

文章编号 1004-924X(2016)06-1474-08

## 利用卷帘快门面阵 CMOS 自相关成像的 空间相机振动参数检测

刘海龙\*, 李祥之, 薛旭成, 韩诚山, 胡长虹, 孙雪晨

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为了获取空间相机在轨摄像期间的振动幅频特性, 提出了一种基于卷帘快门面阵 CMOS 自相关成像的空间相机振动参数检测方法。基于卷帘式快门 CMOS 成像原理, 对同一景物连续拍摄, 得到一组具有相关性的图像序列, 通过灰度投影算法对所成图像进行比对求取相对偏移量, 拟合偏移量数据, 进而根据拟合结果计算出空间相机的振动参数。验证实验显示, 二维振动的周期检测相对误差不超过 2%, 振幅检测绝对误差不超过 1 pixel。实验结果表明, 该方法能够利用低帧频图像序列检测高频振动, 大幅度降低了检测算法的数据传输及处理压力, 为检测算法的星上嵌入式实现提供了可能, 在推扫相机和凝视相机上均有较好的应用。

**关键词:** 卷帘快门 CMOS; 自相关成像; 振动参数; 灰度投影; 拟合

**中图分类号:** V445.8 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162406.1474

## Vibration parameter detection of space camera by taking advantage of CMOS self-correlation Imaging of plane array of roller shutter

LIU Hai-long\*, LI Xiang-zhi, XUE Xu-cheng, HAN Cheng-shan, HU Chang-hong, SUN Xue-chen

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: ustclhl@163.com

**Abstract:** To obtain the amplitude-frequency feature of vibration of space camera during the camera shooting of rail, a kind of vibration parameter detection method of space camera based on CMOS self-correlation imaging of plane array of roller shutter was proposed. Based on CMOS imaging principle of roller shutter, for the continuous shooting of same photographic field, a group of image sequences with correlation were obtained. The images formed were compared through gray projection algorithm to calculate relative shift. The shift data was fitted, so that the vibration parameters of space camera were calculated according to fitting results. The confirmatory experiment shows that the relative error of cycle detection of two-dimensional vibration is no more than 2%, and the absolute error of amplitude detection is no more than 1 pixel. The experimental results indicate that this method may detect high-frequency vibration by taking advantage of low frame-frequency image sequence, so the data

收稿日期: 2015-11-03; 修订日期: 2016-01-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61036015); 吉林省青年基金资助项目 (No. 20150520059jh)

transmission and processing pressure of detection algorithm are produced by a large margin; It provides the possibility to realization of star embedded type of detection algorithm, and has good application to push-broom camera and staring camera.

**Key words:** CMOS of roller shutter; self-correlation imaging; vibration parameter, gray projection; fitting

## 1 引 言

遥感卫星在轨工作期间,受内外部环境的影响,卫星平台的空间姿态会出现扰动,当扰动传递到遥感器平台时,则会表现为平台的振动,最终在空间相机积分成像过程中,导致景物在像面投影产生相对移动,从而降低图像质量<sup>[1-2]</sup>。随着遥感器光学系统设计及制造水平的进步,以及光学成像器件性能指标的提升,空间相机角分辨率不断提高,因此,相机对振动也越来越敏感,如今振动已成为影响高分辨率遥感器成像质量的重要因素<sup>[3-5]</sup>。检测空间相机振动参数,对研究卫星平台振动规律,提升遥感器性能具有重要意义,也为振动抑制及降质图像复原提供了数据基础。

早期的基于数字图像处理的振动参数检测多是针对单帧振动模糊图像进行研究的,这些方法往往只能计算特殊运动形式的点扩散函数,而且受噪声影响严重,精度比较低<sup>[6-7]</sup>。针对上述情况,Gadi Hochman 提出了一种基于奇偶列交错排列的特殊 TDICCD(Time Delay and Integration Charge-Coupled Device)的振动参数检测方法,但交错结构的 TDICCD 应用较少,故此这种方法在实际应用中受到了限制<sup>[8]</sup>。Samson Timoner 从图像序列入手,以快速成像器件拍摄的图像作为基准图像,通过与主成像器件拍摄的图像进行对比,进而检测出振动参数。但由于短曝光基准图像的成像时间短,所以噪声很高,会影响到最后的检测精度,同时由采样定理可知,采样频率应为振动频率的两倍以上才能保证信息不流失,这就要求快速成像装置具有较高的帧频,这增加了对于快速相机可靠性及数据传输链路方面的要求<sup>[9-10]</sup>。

