

航天 TDI CCD 相机成像拼接快速配准 算法设计与分析

常琳^{1,2} 金光¹ 杨秀彬¹

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

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为解决卫星灵活机动多模式成像中多片 TDI CCD 拼接像元失配的问题, 提出了一种实现 TDI CCD 相机成像搭接与错位像元快速拼接配准的匹配算法。通过分析卫星侧摆成像过程焦平面上像移速度矢量变化导致的多片 TDI CCD 拼接成像像元失配现象, 设计了成像速度矢量光线追迹与齐次坐标变换方法, 计算了侧摆成像过程中影响图像失配的偏流角、像移速度矢量和两片 TDI CCD 拼接纵向错位方向和横向搭接方向的像元数目。利用小卫星姿态控制系统半物理仿真平台和 TDI CCD 原理样机系统对两片 TDI CCD 拼接像元匹配算法进行实验验证。结果表明: 视场角为 10° 的 TDI CCD 相机在卫星侧摆 30° 成像时, 经过 1 个拼接周期后, 两片 TDI CCD 拼接纵向错位和横向搭接像元数目由初始的 148.5 和 50 变为 137 和 49, 其中横向搭接像元数目与理论计算结果仅有 0.1 pixel 的偏差, 纵向错位像元数目与理论计算结果基本一致。经实验和理论对比分析, 所设计的纵向错位与横向搭接像元快速拼接配准算法能够解决 TDI CCD 图像拼接的准确性, 确保图像像元匹配进而获得高质量的图片。

关键词 多模式成像; TDI CCD 相机; 纵向错位; 横向搭接; 图像配准

中图分类号 V474.2 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0511001

Fast Registration Algorithm Design and Analysis of TDI CCD Camera Assembly Imaging

Chang Lin^{1,2} Jin Guang¹ Yang Xiubin¹

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

Abstract In order to solve the problem of multi pieces of TDI CCD stitching pixel mismatch in satellite flexible transformation multimodal imaging, a kind of pixel matching algorithm which can realize overlapping and displacement pixel fast assembly and registration of TDI CCD camera is proposed. Through the analysis of multi pieces of TDI CCD assembly imaging pixel mismatch phenomenon caused by the variation of image motion velocity vector in focal plane during the process of satellite side swing imaging, the imaging velocity vector ray tracing and the homogeneous coordinate transformation method is designed. Based on this method, the image motion velocity and drift angle which influence image mismatch during the process of satellite side swing imaging and the number of pixel in direction of longitudinal displacement and transverse overlapping of two pieces of TDI CCD assembly imaging are calculated. Three-axis air flotation turntable attitude simulation system and a TDI CCD camera are used in experiment to verify the pixel matching algorithm of two pieces of TDI CCD assembly imaging. TDI CCD camera of viewing angle of 10° , after an assembly period, the original number of longitudinal displacement and transverse overlapping pixels of two pieces of TDI CCD assembly imaging turns from 148.5 and 50 to 137 and 49, respectively, which is consistent

收稿日期: 2013-10-10; 收到修改稿日期: 2013-11-13

基金项目: 国家 863 计划项目(2012AA121502)、吉林省青年基金项目(201201010)

作者简介: 常琳(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事卫星成像设计以及姿态控制算法方面的研究。

E-mail: fanglinchang@aliyun.com

导师简介: 金光(1958—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间光学遥感器总体方面的研究。

E-mail: jing@ciomp.ac.cn

with theoretical result in longitudinal displacement direction and has a deviation of only 0.1 pixel in transverse overlapping direction. Compared with the theoretical and experimental result, the design of fast registration algorithm of calculation of longitudinal displacement and transverse overlapping pixel can solve the accuracy of TDI CCD assembly imaging, which guarantees image pixel matching and obtain high quality images.

Key words multimodal imaging; TDI CCD camera; longitudinal displacement; transverse overlapping; image registration

OCIS codes 110.2960; 110.3000; 110.3055

1 引 言

随着遥感卫星高分辨率和大视场成像需求的增多,适应高分辨率的 TDI CCD 相机被广泛应用。由于单片 TDI CCD 像元总长度的限制,不能够满足大视场成像的视场长度^[1-3],因此需要由多片 TDI CCD 在焦平面进行模块拼接构成大视场成像系统。TDI CCD 的拼接通常采用光学拼接、机械拼接和交错拼接等方法,其中光学拼接法虽然精度较高,但拼接棱镜会产生色差,需使用拼接的棱镜与透镜组合进行色差校正,一般多用于透射式光学系统;机械拼接法虽结构紧凑,但需要对 CCD 进行特殊加工,且由于每片 CCD 边缘不是有效像元,因此每个连结处会存在像元损失和漏缝现象,成像时漏缝处会出现空白,图像局部细节丢失^[4-5]。高分辨率成像系统多采用长焦距、反射式光学系统,为实现宽幅成像 TDI CCD 之间采用交错拼接方法,较之于机械拼接和光学拼接,交错拼接法没有使用棱镜,拼接简单易行,不会引入附加的色差^[6],同时避免了机械拼接中相邻 CCD 连接处条带拼接漏缝影响图像细节的问题。

交错拼接排布方式下 TDI CCD 之间首尾相切,相互错开,当卫星进行姿态灵活机动多种模式成像时(卫星前后摆或侧摆),各模式下 TDI CCD 像移速度不同,同时同一模式下也存在各片 TDI CCD 之间的速度失配,行转移时间不同,最终使多片 TDI CCD 成像产生的图像在幅宽方向和卫星飞行方向上错开一定的位置。如何选取适当的像元匹配算法实时解决 TDI CCD 成像拼接像元的准确性,找到配准位置确保图像像元匹配进而获得高质量的图片成为技术难点。

