

一种改进相位相关算法的亚像元像移检测方法

李 锋^{1,2,3}, 董 峰^{1,3}, 冯 旗^{1,3}, 王文秀^{1,2,3}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘要: 稳像系统能够保证对地观测视频小卫星“凝视”观测时获得稳定的视频序列。不稳定视频序列的像移精确检测是稳像系统能够正常工作的前提。本文研究了一种改进的相位相关算法提取亚像元像移的方法用于视频卫星稳像系统中的像移检测。传统的相位相关算法只能得到垂直和水平方向上的整像元像移, 通常视频序列图像之间的变换关系存在一定的旋转角度。本文在传统的相位相关算法中加入旋转矢量, 为方便计算将空间域的旋转映射成了频域的平移, 同时在求得的极值点附件利用曲面拟合得到亚像元的精度, 从而保证稳像系统能获得亚像元的稳像精度。实验时, 当图像尺寸为 200×200 、固定像移为 8 个像元时, 检测误差均值 $\text{Mean} = 0.0191 \text{ pixel}$, 均方根 $\text{RMS} = 0.01067$ 。

关键词: 稳像系统; 相位相关; 像移检测; 亚像元

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2018)08-0805-07

A Subpixel Image Shift Detection Method Based on Improved Phase Correlation Algorithm

LI Feng^{1,2,3}, DONG Feng^{1,3}, FENG Qi^{1,3}, WANG Wenxiu^{1,2,3}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. CAS Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai 200083, China)

Abstract: Image stabilization systems can ensure a stable video sequence for small satellites "staring" at the earth. Accurate detection of image movement of unstable video sequence is the precondition for normal operation of the image stabilization system. In this study, an improved phase correlation algorithm is developed to extract sub-pixel image shift for image shift detection in video satellite image stabilization systems. The traditional phase correlation algorithm can only obtain the whole pixel shift in the vertical and horizontal directions. Generally, there is a certain rotation angle between video sequence images. In this study, a rotation vector is added to the traditional phase correlation algorithm for the convenience of calculation, mapping the rotation of the spatial domain into a frequency domain translation, while simultaneously using curved surface fitting near the extreme value point to obtain subpixel precision. Thus, the image stabilization system can obtain subpixel precision. Experiments show that for an image size of 200×200 and fixed image motion of eight pixel, the test error mean is 0.0191 pixels and RMS is 0.01067.

Key words: image stabilization system, phase correlation, image motion detection, subpixel

0 引言

近年来, 小卫星的发展和应关注度持续升温, 越来越多的国家和科研机构加大对小卫星系统的研制投入。甚至, 在航天经济的驱动下, 一些 IT 企业比如美国硅谷以及中国的百度等知名 IT 企业也开始

进入航天领域, 研制和发射商业小卫星, 并提出了“小卫星、大数据”、“小卫星、大星座”等商业发展计划^[1]。对地观测视频小卫星可以对某一特定区域进行“凝视”观测, 以视频方式获取被观测地区或者敏感地区动态信息, 具有高敏捷性、观测动态目标、成本低等特性^[2]。这其中最具有代表性的视频小卫星有

收稿日期: 2017-08-07; 修订日期: 2017-08-31.

作者简介: 李锋 (1989-), 男, 江苏盐城人, 博士研究生, 主要从事航天光电系统、电子稳像方面的研究。E-mail: lifengsitp@163.com.

基金项目: 国家 863 计划探测技术 (2015AAXX5097)。

Skybox 公司的天空卫星 (Skysat)、吉林-1 卫星。

对地观测视频小卫星“凝视”观测时由于平台抖动等扰动引起视轴偏移从而导致拍摄的视频抖动,甚至会导致图像模糊^[3]。为了解决这个问题,研究能够在轨实现的实时图像稳定系统很有必要。精确检测视频小卫星视频序列图像的像移量是图像稳定系统能够正常工作的先决条件。2004 年,德国科学家 V. Tchernykh 等人提出了一种稳像系统: Smart Push broom imaging system^[3-4],能够用来解决由于卫星平台不稳定引起的图像模糊。该系统利用机械光学联合变换相关器来检测视频序列中当前帧与参考帧的像移量^[5]。2005 年, V. Tchernykh 等人在 SMARTSCAN 稳像系统基础上提出了在光路中增加一个利用压电陶瓷控制的倾斜摆镜来补偿像移的方法,从而形成一个闭环形式的稳像系统^[6],如图 1 所示。

