文章编号:1001-5078(2014)11-1230-04

·光电技术与系统 ·

# 航天三线阵光学遥感成像运动模糊建模与分析

贾桂敏<sup>1,2</sup>,王向军<sup>2</sup>

(1. 中国民航大学 天津市智能信号与图像处理重点实验室,天津 300300;
 2. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

摘 要:为了提高立体摄影测量的精度,对航天三线阵光学遥感成像的运动模糊模型进行推导和分析。根据引起运动模糊的方式,将三线阵光学遥感成像运动模糊分为前向运动模糊和姿态运动模糊。利用坐标系旋转来研究三线阵相机曝光瞬间前向飞行和姿态变化对运动模糊的影响,对俯仰、滚转和偏航姿态运动引起的模糊分别进行建模。仿真实验表明:(1)曝光瞬间航天三线阵遥感成像运动模糊是空间变化的,俯仰和滚转比偏航运动对三线阵相机的影响更严重;(2)对于直视线阵 CCD 而言,偏航引起的运动模糊可以忽略不计,但是对前视和后视线阵 CCD 的影响不能忽略;(3)航天三线阵相机的前视和后视线阵 CCD 比直视线阵 CCD 更容易受到航天器姿态运动的影响。

关键词:航天摄影测量;光学成像;运动模糊;三线阵相机

中图分类号:TP391.4 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2014.11.011

# Modeling and analysis of motion blur in spaceborne photogrammetry using optical three-line-array (TLA) camera

JIA Gui-min<sup>1,2</sup>, WANG Xiang-jun<sup>2</sup>

(1. Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
 2. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of stereophotogrammetry, a computational model of motion blur is established for spaceborne TLA cameras. According to the reasons of motion blur, it is divided into two parts: the motion blur caused by flight velocity and attitude instability. The effect of flight velocity and attitude instability on motion blur at the camera exposure is studied by coordinate transformation. The motion blur caused by pitching, rolling and yawing is mathematically modeled. The experimental results show the conclusions as follows: (1) motion blur of spaceborne TLA cameras is variant in space, pitching and rolling have more effect on motion blur of TLA cameras than yawing;(2) for nadir-looking sensor, the motion blur caused by yawing is ignored, but for forward-looking and backward-looking sensors, it can't be ignored because it introduces space variant to the motion blur distribution on the CCD arrays;(3) the motion blur caused by attitude instability is smaller to the nadir-looking sensor than the forward-looking and backward-looking sensors.

Key words: spaceborne photogrammetry; optical imaging; motion blur; three-line-array camera

## 1 引 言

航天相机的立体成像方式可以分为两种:同轨 立体成像和异轨立体成像。20世纪90年代之前, 航天相机大多使用异轨立体成像方式<sup>[1-2]</sup>。自从 1995年德国发射的 MOMS - 02卫星搭载三线阵 CCD 相机,并从理论上解决了摄站外方位元素的重 构问题,三线阵立体相机越来越多的应用在航天立

基金项目:国家自然科学基金(No. 60872097);天津市科技计划 项目(No. 08ZCKFJC27900);中国民航大学科研启动基金(No. 2013QD26X)资助。

作者简介:贾桂敏(1982-),女,讲师,博士,主要从事光学成像, 计算机视觉与模式识别等方面的研究。E-mail:gmjia\_cauc@163.com 收稿日期:2014-05-14 体摄影测量领域<sup>[3-4]</sup>。

由于在曝光瞬间三线阵遥感相机与地面被摄 目标存在相对运动,目标在像面上的像点位置会 发生移动,产生运动模糊,即像移。另外,虽然航 天摄影测量中卫星平台受气流等因素的影响很 小,姿态角变化量较小,但是由于卫星姿态控制精 度和轨道控制精度及稳定性的影响,在实际成像 瞬间卫星平台姿态会发生变化<sup>[5-7]</sup>。本文根据航 天器的运动方式将三线阵相机的像移模糊分为前 向运动模糊和姿态运动模糊,分别进行运动模糊 模型的推导和分析。

#### 2 前向运动模糊建模

# 2.1 坐标系的建立

由于地心惯性坐标系 S<sub>i</sub>,地球坐标系 S<sub>e</sub>,航天器 轨道坐标系 S<sub>e</sub>之间的转换矩阵可以根据已知的格 林尼治赤经和卫星轨道状态等参数求得,本文在模 型推导中只关注航天飞行器飞行速度、姿态变化和 遥感器成像的坐标系。本文坐标系均为右手系,其关 系如图 1 所示。