现有技术中的图像拼接配准方法,主要从已知图像特征点出发,进行图像匹配和图像融合,进而进行拼接处理,文献[7]采用确定第一图像和第二图像之间的拼缝,对第一图像和第二图像的前景像素进行拼接,以及对背景像素进行变形。文献[8]根据单幅视野图像,提取待拼接图中的特征信息,对待拼接图像进行二维小波变化,采用加权平均法来实现图像的融合,实现图像快速准确的拼接。文献[9]应用

实时获取或已存储的视频图像,检测活动图像中关键特征点,估计活动图和配准图之间的活动向量,实现已有宽景图和配准后图像之间的融合。以上技术方案只能对某种特定图像进行拼接处理,均是在轨获得图像并下传至地面后,根据图像特征进行后期图像匹配与融合实现拼接配准,应用范围较窄,不能够实时快速地解决灵活机动多模式成像过程中的像元拼接偏差问题。

针对这一问题,本文将对卫星姿态变化成像过程中多片 TDI CCD 图像拼接像元偏差产生的原因及数目进行分析确定。

2 多片 TDI CCD 拼接像元偏差

2.1 TDI CCD 成像原理

TDI CCD 结构上是面阵 CCD,功能上是线阵 CCD,包含 $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$, M 和 N 分别代表积分级数和垂直相机扫描方向上像元个数,如图 1 所示。当沿着 TDI CCD 级数方向推扫成像时,在第一个积分周期内,目标在某列第一个像元曝光积分,得到的光生电荷下移一个像元,在第二个积分周期内,目标恰好移动到该列第二个像元处曝光积分,得到

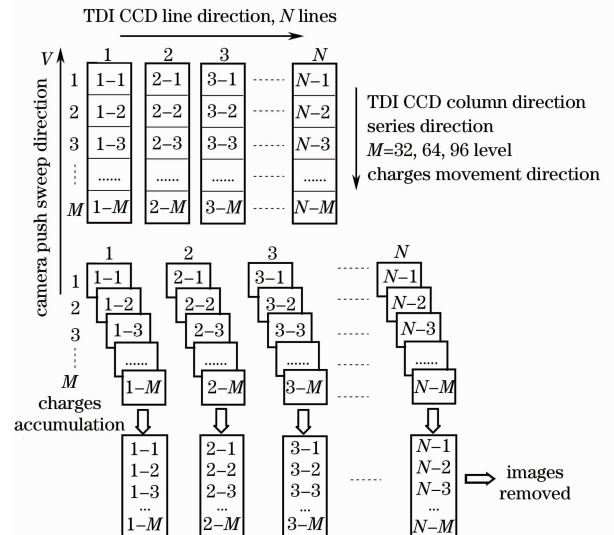


图 1 TDI CCD 成像原理图

Fig. 1 TDI CCD imaging principle diagram

的光生电荷与上一像元的电荷相加后转移到下一像元,直到第 M 个积分周期目标移到该列第 M 个像元曝光积分,产生的光生电荷与前 $(M-1)$ 个电荷相加后移入读出寄存器并读出获得图像^[10-11]。

M 级像元积分相当于同一列像元在 M 个行周期内对同一景物积分,增加了有效积分时间,与普通线阵 CCD 相比,TDI CCD 收集的信号增加了 M 倍。TDI CCD 的这种工作方式,要求同一列上的每一个像元都对同一目标曝光积分,即 TDI CCD 的行扫描速率与目标点景物的移动速率要严格同步,才

能保证成像质量。

2.2 多片 TDI CCD 交错拼接原理

多片 TDI CCD 交错拼接是指将 TDI CCD 分成两行交错平行的阵列,第一行 TDI CCD 形成的间隙由第二行 TDI CCD 填充,两行 TDI CCD 在纵向上相互平行且各自保持在同一直线上,在横向上相邻的 TDI CCD 首尾相切,相互错开,首尾的像元分别对齐,但在图像的运动方向上两列错开一定位置^[12],拼接 TDI CCD 焦平面如图 2 所示。

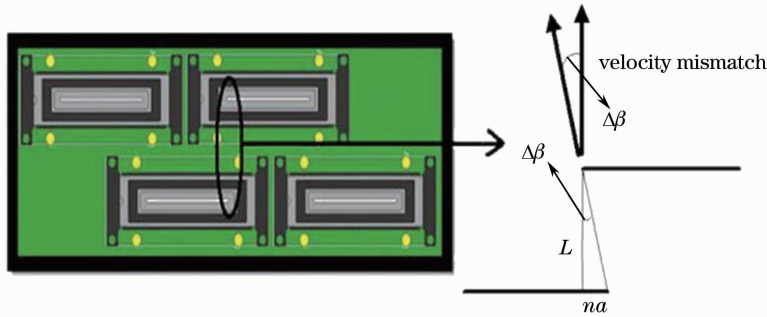


图 2 TDI CCD 焦平面

Fig. 2 TDI CCD focal plane

拼接横向上,由于卫星偏流机构在调整偏流角过程中存在偏流角偏差,卫星速度存在失配现象,导致生成的图像出现拼接漏缝,该拼接偏差主要是由偏流角极限误差 $\Delta\beta$ 引起的,因此要求相邻两片 TDI CCD 拼接重叠像元数目不少于 n_c 个^[13]:

$$n_c = \Delta\beta \times L/a, \quad (1)$$

式中 a 为 TDI CCD 像元尺寸, L 为两行 TDI CCD 纵向间距。

2.3 灵活机动导致的像元偏差

卫星姿态灵活变换多模式成像是指卫星在执行机构作用下,进行前摆、后摆或侧摆成像,不同的成像模式下,TDI CCD 像移速度不同,同时同一成像模式下拼接的各片 TDI CCD 之间的像移速度也不同,导致多片 TDI CCD 拼接后生成的图像在幅宽方向和卫星飞行方向上错开一定的位置。

