

基于指导滤波的图像盲复原算法

李鑫楠 黄贺艳 贾小宁 马驹良

Guided filter-based blind image restoration method

Li Xin-Nan Huang He-Yan Jia Xiao-Ning Ma Si-Liang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 134202 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.134202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于尺度不变特征变换和区域互信息优化的多源遥感图像配准

Multi-source remote sensing image registration based on scale-invariant feature transform and optimization of regional mutual information

物理学报.2015, 64(12): 124204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124204>

基于多相组重建的航空图像超分辨率算法

Super resolution of aerial image by means of polyphase components reconstruction

物理学报.2015, 64(11): 114208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114208>

编码孔径光谱成像仪光学简化彗差对图谱反演误差分析

Analysis on the simplified optic coma effect on spectral image inversion of coded aperture spectral imager

物理学报.2015, 64(5): 054205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054205>

目标跟踪中目标模型更新问题的半监督学习算法研究

Research on semi-supervising learning algorithm for target model updating in target tracking

物理学报.2015, 64(1): 014205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.014205>

基于深度玻尔兹曼模型的红外与可见光图像融合

Infrared and visible image fusion based on deep Boltzmann model

物理学报.2014, 63(18): 184202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.184202>

基于指导滤波的图像盲复原算法

李鑫楠^{1)†} 黄贺艳²⁾ 贾小宁³⁾ 马驹良¹⁾

1)(吉林大学数学学院, 长春 130012)

2)(长春大学理学院, 长春 130022)

3)(长春理工大学理学院, 长春 130022)

(2014年11月9日收到; 2015年1月4日收到修改稿)

作为图像处理领域的重要分支和研究热点之一, 图像复原方法的研究始终具有重要理论意义和广泛的应用价值, 图像盲复原一直以来都是图像复原中比较困难的问题之一. 针对相机与所拍摄景物之间由于相对位置移动而使所获得图像发生运动模糊的情况, 本文提出了一种基于指导滤波的图像盲复原算法. 我们首先通过频域迭代算法对点扩散函数进行估计. 然后, 由于指导滤波具有较好的保持图像边缘的特性, 我们应用基于指导滤波的图像非盲复原算法恢复目标图像. 对以上两步进行反复迭代, 直到获得最终的清晰图像. 为了验证本文所提算法的有效性, 给出了多组对比实验. 实验结果表明, 本文所提算法能够在有效地抑制噪声和振铃效应的同时, 还能够更好的保持图像的边缘和纹理细节. 因此, 本文算法可以获得更高质量的复原图像.

关键词: 图像盲复原, 指导滤波, 运动模糊, 点扩散函数

PACS: 42.30.Va, 42.30.Tz, 02.30.Zz

DOI: 10.7498/aps.64.134202

1 引言

随着计算机、物理和数学的不断发展, 数字图像处理已经成为了一门重要的学科. 图像复原是数字图像处理领域中一个重要的研究方向. 运动模糊图像复原作为图像复原的重要组成部分和基本任务之一, 在天文观测、军事探测、地质勘探以及计算机视觉等领域均有着重要的应用价值. 近年来, 随着电子数码产品的普及和计算机处理能力的提高, 人们对图像品质的要求不断提高. 由于图像复原技术应用的广泛性和需求的迫切性, 出现了一系列应用物理和数学方面的知识来研究这一课题的文章^[1-7].

图像复原问题是一种病态的反问题. 通常可分为两类, 一类是已知点扩散函数(point spread function, PSF), 求清晰图像的问题. 另一类是未知点扩散函数, 恢复清晰图像的问题. 前者称为非盲复原问题, 较为简单, 已经有了相对完善的研究

成果^[8-10]. 然而, 实际生产生活中, 我们遇到的复原问题大多为后者, 一般被称为盲复原问题, 求解难度较大. 本文主要研究盲复原问题的一个子类——运动模糊下的图像盲复原问题. 图像盲复原算法的研究, 在理论上和应用中都有着十分重要的价值. 为提高复原图像的质量, 大部分研究者都是从模糊图像的先验知识中提取一些有用信息, 进而得到清晰图像的最佳估计值. Fergus等^[11]利用图像的统计信息, 从严重的运动模糊图像中复原出了清晰图像, 主要思想是通过变分贝叶斯方法估计出PSF, 进而得到较好的实验结果. Shan等^[12]通过对图像以及其一阶, 二阶导数进行约束, 利用快速傅里叶变换在频域内进行优化, 得到了复原后的图像. Levin等^[13]通过对PSF的最大后验概率采用图像边缘似然优化的方法, 达到较好的复原效果. 其他关于运动模糊图像复原方法的研究, 感兴趣的读者可以参考文献^[14-17].

