

# 基于光线追迹逐点匹配的航天时间延迟积分 CCD 相机机动成像快速几何校正算法

杨 飞<sup>1,2,3</sup> 曲宏松<sup>1,3</sup> 金 光<sup>1,3</sup> 郑亮亮<sup>1,3</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

<sup>3</sup>小卫星技术国家地方联合工程研究中心,吉林 长春 130033

**摘要** 基于线阵时间延迟积分(TDI)电荷耦合器件(CCD)机动成像原理,分析了灵巧卫星在姿态机动过程中动态成像的几何畸变问题。由于地球曲率及姿态机动因素导致像面空间几何映射形状不断改变,通过光线追迹逐点匹配算法推导出了机动成像方式下的空间成像几何关系数学解析表达式。利用小卫星姿态控制系统物理仿真平台对 TDI CCD 相机机动成像快速几何校正算法进行实验验证,姿态角确定精度与姿态稳定度优于 0.05°、0.005°/s。结果表明,在卫星最大扫描角为 45°时,所设计的算法能够解决机动成像几何畸变问题,提高成像质量。

**关键词** 成像系统; 机动成像; 像移; 地面像元分辨率; 快速几何校正

中图分类号 V443.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0511002

## Fast Geometric Correction of Space Time Delayed and Integration CCD Camera Dynamic Imaging Based on Ray Tracing Point Matching

Yang Fei<sup>1,2,3</sup> Qu Hongsong<sup>1,3</sup> Jin Guang<sup>1,3</sup> Zheng Liangliang<sup>1,3</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

<sup>3</sup>National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** Based on the linear array of time delay integration (TDI) charge coupled device (CCD) imaging principle, geometric distortion is analyzed in the process of attitude maneuver while the flexible satellite dynamic imaging. Because of the curvature of the earth and the attitude maneuver factors, the mapping shape of space geometry on focal plane is constantly changing. Dynamic imaging mode of space imaging geometry relationship between mathematics analytic expression is deduced based on the ray tracing point matching algorithm. Then using small satellite attitude control system simulation platform to verify experimentally TDI CCD camera mobile imaging fast geometric correction algorithm. The attitude determine angle accuracy and attitude stability is better than that of 0.05° and 0.005°/s. Results show that when the maximum scan angle of satellite is 45°, the designed algorithm can solve the problem of dynamic imaging geometric distortion and improve the quality of imaging.

**Key words** imaging systems; dynamic imaging; image shift; ground sample distance; rapid geometric correction

**OCIS codes** 110.2960; 040.1490; 040.1520

## 1 引 言

现阶段成像侦察卫星对相机的高分辨率、高时效性要求日益提高。为了适应这一趋势,航天光学

收稿日期: 2014-11-28; 收到修改稿日期: 2015-01-16

基金项目: 国家 863 计划(2014AA7012019)、微小型航天器技术国防重点学科实验室开放基金(HIT.KLOF.MST.201304)

作者简介: 杨 飞(1989—),女,博士研究生,主要从事空间相机成像电子学方面的研究。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

遥感器通常采用星载一体化轻量化设计,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<sup>[1]</sup>。机动成像侦察能够实现一个轨道周期内,一次获得曲线分布的长条带目标图像,解决了目前传统侦察卫星利用多次平行飞行方向推扫成像拼接曲线侦察区域的问题。然而这种成像模式中,需调整成像姿态匹配卫星与分布目标之间的相对关系,因其姿态对地指向不断变化而导致拍摄物体在像面上转动角速度即像移速度发生变化,从而造成图像上相应地物的形状、尺寸以及几何位置与地理投影系统中的特征不一致。

唐新民等<sup>[2]</sup>中针对资源三号测绘卫星的总体设计,提出基于虚拟电荷耦合器件(CCD)线阵成像技术的测绘卫星成像几何模型,并利用资源三号卫星影像数据,完成正视、前视、后视传感器校正产品的生产试验。马洪超等<sup>[3]</sup>中应用普通 Kriging 插值法将地形高程模型化为一个随机场,从而达到在多项式纠正基础上进行误差纠正以提高校正精度的方法。张过等<sup>[4]</sup>建立了推扫式光学卫星影像系统几何校正产品的三维几何模型,用有理函数(RPC)模型表示光学卫星影像系统几何校正产品的高程起伏引起的变形规律,提高了影像定向精度。袁修孝等<sup>[5]</sup>根据遥感卫星传感器对地扫描成像过程中 CCD 线阵列侧视角匀速变化的机理,从理论上改进基于仿射变换的高分辨率卫星遥感影像严格几何处理模型,推导地物与影像间的正反算公式。本文针对航天时间延迟积分(TDI)CCD 相机机动成像时,由于姿态机动性,像面不垂直于地面目标曲面导致的像移速度失配、成像几何变形提出一种基于光线追迹像移匹配的快速几何校正数学建模方法,逐点对像面处的像移失配量进行补偿,实现几何校正的目的。

