

文章编号 1004-924X(2016)02-0422-08

空间相机焦平面 CCD 交错拼接重叠像元数计算

武奕楠*, 李国宁, 张 宇

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对大视场空间相机焦平面采用的多片 CCD 交错拼接, 提出了一种适用于多种姿态模式的重叠像元数解析计算方法, 以保证空间相机成像视场中不出现漏缝。分析了 CCD 交错拼接的成像特性和产生漏缝的原因; 基于空间坐标系变换和中心投影共线方程建立了重叠像元数计算模型, 对像点、相机摄像中心、地面景物点建立动态数学关系, 通过追踪像点在像面上的运动轨迹计算了拼接缝像元重叠情况。结合实际工程样例, 计算和分析了空间相机机动角度、星下点纬度、视场位置等因素对重叠像元数的影响, 并将各工况下计算的最多漏像元数作为最终拼接量。结果表明: 重叠像元数理论误差小于 1 pixel; 对比侧摆, 俯仰成像时所需拼接像元数更多; 该计算模型可扩展应用于其他类型空间相机在任何姿态模式下的重叠像元数计算。

关键词:空间相机; 电荷耦合器件(CCD); 交错拼接; 重叠像元; 共线方程

中图分类号: V447. 3; TN386. 5 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/OPE. 20162402. 0422

Calculation of overlapping pixels in interleaving assembly for CCD focal plane of space camera

WU Yi-nan*, LI Guo-ning, ZHANG Yu

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: wyn_buaa@163.com

Abstract: The focal plane of a wide-field space camera is comprised of several staggered Charge Coupled Device(CCD) detectors. To eliminate the gap in imaging field of the space camera, this paper proposes an analytic calculation method for overlapping pixels applied to multiple maneuvering angle modes. The imaging characteristics of CCD interleaving assembly and the reason that imaging gaps appear were analyzed. Then, the calculation model for overlapping pixels was established by combining space coordinate transformation with a collinearity equation. The dynamic mathematical relationship of the image point, camera center and the ground point was established. The overlapping pixels between adjacent CCDs were calculated by tracing the locus of image point on the image plane. With an engineering example, the influence of maneuvering angle, subastral latitude and the field location of the space camera on overlapping pixels was calculated and analyzed and the maximum number of gap pixels calculating among different working situations were considered as mechanical assembly num-

收稿日期: 2015-04-17; 修订日期: 2015-06-25.

基金项目: 吉林省科技发展计划资助项目(No. 20130522107JH)

bers. The result shows that the theoretical error of the number overlapping pixels is less than 1 pixel. Comparing with scrolling imaging, the pitching imaging needs more number of assembly pixels. The computing model can be applied to other space cameras of different types, and the overlapping pixels can be calculated at any attitude mode.

Key words: space camera; Changed Coupled Device(CCD); interleaving assembly; overlapping pixel; collinearity equation

1 引 言

空间遥感任务的不断发展使空间相机的技术指标要求不断提高。视场角是空间相机的一项重要指标,它决定了空间相机对地成像的地面覆盖宽度,而若要获得更大的视场就需要更长的成像焦面。由于单片线阵 CCD(Charge Coupled Device)的长度有限,目前采用较多的解决方案是将多片线阵 CCD 前后交错拼接以延长焦面、增大视场^[1-2]。然而,由于前后离轴角、卫星姿态机动、偏流角补偿残差以及地球曲率等因素的影响^[3-4],在前后两排 CCD 拼接缝处可能出现目标景物的未覆盖区,即相邻两条带图像之间出现漏缝,使图像有缺失。为了解决这一问题,在进行交错拼接时,各片 CCD 之间需采用像元重叠设计以实现目标景物区域的全覆盖,因此需要通过建模来计算拼接缝处所需补偿像元数。

传统的固定重叠像元数方法采取对焦平面各条拼接缝补偿相同数量的像元数,更多的是靠经验估计,缺乏理论模型推导,因此容易产生冗余或漏缝。文献[5-6]通过分析相机俯仰成像时重叠像元的分布情况,提出了左右视场对称拼接像元的方法。计算时将地球近似为球体,通过视线作图计算各条带的覆盖范围。然而该模型为静态理想化模型,没有考虑卫星轨道倾角、地球和空间相机的实际运动情况,故只能针对俯仰成像作近似计算。文献[7]将地球视为椭球模型,通过坐标变换计算了相机在多种姿态下的重叠像元数。该方法认为在任何姿态模式下,拼接像元数左右视场完全对称;相机平飞时所需拼接像元数比侧摆成像时多。该方法在相机成像过程中没有调整偏流角,没有考虑卫星轨道倾角,故无法更准确地反映相机的实时工作状态,计算结果误差较大。

