

# 大面阵 CMOS 航空相机双重退化图像恢复

万 磊<sup>1,2,3</sup> 张 叶<sup>1,3</sup> 周达标<sup>1,2,3</sup> 贾 平<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春, 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京, 100049

<sup>3</sup>中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春, 130033

**摘要** 由于采用电子卷帘式快门,大面阵互补金属氧化物半导体(CMOS)航空相机在高速成像时不仅会产生像移,还会引入由卷帘快门(RS)效应带来的几何畸变。传统的将两种图像退化因素分开进行处理的方法,过程繁复,计算复杂度高。针对航空前向飞行带来的线性像移和RS畸变,通过分析各自的数学模型,推导出了二者之间的紧密联系,提出了基于线性像移参数估计的双重退化图像恢复方法。随后设计了航空前向飞行模拟实验,通过直线位移平台控制 CMOS 相机以不同速度对目标景物成像。实验结果表明,RS效应对像移参数的估计没有任何影响,最终恢复图像帧间变换保真度能提高到 27 dB 左右。相比分步处理的方法,该方法在获得同样恢复效果的情况下,速度能提高 3.5 倍以上。

**关键词** 图像处理; CMOS 航空相机; 双重退化; 卷帘快门效应; 线性像移

中图分类号 TP752.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0511003

## Restoration of Double Degraded Images in Large Frame CMOS Aerial Cameras

Wan Lei<sup>1,2,3</sup> Zhang Ye<sup>1,3</sup> Zhou Dabiao<sup>1,2,3</sup> Jia Ping<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>3</sup>Key laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** Due to electronic rolling shutter, high-speed large frame complementary metal oxide semiconductor (CMOS) aerial cameras not only suffer from motion blur, but also lead to geometric distortion caused by rolling shutter effect. The conventional method which deals with these two degraded factors separately is very complicated and has a high computational complexity. To address the problems of linear motion and rolling shutter distortion resulting from aerial forward flight, a close relationship is derived between them through analyzing respective mathematical model. Furthermore, a method is proposed to restore double degraded images based on parameter estimation of linear motion. Then an experiment is designed to simulate aerial forward flight in which a CMOS camera controlled by the linear displacement stage imaging at different speed. Experiment results indicate that rolling shutter effect has no influence on the parameter estimation of linear motion. And the Interframe Transform Fidelity of restored images can be improved to about 27 dB. The calculation speed is 3.5 times faster than restoring step by step when obtaining the same good results.

**Key words** image processing; CMOS aerial camera; double degrade; rolling shutter effect; linear motion

**OCIS codes** 110.2970; 110.3010; 040.1490; 040.6070

收稿日期: 2014-12-23; 收到修改稿日期: 2015-1-15

基金项目: 吉林省重大科技攻关项目(11ZDGG001)

作者简介: 万 磊(1988—),男,博士研究生,主要从事航空 CMOS 成像方面的研究。E-mail: keshawanshi@163.com

导师简介: 贾 平(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事航空成像与测量仪器技术等方面的研究。

E-mail: jiap@ciomp.ac.cn

## 1 引 言

自从固态成像传感器取代胶片成为主流的成像设备以来,在航空相机领域电子耦合器件(CCD)一直占据着绝对的主导地位<sup>[1]</sup>。近些年来随着互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺不断发展,其成本低、速度快、可片上集成图像处理单元等优点越来越受到重视,一些科研单位已开始尝试在航空相机上使用CMOS传感器。不同于CCD全局快门的曝光方式,CMOS通常采用电子卷帘式快门(RS)。由于CMOS中只有一条读出电路,每行像素都在不同的时间区间内读出,且相比上一行都有一定的延迟,因此当相机与被照景物发生快速的相对运动时,所成图像会发生倾斜、拉伸、缩短等畸变,这种运动产生的畸变被称为RS效应。

