

模糊图像点扩散函数的亚像素精度离散化方法

梁敏^{1,2*}, 朱虹¹, 欧阳光振¹, 刘薇¹

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048; 2. 山西财经大学 信息管理学院, 太原 030031)

(* 通信作者电子邮箱 liangmin716@163.com)

摘要:快速准确的点扩散函数(PSF)估计方法,是获取良好模糊图像复原效果的前提。针对散焦模糊和匀速运动模糊的PSF在以往离散化实现过程中的近似误差问题,提出一种结合退化模型几何性质和亚像素估计的离散化方法,定义了近邻像素点的距离相关权重分配原则,并以此进行亚像素精度的估计,从而实现了PSF的离散化。实验结果表明该方法的估计精度有很明显的提高,并在主观视觉质量和客观图像清晰度评价函数、峰值信噪比(PSNR)、改善信噪比(ISNR)方面均优于传统方法。

关键词:点扩散函数;散焦模糊;运动模糊;图像复原;亚像素;离散化

中图分类号: TP317.4 **文献标志码:** A

Sub-pixel discrete method of point spread function from blurred images

LIANG Min^{1,2*}, ZHU Hong¹, OUYANG Guang-zheng¹, LIU Wei¹

(1. Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China;

2. School of Information Management, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan Shanxi 030031, China)

Abstract: Fast and accurate Point Spread Function (PSF) estimation method is the premise to obtain good results on the blur image restoration. To solve the deficiency of the discrete PSF of defocus-blurred and motion-blurred images, a discretization method was proposed based on the combination of geometric property of degradation model and sub-pixel estimation. Specifically, the principle of weight allocation was defined, which was related to the distance with the neighboring pixels. Thus, the discretization of PSF was realized. Finally, the experimental results illustrate that the proposed method improves result precision and outperforms the traditional one on visual quality, sharpness evaluation function, Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) and Improved Signal-to-Noise Ratio (ISNR).

Key words: Point Spread Function (PSF); defocus blur; motion blur; image restoration; sub-pixel; discretization

0 引言

由于实际中发生的图像模糊,大多是模型未知的情况,因此,模糊图像的盲复原算法的研究便成了热点之一。保证图像盲复原效果的关键,一是退化模型点扩散函数(Point Spread Function, PSF)的正确估计,二是复原算法能够最大限度地逼近真解。

目前,有学者采用神经网络法、遗传算法和超分辨率算法^[1]等构建复原算法,这类算法虽然结构清晰,但复原效果依赖于PSF的估计准确性。也有学者采用迭代算法^[2-4]同步估计原始图像和PSF,使图像复原问题转化为判据达到最优化的问题,这类方法虽然允许PSF的估计可在迭代的过程中逐步逼近正确解,但运算量大,收敛速度慢。如果采用预估的PSF作为初值,可以得到良好的性能。因此,快速准确的PSF估计方法是获取良好模糊图像复原效果的前提。目前已有大量的文献关于退化图像模糊类型的判定及退化模型的参数辨识^[5-8],且达到了较高的精度。然而,对于数字图像,退化模型的离散化引入的误差降低了PSF估计的正确性。Yin等^[9]考虑到精确离散化的实现难度,指出传统上将散焦模糊退化模型的PSF近似为均匀圆盘函数和将线性运动模糊退化模型的PSF近似为均匀直线函数的离散化方法存在引入误差

的问题,采用了较为理想的圆柱型函数近似散焦退化模型的PSF,并且定义了线性运动在水平方向模糊时的离散化估计方法,都在一定程度上提高了退化模型离散化的精度。

在总结已有工作的基础上,本文构造了一种同时适用于散焦和线性运动模糊退化模型离散化时进行亚像素估计的方法,结合退化模型的几何性质,选取近邻像素点,将亚像素精度等价于近邻像素的加权,从而实现了退化模型的离散化。

