

文章编号: 1003-501X(2009)03-0069-05

## 基于快速 CCD 位移探测的 运动模糊图像的恢复

付中梁, 冯华君, 徐之海, 李 奇, 毛成军

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘要:** 提出了一种可以对被任意形式的运动所造成的退化图像进行恢复的方法, 给出了理论推导, 并建立了一套实现系统。解决了以前的恢复方法存在的只能恢复特定运动形式(如匀速直线运动)的模糊图像的局限性问题。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, 然后求得相对运动的瞬时速度, 根据理论分析, 点扩展函数和瞬时速度有着对应的关系, 进而计算出模糊过程的点扩散函数 (PSF), 并用 RL 迭代法来恢复模糊图像。实验结果表明, 这种恢复方法对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:** 数字图像处理; 运动模糊恢复; 快速 CCD; 点扩散函数 (PSF); 图像序列

**中图分类号:** TN911.73

**文献标志码:** A

### Restoration of the Image Blurred by Motion Based on High-speed CCD Motion Detection

FU Zhong-liang, FENG Hua-jun, XU Zhi-hai, LI Qi, MAO Cheng-jun

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

**Abstract:** This paper provides a new method to restore the image blurred by any motion and a corresponding system for experiments is established. Previous restoration methods can only be useable when the motion is special, for example, uniform rectilinear motion, which is solved in the paper. During the integral time of prime CCD, a series of images used to compute the displacement, are captured by the low resolution white-black CCD. And then, the instantaneous speed can be computed. From the theoretic analysis, we know that the Point Spread Function (PSF) has corresponding relationship with the instantaneous speed. Then the PSF for restoring the blurred image can be worked out. Finally, the Richard-Lucy (RL) method is used to restore the blurred image. The experiment shows that, for any motion blurred images, this method for image restoration can get preferable results.

**Key words:** digital image processing; motion blurred restoration; high-speed CCD; PSF; image sequence

## 0 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, 在这里是点扩散函数 PSF, 就可以用来恢复图像<sup>[2]</sup>。但是, 模糊过程的 PSF 往往是不知道的,

收稿日期: 2008-06-26; 收到修改稿日期: 2008-11-05

作者简介: 付中梁(1984-), 男(汉族), 吉林榆树人。硕士研究生, 现从事数字图像处理、图像恢复、计算机视觉和光电仪器的研究。

E-mail: zhongliang.fu@gmail.com.

因此图像恢复的关键就变成了如何推导 PSF。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 PSF,然后恢复<sup>[3]</sup>。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 PSF,主要有两类,一类从空域直接入手,利用差分,相关等等各种方法计算<sup>[4]</sup>,另一种则是通过图像变换后的频谱域中的零值点来计算<sup>[5]</sup>,这些方法往往只能计算特殊运动形式的 PSF,主要是匀速直线运动,而且受噪声影响精度比较低。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限制的计算模糊过程 PSF 的方法。本文提出一种新型的基于 CCD 位移探测的运动模糊 PSF 计算方法。并以此进行实验验证,取得较好的恢复效果。

## 1 PSF 公式的推导

根据线性系统的理论,运动模糊的过程可以用图 1 表示。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  $h(x, y)$  即是我们要求的 PSF。在不考虑噪声的情况下,在频率域可以写成:

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

式(2)中的  $G(u, v)$ ,  $F(u, v)$  和  $H(u, v)$  分别是  $g(x, y)$ ,  $f(x, y)$  和  $h(x, y)$  的傅里叶频谱。假设在曝光时间  $T$  内,如果没有运动,则得到清晰图像  $f(x, y)$ , 现在在曝光的同时成像器件和物体之间有相对位移  $X(t)$ ,  $Y(t)$ , 得到的模糊图像  $g(x, y)$  可以表示为

$$g(x, y) = \int_0^T \frac{1}{T} f[x - X(t), y - Y(t)] dt \quad (3)$$

模糊图像  $g(x, y)$  的频谱  $G(u, v)$  可以根据傅里叶变换计算得到

$$G(u, v) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy$$

把式(3)代入并交换积分次序可得:

$$G(u, v) = \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \int \int_{-\infty}^{+\infty} f(x - X(t), y - Y(t)) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \right] dt \quad (4)$$