由于重叠像元数的计算过程是一种模拟推导过程,所以需要尽可能地还原相机实时环境和状

态,而以上方法在考虑内外因素时过于理想化,有些只能适用于某种特定工作状态,这限制了它们在实际中的应用范围。针对上述问题,根据空间相机对地成像为中心投影的特点,本文提出了一种基于坐标变换结合中心投影共线方程的思想,首先通过坐标变换得到不同成像时刻的像点、摄像中心、地物点在同一空间坐标系下的表达式,再构建共线方程建立三者的数学关系。本文方法综合考虑了相机、卫星、地球三者的各种耦合情况,可准确地反映像点在像面上的运动情况,以 CCD 拼接位置作为约束条件,可以计算不同星下点纬度下,相机侧摆、俯仰机动成像时重叠像元数的分布情况,最后结合工程样例进行分析和说明。

2 CCD 交错拼接成像特性

以焦平面采用 15 片 TDICCD(Time Delay Integration Charge Coupled Device)交错拼接为例分析相机拼接处的成像特性,焦平面如图 1 所示,各片 CCD 按照编号依照“品”字形排列,相机光轴通过坐标轴原点 O,两排 CCD 之间的间隔的为 d 。

像面上具有奇数编号的 TDICCD(位于后排)边缘像元分别处于 $j_1 \sim j_{14}$ 号搭接缝上,设 $t=0$ 时刻第 j 号搭接缝上的奇数编号 TDICCD 的边缘像元为 A_j ,其对应的地球景物点所成的像点为 q_j ,如图 2 所示,由于景物点与卫星之间的相对运动使得像点 q_j 从 A_j 点开始在像面上运动。根据卫星的姿态参数、相机工作状态的不同^[8],拼接缝处前后两片 CCD 所成像可能出现漏缝或重叠现象,相应的 q_j 的运动轨迹如图 2 所示。

通过建立数学模型计算 q_j 点穿越前排 CCD 时的 y 坐标,并以此计算偏移像元数 $N = \frac{y - y_d(j)}{u}$,其中 $y_d(j)$ 为第 j 号搭接缝前排 CCD 边缘像元 y 坐标值,如图 2 中所示, u 为像元尺寸。

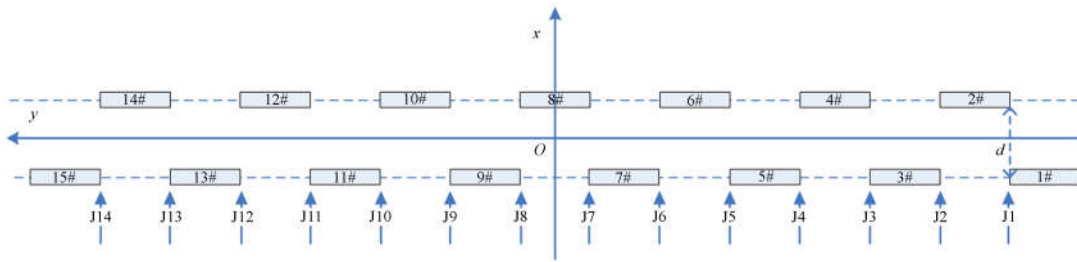
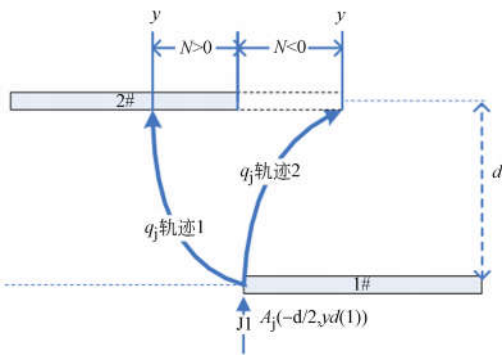