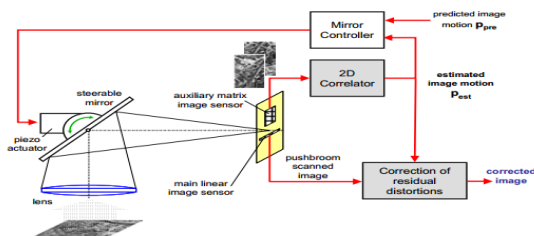


图 1 图像像移补偿系统

Fig.1 Image motion compensation system

可以看出, V. Tchernykh 等人提出的稳像系统中像移量检测是基于联合变换光学相关器采用空间光调制器 (Spatial Light Modulator, SLM) 来实现的,虽然 SLM 在进行傅里叶变换时计算速度很快,但由于其可靠性低、抗辐射能力较差并不适用于空间视频小卫星稳像系统应用。随着 FPGA、DSP 等电子图像处理器的不断发展,运算速度不断提高,本文采用电子学的方法实现联合变换相关算法,检测视频序列中当前图像与参考图像的相对偏移量,并利用亚像元拟合算法拟合得到亚像素的检测精度。

1 改进的相位相关算法

1.1 传统的相位相关算法原理

视频小卫星在“凝视”成像过程中受到的干扰是随机并且是任意方向,因此图像抖动偏移不仅包括二维的 x, y 轴,同时也会有一定的旋转甚至尺度变化产生。运动模型^[7]如式(1)所示:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 为在时间 t_i 和 t_j 时的两帧图像的

坐标。 $(\Delta x, \Delta y)$ 是相对平移量; θ 是两帧图像相对的旋转角度; A 是相对的尺度变换因子。相位相关算法也能检测序列图像旋转角度,原理一致,只需在计算过程中加入旋转角 θ 尺度变化因子 A 即可。本文在研究相位相关算法检测像移时仅考虑 x, y 轴方向的偏移,如图 2 所示,后文分析时重点以 x 轴为例。图 2 中假设 t_1 时刻的 Image1 为参考帧图像, t_2 时刻的 Image2 为当前帧图像,通过相位相关算法后得到 Image2 相对于 Image1 在 x, y 轴的相对偏移量。

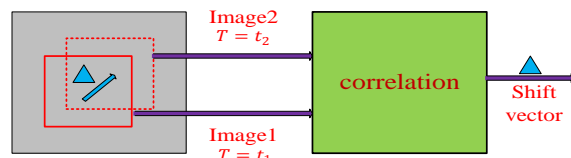


图 2 二维相位相关得到图像二维运动信息

Fig.2 Image motion determination with 2D correlation

相位相关算法原理主要是基于傅里叶变换的平移性质^[8-9],由傅里叶平移性质我们知道,图像在空间域产生平移,在频域中频谱大小不会发生改变,但相位会相应的产生线性变化。利用这一原理,我们可以在频域中计算视频序列中当前帧与参考帧图像的互功率谱,算法的基本思想是在频域中计算当前帧与参考帧两幅图像之间的互功率谱,然后再对互功率谱做傅里叶逆变换便得到其响应函数,响应函数的峰值位置便是要求的两幅图像相对像移量^[10-11]。

假设 $f_r(x, y)$ 为视频序列中的参考帧图像, $f_{r+1}(x, y)$ 为序列图像中的当前帧图像,当前帧图像相对于参考帧图像的平移量为 $(\Delta x, \Delta y)$,则这两帧图像可以用以下关系式表示:

$$f_r(x, y) = f_{r+1}(x + \Delta x, y + \Delta y) \quad (2)$$

设 $F_r(u, v)$ 为 $f_r(x, y)$ 的傅里叶变换, $F_{r+1}(u, v)$ 为 $f_{r+1}(x, y)$ 的傅里叶变换,则有:

$$F_r(u, v) = F_{r+1}(u, v) e^{j2\pi(u\Delta x + v\Delta y)} \quad (3)$$

式(3)可以看出,图像在时域产生的平移到频域可以用相位差来表示。为了求两帧图像的互功率谱,先要得到其互相关函数,设为 $C_{r,r+1}(x, y)$,其表达式如式(4)所示:

$$C_{r,r+1}(x, y) = f_r(x, y) \cdot f_{r+1}(-x, -y) \quad (4)$$

再对等号两边同时作傅里叶变换,可以得到两帧图像 $f_r(x, y)$ 和 $f_{r+1}(x, y)$ 的互功率谱:

$$C_{r,r+1}(u, v) = F_{r+1}(u, v) \cdot F_r^*(u, v) \quad (5)$$

式中: $F_r^*(u, v)$ 表示 $F_r(u, v)$ 的复共轭。通常,相位计算会受到光照变化等条件的影响,一般需要对互功率谱做归一化处理,归一化后的互功率谱:

$$\overline{C_{r,r+1}(u,v)} = \frac{F_{r+1}(u,v)F_r^*(u,v)}{|F_{r+1}(u,v)F_r^*(u,v)|} = e^{-j2\pi(u\Delta x + v\Delta y)} \quad (6)$$