由于盲复原问题的复杂性和病态性, 大部分算法存在结构复杂的弊端. 为了改善问题本身的复

† 通信作者. E-mail: xnli10@mails.jlu.edu.cn

杂性, 本文采用迭代法完成整个盲复原过程. 每次迭代过程分为以下两个步骤. 首先, 利用频域迭代法, 得到PSF的估计值; 然后, 利用得到的点扩散函数, 采用基于指导滤波的非盲复原方法估计目标图像. 最后, 通过实验, 我们验证了本文所提算法的有效性.

2 指导滤波

指导滤波(定义见文献[18, 19])作为一种新颖的图像滤波方法, 是目前比较快速的具有边缘保持性质的滤波方法之一. 在保持图像边缘不被模糊的前提下, 指导滤波可以有效地去除图像的噪声并抑制振铃效应. 指导滤波的过程可以简单描述为, 输入一幅待滤波的图像 u_p , 在指导图像 u_l 的指导下进行滤波, 最后输出一幅滤波后的图像 u .

指导滤波的关键是假设指导图像 u_l 和输出图像 u 存在着局部线性关系. 假设在一个以点 s 为中心的窗口 ω_s (ω_s 的大小为 $\omega \times \omega$) 内, 滤波输出的图像 u 是指导图像 u_l 的一个局部线性变换, 形式如下:

$$u(i) = a_s u_l(i) + b_s, \quad \forall i \in \omega_s, \quad (1)$$

这里, (a_s, b_s) 表示在窗口 ω_s 内给定的线性系数. 这一模型在图像超分辨[20], 图像去雾[21]和图像抠图[22]中都有着广泛的应用. 指导滤波的系数 (a_s, b_s) 的定义式为

$$a_s = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_s} u_l(i) u_p(i) - \mu_s p_s}{\sigma_s^2 + \varepsilon}, \quad (2)$$

$$b_s = p_s - a_s \mu_s, \quad (3)$$

其中, μ_s 和 σ_s^2 分别为 u_l 在窗口 ω_s 内的均值和方差, $|\omega|$ 表示窗口 ω_s 中像素的个数. $p_s = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_s} u_p(i)$ 是滤波图像 u_p 在窗口 ω_s 内的均值.

观察指导滤波的定义式, 不难发现, 像素点 s 包含在覆盖 s 的所有重叠窗口 ω_s 中, 而在不同窗口中计算得到的 $u(s)$ 值不相等, 即 $u(s)$ 的值不唯一. 为了保证指导滤波的唯一性, 对于这些重叠的像素, 最终的取值为所有值的加权平均值. 因此, 滤波输出图像 $u(s)$ 的表达式可以改写为如下形式:

$$u(s) = \bar{a}_s u_l(s) + \bar{b}_s, \quad (4)$$

其中, $\bar{a}_s = \frac{1}{m} \sum_{s \in \omega_i} a_s$ 和 $\bar{b}_s = \frac{1}{m} \sum_{s \in \omega_i} b_s$ 是重叠在 s 处的所有窗口的平均系数, m 为包含 s 的窗口的

个数. 为简化记号, 我们定义指导滤波的函数表达式为

$$u = \text{guidfilter}(u_l, u_p, \omega, \varepsilon). \quad (5)$$

3 本文算法

图像盲复原问题是指在点扩散函数(卷积核)未知的情况下, 从观测到的模糊图像估计出原始清晰图像的一类问题, 相应的数学模型为

$$g = h * u + n, \quad (6)$$

其中, g 表示观测到的模糊图像, h 为点扩散函数(PSF), n 为加性噪声, $*$ 表示卷积运算符. 在盲复原问题中, 我们需要根据 g 的信息估计出 h 和 u , 这是一类高度病态的反问题. 本文关心的运动模糊图像盲复原问题, 是指引起模糊的原因是镜头和被拍摄物体相对位置的移动. 求解问题的关键是如何估计出PSF, 求出PSF之后, 便可通过非盲复原算法得到清晰图像. 当然, 整个算法设计过程必须要有效地保持图像的边缘特征和抑制残留的噪声.

