

运动模糊图像 PSF 参数估计与图像复原研究^①

廖秋香^② 卢在盛 彭金虎

(梧州学院广西高校图像处理与智能信息系统实验室 梧州 543002)

摘 要 运动模糊图像复原对于改善图像质量有重要的理论意义和现实意义。在研究运动模糊图像复原中,对点扩散函数(PSF)的估计是关键点也是难点。本文利用 Radon 变换原理来求解点扩散函数 PSF 中的运动模糊方向,并提出了消除十字亮线引起的干扰的新方法。利用运动模糊图像频谱上的中心暗条纹间距来计算运动模糊尺度。基于估计的 PSF 参数采用维纳滤波算法来恢复运动模糊图像。实验结果表明,运动模糊参数估计精确,运动模糊方向控制在 1° 以下,运动模糊尺度控制在 1 个像素以内。同时采用维纳滤波算法来恢复运动模糊图像,效果优异,可获得细节清晰的图像。

关键词 点扩散函数(PSF),模糊方向,模糊尺度,Radon 变换,维纳滤波

0 引言

采集图像时,如果采集设备和目标在曝光瞬间产生相对运动将导致图像降质,从而造成的图像模糊称为运动模糊^[1]。在不同的图像应用领域,比如天文、军事、医学、工业控制、道路监控以及刑侦等方面,清晰的图像是采集图像信息进行各种分析的重要前提。因此,运动模糊图像的复原研究成为很多学者研究的一个热点课题。在研究运动模糊图像复原中,对点扩散函数(point spread function, PSF)的估计是关键点也是难点^[2]。国内很多学者在点扩散函数(PSF)的精确估计方面做了很多的研究。文献[3]利用 Radon 变换和 Sobel 算子对模糊图像进行一阶微分计算,所求模糊方向绝对误差控制在 2° ,但该算法对于低信噪比图像的估计不理想。文献[4]提出了在改进的倒频域中使用位平面分解提取算法结合 Radon 变换,提取出了含模糊方向信息的清晰中央细线条纹。但是该算法在估计小尺度模糊中出现了一些波动,其效果不是很稳定。文献[5]

利用全局均值标准差法对频谱图进行阈值分割来估计模糊尺度,但在阈值的选取上比较复杂。本文从频谱分析角度出发,利用 Radon 变换原理来求解点扩散函数中的运动模糊方向,并消除了频谱图中的十字亮线出现导致的干扰。同时利用图像频谱上的中心暗条纹间距来求解运动模糊尺度。基于估计的 PSF 参数构建点扩散函数,利用维纳滤波算法来对运动模糊图像复原。实验结果表明,该算法简单可行,运动模糊参数估计精确,运动模糊方向误差控制在 1° 以下,运动模糊尺度误差控制在 1 个像素以内。同时采用维纳滤波算法来恢复运动模糊图像,效果良好,可获得细节清晰的图像。

1 运动模糊图像的退化模型

图像复原处理的关键在于退化模型的确定。图 1 中,用退化函数 $h(x, y)$ 把退化过程模型化,它和加性噪声 $n(x, y)$ 一起,作用于输入图像 $f(x, y)$ 上,产生一幅退化的图像 $g(x, y)$:

① 国家自然科学基金(61562074),2018 年广西高校中青年教师基础能力提升(2018KY0542),梧州学院重点科研(2017B006)和梧州学院中青年骨干教师培养工程资助项目。
② 女,1981 年生,硕士,副教授;研究方向:图像处理,电路系统;联系人,E-mail: liaoqiul23456@163.com
(收稿日期:2018-04-19)

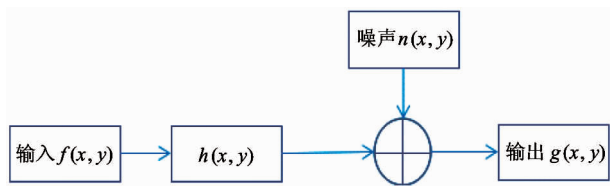


图1 图像退化的模型

图中 $h(x, y)$ 涵盖了整个退化的物理过程,这正是寻找的退化数学模型函数,即需要估计的点扩散函数 PSF。

如果空间域 H 是线性的、空间不变的,则在空间域中退化图像可由式(1)给出:

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

其中符号 $*$ 表示卷积,空间域的卷积和频域的乘法组成了一个傅立叶变换对,式(1)在频域上可以表示成式(2)。

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) + N(u, v) \quad (2)$$

其他运动产生的模糊在一定条件下都可以转换为分段匀速直线运动模糊,其点扩散函数可表示为式(3)。

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{L} & 0 \leq x \leq L \cos \theta, 0 \leq y \leq x \tan \theta \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