对归一化互功率谱 $\overline{C_{r,r+1}(u,v)}$ 做离散傅里叶逆变换, 得到视频序列中两帧图像的互相关函数:

$$C_{r,r+1}(x,y) = \delta[x-\Delta x, y-\Delta y] \quad (7)$$

式中: $\delta[x-\Delta x, y-\Delta y]$ 为冲击函数, 除了中心点 $(\Delta x, \Delta y)$ 位置外处处为 0, $(\Delta x, \Delta y)$ 即为所像相似度越高, 计算速度越快。两帧图像的相似程度可以用 δ 函数的峰值来表示, 峰值越高表示做相关的两幅图像相似程度也越高, 当为 1 时则完全相似, 由于噪声的存在, δ 函数的峰值一般小于 1。

1.2 改进的相位相关算法

在 1.1 中讨论的相位相关算法只能得到水平和垂直方向的像移矢量。稳像系统中, 当相机“凝视”观测时, 理想情况下相机是固定不动的, 由于平台的抖动会导致相机抖动, 即相机路径会随着时间改变, 稳像过程可以看作是相机路径的稳定。如图 3 所示。

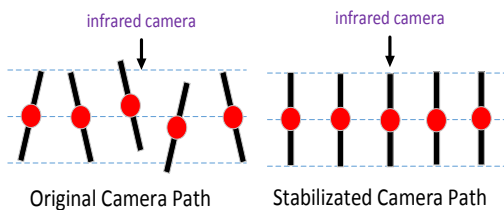


图3 视频采集过程中相机路径变化:
路径随机改变和稳定后的路径

Fig.3 Video acquisition process using a infrared camera:
shaky camera path and stabilized camera path

相机抖动时, 当相机从一个坐标到另一个坐标对统一平面成像时的模型如图 4 所示。

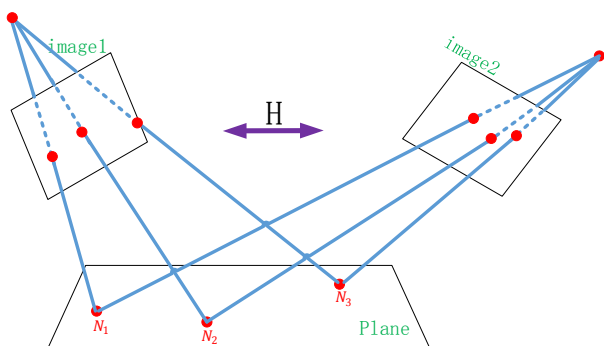


图4 相机运动过程中的成像模型

Fig.4 The imaging model when changing camera path

如图 4 所示, 当相机抖动时, 对同一平面所成的两幅图像之间存在一定的几何变换关系, 通常, 这两幅图像不仅存在平移关系, 还存在旋转关系。相位相

关算法只能得到两幅图像的平移矢量, 因此需要对其进行改进。

如果图像 $f_{r+1}(x,y)$ 是由 $f_r(x,y)$ 旋转一个角度 θ 得到的, 即有:

$$f_{r+1}(x,y) = f_r(x\cos\theta + y\sin\theta, -x\sin\theta + y\cos\theta) \quad (8)$$

对上式两端进行傅里叶变换, 有:

$$F_{r+1}(\xi, \eta) = F_r(\xi\cos\theta + \eta\sin\theta, -\xi\sin\theta + \eta\cos\theta) \quad (9)$$

