

航天时间延迟积分 CCD 相机摆扫成像 快速几何校正设计与分析

杨 飞^{1,2,3} 金 光^{1,3} 曲宏松^{1,3} 杨秀彬^{1,3} 徐 开^{1,3} 张贵祥^{1,3}

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
² 中国科学院大学, 北京 100049
³ 小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130033

摘要 为实现在轨卫星机动成像条带的快速准确拼接和应用, 针对高分辨力卫星在轨推扫相结合的机动成像模式, 提出了一种光线追迹像移匹配数学建模方法。通过对卫星机动过程中的摆角变化、地球表面面型的影响分析, 利用摆扫过程中姿态对地指向不断改变导致的交轨方向速度失配量和成像变形量, 补偿相机像面各点处的像移量从而进行快速几何校正。利用小卫星姿态控制系统全物理仿真平台对成像进行了仿真分析。分析结果表明, 成像过程中随着扫描角的增加, 像面上的像移量增大, 成像变形情况也变严重。利用均方误差分析仿真成像与实验成像质量, 仿真成像与实验成像相差 -0.000011 左右, 较好地满足地面卫星相机成像仿真需求。对不同扫描角下存在速度失配的图像进行快速几何校正, 该校正后图像的均方误差变小。该校正方法具有效率高, 便于拼接应用的优点。

关键词 成像系统; 快速几何校正; 摆扫; 扫描角; 像移

中图分类号 V443.5 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0111001

Design and Analysis about Rapid Geometric Correction of Space Whiskbroom Time Delayed and Integration CCD Camera

Yang Fei^{1,2,3} Jin Guang^{1,3} Qu Hongsong^{1,3} Yang Xiubin^{1,3}
Xu Kai^{1,3} Zhang Guixiang^{1,2}

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ National and Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract High-resolution space-borne remote sensors usually adopt mobile imaging, combining pushbroom and whiskbroom modes. In these modes, to achieve fast and accurate splicing and imaging application, a mathematical modeling method is proposed to match optical image motion tracing. Through the analysis of impact of scan angle and earth surface, the degrees of velocity mismatch and imaging deformation are computed and fast geometric correction is achieved by compensating the image shift for camera image plane at each point. Finally, physics time delayed and integration (TDI) CCD imaging simulation system is used for the simulation analysis of imaging. Simulation results show that the image shift amount increases and the image distortion turns serious with the increase of the scan angle. Velocity mismatch imaging is geometrically rapidly corrected under different scanning angles using optical tracing matching model. The mean square errors of simulation and experimental imaging quality are analyzed. The difference reaches to -0.000011 between simulation and experimental imaging and the mean square error of the corrected

收稿日期: 2013-06-07; 收到修改稿日期: 2013-07-11

基金项目: 国家 863 计划(2012AA121502)

作者简介: 杨 飞(1989—), 女, 博士研究生, 主要从事空间遥感相机成像技术方面的研究。

E-mail: yangfei403305@126.com

导师简介: 金 光(1958—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间遥感相机总体设计方面的研究。

E-mail: jing@ciomp.ac.cn

image turns small. The results show that this method can meet the demand of the ground satellite camera imaging simulation. The calibration method has high efficiency and is easy to splice.

Key words imaging systems; rapid geometric correction; whiskbroom; scan angle; image motion

OCIS codes 110.2960; 040.1490; 040.1520

1 引 言

现代高分辨卫星对于相机的空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率的要求日益提高。为了适应这一趋势,航天光学遥感器通常采用以载荷为中心的星载一体化、轻量化的设计,使之具有较大的成像幅宽、较高的成像分辨率和较强的机动能力。Pleiades-HR^[1-2]卫星可以实现在三轴姿态机动中开启光学有效载荷并进行成像,成像过程中相机地表推扫速度与星下点速度存在夹角,从而实现垂直轨道方向的条带成像。为了获得大面积、高分辨率的观测图像,动态成像需要将获取的序列遥感图像进行在轨动态拼接,以实现航天遥感图像的信息获取功能。而航天高分辨力时间延迟积分(TDI)CCD相机摆扫成像时,因其垂直轨道方向上姿态对地指向不断变化而导致拍摄物体在像面转动的角速度即像移速度发生变化,从而造成原始图像上各地物的几何位置、形状、尺寸、方位等特征与在参照系统中的表达要求不一致。这种交轨方向上的几何变形,严重影响了图像在轨拼接。