本文提出一种基于卷帘快门面阵 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 自相关成像的振动参数检测方法。由于卷帘快门

CMOS 图像传感器连续拍摄的两帧图像之间具有相关性,故像移不会对振动参数的检测结果造成影响,使得检测方法在凝视相机和推扫相机上都应用,具有较好的适用性;同时由成像传感器卷帘快门的特性可知,最小的振动参数检测采样周期为行与行曝光开始时刻的间隔时间,这使得该方法仅利用低帧频图像序列就可以检测到高频振动的相关参数,并且可以人为调节采样周期,因此检测更加方便灵活,大幅度降低了检测算法的数据传输及处理压力,为检测算法的星上嵌入式实现提供了可能。

## 2 振动参数检测方法

### 2.1 振动对空间相机成像质量的影响

卫星的振动可以分解成沿光轴方向,沿飞行方向和沿垂直飞行方向的振动<sup>[11]</sup>。沿光轴方向的振动对成像质量基本没有影响;对于沿飞行方向和垂直飞行方向上的振动,低频振动会使相机产生大幅度的抖动,从而使图像发生位置变化,直观上看不是图像变位、象元拉长或压缩;而高频振动则使图像模糊,图像调制传递函数降低<sup>[12]</sup>。本文主要研究垂直光轴平面上的振动参数检测。

### 2.2 振动参数检测方法原理

传感器成像过程从实质上说就是一个对景物信息的采样过程,而卷帘快门是对每一行依次曝光,即每行的成像时间是不同的,那么每行受振动的影响也不一样,而整幅图像又包含了从成像开始到成像结束整个过程中全部振动的影响。所以当卷帘快门 CMOS 图像传感器连续成像时,每一行都对应着振动在某一段时间内的影响,即记录了这段时间内振动的信息,那么连续生成的这些帧图像就记录了成像这段时间内振动的所有信息。这相当于每行都对振动进行了一次采样,采样时间是单行曝光时间,采样间隔是行与行之间曝光开始时刻的间隔<sup>[13-15]</sup>。而全局快门成像器件对所有像元同时成像,其拍摄一幅图像只相当于

进行了一次采样,因此对于相同的采样频率,卷帘快门只需要很低的帧频就能实现拍摄,所以使用卷帘快门 CMOS 作为检测器件,能够达到利用低频图像序列检测高频振动的目的。

为了便于分析,先假定卫星是静止轨道卫星,并认为卷帘快门 CMOS 图像传感器和景物之间除了振动外,没有其他的相对运动,CMOS 图像传感器的像元数目为  $m \times n$ ,其中  $m$  为行数, $n$  为列数。利用卷帘快门 CMOS 图像传感器对同一景物连续成像,就可以得到该景物的连续的图像序列。这些图像连续地记录了这段时间里的振动信息,利用这些图像序列,就可以进行振动参数检测。由于是使用卷帘快门 CMOS 图像传感器自身所成的具有一定相关性的图像序列进行振动检测,所以称其为面阵 CMOS 自相关成像振动参数检测方法。

