

任意运动形式模糊图像的恢复*

毛成军, 李奇, 徐之海, 冯华君, 陈跃庭

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要:通过理论推导,提出了一种可以对被任意形式的运动所模糊的图像进行恢复的方法,并据此给出了一套实现系统.在成像器件曝光的同时,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运动的位移信息,进而计算出模糊过程的点扩散函数,并用来恢复模糊图像,获得了较好的效果.

关键词:数字图像处理;运动模糊恢复;快速 CCD;点扩散函数;图像序列

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)08-2126-5

0 引言

在航空相机对地面物体成像时,通常需要较长的曝光时间.在曝光的过程中,成像器件与物体之间往往存在着相对运动,因此拍出来的图像是被运动模糊后的图像^[1].这种图像质量较差,需要先进行模糊恢复,对于如何恢复被运动模糊的图像,有很多前人做了大量的工作.

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(Point Spread Function, PSF),就可以用图 1 来恢复图像^[2].但事实是,模糊过程的 PSF 往往是不知道的,因此图像恢复的关键就变成了如何找出 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^[3].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^[4],另一种则是通过图像变换后的频谱域中的零值点来计算^[5],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.

1 理论证明

根据线性系统的理论,运动模糊的过程可以用图 1 的模型来表示.

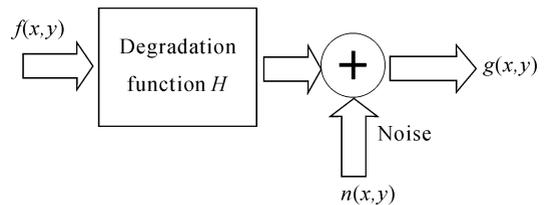


图 1 运动模糊图像退化模型

Fig. 1 Motion-blur degradation model

最后的模糊图像 $g(x, y)$ 可以表示为

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

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

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

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, $G(u, v) = \iint_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy$ 把式(3)代入并交换积分次序可得

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

式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 $H(u, v)$ 的表达式为

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

利用傅里叶逆变换计算公式并交换积分次序

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

* 国家重点高技术研究发展计划项目(2007AA12Z150、2009AA12Z108),浙江省重大科技专项(2008C16018)资助

† Tel: 0571-85951182

Email: fenghj@zju.edu.cn

收稿日期: 2008-01-25

修回日期: 2008-04-02

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 ,

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

dx/dt 就是速度 $v(t)$,且 $0 \leq X(t) \leq d$,故

$$\int_0^d \delta(x - X(t)) dx = 1, \text{ 所以可得} \quad (9)$$

$$h(x) = 1/[T \cdot V(x)]$$

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 $V(x)$,所以得到 PSF 的一维计算公式为

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

式(10)中引入下标 n 是因为成像器件可能做来回的运动,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. 如果假设成像系统成像理想,则点光源的响应为冲击函数 $\delta(x)$,如果存在相对运动,则 $\delta(x)$ 也会在 x 轴上来回运动,我们可以计算出它在 x 轴上的概率密度分布函数,发现就是我们的 PSF 的表达式. 这与 N. S. Kopeika 提出的利用概率密度分布函数来计算系统传递函数的思想是相符的^[6]. 而且因为该表达式可以看作冲击函数 $\delta(x)$ 的概率密度分布,因此由此计算出的 $h(x)$ 在 x 轴上

的积分和为 1,符合能量守恒定律.

如果把这一表达式推广到二维,则为

$$h(x, y) = \frac{1}{[T \cdot V(x, y)]} \quad (11)$$

式(11)是普通情况下的二维 PSF 计算表达式.

2 实验仿真

由推导可以看出,如果不考虑噪声影响^[7-8],只要求得相对运动的速度信息,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速度信息,具体装置结构如图 2.

