,54.26% 和 22.22%.虽然本文算法的 LS 值小于文献[14]、[15]算法所得的值,但由于振铃效应会产生本身不存在的边缘,LS 算法将振铃效应当作图像细节,使得其评价结果与人眼观测的结果恰好相反,这也说明 LS 算法难以客观反映图像复原的效果.

表 1 图 6 的数据分析

Table 1 Statistical data of Fig. 6

	(α, β)	Estimated (α, β)	NMSE	PSNR	LS	RM
Degraded image	(0.002 5, 5/6)		0.039 2	21.54	4.008	-
Algorithm of Ref. [14]	-	(0.003 517, 5/6)	0.028 5	22.93	24.49	0.265 8
Algorithm of Ref. [15]	-	(0.003 755, 5/6)	0.035 2	22.01	25.95	0.273 6
Algorithm of Ref. [16]	-	(0.003 157, 5/6)	0.020 7	24.32	21.83	0.249 8
Proposed algorithm	-	(0.002 643, 5/6)	0.016 1	25.41	18.49	0.200 6

本文算法只需 0.742 s 即可在一台笔记本电脑上 (CPU: Intel i5-3337 双核 1.80 GHz, 内存: 4GB) 恢复

图 6(b). 时间主要消耗在 PSF 估计环节,对 PSF 曲线进行非线性最小二乘拟合的时间为 0.395 s, 超过整个

算法运行时间的一半,此处用到了递归方法,这也是本文算法中唯一用到迭代或递归环节的地方.

4.2 航拍图像

图 7(a)为航拍图像,针对图 7(a)加入 $\alpha=0.002$ 的

湍流模糊,如图 7(b). 因为加入的是合成的湍流模糊,在估计 PSF 时,固定 $\beta=5/6$.

