

文章编号 1004-924X(2016)05-1159-09

基于光纹特征的激光主动照明图像去模糊

王灿进^{1*}, 石宁宁², 孙涛¹, 王锐¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 北京航天自动控制研究所 宇航智能控制国家重点实验室, 北京 100039)

摘要:受光学系统离焦、大气扰动、平台振动的影响,激光主动照明系统捕获的图像容易被模糊,而传统的去模糊方法难以取得良好的复原效果,故本文提出基于光纹特征的盲解卷积复原方法来实现图像去模糊。首先将模糊图像降采样,建立尺度金字塔,在尺度空间查找光纹特征图像块。随后基于激光主动照明图像饱和和像素较多的特点,提出新的图像退化模型。最后针对模糊核估计、光纹参数更新、清晰图像复原 3 个步骤,提出适用的能量函数,迭代复原出无噪清晰图像。搭建了主动照明系统,在捕获的激光主动照明图像上进行了实验,并与现有方法进行了对比。结果表明:本文方法不仅能够复原出清晰图像,而且能有效抑制振铃效应,其客观评价指标峰值信噪比(PSNR)优于已有的其他算法。

关键词:激光主动照明;图像去模糊;光纹特征;能量函数;振铃效应

中图分类号:TN957.52;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162405.1159

Image deblurring for laser active illumination based on light vein features

WANG Can-Jin^{1*}, SHI Ning-ning², SUN Tao¹, WANG Rui¹

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. State Key Laboratory of Aerospace Intelligent Control,

Beijing Aerospace Automatic Control Research Institute, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: wcyjsh@126.com

Abstract: The images captured by a laser active illumination system are easily blurred by optical system defocus, atmospheric disturbance and platform vibration, and traditional deblurring methods can not achieve good image restoration. Therefore, this paper proposes a blind deconvolution restoration method based on light vein features to implement the image deblurring. Firstly, the blurred images were down-sampled, a scale pyramid was established, and the light vein patches were searched along a scale space. Then, according to the laser illumination imaging characterized by more saturated pixels, a new nonlinear image degradation model was proposed. Finally, to implement the three steps, blurred kernel estimation, light vein patch renewal and the image restoration, the proper energy function was proposed and the latent image without noise was iterated and recovered. A laser active illumination system was established and the experiments were performed on the images captured by the system and compared with state-of-art deblurred methods, The experiment results indicate that the proposed method not only obtains more clear images, but also availably suppresses ringing

收稿日期:2015-06-30;修订日期:2015-08-28.

基金项目:长春市科技计划资助项目(No. 2013270)

artifacts, and its Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) is superior to that of other algorithms.

Key words: laser active illumination; image deblurring; light vein feature; energy function; ringing artifact

1 引言

激光主动照明技术是一种利用激光准直性和单色性,进行目标主动探测的成像技术,目前已广泛应用于水下、夜间等环境光较暗的场景。因为较暗场景的光强有限,势必需要增大相机的积分时间,以增强图像的可视性。在大的积分时间下,光学系统离焦、成像装置抖动、大气扰动等原因容易导致图像模糊退化,影响成像质量。因此有必要开展激光主动照明系统模糊复原技术的研究。

图像复原就是根据先验知识(例如系统的点扩散函数、噪声的分布特性等),从模糊图像恢复出清晰锐利图像的过程。传统的图像复原方法包括迭代盲解卷积算法、非负支撑域递归逆滤波、维纳滤波、全变分图像盲复原等。这些方法的数学模型较为简单,在特定情况下能取得良好的复原效果,但在图像信噪比较低时,复原性能迅速下降。近年来,学者们提出了许多新的复原方法,例如 Cai 等^[1]在小波紧框架下通过对原始图像和模糊核函数进行规范化约束,提出了自适应的分裂 Bregman 方法,对能量方程最小化求解;Cho 等^[2]通过预测图像强边缘信息,提取图像结构建立正则化方程,实现快速图像盲复原;Krishnan 等^[3]通过构建尺度不变正则化稀疏方程,以保持图像的高频分量,该方法计算简单且复原效果良好;Fergus 等^[4]研究了清晰图像和模糊图像的概率分布,并构造二者的联合后验概率函数,再最大化该函数以求取原始图像和模糊核;Shan 等^[5]提出在模糊图像的低对比度区域,引入局部平滑项用以抑制振铃效应;Xu 等^[6]提出一种基于最大后验概率(Maximum a Posteriori, MAP)的复原方法。该方法使用新的 L_0 稀疏表达式,不需要额外的滤波过程,对含噪图像具有较好的去模糊效果;Yuan 等^[7]使用两幅图像估计模糊核函数,并提出二次解卷积法用于去除单次解卷积产生的振铃现象;Goldstein 等^[8]提出白化谱域公式以估计模糊核的能量谱分布;Tai 等^[9]提出一种迭代复原含噪图像的盲解卷积策略,对图像进行交替滤波和解卷积;王国栋等^[10]根据图像梯度分布的概率特

