

# 基于空间相机 TDI 传感器重叠区图像的像移测量方法中的多解性研究

刘海秋<sup>1,2</sup> 王 栋<sup>1</sup> 徐抒岩<sup>1</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

**摘要** 针对基于时间延迟积分(TDI)传感器重叠区图像的像移测量方法的多解性问题,提出了以光滑性评价函数最小值为像移解的多解去除方法。根据像移测量原理,探析了像移测量方法的多解性;新增了光滑性评价函数,评价像移曲线的光滑性;以共轭梯度法求解的光滑性评价函数的最小解为像移解,实现从多个伪解中提取真实解;实验结果表明像移测量结果唯一,且测量误差为 0.13 pixel,证明了以光滑性评价函数最小值为像移解的多解去除法的有效性。

**关键词** 传感器;空间相机;像移测量;多解性;光滑性评价函数;共轭梯度法

**中图分类号** V448.15<sup>+</sup>1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1212002

## Research on Multiplicity of Solution in Space Camera Image Motion Measurement Based on Images from TDI Sensor Overlapped Area

Liu Haiqiu<sup>1,2</sup> Wang Dong<sup>1</sup> Xu Shuyan<sup>1</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)

**Abstract** The multiplicity of solution in image motion estimation method based on images captured by overlapping time delay integration (TDI) imaging sensors is addressed, and a method to eliminate the multiplicity of solution by taking the optimum of smoothness evaluation function as the only solution of image motion is proposed. The existence of the multiplicity of solution is analyzed. An evaluation function is proposed to evaluate the smoothness of each solution, and the minimized evaluation function is taken as the optimal solution of image motion. The optimum is found by using the conjugate gradient method (CGM). A single-solution result is obtained with an error of 0.13 pixel, showing that the added smoothness evaluation function is feasible to solve the problem of multiplicity of solution in image motion measurement.

**Key words** sensors; space camera; image motion measurement; multi-solution; smoothness constrain; conjugate gradient method

**OCIS codes** 120.0280; 040.1490

## 1 引 言

空间相机在轨拍摄期间,由于各种因素导致的目标在焦面上映射的像与焦面之间的相对运动称为

像移<sup>[1]</sup>,飞船姿态不稳定、调姿动量轮变速转动、指向控制、太阳帆板调整等振动时刻影响飞船的稳定性,其中大部分振动会被调姿机构或隔振装置补偿

收稿日期: 2014-06-06; 收到修改稿日期: 2014-07-08

基金项目: 吉林省科技发展计划(20090311)、中国科学院领域前沿创新项目基金(201204)

作者简介: 刘海秋(1987—),女,博士研究生,主要从事航天遥感器像移测量等方面的研究。

E-mail: shangyue\_2008@126.com

导师简介: 徐抒岩(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间光学遥感器计算机控制、图像处理等方面的研究。

E-mail: xusy@ciomp.ac.cn(通信联系人)

或抑制<sup>[2-3]</sup>,但是,仍有一部分残余振动,这些因素引起的像移具有幅值小、频带宽、随机性大的特点<sup>[4]</sup>。对于高分辨率空间相机来说,这些像移可能严重影响成像质量,甚至产生错误的图像数据<sup>[5]</sup>。

目前国外公布的空间相机像移测量方面的研究,主要有联合变换相关器法<sup>[6-9]</sup>、对地成像模型法<sup>[10-11]</sup>和基于时间延迟积分(TDI)传感器重叠区图像的像移测量方法<sup>[12]</sup>。联合变换相关器法通过增加辅助面阵图像传感器获得重叠图像,通过光学相关器处理图像,最终得到像移<sup>[6-9]</sup>。这种方法的速度快,其测量位置接近主成像传感器,测量结果能够相对真实地反映主成像传感器处的像移,但是由于振动的存在,搭配的光学设备也会随之振动,测量精度会受到限制。对地成像模型法采用齐次坐标变化和解球面三角形法建立对地成像模型,根据轨道运动、地球自转、飞船姿态等输入参数确定像移<sup>[10-11]</sup>。像移计算精度和带宽取决于输入参数的精度和带宽<sup>[6]</sup>。基于 TDI 传感器重叠区图像的像移测量方法充分利用两片 TDI 传感器重叠区所拍图像内容相同、拍摄时刻不同的特点,利用图像处理法测量像移<sup>[12]</sup>,测量位置在主成像传感器处,更能反映成像时刻和成像位置处像移的真实情况,无需增加辅助设备,测量精度和带宽既不受限于其他参数,又可以通过改善图像处理技术及调整采样频率得到提高,因此,改进该方法的一些不足是十分必要的。本文针对该方法的多解性进行深入的研究,实现对基于 TDI 传感器重叠区图像的像移测量方法的进一步完善。