如果用极坐标表示, 有:

$$F_{r+1}(\rho, \theta_0) = F_r(\rho, \theta_0 - \theta) \quad (10)$$

由此, 空间域的旋转映射成了频域的平移。空间域的旋转映射成了频域的平移后同样可以用传统的相位相关算法得到平移量。

1.3 传统的相位相关算法原理

相位相关算法计算当前帧相对参考帧的相对像移只能精确到整数像素级。为了提高视频小卫星稳像系统的稳像精度, 可以通过亚像素拟合算法获得亚像元的像移量。常用的亚像素拟合算法有曲面拟合法、二维拉格朗日插值法、基于梯度的算法、曲线拟合、质心算法。在充分考虑了拟合精度、计算量、实时性、复杂度后选择了曲面拟合。在相位相关算法得到的相关峰峰值坐标点及其周围 8 个邻域处, 用抛物面进行拟合, 式(9)为抛物面方程:

$$PC_{r,r+1} = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (11)$$

求解方程式(12)可以求得抛物面方程式(11)的系数:

$$AX = B \quad (12)$$

$$A = \begin{bmatrix} x_0^2 & y_0^2 & x_0 y_0 & x_0 & y_0 & 1 \\ x_1^2 & y_1^2 & x_1 y_1 & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_8^2 & y_8^2 & x_8 y_8 & x_8 & y_8 & 1 \end{bmatrix}; X = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} PC_0 \\ PC_1 \\ \vdots \\ PC_8 \end{bmatrix}.$$

式中: B 中数据是峰值的 8 个邻域点的相位相关值。利用最小二乘线性回归求解方程, 可解得式(11)的系数。对式(11)分别对 x, y 求偏导, 并令其为 0:

$$\begin{cases} \frac{\partial PC}{\partial x} = 2ax + cy + d = 0 \\ \frac{\partial PC}{\partial y} = 2by + cx + e = 0 \end{cases} \quad (13)$$

解得:

$$\begin{cases} x = \frac{2db - ce}{c^2 - 4ab} \\ y = \frac{2ae - dc}{c^2 - 4ab} \end{cases} \quad (14)$$

此时, x, y 具有亚像素精度。

2 改进的相位相关算法流程

通过上文分析, 视频小卫星稳像系统中视频序列的当前帧图像与参考帧图像的亚像素像移量计算流程图如图 5 所示。

首先, 输入参考帧和当前帧图像, 将两幅图像合并, 如图 6 所示。经过预处理后, 求两幅图像的互相关函数后通过傅里叶变换得到互功率谱, 如图 7 所示。再经过归一化互功率谱后做傅里叶逆变换, 提取互相关峰, 如图 8 所示。峰值位置即为两幅图像相对的整像素像移量。

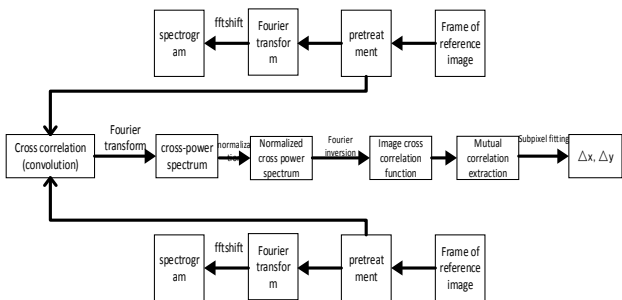


图 5 亚像素像移量计算流程图

Fig.5 The flow chart of subpixel image motion calculation method



图 6 输入参考帧(左)、当前帧(右)图像

Fig.6 Input reference(left) frame and current (right) frame

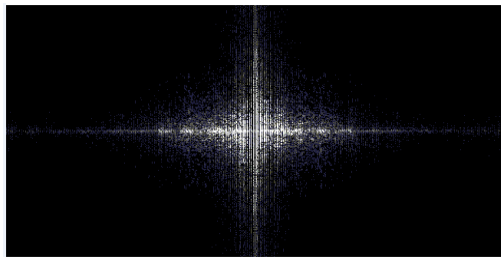


图 7 参考帧与当前帧图像互相关频谱图

Fig.7 The cross-correlation spectrum diagram about reference frame and current frame

图 9 中, 以 X 轴方向为例, 计算了连续 250 帧 200×200 视频序列图像标志为 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_{250}$ 相对于参考帧图像标志为 t_0 的偏移量。上方曲线代表利用传统相位相关算法得到的当前帧图像相对于参考帧图像

在 X 轴方向上的整像素偏移, 下方线代表经过改进后的相位相关算法得到的亚像素偏移量。可以看出改进后的算法能得到更加精确的像移量, 同时, 偏移量变化呈正弦曲线, 这是因为, 在上文稳像系统中讲到, 抖动视频是经过二维转台在 X, Y 轴方向按正弦曲线转动模拟平台抖动获得的。