性,使用超拉普拉斯先验项作为正则项,有利于解的正确收敛;李伟红等^[11]使用 L_1 范数作为保真项,总变分(Total Variation, TV)范数作为正则项,以消除复原图像中的阶梯效应;王莎等^[12]将两步迭代阈值收缩与总变分约束相结合,在抑制边缘模糊的同时加速复原过程;杨亚威等^[13]首先使用离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)分解图像,在不同子带上计算察觉失真阈值,并使用两断对分程序调整通道权值。以上方法使用边缘、纹理和梯度等图像特征帮助估计模糊核函数,在图像光照充足、纹理细节清晰的条件下能够获得良好的处理效果。但是在激光照明成像中,光强较弱导致难以准确提取目标边缘细节信息,另外,散斑噪声容易引入虚假边缘,导致现有复原算法失效。经过充分调研发现,公开发表的文献中,暂无专门针对激光主动照明图像复原的研究。

本文提出一种基于光纹区域的盲解卷积复原方法,通过筛选图像中的光纹区域,并据此迭代估计模糊核函数,克服了主动照明中弱光条件带来的影响。接着,本文建立了激光主动成像的图像退化模型,最后估计出清晰图像。实验证明与已有算法相比,所提算法在低照度条件下能够获得更好的复原效果,并能有效抑制振铃效应。

2 光纹定义与光纹区域提取方法

2.1 光纹定义

定义:在弱光条件下,由于光源抖动、传输介质扰动等原因导致光点运动而在 CCD 像面产生的亮条纹称为光纹。

根据定义可知,在光点很小的情况下,光纹可以近似描述图像模糊核。在激光主动照明图像中,像面上存在大量的离散光点,经过模糊后会生成较多光纹区域。只需要找到那些由足够小的光点(点光点)生成的光纹区域,就可以据此估计出图像退化的模糊核,从而进行复原。

符合要求的光纹区域应该具有以下性质:光纹的灰度值较大,允许部分区域达到饱和;高亮像素分布较紧密,条纹细长,边缘清晰;除光纹外,其

余背景较干净。这样的光纹区域受噪声污染较小,据此估计出的模糊核较为准确。

2.2 光纹区域提取方法

为找到符合以上要求的光纹区域,本文提出一种多尺度光纹区域提取方法:

(1)对降质图像降采样并用高斯核函数卷积,建立 n 层尺度金字塔。

(2)将每层金字塔分为 $s \times t$ 的有重叠小块。对每个分块 P_{ij} ,使用 Otsu 阈值分割法选取阈值 T_{ij} (即将 T 遍历 $0 \sim 255$,并计算前景与背景的方差,取方差最大的阈值作为最终的分割阈值 T_{ij}),对图像进行二值化,灰度大于该阈值,该像素取 1,否则取 0,生成二值图像 Q_{ij} 。

(3)统计每个分块 Q_{ij} 中像素值为 1 的个数 N_{ij} ,其中 $i=1, \dots, n$,为尺度空间的层数, $j=1, \dots, s \times t$,为每层图像块索引。假设 Q_{ij} 的总像素个数为 NT_{ij} ,若 $N_{ij}/NT_{ij} < 20\%$,则跳转至步骤(4),否则舍弃该图像块,继续执行本步骤。

(4)找到 P_{ij} 中灰度值最大的像素位置 $(x_{\max_{ij}}, y_{\max_{ij}})$,在 Q_{ij} 中从对应的 $(x_{\max_{ij}}, y_{\max_{ij}})$ 开始,沿着像素为 1 的方向向两端生长,并对生长路径上的像素个数 NR_{ij} 进行累加。如果生长超出 Q_{ij} 边界,说明所取的 Q_{ij} 未包含完整光纹,舍弃该图像块,继续执行本步骤。若生长完毕后, $NR_{ij}/N_{ij} < 50\%$,说明块中噪声较大或者条纹较多,同样舍弃该图像块并继续执行本步骤。否则转到步骤(5)。

(5)对符合条件的图像块进行插值,得到候选光纹区域 $\varphi = \{Center(x_{ij}, y_{ij}), W_{ij}, H_{ij}\}$,其中 $Center$ 为候选区域的中心, W_{ij} 和 H_{ij} 为候选区域的宽和高。

得到候选光纹区域后,需要从中找到最佳光纹区域 P_0 。再使用该光纹区域,近似估计整幅图像的模糊核函数。

细小光点运动模糊所形成的光纹运动轨迹都类似,在包含较少噪声的情况下,直方图也是相似的。为此定义光纹区域的筛选方法为:对 $\varphi = \{Center(x_{ij}, y_{ij}), W_{ij}, H_{ij}\}$ 中的所有元素,统计灰度直方图,对直方图进行 K-means 聚类,经过若干次迭代之后,将直方图较为接近的类归并在一起,直方图差别较大的类则被分开。此时将最大类的聚类中心规定为最佳光纹区域 P_0 ,最大类中的集合为满足条件的光纹区域集合 $\varnothing = \{P_0, P_1, \dots\}$ 。

3 基于光纹区域的运动模糊复原

3.1 激光主动成像退化模型

引言已经提到,激光主动照明条件下,边缘信息较少且容易受噪声影响,难以准确提取。本文采用光纹区域代替边缘信息,用以估计模糊核函数。

在激光主动照明系统中,为区分光纹区域和非光纹区域,将退化公式改写为如下形式:

$$\begin{cases} P_i = h * S_i + n \\ g^{\text{rem}} = \text{gain} \cdot (h * f + n) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: P_i 表示计算得到的光纹区域, g^{rem} 表示光纹区域以外的图像区域,包括饱和区域和非饱和区域。 gain 为 ICCD 的动态增益。在饱和区域, $g^{\text{rem}}(x, y) = 255$,在非饱和区域, gain 为常数。 h 为模糊核函数, S_i 表示形成光纹区域的光点,每个 P_i 对应一个 S_i 。在 S_i 足够小的情况下,将其近似为半径 r_i 、亮度为 l_i 的圆。在 P_i 已知时,只需要估计 $S_i(r_i, l_i)$,即可根据式(1)推出 h 。