当CMOS航空相机在高速成像时,不仅会造成像移模糊,也会引入由RS效应造成的几何畸变,这两种因素都会严重降低成像质量。传统的解决方法是将两种图像退化因素视为独立的问题,分开进行处理。像移补偿方式主要为光机式补偿与图像法补偿相结合<sup>[2-3]</sup>;而RS效应的去除主要是通过块匹配法对所成视频相邻图像帧间运动进行估计,然后建立不同运动模型进行校正<sup>[4-7]</sup>。其中帧间运动估计过程计算复杂度高,且只能用于多帧图像处理,难以满足航空图像实时处理的需求。由于像移模糊和RS畸变都是由航空飞机高速飞行导致的,模糊的程度和畸变的大小与相机运动参数密切相关,因此可以将两个问题结合起来进行考虑。

本文主要讨论CMOS航空相机前向运动造成的线性像移和RS效应,在对各自数学模型进行分析的基础上,推导出了二者之间的联系,提出了基于线性像移参数估计的双重退化图像恢复方法。随后利用直线位移台搭建了航空前向飞行模拟实验平台,以此得到不同程度的双重退化图像。最后讨论了RS效应对像移参数估计的影响,并对双重退化图像进行了恢复,实验结果证明了本文方法的有效性。

## 2 混合建模

飞机前向飞行造成的像移和RS畸变是CMOS航空相机图像退化的主要原因,严重影响所成图像的质量<sup>[8]</sup>。本节对前向像移和RS畸变的数学模型进行了分析,并推导了二者之间的联系。

### 2.1 前向像移建模

前向像移的产生是因为在相机曝光时间内,飞机以一定速度 $V_s$ 向前飞行,地面上某点 $A$ 在像面上的像会发生位移,从而由一个点 $a$ 变成了一条线段 $aa'$ ,所成图像便会产生模糊,如图1所示。

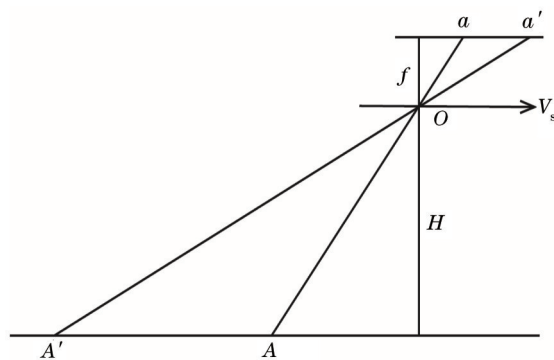


图1 前向像移示意图

Fig.1 Diagram of forward motion

设相机的曝光时间为 $t_c$ ,焦距为 $f$ ,成像高度为 $H$ ,则所成图像像移量 $\sigma$ 可表示为<sup>[2-3]</sup>

$$\sigma = \frac{f}{H} V_s t_c, \quad (1)$$

对应模糊图像的点扩散函数 $h(x,y)$ 为<sup>[9]</sup>:

$$h(x,y) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma}, & \sqrt{x^2 + y^2} \leq \frac{\sigma}{2} \text{ and } \frac{x}{y} = -\tan \theta \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $\theta$ 为模糊的方向, $\sigma$ 即为模糊的长度。对(2)式进行傅里叶变换可得

$$H(u,v) = \frac{\sin(\pi\sigma\omega)}{\pi\sigma\omega}, \quad (3)$$

式中  $\omega = u \cos \theta + v \sin \theta$ 。显然,这是一个辛格函数,其在角度  $\theta$  方向上会出现周期性的零点,表现在频谱图上就是一系列等间距的暗条纹。当飞机前向飞行时,航空图像模糊角度  $\theta = 0^\circ$ ,此时图像模糊的长度与暗条纹的间距密切相关。设暗条纹间距为  $s$ ,则模糊长度即为  $\sigma = M/s$ ,  $M$  为图像列数。图(2)展示了一幅模糊航空图像及其傅里叶频谱,模糊长度为 15 pixel,方向为  $0^\circ$ 。