上式中, θ 指运动方向与水平方向之间的夹角,称为运动模糊方向。 L 指在运动方向上像素移动的距离,称为运动模糊尺度。

以下讨论的运动模糊仅由水平匀速直接运动导致,假如图像沿水平正方向移动,则 $h(x, y)$ 变为

$$h(x, y) = \frac{1}{L} \quad 0 \leq x \leq L, y = 0 \quad (4)$$

对式(4)中的点扩散函数做傅立叶变换:

$$\begin{aligned} H(u, v) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \\ &= \int_0^L \frac{1}{L} e^{-j2\pi ux} dx \\ &= \frac{\sin(\pi u L)}{\pi u L} e^{-j\pi u L} \end{aligned} \quad (5)$$

所以 $H(u, v)$ 是一个 sinc 函数,当 $uL = 0$, $H(u, v)$ 取最大值,当 uL 为非 0 整数时, $H(u, v) = 0$,同时使得 $G(u, v) = 0$ (在不考虑噪声的情况

下),也就是说在运动模糊图像的频谱图中将会出现明暗相间并平行的条纹。经过若干图像进行实验,结果表明运动模糊图像频谱图中的亮条纹和模糊方向之间是垂直的关系,见图 3。在文献[6-8]中也提到了该结论。

图 2 给出了实验中一幅原图和运动模糊图像(设定的模糊方向为 30° ,模糊尺度为 20 像素)。

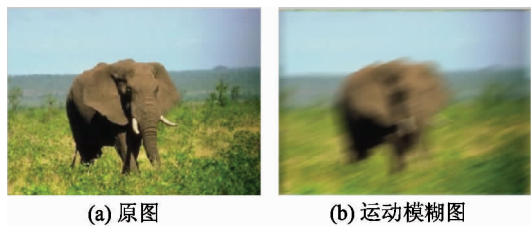


图2 清晰图像和运动模糊图像

图 3 为将运动模糊图像直接进行傅立叶变换后的频谱图与对其进行压缩居中后的频谱图对比。

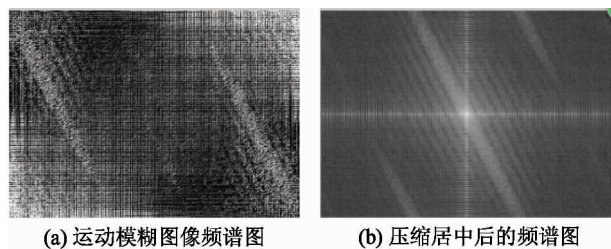


图3 运动模糊图像的频谱图对比

依据傅立叶变换的时域特性,亮条纹与运动模糊方向是垂直关系,所以要检测 PSF 中的运动模糊方向这个参数,只需要检测出其频谱图中亮条纹方向即可。

2 运动模糊参数的估计

为测出频谱图中亮线的方向,早期的文献中大多采用 Hough 变化来检测亮线的方向,如文献[9, 10]。由于 Hough 变换的应用以二值图像为基础,实际处理中难以对一幅图像进行恰当的二值分割,因此在大部分情况下,与 Hough 变换相比, Radon 变换更加精细和准确。本文正是基于 Radon 变换原理来检测频谱图中亮线的方向。

2.1 运动模糊方向的估计

Radon 变换的本质是将直角坐标系的函数做了一个空间转换,即将原来的 XY 平面内的点映射到极坐标 (ρ,θ) 空间,那么原来在 XY 平面上的一条直线的所有的点在极坐标 (ρ,θ) 平面上都位于同一点。记录极坐标 (ρ,θ) 平面上的点的积累厚度,便可知 XY 平面上的线的存在性。Radon 变换就是图像中的像素点在某个方向上的一个积分,所以,图像中高灰度值的直线投影到 (ρ,θ) 空间将会形成亮点,而低灰度值的直线投影到 (ρ,θ) 空间将会形成暗点。因此对 XY 平面内直线的方向检测就转变为在极坐标 (ρ,θ) 空间中对亮点、暗点的检测。