## 2 航天 TDI CCD 相机机动成像几何畸变分析

### 2.1 机动成像模式

目前在轨运行卫星采用的成像模式主要有星下点成像、侧摆成像、立体成像。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些微变化;立体成像针对同一目标进行重复成像合成立体影像。机动成像模式如图 1 所示,它是当下提出的一种新型侦察模式,根据曲线地面目标进行任务规划,在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,有效地提高侦察效率。

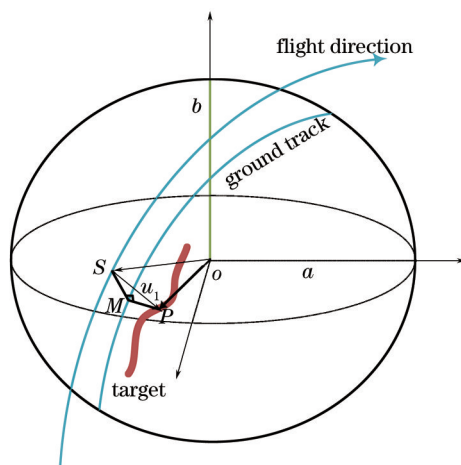


图 1 航天 TDI CCD 相机机动成像

Fig.1 Space TDI CCD camera dynamic imaging

### 2.2 航天 TDI CCD 相机机动成像几何畸变分析

几何畸变是指像面最终影像上各地物的方位、几何位置、形状及尺寸与地理参照系统的表述标准不一致。在轨卫星导致几何畸变的因素主要包括地球曲率、轨道姿态稳定度及卫星机动成像方式。

对考虑地球曲率和将地球视为平坦地球两种情况下的交轨方向地面像面分辨率(GSD)计算仿真,如图2所示,扁平地球在4%范围内的近似效果较好,对应于0.4 rad(23°)。重点对航天TDI CCD相机机动成像时因其姿态角不断变化导致地面像元分辨率变化而引起的几何畸变进行研究,根据机动成像在垂直轨道上的几何成像特征进行分析,成像几何关系如图3所示。

地球形状为不规则球体,特别是在航天光学遥感器机动成像时,姿态机动成像使得扫描角度越大,地球曲率对其地面像元分辨率的影响越大。因此分析了考虑地球曲率时的成像几何关系,推导出了扫描角为 $\theta$ 时,像面上各点对应的地面像元分辨率。

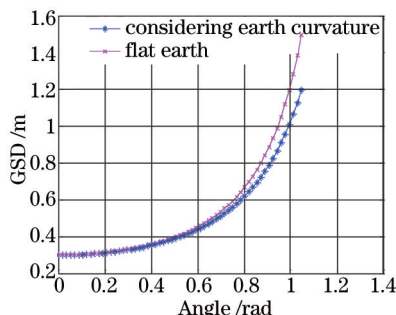


图2 将地球视为平坦地球及考虑地球曲率时,随着扫描角的不同GSD的变化趋势

Fig.2 GSD Varies with scanning angle at the condition of flat earth and considering earth curvature

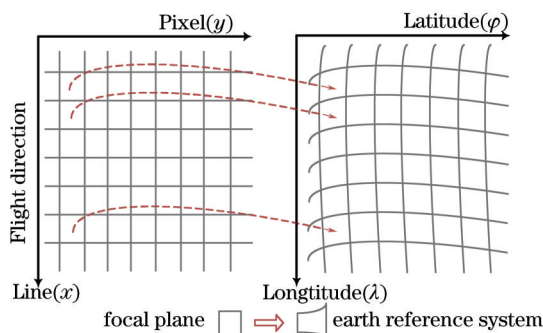


图3 成像几何关系

Fig.3 Imaging geometry relationship

首先推导光轴处探测器采样间隔对应的GSD<sup>[6]</sup>,如图4所示,在 $\Delta ABC$ 中求得 $BC$ 之间距离 $l_{BC}$ :