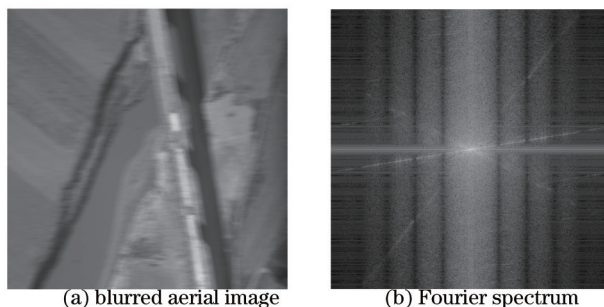


图2 模糊航空图像及其傅里叶频谱  
Fig.2 Blurred aerial image and its Fourier spectrum

### 2.2 RS 效应建模

当飞机以一定速度  $V_s$  向前飞行时,所成图像 RS 畸变根据 CMOS 探测器卷帘快门的扫描方向分为两种:1) 卷帘快门扫描方向与飞行方向平行,此时会产生水平方向的畸变,表现为图像拉伸或缩短;2) 卷帘快门扫描方向与飞行方向垂直,此时会产生垂直方向的畸变,表现为图像发生倾斜。设 CMOS 传感器大小为  $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ , 像素尺寸为  $d$ 。

#### 1) 水平方向畸变

如图3所示,以航空相机投影中心  $O$  为原点建立坐标系,  $Y$  轴为飞机飞行方向,  $Z$  轴垂直与地面向上, 穿过探测器中心。整个坐标系满足右手定则。对于地面上任一点  $A$ , 设其对应像点  $a$  坐标为  $(x,y,f)$ 。

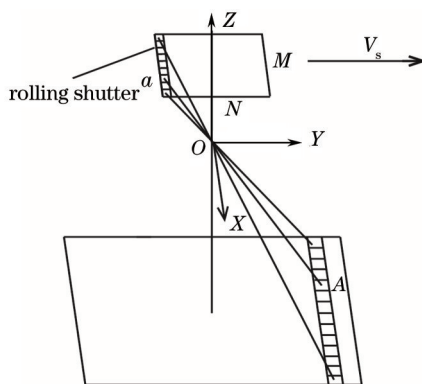


图3 水平方向畸变示意图

Fig.3 Diagram of horizontal distortion

根据坐标系定义可知,点  $a$  位于探测器上第  $(N/2+y)$  行。设探测器的每行的读出时间为  $t_r$ , 点  $a$  的畸变大小为  $d_{y,a}$ 。此时第  $(N/2+y)$  行的曝光时间可以表示为  $(d_{y,a} + N/2 + y - 1)/(1/t_r)$  或者  $d_{y,a}/(V_s f/dH)$ , 由此可得

$$d_{y,a} = \frac{V_s f (N/2 + y - 1)}{d(H/t_r - V_s f)} = \frac{V_s t_r f (N/2 + y - 1)}{d(H - V_s t_r f)}, \quad (4)$$

由于  $t_r$  非常小,  $d - V_s t_r > 0$ , 因此  $d_{y,a}$  方向与  $V_s$  相同。当卷帘快门扫描方向与  $V_s$  相同时,像点与快门同向运动,图像会出现拉伸;当快门扫描方向与  $V_s$  相反时,像点与快门相向运动,此时图像会缩短。将(1)式带入(4)式可得

$$d_{y,a} = \frac{\sigma t_r (N/2 + y - 1)}{d(t_c - \sigma t_r)}. \quad (5)$$

2) 垂直方向畸变

当卷帘快门扫描方向与飞行方向垂直时,和上节类似定义坐标系,如图4所示。此时像点沿着Y轴方向运动,而卷帘快门沿着X轴扫描。每行像素相比上一行会沿Y轴运动一段距离,从上至下越来越大,使得所成图像发生倾斜。