1 模糊图像的退化模型

模糊图像的退化模型通常用PSF描述,一般线性移不变系统的退化过程^[10]可表示为

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

其中: $g(x, y)$ 为模糊图像, $h(x, y)$ 为PSF, $f(x, y)$ 为清晰图像, $n(x, y)$ 为加性噪声,“*”表示卷积。

几何光学表明,光学系统散焦造成图像模糊的PSF是一个均匀分布的圆盘函数,散焦半径为 R 的空域连续PSF可以表示为

$$h(u, v) = \begin{cases} 1/(\pi R^2), & \sqrt{u^2 + v^2} \leq R \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

对于曝光时间 T 内成像设备与目标以速度 v 和角度 α 作

收稿日期: 2011-07-18; 修回日期: 2011-09-26。 基金项目: 山西省自然科学基金资助项目(2010011022-1)。

作者简介: 梁敏(1979-),女,山西忻州人,讲师,博士研究生,主要研究方向:图像处理、计算机图形学; 朱虹(1963-),女,浙江嘉兴人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:图像处理、模式识别; 欧阳光振(1987-),男,湖北天门人,硕士研究生,主要研究方向:图像处理; 刘薇(1982-),女,陕西西安人,博士研究生,主要研究方向:图像处理。

相对匀速运动,定义 $L = vT$, 连续 PSF 表示为

$$h(u, v; L, \alpha) = \begin{cases} 1/L, & \sqrt{u^2 + v^2} \leq L/2, \text{ 且 } u/v = -\tan \alpha \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

PSF 的离散化即将上述式(2)和(3)中连续的 $h(u, v)$ 离散化为式(1)中的 $h(x, y)$ 。本质上,就是在离散化的数字设备上,确定一个最佳逼近于连续 PSF 的像素集的过程。

传统方法在离散化式(2)时,满足条件 $\sqrt{x^2 + y^2} \leq R$, 即采用 $1/C$ 作为 $h(x, y)$ 的值。这里 C 是常数,且保证退化过程不损失图像能量。该离散化方法存在的问题是在圆盘圆周边缘处存在截断,造成估计的误差很大。

文献[9]在离散化式(3)时,令 $\alpha = 0$, 然后给出了水平方向运动模糊退化模型的离散化公式。若使用该离散化方法的 PSF 复原非水平方向线性运动模糊图像,需要旋转模糊图像使其运动方向在水平轴上,这样处理会引入两次图像旋转的误差,影响复原图像的质量。

2 退化模型离散化的亚像素估计

本文构造了一种退化模型在离散化时进行亚像素估计的方法。该方法同时适用于散焦和线性运动退化模型,以散焦模糊退化模型为例进行说明。分析式(2)给出的散焦圆盘函数的估计误差可知,其主要是由于圆盘圆周边缘估计不准确造成的。图1(a)是半径为 R 的均匀圆盘函数,图1(b)是圆盘圆周边缘局部放大图。实心黑点 p 是圆周边缘上任意一点,不失一般性,我们认为未必落在整像素位置。假定网格交点为像素位置,用点 p 的四邻域像素点 p_1, p_2, p_3, p_4 代替 p ,即将点 p 的 $h(x, y)$ 值分配给它的四邻域像素点 p_1, p_2, p_3, p_4 的 $h(x, y)$,从而实现了圆盘函数圆周边缘离散化时的亚像素估计。