将卫星遥感影像精确地投影到固定的参照系统中、准确消除原始影像中存在的几何变形是遥感影像处理和应用的一项关键技术。目前对高分辨率遥感影像的几何校正大多是在地面进行。El-Manabili等^[3-4]利用直接线性变换模型对SPOT模型进行几何校正,形式简单、解算方便,但精度较低;David等^[5-7]对SPOT等线阵影像进行多项式校正,并分析了不同控制点对精度的影响;Fraser等^[8]利用有理函数模型对IKONOS影像几何校正和三维重建进行了研究。这些校正算法均为近似几何校正,需要一定数量的精度较高、空间分布较好的地面控制点。王翀等^[9]通过分析具有空间光滑曲面的体目标视运动及其动态成像问题,推导了对地观测大视场相机像速解析式,提出了一种新的遥感器像移速度场数学建模方法。李仕等^[10-11]通过对异速像移产生机理的分析,根据像移量的不同将图像分成多个区,并用一维维纳滤波并行处理各像素线,将处理结果合并成结果图像,解决了航空相机斜视工作时成像靶面的异速像移补偿问题。目前针对遥感图像处理中的几何校正都是由遥感卫星地面接收站接收到

遥感图像数据后处理完成,通常分为系统几何校正和几何精校正。系统几何校正正是利用卫星所提供的姿态、轨道等信息对遥感图像进行粗校正,几何精校正是指采用地面控制点对系统几何校正模型进行进一步修正,使之更精确地描述卫星与地面位置之间的关系。这些方法并不能满足航天TDI CCD相机摆扫成像时快速几何校正、在轨动态拼接的要求。针对航天TDI CCD相机摆扫成像时,由于扫描角的变化,摄像头不垂直于被拍摄平面导致的像移速度失配和成像变形,提出一种光线追迹像移匹配数学建模方法,通过补偿相机像面各点处的像移量进行快速几何校正。

2 航天 TDI CCD 相机摆扫成像模式

航天 TDI CCD 相机成像模式主要有星下点成像、侧摆成像、摆扫成像。星下点成像是最传统的成像模式,在卫星处于稳定的姿态角时,空间相机沿卫星轨道在地球表面的投影,推扫出与地面投影走向一致的条带;侧摆成像是通过对卫星姿态的调整,空间相机实现对卫星当前轨道在地面投影区域两侧的一定区域进行推扫,在一定范围内增大了卫星单轨的对地观测范围,空间相机对地分辨率也出现一定的变化;摆扫成像模式(如图1所示)是卫星姿态机动过程中同时进行成像的动态成像方式,相机在滚动角方向快速到达某一角速度,然后按一定角速度运动,在卫星姿态机动的过程中对地面物体成像,可以满足目前对地观测范围增大的需求。