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

式中 $\beta$ 为瞬时视场角:

$$\beta = 2 \arctan\left(\frac{d}{2f}\right) \approx \frac{d}{f}. \quad (2)$$

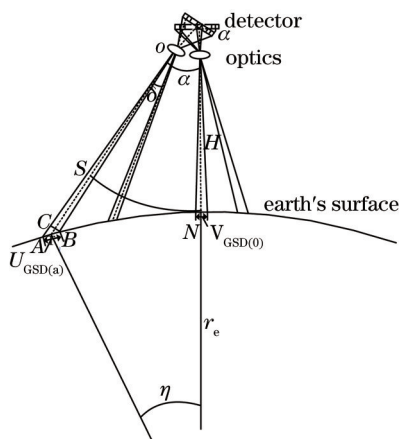


图4 交轨方向上的几何特征

Fig.4 Geometric characteristic at cross-track direction

从而得到了光轴处像元对应的 GSD 值：

$$V_{\text{GSD}_f}(\alpha) = \frac{l_{\text{BC}}}{\cos(90 - \alpha - \eta)} = \frac{H + r_e(1 - \cos \eta)}{\cos \alpha \cos(\alpha + \eta)} \times \frac{d}{f}, \quad (3)$$

式中  $\eta$  为对应于扫描角  $\alpha$  处的地表点的地心角度, 且有

$$\eta = a \sin\{[(r_e + H)/r_e]\sin \alpha - \alpha\}. \quad (4)$$

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

$$V_{\text{GSD}_f}(t) = \frac{d}{f} \times \frac{H + r_e\{1 - \cos\{\arcsin\{[(r_e + H)/r_e]\sin(\omega t) - \omega t\}\}}{\cos(\omega t)\cos\{\omega t + \arcsin\{[(r_e + H)/r_e]\sin(\omega t) - \omega t\}\}}. \quad (5)$$

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：

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

远地点处的地面像元分辨率为：

$$V_{\text{GSD-f}}(\alpha) = \frac{H + r_e(1 - \cos \eta)}{\cos(\alpha + \delta)\cos(\alpha + \delta + \eta)} \times \frac{d}{f}. \quad (7)$$

$\delta$  为偏离视场中心的像元和光轴的夹角,  $n$  为偏离视场中心的像元距离中心像元的像元数：

$$\delta = \arctan\left(\frac{n \times d}{2f}\right). \quad (8)$$

### 3 基于光线追迹逐点匹配的快速几何校正算法

航天 TDI CCD 相机机动成像几何校正的关键问题在于确定卫星像面坐标和地面参考坐标之间的映射关系。提出了直接定位算法计算投影到地面的地理坐标, 对像面上每一像元逐点进行几何匹配。

#### 3.1 卫星本体坐标系下的视线矢量求解

采用 WGS84 大地坐标系, 其地心空间直角坐标系的  $Z$  轴指向[国际时间服务机构(BIH)]1984.0 定义的协议地球极(CTP)方向,  $X$  轴指向 BIH 1984.0 的零子午面和 CTP 赤道的交点,  $Y$  轴与  $Z$  轴、 $X$  轴垂直构成右手坐标系, 称为 1984 年世界大地坐标系统。

卫星本体坐标如下：

$$\begin{cases} Y_1 // V \\ Z_1 // P \\ X_1 // Y_1 \wedge Z_1 \end{cases}, \quad (9)$$

式中  $P$ 、 $V$  为卫星位置、速度矢量, 在笛卡尔坐标系统中给出。本体坐标系下的视线矢量等同于每个 CCD 探测像元对应的指向矢量, 卫星发射前会对相机内方位元素(光学系统畸变量、相机安装误差、校正参数等)进行标定, 这些参数在图像获取期间作为常值使用。辅助数据中视线矢量用旋转角  $\psi_x$ 、 $\psi_y$  表示, 如图 5 所示, 像面上各像元的视线矢量表示为：

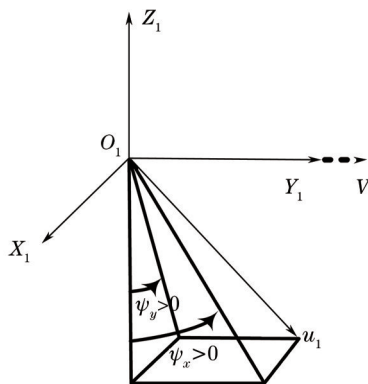


图 5 本体坐标系下视线矢量的定义

Fig.5 Definition of view vector in camera coordinate system

$$\mathbf{u}_1(c,r) = \begin{pmatrix} -\tan \psi_y(c) \\ \tan \psi_x(c) \\ -1 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