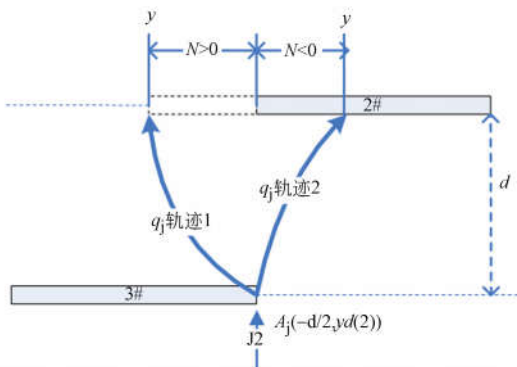
图 1 焦平面示意图

Fig. 1 Diagram of focal plane



(a) 拼接缝为奇数时 q_j 轨迹

(a) Tracing for q_j when number of assembled gap is odd



(b) 拼接缝为偶数时 q_j 的轨迹

(b) Tracing for q_j when number of assembled gap is even

图 2 CCD 交错拼接处的像点轨迹

Fig. 2 Locus of image point for interleaving assembly CCDs

计算结果判据如下:

(a) 当 j 为奇数时,如图 2(a)所示, $N < 0$ 说明像点 q_j 运动至前排时其轨迹点位于前排相邻 CCD 边缘点的右侧,如轨迹 2 所示,此时需要将前排 CCD 右移 $|N|$ 个像元长度;若 $N > 0$ 说明像点 q_j 运动至前排时其轨迹点位于前排 CCD 边缘点左侧,如轨迹 1 所示,此时无需对 CCD 进行调整。

(b) 当 j 为偶数时,如图 2(b)所示, $N < 0$ 说明像点 q_j 运动至前排 CCD 边缘点右侧,如轨迹 2 所示,无需对 CCD 位置进行调整;若 $N > 0$ 说明像点 q_j 运动至前排 CCD 边缘点左侧,如轨迹 1 所示,需将前排 CCD 左移 $|N|$ 个像元长度。

3 重叠像元数的计算模型

3.1 基于共线方程的成像计算模型

图 3 为相机对地成像示意图,图中 X-Y-Z 为地心惯性坐标系, O 为地心。Orbit 为卫星运行轨道。设定 0 时刻, $S_0(X_{s0}, Y_{s0}, Z_{s0})$ 为卫星摄像中心的坐标位置, $P_0(X_{p0}, Y_{p0}, Z_{p0})$ 为像面上某一点, $G_0(X_{a0}, Y_{a0}, Z_{a0})$ 为 P_0 所对应的地面景物点; 经过 ΔT 后,到 t 时刻,卫星摄像中心随卫星运动,坐标变为 $S(X_s, Y_s, Z_s)$,地面景物点随地球自转,由 G_0 运动到 $G(X_a, Y_a, Z_a)$,当 ΔT 较小时(具体范围由卫星相机像面、焦距、轨道等决定),该景物点还可以被相机像面所捕获,所成的相应像点在惯性坐标系下记为 $P(X_p, Y_p, Z_p)$ 。

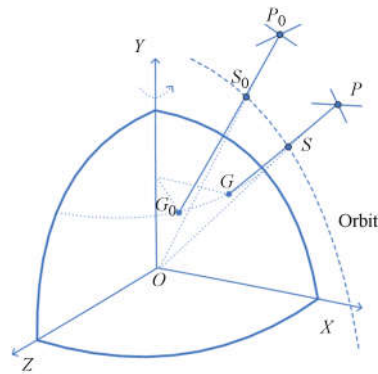


图 3 相机成像示意图

Fig. 3 Diagram of camera imaging

由于空间相机为中心投影成像,故可以将地心惯性坐标系作为像空间辅助坐标系,则像点、卫星摄像中心点和地面景物点在该坐标系下共线,3 个点之间 0 时刻的共线方程为:

$$\begin{bmatrix} X_{p0} - X_{s0} \\ Y_{p0} - Y_{s0} \\ Z_{p0} - Z_{s0} \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} X_{a0} - X_{s0} \\ Y_{a0} - Y_{s0} \\ Z_{a0} - Z_{s0} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中 λ 为比例因子。

t 时刻共线方程为:

$$\begin{bmatrix} X_p - X_s \\ Y_p - Y_s \\ Z_p - Z_s \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} X_a - X_s \\ Y_a - Y_s \\ Z_a - Z_s \end{bmatrix}. \quad (2)$$

通过坐标系变换并联立 0 时刻和 t 时刻的共线方程可以求解同名景物点所对应的 t 时刻像点坐标 $P(X_p, Y_p, Z_p)$, 将其转换到像面坐标系, 以计算重叠像元数, 具体计算流程如图 4 所示:

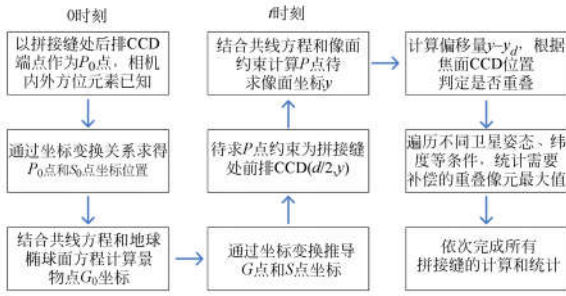


图 4 重叠像元数计算流程

Fig. 4 Flowchart of calculation for overlapping pixels

3.2 0 时刻地面景物点坐标

依照 3.1 节所述,需要得到 0 时刻拼接缝处后排 CCD 端点所对应的地面景物点在惯性坐标系下的坐标 $G_0(X_{a0}, Y_{a0}, Z_{a0})$ 。为建立共线方程,首先计算空间相机摄像中心在惯性坐标系下的坐标 X_{s0}, Y_{s0}, Z_{s0} , 通过卫星本体坐标系→卫星轨道

坐标系→地心惯性坐标系间的坐标变换完成,坐标系定义参考文献[9],推导表达式为:

$$\begin{bmatrix} X_{s0} \\ Y_{s0} \\ Z_{s0} \end{bmatrix} = \mathbf{Osat}_0 = (\mathbf{R}_{r0} \cdot \mathbf{R}_{i0})^T \cdot [0 \ 0 \ Length]^T. \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{R}_{i0} = \begin{bmatrix} \cos(i_0) & \sin(i_0) & 0 \\ -\sin(i_0) & \cos(i_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_{r0} = \begin{bmatrix} \cos(r_{out}) & 0 & -\sin(r_{out}) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(r_{out}) & 0 & \cos(r_{out}) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式(3)、(4)、(5)中相关卫星运行参数为: $Length$ 为卫星轨道地心距, i_0 为卫星轨道倾角。

t 时刻卫星轨道幅角为:

$$r_{out} = \pi - \arcsin(\sin(geolati) / \sin(i_0)) + \Omega t. \quad (6)$$

式中: Ω 为卫星轨道相对地心角运动速率, $geolati$ 为 0 时刻卫星星下点纬度,在星下点纬度给定的情况下,摄像机中心坐标经上述推导计算为确定值。

0 时刻像点在惯性坐标系下的坐标 X_{p0}, Y_{p0}, Z_{p0} 可通过像面坐标系→相机坐标系→卫星本体坐标系→卫星轨道坐标系→地心惯性坐标系的坐标变换完成,文中设相机坐标系和卫星本体坐标系重合。像点在惯性坐标系下的坐标为:

$$\begin{bmatrix} X_{p0} \\ Y_{p0} \\ Z_{p0} \end{bmatrix} = \mathbf{Opxl}_0 = (\mathbf{R}_{r0} \cdot \mathbf{R}_{i0})^T \cdot \mathbf{A}_0^T \cdot [x_0 \ y_0 \ f]^T + \mathbf{Osat}_0, \quad (7)$$

其中,0 时刻姿态旋转矩阵如式(8)所示:

$$\mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} \cos \phi_0 & \sin \phi_0 & 0 \\ -\sin \phi_0 & \cos \phi_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & 0 & -\sin \theta_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_0 & 0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_0 & \sin \varphi_0 \\ 0 & -\sin \varphi_0 & \cos \varphi_0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: $\varphi_0, \theta_0, \phi_0$ 分别为 0 时刻卫星的横滚角、俯仰角和偏航角,它们均为已知量。其中:横滚角、俯仰角根据卫星机动情况设定,偏航角为该时刻相机像移模型计算值^[9-10],若偏航角理想化设置为 0,则无法真实反映相机的在轨工作状态,也会影

响计算结果^[11]。

设 0 时刻某后排 CCD 边缘点像元的像面坐标为 (x_0, y_0) , 其中 y_0 为 TDICCD 焦面横向坐标,如图 1 所示, $x_0 = -d/2$, d 为前后两排 CCD 的间隔, f 为相机焦距。在星下点纬度、姿态角和

像面坐标给定的情况下,在惯性坐标系下的像点坐标经上述计算为确定值。将共线方程组式(1)消元转化得:

$$\begin{aligned} X_{p0} - X_{s0} &= \frac{(X_{a0} - X_{s0})(Z_{p0} - Z_{s0})}{Z_{a0} - Z_{s0}} \\ Y_{p0} - Y_{s0} &= \frac{(Y_{a0} - Y_{s0})(Z_{p0} - Z_{s0})}{Z_{a0} - Z_{s0}} \end{aligned} \quad (9)$$