对比图 7(c)~(f)可以看出,本文算法较好地复原出了湍流模糊图像中的细节,图 7(c)虽然同样恢复出

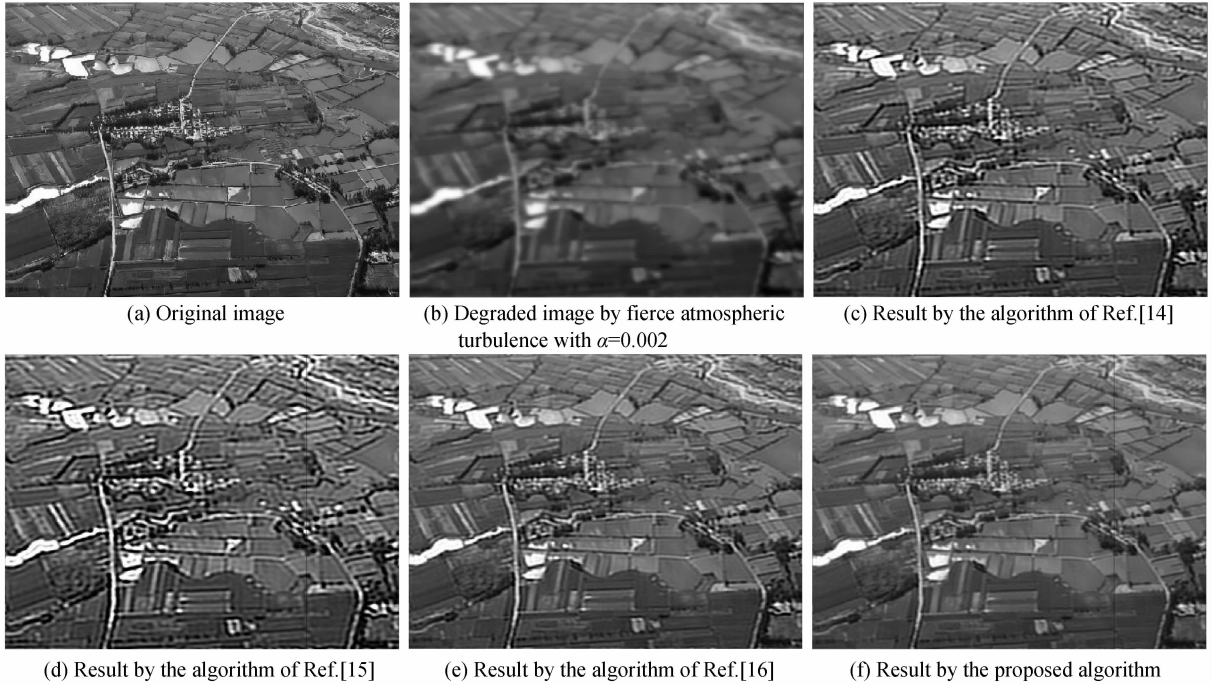


图 7 不同算法对湍流模糊退化的航拍图像的复原结果比较

Fig. 7 Comparison of different algorithms for restoration of the aerial image degraded by atmospheric turbulence

了图像的细节,在池塘和水渠等边缘都出现了明显的振铃效应,图 7(d)的振铃效应更为严重;图 7(e)的振铃效应比(c)和(d)小,但是在图中的道路附近,仍能观测到比较明显的振铃效应.由表 2 可知,本文算法估计得到的 PSF 值与所添加的模糊最为接近;图 7(f)的

NMSE 和 RM 值最小,PSNR 值最大;与其他三个复原结果比较,图 6(f)的 RM 值分别降低了 42.53%、32.60%和 13.03%. 图像复原时,如果采用不准确的 PSF,会导致振铃效应的增加.本文算法可以估计出更准确的 PSF,有效地抑制振铃效应.

表 2 图 7 的数据分析

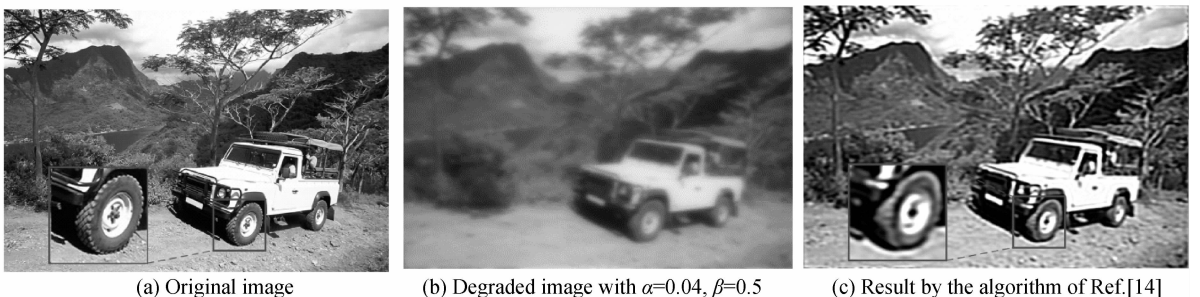
Table 2 Statistical data of Fig. 7

	(α, β)	Estimated (α, β)	NMSE	PSNR	LS	RM
Degraded image	(0.002, 5/6)	-	0.043 1	21.47	3.154	-
Algorithm of Ref. [14]	-	(0.003 822, 5/6)	0.042 3	21.20	13.47	0.343 4
Algorithm of Ref. [15]	-	(0.003 822, 5/6)	0.067 9	19.58	19.34	0.291 1
Algorithm of Ref. [16]	-	(0.002 706, 5/6)	0.031 8	22.79	15.57	0.225 6
Proposed algorithm	-	(0.002 109, 5/6)	0.024 5	24.11	12.87	0.196 2

4.3 汽车图像

图 8(a)为普通 8 位灰度的汽车图像,对图 8(a)加

入 $\alpha=0.04, \beta=0.5$ 的 G 类模糊,如图 8(b),这种模糊符合 Lorentzian 分布.