3.2 估计模糊核函数 h

本文使用能量方程迭代估计 h 和 S_i 。 S_i 的初值估计越准确,迭代次数越少,算法收敛越快。因此首先对 S_i 的初值 $l_{i,0}$ 和 $r_{i,0}$ 进行估计。

对 P_i 使用对应的 T_{ij} 进行二值化(T_{ij} 即为光纹区域提取中的分割阈值),得到二值图 Q_i ,则 $l_{i,0}$ 可由下式得到:

$$l_{i,0} = \text{mean}(P_i(x, y) | \forall Q_i(x, y) = 1), \quad (2)$$

式中 $\text{mean}(\cdot)$ 表示求均值。上式的数学意义是:对 Q_i 中取值为 1 的像素,在 P_i 的对应位置取出像素值并求平均,将其作为光点亮度初始估计值。采用光点运动轨迹的平均值作为亮度估计,二值化削弱了背景的影响,而求均值有利于削弱孤立噪声,因此可认为依据上式的估计值是准确的。

对 r_i ,取其初始值 $r_{i,0}$ 为:

$$r_{i,0} = \text{round}(NT_{ij}/\sqrt{2N_{ij}}), \quad (3)$$

式中: $\text{round}(\cdot)$ 表示取整。 $r_{i,0}$ 是假设光点呈对角线运动而得到的光点半径,也即最小光点半径。

为准确估计模糊核函数 h ,借鉴参考文献[2],定义能量函数 f_h 为:

$$f_h(h) = \sum_{(x,y) \in \text{rem}} \omega_* \|h * P_* - g_*\|^2 + \alpha \|h\|^2 + \beta \sum_i \sum_{(x,y) \in P_i} \|S_i * h - P_i\|^2, \quad (4)$$

式中: $\omega_* = \{\omega_1, \omega_2\}$ 为常系数, P_* 表示原始清晰图像在各个方向上的梯度, g_* 表示模糊图像在各个方向上的梯度, 即:

$$\begin{aligned} (P_*, g_*) = & \{(P_x, \partial_x g), (P_y, \partial_y g), \\ & (\partial_x P_x, \partial_{xx} g), (\partial_y P_y, \partial_{yy} g), \\ & ((\partial_x P_y + \partial_y P_x)/2, \partial_{xy} g)\}. \end{aligned} \quad (5)$$

式(4)的第一项称为梯度保真项, 以保证在 x 和 y 方向上复原图像与观测图像具有梯度相似性; 第二项称为光滑项, 以保证核函数 h 没有突变, 使估计出的核函数更接近真实值; 第三项为数值保真项, 用以保证根据模糊核函数计算出的光点模糊和观测光纹具有一致性。根据文献[2]可知, P_* 计算方法如下: 首先对原始图像作一次双边滤波, 以抑制噪声, 随后对图像作 shock 滤波以增强边缘, 最后作一次强梯度抑制, 进一步去除孤立噪声。双边滤波、shock 滤波和梯度抑制阈值选取方法见参考文献[2], 在此不加赘述, 取 $\alpha = \beta = 5$ 。

式(4)可简单改写为:

$$f_h(\mathbf{h}) = \|\mathbf{A}\mathbf{h} - \mathbf{b}\|^2 + \alpha \|\mathbf{h}\|^2 + \beta \|\mathbf{S}\mathbf{h} - \mathbf{p}\|^2, \quad (6)$$

式中: \mathbf{h} 、 \mathbf{A} 、 \mathbf{b} 、 \mathbf{S} 、 \mathbf{p} 均表示向量。为解 \mathbf{h} , 对上式求导并令其为 0, 可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_h(\mathbf{h})}{\partial \mathbf{h}} &= 2\mathbf{A}^T \mathbf{A}\mathbf{h} + 2\beta \mathbf{h} - \\ & 2\mathbf{A}^T \mathbf{b} + 2\mathbf{S}^T \mathbf{S}\mathbf{h} - 2\mathbf{S}^T \mathbf{p} = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

解上述方程, 就可以得到模糊核 h 的估计。

3.3 估计原始光点 S_i

此步骤用以更新光点形状变量, 定义能量函数 $f_{S_i}(S_i)$ 为:

$$f_{S_i}(r_i, l_i) = \|S_i * h - P_i\|^2 + \|S_i - f_i\|^2, \quad (8)$$

式中: f_i 表示在原始清晰图像上对应 P_i 位置处的像素值, r_i 是光点的半径, l_i 是光点的灰度值。式(8)第一项为保真项, 用以保证根据模糊核函数计算出的光点模糊和观测光纹的一致性, 第二项也是保真项, 用以保证估计的光点 S_i 与原始清晰图像上光点的一致性。

3.4 估计原始清晰图像 f

经过 3.2 和 3.3 之后, 已经得到模糊核函数 h 和光斑形状变量 S_i 的估计, 接下来便可以估计原始清晰图像。为此, 定义能量函数 f_f 为:

$$f_f(f) = \sum_{\partial_*} \omega_* \|h * \partial_* f - \partial_* g\|^2 + \gamma \|\nabla f\|^2, \quad (9)$$

