

文章编号 1004-924X(2013)08-2169-11

## 地球静止轨道面阵凝视成像系统分时积分抑振技术

陶小平\*, 罗 霄, 薛栋林

(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:**针对地球静止轨道卫星平台引起其面阵凝视成像系统的图像模糊,提出基于分时积分亚像元融合的方法来削弱平台颤振的影响,提高景物辨识度。设计并搭建了一维振动平台;利用高速图像采集系统采集不同曝光时间下不同频率振动的序列图像;使用基于能量区域质心法的相位相关法进行亚像元图像配准,计算每帧图像相对偏移量;与一维振动平台中的位移传感器数据进行对比,得到配准算法的精度优于 0.1 pixel。最后,选择短曝光序列图像中清晰度较高的图像完成亚像元融合,与长曝光图像相比,其融合图像清晰度更高,信噪比与长曝光图像相当。得到的结果验证了分时积分亚像元融合法对颤振模糊的抑制作用。

**关键词:**地球静止轨道;遥感图像;振动抑制;图像配准;图像融合

**中图分类号:**TP751.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132108.2169

## Vibration suppression based on multiple integration for staring imaging system in geostationary orbit

TAO Xiao-ping\*, LUO Xiao, XUE Dong-lin

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

\* Corresponding author, E-mail: TaoXPqq@gmail.com

**Abstract:** According to the image blurs caused by platform vibration in a staring imaging system in the geostationary orbit, a vibration suppression method based on multiple integration was proposed to eliminate the motion blur degradation. A 1D vibration platform with a high-speed CMOS image capturing system was built to collect image sequences with different vibration frequencies under different exposure conditions. Next a phase correlation method based on the energy area center was proposed to calculate the relative drift of each image in sub-pixels. Then, The sub-pixel displacements between the different frames estimated by image registration algorithm were compared with the motion data measured by the displacement sensor, which proved that the algorithm precision was better than 0.1 pixels. Furthermore, several sharpest short-exposure frames were chosen for sub-pixel image fusion. Compared with long-exposure images, the motion blur in the fusion image has been weakened. It has proved that the method of multiple integration and sub-pixel image fusion is suitable for the vibration suppression of staring imaging systems in the geostationary orbit.

收稿日期:2013-02-25;修订日期:2013-03-14.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 61036015)

**Key words:** geostationary orbit; remote sensing image; vibration suppression; image registration; image fusion

## 1 引言

近年来,卫星对地观测技术在全球气候与自然灾害监测,海冰与海岸线变更监测,农、林、渔业资源监管,城市规划,国防安全等方面日益凸显出重要的指导作用,在全球民用与军事领域引起了高度重视,世界各国竞相发展本国的对地观测系统。美国、俄罗斯、法国等发达国家稳居遥感观测的优势地位,受政府支持的各大主流商业卫星公司纷纷推出了 0.5 m 地面分辨率的太阳同步轨道成像卫星,而以色列、印度、日本、韩国也相继拥有了地面分辨率优于 1 m 量级的成像卫星,低轨高分辨率卫星的研发竞争日趋激烈。除此以外,拥有对同一区域进行连续观测能力的地球静止轨道卫星观测系统也备受关注。而 36 000 km 的轨道高度,使得地球静止轨道卫星平台一方面具备大幅宽的天然优势,另一方面也限制了其地面分辨率的提升,因此更多的被用于气象观测和通讯应用方面<sup>[1]</sup>。不过,随着卫星平台及各项载荷性能的不不断提高,高分辨率的地球静止轨道卫星的研发也逐渐提上日程<sup>[2-3]</sup>。欧空局正在研发的 Geo-Oculus 卫星星下点地面分辨率可达 10.5 m,其主要任务是监视欧洲自然灾害,海岸线变更,海水水质,海藻分布等情况<sup>[2]</sup>,其计划为非洲研制的 Africa-Geosat1 卫星星下点地面分辨率也达到了 25 m。另外,印度也提出了 50 m 分辨率的地球静止轨道卫星 GEO-HR IMAGER 的发展规划。

要获得高分辨率的遥感图像,除了光学载荷本身的设计之外,卫星平台本身的姿态稳定也至关重要,在成像系统曝光周期内的平台振动将会导致图像模糊。由于地球静止轨道卫星与地面保持相对“静止”的特征,其对地观测系统多采用面阵凝视成像而非低轨太阳同步轨道卫星所常用的线阵多级扫描成像,积分时间相对增长。另外,因其对大气,海洋、陆地等相互作用关系的研究任务模式,地球静止轨道卫星对地观测系统的工作谱段覆盖紫外、可见、近红外、短波红外和远红外区域,多谱段成像的特性使得某些能量较弱的谱段

需要更长的曝光时间方能获取具有足够信噪比的图像,因此曝光时间内的振动控制更为重要<sup>[4-9]</sup>。

除了卫星的低频姿态漂移,太阳帆板的振动,调姿发动机及动量轮的姿态调整和振动都会对成像系统像质造成一定影响<sup>[5-6,10]</sup>。为了保证由振动引起的系统 MTF 影响因子在 0.95 以上,一般认为线性运动时,目标像在成像传感器上的相对位移不应超过 0.3 pixel;而在随机振动时,相对位移不应超过 0.1 pixel<sup>[4,10]</sup>。以 Geo-Oculus 为例,0.1 pixel 的振动控制精度相当于 29 nrad,这一要求甚至高于迄今为止在轨航天器中制造精度最高的哈勃望远镜,其指向控制精度为 34 nrad<sup>[5]</sup>。而要达到高精度的姿态和振动控制,首先需要高精度的振动探测设备。美国 4 m 空间望远镜所使用的惯性伪星参考单元可以在 0.1~300 Hz 频段内达到 20 nrad 的探测精度,在 0~0.1 Hz 频段内则使用精度优于 20 nrad 的精跟踪仪和精度优于 5 nrad 的四象限探测器;日本 ALOS 卫星采用的磁流体动力学(magnetohydrodynamic, MHD)传感器可实现 1~1 000 Hz 频带内 50 nrad 的探测精度<sup>[11]</sup>;而欧空局 Janschek 研究小组的光学联合相关器则在 500 Hz 探测速率下达到了 0.05 pixel<sup>[12-13]</sup>的探测精度。然而,国内尚无法获取此类高精度探测设备。