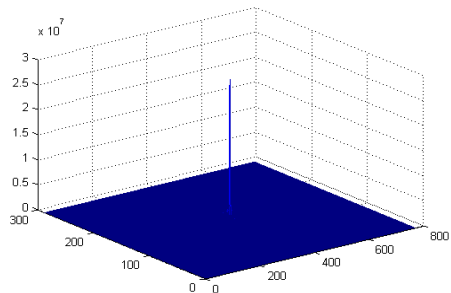


图 8 参考帧与当前帧图像互相关峰

Fig.8 The cross-correlation peak of reference frame and current frame

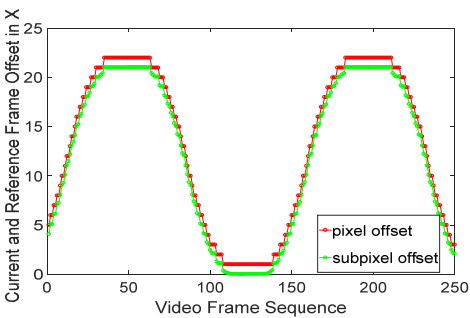


图 9 视频序列当前帧图像相对于参考帧图像在 x 轴像移量

Fig.9 The current frame in the x axis shift relative to the reference frame in a video sequence

3 算法性能仿真分析

改进的相位相关算法性能的优劣直接影响像移检测的精度、检测的速度。精度差、速度慢将直接导致稳像系统稳像失败。文章暂且不考虑系统噪声、图像分辨率、图像噪声等因素影响, 从输入图像大小以及给定当前帧与参考帧图像固定偏移量来分析算法性能。

3.1 图像尺寸与像移大小对计算结果的影响

对抖动视频序列的连续 250 帧图像分别开窗取图像大小为 30×30 、 50×50 、 80×80 、 100×100 、 120×120 、 150×150 、 200×200 、 250×250 像素。分别标志为:

$$\begin{aligned} & \{T_{\text{参考帧}}^{30 \times 30}, T_1^{30 \times 30}, T_2^{30 \times 30}, \dots, T_{250}^{30 \times 30}\} \\ & \dots\dots \\ & \{T_{\text{参考帧}}^{250 \times 250}, T_1^{250 \times 250}, T_2^{250 \times 250}, \dots, T_{250}^{250 \times 250}\} \\ & \{T_{\text{参考帧}}^{384 \times 288}, T_1^{384 \times 288}, T_2^{384 \times 288}, \dots, T_{250}^{384 \times 288}\} \end{aligned}$$

一共有8组连续视频序列图像。然后分别利用基于亚像素拟合的相位相关算法计算每组图像中当前帧与参考帧图像的像移量。计算结果曲线图如图10所示。

从图10中可以看出,图像尺寸为 30×30 时,即第一组序列,当像移量大于10 pixel时,像移计算失败。图像尺寸为 50×50 时,即第二组序列,当像移大于15像素时计算也失败。

因此,可以得出结论:利用相位相关算法获取两幅图像的像移量时,像移大小不能超过图像尺寸的 $1/3$ 。即两幅图像要有 $2/3$ 的相似性。

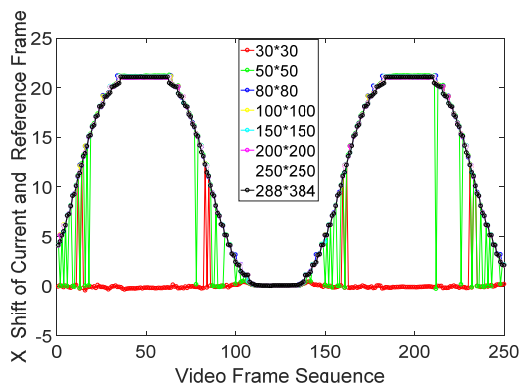


图10 当图像尺寸不同时计算当前帧图像与参考帧图像像移

Fig.10 Calculate subpixel shift about current and reference image when image size different

3.2 当像移一定时,图像尺寸大小对像移计算时间的影响

像移检测算法计算时间是稳像系统的一个关键指标,像移提取时间太长,比如比序列下一帧图像到来的时间还长,稳像肯定会失去意义。算法运行时间与很多因素有关,比如图像噪声、系统噪声、处理器性能、代码优劣、图像中特征点多少、特征点是否明显等等。本文暂且考虑在其他条件都一定时,这里暂且只考虑当给定两帧图像的像移时,图像尺寸对算法性能的影响。

