

# 基于视频重建的颤振探测与图像复原方法

唐超影 陈跃庭\* 李 奇 冯华君 徐之海

浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

**摘要** 提出了一种基于单次曝光视频重建的颤振探测与图像去模糊的方法,该方法对采样区域处的像素进行编码曝光,并由此重建出一系列视频图像,通过视频图像的位移矢量构建点扩展函数,最终复原模糊图像。该方法不需要额外硬件,在系统复杂度和成本上有着一定优势。仿真结果表明,该方法可以较好地复原图像。

**关键词** 图像处理;图像复原;颤振探测;压缩感知;编码曝光;视频重建

中图分类号 TN911.73 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0410002

## Motion Detection and Image Restoration Based on Video Reconstruction from a Single Coded Exposure Photograph

Tang Chaoying Chen Yueting Li Qi Feng Huajun Xu Zhihai

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

**Abstract** A motion detection and image restoration method based on video reconstruction from a single coded exposure photograph is proposed. The exposure time of each pixel in the sampling regions is modulated respectively, and a serial of video frames are reconstructed from the coded exposure image of each region. By using the frames of the videos, displacement vectors and point spread function are calculated, and used to restore the blurred image finally. The proposed approach needs no additional devices and has advantages in both systematic complexity and cost. The effectiveness of the proposed method is experimentally confirmed by the results of simulation on problems of motion detection and image restoration.

**Key words** image processing; image restoration; motion detection; compressive sensing; coded exposure; video reconstruction

**OSIC codes** 100.2000; 100.3010; 110.1758

## 1 引 言

在光学遥感成像中,获得清晰的高分辨率的图像具有十分重要的现实意义。然而在空间相机成像过程中,由于卫星姿态变化、挠性组件的扰动等因素,导致卫星平台颤振,图像产生拖影,造成图像模糊,降低图像分辨率<sup>[1]</sup>。在光照条件不理想的情况下,相机曝光时间更长,使得图像模糊问题更加严重。

图像去模糊是一类图像复原问题。图像去模糊的任务就是依据一定的先验知识,从已知的模糊图像复原真实图像。图像模糊退化模型描述为<sup>[2]</sup>模糊核或点扩展函数(PSF)乘以清晰图像再加上图像噪声。为了复原出清晰图像,通常需要先得到点扩展函数。

从硬件的角度来看,主要是基于运动轨迹的PSF重构方法。Janschek等<sup>[3]</sup>提出了基于光学相关器的颤振探测方法,在该方法中,需要的探测设备包括高速电荷耦合器件(CCD)和光学相关器,高速CCD所得的相邻

收稿日期: 2014-10-11; 收到修改稿日期: 2014-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(61107009)

作者简介: 唐超影(1991—),男,硕士研究生,主要从事光学压缩成像方面的研究。E-mail: tcyopt@zju.edu.cn

导师简介: 冯华君(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事光学成像系统和遥感等方面的研究。

E-mail: fenghj@zju.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: chenyt@zju.edu.cn

两帧图像经光学相关器处理后得到相应的颤振位移矢量,精度较高。所得位移矢量被反馈到控制机构,推动成像 CCD 对相应的颤振运动做出补偿。而在 S.K. Nayar 等<sup>[4]</sup>的研究工作中,则采用了将高速相机和成像相机相结合的成像方式,即在成像相机曝光过程中,用高速相机记录下目标的多帧连续图像,通过配准算法得到相邻帧间的位移矢量,从而实现颤振探测,所得位移矢量被用于构建图像复原所需的 PSF。国内也进行了相关的研究,利用多种途径获取 PSF,如钱义先等<sup>[5]</sup>利用光学相关的双 CCD 成像系统的图像运动测量方法进行测量运动位移。余玉华等<sup>[6]</sup>利用哈特曼-夏克波前传感器探测离焦波前,根据所得波前计算光学系统的点扩展函数。孙韬等<sup>[7]</sup>则利用光学卫星五谱段合一多光谱相机影像定量检测卫星颤振,并采用 PSF 空间移变降质模型对影像进行恢复。

通过硬件进行颤振探测并由此构建 PSF 的方法,具有较高构建精度,但系统复杂度和成本较高。非硬件方面,比较经典的有点光源法和刃边法<sup>[8,9]</sup>。刃边法是在图像上选择具有一定反差的两块相邻的直线边界,称为刃边,通过测定成像系统对这一刃边的模糊情况来确定光学系统对各种空间频率的响应。

此外,盲复原以其不需要先验信息以及额外硬件设备的特点,逐渐成为图像去模糊界的关注热点。图像盲复原是一个病态求逆过程,需要同时对清晰图像和 PSF 做出估计,大多数的盲复原算法<sup>[10-12]</sup>都是通过轮换迭代的方式来得到最优解。由于算法需要多步迭代,盲复原算法时间复杂度较高,而且无法得到相机的颤振信息。