地球旋转椭球面方程为式(10),其中 a_e, b_e 分别是地球的长、短半轴的长度:

$$\frac{X_{a0}^2}{a_e^2} + \frac{Z_{a0}^2}{a_e^2} + \frac{Y_{a0}^2}{b_e^2} - 1 = 0. \quad (10)$$

上述 3 个方程中只有 X_{a0}, Y_{a0}, Z_{a0} 3 个待求量,联立可解。方程组有两组解,根据物理意义取 $|Y_{a0} - Y_{s0}|$ 绝对值小的一组作为有效解。

3.3 t 时刻像点轨迹计算方法

同名地物点所对应的像点在像面上随着卫星和地球的运动而移动,在 t 时刻到达前排 CCD,通过建立 t 时刻下的共线方程推导求解像点轨迹穿过前排 CCD 时的像面坐标 y 。同名地物点经过时间 t 后仅随地球自转发生运动,在惯性坐标系

下的坐标为:

$$\begin{bmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & 0 & \sin(\omega t) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\omega t) & 0 & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{a0} \\ Y_{a0} \\ Z_{a0} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

式中 ω 为地球自转角速率。

t 时刻摄像中心在惯性坐标系下的坐标 X_s, Y_s, Z_s 为:

$$\begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} = \mathbf{Osat} = (\mathbf{R}_t \cdot \mathbf{R}_0)^T \cdot [0 \ 0 \ Length]^T. \quad (12)$$

式中相关矩阵表达式及参数定义如 3.2 节所述。

t 时刻像点在惯性坐标系下的坐标 X_p, Y_p, Z_p 为:

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \mathbf{Opxl} = (\mathbf{R}_t \cdot \mathbf{R}_0)^T \cdot \mathbf{A}_t^T \cdot [x \ y \ f]^T + \mathbf{Osat}, \quad (13)$$

$$\mathbf{A}_t = \begin{bmatrix} \cos \phi_t & \sin \phi_t & 0 \\ -\sin \phi_t & \cos \phi_t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_t & 0 & \sin \theta_t \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_t & 0 & \cos \theta_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_t & \sin \varphi_t \\ 0 & -\sin \varphi_t & \cos \varphi_t \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$\varphi_t, \theta_t, \phi_t$ 分别为 t 时刻卫星横滚角、俯仰角、偏航角,具体值可根据工程经验和计算获得,由于像点从后排运动至前排的时间相对极短,故可以认为 θ, φ, ϕ 取值未发生变化^[12],仍为 $t=0$ 时的取值。

由于 t 时刻待求像点 p 要求在前排 CCD 上,所以式(13)中待求像点的像面坐标 (x, y) 中, $x = d/2$, d 为前后两排 CCD 的间隔; y 为待求像点的横坐标。将式(2)转换得方程组:

$$\begin{aligned} X_p - X_s &= \frac{(X_a - X_s)(Z_p - Z_s)}{Z_a - Z_s} \\ Y_p - Y_s &= \frac{(Y_a - Y_s)(Z_p - Z_s)}{Z_a - Z_s} \end{aligned} \quad (15)$$

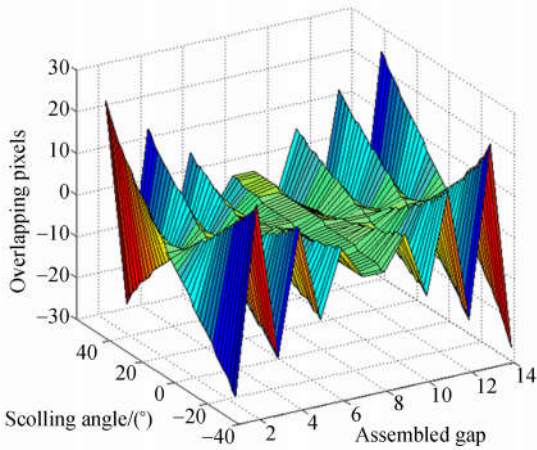
记 $\Delta T = t$,将式(11)、(12)、(13)中的待求坐标值全部展开, $X_a, Y_a, Z_a, X_s, Y_s, Z_s, Z_p$ 均为关于 ΔT 的函数, X_p, Y_p 为关于 ΔT 和 y 的函数。上述方程组(15)中仅有 ΔT 和 y 两个未知数,显然方程组可解。通过消元,可将方程组分解为两