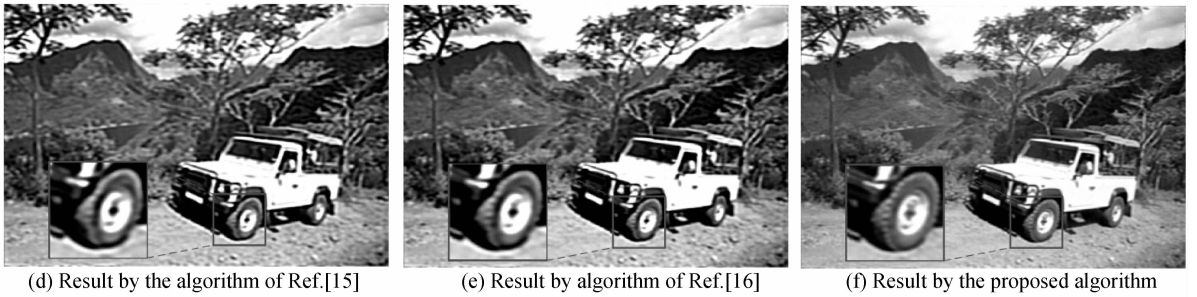


图8 不同算法对洛伦兹模糊退化的汽车图像的复原结果比较

Fig. 8 Comparison of different algorithms for restoration of the jeep image degraded by Lorentzian

表3 图8的数据分析

Table 3 Statistical data of Fig. 8

	(α, β)	Estimated (α, β)	NMSE	PSNR	LS	RM
egraded image	(0.04, 0.5)	-	0.066 6	17.19	2.431	-
Algorithm of Ref. [14]	-	(0.048 86, 0.528 0)	0.048 0	18.62	12.38	0.225 2
Algorithm of Ref. [15]	-	(0.061 63, 0.5)	0.050 6	18.39	12.53	0.217 6
Algorithm of Ref. [16]	-	(0.107 5, 0.420 0)	0.051 1	18.35	12.86	0.221 0
Proposed algorithm	-	(0.529 1, 0.474 3)	0.032 9	20.25	11.78	0.167 4

从图8中可以看出,本文算法可以较好地恢复退化图像的细节,尤其是可以看清轮胎的细节纹路,同时,对树叶的细节恢复也好于其他图片;图8(c)和(d)虽然复原出了退化图像中的细节,但是无法恢复出轮胎的细节,同时出现了比较明显的振铃效应;图8(e)算法振铃效应不明显,但是去模糊效果不佳,无法恢复出图像中树叶的细节和轮胎的纹路。

5 结论

本文提出基于指数律分布的图像快速盲复原算法。该算法针对原始图像频率特征的估计,利用自然图像的指数律分布重建原始图像的频谱,得到更加精准的PSF估计值,从而取得理想的恢复效果,大大降低了图像恢复中的振铃效应;采用多方向的综合估计代替一次性估计,减少随机噪声等因素对估计的影响,增强了算法的抗干扰能力,提高了算法的稳定性;采用维纳滤波法对模糊图像进行复原,更有效地抑制噪声;算法只是在对PSF曲线进行拟合时调用了递归程序,算法复杂度低,流程简明。该算法克服了APEX算法的局限性,可以对湍流模糊、高斯模糊为代表的G类点扩散函数造成的图像退化进行有效的复原。

参考文献

- [1] KATSAGGELOS A K. Digital image restoration [M]. Springer Publishing Company, Incorporated, 2012; 24-41.
- [2] CHAUDHURI S, VELMURUGAN R, RAMESHAN R. Blind deconvolution methods: a review [M]. Springer International Publishing, 2014; 37-60.
- [3] CAO Lei, CHEN Hong-bin, QIU Qi, et al. Research status of blind restoration[J]. *Chinese Optics*, 2014, **7**(1): 68-78.
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.
- [4] MIURA N, BABA N. Extended-object reconstruction with

sequential use of the iterative blind deconvolution method[J]. *Optics Communications*, 1992, **89**(5): 375-379.

