

任意方向匀速直线运动模糊的点扩展函数估计

赵妍妍 袁 艳 苏丽娟

(北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要 在运动图像复原中,建立图像退化模型的关键是找到准确的点扩展函数(PSF)。提出了一种基于单幅图像的、改进的任意方向匀速直线运动模糊 PSF 的估计方法。利用基于图像频谱亮线灰度特征的方向鉴别方法鉴别模糊图像的模糊方向,利用微分自相关的方法对模糊图像的模糊尺寸进行计算,通过计算模糊图像沿二维直线运动方向不同距离的重叠度,来计算得到相应的 PSF。通过开展仿真分析和成像实验,演示了 PSF 估计和图像复原过程。通过采用图像质量评价函数,将图像复原结果与现有算法进行对比,验证了所提出方法的有效性。

关键词 图像处理;图像复原;点扩展函数;运动模糊;重叠度

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.0809003

Point Spread Function Estimation of Blurring due to Uniform Linear Motion in Arbitrary Direction

Zhao Yanyan Yuan Yan Su Lijuan

(Key Laboratory of Precision Opto-Mechatronics Technology, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract The accurate estimation of point spread function (PSF) is the key to the image degradation model in motion blurred image restoration. An algorithm to calculate the PSF of blurring caused by uniform linear motion in arbitrary direction is presented. By computing the extent of superposition between neighboring pixels along the motion direction, the two-dimensional PSF is estimated and then used in image deconvolution to remove the motion blur. We implemented both computer simulation and imaging experiments to demonstrate the proposed approach. The image restoration performance is evaluated by comparing our method with existing algorithms via image quality metric functions.

Key words image processing; image restoration; point spread function; motion blur; the extent of superposition

OCIS codes 100.1455; 100.1830; 100.3020; 100.3190

1 引 言

近十几年来,由于工业化流水线的发展以及农业、资源勘探的需要,各种相机被广泛应用于现代化工厂以及星载、机载等遥感系统上。由于相机受到飞行速度和平台振动等因素的影响,实际得到的图像会产生运动模糊,影响成像效果。为获取清晰的图像,需要对模糊图像进行复原^[1~3],而运动模糊图像复原的关键是找到图像的退化模型,并采取逆过程来求解原始图像,因此研究运动模糊图像的点扩

展函数(PSF),进而对图像进行复原具有重要意义。

图像复原分为盲复原和非盲复原^[4~10],盲复原是指图像和模糊 PSF 同时不可知的情况下进行的图像复原;非盲复原是指仅仅图像不可知,而模糊点扩散函数已知的图像复原。运动模糊图像的处理一般属于盲复原,需要对运动模糊过程中的 PSF 进行估计,再对模糊图像进行退卷积计算。针对运动模糊 PSF 的求解,国内外已经开展了大量研究。Tan 等^[11]针对一维直线运动模糊,利用矩形 PSF 进行复

收稿日期: 2012-02-20; **收到修改稿日期:** 2012-04-24

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724005)和长江学者和创新团队发展计划(IRT0705)资助课题。

作者简介: 赵妍妍(1987—),女,博士研究生,主要从事图像处理、光机结构设计等方面的研究。

E-mail: zhaoyanyan1987@163.com

导师简介: 袁 艳(1967—),女,博士,教授,主要从事成像光谱仪方面的研究。E-mail: yuanyan@buaa.edu.cn

原取得了一定的效果。而针对二维直线运动模糊图像, Yitzhaky 等^[12]首先估计出二维直线运动模糊图像的模糊参数, 包括模糊尺寸和模糊方向。陈前荣^[13,14]利用旋转-插值的方法, 根据模糊方向将二维运动模糊问题转化为一维运动模糊问题, 从而进行处理。刘微等^[15,16]根据二维模糊图像的模糊路径直接进行简单的离散化, 从而利用该方法得到相应的 PSF 并进行图像复原。这两种方法进行图像复原都取得了一定的效果, 但复原效果仍不理想。除此之外, 孔维武等^[17]通过将运动点分别视为无大小和像素大小两种情况进行讨论, 并采用各像素中心到运动直线距离小于“极值”的方法来估计 PSF, 取得了一定的效果。徐树奎等^[18]利用混合编码曝光相机(高速双目立体相机和高分辨率编码曝光相机), 利用高速双目相机采集编码相机曝光时间内的三幅图像, 然后利用这三幅图像来获取编码曝光相机获得模糊图像的 PSF, 从而对匀加速模糊图像进行复原。陈树越等^[19]通过对旋转运动模糊图像进行坐标变换, 然后在直角坐标空间下采取差分方法对旋转模糊图像进行恢复。杨文霞等^[20]利用湍流模型及其控制方程, 计算脉动流场气动光学效应所对应的 PSF, 并对气动模糊图像进行复原。黎明和等^[21]针对背景不变的局部匀速运动模糊图像利用 Z 变换, 将像平面内任意方向的运动转换成 X 轴方向的运动, 进而将复杂的局部模糊复原问题简化为前景模糊恢复和背景融合来解决。