航天 TDI CCD 相机摆扫成像时,由于飞行器的

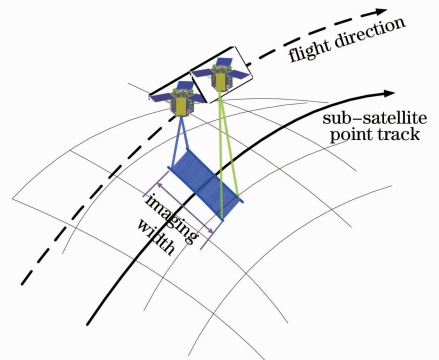


图1 航天 TDI CCD 相机摆扫成像

Fig. 1 Space TDI CCD camera whiskbroom imaging

前向飞行,相机曝光瞬间成像靶面与地面目标产生相对位移使得光学影像在靶面上产生移动,这种像移称为前向像移。通过前向像移补偿机构补偿卫星的前向运动解决这一问题,一般认为补偿后的像移残差不超过 $1/3$ pixel,不影响成像质量。另外由于飞行过程中扫描角速度引起的横滚角不断调整,影像会在靶面上留下不同的像移轨迹,这种由摆扫产生的横向像移特点是靶面上像素点的像移方向相同,但不同列区域的像移量大小不同,如图 2 所示。横向像移导致轨交方向上成像变形,图 3 为将地球视为平坦球体时摆扫成像的几何变形情况,随着扫描角的增大,地面像元分辨率(GSD)变大(如图 4 所示)。下节将会分析考虑地球曲率时成像变形的情况。

本文重点解决这种因姿态对地指向不断改变导致的速度失配和成像变形而使得图像不能快速拼接和应用的问题。

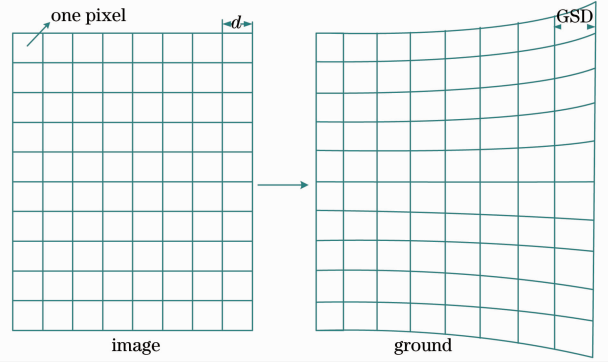


图 4 摆扫成像几何变形示意图

Fig. 4 Geometric aberration at whiskbroom imaging

3 光学追迹像移匹配数学建模

3.1 坐标系选择

地理坐标系:原点位于地心, I_2 指向北极, I_3 指向卫星的轨道平面和赤道面的交点, I_1 轴垂直于 I_2 和 I_3 两轴确定的平面。

轨道坐标系:原点在轨道上, B_1 轴指向轨道前向, B_3 轴指向天顶,坐标系沿轨道以角速度 Ω 作轨道运动。

卫星本体坐标系:无姿态运动时与轨道坐标系重合。

相机坐标系 $o_i x_i y_i z_i$: 无安装误差时与卫星本体坐标系重合。

3.2 利用地面像元分辨率计算地理坐标

光线追迹像移匹配数学建模确定地面点在地理坐标系和相应像点在像面坐标系的二维坐标之间的几何关系。求取地面点对应的像元在像面上的位置和像移速度矢之前,需计算地面点在地理坐标系中的坐标,可利用地面像元分辨率进行计算。

地面像元分辨率是指卫星遥感系统探测器单元对应的地面投影线性尺寸,也就是一个像元对应的地面实际尺寸。航天 TDI CCD 相机摆扫成像时,每一时刻像面上不同像元对应的 GSD 皆不同。下面对考虑地球曲率时不同时刻的 GSD 进行推导。

首先推导光轴处探测器采样间隔对应的 GSD,如图 5 所示,在 $\triangle ABC$ 中求得 BC 之间的距离 l_{BC} ,

$$l_{BC} = \beta[H + r_e(1 - \cos \eta)] \sec \alpha, \quad (1)$$

式中 r_e 为地球半径, d 为像元尺寸, β 为瞬时视场角,

$$\beta = 2 \arctan\left(\frac{d}{2f}\right) \approx \frac{d}{f}, \text{ 其中 } f \text{ 为相机焦距。}$$