Radon 变换定义示意图如图(4)所示。

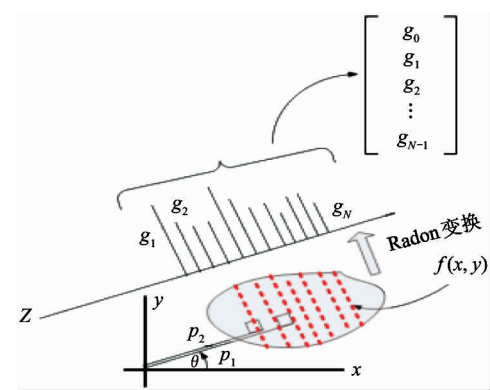


图 4 Radon 变化定义示意图

在实验过程中,对运动模糊图像进行灰度化,并进行二维快速傅立叶变换,生成其频谱图。将频谱压缩居中后可以发现,以原点为中心出现的对称平行线条是沿着同一个方向,这个方向就是与运动模糊图像的模糊方向相垂直的方向。然后对频谱图进行 $1 \sim 180^\circ$ 的 Radon 变换,结果得到的是一个 180 列的矩阵 R ,矩阵 R 中各列的取值正是模糊图像频谱图在某个方向上沿一族直线积分所得的投影值。当 Radon 变换是在运动模糊方向上时,因为频谱中的亮、暗条纹与积分直线平行,所得的投影向量中就会有有一个最大值,且此最大值就是整个矩阵中的最大值。通过找到 R 矩阵中的最大值所在的列,便可得到运动方向。实验结果如表 1 所示。

实验过程中进一步增大模糊尺度到 52、55、58、60、70、100、150、200、500,模糊尺度增大,可以扩

表 1 不同模糊尺度下的实验结果

模糊尺度/ 设定运动方向值 ($^\circ$)	测量运动方向值 ($^\circ$)	误差
50/25	90	出错
50/26	26	0
60/30	30	0
60/35	35	0
70/40	41	1
70/45	45	0
200/50	50	0
200/55	55	0
500/60	60	0
500/64	64	0
500/65	90	出错

大测量范围到 $25 \sim 66^\circ$,影响不是很大。分析表 1 的实验结果,当运动方向为 $26 \sim 64^\circ$ 范围时,基本能准确测出运动模糊图像的运动方向,误差最大为 1° ,非常准确。但如果运动方向不在 $26 \sim 64^\circ$ 范围内,结果将会出错,出现 90° 或者 180° 。分析原因是频谱图中出现了十字亮线,对结果形成了干扰。

由于十字亮线的存在直接影响到实验的结果,必须要对其进行处理。文献[8]中采用分块取阈值的方法来避开十字亮线的干扰,但阈值的选取没有固定的算法。文献[11]中采取的是对二值频谱图进行自适应形态学滤波,算法复杂。文献[12]采取滑动邻域操作的办法,对频谱图中每个像素 3×3 邻域范围内的像素灰度取平均值,以此作为该像素二值化处理的依据从而去除十字亮线的干扰。但这种方法只适用于二值化后的频谱图,且容易删除频谱,影响检测精度。文献[13]中通过图像大小确定十字亮线的位置,再根据亮线宽度判断该亮线是否是由于图像中的条纹引起的十字亮线,若是,就重新对该像素值赋其邻域的灰度值,从而除去十字亮线。本文的算法正是基于文献[13]的一个改进。

十字亮线导致计算结果出现 90° 或者是 180° ,可以在程序中设置一个判断,当结果出现 90° 或者是 180° 时,就对其赋零值,赋完后继续对新的 R 矩阵找最大值,这样就可以很容易地避开了十字亮线对结果的干扰。实验结果如表 2 所示。

表 2 改进算法后不同模糊尺度下的实验结果

模糊尺度/ 设定运动方向值 (°)	测量运动方向值 (°)	误差
50/25	25	0
50/26	26	0
60/30	30	0
60/35	35	0
70/40	41	1
70/45	45	0
200/50	50	0
200/55	55	0
500/60	60	0
500/64	64	0
50/65	65	0
60/75	75	0
70/80	80	0
200/100	100	0
500/130	130	0
500/150	150	0

该算法与文献[13]中所提到的算法相比,不用判断亮线是否由图像中的条纹引起,速度更快。赋零值可以直接避开该十字亮线的干扰。从表 2 实验结果可以看出,算法改进后有效地避免了十字亮线的干扰,同时对于原来的实验精度没有影响,误差控制在 1° 以下。该算法原理简单、有效、容易实现。图 5 为实验结果对比。