近年来,随着压缩感知<sup>[13-14]</sup>理论的提出,出现了基于压缩感知的运动图像复原方法<sup>[15,16]</sup>,这类方法通过在曝光时间内对像素调制,得到经过编码的模糊图像,再利用重建算法获得一系列清晰视频图像,从而达到复原模糊图像的目的。尽管该方法不需要增加额外的硬件,并且能较好地处理复杂的运动模糊问题,但较高的时间复杂度和较低的图像重建精度制约了其应用范围,使其未能很好的运用于颤振模糊图像的恢复。

在此基础上,本文提出了一种基于压缩感知理论的图像去模糊的方法。与文献[15]中方法类似,本文方法需要在曝光时间内对像素进行曝光编码,并由编码图像重建出视频图像,但考虑到系统复杂度和时间复杂度的问题,该方法仅对少数采样区域的像素进行曝光编码和重建,通过重建出的视频图像估计位移矢量,从而构建出点扩展函数,最终复原模糊图像。所提方法不需要额外硬件,可同时获得颤振信息以及复原图像,在系统复杂度和时间复杂度上有较大优势。

## 2 理论基础

根据压缩感知理论,设长度为  $N$  的信号  $X$  在某组正交基或紧框架  $\Psi$  上的变换系数是稀疏的,如果用一个与变换基  $\Psi$  不相关的观测基  $\Phi: M \times N (M \ll N)$  对系数向量进行线性变换,并得到观测向量  $Y: M \times 1$ ,可利用优化求解方法从观测集合中精确或高概率地重构原始信号  $X$ 。

视频信号可以看作空间和时间的体数据<sup>[16]</sup>,定义  $E(x,y,t)$  为  $M \times M$  像素的未知视频信号数据体,则数据体  $E$  的大小为  $M \times M \times N$ ,其中  $N$  为视频帧数。 $S(x,y,t)$  为每个像素在全部曝光时间上的采样函数 [ $S(x,y,t) \in \{0,1\}$ ],那么获得的观测图像  $I(x,y)$  表示为

$$I(x,y) = \sum_{t=1}^N S(x,y,t) \cdot E(x,y,t). \quad (1)$$

如图 1 所示,通过二维的观测图像  $I(x,y)$  可重建出三维视频信号  $\hat{E}$ 。

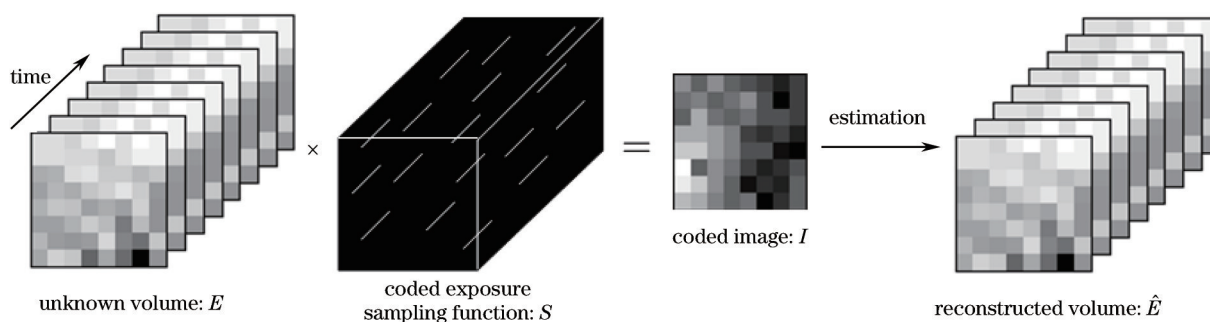


图 1 单帧图像视频重建

Fig.1 Video reconstruction by single coded exposure photograph

(1)式可写作矩阵形式  $I=SE$ , 表示为

$$\begin{pmatrix} I_{1,1} \\ I_{2,1} \\ \vdots \\ I_{M,M} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{1,1,1} & 0 & \cdot & \cdot & S_{1,1,2} & 0 & \cdot & \cdot & S_{1,1,N} & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 S_{M,M,1} & 0 & \cdot & \cdot & 0 S_{M,M,2} & 0 & \cdot & \cdot & 0 S_{M,M,N} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1,1,1} \\ \vdots \\ E_{M,M,1} \\ E_{1,1,2} \\ \vdots \\ E_{M,M,2} \\ E_{1,1,N} \\ \vdots \\ E_{M,M,N} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中  $I$ (观测信号)和  $E$ (视频信号)分别为包含  $M \times M$  和  $M \times M \times N$  个元素的向量。

由于观测信号要远少于视频信号,因此该方程为欠定方程。根据压缩感知理论,视频信号的重构问题可表示为

$$\hat{E} = \arg \min_E \|I - SE\|_2^2, \quad (3)$$

式中  $E$  又可以用某一三维字典  $\Psi$  的稀疏来表示,即  $E = \Psi\theta$ , 其中  $\theta$  为稀疏系数向量。那么求解问题变为

$$\min \|\theta\|_0 \quad \text{s.t.} \quad \|I - S\Psi\theta\|_2^2 \leq \varepsilon, \quad (4)$$