3.1 PSF的估计方法

图像盲复原问题的核心是估计PSF, 因为PSF的估计是否准确直接影响到复原图像的清晰程度, 残留噪声以及振铃效应等现象的抑制效果. 图像盲复原的方法主要集中在迭代法, 正则化方法, 统计方法以及多尺度分析方法. 其中, 迭代法是图像盲复原中最为常见的一种方法[23], 这种方法要求的计算量较低, 复原效果良好, 并且抗噪性能较好. 而其他的方法往往伴随着较大的计算量, 因此我们应用迭代法来对PSF进行估计. 首先, 我们利用频域迭代法估计出PSF的近似解, 然后将其作为初始值, 应用基于指导滤波的非盲复原算法恢复出目标图像初值. 这两步交替求解, 最终得到清晰图像. 本文中, 在频域上, 我们采用维纳滤波来估计PSF, 计算公式为

$$F(u)(\mu, \nu) = \frac{F(h)^*(\mu, \nu) F(g)(\mu, \nu)}{|F(h)(\mu, \nu)|^2 + S_{nn}(\mu, \nu) / S_{uu}(\mu, \nu)}, \quad (7)$$

$$F(h)(\mu, \nu) = \frac{F(u)^*(\mu, \nu) F(g)(\mu, \nu)}{|F(u)(\mu, \nu)|^2 + S_{nn}(\mu, \nu) / S_{hh}(\mu, \nu)}, \quad (8)$$

其中, F 表示FFT算子, $F(\cdot)^*$ 表示 F 的复共轭. $S_{uu}(\mu, \nu)$, $S_{hh}(\mu, \nu)$ 和 $S_{nn}(\mu, \nu)$ 分别是原始图像,

PSF 和噪声的功率谱. 在实际问题中, 这些谱一般都是未知的, 并且较难计算, 从计算代价角度上考虑, 通常并不计算这些功率谱的比值, 而是用一个较小的常数来代替, 分别记为 α_1 和 α_2 , 进而频域估计公式简化为

$$F(u)(\mu, \nu) = \frac{F(h)^*(\mu, \nu)F(g)(\mu, \nu)}{|F(h)(\mu, \nu)|^2 + \alpha_1}, \quad (9)$$

$$F(h)(\mu, \nu) = \frac{F(u)^*(\mu, \nu)F(g)(\mu, \nu)}{|F(u)(\mu, \nu)|^2 + \alpha_2}. \quad (10)$$

通过上面的迭代, 我们得到 PSF 的初始值, 进而图像盲复原问题变成了非盲复原问题.

3.2 基于指导滤波的图像非盲复原算法

接下来, 利用基于指导滤波的非盲复原算法复原出目标图像的初值. 非盲复原过程分为去模糊和去噪两个步骤. 在去模糊过程中, 需要指导图像来指导滤波, 因此给出下面两个函数:

$$u_p = \arg \min_u \|h * u - g\|_2^2 + \lambda \|u - u_e\|_2^2, \quad (11)$$

$$u_l = \arg \min_u \|h * u - g\|_2^2 + \lambda \|\nabla u - \nabla u_e\|_2^2, \quad (12)$$

其中, u_e 是预估计图像, $\lambda > 0$ 是正则化参数. 对于上述问题, 利用快速傅里叶变换 (FFT) 进行加速, 这样便得到了傅里叶域上的解, 形式如下:

$$F(u_p) = \frac{F(h)^* \cdot F(g) + \lambda F(u_e)}{|F(h)|^2 + \lambda}, \quad (13)$$

$$F(u_l) = \frac{F(h)^* \cdot F(g) + \lambda |F(\nabla)|^2 \cdot F(u_e)}{|F(h)|^2 + \lambda |F(\nabla)|^2}, \quad (14)$$

其中, F 表示 FFT 算子, $F(\cdot)^*$ 表示 F 的复共轭. $|F(\nabla)|^2 = |F(\partial_x)|^2 + |F(\partial_y)|^2$ 表示算子 ∇ 的傅里叶变换. 注意, 在等式 (13) 和 (14) 中, 加法, 乘法, 除法以及算子 “ \cdot ” 都是逐点进行的. 对 $F(u_p)$ 和 $F(u_l)$ 分别进行傅里叶逆变换便可以得到 u_p 和 u_l .