式中: $\omega_* = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3\}$ 为梯度加权系数, $\partial_* = \{\partial_x, \partial_y, \partial_{xx}, \partial_{yy}, \partial_{xy}\}$ 表示求各个方向的梯度, ω_* 的取值见参考文献[14], $\gamma = 0.1$ 。式(9)第一项包括数值和梯度保真项, 以保证复原图像的灰度值和梯度的准确性, 第二项为正则光滑项, 用以保证去模糊图像的梯度平滑。根据能量函数(9)估计出的 f 能够保证最接近被模糊之前的真实图像, 同时保证图像的光滑性。最小化能量函数 f_f 可以估计出原始清晰图像 f , 至此完成一次迭代过程。与文献[2, 8-9]中的非盲解卷积方法相比, 本文方法原理较为简单, 经过模糊核估计中的双边滤波、shock 滤波, 消除了噪声, 得到的复原结果能有效抑制振铃现象。

3.5 复原算法流程

本文算法为迭代复原算法, 首先根据模糊图像估计模糊核函数, 随后根据模糊核更新光点参数, 最后估计原始清晰图像, 完成一次迭代过程, 算法流程如图 1 所示。因为首先对光纹初值 $l_{i,0}$ 和 $r_{i,0}$ 进行了估计, 因此经过少数几次迭代之后, 就可以估计出令人满意的复原图像。

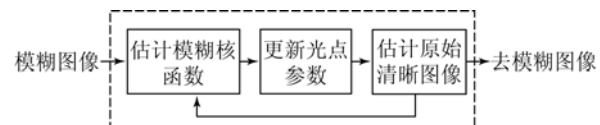


图 1 本文复原算法流程图

Fig. 1 Flowchart of proposed method

4 实验

为证明本文算法对激光主动照明图像的复原效果, 搭建激光照明系统来采集图像, 进行实验验证。系统的实验框图如图 2 所示, 整个系统由激光发射装置、激光接收装置和图像处理装置 3 部分组成, 激光发射装置和激光接收装置对称安装于伺服转台上。本文用半导体泵浦固体脉冲激光器发射脉宽为 8 ns、波长为 532 nm 的脉冲激光, 使用 Lambert ICCD 以 25 fps 的帧频接收目标反射的光信号, 生成图像并通过 cameralink 接口向工控机传输。采用距离选通技术控制相机曝光, 以抑制杂散光。在工控机上编写运行本文算法, 完成复原过程, 最终输出清晰的复原图像。软件编程环境为: i7-2600 3.40 GHz CPU、4 G 内存。

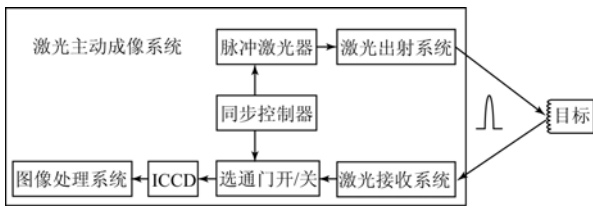


图 2 实验系统框图

Fig. 2 Block diagram of experimental system

目标选为 3 km 处的塔和 3.5 km 处的房顶。发射脉冲激光照射远处目标,调节选通时间,采集主动照明图像。由于激光发散角的限制,照明视场较小,得到大小为 150 pixel×150 pixel 的照明目标图像,如图 3(a)和图 4(a)所示。

为定量衡量复原算法的性能,引入峰值信噪比 (PSNR)作为客观评价指标,PSNR 的计算公式为^[15]:

$$PSNR = 10 \lg(Q^2 / f_{MSE}), \quad (10)$$

式中:Q 为图像量化级数, f_{MSE} 计算公式为:

$$f_{MSE} = \frac{1}{MN} \sum_x \sum_y [f(x, y) - f'(x, y)]^2, \quad (11)$$

式中: M、N 为图像的宽和高, $f(x, y)$ 为模糊之前的图像, $f'(x, y)$ 为复原后的图像。

由公式(11)可知,计算 PSNR 需要模糊之前的图像作为参照。为此,首先令平台静止,采集主动照明清晰图像,并令图像产生长度为 15 像素,方向为逆时针 45°的运动模糊,结果如图 3(b)和图 4(b)所示。