## 2 基于 TDI 传感器重叠区图像的像移测量的原理介绍

以相机焦面为参照,目标在焦面上映射像的运动即为像移。像移可以分解为垂直于 TDI 积分方向的分量  $s_x(t)$  和沿 TDI 积分方向的像移分量  $s_y(t)$ ,与之对应的像移速度分别为  $\Delta v_x(t)$  和  $\Delta v_y(t)$ ,两排具有重叠区域的 TDI 传感器重叠区所拍摄的图像被用于像移分量  $s_x(t)$  和  $s_y(t)$  的测量。图1中的  $OA_1$

和  $OA_2$  为两排 TDI 传感器的重叠区域,黑色正方形为目标在焦面上映射的像,以焦面为参照,像移则是正方形目标在焦面上的运动轨迹。目标首先运动到  $OA_1$  的第一级,经过多级积分后在  $OA_1$  输出的图像  $I_1$  中的成像位置为  $(x_1, y_1)$ ,经过一定时间间隔后,目标运动到  $OA_2$  的第一级,经过多级积分后在  $OA_2$  输出的图像  $I_2$  中的成像位置为  $(x_2, y_2)$ 。像移与目标成像位置之间的关系<sup>[12]</sup>为

$$\Delta s(t) = (x_2, y_2) - (x_1, y_1) = s(t + \Delta t) - s(t), \quad (1)$$

式中  $\Delta s(t)$  为  $t$  时刻偏移量,  $s(t)$  和  $s(t + \Delta t)$  分别为  $t$  和  $(t + \Delta t)$  时刻的像移,  $\Delta t$  为两排 TDI 成像传感器对同一目标的成像时间间隔。对(1)式进行傅里叶变换并整理

$$S(f) = \frac{\Delta S(f)}{\exp(j2\pi f \Delta t) - 1}. \quad (2)$$

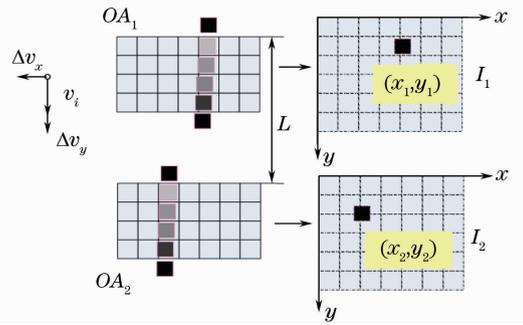


图1 TDI 传感器重叠区成像过程

Fig. 1 Imaging process of the same object by the TDI overlapped areas

基于 TDI 传感器重叠区图像的像移测量方法充分利用两排 TDI 传感器重叠区所拍图像内容相同、拍摄时刻不同的特点,采用图像处理方法得到偏移量,再根据(2)式并采用逆傅里叶运算,最终得到像移<sup>[12]</sup>。

## 3 基于 TDI 传感器重叠区图像的像移测量的多解性探析

通过图像处理方法得到的偏移量数据实际上是离散点列,将(1)式离散化得

$$\begin{aligned} \Delta s(n) &= \Delta(nT_r) = \Delta(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_r) = \sum_{n=1}^N \Delta(t) \delta(t - nT_r) = \sum_{n=1}^N [(t + \Delta t) - (t)] \delta(t - nT_r) = \\ &= \sum_{n=1}^N [(t + \Delta t) \delta(t - nT_r)] - \sum_{n=1}^N [t \cdot \delta(t - nT_r)] = \sum_{n=1}^N [\xi \cdot \delta(\xi - \Delta t - nT_r)] - t \sum_{n=1}^N \delta(t - nT_r) = \\ &= \xi \sum_{n=1}^N \delta(\xi - LT_r - nT_r) - (nT_r) = [(n + L)T_r] - n = (n + L) - n, \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $\xi = t + \Delta t$ ,  $N = rL$ 。整理后  $s(n+L) = s(n) + \Delta s(n)$ , 将  $N$  个偏移量数据  $r$  等分,  $\Delta \mathbf{S} = \{\Delta s(n)\}_N = \{\Delta s_1, \Delta s_2, \dots, \Delta s_r\}$ , 其中

