

文章编号: 0253-2239(2010)02-0369-04

## 二维任意运动形式模糊图像的恢复

付中梁 冯华君 徐之海 李 奇 陈跃庭

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 在曝光时间内相机和被摄物体的相对移动会使图像产生严重的退化,有必要对退化图像进行恢复。但是由于相对运动的方向和形式的任意性,运动模糊图像的恢复是一个难以解决的问题。提出一种可以对被二维任意方向、任意形式的运动所造成的退化图像进行恢复的方法,给出理论推导,并建立一套实现系统。在主 CCD 曝光的同时,利用低分辨率的黑白快速 CCD 获得多帧图像,根据这些图像序列来计算位移,进而计算出模糊过程的点扩展函数(PSF),并用来恢复模糊图像。实验结果表明,这种恢复方法对二维任意运动形式造成的模糊,能够得到较好的恢复效果。

**关键词** 图像处理;电子稳像;快速 CCD;点扩展函数;图像序列

中图分类号 TN911.73 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103002.0369

## Restoration of Image Blurred by Any Form Motion in Two-Dimension

Fu Zhongliang Feng Huajun Xu Zhihai Li qi Chen Yueting

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,  
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** Since the object and the camera don't remain relatively static during the exposure, the captured image would be degenerated seriously. The restoration of the degenerated image is necessary. Due to the arbitrariness of the motion form and direction, it is difficult to restore the blurred image. A new method is proposed to restore the image blurred by motion of any form in two dimension, Theoretical analyses are also given out and a corresponding system for experiments is established. During the integral time of prime CCD, series images are captured by a low resolution white-black high-speed CCD. Based on these images, the displacement is calculated, then the point spread function (PSF) is calculated to restore the blurred image. As the experiments show, this method can get preferable results to restore the image blurred by motion of any form in two dimension.

**Key words** image processing; electronic image stabilization; high-speed CCD; point spread function; image sequence

### 1 引 言

航空相机对地面物体成像时,由于平台的颤振,在曝光时间内成像器件与物体之间往往存在着相对运动,在像面上产生像移,因此拍出来的图像是被运动模糊后的图像<sup>[1]</sup>。这种图像质量较差,对比度和分辨率均降低,需要进行恢复。

如果这种相对运动属于平动,则可以把模糊过程看作一个线性位移不变的系统。因此,如果知道了系统的冲激响应,在这里是点扩展函数(PSF),就

可以用来恢复图像<sup>[2,3]</sup>。但是,模糊过程的点扩展函数往往是不知道的,因此图像恢复的关键就变成了如何推导点扩展函数<sup>[4~6]</sup>。如 Marius Tico 从图像序列入手,通过一帧快速曝光未被运动模糊,但却因曝光不足而信噪比很低的图像,以及一帧曝光充足但被运动模糊了的图像来计算点扩展函数<sup>[7~9]</sup>,然后恢复。但更多的研究还是集中在如何从单帧被模糊了的图像中找出点扩展函数<sup>[10~12]</sup>,主要有 2 类,一类从空域直接入手,利用差分、相关等等各种

收稿日期: 2009-02-23; 收到修改稿日期: 2009-04-02

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724006)和浙江省重大科技专项(2008C16018)资助课题。

作者简介: 付中梁(1984—),男,硕士研究生,主要从事光学图像处理方面的研究。E-mail: zhongliang.fu@gmail.com

导师简介: 冯华君(1963—),男,教授,主要从事光学成像方面的研究。E-mail: fenghj@zju.edu.cn(通信联系人)

方法计算,另一种则是通过图像变换后的频谱域中的零值点来计算,这些方法往往只能计算特殊运动形式的点扩展函数,主要是匀速直线运动,而且受噪声影响精度比较低<sup>[13,14]</sup>。航空相机的振动通常比较复杂,这些方法的适用性受到限制,因此,需要找到一种能够不受运动形式和运动方向限制的计算模糊过程点扩展函数的方法。本文提出一种新型的基于 CCD 位移探测的运动模糊点扩展函数计算方法。并以此进行实验验证,取得较好的恢复效果。

## 2 理论分析及仿真实验

根据线性系统的理论,运动模糊的过程可以用下面的模型来表示(图 1):