以卫星侧摆成像为例,侧摆后地面成像目标区域为梯形,较之于卫星星下点推扫成像,其对应焦平面上像移速度矢量发生很大变化,二者焦平面像移速度关系如图 3、4 所示。

$A_1B_1C_1D_1$ 和 $A_2B_2C_2D_2$ 分别是卫星星下点成像和侧摆成像目标区域,目标景物与 TDI CCD 积分方向相反,由物像对应关系,焦平面上像移速度矢量方向与相机推扫方向保持一致。星下点成像时地面

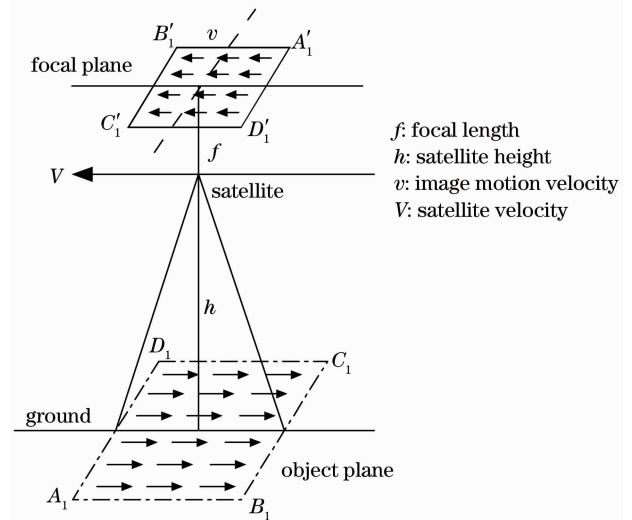


图 3 卫星推扫成像像移对应关系图

Fig. 3 Image motion of satellite push scan imaging

景物移动速度相同,焦平面上像移速度矢量相同,进行 TDI CCD 拼接时只有初始像元位置偏差,无像移的附加影响,而侧摆成像时地面景物移动速度大小不同,焦平面上像移速度矢量方向和大小产生图 4 所示变化,因此各片 TDI CCD 像移速度矢量不同,行转移时间不同,导致一定积分时间后,同一目标区成像拼接像元对应位置将发生纵向错位和横向重叠,其具体表现如图 5、6 所示,只作两片 TDI CCD