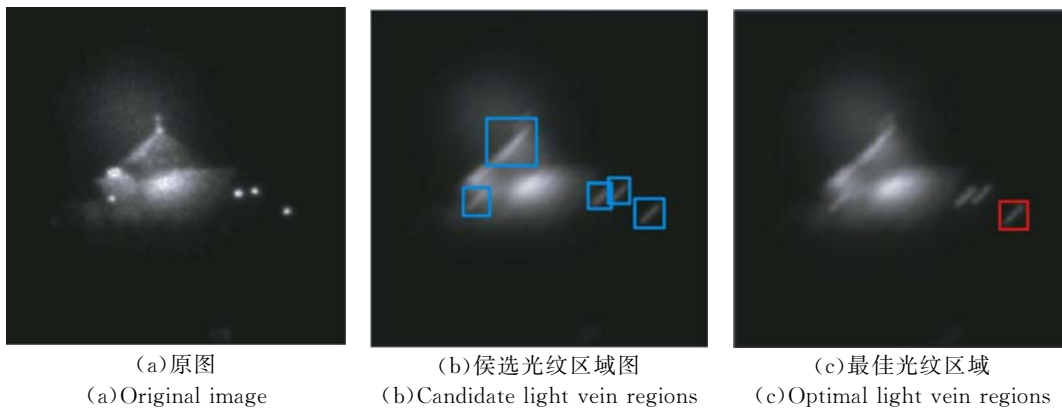


图 3 激光主动照明下的房顶目标像及光纹区域

Fig. 3 Roof image and its light streak regions in laser active illumination

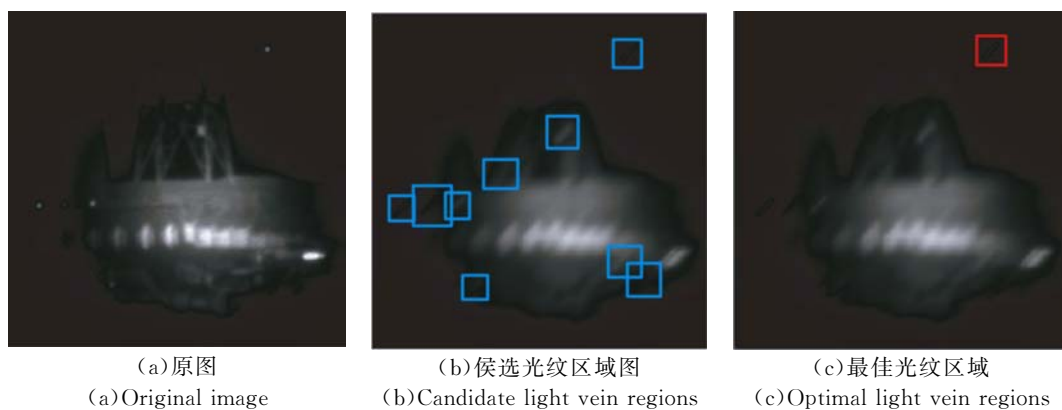


图 4 激光主动照明下的塔目标像及光纹区域

Fig. 4 Tower image and its light streak regions in laser active illumination

从图 3(a)、图 4(a)(彩图见期刊电子版)可以观察到,与白昼条件下的可见光图像相比,激光主动照明下整个场景的照度相对偏暗,且存在大量

分布不均的散斑斑块。从图 3(b)和图 4(b)可见,运动模糊情况下,目标边缘和散斑边缘都出现严重模糊,且出现了形状与模糊核相似的光纹。蓝色框

是经过 2.2 部分(1)~(5)步骤之后得到的候选光纹区域,从主观上可以看出,该方法已将图像中绝大部分小光点的运动轨迹都标识出来了,而对图 3 左部和图 4 下部多个相邻光点或者大光点形成的区域则没有标识,因为大(多个)光点模糊区域无法体现单个光点的运动轨迹。图 3(c)和图 4(c)红色框区域是经过直方图匹配和聚类之后得到的最佳

光纹区域,可以看到最佳光纹区域模糊轨迹清晰,这证明了本文光纹提取算法的有效性。

将本文方法与 Fergus 等^[4]提出的联合后验概率法、Shan 等^[5]提出的似然模型法、Cho 提出的边缘预测法^[2]、Goldstein 提出的白化谱域法^[8]以及 Tai 提出的迭代复原法^[9]进行对比。4 种算法的复原结果如图 5 和图 6 所示。