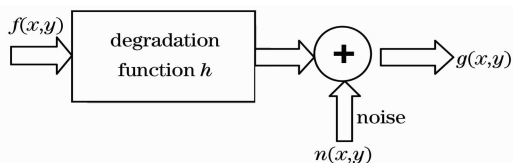


图 1 模糊的退化模型

Fig. 1 Degeneration model of motion blur

最后的模糊图像  $g(x,y)$  可以表示为

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

式中  $g(x,y)$  为模糊图像,  $f(x,y)$  为清晰图像,  $n(x,y)$  为噪声,而  $h(x,y)$  即是要求的点扩展函数。

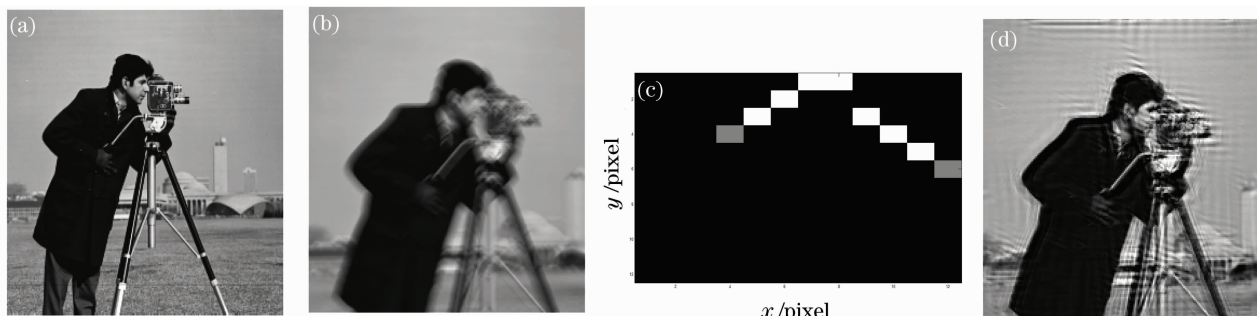


图 2 (a)原始清晰图;(b)按照预定方式进行模糊后的模糊图;(c)估算出的点扩展函数;(d)RL 迭代法恢复图

Fig. 2 (a) Original image; (b) image blurred by a known motion; (c) computed PSF; (d) restoration image by RL method

## 3 实拍实验及结果

为实现这一恢复方法,搭建系统结构装置图,如图 3 所示。其中,高速 CCD 和主 CCD 采用刚性连接已保证其相对位置固定。

在系统中主 CCD 用来获取高分辨率图像,快速 CCD 能够在主 CCD 一次曝光过程中得到一段视频序列,为了尽可能提高帧率,这段视频可以是黑白的。然后通过这段视频序列的计算,求出位移矢量,进而获得模糊过程的点扩展函数。

在本实验中用的两块 CCD 同步方式是软件控

根据以前的研究工作,有如下的关系式:

$$h(x,y) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{T \cdot V_i(x,y)}, \quad (2)$$

这就是普通情况下的二维点扩展函数计算表达式<sup>[15]</sup>,其中  $V_i(x,y)$  表示第  $i$  帧时,传感器与被摄物体的相对运动速度; $T$  表示两帧图像之间的时间间隔;曝光时间内,共获取  $n$  帧图像。

因此,如果不考虑噪声影响,只要我们求到的相对运动的位移矢量,进而获取速度信息,就能够求出模糊过程的点扩展函数来恢复图像。

图 2 是基于以上的理论所做的仿真实验的结果。其中图 2(a)是一幅要处理的清晰图,图中有分明的轮廓和较多的细节,分辨率为  $256 \times 256$ 。在 Matlab 中用预置的模糊函数进行运动模糊仿真,斜上  $45^\circ$  方向运动 5 个像素,再斜下  $45^\circ$  方向运动 5 个像素,得到了如图 2(b)所示的模糊图。模糊图中,大部分细节被湮灭。因为退化方式是已知的,可以理解成预先知道相对运动的位移矢量,由此估算运动模糊的点扩展函数,如图 2(c)所示;然后通过理查德森-露西非线性(RL)迭代算法用此点扩展函数对图 2(b)进行恢复,得到了图 2(d)所示的恢复图。恢复图中大部分细节清晰可见,除了引入少量的振铃效应外,取得了不错的恢复效果。

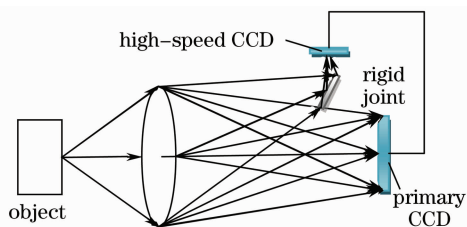


图 3 系统结构图

Fig. 3 Composition of the system

制。高速 CCD 处于连续采集状态,在主 CCD 曝光开始时,发送给电脑一个同步信号,电脑在采集高速

CCD 获取图片的同时,记录下收到信号时的帧数,这样,就获取了一幅模糊图,同时获得了在主 CCD 曝光时间内采集到的一组高速 CCD 获取的图像序列。

实验中,主 CCD 采用的是佳能 EOS 40D 的 CCD,像素大小为  $5.7 \mu\text{m}$ ,曝光时间为 1 s。高速 CCD 像素大小为  $12 \mu\text{m}$ ,帧速为 50 frame/s。其他参数采用默认设置,实验结果如图 4 所示。