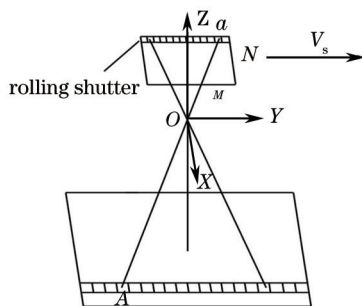


图4 垂直方向畸变示意图

Fig.4 Diagram of vertical distortion

设点  $a$  的垂直方向畸变大小为  $d_{x,a}$ , 此时其位于探测器上第  $(N/2+x)$  行, 则有

$$d_{x,a} = \int_0^{(N/2+x-1)t_r} \frac{f}{H} \frac{V_s}{d} dt = \frac{f}{H} V_s t_r (N/2+x-1)/d, \quad (6)$$

将(1)式带入(6)式可得

$$d_{x,a} = \frac{1}{dt_c} \sigma t_r (N/2+x-1). \quad (7)$$

在(5)式和(7)式中,探测器大小、像素尺寸、曝光时间以及每行像素的读出时间是常值,因此像素点畸变大小完全由模糊长度决定。而且图像的RS畸变属于几何畸变,表现为像面上各像素点产生不同长度的位移,理论上这种畸变不会对模糊图像的频谱造成影响,因此也不会影响模糊参数的估计。由此将RS效应的校正问题转化为了模糊长度的估计问题。只要准确估计前向像移的运动长度,就可以直接对像移模糊和RS畸变双重退化的图像进行恢复。

3 CMOS 航空相机前向成像模拟实验

为验证上述分析,采用直线位移台搭建了航空飞机前向飞行模拟实验平台,如图5所示,实验设备包括运动控制器、CMOS相机、直线位移台、数据采集终端等。其中直线位移台放置在隔震平台上。实验中使用的CMOS相机焦距为40 mm,像元尺寸为5.3 μm,所成图像大小为1000 pixel×1000 pixel。

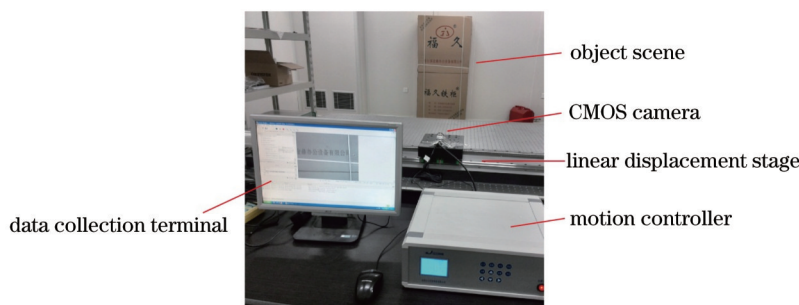


图5 航空前向飞行模拟实验平台

Fig.5 Experiment platform for simulating aerial forward flight

航空飞行器在多数情况下都不会进行姿态调整,此时其相机也是垂直于地面成像,像面上速度是统一的,由此带来线性像移和RS畸变。实验主要模拟上述这种情况,分为两个部分:首先为了分析RS效应对模糊参数估计的影响,分别利用相同焦距的CMOS相机和CCD相机以同样的速度对目标景物成像,从所拍视频中提取同一区域的图像,对各自频谱进行分析。其次CMOS航空相机的前向像移不会随着相机快门的扫描方向而改变,其大小只与相机的移动速度有关。而RS畸变的形式与快门扫描方向却密切相关,因此为了