连续两帧图像之间的相对关系,如图 1 所示:第  $p$  帧图像和第  $p+1$  帧图像的第  $i$  行都是对同一条景物进行拍摄,且两者之间的时间间隔是一个固定数值  $mT_{\text{row}}$ ,其中  $T_{\text{row}}$  是行与行间的曝光间隔时间。若成像时受振动影响,且振动频率  $f_{\text{vib}} \neq j/mT_{\text{row}}$ ,  $j \in N$ ,则连续两帧图像的第  $i$  行所拍摄的景物将会出现相对偏移,但是一行图像包含的数据量太少,为了精确检测振动偏移量,还要利用到第  $i$  行图像附近的一些图像。在实际工程项目中,相机由柔性装置固定,传递到相机上的振动都是小于 200 Hz 的振动,即振动周期大于 5 ms<sup>[16]</sup>。而面阵 CMOS 的行曝光间隔时间  $T_{\text{row}}$  为微秒量级,近似认为第  $i$  行及其向上  $k$  行、向下  $k$  行受到的振动是一致的,这样就可以将一行图像扩展为一小幅图像来进行振动检测。通过对比第  $p$  帧和第  $p+1$  帧图像的第  $i-k-1$  到  $i+k$  行,再利用灰度投影算法,就可以求出时刻  $t_i$  和时刻  $t_i + nT_{\text{row}}$  对同一景物所成图像之间的相对偏移量<sup>[17]</sup>。

通过改变  $t_i$  可以将一帧图像分成若干图像块,将连续两帧图像相对应的图像块进行对比,即可得到相对偏移量序列,并拟合出偏移量曲线参数。图像块之间的距离与采样间隔时间成比例,通过改变图像块间距即可改变采样频率。

由于任意振动方程均可以分解为正弦级数,所以这里假设振动方程为  $y = A \sin(\omega t + \varphi)$ ,其中  $\omega = 2\pi/T_{\text{vib}}$ ,若第  $p$  帧图像的第  $i$  行受到振动影

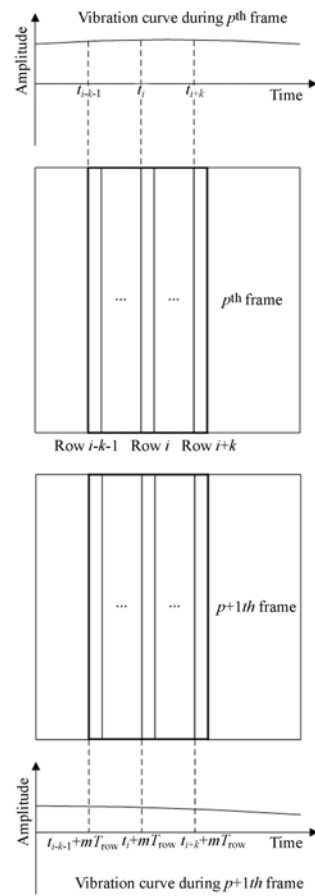


图 1 卷帘快门自相关成像

Fig. 1 Rolling shutter CMOS autocorrelation imaging

响偏移了  $y_1 = A \sin(\omega t_i + \varphi)$ ,第  $p+1$  帧图像的第  $i$  行受到振动影响偏移了  $y_2 = A \sin[\omega(t_i + mT_{\text{row}}) + \varphi]$ ,那么第  $p$  帧图像的第  $i$  行和第  $p+1$  帧图像的第  $i$  行之间的相对偏移量为:

$$\Delta y = y_1 - y_2 = 2A \sin\left(\frac{\omega m T_{\text{row}}}{2}\right) \sin\left[\omega(t_i + \frac{m T_{\text{row}}}{2} + \frac{T_{\text{vib}}}{4}) + \varphi\right], \quad (1)$$

式(1)即为偏移量方程,同时假设拟合曲线方程为:

$$y = A_{\text{fit}} \sin\left(\frac{2\pi}{T_{\text{fit}}} t + \varphi'\right), \quad (2)$$

对比式(1)与式(2)可知,由振动偏移量拟合曲线参数  $T_{\text{fit}}$  和  $A_{\text{fit}}$  即可得到振动参数,计算公式为:

$$T_{\text{vib}} = T_{\text{fit}}, \quad (3)$$

$$A = A_{\text{fit}} / \left[ 2 \sin\left(\frac{\pi m T_{\text{row}}}{T_{\text{fit}}}\right) \right]. \quad (4)$$