Fig. 1 schematic of coordinate systems

(1) 航天器轨道坐标系 S<sub>o</sub>(O<sub>o</sub>, X<sub>o</sub>, Y<sub>o</sub>, Z<sub>o</sub>):原点 位于航天器质心, O<sub>o</sub>Z<sub>o</sub> 轴在轨道平面内垂直向下指 向地心; O<sub>o</sub>X<sub>o</sub> 轴位于轨道平面内与 O<sub>o</sub>Z<sub>o</sub> 轴垂直, 并 指向飞行器前进方向。

(2) 航天器本体坐标系  $S_b(O_b, X_b, Y_b, Z_b)$ :原 点位于航天器质心, $O_bX_b$  轴沿卫星纵轴,向前;  $O_bZ_b$  轴在纵对称平面内,垂直于纵轴,向下。航天 器的飞行姿态通过本体坐标系  $S_b$  与航天轨道坐标 系  $S_a$  的三个姿态角( $\psi, \phi, \theta$ ) 进行描述, $\psi$  为偏航 角, $\phi$  为滚转角, $\theta$  为俯仰角。姿态角的方向定义如 下:当沿着坐标轴正向观察时,顺时针转动为正, 反之为负。

(3) 三线阵相机坐标系 S<sub>e</sub>(O<sub>e</sub>, X<sub>e</sub>, Y<sub>e</sub>, Z<sub>e</sub>):原点 位于三线阵相机光学物镜的主点。由于三线阵相机 在飞行器中的安装位置可以事先测量得到,所以 S<sub>b</sub> 和 $S_e$ 的变换矩阵已知。又由于相机固定连接在航天器上,所以本文中假设 $S_b$ 和 $S_e$ 重合。

(4) 像面坐标系 *P*(*o*,*x*,*y*):该坐标系为二维坐标系,原点为遥感器光轴与像面的交点。*ox* 轴和 *oy* 轴分别平行于 *O*<sub>e</sub>X<sub>e</sub> 轴和 *O*<sub>e</sub>Y<sub>e</sub> 轴。

2.2 航天三线阵光学遥感成像前向运动模糊建模

一般的,相机的曝光时间为已知,引入像移速度 矢量 $\hat{\delta}_{e}$ 的概念,其表示单位时间内像平面上的运动 模糊量的大小和方向。假设航天飞行器的飞行速度 在 $S_{e}$ 中可以表示为 $\vec{V}_{e} = [V_{s},0,0]^{T}$ 。如果飞行器 的姿态角为零,那么 $S_{e}$ 、 $S_{b}$ 和 $S_{e}$ 重合,由前向飞行 引起的像移速度可以通过简单的几何关系计算得 到。如公式(1)所示:

$$\vec{\delta}_v = \frac{f}{H} \vec{V}_o \tag{1}$$

其中,f为三线阵相机的焦距;H为航天器轨道高度。 飞行器姿态角不为零时,三线阵遥感成像运动模糊 原理示意图如图2所示。



图 2 三线阵遥感成像运动模糊原理示意图 Fig. 2 schematic of motion blur for TLA camera

其中, $\alpha_1$ , $\alpha_2$ 分别为直视和前视、直视和后视的夹角。当姿态变化时,传感器光学成像镜面中心到地面目标的距离发生变化,由H变为|00''|,用坐标系旋转表示姿态变化,像移速度如公式(2)所示:

 $\vec{\delta}_{v} = \frac{f \cos\theta \cos\phi}{H} R_{\psi\theta\phi} \vec{V}_{o} = \frac{f \cos\theta \cos\phi}{H} \vec{V}_{o}$ 0  $\int \cos\theta = 0$ г1 0  $-\sin\theta$ 0 0  $\cos\phi$  $\sin\phi$  $\lfloor 0 \rfloor$  $\cos\phi^{\perp}\sin\theta = 0$  $-\sin\phi$  $\cos\theta$  $\lceil \delta_{vx} \rceil$ sin∉ 0cosψ  $\delta_{vy}$  $-\sin\psi$ cosψ 0 0 0

$$= f \frac{V_s}{H} \cos\phi \cos\theta \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\psi \\ \sin\phi \sin\theta \cos\psi - \cos\phi \sin\psi \\ \cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi \end{bmatrix}$$
(2)