式中  $\varepsilon$  为重建精度。

使用正交匹配跟踪(OMP)算法<sup>[17]</sup>对(4)式进行求解,所得结果为稀疏系数  $\theta$ , 从而由关系式  $E = \Psi\theta$  得到视频信号。

### 3 颤振探测与图像去模糊方法

#### 3.1 方法整体流程

针对相机颤振模糊的问题,提出了基于单次曝光视频重建的颤振探测与去模糊方法,方法的整体流程如图2所示。在一次曝光过程中,通过控制互补金属氧化物半导体(CMOS)的工作时间,对图像四周边缘处的采样块进行曝光编码,获得编码后的图像块,然后使用单张图像视频重建方法重建出视频图像,重建出的视频图像用于相邻帧间的位移估计,从而实现颤振探测,同时所得颤振矢量可构建图像复原所需的PSF,最终复原模糊图像。由于不需要额外硬件,本文方法能减少系统复杂度和成本,于此同时,相较于文献[15]中基于整体重建的方法,本文方法由于仅重建采样区域图像,因而有着更快的重建时间。此外,本文方法亦能获

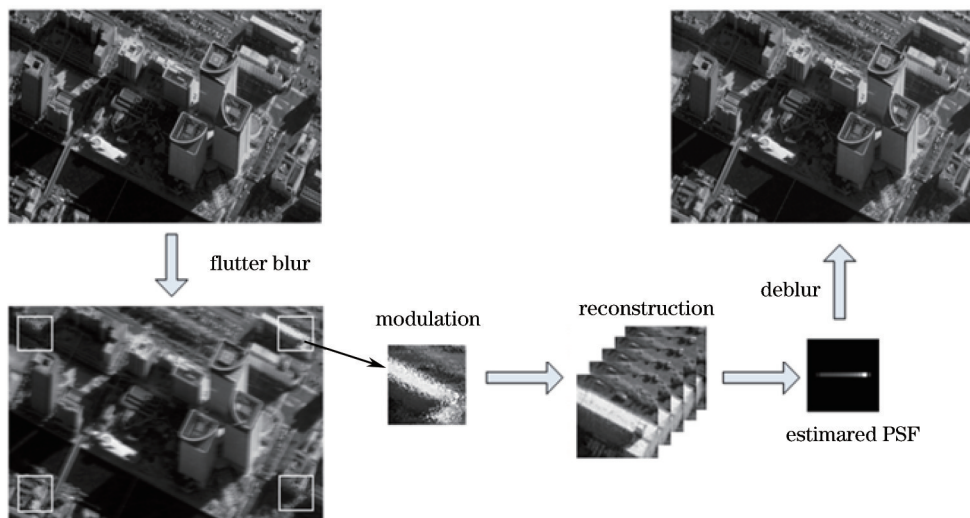


图2 方法整体流程

Fig.2 Overall process of the proposed method

得相机的颤振信息,这是盲复原等直接复原方法所欠缺的。

### 3.2 像素编码

CMOS图像传感器的光电转换原理与CCD基本相同,其光敏单元收到光照后产生光生电子。而信号的读出方法却与CCD不同,每个CMOS源像素传感单元都有自己的缓冲放大器,而且可以被单独选址和读出,这为单个像素控制提供了可能。在曝光过程中,将曝光时间分为等长的时间片段,同时使用随机采样函数对采样区域内的每个像素进行曝光编码,编码遵循各像素的曝光时间相同、曝光片段连续的原则,如图3所示,从而获得编码后的模糊图像块。由于采样区域所包含的信息量会对PSF的估计产生影响,对于编码采样区域大小的设定,采样区域越大,所估计的PSF精度越高,复原效果越好。但是随着区域增大,计算时间也会随之增加,此外,还应考虑图像整体大小。因此将采样区域大小设为64 pixel×64 pixel。

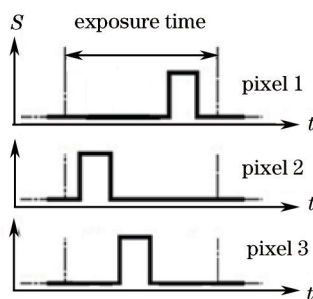


图3 像素曝光编码

Fig.3 Pixel exposure encoding

### 3.3 视频重建

视频重建问题如(3)式所述,使用OMP算法进行求解。由于颤振估计的精度依赖于视频重建精度,因此,为了获得更高的重建精度,首先使用KSVD<sup>[18]</sup>算法对三维字典  $\Psi$  进行训练。