### 2.3 像移对检测方法的影响

该检测方法应用于推扫相机时还要分析像移对检测的影响。虽然每行开始成像的时间都不同,但是每行的曝光时间都相同,所以每行的像移距离都是一样的,每行图像的像移点扩散函数也是一致的<sup>[18]</sup>。这里假设飞行方向为  $x$  轴,卷帘曝光方向为  $y$  轴,其与飞行方向垂直,则在振动和像移影响下降质图像的表达式如下:

$$g(x, y) = \frac{1}{T_e} \int_{T_s}^{T_s+T_e} f[x - X_{\text{vib}}(t) - X_{\text{img}}(t), y - Y_{\text{vib}}(t)] dt, \quad (5)$$

由振动方程  $y = A \sin(\omega t + \varphi)$  可知,振动的最大运动速度  $v_{\text{vibm}} = A\omega = 2\pi Af$ ,根据 NASA/GSFC 提供的 LANDSAT-4 卫星的振动数据,可以计算出振动最大速度的量级为  $10^{-3}$  m/s,而对于轨道高度为 760 km、焦距为 10 m 的空间相机,像在焦面上的移动速度的量级为  $10^{-1}$  m/s,两者差距较大,在曝光时间内振动的位移量相对于像移量很小,故可以认为在曝光时间内振动的位移是一个固定值<sup>[19]</sup>。那么式(5)可以化为:

$$g(x, y) = \frac{1}{T_e} \int_{T_s}^{T_s+T_e} f[x - X_{\text{vib}} - X_{\text{img}}(t), y - Y_{\text{vib}}] dt, \quad (6)$$

模糊图像  $g(x, y)$  的傅里叶频谱  $G(u, v)$  为:

$$G(u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) e^{-i2\pi(ux+vy)} dx dy, \quad (7)$$

将式(6)代入式(7)中并进行变换,有:

$$G(u, v) = \frac{1}{T_e} \int_{T_s}^{T_s+T_e} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f[x - X_{\text{vib}} - X_{\text{img}}(t), y - Y_{\text{vib}}] e^{-i2\pi(ux+vy)} dx dy \right\} dt, \quad (8)$$

取  $x' = x - X_{\text{img}}(t)$ ,  $y' = y$ ,代入式(8),同时两边取 Fourier 反变换有:

$$g(x, y) = \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \frac{1}{T_e} \int_{T_s}^{T_s+T_e} e^{-i2\pi u X_{\text{img}}(t)} dt \right] e^{i2\pi u x} du \right\} * f(x - X_{\text{vib}}, y - Y_{\text{vib}}), \quad (9)$$

取  $\int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \frac{1}{T_e} \int_{T_s}^{T_s+T_e} e^{-i2\pi u X_{\text{img}}(t)} dt e^{i2\pi u x} du \right] = \text{PSF}_{\text{img}}$ , 则:

$$\text{PSF}_{\text{img}} = \frac{1}{T_e} \int_{T_s}^{T_s+T_e} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i2\pi[ux - uX_{\text{img}}(t)]} du \right\} dt = \frac{1}{T_e} \int_{T_s}^{T_s+T_e} \delta[x - X_{\text{img}}(t)] dt, \quad (10)$$

又由于  $V_{\text{img}}(t) = \frac{dX(t)}{dt}$ , 则:

$$\text{PSF}_{\text{img}} = \frac{1}{T_e} \int_{T_s}^{T_s+T_e} \delta[x - X_{\text{img}}(t)] \frac{V_{\text{img}}(t)}{V_{\text{img}}(t)} dt = \frac{1}{T_e} \int_{X_{\text{min}}}^{X_{\text{max}}} \frac{\delta[x - X_{\text{img}}(t)]}{V_{\text{img}}(t)} dX(t), \quad (11)$$

又由于像移是匀速运动,即  $V_{\text{img}}(t) = V_{\text{img}}$ ,代入式(11)有:

$$\text{PSF}_{\text{img}}(x) = \frac{1}{T_e V_{\text{img}}}, x \in [0, T_e V_{\text{img}}], \quad (12)$$