其中,  $R_{\psi\phi\phi}$  为  $S_{o}$  到  $S_{b}$  的变换矩阵。需要指出的是, 研究传感器成像平面上的运动模糊时,像移速度的  $\delta_{vz}$  分量不考虑,只考虑在 ox 和 oy 方向上的像移 速度。

3 航天三线阵光学遥感成像姿态运动模糊建模

3.1 航天器俯仰运动引起的运动模糊建模

假设航天器在曝光瞬间的俯仰角变化率为θ, 由图2可知俯仰像移速度沿 ox 方向,可以求出俯仰 运动引起的像移速度如下:

$$\delta_{\theta lx} = -\frac{f\theta}{\cos\alpha_1} \tag{3}$$

$$\delta_{\theta nx} = -f\dot{\theta} \tag{4}$$

$$\delta_{\theta rx} = -\frac{f\theta}{\cos\alpha_2} \tag{5}$$

其中,  $\delta_{\theta lx}$ ,  $\delta_{\theta nx}$  和  $\delta_{\theta nx}$  分别为前向、直视和后视线阵 CCD 在 ox 方向上的像移速率。

3.2 航天器滚转运动引起的运动模糊建模

假设航天器在曝光瞬间的滚转角变化率为 $\phi$ , 从图2看出滚转像移速度沿oy方向,计算公式如下:

$$\delta_{\phi ly} = \sqrt{f^2 + y_l^2 \dot{\phi}} \tag{6}$$

$$\delta_{\phi n y} = \sqrt{f^2 + y_n^2} \dot{\phi} \tag{7}$$

$$\delta_{\phi r y} = \sqrt{f^2 + y_r^2} \dot{\phi} \tag{8}$$

其中, $\delta_{\phi ly}$ , $\delta_{\phi ny}$ 和 $\delta_{\phi ry}$ 分别为前视、直视和后视线阵 CCD 在 oy 方向上的像移速率; $y_l$ , $y_n$ 和 $y_r$ 分别为前 视、直视和后视线阵 CCD 上像点的 y 坐标。

3.3 航天器偏航运动引起的运动模糊建模

假设航天器在曝光瞬间的滚转角变化率为 $\psi$ , 从图 2 可以看出,偏航运动在三线阵相机的 ox 和 oy 方向上都引起运动模糊。可以计算偏航运动引起的 像移速度幅值如下:

$$|\vec{\delta}_{\psi l}| = |\sqrt{(f \tan \alpha_1)^2 + y_l^2} \dot{\psi}|$$
(9)

$$\mid \delta_{\psi n} \mid = \mid y_n \dot{\psi} \mid \tag{10}$$

$$|\vec{\delta}_{\psi r}| = |\sqrt{(f \tan \alpha_2)^2 + y_r^2 \dot{\psi}}| \qquad (11)$$

其中, $\delta_{\psi}$ , $\delta_{\psi}$ 和 $\delta_{\psi}$ 分别为前视、直视和后视线阵 CCD 的偏航像移速度。

# 4 仿真实验结果与分析

以下仿真实验均采用某型航天三线阵相机的成 像参数: $f = 5800 \text{ mm}, H = 820 \text{ km}, V_s = 7.4 \text{ km/s},$   $\tau = 0.8 \text{ ms}, \alpha_1 = \alpha_2 = 20^\circ, \dot{\phi} = \dot{\theta} = \dot{\psi} = 6 \times 10^{-4} \text{ o/s}, 单位像元长度 a = 6.5 \mu\text{m}, 线阵列像元数 n = 12000_{\circ}$ 

4.1 前向运动模糊仿真与分析

根据公式(2)可以看出,前向飞行引起的像移 模糊在前视、直视和后视线阵 CCD 上的分布都是空 间不变的,三个线阵列受前向飞行影响程度相同。 由公式(2)可以计算出前向飞行引起的像移速度约

为 $\delta_{v}$  = [52.341µm/ms,0]<sup>*T*</sup>。从计算结果可以看出,*y*方向的相移速度几乎为零,即航天器的角运动对前向飞行所产生的运动模糊几乎可以忽略不计。前向飞行引起的运动模糊主要受到航天器速高比和三线阵相机焦距的影响,其方向与飞行方向相同。在曝光时间内,三线阵前向飞行引起的像移量可达41.873µm。