本文提出一种改进的 PSF 求解方法得到二维匀速直线运动模糊图像的 PSF, 再对模糊图像进行复原。通过计算机仿真和运动模糊实验对所提出算法进行验证, 并与现有的图像复原方法进行对比评价。所提出方法的优势在于, 不需要借助外界条件, 仅仅利用单幅模糊图像, 即能得到任意方向模糊图像的 PSF, 并对模糊图像进行复原。

2 运动模糊的产生

当机载平台以速度 V 在空中飞行时, 如图 1 所示, 地面景物 A 点相对飞机向后移动到 A' 。通过光学系统成像于 a' 点, 在 CCD 靶面上像移速度为

$$V' = \frac{V}{H}f', \quad (1)$$

式中 V 为飞机飞行速度; H 为飞行高度; f' 为光学系统焦距。

在 CCD 摄像机每场积分时间内像移量为

$$\Delta l = V't, \quad (2)$$

式中 t 为 CCD 摄像机的场积分时间。

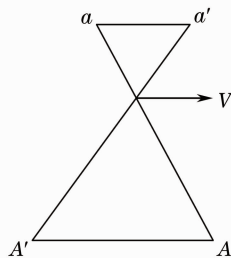


图 1 像移产生的原因示意图

Fig. 1 Schematic of the reasons of image motion

像移量的存在将使图像模糊, 为得到清晰图像, 必须要对像移进行控制。由(2)式可以看出, 减小像移模糊的途径有两个: 缩短曝光时间和降低像移速度。像移速度与飞机飞行速度成比例关系, 不可能随意改变, 缩短曝光时间会降低探测器靶面照度, 影响图像探测效果。因此, 目前解决运动模糊的主要手段是通过了解图像的退化过程, 建立运动图像的复原模型, 通过数学模型来解决图像的复原问题。

3 匀速直线运动模糊退化模型

假定在摄像机曝光时间内飞机是匀速直线飞行, 则飞机的前向像移可等效为地面景物与摄像机之间的相对匀速直线运动造成的成像模糊, 根据线性系统的理论, 建立数学模型^[15]如图 2 所示。

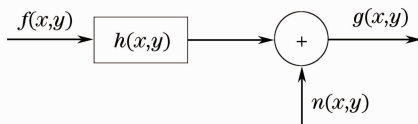


图 2 图像退化模型

Fig. 2 Image degradation model

则, 最后得到的模糊图像 $g(x, y)$ 可以表示为

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + n(x, y), \quad (3)$$

式中 $f(x, y)$ 为清晰图像, $n(x, y)$ 为噪声, 而 $h(x, y)$ 即是要求的 PSF。

对于一维运动模糊, 运动模糊 PSF 的表达式为

$$h(x, y) = \begin{cases} 1/L & 0 \leq x \leq L-1 \\ 0 & \text{others} \end{cases}, \quad (4)$$

式中 L 为模糊像元。

4 图像复原中 PSF 的估计方法

4.1 现有的 PSF

对于任意方向匀速直线运动模糊图像, 一般有两种 PSF 估计方法。一种是先将二维运动模糊图片旋转到模糊方向为水平方向, 将其作为一维运动

模糊的情形来估计 PSF^[13]。另一种是直接对二维的运动模糊 PSF 进行估计^[15]。由于在计算机中处理的都是离散的矩阵,因此计算出模糊图像的模糊像元和模糊方向得到相应的 PSF 时,可通过离散化得到更为准确的 PSF,即

$$y = \left[\frac{m}{n}x \right], \quad x = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (5)$$

$$x = \left[\frac{n}{m}y \right], \quad y = 0, 1, 2, \dots, m-1 \quad (6)$$

式中 n 为 y 方向的模糊点数; m 为 x 方向的模糊点数。当 $n \geq m$ 的时候用(5)式计算,当 $n < m$ 的时候用(6)式计算。 $[\]$ 为取整符号。