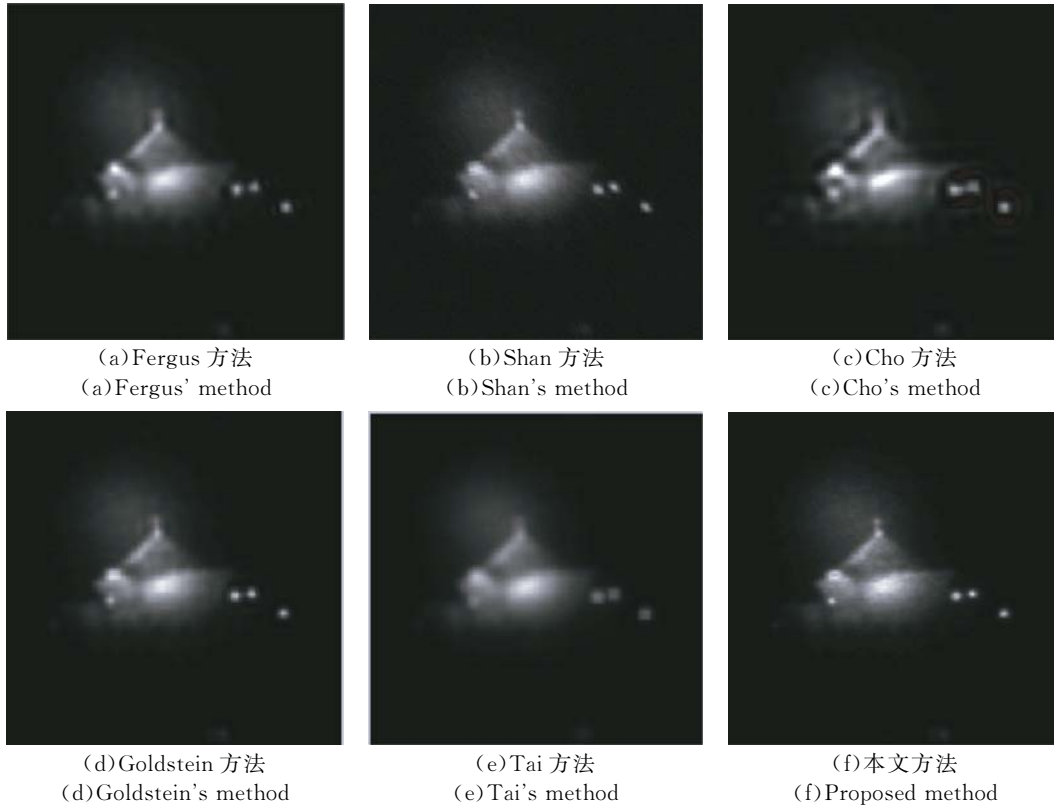
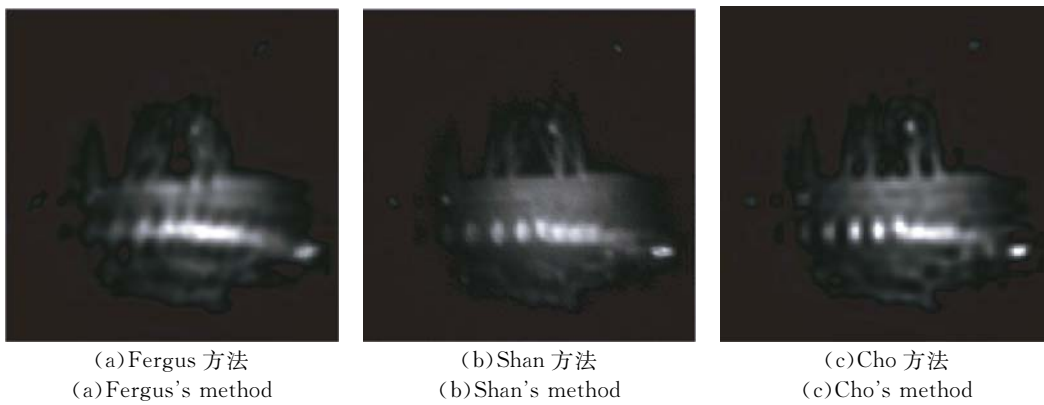


图 5 屋目标的复原结果
Fig. 5 Restoration results of roof image



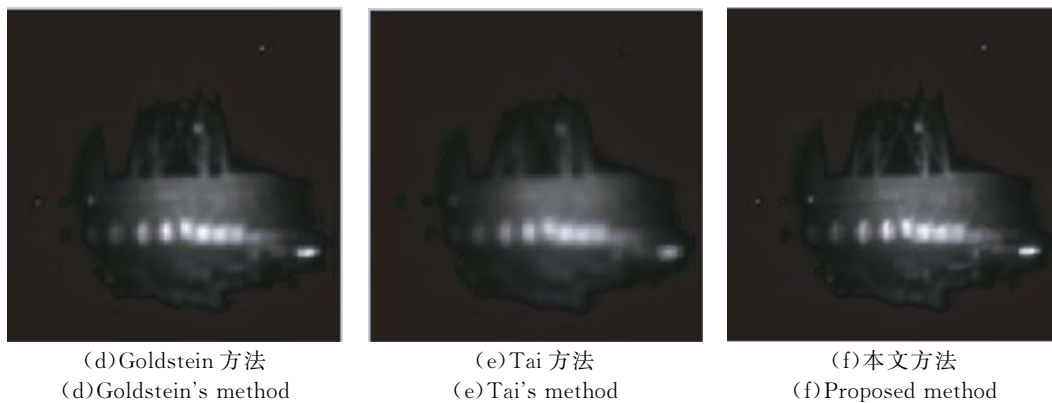


图 6 塔目标的复原结果

Fig. 6 Restoration results of tower image

从图 5(a)、图 6(a)中可以看出,联合后验概率法振铃现象严重,复原效果不理想,这是因为在弱光条件下难以统计出准确的梯度分布模型,缺乏强约束条件;从图 5(b)、图 6(b)可以看出,似然模型法虽然能够有效抑制振铃,但由于在模糊图像的低对比度区域强加了对比度约束,因此复原图像整体不够清晰;从图 5(c)、图 6(c)可以看出,边缘预测法在房顶、塔等目标边缘和散斑边缘处都出现了严重的振铃,这是因为激光主动照明图像对比度较差,边缘估计不准确,同时在散斑噪声附近容易出现虚假边缘,导致模糊核估计误差较大;从图 5(d)、图 6(d)可以看出,白化谱域方法同样出现了振铃现象,边缘模糊严重,这是因为白化谱域方法容易受到噪声影响,估计出错误的模糊

核;从图 5(e)、图 6(e)可以看出,迭代复原法结果图上几乎看不到振铃,但是边缘模糊仍然较为严重,这是因为迭代复原法仅简单地将去噪和模糊核估计分离,每一次迭代中,去噪过程都会给模糊核估计带来误差。以上 5 种方法建立的退化模型过于简单,在激光主动照明条件下无法适用。从图 5(f)、图 6(f)可以看出,本文方法可利用光纹信息估计出较为准确的模糊核,同时由于建立了新的退化模型,故边缘较为清晰,同时有效抑制了振铃现象。