这里函数  $\text{PSF}_{\text{img}}(x)$  是一个归一化函数。

由式(9)可知,某一行图像的振动偏移量涉及到  $\text{PSF}_{\text{img}}(x)$  中若干行图像,也就是第  $p$  帧图像的第  $i$  行受到振动的影响偏移了  $\bar{y}_1 = \text{PSF}(x) * y_1(x)$ ,又由于在  $T_e$  时间内认为振动偏移是相同的,则  $\bar{y}_1 = y_1 \sum \text{PSF}(x)$ ,而函数  $\text{PSF}_{\text{img}}(x)$  又是一个归一化函数,那么  $\bar{y}_1 = y_1$ 。同理有第  $p+1$  帧图像的第  $i$  行受到振动影响偏移了  $\bar{y}_2 = y_2$ ,那么第  $p$  帧图像的第  $i$  行和第  $p+1$  帧图像的第  $i$  行之间的相对偏移量为:

$$\Delta \bar{y} = \bar{y}_1 - \bar{y}_2 = y_1 - y_2 = \Delta y, \quad (13)$$

式(13)的结果与式(1)中无像移时一致,证明在像移速度远大于振动速度时,像移对面阵 CMOS 自相关振动参数检测方法基本没有影响,有无像移的检测结果相同,故可以忽略像移,直接进行振动参数检测。

## 3 振动参数检测实验

### 3.1 振动参数检测实验平台

通过搭建实验平台,进行成像实验,对提出的



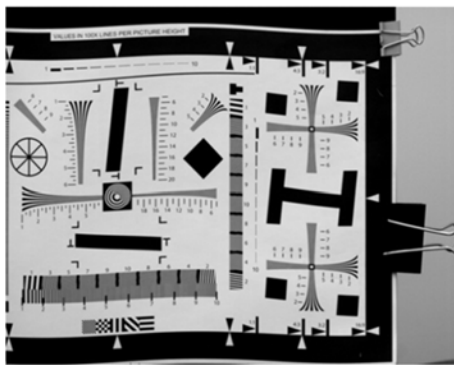
图2 振动参数检测实验平台

Fig. 2 Experimental platform for vibration parameters detection

检测方法进行实验验证,以证明检测方法的正确性与可行性。实验设备主要包含气垫平台、二维振动平台、信号发生器、面阵相机、标靶等。最终搭建的实验平台如图 2 所示。

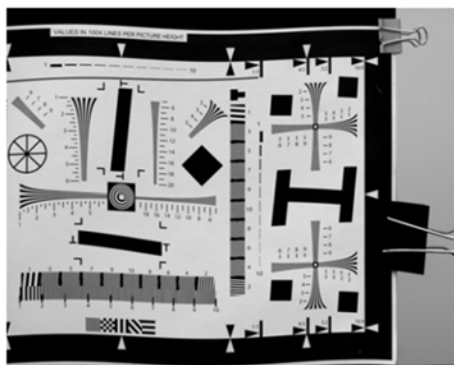
### 3.2 振动参数检测实验

设计实验以验证:a)检测方法的正确性与准确性;b)检测方法能够利用低帧频图像序列检测高频振动。基于以上目的设计实验参数如下:在水平方向和竖直方向同时加入振动激励,水平方向为 50 Hz、5 pixels 的振动,竖直方向为 30 Hz、8 pixels 的振动;利用卷帘快门面阵 CMOS 进行连续拍摄,器件像元数为  $2048 \times 2048$ ,即  $m=n=2048$ ,行与行间的曝光间隔时间  $T_{row}=20.52 \mu s$ ,则  $mT_{row}=40.025 \text{ ms}$ ,帧频为 24fps。由此得到一段时间内的图像序列,其中连续曝光的两帧自相关图像如图 3 所示。