组函数: $F(\Delta T) = 0; y = Y(\Delta T)$ 。 $F(\Delta T)$ 为非线性方程,公式若全部展开将很冗长,不再赘述,通过迭代求解 ΔT ,代入 $Y(\Delta T)$ 即可解得如图 2 所示的像面位置 y 。以第 j 条拼接缝为例,其相对于前排 CCD 端点位置 $y_d(j)$ 的偏移量 $\Delta y_j = y - y_d(j)$, CCD 像元尺寸为 u , 偏移像元整数部分为 $N_j = \left[\frac{\Delta y_j}{u} \right]$, $[\cdot]$ 表示为取整函数,小数部分为 $\delta = \frac{\Delta y_j}{u} - \left[\frac{\Delta y_j}{u} \right]$, $\delta \in (0, 1)$ 。由于 CCD 像元拼接量必须为整数,而计算结果往往不是整数,为避免出现漏缝,最终拼接像元数取 $N_j + 1$, 则理论误差为 $1 - \delta, (1 - \delta) \in (0, 1)$, 误差小于一个像元。

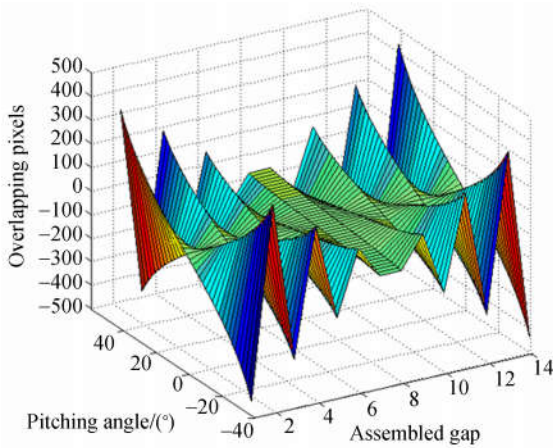
为提高区域覆盖能力,空间相机在轨工作时往往需要机动成像,通过该模型可以遍历计算空间相机在各工况下的重叠像元数,将每条拼接缝所需的最大拼接像元数作为最终拼接量,可以保证在任何工况下都不出现漏缝。

4 应用实例分析

以某卫星相机为对象进行实验分析, 其轨道高度为 1 200 km, 轨道倾角为 100.5°, 相机焦距为 2.06 m, 卫星下行。焦平面采用 15 片 TDIC-CD 交错拼接, 每片包含 4 096 个像元, 像元尺寸为 8.5 μm, 前后两排 CCD 间隔 $d=27.6$ mm。卫星最大机动角度为 40°。



(a) 侧摆在 ±40° 以内的结果
(a) Results of scrolling within ±40°



(b) 俯仰在 ±40° 以内的结果
(b) Results of pitching within ±40°

图 5 重叠像元数与姿态角关系

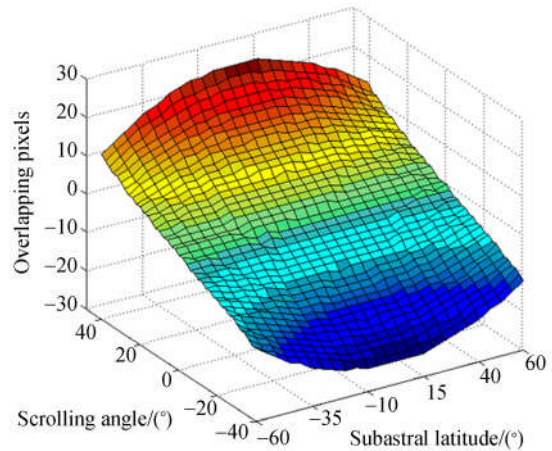
Fig. 5 Relationship between overlapping pixels and attitude angles