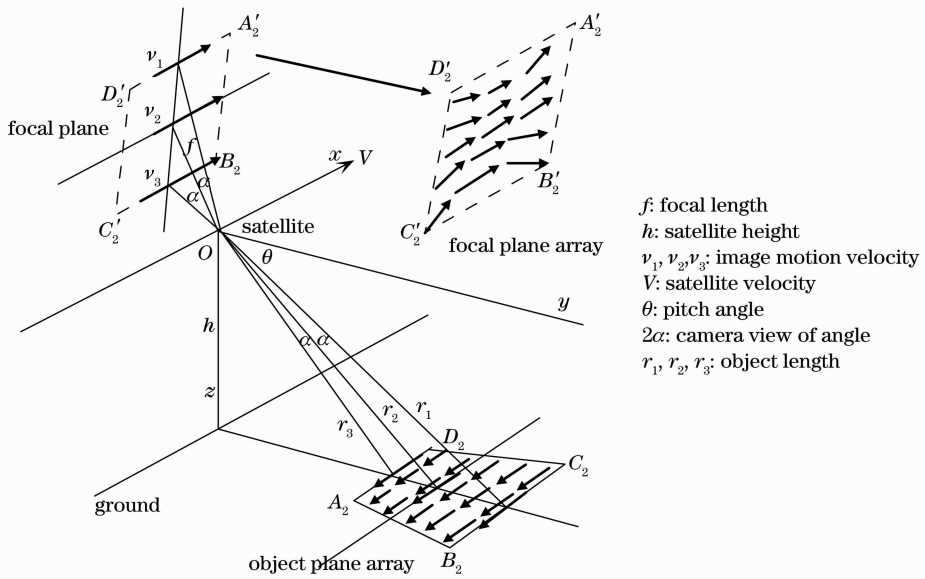


图 4 侧摆成像像移对应关系图

Fig. 4 Image motion of satelliteside swing imaging

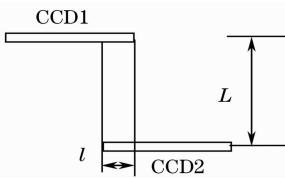


图 5 两片 TDI CCD 拼接位置关系图

Fig. 5 Two pieces of TDI CCD assembly location

拼接,多片 TDI CCD 拼接可依此类推,其中拼接的两行 TDI CCD 共线性、长度方向的搭接精度以及间

距方向的共面度和错位精度均在几个像元以内,系统误差可忽略。

图 5 中初始时刻两片 TDI CCD 首尾在横向方向上的搭接尺寸为 l ,纵向上相差的错位尺寸为 L ,则初始时刻横向上搭接像元和纵向上错位像元数目分别为

$$\begin{cases} M_0 = l/a \\ N_0 = L/a' \end{cases} \quad (2)$$

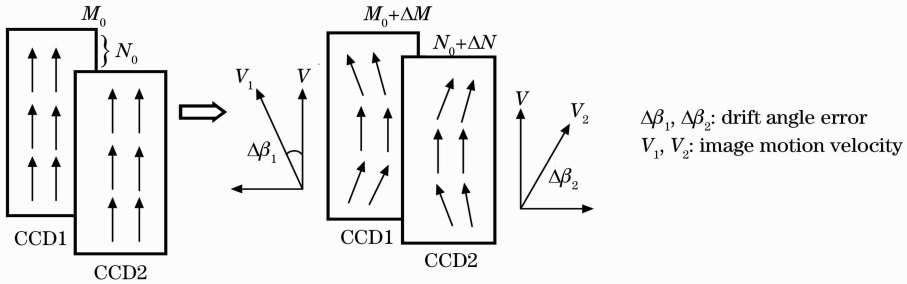


图 6 两片 CCD 拼接焦平面像移阵列

Fig. 6 Image motion array of two pieces of TDI CCD assembly in focal plane

图 6 中,卫星侧摆成像后,两片 TDI CCD 像移速度矢量和偏流角互不相同,对同一目标区成像时,每个积分周期内两片 TDI CCD 对应行电荷移动速度不同步,即两片 TDI CCD 对应行像元成像不对应,而是产生一定的变化,纵向错位像元数目由初始时刻的 N_0 变为 $N_0 + \Delta N$,横向搭接像元数目由初始时刻的 M_0 变为 $M_0 + \Delta M$,致使最终的图像发生严重错位和重叠,因此为获得实际的错位和搭接像元数目,需要准确计算两片 TDI CCD 上像移速度矢

量的大小和方向。

3 纵向错位与横向搭接像元快速拼接配准

3.1 多片 TDI CCD 像移速度匹配计算

卫星灵活变换多模式成像时,像移速度矢量的存在使 TDI CCD 拼接对应像元成像不对应,同一地面目标在焦平面上成像发生纵向错位和横向重叠,

图片质量受到严重影响,因此为获得高质量的图片,需要计算得到成像过程中像移速度矢量的大小和方向。卫星成像像移计算中,为将姿态旋转以及平移等因素综合考虑在内,多采用齐次坐标变换方法^[14-15]。本文以地面景物大地坐标系(经度、纬度、

地面高度)下位置为基准,获得卫星相机像面坐标系下像面位置方程和像移速度形式,进而完成两片 TDI CCD 像移速度匹配计算。

进行大地坐标系到天基坐标系的变换,具体经历过程如图 7 所示。

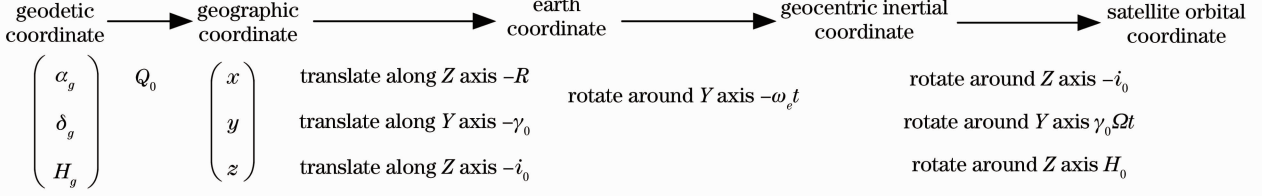


图 7 大地坐标系到天基坐标系变换过程

Fig. 7 Transformation process from Geodetic coordinate to the space-based coordinate

图中 Q_0 为大地坐标系与地理坐标系转换矩阵,有下式成立

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = Q_0 \begin{bmatrix} \alpha_g \\ \delta_g \\ H_g \end{bmatrix} = \begin{cases} (N_g + H_g) \cos \alpha_g \cos \delta_g \\ (N_g + H_g) \cos \alpha_g \sin \delta_g \\ [N_g (1 - e_g^2) + H_g] \sin \alpha_g \end{cases}, \quad (3)$$

$$N_g = \frac{a_g}{\sqrt{1 - e_g^2 \sin^2 \alpha_g}}. \quad (4)$$

由此大地坐标系到天基坐标系坐标转换矩阵为

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -H_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\gamma_0 + \Omega t) & 0 & \sin(\gamma_0 + \Omega t) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\gamma_0 + \Omega t) & 0 & \cos(\gamma_0 + \Omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos i_0 & \sin i_0 & 0 & 0 \\ -\sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} \cos \omega_e t & 0 & \sin \omega_e t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \omega_e t & 0 & \cos \omega_e t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos i_0 & -\sin i_0 & 0 & 0 \\ \sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma_0 & 0 & -\sin \gamma_0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma_0 & 0 & \cos \gamma_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{R} \mathbf{Q}_0. \quad (5)$$

从天基坐标系再次转换到像面坐标系,变换过程如图 8 所示。

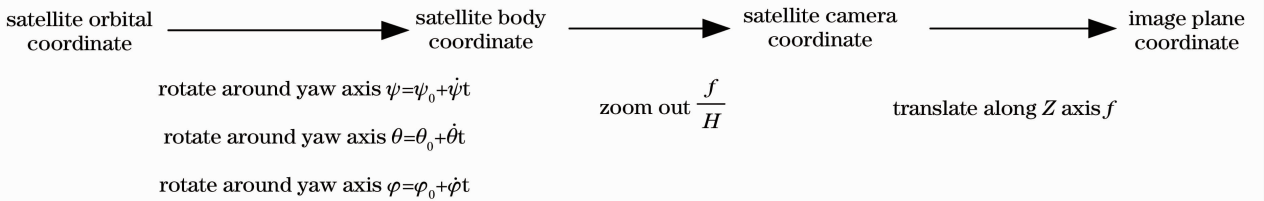


图 8 天基坐标系到像面坐标系变换过程

Fig. 8 Transformation process from space-based coordinate to image plane coordinate