4.2 改进的 PSF

传统的 PSF 离散化方法相对比较简单,但复原图像中存在严重的振铃噪声,效果并不理想。运动模糊可以理解为运动过程中,像元相互重叠而造成的“拖尾”现象。由于模糊 PSF 可以理解为一个二维矩阵,因此,不同重叠度的区域,模糊 PSF 中相应位置的比重不同。由图 3 可知,像元重叠度与像元运动轨迹的不同区域以及到运动轨迹中心的距离有关。越接近运动轨迹的中心位置,像元重叠度越高。根据这一特点可对 PSF 的离散化方法进行如下改进。

如图 3 所示,假设图中每个小方格代表一个像元,此像元以任意角度 θ 做匀速直线运动。图中标出了运动的初始位置,终止位置以及运动过程中的

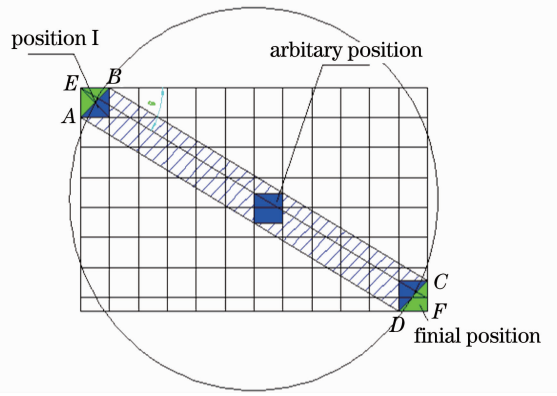


图 3 物体沿任意方向模糊的过程

Fig. 3 Blur process in arbitrary direction

任意位置,则每个像元在运动过程中都会和上一个像元位置发生重叠。图 3 所示的剖面线部分区域以及蓝色区域即为重叠部分区域,绿色部分区域是整个像元从初始位置运动到终止位置的过程中没有发生重叠的区域。因此,为将不同重叠程度的区域划分开来,以线段 AC 和 BD 的交点为圆心(设为坐标原点),过线段 AB 的中心画圆,则线段 AD 、 BC 与圆相交所围成的区域即认为是重叠部分的区域。为简化起见,假设运动模糊像元数为 n ,取 $R = (n-1)/2$ 作为圆的半径。在像元轨迹范围内,重叠区域中任意一点 (x, y) 距离轨迹中心线的距离 $d = y \cos \theta - x \sin \theta$,非重叠区域中任意一点 (x, y) 的有效距离可以近似为该点到轨迹中心线与圆交点的距离,即

$$d = \begin{cases} y \cos \theta - x \sin \theta & (x, y) \in ABCD \\ \sqrt{(y \cos \theta - x \sin \theta)^2 + [(x + x \sin \theta) / \cos \theta - R]^2} & (x, y) \in ABE \cap CDF \end{cases} \quad (7)$$

由于像元扫过区域内任意一点到轨迹中心线的距离 $d < 1$,因此可建立数学模型

$$h(x, y) = \begin{cases} 1-d & 0 \leq d \leq 1 \\ 0 & d > 1 \end{cases} \quad (8)$$

考虑到运动模糊 PSF 的能量保持性,利用计算式对 $h(x, y)$ 进行归一化,而得到最终的 PSF。计算式为

$$\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n h(x, y) = 1. \quad (9)$$