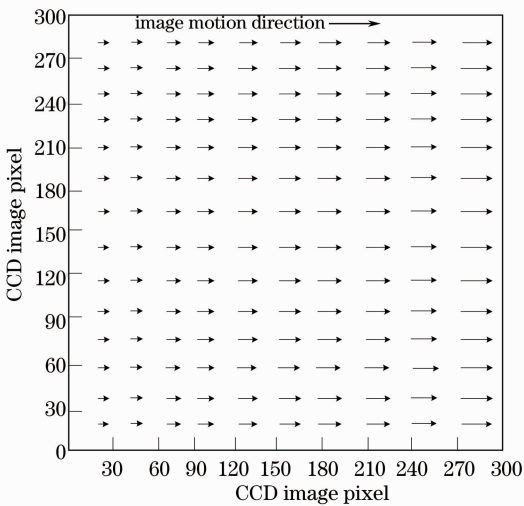


图 2 横向像移示意图

Fig. 2 Landscape orientation motion

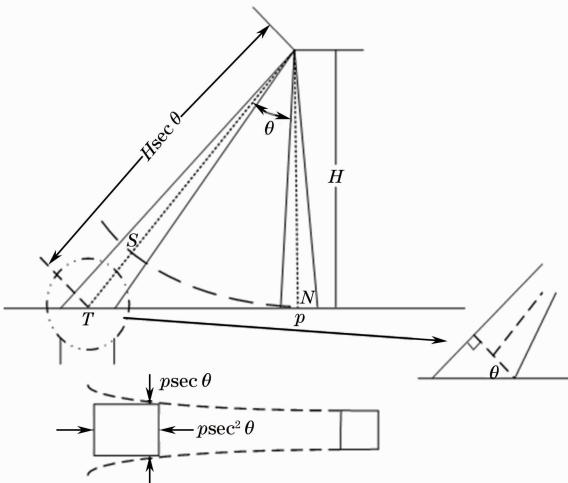


图 3 不考虑地球曲率时的几何变形

Fig. 3 Geometric aberration regardless of earth curvature

从而得到了光轴处像元对应的 GSD 值:

$$V_{\text{GSD}_f}(\alpha) = \frac{l_{\text{BC}}}{\cos(90 - \alpha - \eta)} = \frac{H + r_e(1 - \cos \eta)}{\cos \alpha \cos(\alpha + \eta)} \times \frac{d}{f}, \quad (2)$$

式中 η 为对应于扫描角 α 处的地表点的地心角度, 且有^[12]

$$\eta = \arcsin\{[(r_e + H)/r_e]\sin \theta - \theta\}. \quad (3)$$

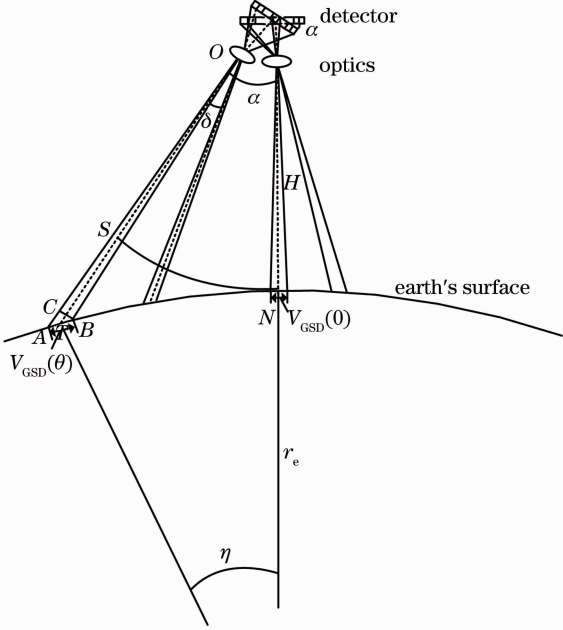


图 5 交轨方向上的几何特征

Fig. 5 Geometric characteristic at cross-track direction

若横滚角速率为 ω , 则 $\alpha = \omega t$, 从而得到

$$V_{\text{GSD}_f}(t) = \frac{d}{f} \times \frac{H + r_e \{1 - \cos\{\arcsin\{[(r_e + H)/r_e]\sin(\omega t) - \omega t\}\}\}}{\cos(\omega t) \cos\{\omega t + \arcsin\{[(r_e + H)/r_e]\sin(\omega t) - \omega t\}\}}. \quad (4)$$