(a) 第一帧图像

(a) The 1st frame image



(b) 第二帧图像

(b) The 2nd frame image

图 3 二维振动实验图像

Fig. 3 Experimental images with two dimension vibrations

对连续曝光的两帧图像做开窗处理,选择合适的窗口大小和开窗间隔,其中开窗间隔即为振动检测采样频率,得到的两组图像序列如图 4 所示。从图像序列中可以看出前后两帧图像在水平方向和竖直方向均有错位,说明其在水平方向和竖直方向都受到振动影响,并且前后两帧图像受到的影响并不相同。

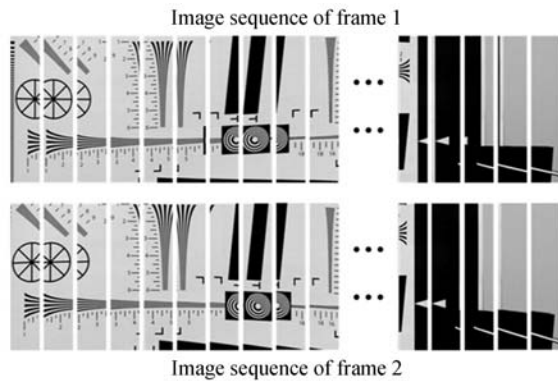
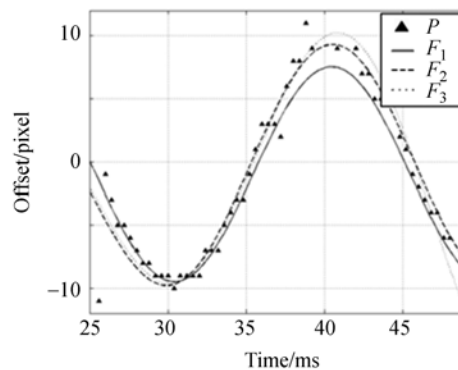


图 4 图像开窗处理

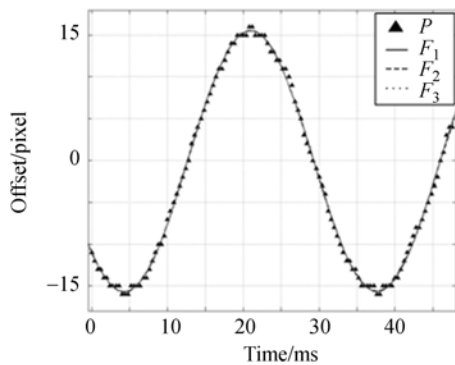
Fig. 4 Image tailoring process

应用本文提出的振动参数检测算法对两组开窗图像序列对应的图像对进行灰度投影计算,寻找相关系数最小值,并对最小值进行坐标变换,得到两帧连续曝光自相关图像间的振动相对偏移量数组。对数组进行 1 级、2 级、3 级 Fourier 拟合,得到振动偏移量拟合曲线及拟合曲线参数。水平方向和竖直方向拟合曲线如图 5 所示,拟合曲线参数如表 1 和表 2 所示。



(a) 水平方向拟合曲线

(a) Fitting curves of horizontal direction



(b) 竖直方向拟合曲线

(b) Fitting curve of vertical direction

图 5 振动参数检测拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves for vibration parameters detection

表 1 水平方向偏移量的拟合结果

Tab. 1 Results of offset fitting along horizontal direction

拟合级数	拟合曲线参数		
	周期(ms)	振幅(pixel)	确定系数
1	20.074	8.517	0.586 4
2	20.321	8.330	0.624 2
3	20.282	8.648	0.631 0

表 2 竖直方向偏移量的拟合结果

Tab. 2 Results of offset fitting along vertical direction

拟合级数	拟合曲线参数		
	周期(ms)	振幅(pixel)	确定系数
1	33.350	15.603	0.998 6
2	33.108	15.313	0.998 6
3	33.125	15.610	0.998 6

### 3.3 检测实验结果分析

根据式(3)和式(4),由拟合曲线参数得到水平方向和竖直方向振动参数,并与输入参数进行对比,结果如表 3 和表 4 所示。

表 3 水平方向检测结果分析

Tab. 3 Analysis of detection results in horizontal direction

拟合级数	输入参数		检测参数		对比结果	
	周期(ms)	振幅(pixel)	周期(ms)	振幅(pixel)	周期相对误差(%)	振幅绝对误差(pixel)
1			20.074	4.520	0.37	0.48
2	20	5	20.321	4.589	1.61	0.41
3			20.282	4.709	1.41	0.29