同样取图像尺寸分别为 30×30 、 50×50 、 80×80 、 100×100 、 150×150 、 200×200 、 250×250 、 384×288 ,参考帧图像与当前帧图像像移量为固定5 pixel,表示为:

$$\{T_{\text{参考帧}}^{30 \times 30}, T_1^{30 \times 30}; 5\text{pixel}\}$$

$$\dots\dots$$

$$\{T_{\text{参考帧}}^{250 \times 250}, T_1^{250 \times 250}; 5\text{pixel}\}$$

$$\{T_{\text{参考帧}}^{384 \times 288}, T_1^{384 \times 288}; 5\text{pixel}\}$$

对8组图像分别计算一次相位相关算法所用的时间如图11所示。

从图中可以看出,除了尺寸为 30×30 的图像,

图像尺寸越大计算一次相位相关算法所用的时间越长。尺寸为 30×30 的图像用了比尺寸为 50×50 、 80×80 、 100×100 的图像更多的时间,这是由于 30×30 图像中特征点较少导致计算时间长。同理,尺寸为 150×150 大小的图像计算一次相位相关算法时间比尺寸为 200×200 大小的图像时间长。

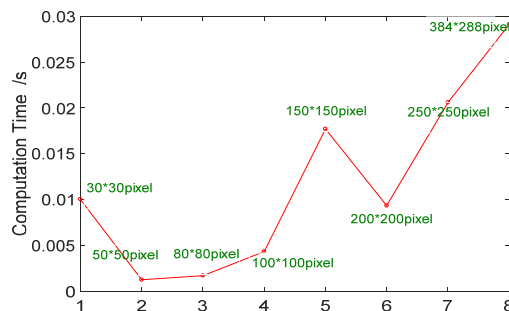


图11 不同尺寸图像计算一次相位相关算法所用的时间

Fig.11 Different size images computing time used a phase correlation algorithm

由此可以得出结论:当偏移量固定时,总的来说计算时间随着图像尺寸增大而变长;同时计算时间长短也与图像特征点多少有关系,特征点越多计算时间越短。当图像太小时由于特征点较少,需要更长的时间去计算。

3.3 固定像移大小对像移检测误差的影响

通常,像移测量的误差是衡量相位相关算法性能的一个重要指标,误差越小检测的像移越精确,经补偿后稳像系统获得的视频越稳定。为了确定固定像移大小对像移检测误差的影响,实验时,用稳像系统采集了一段没有添加抖动的稳定的“凝视”成像的视频序列,然后开窗选取了连续101帧图像尺寸为 200×200 大小的视频序列,将视频序列中的第一帧作为参考帧标志为 $T_{\text{参考帧}}$,其余序列当做当前帧,分别标志为 $T_1, T_2, T_3, \dots, T_{100}$,将当前帧图像 $T_1, T_2, T_3, \dots, T_{100}$ 分别在X轴方向平移3、5、8、12、15、18、20个像素,这样给每组序列当前帧图像相对于参考帧图像一个固定的偏移,获得7组新的视频序列。即:

$$T_1 = \{T_{\text{参考帧}}^{200 \times 200}, T_1^{200 \times 200}, \dots, T_{100}^{200 \times 200}; 3\text{pixel}\}$$

$$T_2 = \{T_{\text{参考帧}}^{200 \times 200}, T_1^{200 \times 200}, \dots, T_{100}^{200 \times 200}; 5\text{pixel}\}$$

$$\dots\dots$$

$$T_3 = \{T_{\text{参考帧}}^{200 \times 200}, T_1^{200 \times 200}, \dots, T_{100}^{200 \times 200}; 8\text{pixel}\}$$

$$T_4 = \{T_{\text{参考帧}}^{200 \times 200}, T_1^{200 \times 200}, \dots, T_{100}^{200 \times 200}; 12\text{pixel}\}$$

$$T_5 = \{T_{\text{参考帧}}^{200 \times 200}, T_1^{200 \times 200}, \dots, T_{100}^{200 \times 200}; 15\text{pixel}\}$$

$$T_6 = \{T_{\text{参考帧}}^{200 \times 200}, T_1^{200 \times 200}, \dots, T_{100}^{200 \times 200}; 18\text{pixel}\}$$

$$T_7 = \{T_{\text{参考帧}}^{200 \times 200}, T_1^{200 \times 200}, \dots, T_{100}^{200 \times 200}; 20\text{pixel}\}$$