结合散焦圆盘模型的几何性质,可进一步简化上述亚像素估计方法。按照图1(b)离散化圆周边缘时,考虑圆周具有对称性,可以先离散化圆周边缘在第一象限上半部分 $1/8$ 圆弧,然后对称得到其余部分。该 $1/8$ 圆弧满足 $x^2 + y^2 = R^2 (0 \leq x \leq y)$, 如图2(a)所示,且圆弧上任意两个点在垂直方向上的增量小于水平方向上的增量,即 $\Delta y < \Delta x$ 。因此将首个离散点放置在 $x = 0$ 的位置上,以 x 方向步长为单位1顺序选择下一个离散点的位置,可能会使离散点落在 y 方向上两个像素点之间的亚像素位置。用这两个近邻像素点代替该离散点,可实现离散化估计的圆周边缘。需要指出的是,若半径 R 为整数,则首个离散点恰好落在像素位置;若 R 为小数,则首个离散点落在亚像素位置,同样可用上述方法进行离散化。若记圆周边缘上的当前离散点为 $q(x, y)$, 点 q 的上下两侧近邻像素用 q_1, q_2 表示,可得 q_1 的坐标为 $(x, \lceil y \rceil)$, q_2 的坐标为 $(x, \lceil y \rceil - 1)$ 。其中, $\lceil y \rceil$ 是对 y 向上取整。很自然的,用 q_1, q_2 代替 q 。两近邻点 q_1, q_2 权值的计算方法如下:

$$w(q_1) = d_2 / \pi R^2, w(q_2) = d_1 / \pi R^2 \quad (4)$$

其中: d_1 为离散点 q 与 q_1 的距离, d_2 为离散点 q 与 q_2 的距离,计算公式为 $d_1 = |y - \lceil y \rceil|$, $d_2 = |y - (\lceil y \rceil - 1)|$, $y = (R^2 - x^2)^{1/2}$ 。

当 x 递增至 $y = x$ 可得 $1/8$ 圆周边缘离散化的亚像素估计

计,利用对称性进而得到整个圆周边缘的离散化估计。图2(b)是散焦半径为8的圆盘函数由亚像素估计方法离散化的示意图。

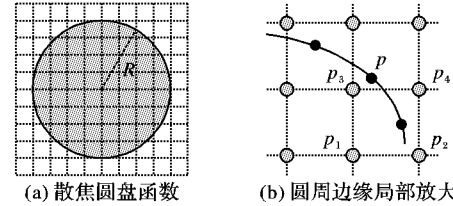


图1 散焦圆盘圆周边缘离散化的亚像素估计方法

上述方法也可以用于带角度的匀速直线运动模糊图像的 PSF, 即式(3)的离散化。通过预先得到的运动模糊方向和模糊尺度,选择 $\sqrt{x^2 + y^2} \leq L/2$ 区域内模糊方向上离散点的近邻像素点来代替实现,图3(a)给出了运动模糊 PSF 离散化估计方法,图3(b)是模糊方向为 37.1° , 模糊尺度为 10.9 的 PSF 经过离散化后的示意图。由于该方法直接在模糊方向进行 PSF 的离散化估计,不需要旋转图像,从而避免了旋转误差的引入。