在目前的硬件技术水平基础上,为了抑制曝光时间内平台振动引起的图像模糊,本文提出了基于分时积分亚像元融合的方法来削弱平台颤振的影响,提高景物成像清晰度。设计了偏心轮加导轨结构的一维振动平台来模拟卫星平台不同频率的振动,利用高速图像采集系统采集不同曝光时间的图像序列,通过对多帧短曝光图像进行亚像元图像配准<sup>[14-17]</sup>计算帧间偏移量,结果显示探测精度约为 0.1 pixel<sup>[18]</sup>。然后,对亚像元的偏移量进行补偿和融合,得到信噪比与长曝光图像相当,但清晰度更高的融合图像,验证了分时积分法抑制颤振平台应用的可行性。

## 2 分时积分法原理简介

在不增加额外的高精度硬件探测与控制设

备,并保持成像系统具有继承性的前提下,本文利用缩短曝光时间的多帧图像进行亚像素配准和融合的方法来削弱平台振动的影响。考虑到由于曝光时间缩短使得采集的序列图像会存在平均亮度降低、信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)降低等问题,在先期的仿真研究中提出了基于能量区域质心法的相位相关法<sup>[16]</sup>进行图像帧间偏移量探测。该方法利用参考图像与被测图像的互相关频谱找到相关峰之间的距离,从而确定图像间的相对偏移量,其对场景光照变化不敏感,对噪声、少量云层遮挡等干扰也有明显抑制作用。文献[18]中的仿真实验结果表明,对于城市、海滨、林地、沙漠等各类典型遥感图像,当信噪比从 55 dB 降至 15 dB,而配准算法精度并未下降。探测出的偏移量估计偏差均值均优于 0.1 pixel,满足卫星平台振动探测需求。其具体思路如下:

假设振动过程中的当前图像  $I_2(x, y)$  与参考图像  $I_1(x, y)$  的相对偏移量为  $x_0, y_0$ , 则有:

$$I_2(x, y) = I_1(x - x_0, y - y_0). \quad (1)$$

根据傅里叶变换平移定理,可知图像在空域中的平移在傅里叶变换域上将呈现出相位的变化:

$$F_2(u, v) = F_1(u, v) \exp(-i(ux_0 + vy_0)). \quad (2)$$

因此两平移图像的归一化互相关功率谱表达式为:

$$\text{Corr}(u, v) = \frac{F_2(u, v) F_1^*(u, v)}{|F_2(u, v) F_1^*(u, v)|} = \exp(-i(ux_0 + vy_0)). \quad (3)$$

从式(3)中可以看出归一化互相关谱仅与平移量  $x_0, y_0$  有关,找到互相关谱的最大值所在位置即可得到偏移量  $x_0, y_0$ 。而且注意到相位  $\exp(-i(ux_0 + vy_0))$  的傅里叶逆变换是平移的 Dirichlet 脉冲函数,脉冲偏移位置即为平移量  $x_0, y_0$ :

$$F(\exp(-i(ux_0 + vy_0))) = \delta(x - x_0, y - y_0). \quad (4)$$

若平移量  $x_0, y_0$  是整数值,那么离散的脉冲函数极大值所处的位置  $x_\delta$  和  $y_\delta$  即为  $x_0$  和  $y_0$ 。不过平台振动的实际应用中亚像素的偏移更为常见,于是,为了在脉冲峰值区域进行更准确的亚像素定位,同时为了更好地适应脉冲峰值不对称的

情形,本文提出用种子生长法搜索峰值附近最外围的像素能量衰减为主峰 0.1% 的区域代替普通的峰值位置的 4 连通域或 8 连通域,然后在该区域中采用质心法来估计亚像素的偏移量,其中,质心算法表达为:

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_i I(x_i, y_j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(x_i, y_j)} \\ y_0 &= \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N y_j I(x_i, y_j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(x_i, y_j)} \end{aligned}, \quad (5)$$

式中,  $M, N$  为质心计算区域的长和宽。

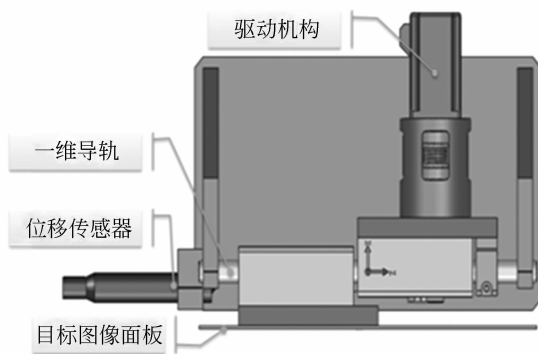
计算出亚像素级的偏移量后,即可按预定的精度进行归整化处理(偏移量与  $k$  相乘后取整),然后进行  $k$  倍的插值上采样,在整像素偏移量的大尺度图像上完成平移配准,补偿各帧之间的随机偏移,再进行  $k$  倍积分下采样回到原图像尺度,多帧融合之后即得到清晰度改善,信噪比亦满足应用需求的图像。

多帧融合图像的像质除了受到图像配准算法的精度、偏移量的规整化处理,以及图像上、下采样插值算法的保真度等方面的影响之外,单帧图像的清晰度也是关键因素之一。曝光时间内运动速度大,位移大则模糊程度大,反之则小,如第 4 节中以正弦运动为例的运动峰值处和运动中值处,因此可以利用均值偏差(Mean-Square-Error, MSE),灰度平均梯度(Gray Mean Gradient, GMG),或最大熵(Largest Entropy, LE)等算法自动选择短曝光序列图像中清晰度较高的图像进行融合以使最终像质更好。