$$\begin{aligned} \Delta s_1 &= \{\Delta s(1), \Delta s(2), \dots, \Delta s(L)\}, \\ \Delta s_2 &= \{\Delta s(1+L), \Delta s(2+L), \dots, \Delta s(2L)\}, \\ &\vdots \\ \Delta s_r &= \{\Delta s[1+(r-1)L], \Delta s[2+(r-1)L], \dots, \Delta s(rL)\}. \end{aligned} \quad (4)$$

同样, 将像移数据等分成  $(r+1)$  组,  $\mathbf{S} = \{s(n)\} = \{s_1, s_2, \dots, s_{r+1}\}$ , 其中,  $s_1 = \{s(1), s(2), \dots, s(L)\}$ ;  $s_2 = \{s(L+1), s(L+2), \dots, s(2L)\}$ ;  $\dots$ ;  $s_{r+1} = \{s(rL+1), s(rL+2), \dots, s[(r+1)L]\}$ , 则

$$\begin{cases} s_1 = s s_1 \\ s_2 = s_1 + \Delta s_1 \\ s_3 = s_1 + \Delta s_1 + \Delta s_2 \\ \vdots \\ s_{r+1} = s_1 + \Delta s_1 + \Delta s_2 + \dots + \Delta s_r \end{cases} \quad (5)$$

像移  $\mathbf{S}$  完全由前  $L$  个像移数据  $s_1$  和  $N$  个偏移量数据  $\Delta \mathbf{S}$  确定, 偏移量数据可以通过对 TDI 传感器重叠区拍摄的图像进行图像处理得到。但是,  $L$  个像移数据的  $s_1$  却无法提前获得, 由(5)式可知, 在相同的偏移量情况下, 不同的  $s_1$  对应不同的像移  $\mathbf{S}$ , 因此, 通过上述公式得到的像移结果不唯一。

## 4 基于共轭梯度法的像移最优值求解

### 4.1 光滑性评价函数的建立

由上述方法求得的像移解不唯一, 为了对得到的多个像移的质量进行评价, 建立了光滑性评价函数, 评价所求像移曲线的光滑性。如(6)式所示, 函数值越小, 说明所求像移曲线的光滑性越好, 使函数取得最小值的像移被认为是多解中的真实解(真实解指所求多解中最接近像移真值的解, 而非真

值), 其他解则为伪解。

$$f(\mathbf{S}) = \sum_{n=1}^{(r+1)L-1} [s(n+1) - s(n)]^2. \quad (6)$$

### 4.2 光滑性评价函数的凸性分析

求解上述光滑性评价函数最小值的过程属于无约束非线性极小值问题。常用的算法包括最速下降法、拟牛顿法和共轭梯度法<sup>[13-15]</sup>。所有算法都要求目标函数为凸函数<sup>[13]</sup>, 下面证明在合理设计空间相机焦面参数及重叠的图像行数的情况下, 作为目标函数的光滑性评价函数满足凸性要求。

定义 1) 设定义在  $n$  维欧式空间的某个凸集  $\mathbf{R}$  上的函数  $f(\mathbf{X})$ , 若对任意实数  $\alpha (0 < \alpha < 1)$  以及  $\mathbf{R}$  中的任意两点  $x_1$  和  $x_2$ , 恒有  $f[\alpha x_1 + (1-\alpha)x_2] \leq \alpha f(x_1) + (1-\alpha)f(x_2)$ , 则称  $f(\mathbf{X})$  为定义在  $\mathbf{R}$  上的凸函数<sup>[13]</sup>。

定理 1) 设  $f(\mathbf{X})$  在  $\mathbf{R}$  上具有二阶连续偏导数, 则  $f(\mathbf{X})$  为  $\mathbf{R}$  上的凸函数的充要条件是  $f(\mathbf{X})$  的海赛矩阵  $\mathbf{H}(\mathbf{X})$  在  $\mathbf{R}$  上处处正定<sup>[13]</sup>。

无约束非线性极小值问题的目标函数为

$$\min\{f(\mathbf{S})\} = \min\left\{\sum_{n=1}^{(r+1)L-1} [s(n+1) - s(n)]^2\right\}, \quad (7)$$