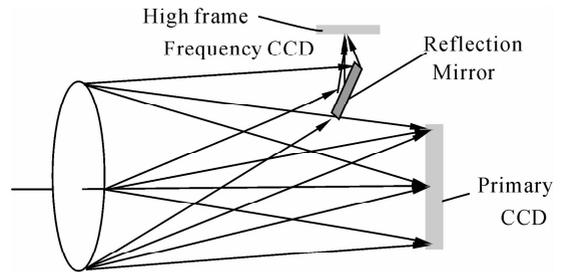


图 2 系统结构
Fig. 2 Structure of the system

在系统中大部分的成像光束都集中在主 CCD,也就是用来获得高分辨图像的 CCD 上面,而边缘有一小部分成像光线则被反射镜反射投在快速 CCD 上,并在高分辨率 CCD 的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. 得到视频序列后,再通过计算,获得模糊过程的 PSF,具体实现步骤如下,并由图 3 表示.

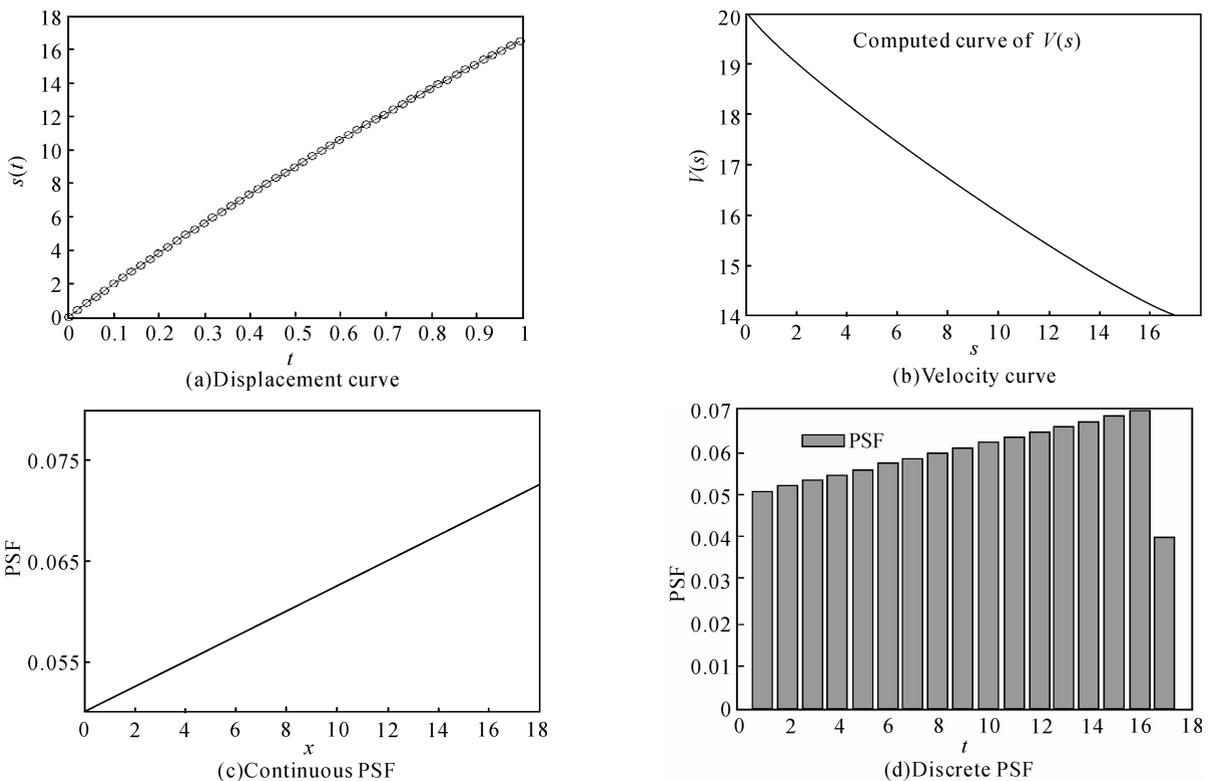


图 3 获得模糊过程 PSF 的实现步骤
Fig. 3 Process of obtaining PSF blurred

- 1) 计算两帧图像之间的位移向量, 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 Lucas Kanade 特征点法^[9] 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 3d), 并用起来恢复图像. 本实验中是基于 Lucy-Richardson^[10] 的方法进行恢复;