以卫星星下点纬度为 0° 时为例, 图 5(a) 为相机在 ±40° 内 侧摆成像时, 各条拼接缝处重叠像元数与侧摆角度的关系曲线, 重叠像元数 N 为正表

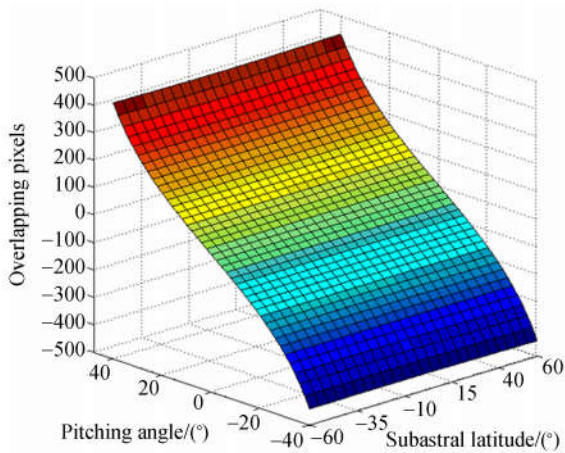
示拼接缝处重叠 N 个像元, 为负表示漏掉 N 个像元。相邻两条拼接缝, 若一侧为重叠, 则另一侧为漏缝, 重叠的像元数越多, 则漏掉的像元数越多。随着侧摆角的增大, 各条拼接缝处重叠像元数的绝对值变大, 即重叠像元数目和漏掉像元数目都会更多; 拼接缝离视场中心越远, 视线长度和偏流角差异越大, 重叠像元数绝对值越大。由于轨道倾角并非 90°, 所以左右两端重叠像元数并非完全对称, 例如侧摆 -40°, 第 1 条拼接缝为漏像元 24 个, 第 14 条拼接缝为漏像元 27 个。同一条拼接缝, 左侧摆为重叠, 右侧摆为漏缝, 反之亦然。

图 5(b) 为相机俯仰角在 ±40° 以内的成像结果, 其变化趋势和侧摆成像相似, 但由于俯仰成像时受地球曲率影响较大, 所以重叠像元数的绝对值会很大, 例如第 1 号拼接缝处侧摆 -40° 时会漏掉 440 个像元, 而中心视场附近的第 7 条拼接缝则漏掉 34 个像元。当前工况下, 为满足俯仰成像要求, 相机焦面需要拼接补偿的像元总数达到 3 270 个。而有效像元数的大幅减少会影响相机的视场设计指标。

由于地球为椭球体, 且不同纬度的地球自转线速度不同, 所以重叠像元数会受成像时星下点纬度的影响。图 6(a) 为相机侧摆角度在 ±40° 以内, 纬度为 ±60° 以内成像时, 第 1 条拼接缝处重叠像元数的变化曲面。由图可见, 在同一侧摆角度下, 重叠像元数绝对值在赤道地区最多, 随纬度升高逐渐减少。图 6(b) 为相机俯仰角度在 ±40°



(a) 重叠像元数与侧摆角和纬度的关系
(a) Relationship between overlapping pixels and scrolling angle, latitude



(b) 重叠像元数与俯仰角和纬度的关系

(b) Relationship between overlapping pixels, pitching angles and latitude

图 6 第 1 条拼接缝重叠像元数计算结果

Fig. 6 Calculation results of overlapping pixels for the 1st assembled gap

以内, 纬度为 $\pm 60^\circ$ 内成像时, 第 1 条拼接缝处重叠像元数的变化曲面。由图可见, 在同一俯仰角度下, 由于重叠像元数基数较大, 其随纬度变化量相对较小。

同理计算第 2~14 条拼接缝在不同纬度下侧摆成像和俯仰成像时的重叠像元数, 取出现漏像元数最多的值(即 N 的最小值)作为该拼接缝需要机械拼接的像元数, 俯仰成像时需要拼接的像元数更多, 故满足俯仰成像要求即能满足侧摆成像要求。表 1 为各条拼接缝最终的拼接像元数, 并和传统的固定像元数方法做差值对比。固定像元数分别为 200 和 300 个, 为负表示漏像元, 为正表示冗余像元。采用平均分配原则会造成视场两端出现漏缝, 而靠近视场中心位置则会出现拼接缝冗余, 其中固定 300 像元数方法拼接的像元总数为 4 200 个, 相较于本文方法多损失了 904 个有效像元数。

参考文献:

[1] 张星祥, 任建岳. TDICCD 焦平面的机械交错拼接

表 1 各条拼接缝拼接像元数统计与对比结果

Tab. 1 Statistics and contrasts of stitching pixels for each assembled gap

拼接缝编号	本文拼接 像元数	固定 200 像元方法	固定 300 像元方法
1	444	-244	-144
2	363	-163	-63
3	305	-105	-5
4	232	-32	68
5	170	30	130
6	99	101	201
7	35	165	265
8	34	166	266
9	101	99	199
10	169	31	131
11	235	-35	65
12	303	-103	-3
13	369	-169	-69
14	437	-237	-137