利用基于亚像素拟合的相位相关算法计算每一

组视频序列每一帧 $T_1^{200 \times 200}, \dots, T_{100}^{200 \times 200}$ 相对于参考帧 $T_{\text{参考帧}}^{200 \times 200}$ 的像移量, 将计算结果再减去固定的偏移量就得到像移的计算误差。以第一组数据为例, 将计算结果表示为:

$$Q_1 = \{q_1 - 3, q_2 - 3, \dots, q_{100} - 3\}$$

则平均误差:

$$\text{Mean} = \frac{(q_1 - 3) + (q_2 - 3) + (q_{100} - 3)}{100} \quad (15)$$

均方根 (Root Mean Square, RMS) 值:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{(q_1 - 3)^2 + (q_2 - 3)^2 + \dots + (q_{100} - 3)^2}{100}} \quad (16)$$

同理可以算出其他几组序列数据的 Mean、RMS 值。当图像尺寸一定、不同固定偏移量条件下, $T_1 \sim T_7$ 7 组序列中, 每组序列中当前帧与参考帧像移检测误差曲线以平均误差和均方根值如图 12 所示。

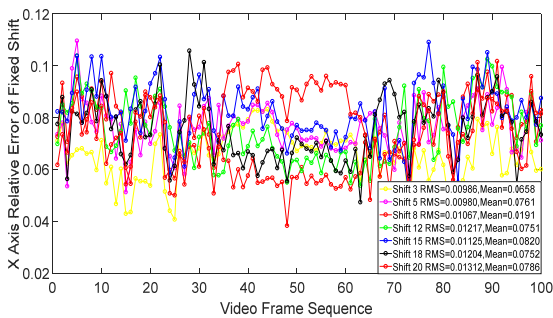


图 12 不同固定偏移下误差分布曲线以及 RMS 值

Fig.12 The error distribution curves and RMS of different fixed offset

图 13 中显示误差均方根值随着固定偏移变化情况。从图中可以看出, 当输入图像大小固定为 200×200 时, 固定像移越大, 总体上 RMS 值也越大。总体上误差均方根值很小, 当图像尺寸为 200×200 时, 固定像移达到 8 个像元时, 误差均值 Mean 为 0.0191 pixel, 均方根值为 0.0131, 检测精度和稳定性都很高。

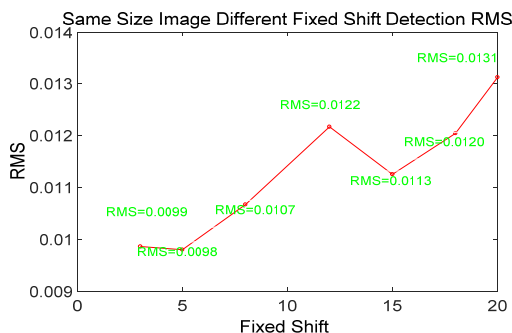


图 13 RMS 值与固定偏移大小的关系

Fig.13 The relationship about RMS values and fixed offset

4 视频小卫星稳像系统实验平台

V. Tchernykh 等人在 SMARTSCAN 稳像系统中用于相位相关计算的图像来源于 50×50 像素的可见光 CCD 相机^[3], 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所许博谦博士利用了可见 CMOS 相机搭建了稳像实验系统^[12]。与他们方法不同的是, 本文稳像系统基于某全天时对地观测视频相机预研课题, 稳像系统中并没有额外加可见光相机用于像移检测, 而是直接用主相机采集到的视频序列图像应用相位相关算法获取像移量。由于应用于全天时对地观测, 系统采用法国 Sofradir 公司的 384×288 长波红外探测器。稳像系统模拟实验平台如图 14 所示。

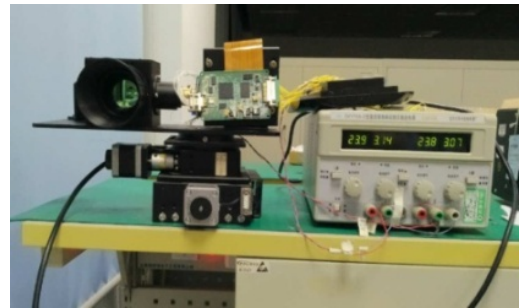


图 14 稳像系统模拟实验平台

Fig.14 Experiment platform of image stabilization system

系统主要由红外探测器、驱动电路、采集系统、抖动平台等主要部分组成。稳像实验时, 利用二维转台在 X、Y 轴方向做正弦运动模拟平台抖动, 从而获得带有抖动的视频。利用相位相关算法实时计算当前帧图像相对参考帧图像的像移, 并实时对视频进行补偿, 从而获得稳定的视频序列, 达到稳像的目的。与可见光相机相比, 红外探测器的图像质量比较差, 预处理比较复杂, 通常要经过非均匀性矫正、盲元剔除、滤波等操作后提高图像质量, 降低噪声, 从而提高算法准确度、精度、速度。