其坐标转换矩阵为

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} -\frac{f}{H} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{f}{H} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{f}{H} & -f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

地面景物大地坐标系到像面坐标系的像面位置方程为

$$P = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{pmatrix} = M_2 M_1 \begin{pmatrix} \alpha_g \\ \delta_g \\ H_g \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

像面上各点的像移方程为

$$\begin{cases} V_{p1} = \frac{dP_1}{dt} \Big|_{t=0} \\ V_{p2} = \frac{dP_2}{dt} \Big|_{t=0} \end{cases}. \quad (8)$$

像移速度大小和偏流角分别为

$$\begin{cases} V_p = \sqrt{V_{p1}^2 + V_{p2}^2} \\ \beta = \arctan \frac{V_{p2}}{V_{p1}} \end{cases}, \quad (9)$$

式中 δ_g 、 α_g 、 H_g 为地面景物处大地经度、大地纬度和大地高, a_g 、 e_g 为地球椭球半长轴和偏心率, H 为地面景物处卫星轨道高度, R 为地球半径, H_0 为地心距, $H_0 = H + R$, ω_e 为地球自转角速度, i_0 为轨道倾角(轨道平面和地球赤道平面间的夹角), f 为相机光学系统焦距, γ_0 为摄影时刻轨道平面内降交点到卫星(卫星轨道平面在下行段与赤道的交点)之间所对应的中心角; Ω 为摄像时刻相对地心的卫星轨道运动角速率。

根据计算得到的像移速度大小和偏流角, 可以确定两片 TDI CCD 行转移时间, 进而对两片 TDI CCD 拼接纵向错位像元数目和横向搭接像元数目进行确定。

3.2 纵向错位像元数目的确定

由于像移速度矢量的不同, 两片 TDI CCD 行转移时间不同, 拼接成像时, 纵向错位像元数目由初始时刻的 N_0 变为 $N_0 + \Delta N$, 需对真实的纵向错位像元数目进行确定, 这一过程要结合 TDI CCD 的具体结构进行分析。假设图像拼接以 TDI CCD-1 的图像为基准, TDI CCD-2 向 TDI CCD-1 靠拢, 拼接示意如图 7 所示, 图中每一个方格表示一片 TDI CCD 的一行数据, 每一行数据都有一个独立的流水号, 此处仅列出 632 行数据作为例子。

令 N_{12}^T 表示 TDI CCD-1 和 TDI CCD-2 之间的错位像元数, N_{12}^T 的初始值 N_{12}^0 为 N_0 。由于图像拼接时有方向问题, 定义正方向为流水号小的行的方向, 负方向为流水号大的行的方向, 当 N_{12}^T 为正值时, 图像拼接时按正方向平移, 为负时按照负方向平移, 图 9 中所示 $N_{12}^T = 629$ 。两片 TDI CCD 拼接周

期前后纵向错位像元数目关系如图 10 所示。

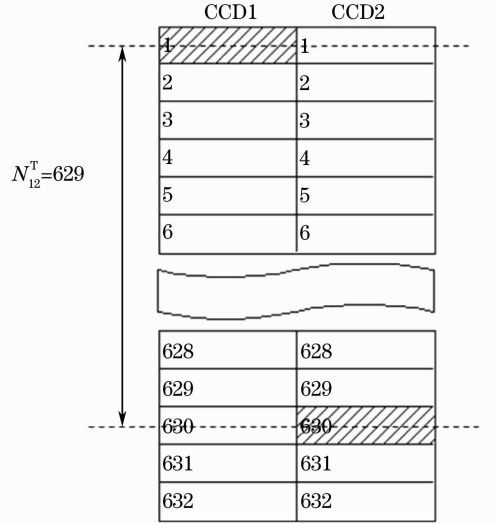


图 9 两片 TDI CCD 纵向拼接结构图
Fig. 9 Two pieces of TDI CCD longitudinal assembly structure

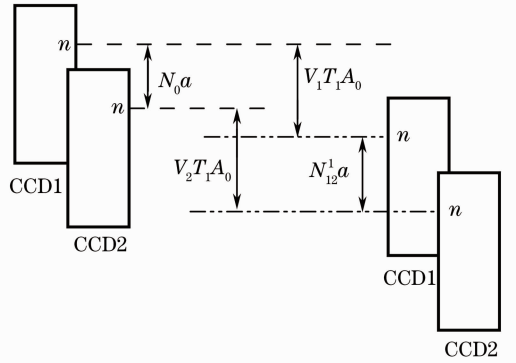


图 10 两片 TDI CCD 纵向错位像元示意图
Fig. 10 Two pieces of TDI CCD longitudinal displacement pixel

以 TDI CCD-1 为基准位置, 假设初始时刻两片 TDI CCD 对应行 n 间距为 $N_0 a$, N_0 为初始错位像元数目, 对地面景物成像时, TDI CCD-1 像移速度为 V_1 , 行转移时间为 T_1 , TDI CCD-2 像移速度为 V_2 , 行转移时间为 T_2 , 有 $a = V_1 T_1 = V_2 T_2$, 取两片 TDI CCD 每次积分相同时间后进行拼接, 周期为 $A_0 T_1$, 则一个拼接周期后, TDI CCD-1 第 n 行移动距离为 $V_1 T_1 A_0$, TDI CCD-2 第 n 行移动距离为 $V_2 T_1 A_0$, 两片 TDI CCD 第 n 行错位距离为 $N_{12}^1 a$, 由图 10 可知:

$$N_0 a + V_2 T_1 A_0 = N_{12}^1 a + V_1 T_1 A_0. \quad (10)$$

由此得到:

$$N_{12}^1 = N_0 + \frac{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}{\frac{1}{T_1}} A_0, \quad (11)$$