式(4)中括号内的积分可以看作  $F(u, v)$  的计算公式,可得  $G(u, v) = \frac{1}{T} \int_0^T e^{-j2\pi[uX(t)+vY(t)]} F(u, v) dt$ , 根据式(2),可得  $H(u, v)$  的表达式如下:

$$H(u, v) = \frac{1}{T} \int_0^T e^{-j2\pi[uX(t)+vY(t)]} dt \quad (5)$$

利用傅里叶逆变换计算公式并交换积分次序:

$$h(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \int \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi u(x-X(t))} e^{j2\pi v(y-Y(t))} du dv \right\} dt \quad (6)$$

简化花括号内的积分有:

$$h(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T \delta[x - X(t), y - Y(t)] dt \quad (7)$$

为简化计算取一维, 变换积分变量  $dt$  为  $dx$ :

$$h(x) = \frac{1}{T} \int_0^d \frac{\delta[x - X(t)]}{dx/dt} dx \quad (8)$$

其中:  $dx/dt$  就是速度  $V(t)$ , 且  $0 \leq X(t) \leq d$ , 故  $\int_0^d \delta[x - X(t)] dx = 1$ , 所以可得:

$$h(x) = \frac{1}{T \cdot V(t)} \quad (9)$$

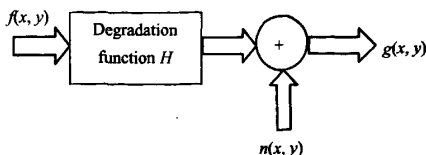


图 1 模糊的退化模型

Fig.1 Degeneration model of motion blur

时间  $t$  和运动位移  $x$  之间存在对应关系, 因此  $V(t)$  可以表示为  $V(x)$ , 所以我们得到了 PSF 的一维计算公式:

$$h(x) = \frac{1}{T \cdot \sum_{i=1}^n V_i(x)} \quad (10)$$

式中引入下标  $n$  是因为成像器件可能做往复的运动, 即在曝光过程中多次经过某一位置, 因此 PSF 在该处的值也为各次大小的和。如果把这一表达式推广到二维, 则为

$$h(x) = \frac{1}{T \cdot \sum_{i=1}^n V_i(x, y)} \quad (11)$$

这就是普通情况下的二维 PSF 计算表达式。

## 2 实验验证及讨论

由上面的推导可以看出, 如果不考虑噪声影响<sup>[7-8]</sup>, 只要我们求到的相对运动的位移矢量, 就能够求出模糊过程的 PSF, 进而恢复图像, 因此关键点变成了如何求取位移矢量, 结构装置图如图 2 所示。

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 PSF, 具体实现步骤如下, 并由图 3 表示:

1) 计算两帧图像之间的位移矢量, 获得离散的位移点信息, 并拟合得到位移曲线(图 3(a)), 本实验中通过改进的 Lucas Kanade 特征点法<sup>[9]</sup>计算位移矢量;

2) 对位移曲线求导, 得到速度曲线  $V(t)$ , 并转换成  $V(s)$ (图 3(b));

3) 对速度取倒数, 并除以曝光时间  $T$  得到 PSF 曲线(图 3(c));

4) 以像素为单位离散化 PSF 曲线(图 3(d)), 并用来恢复图像。本实验中是基于 Lucy-Richardson<sup>[10]</sup>的方法进行恢复;

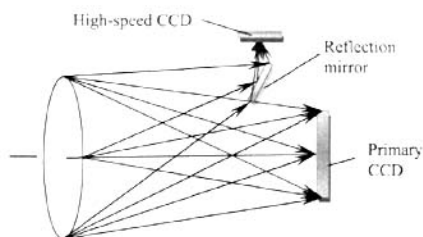


图 2 系统结构图

Fig.2 Composition of the system

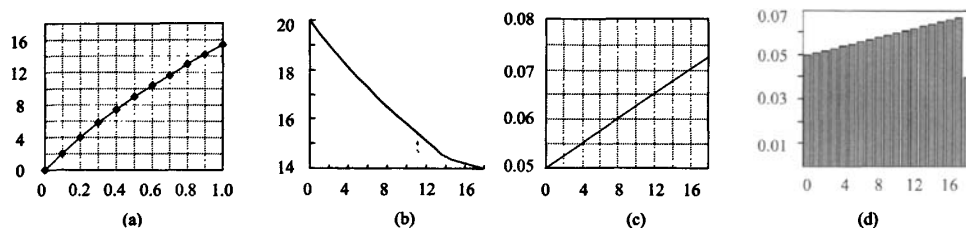


图 3 PSF 的计算过程

(a) 运动位移曲线; (b) 计算出的速度-位移曲线; (c) 估算出的 PSF 曲线; (d) 离散化的 PSF

Fig.3 Computation of PSF

(a) Curve of moved distance; (b) The computed curve of  $V(s)$ ; (c) The computed PSF curve; (d) The discreted PSF.