表 4 竖直方向检测结果分析

Tab. 4 Analysis of detection results in vertical direction

拟合级数	输入参数		检测参数		对比结果	
	周期(ms)	振幅(pixel)	周期(ms)	振幅(pixel)	周期相对误差(%)	振幅绝对误差(pixel)
1			33.350	7.946	0.05	0.05
2	33.33	8	33.108	7.753	0.68	0.25
3			33.125	7.874	0.62	0.13

由实验结果可知:本文提出的振动检测方法可以有效检测空间相机的振动参数,并具有较好的检测精度,周期检测相对误差不超过 2%,振幅检测绝对误差不超过 1 个像元;对于 50 Hz 的振动,全局快门成像器件至少需要 100 fps 以上的帧频才能检测到,而使用卷帘快门面阵 CMOS,只需 24 fps 即可较为精确地检测到,达到了利用低帧频图像序列检测高频振动的目的。从结果中还可以看出,水平方向的检测精度较竖直方向的检测精度稍低,这是因为进行理论分析时,在水平方向上,假设若干相邻像元受到的振动影响是相同的,但实际上各像元的成像时刻并不同,因此会带来一定误差,而竖直方向上的像元实际上也是在同一时刻成像,受到的振动影响完全相同,因此检测精度较高。

## 4 结 论

本文提出了一种利用卷帘快门面阵 CMOS 自相关成像的振动参数检测方法,具有良好的适用性,在推扫相机和凝视相机上均能较好应用,并实现了利用低帧频图像序列检测高频振动的目的,大幅度降低了检测算法的数据传输及处理压力,为检测算法的星上嵌入式实现提供了可能。通过搭建实验平台验证了检测方法的正确性与准确性,实验结果表明周期检测相对误差不超过 2%,振幅检测绝对误差不超过 1 个像元,这证明了本文提出的振动检测方法可以有效地检测振动参数,并具有较高的检测精度;同时使用卷帘快门面阵 CMOS 只需 24 fps 即可较为精确地检测到 50 Hz 振动,而对于全局快门成像器件,则至少需要 100 fps 以上的帧频才能检测到,这证明了本文检测方法可利用低帧频图像序列检测高频振动的能力。