### 3 分时积分法颤振抑制实验平台

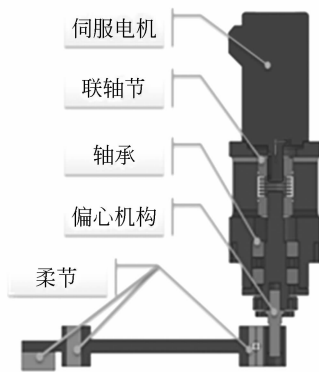
图像面阵凝视成像系统的分时积分法颤振抑制实验平台主要包括振动仿真系统和图像采集系统。由于振动仿真系统只是用于分时积分图像采集和亚像素配准融合方法验证的辅助设备,卫星平台应用中无需该设备的参与,因此将其简化为一维振动。如图 1 所示,该系统是由伺服电机带动双偏心轮沿导轨作一维正弦运动,振动部分上安装了 400 mm × 300 mm 薄铝板,用于放置目标图像,从而模拟物面的左右振动。调整电机参数

可实现 0.1~50 Hz 的频率变化,而通过调整 2 个偏心轮之间的夹角可以实现任意 0~2 mm 振幅的正弦振动。在设计中为了避免滚动轴承的间隙,减小振动台运动过程中产生的振动冲击,采用了柔性拉杆机构,该机构中的柔性环节可以产生偏心轴拉杆所需的微量摆角,同时保证了在受力方向的刚度,实现无间隙的运行。



(a) 一维振动平台俯视图

(a) Top view of one-dimensional vibration platform



(b) 驱动机构示意图

(b) Schematic diagram of driving mechanism

图 1 一维振动平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of one-dimensional vibration platform

装置的一侧还设计了位移传感器固定接口,此处放置位移传感器可监测目标图像面板的实际振动偏移量,通过与采集图像序列计算出的偏移数据进行对比,来验证图像配准算法的计算精度。实验中选择了 Micro-Epsilon 公司 OptoNCDT 非接触式位移传感器,IFS 2401-3 探头,其最大测量

行程为 3 mm,分辨率为  $0.12 \mu\text{m}$ ,线性精度达  $1.5 \mu\text{m}$ ,最高采样频率为 2 kHz。

图像采集系统包括德国 Schneider 公司 XENON-EMERALD 2.2/50 mm 的定焦镜头和 Mikrotron 公司的 MC1360 高速 CMOS 成像传感器,CMOS 探测器分辨率为  $1\,280 \times 1\,024$ ,像元尺寸为  $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$ ,最高采样频率为 110 frame/s。

实验时使用直流 LED 阵列照明光源,一维振动平台置于图像采集系统前约 0.8 m 距离处,定焦镜头焦距为 50 mm,那么成像系统的放大倍率约为  $1/16$ ,0.1 pixel 转换到物面即为  $22.4 \mu\text{m}$ 。位移传感器精度高于该数据一个数量级,因此能够满足振动数据监测的需要。

## 4 实验与分析

### 4.1 成像系统放大倍率标定

按照第 3 节所述搭建实验光路,开启 LED 直流光源,调整光源的亮度、镜头光圈及相机的曝光时间,直至采集到全视场均匀照明、亮度适中的图像。由于实验平台是采用物面振动的方法模拟成像系统颤振,位移传感器探测的也是物面振动数据,因此还需计算系统放大倍率来确定物面—像面偏移量的转换关系。

理论上,从几何光学成像关系出发,根据物距和像距即可计算成像系统的放大倍率,不过由于无法确定所使用的商业镜头的主面位置,因此也无法得到物距、像距的准确估计,进而不能满足像面微米量级偏移估计精度的要求。于是考虑对已知物理距离的点对成像,再利用质心法计算图像中点对位置和相对距离,从而以物高和像高来确定系统放大倍率,具体方法如下:

在物面放置点状目标图板,如图 2 所示,自左至右,由上下两点  $A_1 - B_1, A_2 - B_2, A_3 - B_3, A_4 - B_4, A_5 - B_5$  组成的 5 组点对,其物理距离分别为 20,30,40,50,60 mm。采集该图板图像,按组搜索各点状目标所在区域,利用质心法精确定位各点位置。各点坐标及相对距离如表 1 所示,其中图像采集系统所使用 CMOS 像元尺寸为  $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$ 。

表 1 放大倍率标定数据

Tab.1 Calibration data of magnification of imaging system

| Object       | Image           |                 |                  |            |
|--------------|-----------------|-----------------|------------------|------------|
| Distance /mm | A               | B               | Distance /Pixels | Beta       |
| 20           | (126.03,47.95)  | (216.06,47.98)  | 90.04            | 1/(15.866) |
| 30           | (103.05,182.97) | (236.96,184.05) | 133.921          | (16.001)   |
| 40           | (78.95,316.93)  | (258.95,318.00) | 180.01           | 1/15.872   |
| 50           | (55.93,451.95)  | (280.97,453.00) | 225.041          | (15.870)   |
| 60           | (33.95,587.06)  | (304.08,588.08) | 270.131          | (15.865)   |

从表中可以看出,10 mm 物面距离大约对应像面 45 pixel,除了第二组 30 mm 距离点对相对其它几组数据有一个像元偏差外,其它各组数据吻合很好,取各组放大倍率值计算均值,可得系统放大倍率 Beta 为  $1/(15.895) \approx 0.063$ 。