图 5 实验结果对比

2.2 运动模糊尺度的估计

基于对运动模糊图像频谱的分析和 Radon 变换原理,在估计运动模糊尺度参数时引入了投影的理

论。设图像有 N 行,对式(5)进行离散化,得到表达式:

$$H(u) = \frac{\sin(\pi uL/N)}{\pi uL/N} \tag{6}$$

令 $H(u) = 0$, 则 $\sin(\pi uL/N) = 0$, 假设有 2 个频谱图上连续的零点 u_1, u_2 , 则满足 $\frac{\pi u_2L}{N} - \frac{\pi u_1L}{N} = \pi$, 化简可得到 $u_2 - u_1 = \frac{N}{L}$, 而 $(u_2 - u_1)$ 就是运动模糊图像频谱图中暗条纹之间的距离, 设为 D , 则得到式(7)。

$$L = \frac{N}{D} \tag{7}$$

求解运动模糊尺度 L , 只需求出频谱图中的暗条纹间距即可。由于频谱图中的暗条纹不是垂直方向, 所以首先将频谱图顺时针旋转 θ 度 (θ 为之前 Radon 变换所求出的运动模糊方向) 至水平方向, 图 6 为 Lena 的运动模糊图像 ($LEN = 50$, 模糊尺度取 50°) 的频谱图及旋转至水平方向的频谱图。

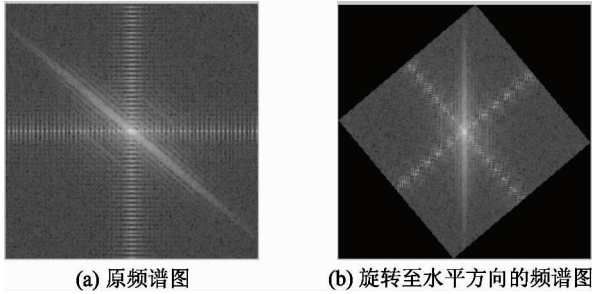


图 6 频谱图旋转前后对比

对旋转后的频谱图进行垂直投影, 得到垂直投影图, 图 7 为频谱图垂直投影后的图像。

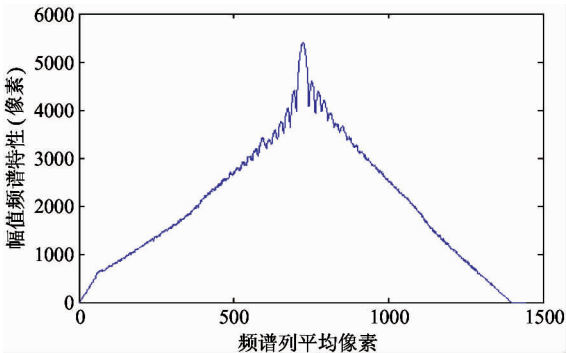


图 7 频谱垂直投影图

在投影图中查找暗条纹对应的极值点 $d_k(k = 1, 2, \cdots)$ 。根据式(7)来计算运动模糊尺度 L , 实验结果见表 3。

表 3 图 6(b) 中暗条纹的间距(像素)

暗条纹序列	$u_1 u_2$	$u_2 u_3$	$u_3 u_4$	$u_4 u_5$
暗条纹间距 D	20	20	20	41
暗条纹序列	$u_5 u_6$	$u_6 u_7$	$u_7 u_8$	$u_8 u_9$
暗条纹间距 D	21	20	21	20

其中 $u_4 u_5$ 为中心两侧间距, 是两倍的暗条纹间距, 将表格中的 8 组数据取平均值得 $D = 20.3$, 图像行数 $N = 1024$, 带入得运动模糊尺度 $L = N/D = 50.44$, 实际设置的运动模糊尺度为 50, 表明测量非常准确, 误差不到 1 个像素。

3 运动模糊图像复原

PSF 参数估计出来后, 采用经典的线性图像复原方法维纳滤波来对图像进行复原。维纳滤波器是一种基于最小均方误差准则的最优估计器, 如下式所示:

$$e^2 = E\{(f - \hat{f})^2\} \tag{8}$$

式中, e^2 为统计误差, $\hat{f}$ 是使统计误差为最小的估计值, E 表示数学期望, f 是未退化的图像。该表达式在频域可表示为式(9):

$$\hat{F}(u, v) = \left[\frac{1}{H(u, v) |H(u, v)^2 + S_\eta(u, v)/S_f(u, v)|} \right] G(u, v) \tag{9}$$