将目标函数展开为

$$\begin{aligned} f(\mathbf{S}) &= \sum_{n=1}^{(r+1)L-1} [s(n+1) - s(n)]^2 = [s(2) - s(1)]^2 + [s(3) - s(2)]^2 + \dots + [s(L) - s(L-1)]^2 + \\ &[s(1+L) - s(L)]^2 + [s(2+L) - s(1+L)]^2 + \dots + [s(2L) - s(L-1+L)]^2 + \dots + \\ &[s(1+rL) - s(rL)]^2 + [s(2+rL) - s(1+rL)]^2 + \dots + [s((r+1)L) - s[L-1+rL]]^2. \end{aligned} \quad (8)$$

目标函数为未知变量, 为  $\mathbf{S} = \{s(1), s(2), \dots, s(L)\}$  的  $L$  元二次函数, 则目标函数一定存在二阶连续的偏导数<sup>[16]</sup>, 即满足定理 1) 中的第一个条件。下面对目标函数的海赛矩阵  $\mathbf{H}(\mathbf{X})$  是否正定进行分析。

定义 2) 海赛矩阵: 函数  $f(\mathbf{X})$  在点  $\mathbf{X}$  处的海赛矩阵为(9)式, 其中  $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。

$$\mathbf{H}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f(\mathbf{X})}{\partial x_1^2}, & \frac{\partial^2 f(\mathbf{X})}{\partial x_1 \partial x_2}, & \cdots, & \frac{\partial^2 f(\mathbf{X})}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f(\mathbf{X})}{\partial x_2 \partial x_1}, & \frac{\partial^2 f(\mathbf{X})}{\partial x_2^2}, & \cdots, & \frac{\partial^2 f(\mathbf{X})}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial^2 f(\mathbf{X})}{\partial x_n \partial x_1}, & \frac{\partial^2 f(\mathbf{X})}{\partial x_n \partial x_2}, & \cdots, & \frac{\partial^2 f(\mathbf{X})}{\partial x_n^2} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

利用递推法求目标函数的海赛矩阵:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(\mathbf{S})}{\partial \mathbf{s}(1)} &= [\mathbf{s}(1) - \mathbf{s}(2)]^2 + [\mathbf{s}(1+L) - \mathbf{s}(L)]^2 + [\mathbf{s}(1+L) - \mathbf{s}(2+L)]^2 + \cdots + \\ &[\mathbf{s}(1+rL) - \mathbf{s}(rL)]^2 + [\mathbf{s}(1+rL) - \mathbf{s}(2+rL)]^2 = \\ &[\mathbf{s}(1) - \mathbf{s}(2)]^2 + [\mathbf{s}(1) - \mathbf{s}(L) + \Delta \mathbf{s}(1)]^2 + [\mathbf{s}(1) - \mathbf{s}(2) + \Delta \mathbf{s}(1) - \Delta \mathbf{s}(2)]^2 + \cdots + \\ &\{\mathbf{s}(1) - \mathbf{s}(L) + \Delta \mathbf{s}(1) + \Delta \mathbf{s}(1+L) - \Delta \mathbf{s}(L) + \cdots + \Delta \mathbf{s}[1+(r-1)L] - \Delta \mathbf{s}[(r-1)L]\}^2 + \\ &\{\mathbf{s}(1) - \mathbf{s}(2) + \Delta \mathbf{s}(1) - \Delta \mathbf{s}(2) + \Delta \mathbf{s}(1+L) - \Delta \mathbf{s}(2+L) + \cdots + \Delta \mathbf{s}[1+(r-1)L] - \Delta \mathbf{s}[2+(r-1)L]\}^2 = \\ &2[\mathbf{s}(1) - \mathbf{s}(2)] + 2[\mathbf{s}(1) - \mathbf{s}(L) + \Delta \mathbf{s}(1)] + 2[\mathbf{s}(1) - \mathbf{s}(2) + \Delta \mathbf{s}(1) - \Delta \mathbf{s}(2)] + \cdots + \\ &2\{\mathbf{s}(1) - \mathbf{s}(L) + \Delta \mathbf{s}(1) + \Delta \mathbf{s}(1+L) - \Delta \mathbf{s}(L) + \cdots + \Delta \mathbf{s}[1+(r-1)L] - \Delta \mathbf{s}[(r-1)L]\} + \\ &2\{\mathbf{s}(1) - \mathbf{s}(2) + \Delta \mathbf{s}(1) - \Delta \mathbf{s}(2) + \Delta \mathbf{s}(1+L) - \Delta \mathbf{s}(2+L) + \cdots + \Delta \mathbf{s}[1+(r-1)L] - \Delta \mathbf{s}[2+(r-1)L]\}, \end{aligned} \quad (10)$$