经过傅里叶收缩 (见 (13) 和 (14)) 式, 两幅图像中的噪声被放大, 并产生了一些虚假边缘, 图像 u_p 比 u_l 包含了更多的细节, 并含有大量的遗漏噪声. 因此, 在去噪步骤中, 将 u_l 作为指导图像, u_p 作为滤波输入图像, 利用指导滤波对图像 u_p 进行平滑以达到去噪的目的, 进而得到更清晰的图像.

指导滤波具有较好的边缘保持的特性, 并且它的计算复杂度不依赖于滤波窗口的大小, 它的时间复杂度为 $O(N^2)$ (N^2 表示像素的个数). 本文将指导滤波引入到图像复原问题中, 得到了较好的复原效果.

3.3 算法流程

本文提出的盲复原算法步骤可总结如下:

步骤 1 对模糊图像进行离散傅里叶变换, 选择参数 α_1 和 α_2 ;

步骤 2 根据 (9) 和 (10) 式, 估计出 u^0 和 h^0 ;

步骤 3 设置 $k = 0$, $h^k = h^0$, $u_e^k = u^0$, 选择指导滤波参数 ω 和 ε ;

步骤 4 将 u_e^k 和 h^k 分别代入 (13) 和 (14) 式, 得到滤波输入图像 u_p^k 和指导图像 u_l^k ;

步骤 5 对 u_p^k 进行指导滤波, 得到滤波输出图像 $u^{k+1} = \text{guidfilter}(u_l^k, u_p^k, \omega, \varepsilon)$;

步骤 6 将 u^{k+1} 代入 (10) 式中, 得到 h^{k+1} , 令 $u_e^k = u^{k+1}$, $h^k = h^{k+1}$, $k = k + 1$, 返回步骤 4, 经过数次迭代即可得到最终结果.

4 实验结果

本文的算法主要包括两个主要部分, 第一部分是在频域估计点扩散函数, 第二部分是基于指导滤波的非盲复原算法, 这两部分交替迭代求解, 最终得到清晰图像. 算法实现所使用的开发工具是 MATLAB, 软硬件环境是 CPU 为 Intel Core i7, 内存为 2 GB.

在实验中, 对于参数 α_1 和 α_2 需要仔细慎重的选取, 本文参考了文献 [24] 中的参数设置, 通常这两个参数是与模糊图像中含有噪声的方差有关, 模糊图像包含的噪声越多, 参数的取值越大. 为了使复原图像达到较为满意的效果, 经过大量的实验, 我们将这两个参数分别取为: $\alpha_1 = 0.001$, $\alpha_2 = 0.03$.

为了验证算法的可行性和有效性, 我们将算法分别与 Fergus [11], Shan [12] 和 Xu [15] 等的算法进行了实验对比, 由于求解图像盲复原问题时, 我们只知道模糊图像, 无法获得真实图像, 目前还没有很好的客观标准来衡量复原结果的好坏, 所以本文采取可视化方法, 在视觉效果上进行对比, 实验的结果表明本文算法得到的复原效果更好.

图 1 中, Fergus 的方法在一些细节上产生了模糊, 本文算法复原的效果要比 Fergus 的结果略微清晰. 图 2 中, Shan 的方法有较为明显的震荡波纹, 而本文的方法有效地抑制了振铃效应, 恢复出了清晰的边缘和纹理细节. 在图 3 中, 与 Xu 的方法相比, 本文算法的复原效果更为明显, 细节上更为清晰, 视觉效果更好. 图 4 和图 5 显示了实拍的模糊



图1 (网刊彩色) 实验结果对比. 从左至右依次为: 运动模糊图像, Fergus 算法的复原结果, 本文算法的复原结果
Fig. 1. (color online) Results of different restoration methods. From left to right: Motion blurred image, Fergus' restoration result, Our method's restoration result.



图2 (网刊彩色) 实验结果对比. 从左至右依次为: 运动模糊图像, Shan 算法的复原结果, 本文算法的复原结果
Fig. 2. (color online) Results of different restoration methods. From left to right: Motion blurred image, Shan's restoration result, Our method's restoration result.