信号稀疏分解理论的数学模型是:给定一个集合  $\Psi = \{\psi_k, k = 1, 2, \dots, K\}$ , 其中  $\Psi$  为字典,  $\Psi$  中的每一个元素  $\psi_k$  称为字典原子。对于任意给定的信号  $X \in R^N$ , 可以将其分解为字典下各个原子的线性组合形式:

$$X = \sum_{k=1}^K \alpha_k \psi_k. \quad (5)$$

如图4所示,其中  $\alpha = \{\alpha_k, 1 \leq k \leq K\}$  是信号  $X$  在字典  $\Psi$  下的分解系数。若字典原子数量  $K > N$ , 则称字典  $\Psi$  是冗余字典,若其也可以张成  $N$  维欧式空间  $R^N$ , 则认为此字典是过完备的,在该字典上分解获得的系数不唯一。

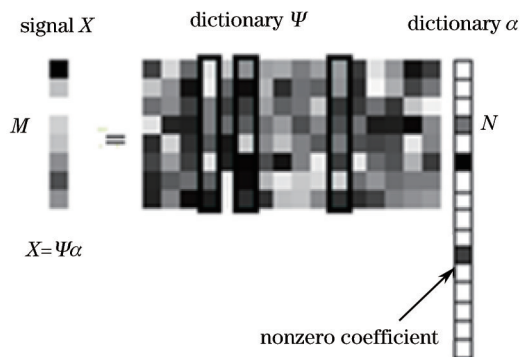


图4 过完备字典示意图

Fig.4 Sketch map of over-complete dictionary

使用KSVD的方法训练字典,选择尽可能逼近原始数据的基函数作为字典的原子。KSVD字典学习算法是一种迭代算法,通过简单而有效地逐列更新的方式,实现字典的整体更新。定义码集  $\Psi = \{\psi_i\}_{i=1}^K$ , 训练样本集  $X = \{x_i\}_{i=1}^N$ 。当  $\Psi$  给定时,各信号  $x_i$  可用其最近的码字表示,即  $x_i = \Psi \alpha_i$ , 其中  $\alpha_i = e_j$  为一稀疏基中的向

量,该向量仅在第 $j$ 项为1,其余项全为0。 $j$ 由下式得到:

$$\forall k \neq j \quad \|x_i - \Psi e_j\|_2^2 \leq \|x_i - \Psi e_k\|_2^2. \quad (6)$$

这可以看作稀疏表示的一种极限情况:稀疏系数仅有一项,且必须为1。从而在最近邻域中找到最佳的编码集来表示训练样本集 $X$ 。

$$\min_{\Psi, A} \{\|X - \Psi A\|_F^2\} \quad \text{subject to } \forall i, \alpha_i = e_k \text{ for some } k, \quad (7)$$

式中 $A = \{\alpha_i\}_{i=1}^N$ 。

求解主要包括两个过程:1)利用K-means聚类将训练样本 $X$ 以接近 $\psi_k^{(j-1)}$ 的程度为依据,分为 $K$ 组 $[R_1^{(j-1)}, R_2^{(j-1)}, \dots, R_K^{(j-1)}]$ ,

$$R_k^{(j-1)} = \left\{ i \mid \forall l \neq k, \|x_i - \psi_k^{(j-1)}\|_2 < \|x_i - \psi_l^{(j-1)}\|_2 \right\}. \quad (8)$$

2)对 $\Psi^{(j-1)}$ 中的每一列按照下式更新,并令 $J = J + 1$ 。重复上述步骤直到收敛。

$$\psi_k^{(j)} = \frac{1}{|R_k^{(j-1)}|} \sum_{i \in R_k^{(j-1)}} x_i. \quad (9)$$

对若干幅遥感图像在不同颤振方式下的模拟序列图像进行训练,图5为对训练得到的部分字典示意图。训练字典用于OMP算法重构图像。

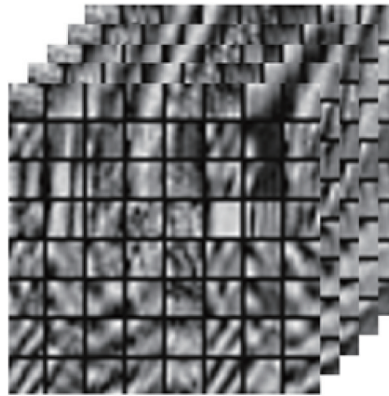


图5 训练字典示意图

Fig.5 Sketch map of the trained dictionary

### 3.4 位移估计与去模糊

获得采样区域内的重建视频后,使用配准算法得到相邻帧间的位移矢量,使用亚像素相位相关算法<sup>[9]</sup>进行位移配准,设置配准精度为1/20 pixel,该算法在图像清晰时有着非常高的配准精度,通过插值可拟合出颤