用具体的仿真实验来验证方案的可行性. 曝光时物体与 CCD 之间的相对位移为 $s(t) = 40(\sqrt{t+1}-1)$, 主 CCD 有效分辨率为 450×299 , 曝光时间为 1s, 快速 CCD 有效分辨率为 210×140 , 帧率为 50 帧每秒.

图 4 为没有运动时获得的清晰像, 图 5(a) 为由快速 CCD 得到的视频序列, 图 5(b) 是有相对运动时获得的模糊图像, 图 5(c) 是根据视频序列计算出的 PSF, 图 5(d) 是最后的恢复效果图, 其迭代次数为 20.



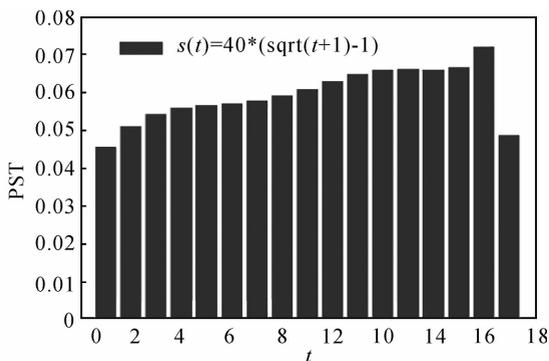
图 4 清晰图
Fig. 4 Un-blurred image



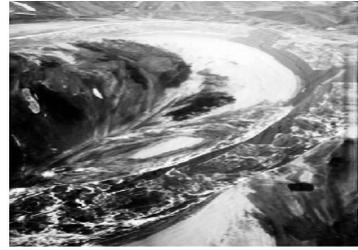
(a) Video frequency



(b) Motion-blurred image



(c) Computed discrete PSF



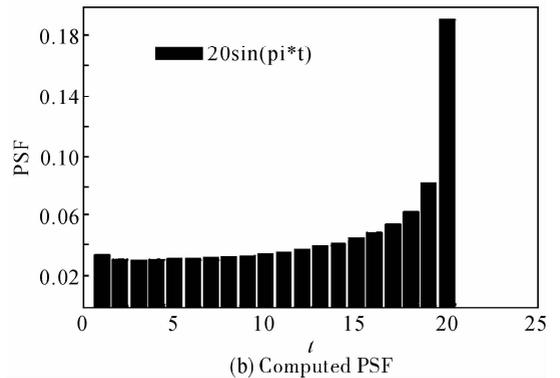
(d) Filtered image

图 5 视频序列和模糊图 PSF 和恢复
Fig. 5 Video frequency, motion-blurred image, PSF and filtered image

从图 5(d) 可以看出, 效果是比较理想的. 如果 CCD 的帧率足够快, 这种计算方法就不会受到运动形式的影响, 不像其他的一些方法, 只能计算特定形式的运动模糊的 PSF, 如匀速直线运动. 接下来仍然用相同的 CCD 和曝光时间, 只是相对运动的形式变成正弦运动和匀速直线运动, 其位移分别是 $s(t) = 20 \sin(\pi t)$, 以及 $s(t) = 20t$, 效果分别如图 6 和图 7.