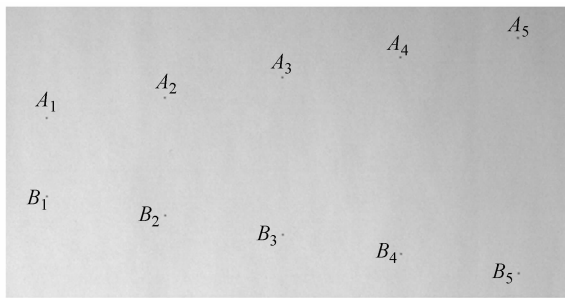


图 2 放大倍率标定点状目标组

Fig. 2 Point-pair target group for magnification calibration

4.2 静止图像连续多帧采集、配准,验证算法精度

将物面点状目标图板换为普通遥感图像,调整曝光时间为 16 ms,在 60 frame/s 帧速率下连

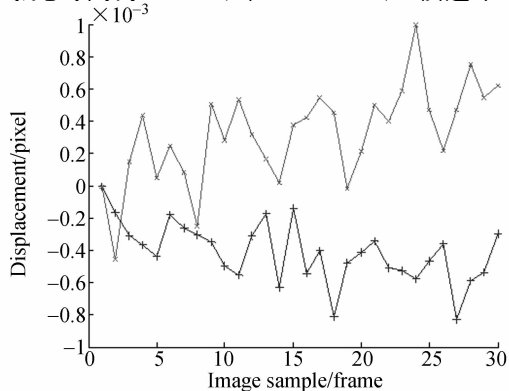


图 3 振动台静止时,所采集的连续 30 frame 的图像配准偏移曲线

Fig. 3 Registration curves of 30 still images when vibration platform is stopped

续采集 30 frame 静态图像。对 30 frame 静态图像进行图像配准运算,偏移曲线如图 3 所示,其中‘-x’曲线表示 X 方向(即垂直光轴平面内水平方向)偏移量,‘-+’曲线表示 Y 方向(即垂直光轴平面内垂直方向)的偏移量,可以看到偏移量计算值均小于 0.001 pixel。也就是说,对于静止图像序列,图像配准算法计算精度满足仿真实验中优于 0.1 pixel 的预期。

4.3 不同振动输入的连续图像采集、配准,验证算法精度

开启一维振动台及位移传感器,物面目标沿水平方向导轨开始作正弦运动,图 4 展示了位移传感器所探测的约 2 个周期的物面振动情况,中心点划线表示正弦运动的中点位置。从图中可以看出,曲线的最大值为  $1\ 782.8\ \mu\text{m}$ ,最小值为  $158.9\ \mu\text{m}$ ,因此物面正弦运动的振幅实际约为  $1\ 782.8 - 158.94 = 1\ 623.9\ \mu\text{m}$ 。按照放大倍率标定实验中的标定系数 Beta,将物面振动振幅换算到像面,则为:

$$\frac{(D_{\max} - D_{\min}) \times \text{Beta}}{p} = \frac{(1\ 782.8\ \mu\text{m} - 158.9\ \mu\text{m}) \times 0.063}{14\ \mu\text{m}} \approx 7.3\ \text{pixel} \quad (6)$$

式中,  $D_{\max}$  和  $D_{\min}$  分别表示振动位移探测值的最大值和最小值,  $p$  是成像传感器像元尺寸。

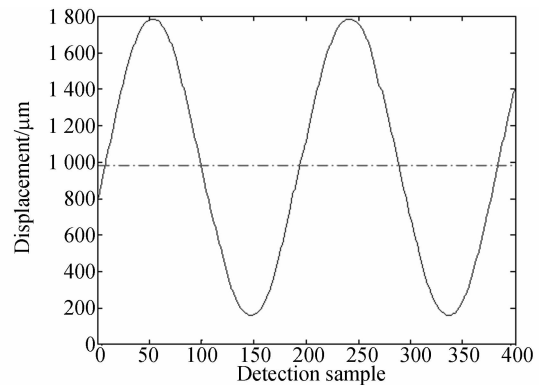


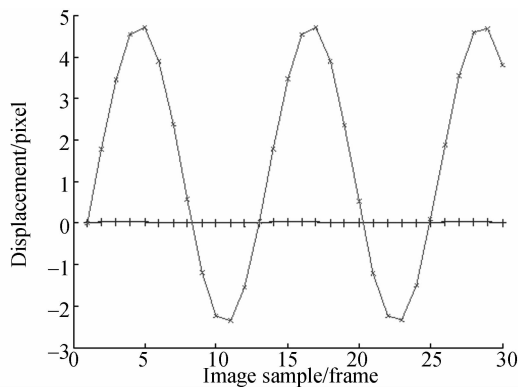
图 4 位移传感器数据

Fig. 4 Vibration detection curve of displacement sensor

以 5 Hz 和 10 Hz 振动频率为例,同样在 16 ms 曝光时间内,60 frame/s 下连续采集 30 frame 图像,对图像序列进行配准,计算各帧相对偏移量,偏移曲线分别如图 5(a)和图 5(b)所示。其中‘-x’曲线表示 X 方向偏移量,‘-+’曲线表

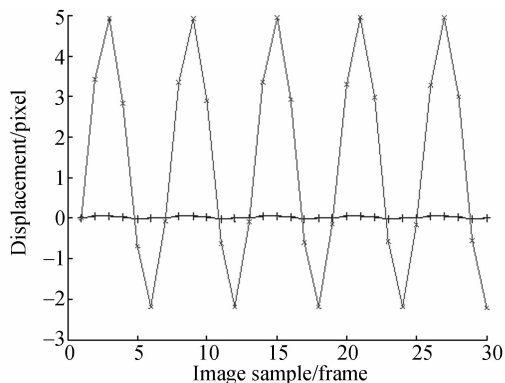
示 Y 方向偏移量。由于物面是沿水平导轨作正弦运动, Y 方向实际偏移量接近于零, 配准曲线结果与此相符。