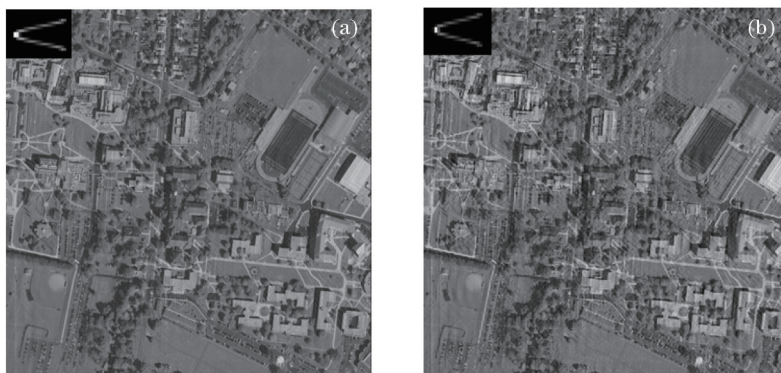


图6 使用构建的PSF复原图像结果。(a)列方向位移矢量误差6%;(b)列方向位移矢量误差14%

Fig.6 Restoration results using constructed PSF. (a) 6% displacement vector error of column direction; (b) 14% displacement vector error of column direction

振矢量,所得颤振矢量被用于构建图像复原所需的PSF,进而对非采样区的模糊图像去模糊。考虑到周期性图像和均匀图像会降低位移矢量的估计精度,进而影响PSF估计,特别是在二维颤振模式下对位移矢量精度要求更高,若位移矢量估计不准确,往往会出现所得PSF与真实PSF形状相似,但复原结果相去甚远的情况,如图6所示。因此需去掉误差较大的位移矢量,并对剩余各位移矢量求均值以减小位移矢量估计误差。

### 4 仿真与分析

仿真实验所用计算平台为Intel(R)Core(TM)i7-4770,中央处理器(CPU)3.4 GHz,8G RAM。仿真图像I的大小为400 pixel×600 pixel,采样区域在图像四个顶点位置,采样块大小64 pixel×64 pixel。曝光时间分为21个片段,像素编码的曝光时间为总曝光时间的1/7。仿真颤振为x方向上振幅为15 pixel的半周期正弦运动。

图7为重建视频的各帧图像,图7(a)为模糊图像,图7(b)为经过曝光编码后的调制图像,图7(c)~(e)分别为重建视频的第5、8、11帧,图8为利用重建视频得到的像移轨迹以及相对于原颤振像移的相对误差。从图8可以看出,估计像移的相对误差均在3.5%以下,可认为本文方法能够较好的估计颤振信息。

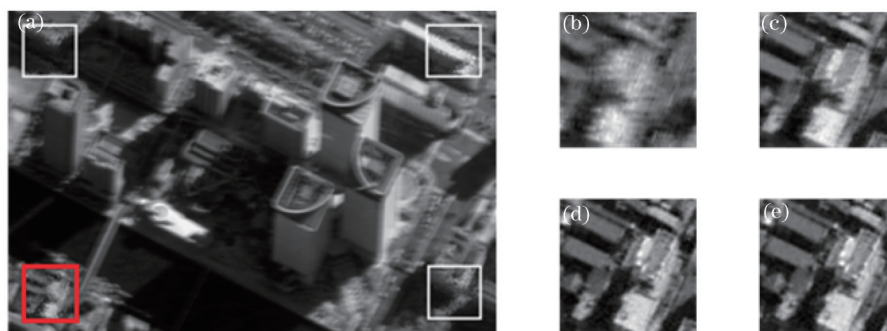


图7 图像调制与重建。(a)模糊图像与采样区域;(b)调制图像块;(c)重建图像第5帧;(d)重建图像第8帧;(e)重建图像第11帧

Fig.7 Image modulation and reconstruction.(a) Blurred image and sampling regions; (b) modulated blocks; (c) reconstructed frame 5; (d) reconstructed frame 8; (e) reconstructed frame 11

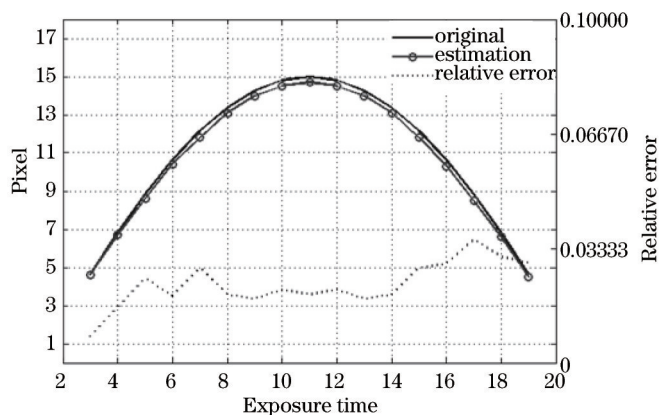


图8 像移轨迹

Fig.8 Image motion trajectory

所得颤振信息用于构建去模糊所需的PSF,进而对中间模糊图像去模糊。对于采样区域,可用重建出的清晰图像块进行填补。图9为本文方法与盲复原<sup>[12]</sup>对一维颤振模糊图像I的去模糊效果比较图,图10为区域放大图,由图10可知,在颤振轨迹精确估计时,本文方法有着更好的去模糊效果。