所以,

$$\frac{\partial^2 f(\mathbf{S})}{\partial \mathbf{s}(1) \partial \mathbf{s}(i)} = \begin{cases} 4r+2, & i=1 \\ -2(r+1), & i=2 \\ -2r, & i=L \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad (11)$$

同理,

$$\frac{\partial^2 f(\mathbf{S})}{\partial \mathbf{s}(2) \partial \mathbf{s}(i)} = \begin{cases} -2(r+1), & i=1 \\ 4(r+1), & i=2 \\ -2(r+1), & i=3 \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad \frac{\partial^2 f(\mathbf{S})}{\partial \mathbf{s}(3) \partial \mathbf{s}(i)} = \begin{cases} -2(r+1), & i=2 \\ 4(r+1), & i=3 \\ -2(r+1), & i=4 \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad (12)$$

依此类推,

$$\frac{\partial^2 f(\mathbf{S})}{\partial \mathbf{s}(L-1) \partial \mathbf{s}(i)} = \begin{cases} -2(r+1), & i=L-2 \\ 4(r+1), & i=L-1 \\ -2(r+1), & i=L \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad \frac{\partial^2 f(\mathbf{S})}{\partial \mathbf{s}(L) \partial \mathbf{s}(i)} = \begin{cases} -2r, & i=1 \\ -2(r+1), & i=L-1 \\ 4r+2, & i=L \\ 0, & \text{others} \end{cases}. \quad (13)$$

因此,

$$\mathbf{H}(\mathbf{S}) = \begin{bmatrix} 4r+2 & -2(r+1) & 0 & 0 & \cdots & 0 & -2r \\ -2(r+1) & 4(r+1) & -2(r+1) & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -2(r+1) & 4(r+1) & -2(r+1) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & -2(r+1) & 4(r+1) & -2(r+1) & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & -2(r+1) & 4(r+1) & -2(r+1) \\ -2r & 0 & 0 & \cdots & 0 & -2(r+1) & 4r+2 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

由此可见,当偏移量数据长度  $r$  和排间距  $L$  一定时,目标函数定义域内所有点的海赛矩阵值都相

等.由定理2)可知,通过合理选择  $r$  和  $L$  的值,可以使海赛矩阵正定,进而使相应的目标函数为凸函

数,以满足优化算法对目标函数凸性的要求。

定理 2) 矩阵正定判定定理: 矩阵的左上角各阶顺序主子式行列式都大于零, 则矩阵正定<sup>[13]</sup>。

求解光滑性评价函数最小值的过程属于无约束非线性极小值问题, 通过全局收敛性、收敛速率和资源占用量三个方面对常用的最速下降法(SD)、拟牛

顿法(QN)和共轭梯度法(CG)在解决无约束非线性极小值问题时的性能进行对比(表 1<sup>[13-15]</sup>), 本文选择在精确线性搜索或强 Wolfe-Powell 型搜索策略情况下具有全局收敛性且收敛速率及资源占用量都居中的共轭梯度法求解上述目标函数的极小值。

表 1 三种无约束非线性优化算法的性能对比

Table 1 Performance comparison of the three unconfined nonlinear optimization algorithms

|                      | SD      | QN      | CG           |
|----------------------|---------|---------|--------------|
| Global convergence   | Ac/WP/A | Ac /WP  | Ac /SWP      |
| Rate of convergence  | Slowest | Fastest | Intermediate |
| Resource consumption | Small   | Large   | Intermediate |

(SD; Steepest descent method; QN; Quasi-Newton; CG; Conjugate Gradient; Ac; accurate linear search; WP; Wolfe-Powell search; A; Armijo search; SWP; Strong Wolfe-Powell search; ‘/’ means ‘or’)