模拟不同形式的RS畸变,在正向垂直成像后,将CMOS相机旋转90°进行成像。

CMOS相机在直线位移平台上以不同速度运动成像,得到一系列受到像移模糊和RS畸变影响的退化图像。传统的线性像移参数估计方法一般首先使用Radon变换或Hough变换对模糊角度进行检测,然后根据频谱图每行像素的一维灰度曲线计算暗条纹的间距,进而求得模糊长度<sup>[10-11]</sup>。前向像移的模糊角度为0°,文中只需估计模糊长度即可。由于受到噪声干扰,估计模糊长度时会产生一定的误差,为了得到更加准确的长度估计,引入最小误差约束,将长度估计误差考虑在内,通过迭代法求取最优长度估计。设长度误差 $|\Delta\sigma| \leq 5 \text{ pixel}$ ,每一次迭代步长为1,最终图像数据的处理步骤如下:

- 1) 根据退化图像频谱灰度估计出模糊长度  $\sigma$ ;
- 2) 迭代初始时刻模糊长度为  $(\sigma - 5)$ ,此时对应的点扩展函数(PSF)设为  $h$ 。然后使用基于稀疏先验的非盲复原算法<sup>[12]</sup>对模糊图像  $b$  进行恢复,得到原始图像估计  $f$ 。
- 3) 计算2)中复原图像的误差  $E = \|b - h * f\|^2$ 。
- 4) 模糊长度增加1个像素,重复步骤2)和3),直到长度达到误差范围内最大值  $(\sigma + 5)$ ,最终得到复原误差与模糊长度的关系曲线,对应最小误差的即为最优长度估计。
- 5) 根据实际CMOS相机的构成,将估计得到的模糊长度代入(5)式或(7)式计算像面上各点的畸变。对畸变图像作反向映射,得到最终复原图像。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 RS效应对模糊参数估计的影响

在相同的运动速度和曝光时间下,焦距相同的CMOS相机与CCD相机对同一目标成像,所得结果及其对应傅里叶频谱图如图6所示。

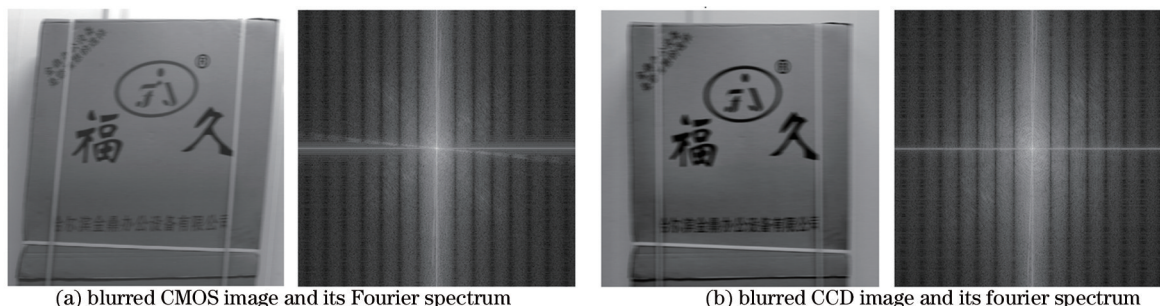


图6 相同成像条件下CMOS相机与CCD相机所拍运动模糊图像及其傅里叶频谱

Fig.6 Motion blurred images captured by a CMOS camera and a CCD camera in the same imaging condition and their Fourier spectra

从频谱图的对比可以明显看出,在同样模糊条件下,两幅图的频谱没有明显差异。为了更进一步说明这个问题,分别对两个相机拍摄的另一区域不同模糊程度的图像进行参数估计,得到CCD估计-CMOS估计