图像II的大小为750 pixel×750 pixel,颤振模式为x、y两方向上的正弦运动,分别为振幅10 pixel的整周期正弦运动和振幅15 pixel的半周期正弦运动。图11为图像II复原结果。从图中看出,颤振为二维方向时,由于运动方式复杂化,导致图像更为模糊,此时使用盲复原方法难以得到好的效果,其估计的PSF与真实颤

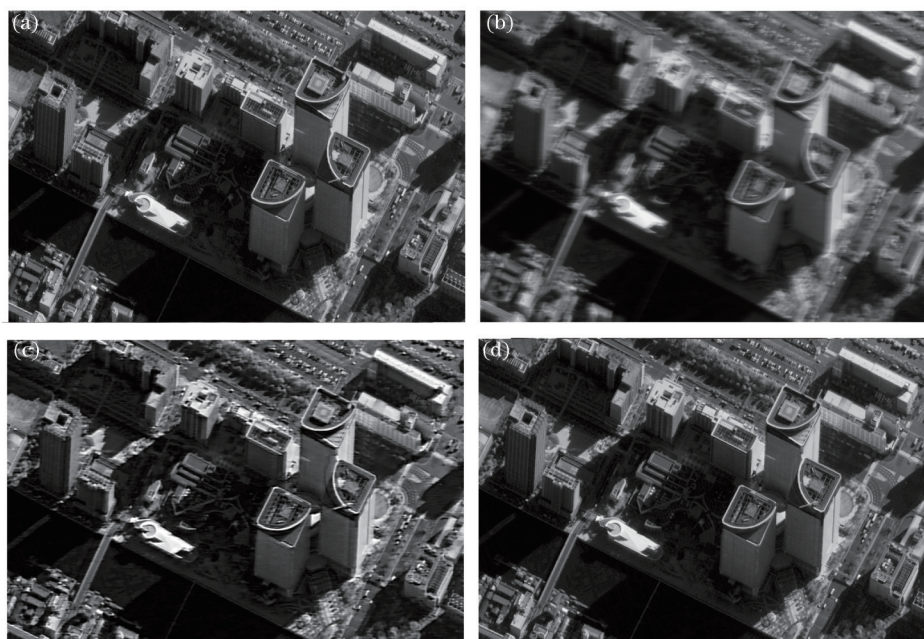


图9 一维颤振图像复原效果比较。(a)清晰图像;(b)模糊图像;(c)盲复原结果;(d)本文方法复原结果

Fig.9 Effect comparison of one-dimensional flutter image restoration. (a) Clear image;(b) blurred image; (c) restored image by blind restoration; (d) restored image by the proposed method

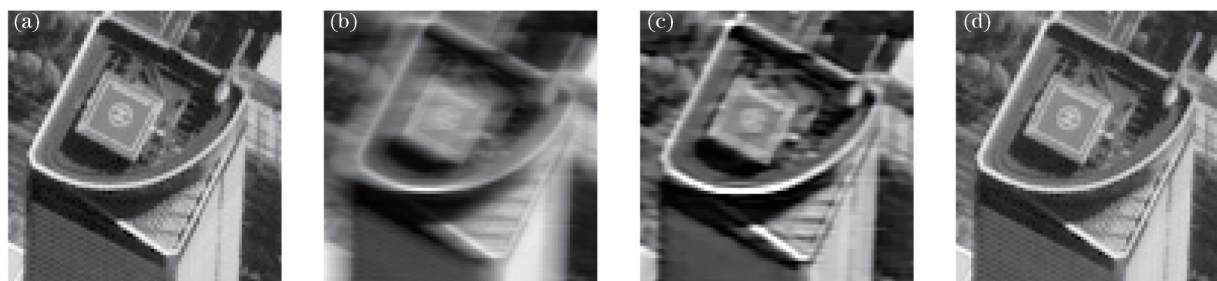


图10 图像I复原图像区域放大图。(a)清晰图像;(b)模糊图像;(c)盲复原结果;(d)本文方法复原结果

Fig.10 Close-ups of the restored image I. (a) Clear image; (b) blurred image; (c) restored image by blind restoration; (d) restored image by the proposed method