### 3.2 地球坐标系下的视线矢量求解

轨道坐标系  $(O_2, X_2, Y_2, Z_2)$  以卫星质心为中心,用卫星瞬时位置和速度表示:

$$\begin{cases} \mathbf{Z}_2(t) = \frac{\mathbf{P}(t)}{\|\mathbf{P}(t)\|_2} \\ \mathbf{X}_2(t) = \frac{\mathbf{V}(t) \wedge \mathbf{Z}_2(t)}{\|\mathbf{V}(t) \wedge \mathbf{Z}_2(t)\|_2} \\ \mathbf{Y}_2(t) = \mathbf{Z}_2(t) \wedge \mathbf{X}_2(t) \end{cases}. \quad (11)$$

$a_p$ 、 $a_r$ 、 $a_y$  为卫星的俯仰角、横滚角及偏航角,因此在轨道坐标系下的视线矢量  $\mathbf{u}_2(c,r)$  可表示如下:

$$\mathbf{u}_2(c,r) = R_p(r)R_r(r)R_y(r)\mathbf{u}_1(c), \quad (12)$$

$$R_p(r) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a_p(r) & \sin a_p(r) \\ 0 & -\sin a_p(r) & \cos a_p(r) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$R_r(r) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a_r(r) & \sin a_r(r) \\ 0 & -\sin a_r(r) & \cos a_r(r) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$R_y(r) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a_y(r) & \sin a_y(r) \\ 0 & -\sin a_y(r) & \cos a_y(r) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

最终推导出地球坐标系下的视线矢量  $\mathbf{u}_3(c,r)$  为:

$$\mathbf{u}_3(c,r) = \begin{bmatrix} X_{2x}(r) & Y_{2x}(r) & Z_{2x}(r) \\ X_{2y}(r) & Y_{2y}(r) & Z_{2y}(r) \\ X_{2z}(r) & Y_{2z}(r) & Z_{2z}(r) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u}_2(c,r). \quad (16)$$

### 3.3 求取对地定位点

通过计算视线矢量  $\mathbf{u}_3(c,r)$  和地球椭球面的交点求取原始图像上相应的地面点坐标,对于任一像元,通过下式计算地面点  $P$  点坐标。

$$\mathbf{l}_{op}(c,r) = \mathbf{l}_{om}(r) + \mu \cdot \mathbf{u}_3(c,r). \quad (17)$$

地球模型采用 WGS84 椭球坐标系,表示如下:

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} + \frac{z^2}{B^2} = 1, \text{ with } \begin{cases} A = a + h \\ B = b + h \end{cases}, \quad (18)$$

式中  $a$ 、 $b$  为椭球长、短半轴,  $h$  为  $P$  点地形高程。

$$\left( \frac{\mathbf{u}_{3x}^2 + \mathbf{u}_{3y}^2}{A^2} + \frac{\mathbf{u}_{3z}^2}{B^2} \right) \mu^2 + 2 \left( \frac{M_x \mathbf{u}_{3x} + M_y \mathbf{u}_{3y}}{A^2} + \frac{M_z \mathbf{u}_{3z}}{B^2} \right) \mu + \left( \frac{M_x^2 + M_y^2}{A^2} + \frac{M_z^2}{B^2} \right) = 1. \quad (19)$$

## 4 实验与验证

利用小卫星姿态控制系统物理仿真平台和 TDI CCD 原理样机成像系统对提出的基于光线追迹逐点匹配机动成像几何校正算法进行实验验证,如图 6 所示。单轴气浮转台模拟卫星姿态调整,姿态角确定精度与姿态稳定度优于  $0.05^\circ$ 、 $0.005^\circ/\text{s}$ ,成像仿真参数如表 1 所示。发光二极管(LED)屏幕采用地球等比缩放的原则进行设计。

系统模拟卫星机动成像,LED 成像显示系统地物以  $28.3^\circ/\text{s}$  的速度运动,靶标以  $45^\circ$  方向运动,转台角速度为  $0.67^\circ/\text{s}$ ,根据表 1 所示的成像仿真参数计算出转台物距为 6.85 m,对应的 TDI CCD 像移速度为  $0.175 \text{ mm/s}$ 。