## 5 共轭梯度法求解光滑性评价函数最优解的误差分析

在基于 TDI 传感器重叠区图像的像移测量原理的基础之上, 增加了光滑性评价函数, 用以评价所求像移的优劣; 并采用共轭梯度法求解光滑性评价函数的最优解, 实现了从多个伪解中找到真实解。

由于相机焦面排布(主要指相机焦面上两排具有重叠区域的 TDI 传感器之间的排间距)、用于像移测量的图像行数以及被测像移的频率不同, 在求解光滑性评价函数最优解过程中的共轭梯度法的算法误差也不同。下面对相关参数变化引起的共轭梯度法的算法误差变化进行分析。根据像移测量原理, 像移是由两排成像传感器重叠区图像之间的偏移量数据推导的, 它反映两排之间像移差值在两排的拍摄时间间隔内的累积效果。排间距越大, 偏移量数据的时域分辨率越低<sup>[17]</sup>, 与真实偏移量之间的差距越大, 由它所求的像移与真实的像移之间的差距越大, 所以, 排间距越大, 共轭梯度法求得的最优解与像移真值之间的算法误差越大。在排间距不变时, 图像行数越多, 偏移量数据长度越长, 其时域的时间跨度越大, 导致频域的分辨率越高<sup>[17]</sup>, 所以, 图像行数越多, 算法误差越小。为了验证上述理论分析结论, 通过数值仿真方法, 在两个参数保持不变的情况下, 对另外一个参数变化引起的误差变化进行实验。用于实验的参数包括两排具有重叠区域的 TDI 传感器之间的排间距( $L$ )、用于像移测量的图像行数( $N=rL$ )以及被测像移的频率( $f_0$ ), 在三组实验中每个参数的取值范围如表 2 所示, 其中  $F_r$  为相机 TDI 传感器的行频, 为了配合后续的物理实

验, 仿真实验中的行频设置为 240 Hz。

表 2 仿真实验参数设置

Table 2 Simulation experiment parameters

|              | $F_r$ /Hz | $f_0$ /Hz | $r$     | $L$ /line    |
|--------------|-----------|-----------|---------|--------------|
| Experiment 1 | 240       | 1         | 73      | [10:120]     |
| Experiment 2 | 240       | 1         | [1:100] | 28           |
| Experiment 3 | 1000      | [7:70]    | 73      | $F_r/(2f_0)$ |

仿真结果如图 2 所示, 随着排间距的增加, 误差逐渐增大。当排间距不变时, 随着图像行数的增加, 误差逐渐减小, 且变化幅度与排间距对误差的变化幅度相当。随着被测频率的增加, 误差略微减小, 但是与其他两个参数相比, 由频率变化引起的误差绝对变化率非常小, 可以忽略不计。仿真结果与分析结论相符。采用共轭梯度法求解光滑性评价函数最

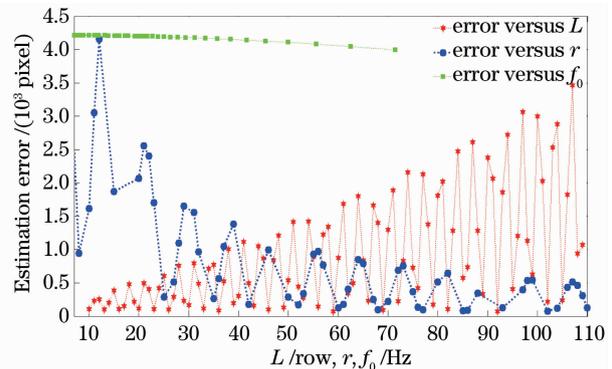


图 2 共轭梯度法求解光滑性评价函数最优解的算法误差与排间距、数据长度和被测频率之间的关系

Fig. 2 Relationship between  $L$ ,  $r$  and  $f_0$  and the algorithm error of the optimum solution of the smoothness evaluation function by the conjugate gradient method

优解的算法误差在 0.005 pixel 范围内,相对于实现过程中的其他系统误差,该算法误差可以忽略<sup>[18]</sup>。

## 6 实验及结果分析

为了验证结合光滑性评价函数的基于 TDI 重叠区图像像移测量方法的有效性,搭建了振动干扰 TDI 成像装置。目标与相机焦面之间的相对运动(像移)由固定在振动台上随之运动的目标和静止的相机模拟;振动台输出的带宽及行程分别是 60 Hz 和 1.5 mm;像移测量算法在计算机上实现;将精度为 5  $\mu\text{m}$ (相当于 0.01 倍目标像素)、探测频率为 2 kHz 的位移传感器所测得的振动台输出振动作为像移的真实值,与本文方法的测量值进行对比,最终求得本文方法的误差。实验中相关参数设置如表 3 所示。