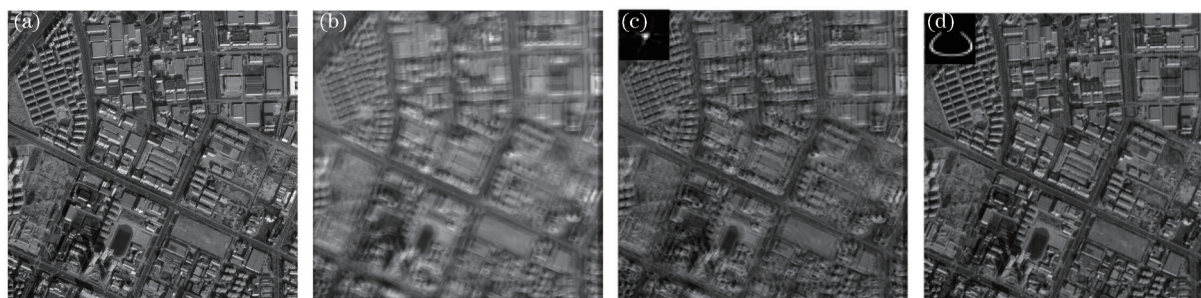


图11 二维颤振图像复原效果比较。(a)清晰图像;(b)模糊图像;(c)盲复原结果;(d)本文方法复原结果

Fig.11 Effect comparison of two-dimensional flutter image restoration. (a) Clear image; (b) blurred image; (c) restored image by blind restoration; (d) restored image by our method

振产生的PSF有较大差异,而本文方法能更为准确的估计出PSF。图12、图13为部分其他二维颤振模式下的仿真结果,可以看出本文方法对于二维颤振模式下的PSF估计以及图像复原有着更好的效果。表1为仿真图像的峰值信噪比(PSNR)以及结构相似度(SSIM)数值比较。

在计算时间方面,对于大小为750 pixel×750 pixel的观测图像,文献[14]中复原方法视频图像整体重建所需平均时间为4000 s,且随图像大小增大而显著增加。对于同样大小的图像,采用4个大小为64 pixel×64 pixel

的采样区域,通过采样区域重建、PSF估计以及反卷积平均一共耗时为200 s,从而大大减小了运算时间,增大了方法的实用性。且由于本文方法是对各采样区域图像块进行重建,因此可使用并行运算等方式,进一步降低计算时间。

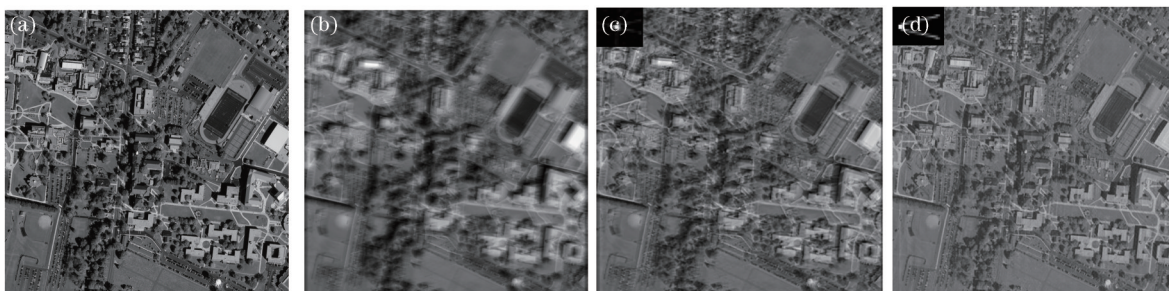


图12 实验结果。(a)清晰图像;(b)模糊图像;(c)盲复原结果;(d)本文方法复原结果

Fig.12 Experimental results. (a) Clear image; (b) blurred image; (c) restored image by blind restoration; (d) restored image by the proposed method

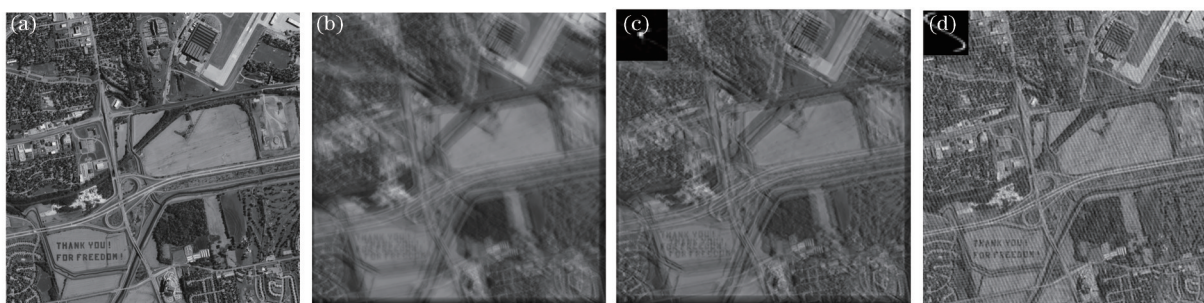


图13 实验结果。(a)清晰图像;(b)模糊图像;(c)盲复原结果;(d)本文方法复原结果

Fig.13 Experimental results. (a) Clear image; (b) blurred image; (c) restored image by blind restoration; (d) restored image by the proposed method