改变模糊步长,分别统计不同算法的 PSNR 值,结果如图 7 所示。由图 7 可知,在不同的模糊条件下,本文算法都能够取得最好的复原效果,这与前文的分析及主观观察结果相符。

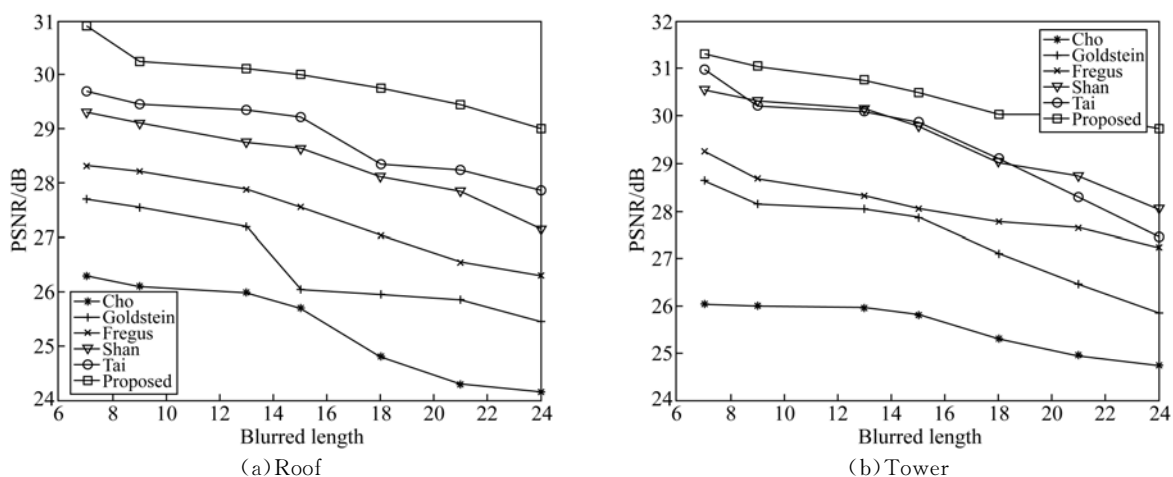


图 7 不同模糊步长下 PSNR 指标对比

Fig. 7 Comparison of PSNR in different blurred lengths

最后,验证本文算法对实际采集的模糊图像的复原性能。控制伺服转台进行方位和俯仰方向运

动,置于转台上的主动成像装置也相对于远处目标进行运动,采集主动照明图像,如图 8(a)所示,可见

目标区域发生较为严重的模糊,边缘难以辨识。使用不同复原算法得到的结果分别如图 8(b~g)所

示,主观效果上,本文复原算法结果优于其余算法,边缘清晰可辨,并且几乎不存在振铃现象。

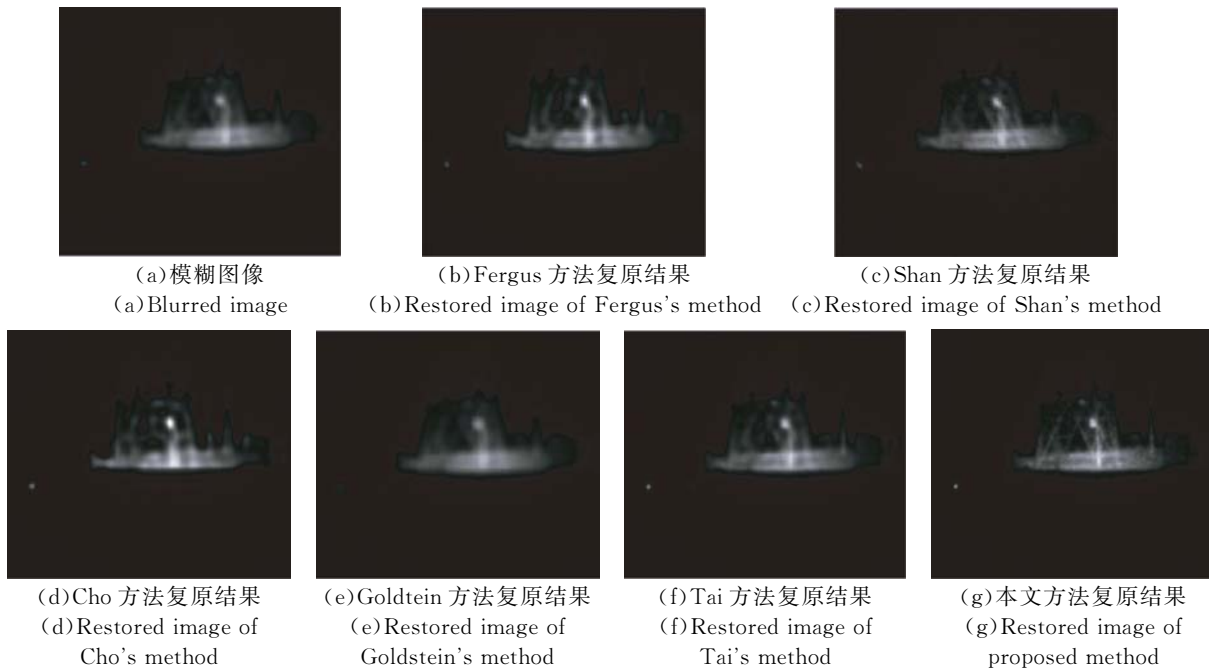


图 8 不同算法对激光主动成像实际模糊目标的复原效果

Fig. 8 Restoration results of different algorithms for real laser active blurred image