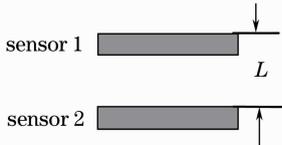


图 3 TDI 模拟相机焦面排布

Fig. 3 Layout of focal plane of simulated TDI camera

TDI 相机由结合数字域 TDI 技术的 CMOS 面阵相机模拟<sup>[19]</sup>,模拟 TDI 相机的焦面排布如图 3 所示。CMOS 相机的帧频设为 240 frame/s,即模拟 TDI 相机的行扫描频率为 240 Hz,相关参数设置如表 3 所示。

表 3 实验参数设置

Table 3 Experimental parameters

| $F_r/\text{Hz}$ | $f_0/\text{Hz}$ | $r$ | $L/\text{line}$ |
|-----------------|-----------------|-----|-----------------|
| 240             | 1               | 73  | 53              |

图 4 中虚线为真实像移曲线,实线为本文方法测得的像移曲线(为了便于观察,图中只显示 4 s 内的曲线)。两条曲线随时间的变化规律大致相同。图 5 给出了测量值与真值之间的差值曲线,本文方法测量结果与位移传感器测得的像移真值差值的标准差为 0.13 pixel。

通过增加光滑性约束条件,得到了具有唯一解的像移测量方法,而且唯一解与真值之间的误差比较小。实验中的误差远大于仿真误差(0.005 pixel),因为除了共轭梯度法求解光滑性评价函数最优解的算法误差之外,还包括位移传感器的测量误差、放大倍率标定误差、图像处理误差等,这些误差的数量级比算法误差大很多<sup>[18]</sup>,最终导致实验测量误差远大于算法误差。

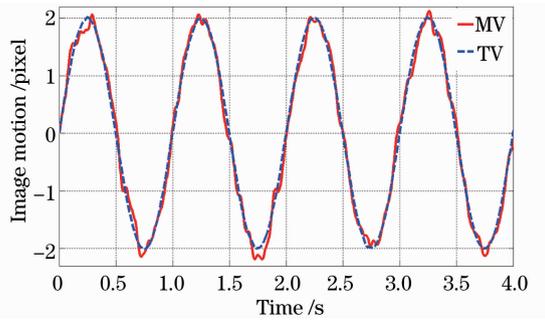


图 4 共轭梯度像移测量结果与真值对比(MV: 测量值; TV: 真值)

Fig. 4 Comparison of measured image motion (MV) and true value (TV) using conjugate gradient based image motion measurement (MV: the measured value; TV: the true value)

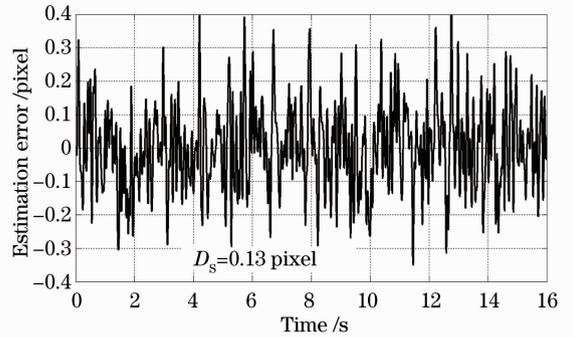


图 5 共轭梯度像移测量方法的误差

Fig. 5 Error of the conjugate gradient based image motion estimation

## 7 结 论

对宽频带、高精度的基于 TDI 传感器重叠区图像的空间相机像移测量方法的多解性进行探析,为了解决该方法的多解性,在其像移测量原理的基础之上,新增了光滑性评价函数,用以评价多个像移曲线的光滑性,并采用共轭梯度法求解满足光滑性评价函数的最优像移,实现了从多个伪解中找到像移真实解。为了得到共轭梯度法求解像移最优解的误差,对相关参数对误差的影响进行了仿真,结果表明,相对于算法实现中的系统误差,由两排存在重叠区的成像传感器间的排间距、用于像移计算的图像行数以及被测频率的变化引起的误差变化非常小,可以忽略。物理实验结果表明结合光滑性评价函数的基于 TDI 传感器重叠区图像的像移测量方法实现了从伪解中找到真实解,在该实验条件下的像移测量误差为 0.13 pixel,证明了新增的光滑性评价函数的有效性。