5 图像复原仿真与评价

利用 Matlab 仿真得到二维运动模糊图像如图 4 所示。计算二维模糊图像的运动方向。采用基于频谱亮线灰度特征的方向鉴别方法^[22]来求解运

动模糊图像的运动方向,其流程如图 5 所示,方向鉴别结果如图 6 所示。



图 4 仿真得到的运动模糊图片

Fig. 4 Simulated motion blur image

由图 6 可以看出,该二维模糊图像的运动方向为 45° 。在此基础上,将模糊图像的模糊方向旋转

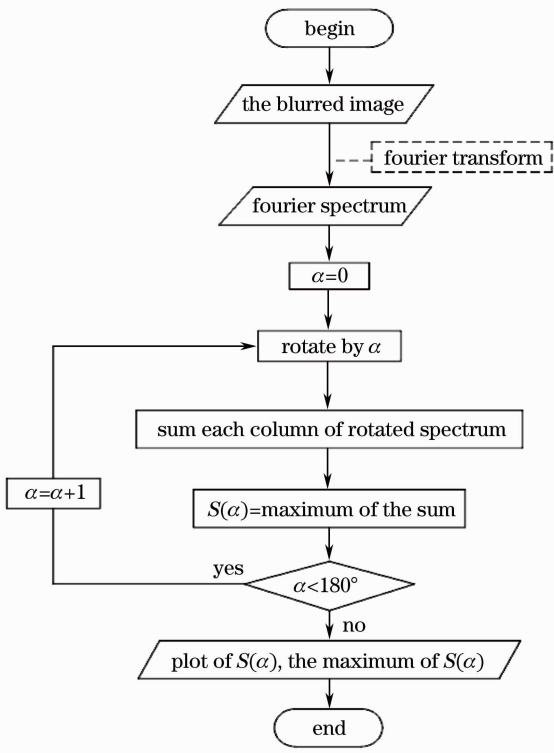


图 5 运动方向鉴别流程图

Fig. 5 Flow chart of identification of motion direction

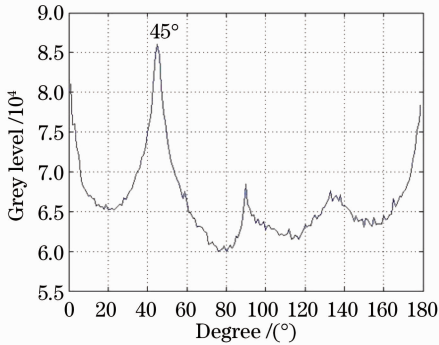


图 6 频域亮线方向鉴别曲线

Fig. 6 Identification direction curve of spectrum positive ripples

到水平方向,从而利用微分自相关^[12]的方法进行模糊尺寸的估计,其流程图如图 7 所示,估计得到的模糊尺寸如图 8 所示。

由图 8 可以看出,运动模糊 PSF 尺度鉴别曲线两个最小值之间的距离为 $644 - 596 = 48$ pixel。由于模糊尺寸为两个最小值之间距离的一半^[12],因此该运动模糊图像的模糊尺寸为 24 pixel。综上所述,图 4 中二维运动模糊图像的模糊尺寸为 24 pixel,运动方向与水平轴成 45° 夹角。据此,画一条直线 AD 使其长度为 24,角度为 45° 方向,再以 AD 的中心 O 为圆心,以 $R = (24 - 1) / 2 = 11$ 为半径画圆如图 9(a)所示,其中 BE, CF 与 AD 平行,且分别过点 $B(8, 9)$,