对于同一焦平面, 近地点和远地点不同像元处探测器采样间隔对应的 GSD 也不同。近地点处的地面像元分辨率为

$$V_{\text{GSD-n}}(\theta) = \frac{H + r_e(1 - \cos \eta)}{\cos(\alpha - \delta) \cos(\alpha - \delta + \eta)} \times \frac{d}{f}, \quad (5)$$

远地点处的地面像元分辨率为

$$V_{\text{GSD-f}}(\theta) = \frac{H + r_e(1 - \cos \eta)}{\cos(\alpha + \delta) \cos(\alpha + \delta + \eta)} \times \frac{d}{f}, \quad (6)$$

式中 δ 为偏离视场中心的像元和光轴的夹角,

$$\delta = \arctan\left(\frac{n \times d}{2f}\right), \quad (7)$$

式中 n 为偏离视场中心的像元距离中心像元的像元数。

不同时刻不同像元对应的 GSD 分析结果如

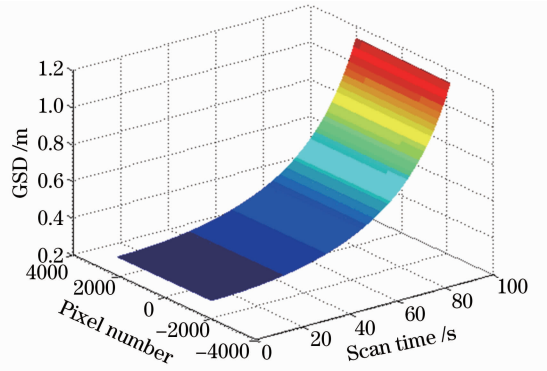


图 6 不同时刻不同像元对应的 GSD

Fig. 6 GSD at different time and different pixels

图 6 所示, 扫描角速度为 $0.56^\circ/\text{s}$, 计算结果表明, 同一时刻, 同一像面上不同像元处对应的 GSD 值相差很小; 随着扫描角的增加, GSD 增大, 分辨率下降。

假设星下点处地理坐标为 (x_0, y_0) , 扫描方向为 x 轴, 垂直扫描方向为 y 轴, 则偏离星下点时像元数为 n 处对应的地理坐标表示为

$$\begin{cases} x = x_0 + \sum_{i=1}^{n-1} V_{\text{GSD}}(i) + V_{\text{GSD}}(n)/2 \\ y = y_0 \end{cases}. \quad (8)$$

3.3 光线追迹像移匹配模型建立

以遥感卫星通常使用的太阳同步圆轨道作为研究对象, 其轨道摄动在成像中极其微小, 可忽略不计。图 7 为航天 TDI CCD 相机摆扫成像几何关系示意图。相关物理量有地球半径 R , 卫星轨道角速率 Ω , 轨道高度 H , 轨道倾角 i_0 , 摄影时刻轨道平面内降交点到卫星之间对应的中心角 γ_0 , 相机焦距 f , 横滚角 φ_0 , 横滚角速度 $\dot{\varphi}$ 。

成像目标的物方光线追迹是在相机坐标系内对目标进行观测时光线方向和位置的确定。从地理坐标系到像面坐标系需要经过 7 个坐标系间的转换^[13], 如图 8 所示。P 为目标光线与地理坐标系的交点, 由 P 发出的光线矢量 $(g_1, g_2, 0, 1)$ 经过坐标转换最终到达像面上。由地理坐标系到轨道坐标系的转换公式为

$$\mathbf{l}_{\text{OP}'} = \begin{bmatrix} -f/H & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -f/H & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -f/H & -f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi_0 + \dot{\varphi}t) & \sin(\varphi_0 + \dot{\varphi}t) & 0 \\ 0 & -\sin(\varphi_0 + \dot{\varphi}t) & \cos(\varphi_0 + \dot{\varphi}t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{l}_{\text{OP}}. \quad (9)$$