而 X 方向上, 由于图像采集初始相位的随机性, 很难刚好采集到正弦曲线的峰值点和中值点, 例如图 5(a) 中所示的 5 Hz 振动输入时的图像序列偏移曲线最大值为 4.9 pixel, 最小值为 -2.2 pixel, 图 5(b) 中所示的 10 Hz 振动输入时的图像序列偏移曲线最大值为 4.7 pixel, 最小值为 -2.3 pixel, 从曲线数据变化趋势可知, 这 4 个极值位置都并非正弦曲线的峰值点, 它们所能表征的最大相对偏移量分别为 7.1 pixel 和 7.0 pixel。该值与输入振幅 7.3 pixel 存在的少量差距正是由于图像采集的初始相位与曲线峰值相位之差并非采样周期(即帧速率)的整数倍, 采样序列未能



(a) 振动输入为 5 Hz 时, 图像序列配准曲线

(a) Registration curve of image sequence with vibration input of 5 Hz



(b) 振动输入为 10 Hz 时, 图像序列配准曲线

(b) Registration curve of image sequence with vibration input of 10 Hz

图 5 不同振动输入时, 图像序列配准曲线

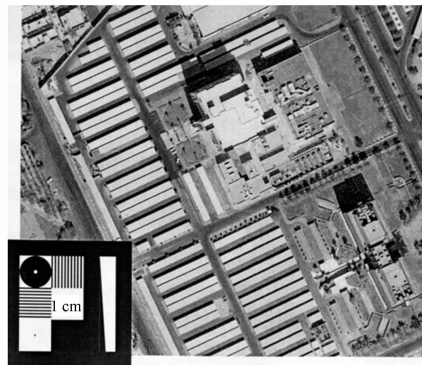
Fig. 5 Registration curves of image sequence with different vibration inputs

覆盖运动曲线峰值位置, 因此也就未能完整地表征曲线振幅特征, 但周期曲线的变化趋势与位移传感器数据曲线是完全相符的。根据曲线峰值数据变化趋势, 仍可认为图像配准算法精度约为 0.1 pixel。

缩短曝光时间至 11 ms, 仍以 60 frame/s 帧速率连续采集 30 frame 图像, 图像序列平均灰度下降, 信噪比亦相应降低, 不过与文献[18]中仿真实验结果相似, 图像配准算法精度并未因此而降低。

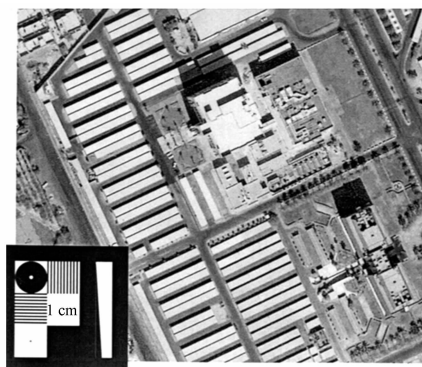
#### 4.4 图像序列清晰度计算

从图 5 中还能看出, 位于曲线中值附近的两点距离相隔较远, 而峰值附近两点则相隔较近, 这也意味着 2 个位置运动速度不同, 采集图像清晰程度也不同。图 6 和图 7 所示为曝光时间分别为 16 及 11 ms 时, 5 及 10 Hz 振动输入的峰值图像和中值图像, 可以明显看出 11 ms 短时曝光图像清晰度高于 16 ms 长曝光图像; 而峰值图像与中值图像的清晰度区别在 16 ms 曝光时更大; 此外, 10 Hz 振动相对于 5 Hz 的振动频率更高, 曝光时