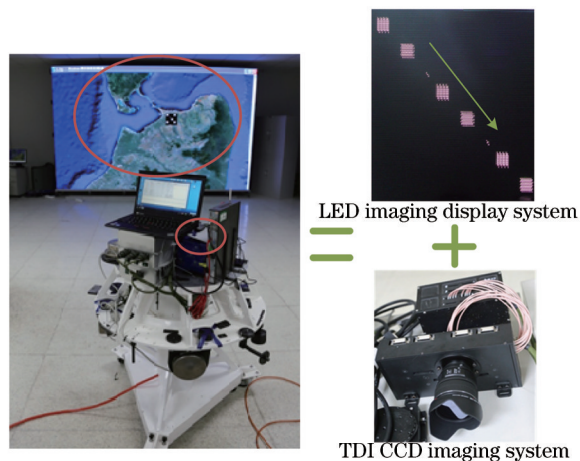


图 6 机动成像仿真验证系统

Fig.6 Mobile imaging simulation system

表 1 成像仿真参数

Table 1 Imaging simulation parameters

Parameters	Value
Focal length /mm	17.5
Pixel size / $\mu\text{m}$	8.75
LED pixel size /mm	4
Camera view of angle /( $^{\circ}$ )	10
Ground object velocity /(pixel/s)	28.3

图 7 中为对靶标进行成像实验得到的图像,实验结果表明,在单轴气浮转台系统最大扫描角达到  $45^{\circ}$  时,成像效果良好,验证了该算法的可行性。

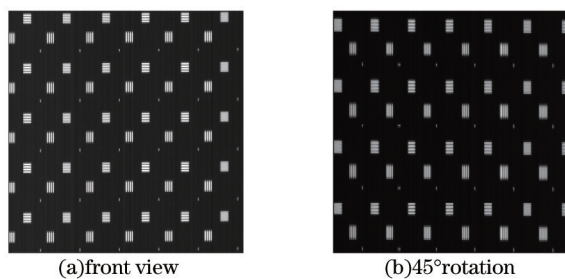


图 7 实验成像

Fig.7 Experimental imaging

## 5 结 论

根据航天 TDI CCD 相机机动成像原理,分析了卫星机动成像时几何畸变产生的原因,通过基于光线追迹逐点匹配算法计算出像面上各个像元对应的精确地面点坐标,将几何关系校正到地理参考系统标准,解决机动成像几何畸变问题,利用小卫星姿态控制系统和 TDI CCD 相机对本算法进行实验验证,成像效果良好,证明了算法设计的可行性。

## 参 考 文 献

- 1 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 Optical 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.
- 2 Tang Xinming, Zhang Guo, Zhu Xiaoyong, *et al.*. Triple linear-array imaging geometry model of ziyuan-3 surveying satellite and its validation[J]. Acta Geodaetica et Cartographic Sinica, 2012, 41(2): 191-198.

- 唐新明, 张 过, 祝小勇, 等. 资源三号测绘卫星三线阵成像几何模型构建与精度初步验证[J]. 测绘学报, 2012, 41(2): 191-198.
- 3 Ma Hongchao, Zhao Xiangdong. Geometric rectification of remotely sensed imagery based on rand field modeling of topography[J]. Acta Geodaetica et Cartographic Sinica, 2006, 35(3): 251-254.
- 马洪超, 赵向东. 基于地形随机场模型的遥感图像几何纠正[J]. 测绘学报, 2006, 35(3): 251-254.
- 4 Zhang Guo, Li Wanting, Jiang Wanshou, *et al.*. Study of three-dimensional geometric model and orientation algorithms for systemic geometric correction product of pushbroom optical satellite Image[J]. Acta Geodaetica et Cartographic Sinica, 2010, 39(1): 34-38.
- 张 过, 厉芳婷, 江万寿, 等. 推扫式光学卫星影像系统几何校正产品的3维几何模型及定向算法研究[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 34-38.
- 5 Yuan Xiuxiao, Cao Jinshan, Yao Na. A rigorous geometric model considering the variety of side watch angle for highresolution satellite imagery[J]. Acta Geodaetica et Cartographic Sinica, 2009, 38(2): 120-124.
- 袁修孝, 曹金山, 姚 娜. 顾及扫描侧视角变化的高分辨率卫星遥感影像严格几何模型[J]. 测绘学报, 2009, 38(2): 120-124.
- 6 Yang Fei, Jin Guang, Qu Hongsong, *et al.*. Design and analysis about rapid geometric correction of space whiskbroom time delayed and integration CCD camera[J]. Acta Optical Sinica, 2014, 34(1): 0111001.
- 杨 飞, 金 光, 曲宏松, 等. 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[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0111001.

栏目编辑: 韩 峰