表1 复原图像PSNR与SSIM比较

Table 1 Comparison of the restored images by PSNR and SSIM

		Blurred image	Blind restoration	Proposed method
Image I	PSNR/dB	16.875	24.576	31.390
	SSIM	0.337	0.809	0.935
Image II	PSNR/dB	16.124	16.958	22.223
	SSIM	0.307	0.338	0.717
Average	PSNR/dB	16.180	18.562	23.891
	SSIM	0.312	0.456	0.805

## 5 结 论

提出了一种基于单帧图像视频重建的颤振探测与图像去模糊方法。在曝光时间内对少数采样区域内像素进行曝光编码,由编码图像重建出视频图像,通过重建出的视频图像估计位移矢量,并构建出点扩展函数,最终复原模糊图像。该方法不需要额外硬件,可同时获得颤振信息以及复原图像。此外,该方法能更好地处理复杂运动时的情况。

本文方法仍存在问题:1) PSF的估计非常依赖于视频图像的重建精度,而视频重建精度又受到图像噪声以及训练字典内容的制约,且颤振方式越复杂,对重建精度要求就越高。2)尽管本文方法的计算时间相较于图像整体重建的方法减少了许多,但依旧很大,在实时性上仍需进一步改善。

## 参 考 文 献

1 R Fergus, B Singh, A Hertzmann, *et al.*. Removing camera shake from a single photograph [C]. ACM Transactions on Graphics



- (TOG). ACM, 2006, 25(3): 787–794.
- 2 P C Hansen, J G Nagy, D P O'Leary, *et al.*. Deblurring Images: Matrices, Spectra, and Filtering [M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2006.
- 3 K Janschek, V Tcherykh. Optical correlator for image motion compensation in the focal plane of a satellite camera [J]. Space Technology, 2001, 21(4): 127–132.
- 4 S K Nayar, M Ben-Ezra. Motion-based motion deblurring[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 2004, 26(6): 689–698.
- 5 Qian Yixian, Hong Xueting, Jin Weimin. Motion measurement of dual-CCD imaging system based on optical correlator[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0708002.  
钱义先, 洪雪婷, 金伟民. 光学相关的双 CCD 成像系统图像运动位移测量[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0708002.
- 6 Yu Yuhua, Dong Wende, Xu Zhihai, *et al.*. Method for blurred image restoration based on Hartmann-Shake wavefront sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0828005.  
余玉华, 董文德, 徐之海, 等. 基于哈特曼-夏克波前传感器的模糊图像复原方法[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0828005.
- 7 Sun Tao, Long Hui, Zhao Dong, *et al.*. Detection and compensation of satellite flutter based on image from multispectral camera with five spectral combination [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0728005.  
孙 韬, 龙 辉, 赵 冬, 等. 基于五谱段合一多光谱相机影像的卫星颤振检测和补偿[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0728005.
- 8 Li Tiecheng, Tao Xiaoping, Feng Huajun, *et al.*. Modulation transfer function calculation and image restoration based on slanted edge method [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2891–2897.  
李铁成, 陶小平, 冯华君, 等. 基于倾斜刃边法的调制传递函数计算及图像复原[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2891–2897.
- 9 F Viallefont-Robinet, D Léger. Improvement of the edge method for on-orbit MTF measurement[J]. Opt Express, 2010, 18(4): 3531–3545.
- 10 W Stefan. Image Restoration by Blind Deconvolution [D]. Munich: Technische Universität München (TUM) and Arizona State University, 2003.
- 11 I Kopriva, D J Garrod, V Borjanovic. Single frame blind image deconvolution by non-negative sparse matrix factorization [J]. Opt Commun, 2006, 266(2): 456–464.
- 12 D Krishnan, R Fergus. Fast image deconvolution using hyper-Laplacian priors[C]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2009. 1033–1041.
- 13 E J Candes, J Romberg. Quantitative robust uncertainty principles and optimally sparse decompositions [J]. Foundations of Computational Mathematics, 2006, 6(2): 227–254.
- 14 D L Donoho. Compressed sensing [J]. Information Theory, IEEE Transaction on, 2006, 52(4): 1289–1306.
- 15 D Reddy, A Veeraraghavan, R Chellappa. P2C2: Programmable pixel compressive camera for high speed imaging [C]. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011 IEEE Conference on. IEEE, 2011: 329–336.
- 16 Y Hitomi, J Gu, M Gupta, *et al.*. Video from a single coded exposure photograph using a learned over-complete dictionary [C]. Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE International Conference on. IEEE, 2011: 287–294.
- 17 J A Tropp, A C Gilbert. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. Information Theory, IEEE Transactions on, 2007, 53(12): 4655–4666.
- 18 M Aharon, M Elad, A Bruckstein. K-svd: An algorithm for designing overcomplete dictionaries for sparse representation [J]. Signal Processing, IEEE Transactions on, 2006, 54(11): 4311–4322.
- 19 M Guizar-Sicairos, S T Thurman, J R Fienup, *et al.*. Efficient subpixel image registration algorithms [J]. Opt Lett, 2008, 33(2): 156–158.

栏目编辑: 苏 岑