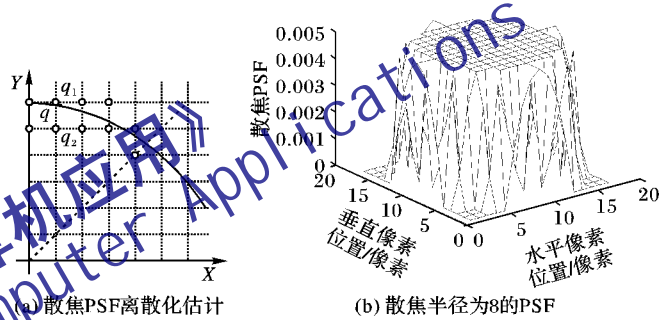


图2 结合散焦圆盘几何性质和亚像素估计的离散化

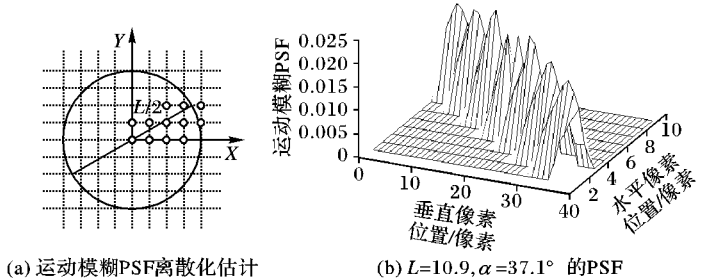


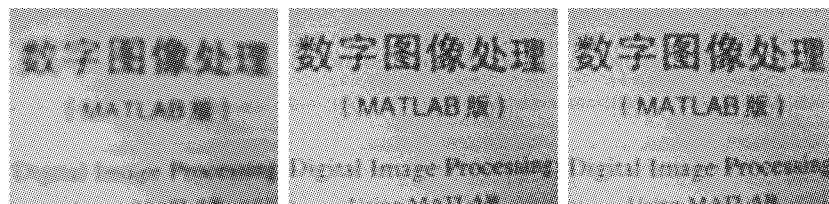
图3 直线运动模糊离散化

3 实验结果与分析

为了验证本文离散化退化模型的亚像素估计方法的有效性和实用性,对实际拍摄的散焦模糊图像和仿真运动模糊图像进行了测试实验,并运用图像处理中常用的评价图像清晰度的梯度函数^[11]、峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)和改善信噪比(Improved Signal-to-Noise Ratio, ISNR)来测试复原图像的性能。梯度函数一般被用来提取图像的边缘信息,复原良好的图像,应该有更尖锐的边缘,对应的梯度值也更大。

图4(a)为实际拍摄的散焦模糊图像,大小为 $480 \times 640 \times 24$ b。本文选用散焦模糊图像的频域相关性辨识参数法^[12]来判断模糊半径,判得模糊半径 $R = 10$; 大多数图像复原算法在获得退化模型的参数后,通常采用 Matlab 工具箱中的 fspecial 函数作为 PSF 的离散化实现。图4(b)为使用 fspecial

(‘disk’, R) 复原的图像, 图 4(c) 是运用本文方法复原的图像。复原算法使用了经典的维纳滤波, 选取了相同的参数, γ 取 0.01。视觉上观察, 图 4(c) 和图 4(b) 的复原效果都很好; 进一步运用清晰度函数评价, 从表 1 中可以看出使用本文离散化方法复原图像 (图 4(c)) 的四种梯度函数值均大于使用 Matlab 函数复原图像 (图 4(b)) 的相应函数值, 由此可以说明



(a) 散焦模糊图像

(b) Matlab函数复原图像

(c) 本文方法复原图像

图 4 散焦模糊图像复原结果

表 1 复原图像的清晰度评价

方法	Brenner 函数 ($\times 10^7$)	能量梯 度函数 ($\times 10^7$)	方差 函数 ($\times 10^9$)	拉普 拉斯算子 ($\times 10^8$)
Matlab 方法	5.8563	4.5634	6.6857	6.9786
本文方法	5.9704	5.0751	8.2057	7.9884

表 2 两种 PSF 的复原图像的评价

模糊尺度 ($\alpha = 40^\circ$)	模糊图像 PSNR/dB	Matlab 函数复原图像 PSNR/dB	Matlab 函数复原图像 ISNR/dB	本文方法复原图像 PSNR/dB	本文方法复原图像 ISNR/dB
10	21.341	23.570	2.2290	25.249	3.9081
25	18.883	21.412	2.5284	21.455	2.5717
30	18.479	20.915	2.4361	21.137	2.6357
40	17.824	20.083	2.2585	20.150	2.3258
60	17.178	19.389	2.2105	19.431	2.2430
70	16.990	19.360	2.3697	19.434	2.4438

使用本文离散化方法复原图像的质量较好。

针对不同程度的运动模糊图像, 对比了分别使用 Matlab 的 fspecial 函数、文献[9]方法和本文方法的复原结果。维纳滤波的参数 γ 取 0.01。表 2 给出了在无添加噪声的情况下, 模糊方向为 40° , 模糊尺度从 10 ~ 70 像素的运动模糊图像及其复原图像分别相对于原图像的 PSNR 和 ISNR 评价。

采用文献[9]方法复原的图像, 边界振荡波纹明显, 因此需要后处理或调整算法抑制波纹。图 5(c) 是用 Matlab 函数 fspecial(‘motion’, 10.1, 40) 复原的效果, 图 5(d) 是用本文方法的复原图像。对比图 5(c) 和 (d), 可以明显看到图像质量的提高。计算相应的 PSNR 和 ISNR, 也表明了图 5(d) 复原结果优于图 5(c)。