式中 A_0 为拼接周期 ($A_0 T_1$) 内 TDI CCD-1 移动的图像行数,其值依据对图像的需求进行选取。依次类推, T 个拼接周期后, TDI CCD-1 与 TDI CCD-2 之间的纵向错位像元数为

$$N_{12}^T = N_{12}^{T-1} + \frac{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}{\frac{1}{T_1}} A_0. \quad (12)$$

3.3 横向搭接像元数目的确定

卫星调整偏流角过程中,偏流角极限误差的存在要求 TDI CCD 拼接横向之间存在搭接像元。卫星侧摆成像时,TDI CCD 横向搭接像元数目的确定需要依据不同时刻偏流角的大小进行计算,横向搭接像元数目计算关系如图 11 所示。

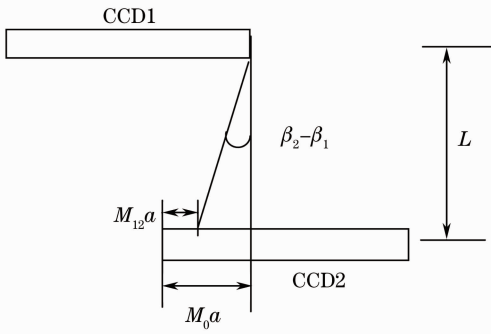


图 11 两片 TDI CCD 横向搭接像元示意图
Fig. 11 Two pieces of TDI CCD transverse overlapping pixel

初始时刻整机偏流角为 β_0 , 横向像元搭接数目为 M_0 , 经一定积分时间后, TDI CCD-1 和 TDI

CCD-2 偏流角变为 β_1 、 β_2 , TDI CCD-2 相对 TDI CCD-1 的偏流角变化为 $\beta_2 - \beta_1$, 此时满足关系式:

$$M_0 a = M_{12} a + L \tan(\beta_2 - \beta_1). \quad (13)$$

由此得到 TDI CCD-1 与 TDI CCD-2 之间横向搭接像元数目为

$$M_{12} = M_0 - L \tan(\beta_2 - \beta_1) / a. \quad (14)$$

至此,根据以上过程得到了卫星侧摆成像像移速度矢量以及两片 TDI CCD 拼接纵向错位和横向搭接像元数目的确定方法。两片 TDI CCD 在轨实时拼接过程中,只需要对拼接 TDI CCD 首行进行像元配准对应,其余各行将全部自动对应得到,为进一步保证成像质量,经一定积分时间后,重新对拼接 TDI CCD 进行像元配准,这样的处理方法既减少了数据处理量,又实现了拼接配准和调整。

4 实验验证

利用小卫星姿态控制系统全物理仿真平台和 TDI CCD 原理样机系统对两片 TDI CCD 图像拼接像元匹配算法进行实验验证,如图 12 所示。单轴气浮转台系统模拟卫星姿态调整,其姿态角确定精度与姿态稳定度优于 0.05° 、 $0.005^\circ/\text{s}$; TDI CCD 原理样机系统选用两片 TDI CCD 进行拼接,每片 TDI CCD 包含 512 列像元,像元尺寸为 $8.75 \mu\text{m}$,焦距为 17.5 mm ,初始时刻两片 TDI CCD 横向搭接和纵向错位尺寸分别为 0.4375 mm 和 1.3 mm ,相机视场角为 10° ; LED 成像系统动态靶标模拟地物移动,像元尺寸为 4 mm 。

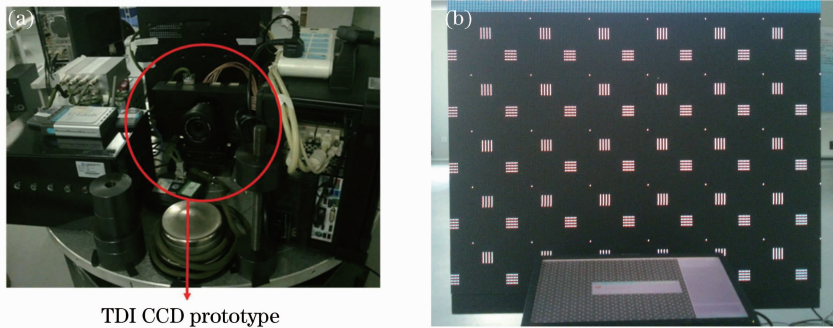


图 12 实验设备组成图。(a)小型三轴气浮转台;(b)LED 成像显示系统和靶标系统

Fig. 12 Experimental equipments. (a) Three-axis small attitude control system simulation platform; (b) LED imaging system and object system

系统模拟卫星侧摆 30° 成像,根据地面分辨率 (LED 像元尺寸) 及相机参数关系等确定仿真参数条件如表 1 所示。单轴气浮转台系统(含相机)侧摆 30° 后,两片 TDI CCD 对应地物物距分别为 9.24 m 和 10.44 m ,物像对应位置关系如图 13 所示。