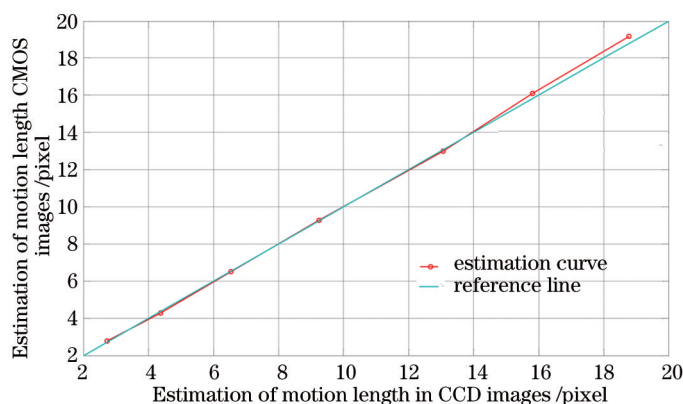


图7 两个相机以相同速度成像时模糊长度估计结果

Fig.7 Estimation of motion length when two cameras imaging at the same speed

曲线,如图7所示。

从图中可以看出,两者的估计结果几乎成一条直线,与理想参考线的偏差仅为0.0358。由此可以得出结论,RS效应对模糊参数的估计不会造成任何影响,在存在RS畸变的模糊图像上,使用传统的估计方法依然可以得到准确结果。

#### 4.2 双重退化图像恢复

针对三种不同情况下的线性像移和RS畸变,实验时均在不同的运动速度下进行了成像,本节选取其中像移和畸变比较明显的退化图像,分别采用本文方法和传统的分步处理的方法进行恢复,其中分步处理时图像去模糊与本文方法相同,而RS畸变校正采用的是文献[7]中的算法。文献[7]中建立了全局仿射运动模型,使用块匹配法对连续多帧图像间的运动向量进行估计,由此得到模型参数,然后使用仿射变换得到校正图像<sup>[7]</sup>。文中匹配块的大小为8 pixel×8 pixel。

CMOS相机卷帘快门扫描方向垂直于位移台时,以一定速度成像即可模拟垂直方向运动畸变,如图8所示。垂直成像时,目标景物发生明显倾斜,并伴随有一定的模糊,此时模糊长度估计为 $\sigma = 13.83$ 。图8(b)是使用本文方法得到的恢复图像,图8(c)是使用传统的分步处理的方法得到的恢复图像。

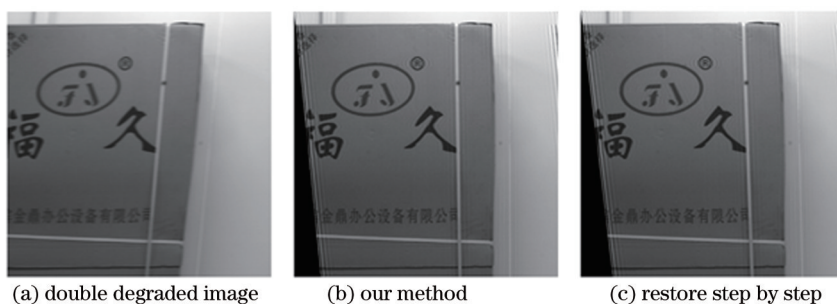


图8 卷帘快门扫描方向与运动方向垂直( $\sigma = 13.83$ )

Fig.8 Scanning direction of rolling shutter is vertical to the motion direction

将相机顺时针旋转90°,此时卷帘快门扫描方向与相机运动方向相反,所成图像会缩短,如图9所示。相比图像倾斜,图像缩短的视觉效果没有那么明显,但在航空测绘领域目标尺寸的误差会严重影响测量精度,因此精确的校正也是非常必须的。图9中退化图像长度估计结果为 $\sigma = 14.52$ 。

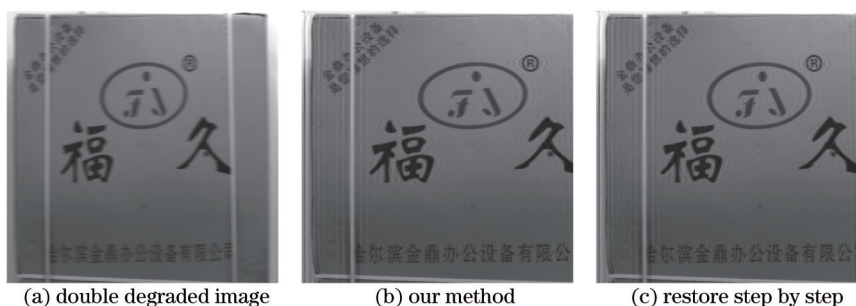


图9 卷帘快门扫描方向与运动方向相反( $\sigma = 14.52$ )