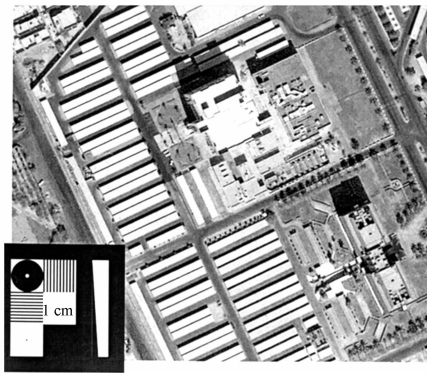
(a) 5 Hz 振动输入峰值图像

(a) Peak image with vibration input of 5 Hz



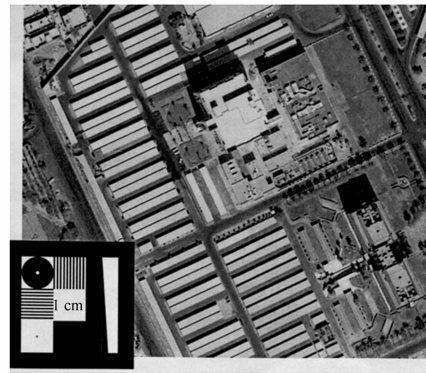
(b) 5 Hz 振动输入中值图像

(b) Median image with vibration input of 5 Hz



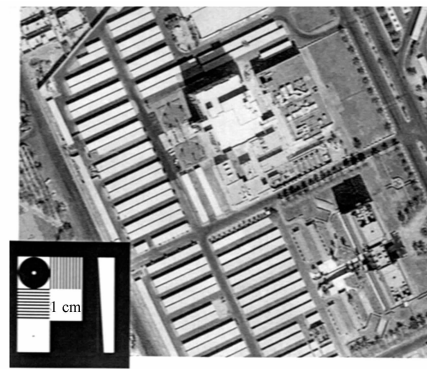
(c) 10 Hz 振动输入峰值图像

(c) Peak image with vibration input of 10 Hz



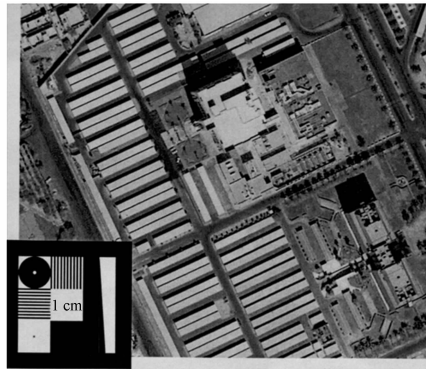
(b) 5 Hz 振动输入中值图像

(b) Median image with vibration input of 5 Hz



(d) 10 Hz 振动输入中值图像

(d) Median image with vibration input of 10 Hz

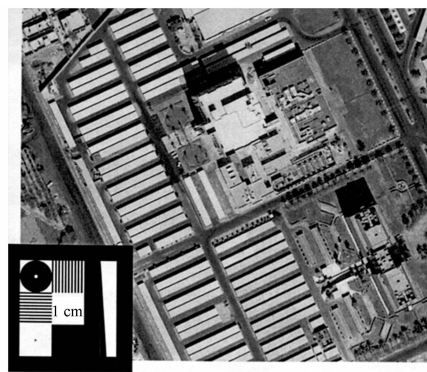


(c) 10 Hz 振动输入峰值图像

(c) Peak image with vibration input of 10 Hz

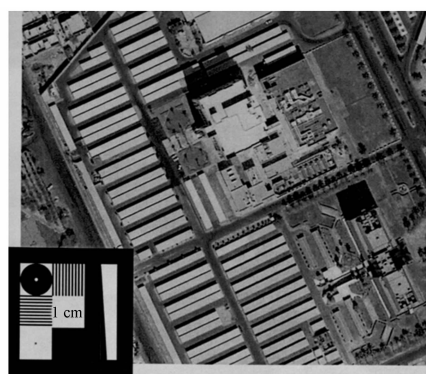
图 6 16 ms 曝光时间,5 Hz 与 10 Hz 振动输入时正弦运动峰值图像和中值图像

Fig. 6 Peak image and median image with vibration inputs of 5 Hz, 10 Hz and exposure time of 16 ms



(a) 5 Hz 振动输入峰值图像

(a) Peak image with vibration input of 5 Hz



(d) 10 Hz 振动输入中值图像

(d) Median image with vibration input of 10 Hz

图 7 11 ms 曝光时间,5 Hz 与 10 Hz 振动输入时的正弦运动峰值图像和中值图像

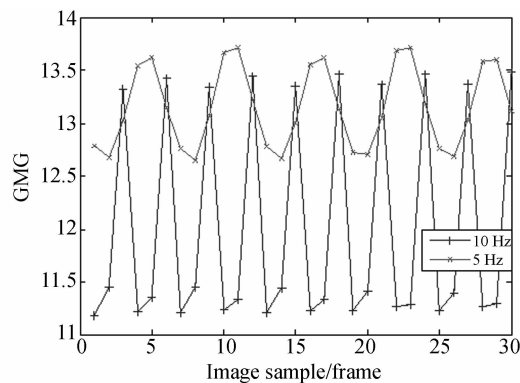
Fig. 7 Peak image and median image with vibration inputs of 5 Hz, 10 Hz and exposure time of 11 ms

间内的偏移量更大,图像的模糊程度也越大。

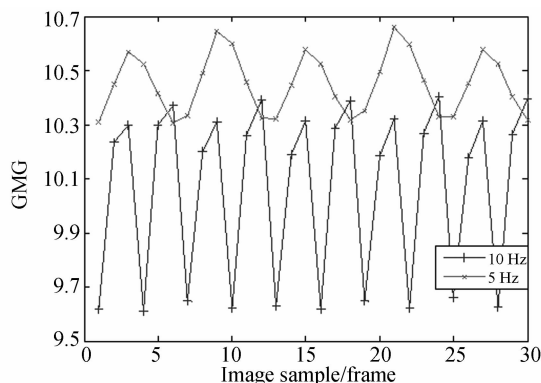
以灰度平均梯度法(GMG)评价图像序列的清晰度,其定义如下:

$$GMG = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \times \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{[I(i+1,j) - I(i,j)]^2 + [I(i,j+1) - I(i,j)]^2}{2}} \quad (7)$$

式中, $M$ 、 $N$ 分别为图像的长和宽。对于相同平均灰度的同一目标图像,GMG 值越大,图像清晰度越高。16 ms 曝光时间时图像序列的 GMG 曲线如图 8(a)所示,‘-x’曲线和‘-+’曲线分别表示 5 Hz 和 10 Hz 振动输入,可以看到 5 Hz 图像序列清晰度均高于 10 Hz 图像序列,而正弦运动



(a) 曝光时间为 16 ms 时的图像序列清晰度曲线  
(a) Sharpness curve of image sequence with exposure time of 16 ms



(b) 曝光时间为 11 ms 时,图像序列清晰度曲线  
(b) Sharpness curve of image sequence with exposure time of 11 ms

图 8 图像序列清晰度曲线

Fig. 8 Sharpness curves of image sequence

曲线峰谷值位置的图像清晰度也都高于中值位置,与主观评价结果一致。

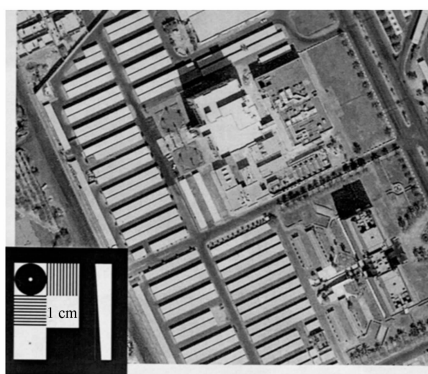
同样,对 11 ms 曝光时间图像序列计算清晰度曲线,如图 8(b)所示。注意到此时的 GMG 值整体都小于 16 ms 曝光时,这是由于 11 ms 曝光图像平均灰度为 73.85,远低于 16 ms 图像的 113.97,故梯度也较之更小,按照这个灰度比例,11 ms 曝光图像的 GMG 值其实是高于 16 ms 的,与短时曝光图像清晰度高于长曝光图像的事实相符。