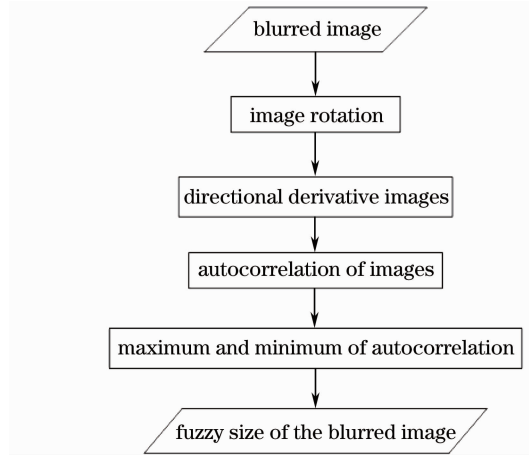


图 7 运动模糊 PSF 尺寸鉴别计算流程

Fig. 7 Flow chart of identifying the scale of PSF

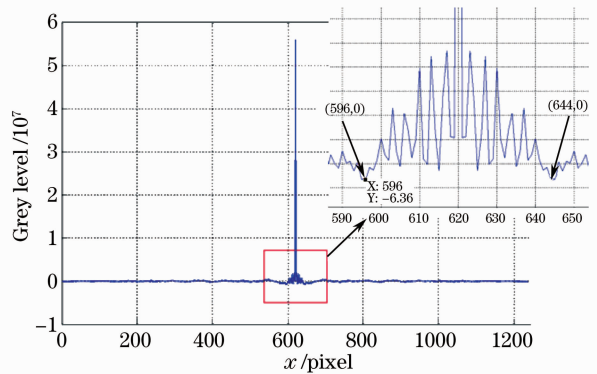


图 8 运动模糊 PSF 尺度鉴别曲线

Fig. 8 Curve of identifying the scale of PSF

$C(9, 8)$ 。通过计算可得直线 BE, CF 上的点到运动中心直线 AD 的距离 $d = 0.71 < 1$, 而直线 BE 和 CF 之外的点到直线 AD 的距离均大于 1; 其次, 由于点 A, B, C, D, E, F 均在以 O 为圆心, 以 $R = 11$ 为半径所构成的圆外, 因此按(7)式计算得:

$$d_A = d_D = 1.73 > 1,$$

$$d_B = d_C = d_E = d_F =$$

$$\sqrt{\frac{1}{2} + \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + 1\right)^2} = 0.77 < 1.$$

再根据(8)式和(9)式得到归一化后的二维 PSF, 如图 9(b)所示。

将运动模糊图像与所估计出的 PSF 进行反卷积处理, 得到复原后的结果如图 10(a)所示。作为对比, 图 10(b)和图 10(c)分别给出了按照旋转-插值法和直接二维离散法进行 PSF 估计后的图像复原结果。其中, 旋转-插值法的 PSF 为各个元素均为 $1/24$ 的 1×24 维矩阵; 直接二维离散法估计的 PSF 为对角线方向为 $1/24$, 其余元素均为 0 的 24×24 维矩阵。