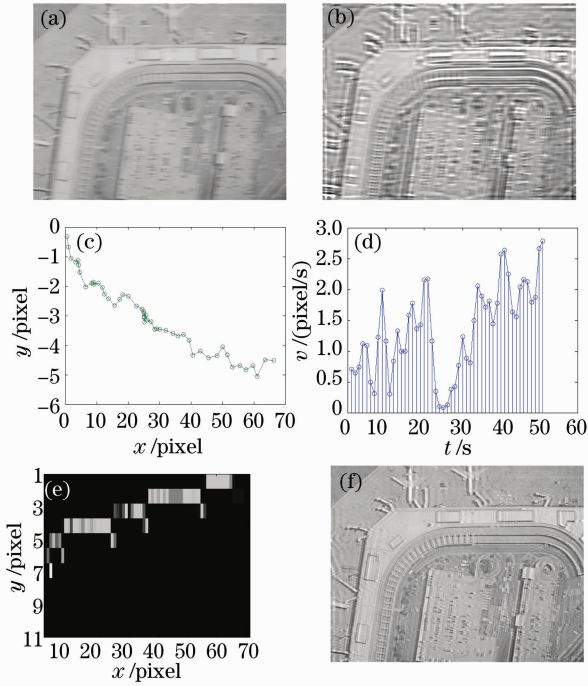


图 4 (a)主 CCD 获取的模糊图;(b)直接盲恢复的结果;(c)运动路径;(d)速度-时间曲线;(e)根据序列图像求得的 PSF;(f)由求得的点扩展函数利用 RL 算法得到的恢复图

Fig. 4 (a) Blurred image captured by primary CCD; (b) result of blind restoration; (c) motion path; (d) velocity-time graph; (e) PSF computed by sequential image; (f) restored image by the PSF

图 4(a)是由主 CCD 在 1 s 时间内拍摄得到的因随机运动而退化的模糊图,图中的细节模糊,有很严重的拖影;在主 CCD 曝光的同时,高速 CCD 获取了 50 frame 的序列图像,图 4(b)表示盲恢复的效果图,可以看出有强烈的振铃效应,图像质量很差。图 4(c)表示在主 CCD 曝光时间内,通过快速 CCD 获取到的序列图像计算出的被摄物和相机的相对运动路径,其中,横轴代表  $x$  方向上的位移,纵轴代表  $y$  方向上的位移,图中的圆点表示一帧图像相对第一帧的位移矢量。可以看出,运动方向是随机的;由此可以求得被摄物和相机的相对运动速度,如图 4(d)所示,可知运动速度也是随机变化的。根据

第一部分理论,可以求得点扩展函数,如图 4(e)所示,颜色的深浅表示该坐标位置对应元素数值的大小,然后利用 RL 迭代法得到图 4(f)所示的恢复图。主观评价可以看出,恢复图轮廓更加清晰,消除了绝大部分的拖影,比模糊图有了很大的改善,而且,试验中的运动方向和运动速度都是随机的,也就是说此方法适用于任意方向,任意运动形式的运动模糊的恢复;当模糊尺度较大时,恢复效果会下降,此时,需要更高速度的高速 CCD 来获取足够的信息描述运动路径,进而恢复图像。

同时,通过如表 1 所示的客观评价函数灰度平均梯度法(GMG)和拉普拉斯算子和法(LS)评价,恢复图的指数比模糊图有了很大的提高。证明了恢复方法的有效性。

表 1 客观评价结果  
Table 1 Quality evaluation

Objective assessment function	GMG assessment	LS assessment
Blurred image	1.3362	10.3153
Restoration image	5.1700	55.4767

图 5 是另一组实验的结果,图 5(a)表示主 CCD 获取到的模糊图,图 5(b)表示算得的运动路径,图 5(c)表示估算出的点扩展函数,图 5(d)是通过提出的算法得到的恢复图,图 5(a)中文字模糊几乎不可识别,经过恢复后,文字可以清楚的识别。表 2 是两幅图的客观评价函数值。由此,可以得出,这种恢复方法在增加少量辅助资源的情况下,获得了很好