LED 系统地物以 20 pixel/s 的速度运动,卫星侧摆成像像移速度值和偏流角满足:

$$V_0 = V_1 = V_2 = 20/\text{s} \times 4 \text{ mm} = 80 \text{ mm/s},$$

$$\frac{v_0}{f} = \frac{V_0}{r_0}, \quad \frac{v_1}{f} = \frac{V_1}{r_1}, \quad \frac{v_2}{f} = \frac{V_2}{r_2},$$

$$T_1 = \frac{a}{v_1}, \quad T_2 = \frac{a}{v_2}, \quad \beta_1 = \arctan \frac{\Delta v_1}{v_0},$$

$$\beta_2 = \arctan \frac{\Delta v_2}{v_0}. \quad (17)$$

表 1 成像仿真参数

Table 1 Imaging simulation parameters

Parameters	Value
TDI CCD camera focal length /mm	17.5
TDI CCD pixel size / μm	8.75
LED pixel size /mm	4
Swing object length /m	8
Camera view of angle /($^\circ$)	10
Satellite side swing angle /($^\circ$)	30
TDI CCD-1 object length /m	9.24
TDI CCD-2 object length /m	10.44
Ground object velocity /(pixel/s)	20
M_0	50
N_0	148.5
Lines in assembly period /A	100

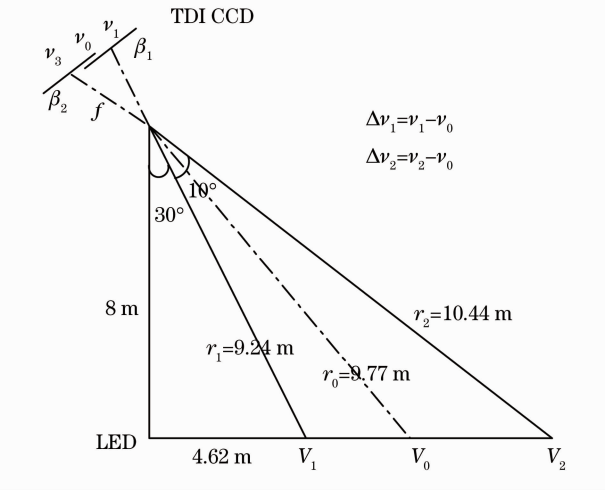


图 13 物像相对位置图

Fig. 13 Relative location between object and image

由此可以得到两片 TDI CCD 的像移速度值、行转移时间以及偏流角的相对变化量,进而通过(13)、(16)式可计算得到纵向错位和横向搭接像元数目,如表 2 所示。

表 2 成像理论结果

Table 2 Imaging theory results

Parameters	Value
TDI CCD-1 image motion velocity /(mm/s)	0.1515
TDI CCD-2 image motion velocity /(mm/s)	0.1341
TDI CCD-1 line transfer time /s	0.0578
TDI CCD-2 line transfer time /s	0.0652
$ \beta_2 - \beta_1 /(^{\circ})$	0.398
Longitudinal displacement changeable pixels	11.5
Transverse overlapping changeable pixels	1.1
N_{12}^l	137
M_{12}	48.9