其中, $H(u, v)$ 表示退化函数, $|H(u, v)^2| = H^*(u, v)H(u, v)$, $H^*(u, v)$ 表示 $H(u, v)$ 的复共轭。 $S_\eta(u, v) = |N(u, v)|^2$ 是噪声的功率谱, $S_f(u, v) = |F(u, v)|^2$ 是未退化图像的功率谱。比率 $S_\eta(u, v)/S_f(u, v)$ 称为噪信功率比。这里讨论的两个量是噪声平均功率和图像平均功率, 分别定义为

$$\eta_A = \frac{1}{MN} \sum_u \sum_v S_\eta(u, v) \tag{10}$$

$$f_A = \frac{1}{MN} \sum_u \sum_v S_f(u, v) \tag{11}$$

上式中, M 和 N 分别代表图像和噪声数组的垂直和水平大小。设它们的比值为

$$R = \frac{\eta_A}{f_A} \tag{12}$$

图 8 为实验结果对比, 选取不同的 R 值, 复原效果不同, 图 8(c) 为 $R = 0.0000019$ 的复原结果, 图 8(d) 为 $R = 0.00097$ 的复原效果。从实验结果来看, 适当增大 R 的值, 复原效果较好。尽管得到的结果里面仍然包含一些噪声, 但从视觉上看已经比较接近原始图像了。



图 8 复原效果对比

4 结 论

为了求取运动模糊图像的点扩散函数 PSF 中的两个重要参数, 本文利用 Radon 变换原理来求解 PSF 中的运动模糊方向, 并对十字亮线出现导致的干扰进行了优化和改善。利用求解图像频谱上的中心暗条纹间距来估算运动模糊尺度。基于估计的 PSF 参数采用维纳滤波算法来恢复运动模糊图像。实验结果表明, 运动模糊参数估计精确, 运动模糊方向误差控制在 1° 以下, 运动模糊尺度误差控制在 1 个像素以内。同时采用维纳滤波算法来恢复运动模糊图像, 效果良好, 可获得细节清晰的图像。

参考文献

[1] 梁宛玉,孙权森,夏德森. 利用频谱特性鉴别运动模糊方向[J]. 中国图象图形学报,2011,16(7):1164-1169

[2] 王玉全,隋宗宾. 运动模糊图像复原算法综述[J]. 微型机与应用, 2014,33(19):54-57

[3] 贤光,颜昌翔,张新洁. 运动模糊图像点扩散函数的频谱估计法[J]. 液晶与显示, 2014,29(5):751-754

[4] 吕霞付,王博化,陈俊鹏. 基于位平面分解方法的运动模糊图像 PSF 参数辨识[J]. 半导体光电,2016,37(3):449-453

[5] 许兵,牛燕雄,邓春雨,等. 基于图像频谱全局均值标准差分割的点扩散函数估计[J]. 光学技术,2015,41(4):341-345

[6] 高树辉,樊攀登,蔡能斌. 基于 Matlab 平台的运动模糊图像复原研究[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2015,4:5-8

[7] 陈至坤,韩斌,王福斌,等. 运动模糊图像模糊参数辨识与逐行法恢复[J]. 科学技术与工程, 2016,16(5):177-180

[8] 乐翔,程建,李民. 一种改进的基于 Radon 变换的运动模糊图像参数估计方法[J]. 红外与激光工程, 2011,40(5):963-969

[9] 黄琦,张国基,唐向东. 基于霍夫变化的图像运动模糊角度识别法的改进[J]. 计算机应用, 2008,28(1):211-213

[10] 陈波. 一种新的运动模糊图像恢复方法[J]. 计算机应用, 2008,28(8):2024-2026

[11] 胡硕,张旭光,吴娜. 基于 Radon 变换的运动模糊方向估计的改进方法[J]. 高技术通讯, 2015,25(8-9):822-828

[12] 孔勇奇,卢敏,潘志庚. 频谱预处理模糊运动方向鉴别的改进算法[J]. 中国图象图形学报, 2013,18(6):637-646

[13] 唐春菊. 基于频谱分析的运动模糊图像参数检测[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(1):148-152

Research on PSF parameter estimation and image restoration of motion blurred image

Liao Qiuxiang, Lu Zaisheng, Peng Jinhu
(Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Image Processing and Intelligent Information Systems, Wuzhou University, Wuzhou 543002)

Abstract

The restoration of motion blurred images has important theoretical and practical significance for improving the quality of the image. Estimation of point spread function (PSF) is crucial and difficult in research on restoration of motion blurred images. The motion blur direction in point spread function is gained by using the Radon transform principle, and a new method to eliminate the interference caused by the cross line is proposed. The motion blur extent is calculated by using the central dark fringe distance on the motion blurred image spectrum. The Wiener filtering algorithm is used to restore the motion blurred image based on the estimated PSF parameters. The experiment results show that the motion blur parameters are estimated accurately, the estimated error in blurred direction is less than 1 degree, and the estimated error of blurred extent is less than 1 pixel. At the same time, the restoration based on the Wiener filtering algorithm has good restore effect and gain clear details.

Key words: point spread function (PSF), blurred direction, blurred extent, Radon transform, Wiener filtering