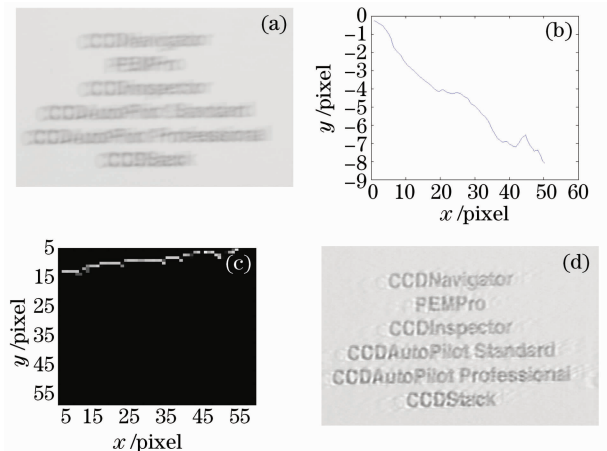


图 5 (a)主 CCD 获取的模糊图;(b)运动路径;(c)估算出的点扩展函数;(d)恢复图

Fig. 5 (a) Blurred image captured by primary CCD; (b) motion path; (c) computed PSF; (d) restored image

的恢复效果。

表 2 图 5 中模糊图和恢复图的客观函数评价值

Table 2 Quality evaluation of picture 5

Objective	GMG	LS
assessment function	assessment	assessment
Blurred image	0.5049	3.2773
Restoration image	1.9965	16.7921

## 4 结 论

提出了二维任意形式运动模糊图像的有效恢复方法,关键是通过快速 CCD 获取序列图像,求出主 CCD 曝光过程中的运动矢量信息,并计算出用来恢复图像的点扩展函数。之后用 RL 迭代法进行图像恢复。给出理论推导,继而给出的具体实现步骤,再通过仿真实验和实拍实验验证,通过主观和客观评价函数验证了方法的有效性。随着制造工艺和材料科学的进步,CCD 的帧率越来越高,文中提出的方法是很容易实现的,在很多情况下,尤其是在分辨率高,曝光时间相对要求较长的航空相机方面拥有较广的应用背景。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Xichun, Cao Fengmei, Jin Weiqi. Recursive model of forward motion blurred image based on polar coordinates[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 552~556  
陈喜春,曹峰梅,金伟其.基于极坐标的相向运动图像模糊的递归模型[J]. *光子学报*, 2007, **36**(3): 552~556
- 2 Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods. Digital Image Processing [M]. Ruan Qiuqi Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003, 220~222  
风萨雷斯,理查德.数字图像处理[M].阮秋琦译.北京:电子工业出版社,2003,220~222
- 3 Marius Tico, Mejdí Trimeche, Markku Vehvilainen. Motion blur identification based on differently exposed images [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2006, **1**: 2021~2024
- 4 Y. Yitzhaky, A. Lantzman, I. Mor *et al.*. Evaluation of the PSF from motion blurred images [C]. *SPIE*, 1997, **3110**: 822~831

- 5 C. Mayntz, T. Aach, D. Kunz. Blur identification using a spectral inertia tensor and spectral zeros[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 1999, **2**: 885~889
- 6 Wu Dongmei. Noisy image estimation with translation invariant wavelet thresholding[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 306~309  
吴冬梅.基于平移不变小波阈值算法的噪声图像估计[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2): 306~309
- 7 J. Y. Bouguet. Pyramidal implementation of the lucas kanade feature tracker description of the algorithm [EB/OL]. 2001-04-11 [2008-01-25]. <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary>
- 8 W. H. Richardson. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, **62**(1): 55~99
- 9 B. Bascle, A. Blake, A. Zisserman. Motion deblurring and super-resolution from an image sequence, proc [J]. *Fourth European Conf. Computer Vision. ECCV*, 96, 573 1996
- 10 Tao Xiaoping, Feng Huajun, Lei Hua *et al.*. A splicing method of sectioned restoration algorithm for images with space-variant point spread function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 648~653  
陶小平,冯华君,雷华等.一种空间变化 PSF 图像分块复原的拼接方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 648~653
- 11 O. Hadar, I. Dror, N. S. Kopeika. Numerical calculation of image motion and vibration modulation transfer function-a new method[C]. *SPIE*, 1991, **1533**: 61~74
- 12 James G. Nagy, V. Paul Pauca, Robert J. Plemmons *et al.*. Space-varying restoration of optical image[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(12): 3162~3174
- 13 Mohammad Faisal, Aaron D. Lanterman, Donald L. Snyder. Implementation of a modified richardson-lucy method for image restoration on a massively parallel computer to compensate for space-variant point spread of a charge-coupled-device camera[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(12): 2593~2603
- 14 K. A. Jain, S. E. Angel. Restoration of images degraded by spatially varying point spread functions by a conjugate gradient method[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(14): 2186~2190
- 15 Fu Zhongliang, Feng Huajun, Xu Zhihai. Restoration of the image blurred by motion based on high-speed CCD motion detection [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(3): 69~73  
付中梁,冯华君,徐之海.基于快速 CCD 位移探测的运动模糊图像的恢复[J]. *光电工程*, 2009, **36**(3): 69~73