两片 TDI CCD 拼接对图 10 所示靶标进行成像实验,得到图像。

图 14 中有三种靶标形态:单像素点、横条纹、纵条纹,其相对位置关系如图 15 所示。根据实验结果

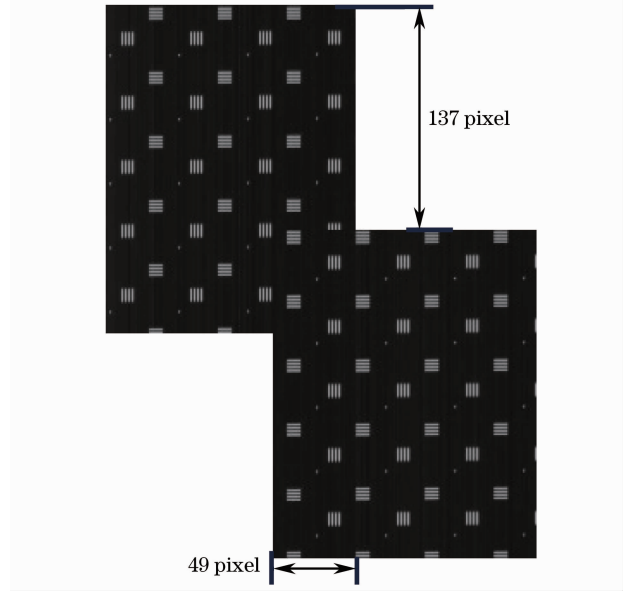


图 14 两片 TDI CCD 拼接实验成像

Fig. 14 Two pieces of TDI CCD assembly experimental image

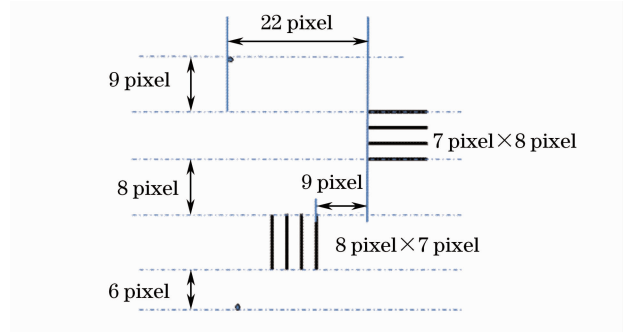


图 15 靶标位置关系

Fig. 15 Target position

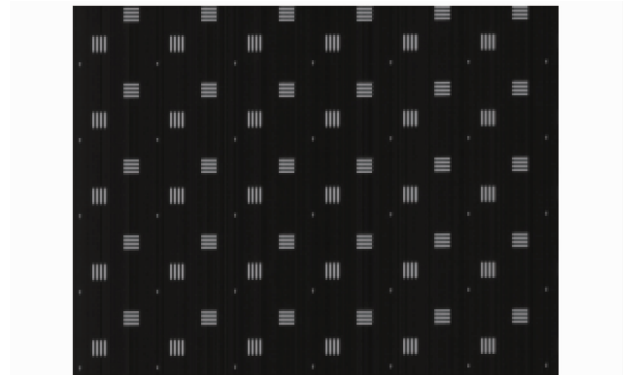


图 16 匹配拼接复原图像

Fig. 16 Matching assembly restored image



图 17 大连市景象拼接成像图

Fig. 17 Dalian city matching assembly image

图及靶标位置关系可知,1个拼接周期后,两片 TDI CCD 拼接纵向错位像元数目为 137,横向搭接像元数目为 49,实验结果与理论公式计算存在 0.1 pixel 偏差,此偏差对成像质量影响极小,可忽略不计,匹配后成像效果如图 16 所示,基本可以做到无偏差复原,且成像分辨率为单个像元,效果较好。进一步以大连市某场景进行成像实验,效果如图 17 所示,图像除存在 TDI CCD 自身噪声等因素导致的亮度、对比度差异外,整体恢复效果较好,能清楚地显示出各地区的轮廓。

5 结 论

根据多片 TDI CCD 拼接成像的原理,分析了卫星侧摆成像过程中多片 TDI CCD 图像拼接像元偏差产生的原因,通过构建 TDI CCD 焦平面纵向错位和横向搭接像元方式,采取图像在轨快速拼接像元匹配算法解决了多片 TDI CCD 拼接像元数的实时性和准确性的计算问题,最后利用姿态仿真单轴气浮转台系统和某 TDI CCD 相机成像系统对两片 TDI CCD 图像拼接像元匹配算法进行实验验证,实验结果证明了算法设计的准确性及可行性。

参 考 文 献

- Zhang Xingxiang, Ren Jianyue. Mechanical interleaving assembly of TDICCD focal plane [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(5): 740-745.
张星祥,任建岳. TDI CCD 焦平面的机械交错拼接[J]. *光学学报*, 2006, 26(5): 740-745.
- Xu Zhengping, Kuang Haipeng, Xu Yongsen. Multi-model control of dynamic scanning assembly imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1282-1290.
徐正平,匡海鹏,许永森. 动态扫描拼接成像系统的多模控制

- [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1282-1290.
- Guo Jiang, Gong Dapeng, Zhu Lei, *et al.*. Calculation of overlapping pixels in interleaving assembly of CCD focal plane of mapping camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1251-1257.
郭疆,龚大鹏,朱磊,等. 测绘相机焦平面交错拼接中重叠像元数计算[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1251-1257.
- Yang Hua, Guo Yue, Fu Ruimin. Study on field butting of TDI CCD [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(2): 226-228.
杨桦,郭悦,伏瑞敏. TDI CCD 的视场拼接[J]. *光学技术*, 2003, 29(2): 226-228.
- Lü Hengyi, Liu Yang, Guo Yongfei. Computation of overlapping pixels of mechanical assembly CCD focal planes in remote sensing camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(5): 1041-1047.
吕恒毅,刘杨,郭永飞. 遥感相机焦面 CCD 机械拼接中重叠像元数的确定[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5): 1041-1047.
- Yang Lihong, Zhang Xingxiang, Sun Bin, *et al.*. Application of image registration in precision detection of TDICCD butting focal plane [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1934-1940.
杨利红,张星祥,孙斌,等. 图像配准在 TDI CCD 拼接焦面精度检测中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1934-1940.
- Zeng Wei, Zhang Hongming. Image stitching method and equipment; China, 200910149346.7 [P]. 2009-05-22.
曾伟,张洪明. 图像拼接方法与设备; 中国,200910149346.7 [P]. 2009-05-22.
- Cheng Lianglun, Zong Liusheng, Lai Yufeng, *et al.*. A kind of quick image stitching method; China CN201010154362.8 [P]. 2010-09-22.
程良伦,衷柳生,赖宇峰,等. 一种快速图像拼接方法; 中国, CN201010154362.8 [P]. 2010-09-22.
- Xu Mantao, Zhang Yu, Lu Huihai, *et al.*. A kind of image stitching method; China, 201010250868.9 [P]. 2010-08-11.
徐漫涛,张羽,陆汇海,等. 一种图像拼接方法; 中国, 201010250868.9 [P]. 2010-08-11.
- Liu Chunxiang, Guo Yongfei, Li Ning, *et al.*. Composition and compression of satellite multi-channel remote sensing images [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 445-453.
刘春香,郭永飞,李宁,等. 星上多通道遥感图像的实时合成压缩[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2): 445-453.
- Liu Ming, Wu Hongsheng, Kuang Haipeng, *et al.*. Image motion compensation in aerospace camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(4): 30-34.
刘明,吴宏胜,匡海鹏,等. 航相机的像移补偿方法及应用[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(4): 30-34.
- Shi Lei, Jin Guang, An Yuan, *et al.*. Research on a mechanical interleaving stitching method of CCDs for remote sensing camera [J]. *Infrared*, 2009, 30(1): 12-15.
史磊,金光,安源,等. 一种遥感相机的 CCD 交错拼接方法研究[J]. *红外*, 2009, 30(1): 12-15.
- Yang Xiubin. Research on Sun-Synchronous and Day Recursive Orbit High Resolution Camera Image Motion Compensation [D]. Changchun; Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. Chinese Academy of Sciences, China. 2011, 66-70.
杨秀彬. 太阳同步天回归轨道的高分相机像移补偿研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011. 66-70.
- Yang Xiubin, Jiang Li, Jin Guang. Design and analysis of CMOS camera based on TDI in digital domain to realize high-resolution staring imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0911004.
杨秀彬,姜丽,金光. 数字域时间延迟积分时间 CMOS 相机高分凝视成像设计分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0911004.
- 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:李志兰