Fig.9 Scanning direction of rolling shutter is opposite to the motion direction

将相机逆时针旋转90°,此时卷帘快门扫描方向与运动方向相同,所成图像会拉伸,恢复结果如图10所示。其中模糊长度估计结果为 $\sigma = 21.66$ 。

为了更准确地描述恢复图像的效果,采用帧间变换保真度(ITF)对去模糊和消除RS畸变的图像进行评估<sup>[13]</sup>,定义如下:

$$I_{TF} = \frac{1}{N_i - 1} \sum_{k=2}^{N_i} P_{RSN}(k), \quad (8)$$

式中 $P_{RSN}$ 表示峰值信噪比, $N_i$ 则表示整个视频进行计算的帧数。ITF表示了任意连续多帧图像间的平均差异,不仅能准确评价图像清晰度,也能用来对RS畸变校正效果进行评估。ITF值越大,说明视频越清晰,并且畸变校正的效果越好。

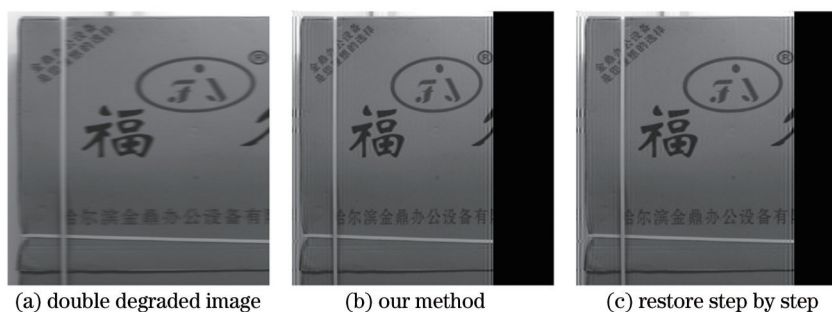


图 10 卷帘快门扫描方向与运动方向相同( $\sigma = 21.66$ )

Fig.10 Scanning direction of rolling shutter is the same as the motion direction

分别对上述三种情况下恢复视频的 ITF 进行计算,并对两种方法的运行时间进行了对比,结果如表 1 所示,视频 1 对应图(8),视频 2 对应图(9),视频 3 对应图(10)。其中计算恢复图像的 ITF 时,需要首先去除黑边。

不论从视觉效果上,还是使用客观的评价指标,本文方法图像恢复的效果和分步进行恢复的效果相差无几。而从时间效率来看,本文方法有着非常显著地提高,速度提高了 3.5 倍以上。

表 1 三种情况下本文方法和分步恢复的性能对比

Table 1 Performance comparison in three conditions between our method and restoring step by step

	Videos/ 1000 pixel×1000 pixel	Our method	Restore step by step
ITF /dB	Video 1	27.04	27.11
	Video 2	27.43	26.69
	Video 3	26.12	25.88
Time /s	Video 1	8.658	30.468
	Video 2	8.969	31.478
	Video 3	9.023	31.620

## 5 结 论

针对 CMOS 航空相机前向飞行带来的线性像移和 RS 效应,首次建立了两者之间的数学联系,由此提出了基于线性像移参数估计的双重退化图像恢复方法。该方法只需一次参数估计就能同时消除像移模糊和 RS 畸变,省去了去畸变时图像帧间运动估计过程,能显著地提高效率,且可用于单帧 RS 畸变图像恢复。实验结果表明,最终恢复图像的 ITF 能提高到 27 dB 左右。相比分步恢复的方法,在获得同样恢复效果的情况下,速度能提高 3.5 倍以上,从而证明了该方法的有效性。