#### 4.5 短曝光图像亚像元融合

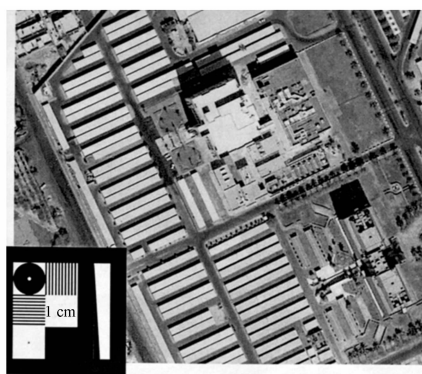
已计算出图像序列的清晰度和相对偏移量,即可选择其中清晰度较高的图像(如正弦运动峰值图像)进行亚像元融合。实验中选择 0.2 pixel 精度对亚像元偏移量进行规整化处理,使用立方插值法进行 5 倍插值,在得到的大尺度图像上完成整像元偏移量的配准补偿,然后积分采样回到原图像尺度,多帧融合得到消除长曝光运动模糊的图像。图 9 是多帧短曝光融合图像与长曝光图像的对比:由于 5 Hz 振动时 16 ms 长曝光图像本身清晰度与 11 ms 时相差很小,因此多帧 11 ms 短曝光融合图像并未显示出分时积分法的优势,而在 10 Hz 振动输入时,16 ms 长曝光的模糊图像与 11 ms 短曝光融合图像的区别就较为明显,清晰度提高,更符合人眼观察与判读的要求。

在卫星平台应用中,短曝光时间和图像帧数的选择还需根据轨道工况,平台姿态,成像系统光能收集与转换效率,成像传感器光谱响应、动态范围与信噪比,星上存储与传输能力,电路瞬时功率与热控等因素进行综合的权衡。实际的平台颤振并非规则的正弦运动,而是多种频率、振幅随机扰动的叠加,采集到的相对短时间曝光的图像也很难确定是运动曲线的峰值或中值,不过这并不影响利用清晰度评价算法对“高清晰度”图像的选取。另外,在实验中为方便展示运动曲线,采集图像时采用了 60 frame/s 高速连续采集模式,然而在卫星平台应用时,超大画幅的海量数据读取与存储并不允许这样的高速连续采集,不过由于地球静止轨道的“相对凝视”特性,可以间隔一定时间后再进行下一帧图像的采集,以此得到短曝光图像序列。因此本实验已经能够验证分时积分亚像元配准融合法在卫星平台应用的可行性。

需要额外予以关注的是,多帧图像采集所引

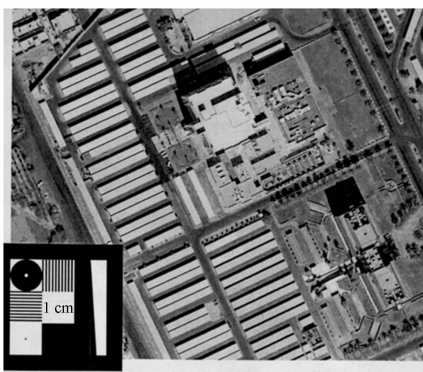


(a) 振动频率为 5 Hz, 长曝光 16 ms 时单帧采集图像  
(a) Single frame of 16 ms long-exposure image with 5 Hz vibration

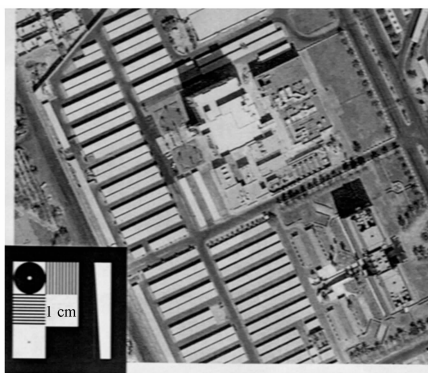


(d) 振动频率为 10 Hz, 短曝光 11 ms 时多帧融合图像  
(b) Image fusion of 11 ms short-exposure image sequence with 10 Hz vibration

图 9 单帧长曝光图像与多帧短曝光融合图像对比  
Fig. 9 Comparison of single long-exposure images and fusion of short-exposure images sequence



(b) 振动频率为 5 Hz, 短曝光 11 ms 时多帧融合图像  
(b) Image fusion of 11 ms short-exposure image sequence with 5 Hz vibration



(c) 振动频率为 10 Hz, 长曝光 16 ms 时单帧采集图像  
(d) Single frame of 16 ms long-exposure image with 10 Hz vibration

起的数据量倍增给星上存储和传输资源带来的压力,以及图像亚像元配准和融合带来的计算资源的压力。其中,图像配准不需要全画幅数据,只需选择细节信息丰富的局部区域即可完成。此外,如果任务模式允许只对任务目标区域(如火灾、赤潮、石油泄漏等重点区域)进行颤振抑制处理,那么局部区域图像的多帧存储和传输也能目前的硬件平台所接受。

## 5 结 论

对于地球静止轨道卫星平台凝视成像系统,为保证各谱段图像信噪比,其成像所需曝光时间相较于低轨太阳同步轨道卫星成像系统更长,积分时间内的平台稳定性对遥感图像清晰度有较大影响。基于静止轨道长时段凝视成像特性,本文提出了分时积分法对多帧短曝光图像进行亚像元配准融合来削弱平台振动对像质的影响。设计了振动仿真系统和高速图像采集系统并进行了实验,实验中利用点状目标图板进行成像系统放大倍率标定,通过转换高精度位移传感器探测数据并与序列图像配准所计算出的帧间偏移量对比,验证了配准算法的精度优于 0.1 pixel。调整振动输入,模拟了不同频率颤振工况;调整成像系统曝光时间,对比了长、短曝光图像清晰度的变化;选择短曝光序列图像中清晰度较高的图像完成亚像元融合,验证了分时积分法多帧短曝光融合图