4.2 姿态运动模糊仿真与分析

4.2.1 航天三线阵相机前视、直视和后视线阵 CCD 的姿态运动模糊对比与分析

根据公式(3)~(5)可以计算仿真只有俯仰角运动时的像移速度分布情况。得到结论如下:俯仰运动引起的像移速度只在 ox 轴方向上有分量,其分布是空间不变的。前视和后视线阵 CCD 比直视线阵 CCD 受俯仰运动影响严重。

根据公式(6)~(8)可以计算仿真只有滚转角运 动时的像移速度分布情况。结论如下:滚转运动引起 的像移速度只在 oy 轴方向上有分量,并且是空间变 化的。其幅值与像点距离 o 点的距离成正比。前视、 直视和后视线阵 CCD 受滚转运动的影响程度相同。

根据公式(9)~(11)仿真只有偏航角运动时的 像移速度分布情况,如图3所示。





可以看出:偏航运动在直视线阵 CCD 上引起的 像移速度只在 ox 方向有分量,其分布是空间变化 的,其幅值与像点坐标有关,距离 ox 轴越远,幅值越 大。偏航运动在前视和后视 CCD 上引起空间变化 的像移, ox 方向和 oy 方向的分量均不为零,其幅值 与像点距离 o 点的距离成正比。前视和后视线阵 CCD 比直视线阵 CCD 受偏航运动的影响更严重,且 像移模糊的分布更复杂。

综合以上的分析,可以看出前视和后视线阵 CCD 比直视线阵 CCD 在曝光瞬间受姿态变化的影 响更严重。

4.2.2 航天三线阵遥感成像三轴姿态角运动模糊 对比与分析

设姿态角的变化范围为0~0.05°/s,根据公式 (3)~(11)可以得到前视、直视和后视线阵 CCD 的 像移速度幅值随姿态角变化如图4 所示。





从图 4 可以得到结论如下:总体而言,俯仰角和 滚转角比偏航角对三线阵相机的影响更严重;偏航 角对直视 CCD 的影响几乎可以忽略不计;但是对前 视和后视 CCD 而言,虽然偏航角比俯仰角和滚转角 引起的像移幅值小,但是偏航角的运动使线阵 CCD 上的运动模糊发生空间变化,给后续的运动模糊补 偿带来困难,因此不能被忽略。

5 结 论

本文对航天三线阵遥感成像运动模糊模型进行 了推导和分析。为了研究曝光瞬间航天三线阵遥感 器的像移情况,利用坐标系旋转代替航天器姿态的 变化,对航天器前向飞行和姿态运动引起的像移模 糊分别进行建模。利用本文构建的像移模型通过仿 真实验对航天三线阵相机的像移特点进行分析,为 运动模糊补偿奠定基础。

# 参考文献:

- Toutin, T. ASTERDEMs for geomatic and geoscientific applications: a review [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(7):1855-1875.
- [2] Toutin T, P Cheng. Comparison of automated digital elevation model extraction results using along-track ASTER and across-track SPOT stereo images [J]. Optical Engineering, 2002, 41(9):2102 - 2106.
- [3] Ebner H, et al. Orientation of MOMS 02/D2 and MOMS 2P/PRIRODA imagery [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996, 54(5-6): 332 – 341.
- [4] Fraser C, J Shao. Exterior orientation determination of MOMS - 02 three-line imagery: experiences with the Australian testfield data[J]. Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996, 31 (Part B3): 207 - 214.
- [5] Zhang L, et al. Modeling of satellite borne TDI CCD pitching imaging image motion velocity vector [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, Shenyang, 2009:1587-1591.
- [6] ZHENG Qiuzhen, YANG Huajun, LI Dong, et al. Analysis of real-time detection accuracy of airborne three-dimensional imaging radar[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(6): 612 615. (in Chinese)

郑秋贞,杨华军,李东,等.机载三维成像激光雷达实 时探测精度分析[J].激光与红外,2011,41(6): 612-615.

[7] NIE Pin, TIAN Haiying, ZHANG Jingguo, et al. Calculation and analysis of the dimensions of aerial sensor's scanning mirror and window[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(12):1364-1367. (in Chinese)
聂品,田海英,张景国,等. 航空遥感器扫描反射镜与窗口尺寸的计算与分析[J]. 激光与红外, 2011, 41 (12):1364-1367.