4 结语

针对散焦模糊和运动模糊的 PSF 离散化时出现的亚像素精度问题, 本文提出了一种结合退化模型几何性质和亚像素估计的精确离散化方法。经实际相机拍摄的散焦模糊图像和仿真运动模糊图像的复原测试, 实验结果表明, 本文方法能够获得较高的精度, 可满足实际应用中为模糊图像复原提供准确 PSF 的要求。

参考文献:

- [1] 赵琳, 金伟其, 陈翼男, 等. 基于微分图像自相关的离焦模糊图像盲复原[J]. 光学学报, 2008, 28(9): 1703 - 1709.
- [2] 余国亮, 张天序, 洪汉玉, 等. 基于贝叶斯理论的湍流退化图像复原方法研究[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(9): 1171 - 1177.
- [3] 高潮, 郭永彩, 刘国祥. 基于频域共轭梯度算法的盲图像恢复[J]. 计算机学报, 2003, 26(9): 1152 - 1156.
- [4] 尹兵, 王延斌, 刘威, 等. 用神经网络鉴别退化图像的模糊类型[J]. 光学技术, 2006, 32(1): 138 - 140.
- [5] 孙辉, 张葆, 刘晶红, 等. 离焦模糊图像的维纳滤波恢复[J]. 光学技术, 2009, 35(2): 295 - 298.
- [6] 刘克, 杨静宇, 权军, 等. 离焦图像模糊辨识及复原方法研究[J]. 自动化学报, 1994, 20(1): 58 - 65.
- [7] 陈前荣, 陆启生, 成礼智. 基于方向微分的运动模糊方向鉴别[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(5): 590 - 595.
- [8] 郭永彩, 郭瑞瑞, 高潮. 运动模糊图像点扩散函数的参数鉴别[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(5): 1052 - 1057.
- [9] YIN H J, HUSSAIN I. Blind source separation and genetic algorithm for image restoration [C]// ICST 2006: International Conference on Advances in Space Technologies. Piscataway: IEEE, 2006: 167 - 172.
- [10] 陈前荣, 陆启生, 成礼智, 等. 利用拉式算子鉴别散焦模糊图像点扩散函数[J]. 计算机工程与科学, 2005, 27(9): 40 - 43.
- [11] 李奇, 冯华君, 徐之海, 等. 数字图像清晰度评价函数研究[J]. 光子学报, 2002, 31(6): 736 - 738.
- [12] 周曲, 颜国正, 王文兴. 相关系数分析在模糊图像参数识别中的应用[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6): 988 - 995.

(a) 运动模糊加噪图像
(PSNR=21.283)

(b) 文献[9]方法

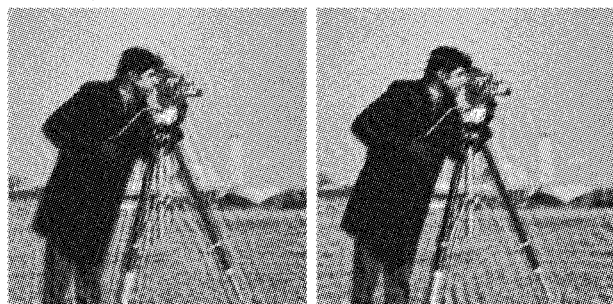
(c) Matlab函数(PSNR=22.735,
ISNR=1.4537)(d) 本文方法(PSNR=23.746,
ISNR=2.4646)

图 5 运动模糊图像复原结果

图 5(a) 是一幅添加了均值为 0, 方差为 0.0001 的高斯噪声, 模糊参数为 $L = 10$, $\alpha = 40^\circ$ 的运动模糊图像。假设模型估计有一定的误差, 以 $L = 10.1$ 进行图像复原, 图 5(b) 是