5 结 论

本文提出一种坐标变换结合中心投影共线方程方法来计算重叠像元数, 建立了成像时刻的像点、摄像中心、地物点间严格的动态数学关系, 以准确反映同名地物点对应的像点在像面上的运动情况, 接着结合样例计算了不同星下点纬度和卫星姿态下各拼接缝处的重叠像元数。结果显示: 拼接缝离视场中心位置越远, 机动角度越大, 则重叠像元数越多。其中侧摆成像时纬度越低, 重叠像元数越多。不同于其他静态近似模型, 本方法采用的动态模型已耦合了相机、卫星、地球三者的各种固定参数和动态因素。理论误差小于一个像元。结合工程复算证明, 本文方法适用于相机各种机动成像状态, 可扩展应用于其他类型空间相机。由于地球曲率和视线角度的影响, 在大角度俯仰成像时视场两端拼接缝所需的像元拼接量很大, 这会在一定程度上减小相机的有效视场, 在实际应用时还需根据相机具体任务要求计算和分配像元数。

[J]. 光学学报, 2006, 26(5): 740-745.

ZHANG X X, REN J Y. Mechanical interleaving assembly of TDICCD focal plane[J]. *Acta Optical*

- Sinica*, 2006, 26(5):740-745. (in Chinese)
- [2] ROGALSKI A. Progress in focal plane array technologies [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2012, 36(2-3): 342-473.
- [3] 李伟雄, 闫得杰, 王栋, 等. 高分辨率空间相机俯仰成像的像移补偿方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(9): 2443-2448.
LI W X, YAN D J, WANG D, *et al.*. Image motion compensation method of high resolution space camera's imaging with pitch angle[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2443-2448. (in Chinese)
- [4] 武星星, 刘金国. 基于地球椭球的空间相机侧摆摄影像移补偿[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 352-359.
WU X X, LIU J G. Image motion compensation of scroll imaging for space camera based on earth ellipsoid [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 352-359. (in Chinese)
- [5] 吕恒毅, 刘扬, 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.
LV H Y, LIU Y, GUO Y F. Computation of overlapping pixels of mechanical assembly CCD focal planes in remote sensing cameras[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 1041-1047. (in Chinese)
- [6] 郭疆, 龚大鹏, 朱磊, 等. 测绘相机焦平面 CCD 交错拼接中重叠像元数计算[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1251-1257.
GUO J, GONG D P, ZHU L, *et al.*. Calculation of overlapping pixels in interleaving assembly of CCD focal plane of mapping camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1251-1257. (in Chinese)
- [7] 王运, 孙胜利, 林长青. 空间相机交错拼接线阵探测器重叠像元数计算[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 1-7.
WANG Y, SUN SH L, LIN CH Q. Calculation of overlapping pixels of staggered linear array detectors for space camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 1-7. (in Chinese)
- [8] 闫得杰, 徐抒岩, 韩诚山. 飞行器姿态对空间相机像移补偿的影响[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2199-2203.
YAN D J, XU SH Y, HAN CH SH. Effect of aircraft attitude on image motion compensation of space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2199-2203. (in Chinese)
- [9] 王家琪, 于平, 颜昌翔, 等. 航天光学传感器像移速度矢计算数学模型[J]. *光学学报*, 2004, 24(12): 1585-1589.
WANG J Q, YU P, YAN CH X, *et al.*. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12): 1585-1589. (in Chinese)
- [10] 李广泽, 孔德柱, 刘金国. 宽覆盖型光学遥感相机侧摆像移速度计算[J]. *中国光学*, 2013, 6(5): 751-757.
LI G Z, KONG D ZH, LIU J G. Computation of scroll image motion velocity of wide coverage optical remote camera[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 751-757. (in Chinese)
- [11] 杨秀彬, 贺小军, 张刘, 等. 偏流角误差对 TDICCD 相机成像的影响与仿真[J]. *光电工程*, 2008, 35(11): 45-50.
YANG X B, HE X J, ZHANG L, *et al.*. Effect and simulation of the deviant angle error on TDICCD cameras image[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(11): 45-50. (in Chinese)
- [12] 胡燕, 金光, 常琳, 等. 椭圆轨道 TDICCD 相机像移匹配计算与成像验证[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2274-2284.
HU Y, JIN G, CHANG L, *et al.*. Image motion matching calculation and imaging validation of TDI CCD camera on elliptical orbit[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2274-2284. (in Chinese)

作者简介:



武奕楠(1984—),男,山东惠民人,硕士,助理研究员,2007年于南京航空航天大学获得学士学位,2010年于北京航空航天大学获得硕士学位,主要从事光电成像技术方面的研究。E-mail: wyn_buaa@163.com



李国宁(1979—),男,辽宁盘锦人,博士,副研究员,2002年、2005年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要研究方向为光电成像及图像压缩技术。

(版权所有 未经许可 不得转载)