下面用具体的实验来验证方案的可行性。在本实验中用的两台 CCD 同步方式是软件控制。通过软件发出曝光信号, 控制两台 CCD 开始同步积分。实验中使用的主 CCD 是大恒公司的 DH-SV1310FM 黑白 CCD, 最大分辨力是  $1280 \times 1024$ , 也是实验中使用的分辨力, 快速 CCD 是用敏通编号为 F25239749C 的黑白 CCD, 分辨力是  $640 \times 576$ , 其帧率是 12.5 帧。镜头用的是凤凰的焦距为 50 mm 的标准镜头。

主 CCD 的像素大小为  $6.45 \mu\text{m}$ , 快速 CCD 的像素大小为  $7.5 \mu\text{m}$ 。实验中主 CCD 的曝光时间为 1 s, 其他参数采用默认设置, 实验结果如图 4(a)所示。

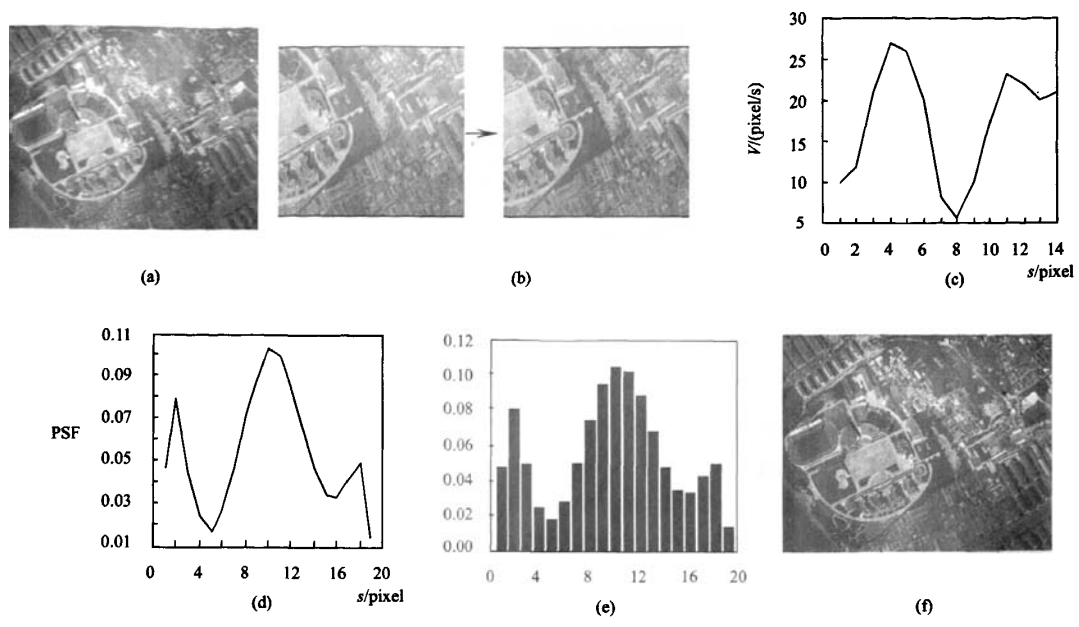


图 4 实验结果

(a) 主 CCD 捕获到的模糊图; (b) 高速 CCD 捕获到的图像序列; (c) 计算出的速度-位移曲线;  
(d) 估算出的 PSF 曲线; (e) 离散的 PSF; (f) 恢复后的图像

Fig.4 Experimental result

(a) The blurred image of primary CCD; (b) The image sequence taken by High-speed CCD;  
(c) The computed curve of  $V(s)$ ; (d) The computed curve of PSF; (e) The discreted PSF; (f) The restoration image.