- [5] CAO lei, CHEN Hong-bin, QIU qi, et al. Blind image deconvolution based on power law distribution applied in optoelectronic detection system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(3): 0308007.
曹雷, 陈洪斌, 邱琪, 等. 基于指数律分布的快速盲图像解卷积在光电探测系统中的应用[J]. *中国激光*, 2015, **42**(3): 0308007.
- [6] KUNDUR D, HATZINAKOS D. A novel blind deconvolution scheme for image restoration using recursive filtering [J]. *IEEE Transactions on Singal Processing*, 1998, **46**(2): 375-390.
- [7] WANG W, NG M K. Convex regularized inverse filtering methods for blind image deconvolution[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2016, **10**(7): 1353-1360.
- [8] LIU Jun, HUANG Ting-zhu, SELESNICK I W, et al. Image restoration using total variation with overlapping group sparsity[J]. *Information Scineces*, 2015, **295**: 232-246.
- [9] GUO X, MA Y. Generalized tensor total variation minimization for visual data recovery[C]. 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Reognition (CVPR), 2015; 3603-3611.
- [10] RENU M R, SUBHASIS C, RAJBABU V. Convergence analysis of a quadratic upper bounded TV regularizer based blind deconvolution[J]. *Signal Processing*, 2015, **106**: 174-183.
- [11] CARASSO A S. Direct blind deconvolution [J]. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 2001, **61**(6): 1980-2007.
- [12] CARASSO A S. The APEX method in image sharpening and the use of low exponent Lévy stable laws[J]. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 2003, **63**(2): 593-618.
- [13] ZHANG J, ZHANG Q. Noniterative blind image restoration based on estimation of a significant class of point spread functions[J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(7): 077005.
- [14] XIE Sheng-hua, ZHANG Qi-heng, SU Ding. The improved image restoration algorithm based on APEX method[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **32**(2): 185-188.
谢盛华, 张启衡, 宿丁. 基于 APEX 方法的改进图像复原算

- 法[J]. 激光与红外, 2007, **32**(2): 185-188.
- [15] LUO Y, FU C. Midfrequency-based real-time blind image restoration via independent component analysis and genetic algorithms[J]. *Optical Engineering*, 2011, **50**(4): 047004.
- [16] GE Qi, ZHANG Hong, WANG Ke-dong, *et al.* Estimation of point spread function for long-exposure atmospheric turbulence-degraded images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(4): 1327-1331
葛琪, 张弘, 王可东. 长曝光大气湍流退化图像点扩散函数估计[J]. 红外与激光工程, 2014, **43**(4): 1327-1331.
- [17] DRUMMOND J D, REYNOLDS O R, BUCKMAN M D. The orbit and size of (87) Sylvia's Romulus from the 2015 apparition[J]. *Icarus*, 2016, **276**: 107-115.
- [18] OLIVEIRAJ P, FIGUEIREDOM T, JOSÉ M. Parametric blur Estimation for blind restoration of natural images: linear motion and out-of-focus[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, **23**(1): 466-476
- [19] DYAKOVA O, LEE Y J, LONGDEN K D, *et al.* A higher order visual neuron tuned to the spatial amplitude spectra of natural scenes [J]. *Nature Communications*, 2015, **6**(9): 503-511.
- [20] ANDREA D C, MASTRIAS, CODISPOTI M. Early spatial frequency processing of natural images: an ERP study [J]. *Plos One*, 2013, **8**(5): e65103.
- [21] BALASUBRAMANIAN M, IYENGAR M M, REYNAUD J, *et al.* A ringing metric to evaluate the quality of images restored using iterative deconvolution algorithms [C]. 18th International Conference on Systems Engineering, 2005: 483-488.
- [22] GONZALEZ R C, Woods R E. Digital image processing, 3rd edition [DB]. [2008]. [http://www. imageprocessingplace. com/root_files_V3/image_databases. htm](http://www.imageprocessingplace.com/root_files_V3/image_databases.htm).