像相对长曝光图像清晰度的提升,为该方法在卫

星平台的实施提供了应用基础。

### 参考文献:

- [1] 郭玲华,邓峥,陶家生,等. 国外地球同步轨道遥感卫星发展初步研究[J]. *航天返回与遥感*, 2010, 6(31), 23-30.  
GUO L H, DENG ZH, TAO J SH, *et al.*. Preliminary research on development of foreign GEO remote sensing satellites [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 6(31), 23-30. (in Chinese)
- [2] VAILLON L, SCHULL U, KNIGGE T, *et al.*. GEO-OCULUS: High resolution multi-spectral earth imaging mission from geostationary orbit [C]. *International Conference on Space Optics, Rhodes, Greece, 4-8 October*, 2010.
- [3] MESRINE M, THOMAS E, GARIN S, *et al.*. High resolution earth observation from geostationary orbit by optical aperture synthesys [C]. *Proc. '6th Internat. Conf. on Space Optics'*, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 27-30 June 2006.
- [4] BLANC P, MONROIG G. Numerical line of sight stabilization for high resolution earth observation from high orbits[C]. *Proc. '6th Internat. Conf. on Space Optics'*, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 27-30 June 2006.
- [5] DRESNER T, FREIER L, CHIEN T T, *et al.*. Gilmore, Design of a space telescope for vibration control [C]. *SPIE, Vibration Monitoring and Control*, 1994, 2264:82-92.
- [6] TOYOSHIMA M, TAKAYAMA Y, KUNIMORI H. In-orbit measurements of spacecraft microvibrations for satellite laser communication links [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(8):1-10.
- [7] TOYOSHIMA M, ARAKI K. In-orbit measurements of short term attitude and vibrational environment on the engineering test satellite VI using laser communication equipment [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(5):827-832.
- [8] MOSIER G, FEMIAMO M, HA K, *et al.*. Fine pointing control for a next generation space telescope [C]. *SPIE conference on Space Telescopes and Instruments V, Kona, Hawaii, March 1998*, 3356, 1070-1077.
- [9] 王运,颜昌翔. 光谱仪图像的亚像素配准[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3):661-667.  
WANG Y, YAN CH X. Sub-pixel image registration of spectrometer images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3):661-667. (in Chinese)
- [10] 王少游. 地球静止轨道区域凝视光学系统成像性能分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2009.  
WANG SH Y. *The analysis of imaging quality of the optical system in geostationary orbit* [D]. Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [11] IWATA T. Precision attitude and position determination for the Advanced Land Observing Satellite (ALOS) [C]. *Proceedings of SPIE, Enabling Sensor and Platform Technologies for Spaceborne Remote Sensing, Bellingham, WA*, 2005, 5659, 34-50.
- [12] JANSCHKE K, TCHERNYKH V, DYBLENKO S. Performance analysis of opto-mechatronic image stabilization for a compact space camera [J]. *Control Engineering Practice*, 2007, 15: 333 - 347.
- [13] JANSCHKE K, TCHERNYKH V, DYBLENKO S, *et al.* Compensation of focal plane image motion perturbations with optical correlator in feedback loop [C]. *Proceedings of SPIE, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VIII, Bellingham, WA*, 2004, 5570, 280-288.
- [14] MANUEL G S, THURMAN S Y, JAMES R. Finup, Efficient subpixel image registration algorithms [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(2):156-158.
- [15] PAN B, XIE H M, XU B Q, *et al.*. Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17, 1615-1621.
- [16] FOROOSH H, ZERUBIA J B, BERTHOD M. Extension of phase correlation to subpixel registration [C]. *IEEE transactions on image processing*, 2002, 11(3), 188-200.

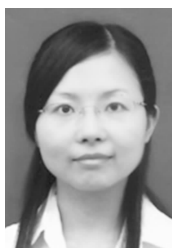
- [17] 邓建青,刘晶红. 基于 Fourier-Mellin 变换和 Keren 算法的改进运动估计算法[J]. 液晶与显示, 2011, 26 (3), 364-369.

DENG J Q, LIU J H. Improved motion estimation algorithm based on Fourier-Mellin transform and Keren algorithm[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26 (3), 364-369. (in Chinese)

- [18] 陶小平,薛栋林,黎发志,等. 基于分时积分亚像元融合的地球静止轨道平台消颤振技术[J]. 光子学报, 2012, 41(11), 1359-1364.

TAO X P, XUE D L, LI F ZH, *et al.*. Vibration suppression based on multiple integration and sub-pixel image fusion for imaging system in geostationary orbit [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41 (11), 1359-1364. (in Chinese)

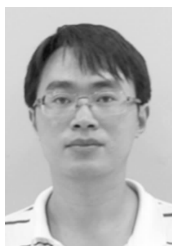
#### 作者简介:



陶小平(1984—),女,湖北麻城人,博士,助理研究员,2005年、2010年于浙江大学分别获得学士、博士学位,现就职于中科院长春光学精密机械与物理研究所,主要从事遥感成像系统设计与检测方面的研究。E-mail: TaoXP99@gmail.com



薛栋林(1979—),男,江苏靖江人,博士,副研究员,2001年于长春理工大学光学工程专业获得学士学位,2006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,主要从事光学加工、检测和空间光学系统设计等方面的研究。E-mail: xuedl@ciomp.ac.cn



罗霄(1982—),男,湖北宜昌人,博士,助理研究员,2006年于中国科技大学获得学士学位,2011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,主要从事大口径光学反射镜的加工及轮廓检验方面的研究。E-mail: pb02009061@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)