分析和实验均证实了像移与 RS 效应之间的密切联系,从而提供了一种解决双重退化问题的思路。然而非线性像移的点扩散函数无法像线性像移一样,用统一的运动长度和角度进行描述,因此如何从其点扩散函数中得到所需的运动信息,从而建立非线性像移与 RS 效应之间确切的数学关系将是未来工作的一大挑战。

## 参 考 文 献

- 1 Abbas El Gamal, Helmy Eltoukhy. CMOS image sensors[J]. Circuits & Devices Magazine, 2005, 21(3): 6-20.
- 2 Liu Zhiming, Zhu Ming, Chen Li, *et al.*. Long range analysis and compensation of smear in sweep aerial remote sensing[J]. Acta Optica Sinca, 2013, 33(7): 0711001.  
 刘志明, 朱 明, 陈 黎, 等. 长焦距全景式航空遥感器像拖影分析及补偿抑制方法[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0711001.
- 3 Zhao Jiabin, Zhang Tao, Yang Yongming, *et al.*. Image motion velocity field of TDI-CCD aerial panoramic camera[J]. Acta Optica Sinca, 2014, 34(7): 0728003.  
 赵嘉鑫, 张 涛, 杨永明, 等. TDI-CCD 全景航空相机的像移速度场计算模型研究[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0728003.
- 4 Per-Erik Forssen, Erik Ringaby. Rectifying rolling shutter video from hand-held devices[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010: 507-514.

- 5 Jung-Bum Chun, Hunjoon Jung, Chong-Min Kyung. Suppressing rolling-shutter distortion of CMOS image sensors by motion vector detection[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2008, 54(4): 1479-1487.
- 6 Yun Gu Lee, Guo Kai. Fast-rolling shutter compensation based on piecewise quadratic approximation of a camera trajectory[J]. Optical Engineering, 2014, 53(9): 093101.
- 7 Won-Ho Cho, Ki-Sang Hong. Affine motion based CMOS distortion analysis and CMOS digital image stabilization[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2007, 53(3): 833-841.
- 8 Yuan Guoqin, Ding Yalin, Hui Shouwen, *et al.*. Analysis of forward image displacement compensation and error correction for area scan color CCD airborne mapping camera[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0128001.  
远国勤, 丁亚林, 惠守文, 等. 彩色大面阵航空测绘相机前向像移补偿分析及误差纠正 [J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0128001.
- 9 Li Haisen, Zhang Yanning, Yao Rui, *et al.*. Parameter estimation of linear motion blur based on principal component analysis[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(10): 2656-2663.  
李海森, 张艳宁, 姚 睿, 等. 基于主成分分析的直线运动模糊参数估计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2656-2663.
- 10 Guo Lingling, Wu Zepeng, Zhang Liguu, *et al.*. Multichannel blind deconvolution-based on-orbit estimation of point spread function for Space optical remote sensors[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0428001.  
郭玲玲, 吴泽鹏, 张立国, 等. 基于多通道盲反卷积的空间光学遥感器在轨点扩展函数估算 [J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0428001.
- 11 Zhao Peng, Cao Jun, Wei Xingzhu. Identification of robust blur parameter for uniform linear motion blurred images[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(9): 2430-2438.  
赵 鹏, 曹 军, 韦兴竹. 匀速直线运动模糊图像的模糊参数鲁棒识别[J]. 光学精密工程, 2013, 21(9): 2430-2438.
- 12 A Levin, Y Weiss, F Durand, *et al.*. Understanding and evaluating blind deconvolution algorithms[C]. IEEE lonference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2009: 1964-1971.
- 13 Wei Hong, Dennis Wei, Aziz Umit Batur. Video stabilization and rolling shutter distortion reduction[C]. IEEE 17th International Conference on Image Processing, 2010: 3501-3504.

栏目编辑: 刘丰瑞