5 总结

本文主要研究视频小卫星稳像系统中视频序列亚像元像移提取的改进的相位相关算法。改进后的算法不仅能检测参考帧图像与当前帧图像之间的亚像元平移矢量, 还能得到图像间的选择角度。与以往基于机械光学的相位相关器件不同的是, 本文基于电子学的方法实现相位相关算法。同时, 以往用于提取像移的输入图像为可见光图像, 本系统利用长波红外探测器本身的视频序列做相关性研究, 提取像移, 再补偿达到稳像目的。文中重点介绍了改进的基于相位相关算法的亚像元像移提取算法的设计流程, 分析了与

算法性能相关的参数。分析了不同尺寸相同像移大小的输入图像与算法时间的关系,固定图像尺寸、不同像移大小跟算法误差均方根的关系。最后根据算法,视频小卫星稳像系统能够实时处理 30 帧/s 的视频序列,获得稳定的视频图像。

参考文献:

- [1] 张召才,朱鲁青. 对地观测小卫星最新发展研究[J]. 国际太空, 2015(11): 46-51.
- ZHANG Z C, ZHU L Q. The latest development and research about small observation satellites[J]. *International Space*, 2015(11): 46-51.
- [2] 刘韬. 国外视频卫星发展研究[J]. 国际太空, 2014(9): 50-56.
- LIU T. The abroad video satellite development research[J]. *International Space*, 2014(9): 50-56.
- [3] Tchernykh V, Dyblenko S, Janschek K. Airborne test results for a smart pushbroom imaging system with optoelectronic image correction[C]// *Proceeding of SPIE*, 2004, **5234**: 550-559.
- [4] Janschek K, Tchernykh V, Dyblenko S. Compensation of focal plane image motion perturbations with optical correlator in feedback loop[J]. *Acta Astronautica*, 2003, **52**: 965-974.
- [5] Janschek K, Tchernykh V. Optical correlator for image motion compensation in the focal plane of a satellite camera[J]. *Space Technology*, 2001, **30**: 127-132.
- [6] Janschek K, Tchernykh V, Dyblenko S. Integrated camera motion compensation by real-time image motion tracking and image deconvolution[C]//*IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2005: 1437-1444.
- [7] 邢慧, 颜景龙, 张树江. 基于相位相关的数字稳像算法研究[J]. 光电工程, 2007, **34**(3): 37-41.
- XING H, YAN J L, ZHANG S J. The digital image algorithm based on phase correlation research[J]. *Photoelectric Engineering*, 2007, **34**(3): 37-41.
- [8] 周武, 胡跃明. 基于相位相关和重采样的亚像素图像配准算法[J]. 华南理工大学学报, 2010, **38**(10): 68-78.
- ZHOU W, HU Y M. Image registration algorithm based on phase correlation and resampling[J]. *Journal of South China University of Technology*, 2010, **38**(10): 68-78.
- [9] 李世杨, 储泽楠. 一种视频目标平移运动估计算法[J]. 计算机应用与软件, 2015, **32**(12): 184-200.
- LI S Y, CHU Z N. A video target translational motion estimation algorithm[J]. *Computer Application Software*, 2015, **32**(12): 184-200.
- [10] 王金泉, 李钦富. 基于单应性矩阵的 SAR 图像配准技术研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, **3**(6): 657-660.
- WAN J Q, LI Q F. Based on single should sex matrix of SAR image registration technology research[J]. *Journal of China Institute of Electronics*, 2009, **3**(6): 657-660.
- [11] 孙辉, 李志强, 孙丽娜, 等. 基于相位相关的亚像素配准技术及其在电子稳像中的应用[J]. 中国光学与应用光学, 2010, **3**(5): 480-485.
- SUN H, LI Z Q, SUN L N, et al. Based on phase correlation subpixel registration technique and its application in electronic image stabilization[J]. *China Optics and Applied Optics*, 2010, **3**(5): 480-485.
- [12] 许博谦. 星载相机微振动下图像补偿技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械研究所, 2015.
- XU B Q. Study on Image Compensation Technology for Spaceborn eCameras under Micro-vibration Circumstances[D]. Changchun: The Chinese academy of sciences Changchun optical precision machinery research institute, 2015.