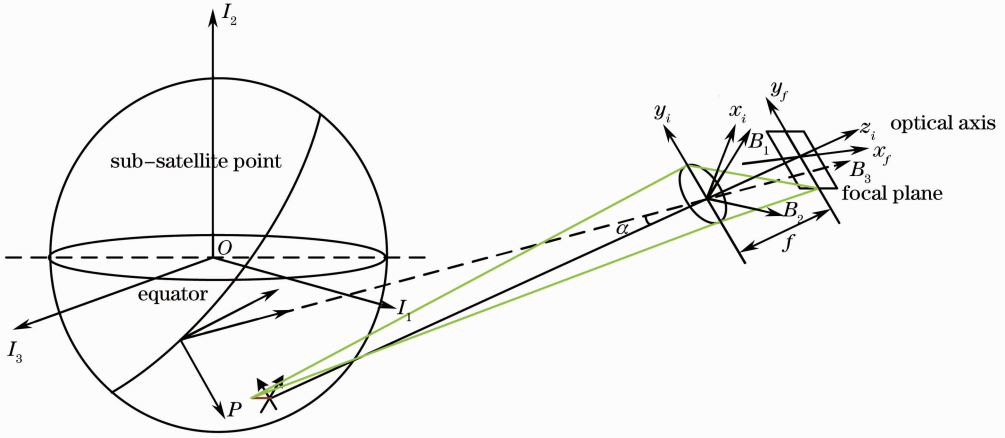


图 7 航天 TDI CCD 相机摆扫成像几何关系

Fig. 7 Geometric relationship of space whiskbroom TDI CCD camera

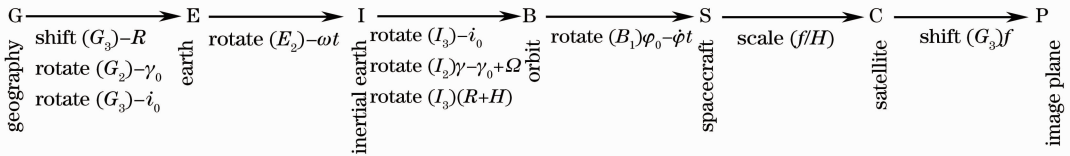


图 8 坐标转换图

Fig. 8 Coordinate transformation

航天相机摆扫成像时,垂直轨道方向上姿态指向不断变化,卫星飞行过程中存在横滚角,导致了轨道坐标系相对于卫星本体坐标系发生旋转。光线矢量 $\mathbf{l}_{OP'}$ 经过从轨道坐标系到卫星本体坐标系的坐标转换到达卫星本体,得到矢量 $\mathbf{l}_{OP'}$:

$$\mathbf{l}_{OP'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -(R+H) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\gamma_0 + \Omega t) & 0 & -\sin(\gamma_0 + \Omega t) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\gamma_0 + \Omega t) & 0 & \cos(\gamma_0 + \Omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos i_0 & \sin i_0 & 0 & 0 \\ -\sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \omega t & 0 & \sin \omega t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \omega t & 0 & \cos \omega t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos i_0 & -\sin i_0 & 0 & 0 \\ \sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma_0 & 0 & \sin \gamma_0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \gamma_0 & 0 & \cos \gamma_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{l}_{OP'}$$

对时间 t 微分后,即可得到像面上各点的像移方程

$$\frac{d\mathbf{l}_{OP'}}{dt} = \begin{bmatrix} d\mathbf{l}_{OP'_1}/dt \\ d\mathbf{l}_{OP'_2}/dt \\ d\mathbf{l}_{OP'_3}/dt \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\rho 1} \\ V_{\rho 2} \\ V_{\rho 3} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

提出的光线追迹像移匹配算法通过补偿像面上各点的像移量进行快速几何校正,同以往在地面对下传的图像数据进行几何校正不同的是,这种算法可以映射到现场可编程门阵列(FPGA)中,用硬件计算在速度上的优势来满足实时性系统的处理需