图3 (网刊彩色) 实验结果对比. 从左至右依次为: 运动模糊图像, Xu 算法的复原结果, 本文算法的复原结果
Fig. 3. (color online) Results of different restoration methods. From left to right: Motion blurred image, Xu's restoration result, Our method's restoration result.

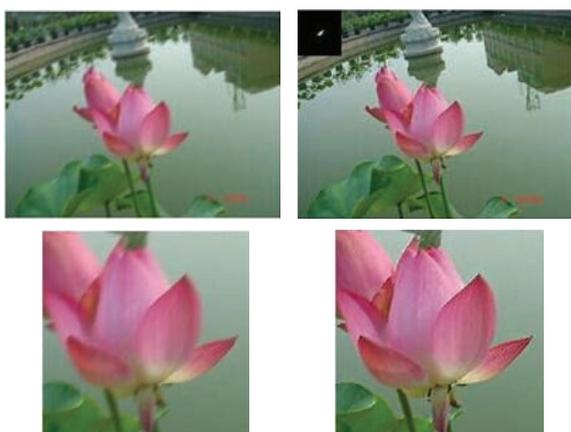


图4 (网刊彩色) 左边: 运动模糊图像; 右边: 本文算法的复原结果
Fig. 4. (color online) Left: Motion blurred image; Right: Our method's restoration result.

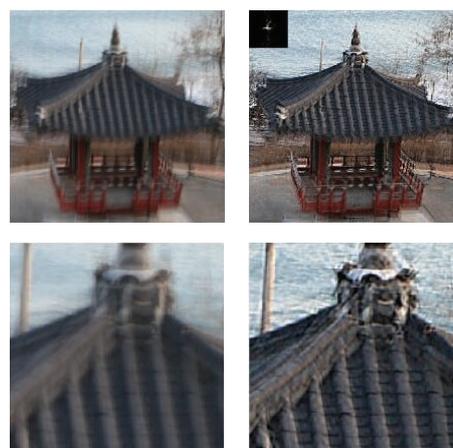


图5 (网刊彩色) 左边: 运动模糊图像; 右边: 本文算法的复原结果
Fig. 5. (color online) Left: Motion blurred image; Right: Our method's restoration result.

图像的复原结果, 图片包含复杂的结构和不同的运动模糊. 图中还显示了复原结果的细节图, 在去模糊结果中, 一些边缘得到明显改善, 同时显示的物体形状和结构更加清晰. 实验表明复原图像在纹理细节上相对比较清晰, 边缘也有所改善, 主观视觉效果也较为明显.

由于本文算法是通过迭代计算来实现的, 图6给出了迭代的中间结果, 可以看出经过数次迭代后可以得到最终结果. 而且如果减少迭代次

数, 所得到的复原图像的效果并没有最终结果的清晰.

以上的实验结果表明本文算法的复原图像的纹理细节较为清晰且视觉效果的改善较明显. 此外, 复原图像的边缘也得到很好的恢复. 每幅图像的PSF都显示在相应复原图像的左上角处, PSF的恢复效果相对地较明显. 从这些实验结果可以看出, 本文的算法具有可行性和有效性.



图6 (网刊彩色) 本文算法迭代计算的中间结果. 从左到右依次为: 1次迭代, 3次迭代, 5次(最终)迭代

Fig. 6. (color online) The intermediate results of iterative calculation. From left to right: 1 iteration, 3 iterations, 5 iterations(final iteration).

5 结 论

本文提出了一种基于指导滤波的运动模糊图像盲复原方法. 首先, 我们利用频域迭代算法对点扩散函数进行初始估计. 然后, 根据估计得到的点扩散函数, 应用基于指导滤波的图像复原算法来恢复出清晰图像, 这两步迭代求解, 最终得到清晰图像. 本文算法能够快速有效地复原出具有清晰边缘和纹理的高质量图像, 并且具有能够很好地消除噪声和抑制振铃效应的优点, 获得了较明显的视觉效果, 符合图像复原问题的实际需求.