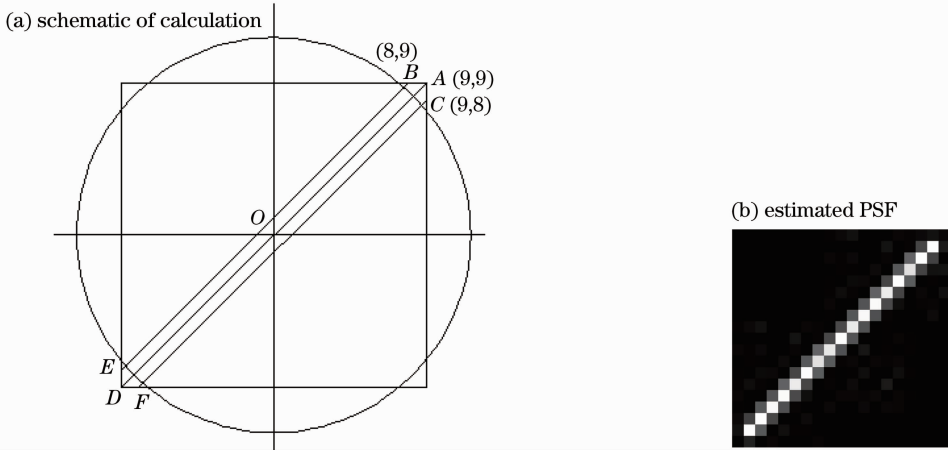


图9 运动模糊 PSF 的计算过程

Fig.9 Calculation process of moving blurred points' PSF

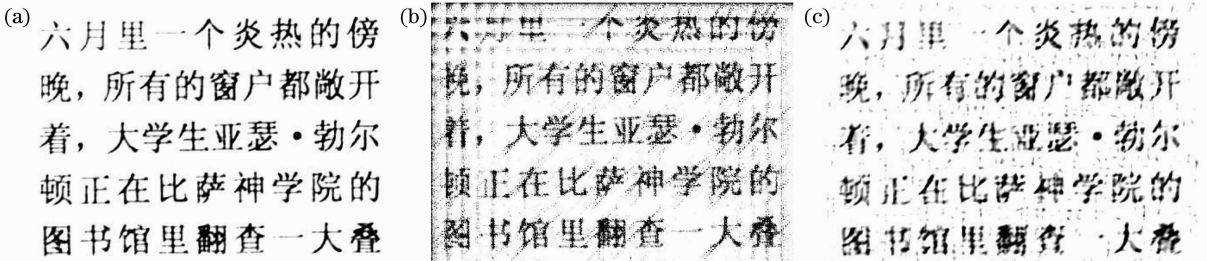


图10 (a)本文所提出的方法;(b)旋转-插值法和(c)直接二维离散法所复原的图像对比

Fig.10 Comparison of recovered images by (a) the proposed method; (b) rotation-interpolation method and (c) direct two-dimensional discrete method

通过观察三种方法的复原图像,可以看出本文所提出算法的复原效果明显优于旋转-插值法和直接二维离散法。为了更客观地评价三种方法所复原图像的质量,下面分别计算其均方误差(MSE)和信噪比(SNR)进行对比。

1) 均方误差。该方法将被评价图像与原始图像各点灰度值之差的平方和除以图像的大小作为评价标准,其值越小表示图像质量越好。其具体表达式为

$$E_{MS} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |g(i,j) - \hat{g}(i,j)|^2}{M \times N}, \quad (10)$$

2) 信噪比。图像的信噪比等于信号和噪声的功率谱之比,但通常功率谱难以计算,因此用信号和噪声的方差之比来近似估计图像的信噪比。信噪比越大表明图像质量越好。其表达式为

$$R_{SN} = 10 \lg \left[\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i,j)^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |g(i,j) - \hat{g}(i,j)|^2} \right], \quad (11)$$

表1 复原图像质量评价对比

Table 1 Comparison of MSE and SNR of recovered images

Restoration methods	Evaluation funtions	
	MSE	SNR
Rotation-interpolation	3193.5	21.2817
2D discrete method	1268.8	37.8544
Method proposed in the paper	542.771	46.3458

通过对比如表1所列的三种方法的MSE和SNR两种评价指标可以看出,本文提出的改进的PSF估计方法相对于旋转-插值法和直接二维离散法,对图像的复原质量有一定程度的提高。

6 图像复原实验

实验采用大恒DH-SV1410FC/FM型号数字摄像机,其焦距为 $f=12$ mm。实验中,设置快门速度为1 s,目标和摄像机之间的距离为67 cm,相机放在二维平移台上,平移台的 x 轴和 y 轴同动,两轴方向的运动速度均为8.62 mm/s。实验装置如图11所示。

图12(a)是由上述装置得到的二维运动模糊图片,利用(1),(2)两式并结合上述实验参数计算得到

其模糊尺寸为 31 pixel,由于 x, y 轴的速度相同,所以其模糊方向为 135° 方向,分别利用旋转-插值法、二维直接离散法和本文所提出的方法对图 12(a)的模糊图片进行复原,复原结果分别如图 12(b)~(d)所示。

通过观察对比模糊图片和复原图片,可以看出,利用旋转-插值法得到的复原图片有很明显的振铃噪声,而且图像清晰度不高;利用直接二维离散法得到的复原图片相比于旋转-插值法,振铃噪声有所减弱,并且图像清晰度也有所改善;而利用本文所提出的方法得到的复原图像,在振铃噪声的抑制和图像清晰度的改善方面都有很大改善。