参 考 文 献

- 1 A Sterm, N S Kopeika. Analytical method to calculate optical transfer functions for image motion and vibrations using moments [J]. *J Opt Soc Am A*, 1997, 4(2): 388—396.
- 2 M B McMickell, T Kreider. Optical payload isolation using the miniature vibration isolation system (MVIS-II) [C]. *SPIE*, 2007, 6527: 652703.
- 3 R G Cobb, J M Sullivan, A Das. Vibration isolation and suppression system for precision payloads in space [J]. *Smart Mater Struct*, 1999, 8(6): 798—812.
- 4 Sun Yang. On-Orbit Platform Jitter Effect on Image Quality of High-Resolution Remote Sensor [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.  
孙 阳. 卫星平台在轨颤振对高分辨率遥感器成像[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- 5 F Ayoub, S Leprince, R Binet, *et al.*. Influence of camera distortions on satellite imageregistration and change detection applications [C]. *International geoscience and Remote Sensing symposium*, 2008, 2: 1072—1075.
- 6 K Janschek, V Tchernykh, S Dyblenko. Integrated camera motion compensation by real-time image motion tracking and image deconvolution [C]. *International IEEE Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2005. 1437—1444.
- 7 K Janschek, V Tchernykh. Optical correlator for image motion compensation in the focal plane of a satellite camera [J]. *Space Technology*, 2001, 21(4): 127—132.
- 8 K Janschek, V Tchernykh, S Dyblenko. Performance analysis of opto-mechatronic image stabilization for acompact space camera [J]. *Control Engineering Practice*, 2007, 15(3): 333—347.
- 9 K Janschek, V Tchernykh, S Dyblenko. Performances of image motion tracking with optical correlation [C]. *International Conference on Signal and Image Processing*, 2005. 352—358.
- 10 J Wang, P Yu, C Yan, *et al.*. Space optical remote sensor image motion velocity vectorcomputational modeling, error budget and synthesis [J]. *Chin Opt Lett*, 2005, 3(7): 414—417.
- 11 Wang Jiaqi, Yu Ping, Yan Changxiang, *et al.*. Space optical remote sensor image motion velocity vectorcomputational modeling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12): 1585—1589.
- 王家骥, 于 平, 颜昌翔, 等. 航天光学遥感器像移速度矢计算数学模型[J]. *光学学报*, 2004, 24(12): 1585—1589.
- 12 Liu Haiqiu, Xu Shuyan, Wang Dong, *et al.*. Space camera image motion measurement based on images from time delayed integration sensors overlapped area [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0212001.  
刘海秋, 徐抒岩, 王 栋, 等. 基于空间相机时间延迟积分传感器拼接区图像的像移测量[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0212001.
- 13 Qian Songdi. *Operations Research* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012. 157—169.  
钱颂迪. *运筹学* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012. 157—169.
- 14 Li Donghui, Tong Xiaojiao, Wan Zhong. *Numerical Optimization Algorithm and Theory* [M]. Beijing: Science Press, 2010.  
李董辉, 童小娇, 万 中. *数值最优化算法与理论* [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- 15 Wu Qizong, Zheng Zhiyong, Deng Wei, *et al.*. *Operations Research and Optimization* [M]. Beijing: China Machine Press, 2009. 88—100.  
吴祈宗, 郑志勇, 邓 伟, 等. *运筹学与最优化方法* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009. 88—100.
- 16 Department of Mathematics, Tongji University. *Advanced Mathematics* [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2007. 7—35.  
同济大学数学系. *高等数学* [M]. 上海: 同济大学出版社, 2007. 7—35.
- 17 Hu Guangshu. *The Theory, Algorithm and Implementation of Digital Signal Process* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.  
胡广书. *数字信号处理的理论、算法与实现* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- 18 K Zhang, X Li, J Zhang. A robust point-matching algorithm for remote sensing image registration [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 11(2): 469—473.
- 19 Tao Shuping. *Research on the TDI Technology in the Digital Domain for CMOS Space Cameras* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.  
陶淑苹. *航天 CMOS 相机数字域 TDI 技术研究* [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.

栏目编辑: 何卓铭