最后,统计 4 种算法对实验图像的平均运算时间,结果如表 1 所示。

表 1 4 种方法的单帧运算耗时比较

Tab. 1 Comparison of single frame processing time for four methods (s)

Deblurring methods	Processing time
Fergus's joint probability distributions method	2.295
Shan's probabilistic model method	0.476
Cho's edge prediction method	0.128
Goldstein's spectral whitening method	0.522
Tai's iterative method	2.649
Proposed method	0.019

由表 1 可知,6 种算法中,Tai 提出的滤波迭代方法耗时最长,这是因为该方法在每次迭代中均需要进行滤波与模糊核估计。而本文方法耗时最短,甚至快于 Cho 的边缘预测复原方法,这是因为其先对光纹初值 $l_{i,0}$ 和 $r_{i,0}$ 进行了估计,因此仅经过少数几次迭代之后,就可以估计出令人满意的复原图像。其中,光纹区域的平均筛选时间为 8 ms,占总处理时间的 42%,而单步迭代时间

远小于光纹区域筛选时间。这是因为尺度空间搜索和直方图聚类较为耗时。受激光功率的限制,实验图像的尺寸较小,因此导致提取的候选光纹区域较少,计算时间较短。随着图像尺寸的增加,算法的处理时间也将随之上升。

5 结 论

机载、舰载激光主动照明系统图像容易产生运动模糊。由于图像平均照度较低、散斑噪声严重,传统的去模糊方法难以取得良好的复原效果。因此,提出一种基于光纹特征的激光主动照明去模糊方法。本文根据光纹的概念,在尺度空间中提取合适的光纹区域,用以近似估计模糊核函数。接着针对激光主动照明图像饱和和像素较多的特点,提出了新的退化模型。针对模糊核估计、光纹参数更新、清晰图像复原 3 个步骤,提出适用的能量函数,进行迭代复原。最后搭建了主动照明系统进行试验,结果证明本文复原方法对激光主动照明模糊图像,能够取得比现有方法更好的复原效果,同时可以很好地抑制振铃现象。

参考文献:

- [1] CAI J F, JI H, LIU CH Q, *et al.*. Framelet based blind motion deblurring from a single image [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(2):562-572.
- [2] CHO S, LEE S. Fast motion deblurring [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2009, 28(5):145-152.
- [3] KRISHNAN D, TAY T, FERGUS R. Blind deconvolution using a normalized sparsity measure [C]. *IEEE Transactions on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2011:233-240.
- [4] FERGUS R, SINGH B, HERTZMANN A, *et al.*. Removing camera shake from a single photograph [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2006, 25(3):787-794.
- [5] SHAN Q, JIA J, AGARWALA A. High-quality motion deblurring from a single image [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2008, 27(3):731-740.
- [6] XU L, ZHENG S, JIA J. Unnatural L0 sparse representation for natural image deblurring [C]. *IEEE Transactions on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2013:1107-1114.
- [7] YUAN L, SUN J, QUAN L. Image deblurring with blurred/noisy image pairs [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3):1-10.
- [8] GOLDSTEIN A, FATTAL R. Blur-kernel estimation from spectral irregularities [C]. *European Conference on Computer Vision*, 2012:622-635.
- [9] TAI Y W, LIN S. Motion-aware noise filtering for deblurring of noisy and blurry images [C]. *IEEE Transactions on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2012:17-24.
- [10] 王国栋,徐洁,潘振宽.基于归一化超拉普拉斯先验项的运动模糊图像盲复原[J].*光学精密工程*, 2013, 21(5):1340-1348.
- WANG G D, XU J, PAN ZH K. Blind image restoration based on normalized hyper laplacian prior term [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5):1340-1348. (in Chinese)
- [11] 李伟红,董亚莉,唐述.多范数混合约束的正则化图像盲复原[J].*光学精密工程*, 2013, 21(5):1357-1364.
- LI W H, DONG Y L, TANG SH. Regularized blind image restoration based on multi-norm hybrid constraints [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5):1357-1364. (in Chinese)
- [12] 王莎,陈跃庭,冯华君,等.基于TWIST-TV约束的图像去模糊方法[J].*红外与激光工程*, 2014, 43(6):2000-2006.
- WANG SH, CHEN Y T, FENG H J, *et al.*. TWIST-TV regularization based image deblurring method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6):2000-2006. (in Chinese)
- [13] 杨亚威,李俊山,张士杰,等.基于视觉对比敏感度与恰可察觉失真感知的图像复原[J].*光学精密工程*, 2014, 22(2):459-466.
- YANG Y W, LI J SH, ZHANG SH J, *et al.*. Image restoration based on visual contrast sensitivity and just noticeable distortion perception [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2):459-466. (in Chinese)
- [14] WHYTE O, SIVIC J, ZISSERMAN A. Deblurring shaken and partially saturated images [C]. *International Conference on Computer Vision*, 2011:745-752.
- [15] 姚军财.基于人眼对比度敏感视觉特性的图像质量评价方法[J].*液晶与显示*, 2011, 26(3):390-396.
- YAO J C. Image quality assessment method based on contract sensitivity characteristics of human vision system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(3):390-396.

作者简介:



王灿进(1987—),男,福建龙岩人,博士,助理研究员,主要从事激光主动成像技术研究。E-mail: wcyjsh@126.com