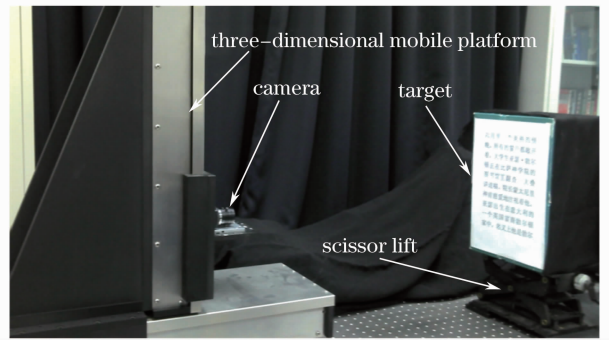


图 11 实验装置图
Fig. 11 Experiment setup

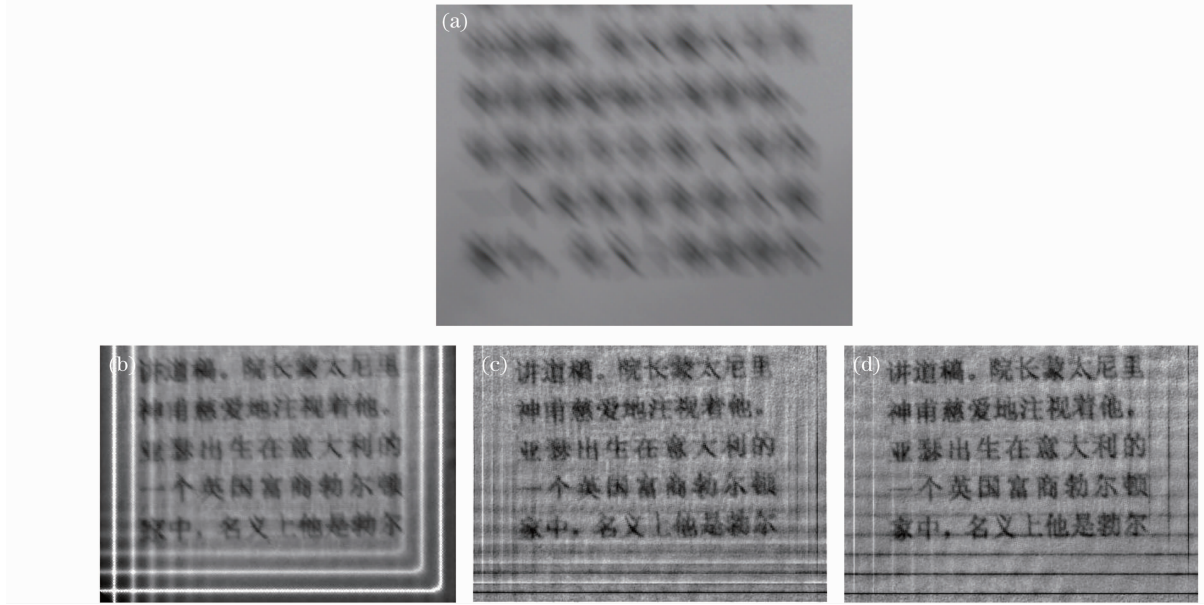


图 12 (a)模糊图像和(b)旋转插值法、(c)直线二维离散法以及(d)本文提出方法的实验结果对比图
Fig. 12 Comparison of (a) blurred image and the experimental results of (b) rotation-interpolation method, (c) direct two-dimensional discrete method and (d) the proposed one

7 结 论

提出了一种改进的二维直线运动模糊 PSF 求解方法。根据距离模糊中心线不同距离灰度值及图像模糊重叠度不同,通过分析图像的模糊过程,利用几何关系得到了相应的 PSF。在此基础上,利用本文方法求解得到的 PSF 对模糊图像进行复原,取得了显著的效果。通过开展仿真分析和成像实验,并利用均方误差和信噪比两种图像质量评价方法对现有方法和本文方法的复原结果进行比较,验证了本文算法的有效性。实验结果表明,利用本文方法得到的图像质量相比于利用现有估计方法复原得到的图像质量有一定的提高。

参 考 文 献

- Jia Ping, Zhang Bao. Critical technologies and their development for airborne opto-electronic reconnaissance platforms[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(1): 82~88
贾平,张葆. 航空光电侦察平台关键技术及其发展[J]. *光学精密工程*, 2003, **11**(1): 82~88
- Sun Hui, Zhang Bao, Liu Jinghong. Restoration of motion-blurred image based on Wiener filter and its application in aerial imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(6): 735~740
孙辉,张葆,刘晶红. 基于维纳滤波的运动模糊消除算法及其在航空成像系统中的应用[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(6): 735~740
- Jia Ping, Zhang Bao, Sun Hui. Restoration of motion blurred aerial image [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(4): 697~703
贾平,张葆,孙辉. 航空成像像移模糊恢复技术[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(4): 697~703