参考文献

- [1] Bishop T E, Babacan S D, Amizic B, Chan T, Molina R, Katsaggelos A K 2007 *Blind image deconvolution: theory and applications*. CRC Press
- [2] Jin Z L, Han J, Zhang Y, Bai L F 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 069501 (in Chinese) [金左轮, 韩静, 张毅, 柏连发 2014 物理学报 **63** 069501]
- [3] Shi M Z, Xu T F, Zhang K 2011 *Opt. Precision Eng.* **19** 1973 (in Chinese) [石明珠, 许廷发, 张坤 2011 光学精密工程 **19** 1973]
- [4] Li F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 230203 (in Chinese) [李斐 2012 物理学报 **61** 230203]
- [5] Zhao L, Jin W Q, Chen Y N, Su B H 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 1703 (in Chinese) [赵琳, 金伟其, 陈翼男, 苏秉华 2008 光学学报 **28** 1703]
- [6] Sun H, Li Z Q 2012 *Chinese Opt.* **5** 174 (in Chinese) [孙辉, 李志强 2012 中国光学 **5** 174]
- [7] Shi M Z, Xu T F, Liang J, Li X M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 174204 (in Chinese) [石明珠, 许廷发, 梁炯, 李相民 2013 物理学报 **62** 174204]
- [8] Yang J, Yin W, Zhang Y, Wang Y 2013 *SIAM J. Imaging Sciences* **2** 569
- [9] Michailovich O V 2011 *IEEE Trans. Image Process* **20** 1281
- [10] Huang H Y, Yang H, Ma S L 2013 *J. Electronic Imaging* **22**
- [11] Fergus R, Singh B, Hertzmann A, Roweis S T, Freeman W T 2006 *ACM Trans. Graphics* **25** 787
- [12] Shan Q, Jia J, Agarwala A 2008 *ACM Trans. Graphics* **27** 73
- [13] Levin A, Weiss Y, Durand F 2011 *IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell.* **33** 2354
- [14] Yuan L, Sun J, Quan L, Shum H Y 2007 *ACM Trans. Graphics* **26** 1
- [15] Xu L, Jia J 2010 *In Proc. of the European Conf. on Computer Vision*
- [16] Babacan S D, Rafael M, Minh X D, Aggelos K K 2012 *In Proc. of the European Conf. on Computer Vision* **6** 341
- [17] Zhong L, Cho S, Dimitris M, Sylvain P, Jue W 2013 *In Proc. CVPR*
- [18] He K M, Sun J, Tang X 2010 *In Proc. of the European Conf. on Computer Vision* **1** 1
- [19] He K M, Sun J, Tang X 2013 *IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell.* **35** 1397
- [20] Zomet A, Peleg S 2002 *Proc. IEEE Workshop Applications of Computer Vision*

- [21] He K M, Sun J, Tang X 2009 *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*
 [22] Levin A, Lischinski D, Weiss Y 2006 *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*
 [23] Ayers G R, Dainty J C 1998 *Optics Letters* **13** 547
 [24] Sunghyun C, Seungyong L 2009 *ACM Trans. Graphics(SIGGRAPH ASIA)* **28** 145

Guided filter-based blind image restoration method

Li Xin-Nan^{1)†} Huang He-Yan²⁾ Jia Xiao-Ning³⁾ Ma Si-Liang¹⁾

1) (School of Mathematics, Jilin University, Changchun 130012, China)

2) (School of Science, Changchun University, Changchun 130022, China)

3) (School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(Received 9 November 2014; revised manuscript received 4 January 2015)

Abstract

As a major branch and research focus in the image processing field, the study on image restoration is always of practical significance and application value. Blind image restoration has always been one of the most difficult problems in image restoration. In view of the image motion blurring induced by the relative motion between the camera and the subject, we present a blind image restoration method based on guided filter. We first estimate the point spread function by using the iteration algorithm in the frequency domain. And then, because the guided filter has the edge-preserving smoothing property, we restore the target image by the non-blind image restoration algorithm based on the guided filter. By iterating the above two steps, we can obtain the original clear image. In order to verify the effectiveness of the proposed algorithm, we give several groups of experiments. Experimental results show that the proposed algorithm can not only effectively eliminate the noise and suppress the ringing, but also well preserve the edge and texture details. Therefore, the proposed algorithm can restore the image with high quality.

Keywords: image blind restoration, guided filter, motion blurring, point spread function

PACS: 42.30.Va, 42.30.Tz, 02.30.Zz

DOI: 10.7498/aps.64.134202

† Corresponding author. E-mail: xnli10@mails.jlu.edu.cn