求,从而实现在轨快速几何校正。

4 仿 真

利用小卫星姿态控制系统全物理仿真平台对航天 TDI CCD 相机摆扫成像进行仿真分析。仿真平台主要由单轴气浮转台、反作用飞轮、光纤陀螺、TDI CCD 相机、台上控制计算机、动态靶标、Matrox Imaging 图像采集软件等构成,原图像如图 9 所示。采用移动 LED 屏幕的方法实现摆扫成像,如图 10 所示。实验过程中,靶标运动速度需和转台转速相匹配,物距根据在轨参数进行计算。仿真平台对应

参数如表 1 所示。



图 9 原图像
Fig. 9 Original image

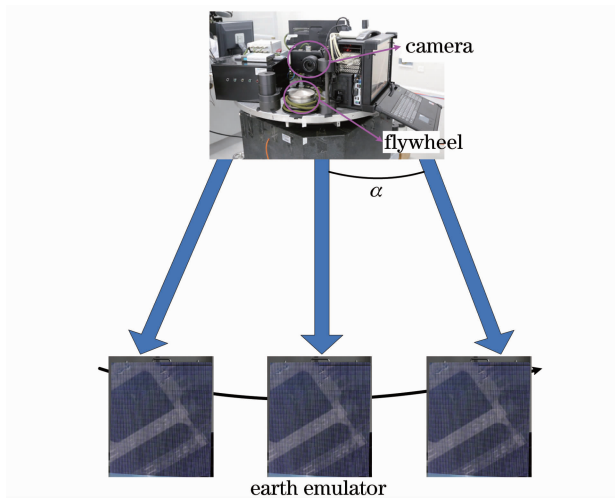


图 10 小卫星姿态控制系统全物理仿真平台
Fig. 10 Satellite attitude control system physics simulation platform

表 1 仿真平台参数

Table 1 Parameter of simulation system

Camera parameters	Focal length: 15 mm
	Pixel size: 8.75 μm
	Integral stages: 16
Turntable, target parameters	Turntable speed: 0.56°/s
	Target movement speed: 68 mm/s
	LED size: 4 mm
	Object distance: 7 m

图 11(a)~(c)分别为相机偏离垂直靶标方向角度逐渐增大时的实验成像结果,图 11(d)~(f)为仿真成像结果,表 2 为利用均方误差(MSE)对图像质量进行评价的结果,实验成像相对于仿真成像的MSE稍微大一些,这是因为实际成像时误差引入的结果。根据成像比较可以得出结论:随着扫描角的增加,像面上的像移量增大,图像变形情况随之变严重,利用小卫星姿态控制系统物理平台得到的图像

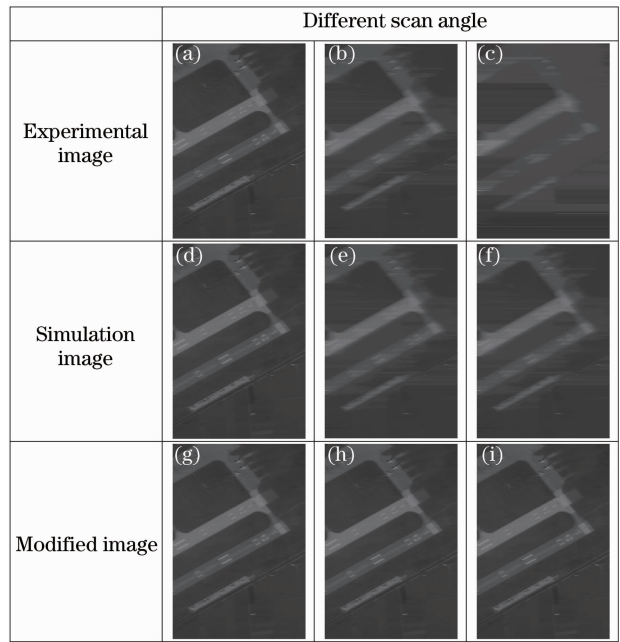


图 11 相机偏离垂直靶标方向角度增大时的(a)~(c)实验结果,(d)~(f)仿真结果和(g)~(i)校正后的结果

Fig. 11 (a) ~ (c) Experimental images, (d) ~ (f) simulated images and (g) ~ (i) modified images for different angles between camera and the direction perpendicular to target