- 4 Qi Shan, Jiaya Jia, Aseem Agarwala. High-quality motion deblurring from a single image[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2008, **27**(3)
- 5 S. Cho, S. Lee. Fast motion deblurring [J]. *ACM Trans. Graph.*, 2009, **28**(5)
- 6 Jianfeng Cai, Hui Ji, Chaoqiang Liu *et al.*. Blind motion deblurring from a single image using sparse approximation[C]. *CVPR*, 2009, 104-111
- 7 Lu Yuan, Sun Jian, Long Quan *et al.*. Image deblurring with blurred/noisy image pairs [J]. *ACM Trans. Graph.*, 2007, **26**(3)
- 8 Lu Yuan, Jian Sun, Long Quan *et al.*. Progressive inter-scale and intra-scale non-blind image deconvolution[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2008, **27**(3): 741~750
- 9 Rob Fergus, Barun Singh, Aaron Hertzmann *et al.*. Removing camera shake from a single photograph[J]. *Siggraph*, 2006, **25**(3): 787~794
- 10 Y. P. Wang, H. J. Feng, Z. H. Xu *et al.*. An improved Richardson-Lucy algorithm based on local prior[J]. *Optics and Laser Technology*, 2010, **42**(5): 845~849
- 11 K. C. Tan, H. Lim, B. T. G. Tan. Restoration of real world motion blurred images[J]. *CVGIP*, 1991, **53**(3): 291~299
- 12 Y. Yitzhaky, N. S. Kopeika. Identification of the blur parameters from motion blurred images[J]. *Graphical Modals and Image Processing*, 1997, **59**(5): 310~320
- 13 Chen Qianrong. Optical Correlation Pattern Recognition and the Motion Blurred Image Restoration [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004
陈前荣. 目标图像的光学相关识别与运动模糊图像的恢复[D]. 长沙: 国防科技大学, 2004
- 14 Wang Xiaohong, Zhao Rongchun. Restoration of arbitrary direction motion blurred images [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2000, **5**(6): 525~529
王晓红, 赵荣椿. 任意方向运动模糊的消除[J]. *中国图象图形学报*, 2000, **5**(6): 525~529
- 15 Liu Wei. The Research on Restoration Algorithm of Motion Blur Image and Its Realization[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005
刘 微. 运动模糊图像恢复算法的研究与实现[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005
- 16 Fu Zhongliang, Feng Huajun, Xu Zhihai *et al.*. Restoration of image blurred by any form motion in two-dimension [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 369~372
付中梁, 冯华君, 徐之海等. 二维任意运动形式模糊图像的恢复[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 369~372
- 17 Kong Weiwu, Lu Hongnian, Li Junjiang *et al.*. Restoration of motion blurred image based on the digital radiography [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(12): 369~372
孔维武, 路宏年, 李俊江等. 任意方向匀速直线运动模糊点扩散函数研究[J]. *仪器仪表学报*, 2006, **27**(12): 369~372
- 18 Xu Shukui, Zhang Jun, Tu Dan *et al.*. A constant acceleration motion blur image deblurring based on hybrid coded exposure[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2011, **33**(6): 78~94
徐树奎, 张 军, 涂 丹等. 基于混合编码曝光的匀加速运动模糊图像复原方法[J]. *国防科技大学学报*, 2011, **33**(6): 78~94
- 19 Chen Shuyue, Feng Jun, Zou Ling. Study of image restoration under rotation motion blurring based on spatial difference technique [J]. *Microelectronics & Computer*, 2011, **28**(1): 120~122
陈树越, 冯 军, 邹 凌. 旋转运动模糊图像的空间差分恢复研究[J]. *微电子学与计算机*, 2011, **28**(1): 120~122
- 20 Yang Wenxia, Cai Chao, Ding Mingyue *et al.*. Characterization of aero-optic effects and restoration of aero-optical degraded images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 347~352
杨文霞, 蔡 超, 丁明跃等. 气动光学效应分析与气动模糊图像复原[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 347~352
- 21 Li Minghe, He Bin, Yue Jiguang *et al.*. Blurred image restoration of local uniform motion based on z transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1193~1197
黎明和, 何 斌, 岳继光等. 基于z变换的局部匀速运动模糊图像复原算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1193~1197
- 22 Zhang Mingqian. Identification of Blur Parameters From Motion Blurred Image and Restoration [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009
张明谦. 运动模糊图像的运动模糊参数估计及复原研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009