(a) Motion-blurred image



(b) Computed PSF



(c) Filtered image(20)

图 6 位移为 $s(t) = 20 \sin(\pi t)$ 时的恢复结果
Fig. 6 Result with $s(t) = 20 \sin(\pi t)$



(a) Motion-blurred image

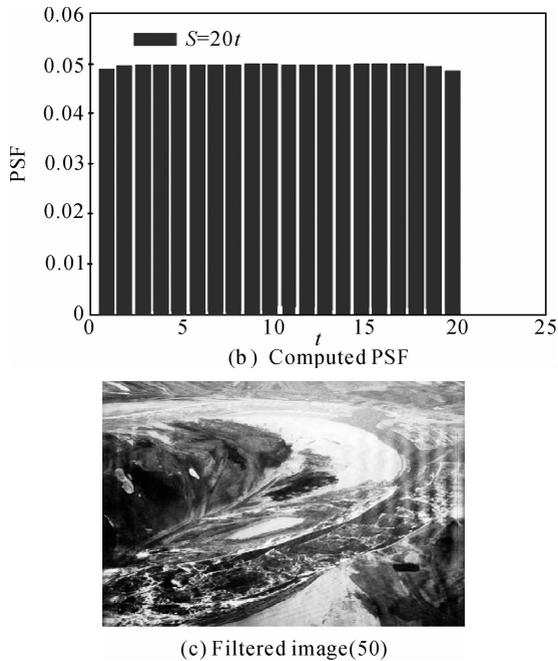


图7 位移为 $s(t)=20t(\pi t)$ 时的恢复结果
Fig.7 Result with $s(t)=20t$

从图 6、7 的效果图可以看出,对于不同的运动形式,本文提到的方法均能得到较为理想的结果.此外,由于 Lucy-Richardson 方法是一种迭代非线性算法,所以要选择适当的迭代次数,理论上计算次数越多效果越好,但实际上达到某个次数之后效果不会有明显的变化,而计算时间则大大增加,并且当迭代次数越多时,鬼影效应也会变得更明显,如图 7(c).

3 结论

文中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 获取曝光过程中的相对位移信息,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,最后通过仿真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,DALASA 公司的 IA-D1 型号的 128×128 面阵 CCD 帧率达到了 830 fps,该公司的分辨率为 640×480 的 IA-G1 型 CMOS 图像传感器帧速率更是达到了惊人的 1 300 fps,而 Mikrottron 公司和

Photonfocus 公司也有 1000 fps 以上的 CMOS 图像传感器产品. 因此,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 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.
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 CG, RICHARD E W. Digital image processing[M]. 2th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [3] MARIUS T, MEJDI T, MARKKU V. Motion blur identification based on differently exposed images [C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2006, **1**: 2021-2024.
- [4] YITZHAKY Y, LANTZMAN A, MOR I, et al. Evaluation of The PSF from Motion Blurred Images[C]. *SPIE*, 1997, **3110**: 822-831.
- [5] MAYNTZ C, AACH T, KUNZ D. 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] HADAR O, DROR I, KOPEIKA N S. Numerical calculation of image motion and vibration modulation transfer function-a new method[C]. *SPIE*, 1991, **1533**: 61-74.
- [7] WU Dong-mei. 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音图像估计[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2): 306-309.
- [8] ZHENG Gang, JIA Zhen-hong. Application of homo morphic technology in infrared images processing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1401-1403.
郑刚,贾振红.同态技术在红外图像处理中的应用[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9): 1401-1403.
- [9] BOUGUET JY. 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>.
- [10] RICHARDSON W H. Bayesian-based iterative method of image restoration [J]. *J Opt Soc Am*, 1972, **62**(1): 55-99.

Arbitrary Motion Blurred Image Restoration

MAO Cheng-jun, LI Qi, XU Zhi-hai, FENG Hua-jun, CHEN Yue-ting

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

Abstract: An approach which can be used to restore the images that were blurred by arbitrary motion was proposed in this paper. When exposure time, video frequency were caught by the ccd that has high frame frequency, which were used to compute the information about the motion and finally compute the point spread function (PSF), necessary to restore the motion-blurred image.

Key words: Digital image processing; Motion-blurred image restoration; High frame frequency ccd; Point spread function; Video frequency



MAO Cheng-jun is studying for the M. S. degree at Zhejiang University. His research interests focus on digital image processing, focus on attention upon image stabilization and restoration.