## 参考文献:

- [1] 乐国庆,郭永飞,刘春香,等. 低曝光条件下遥感相机微振动量检测[J]. 中国光学,2014,7(6):917-924.  
LE G Q, GUO Y F, LIU CH X, *et al.*. Micro-vibration detection of remote sensing camera under low exposure condition [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6):917-924. (in Chinese)
- [2] 周前飞,刘晶红,居波,等. 面阵 CCD 航空相机斜视图的几何校正[J]. 液晶与显示,2015,30(3):505-513.  
ZHOU Q F, LIU J H, JU B, *et al.*. Geometric correction of oblique images for array CCD aerial cameras [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015,30(3):505-513. (in Chinese)
- [3] 刘海龙,韩诚山,李祥之,等. 机械拼接时间延迟积分 CCD 空间相机的振动参数检测[J]. 光学精密工程,2015,23(3):729-737.  
LIU H L, HAN CH SH, LI X ZH, *et al.*. Vibration parameters measurement of the TDICCD space camera with mechanical assembly [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3):729-737. (in Chinese)
- [4] JANSCHKE K, TCHERNYKH V, DYBLENKO S. Performance analysis of opto-mechatronic image stabilization for a compact space camera[J]. *Control Engineering Practice*, 2007, 15(3):333-347.
- [5] 杨磊,任龙,刘庆,等. 基于 FPGA 的大视场图像实时拼接技术的研究与实现[J]. 红外与激光工程,2015,44(6):1929-1935.  
YANG L, REN L, LIU Q, *et al.*. Research and implementation of large field image real-time mosaic technology based on FPGA[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2015,44(6):1929-1935. (in Chinese)
- [6] HADAR O, DROR I, KOPEIKA N S. Image-resolution limits resulting from mechanical vibrations, Part IV: real-time numerical calculation of optical transfer-functions and experimental verification[J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(2): 566-78.
- [7] HADER O, DROR I, KOPEIKA N S. Numerical calculation of MTF for image motion; experimental verification[J]. *SPIE*, 1992, 1697: 183-197.
- [8] HOCHMAN G, YITZHAKY Y, KOPEIKA N S, *et al.*. Restoration of images captured by a staggered TDI camera in the presence of mechanical vibrations[J]. *SPIE*, 2003, 5203: 559-570.
- [9] MARIUS T, MEJDI T, MARKKU V. Motion blur identification based on differently exposed images [C]. *IEEE International Conference on Image Processing, Atlanta, GA, P. R. America: IEEE*, 2006: 2021-2024.
- [10] TIMONER S J, FREEMAN D M. Multi-image gradient-based algorithms for motion estimation[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(9): 2003-2016.
- [11] 樊超,李英才,易红伟. 颤振对 TDICCD 相机像质的影响分析[J]. 光子学报,2007,36(9):1714-1717.  
FAN CH, LI Y C, YI H W. Influence analysis of buffeting on image quality of TDICCD camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(9): 1714-1717. (in Chinese)
- [12] 吕恒毅,李祥之,韩诚山,等. 遥感相机静态调制传递函数的地面测试原理[J]. 液晶与显示,2015,30(5):851-856.  
LV H Y, LI X ZH, HAN CH SH, *et al.*. Principle of static modulation transfer function measurement for remote sensing cameras [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(5):851-856. (in Chinese)
- [13] 李豫东,汪波,郭旗,等. CCD 与 CMOS 图像传感器辐射效应测试系统[J]. 光学精密工程,2013,21(11):2778-2784.  
LI Y D, WANG B, GUO Q, *et al.*. Testing system for radiation effects of CCD and CMOS image sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(11): 2778-2784. (in Chinese)
- [14] GAMAL A E, ELTOUKHY H. CMOS image sensors [J]. *Circuits and Devices Magazine, IEEE*, 2005, 21(3):6-20.
- [15] 金伟其,陶禹,石峰,等. 微光视频器件及其技术的进展[J]. 红外与激光工程,2015,44(11):3167-3176.  
JIN W Q, TAO Y, SHI F, *et al.*. Progress of low level light video technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015,44(11):3167-3176. (in Chinese)

- [16] 刘海龙. 空间相机振动参数检测及降质图像复原 [D]. 中国科学院大学(长春光学精密机械与物理研究所), 2015.  
LIU H L. *Space camera vibration parameters detection and blurred image restoration* [D]. University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences), 2015. (in Chinese)
- [17] 顾学海, 王利平, 顾国华. 基于灰度投影改进的电子稳像[J]. 应用光学, 2013, 34(6): 957-963.  
GU X H, WANG L P, GU G H. Electronic image stabilization based on improved gray projection[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(6): 957-963. (in Chinese)
- [18] 李刚, 杨名宇. 基于联合变换相关的机载航空相机像移测量[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 401-406.  
LI G, YANG M Y. Image motion measurement for airborne camera based on joint transform correlation [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 401-406. (in Chinese)
- [19] SUDEY J, SCHULMAN J R. In orbit measurements of Landsat-4 thematic mapper dynamic disturbances[J]. *Acta Astronaut*, 1985, 12: 485-503.

#### 作者简介:



刘海龙(1987—),男,吉林长春人,博士,2010年于中国科学技术大学获得学士学位,2015年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间相机像移算法及振动影响研究。E-mail: ustclhl@163.com



李祥之(1982—),男,黑龙江大庆人,博士,副研究员,2004年、2010年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事空间光通信扰动补偿技术研究。E-mail: lixiangzhi219@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)