图 4(a)是在曝光过程中拍摄目标在  $x$  轴方向做随意变速运动,主 CCD 得到的模糊图。而图 4(b)则是有快速 CCD 得到的没有被模糊的图像序列,图 4(c)和图 4(d)是利用这些图像序列计算得到的运动模糊  $V(s)$  曲线以及 PSF 曲线。图 4(e)则是离散化后的 PSF,图 4(f)是利用图 4(e)的 PSF 对图 4(a)用 L-R 算法迭代 15 次后得到的效果图。

下面就用 GMG 和 LS 图像质量评价方法分别对图 4 的模糊图和恢复图进行评价,其结果如表 1 所示。图 5 是另外一组实验的模糊图和恢复图。

表 1 图像质量评价		
Table 1 Quality evaluation		
Evaluate method	LS	GMG
Blured image	28.69	1.948 7
Restoration image	47.01	3.618 1

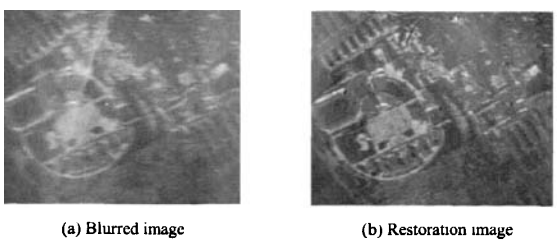


图 5 另一组实验的结果

Fig.5 Result of another experiment

由以上实验结果我们可以看出,这种方法能够近似估计出运动模糊的 PSF,得到很好的恢复效果。

对于快速 CCD 的参数,一方面,快速 CCD 帧频的提高可以提高 PSF 的探测精度,增强探测的抗噪声能力,但同时,帧频的提高会使单一帧接收到的光能量下降,会获得欠曝的图像。严重时也会影响 PSF 的探测精度。另一方面,快速 CCD 分辨力一般是随着帧频增加而减小的,实验证明,在快速 CCD 分辨力为  $80 \times 80$  分辨力的实验条件下,仍能获得较好的恢复效果。

本文主要研究的是一维方向上任意形式运动模糊的恢复,对于不同方向上,即二维运动模糊的恢复,

将在进一步的工作中进行研究。

### 3 结 论

提出了一种可对任意形式运动造成的模糊图像进行恢复的有效方法, 关键是通过快速 CCD 获取曝光过程中的运动矢量信息, 并计算出用来恢复图像的 PSF。首先从理论上推导了 PSF 的计算公式, 继而提出了获取 PSF 的方法, 并给出的具体实现步骤, 最后通过实验证明了方法的可行性。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, 尤其是在分辨力高, 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] 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.  
CHEN Xi-chun, CAO Feng-mei, JIN Wei-qi. Recursive Model of Forward Motion Blurred Image Based on Polar Coordinates [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(3): 552-556.
- [2] Gonzalez Rafael C, Woods Richard E. **Digital Image Processing: 2nd** [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [3] MARIUS Tico, MEJDI Trimeche, MARKKU Vehvilainen. Motion Blur Identification Based On Differently Exposed Images [C]// **IEEE International Conference on Image Processing**, Atlanta, GA, Oct 8-11, 2006, 1: 2021-2024.
- [4] YITZHAKY Y, LANTZMAN A, MOR I, *et al.* Evaluation of the PSF from Motion Blurred Images [J]. *Proc. of SPIE*, 1997, 3110: 822-831.
- [5] MAYNTZ C, AACH T, KUNZ D. Blur Identification Using a Spectral Inertia Tensor and Spectral Zeros [C]// **1999 International Conference on Image Processing**. Kobe, Japan, Oct 24-28, 1999, 2: 885-889.
- [6] HADAR O, DROR I, KOPEIKAN S. Numerical calculation of image motion and vibration modulation transfer function-a new method [J]. *Proc. of SPIE(S0277-786X)*, 1991, 1533: 61-74.
- [7] 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.  
WU Dong-mei. Noisy image estimation with translation invariant wavelet thresholding [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(2): 306-309.
- [8] BOUGUET J Y. Pyramidal implementation of the Lucas Kanade feature tracker Description of the algorithm [EB/OL]. <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary>, 2001-04-11/2008-01-25.
- [9] RICHARDSON W H. Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration [J]. *J. Opt. Soc. Am(S1084-7529)*, 1972, 62(1): 55-99.
- [10] Basile B, Blake A, Zisserman A. Motion Deblurring and Super-Resolution from an Image Sequence [C]// **Proceedings of the 4th European Conference on Computer Vision**, Cambridge UK, April 14-18, 1996, 1996: 573-582.