表 2 图像质量评价

Table 2 Image analysis

Experimental image	Fig. 11(a)	Fig. 11(b)	Fig. 11(c)
Experiment MSE	-0.00068	-0.00215	-0.00726
Simulation image	Fig. 11(d)	Fig. 11(e)	Fig. 11(f)
Simulation MSE	-0.00057	-0.00127	-0.00643
Modified image	Fig. 11(g)	Fig. 11(h)	Fig. 11(i)
Modified MSE	0.000029	0.000038	0.000045

和理论分析、仿真图像相吻合。

图 11(g)~(i)分别为利用光线追迹像移匹配模型对图像进行校正后的结果。由图 11 和表 2 中的图像质量评价可知,校正效果较好,适用于图像快速拼接以及应用。

5 结 论

提出了一种可以映射到 FPGA 中的光线追迹像移匹配数学建模方法,通过补偿相机像面各点处的像移量进行在轨快速几何校正。利用小卫星姿态控制系统全物理仿真平台对成像进行了仿真分析,实验结果与模拟结果的均方误差相差 -0.000011,可以满足地面卫星成像仿真的要求。校正后图像均方误差变小,可以实现快速拼接,适宜在工程实践中

使用。文中对光线追迹像移匹配数学建模误差并未作分析,可作为下一步工作。

参 考 文 献

- 1 J Jean, J Eric, L Gerard, *et al.*. Attitude guidance technics developed in CHES for each observation and scientific missions [C]. The 28th Annual AAS Guidance and Control Conference, Breckenridge, 2005. 11-16.
- 2 L Perret, E Boussarie, J M Lachiver, *et al.*. The Pleiades system high resolution optical satellite and its performance [C]. The 53rd International Astronautical Congress, The World Space Congress, Houston, 2002.
- 3 Y El-Manabali, K Novak. Precision rectification of SPOT imagery using the direct linear transformation model [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1996, 62(1): 67-72.
- 4 F Savopol, C Armenakis. Modelling of IRS-1C satellite pan imagery using the DLT approach [J]. International Archives of Photogrammetric and Remote Sensing, 1998, 32(4): 511-514.
- 5 P S David, F A Saumeul. Accuracy of rectification using topographic map versus GPS ground control points [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2001, 67(5): 565-570.
- 6 G Jay. Non-differential GPS as an alternative source of planimetric control for rectifying satellite imagery [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2001, 67(1): 49-55.
- 7 E S Baltsavias. Metric information extraction from SPOT images and the role of polynomial mapping functions [J]. International Archives of Photogrammetric and Remote Sensing, 1992, 29 (B4): 358-364.
- 8 C S Fraser, T Yamakawa. Insights into the offline model for high-resolution satellite sensor orientation [J]. Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2004, 58: 275-288.
- 9 Wang Chong, You Zheng, Xing Fei, *et al.*. Image motion velocity field for wide view remote sensing camera and detectors exposure integration control [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33 (5): 0511002.
王 翀, 尤 政, 邢 飞, 等. 大视场空间遥感相机的像速场及图像传感器曝光积分控制[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0511002.
- 10 Li Shi, Sun Hui, Zhang Bao. A method for real-time restoration of motion-blurred images [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(5): 767-772.
李 仕, 孙 辉, 张 葆. 一种运动模糊图像的实时恢复算法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(5): 767-772.
- 11 Li Shi, Sun Hui, Zhang Bao. Real-time restoration for aerial side-oblique images with different motion rates [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(4): 895-900.
李 仕, 孙 辉, 张 葆. 航空斜视成像异速像移实时恢复算法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(4): 895-900.
- 12 R John, H. Brush. A method for real-time navigation of AVHRR imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, 23(6): 876-887.
- 13 Wang Jiaqi, Yu Ping, Yan Changxiang, *et al.*. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational 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.

栏目编辑: 张 腾