基于同名点追踪的空间相机成像拼接配准模型

武奕楠,李国宁,张 柯,张 宇,金龙旭

(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:分析了已有图像配准算法在遥感图像拼接配准方面面临的问题。根据空间相机 TDICCD 交错拼接的成像特点,提出了一种基于同名点轨迹追踪的成像拼接配准模型。通过建立辅助空间坐标系下的中心投影共线方程,将像点、摄像中心、景物点建立严谨的数学关系,可精确实现对同名像点在像面上的轨迹追踪。结合 TDICCD 在像面上的位置约束,计算图像上同名像对的纵向偏差像元数和横向偏差像元数。最后结合相机在轨所成条带图像和卫星辅助数据进行分析,选取多组像点进行配准,同名像对配准误差小于 1 pixel,经验证模型算法可行。相比传统的遥感图像配准算法,该方法不需要已知图像内容,为一种严格的几何意义上的配准,具有很强的适应性和预测性,已应用在型号相机的地面复算,易移植应用于其他类型空间相机的图像配准与拼接。

关键词:图像配准; 空间相机; 同名点; 共线方程; 轨迹追踪

中图分类号:V474.2 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.0326002

Registration model based on homologous points tracking of space camera assembly imaging

Wu Yinan, Li Guoning, Zhang Ke, Zhang Yu, Jin Longxu

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

Abstract: The defect of the existing imaging registration algorithms which are applied in remote sensing image assembling and registration was analyzed. According to the imaging characteristic of interleaving assembly for space camera, a registration model based on homologous points tracking for assembly imaging was proposed. The collinearity equation of perspective projection under assistant space coordinate was established. Then, the strict mathematical realationship of image point, camera imaging center and ground point was established. The locus of homologous points at image plane could be tracked accurately. Combined with the restrict of TDICCD on image plane, the number of pixels in direction of longitudinal and transverse displacement of pair of homologous points was calculated. Finally, according to the analysis based on image bands camera imaging on the track and satellite assistant datas, multiple of image points were selected to be registrated. The error of homologous points registration was less than 1 pixel. The feasibility of registration algorithms was proved. Compared with traditional registration algorithms for remote sensing image, this method is a strict registration with meaning of geometry, and there is no need to know the content of image. The method applied to the checking and calculating on

收稿日期:2015-07-11; **修订日期**:2015-08-12

基金项目:国家 863 计划(863-2-5-1-13B);吉林省科技发展计划(20130522107JH)

作者简介:武奕楠(1984-),男,助理研究员,硕士,主要从事光电成像技术方面的研究。Email:wyn_buaa@163.com

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

correlative camera, has better adaptability and predictability. The model is easy to be applied to the imaging registration and assembling for others kinds of space camera.

Key words: image registration; space camera; homologous points; collinearity equation; locus tracking

0 引 言

大视场空间相机已成为遥感成像领域的一个发展趋势，而为获得更大的视场就需要更长的成像焦平面。目前扩展焦平面采用较多的方案是机械交错拼接[1-2]。在交错拼接方式中，焦平面前后两排 TDICCD 呈“品”字型排列。由于安装位置、行转移时间不同，偏流角的补偿残差以及地球曲率等因素影响，会导致相邻 TDICCD 图像在卫星飞行方向上存在纵向偏移，幅宽方向存在横向偏移。为将各片 TDICCD 所成条带图像拼接成一幅完整的遥感图像产品，需通过图像配准计算同名点间的像元偏移。

现有图像拼接配准算法大多是基于图像的特征、灰度或频域信息。参考文献[3]用核尺寸自适应算法对传统 SIFT 算法在特征点提取效率上进行了优化，用于遥感影像配准取得较好效果。参考文献[4]提出一种空域互相关自校正亚像素配准方法，算法精度优于 0.1 个像素。上述方法均基于已知下传图像，对于纹理特征不丰富的图像拼接效果较差；遥感图像在列方向上的重叠像元较少，也会影响特征匹配。参考文献[5]提出一种在轨快速拼接匹配算法，通过相邻两片 CCD 的偏流角残差和像移速度矢量求解错位像元数目。该方法需根据相邻 CCD 的行转移时间计算拼接周期，只能进行整周期的采样。只考虑了偏流角原理残差，没有包含地球表面曲率引起的偏流角畸变[6]，会对横向偏移像元数的计算产生很大影响。

针对上述问题，根据空间相机 CCD 交错拼接的成像特点，文中提出一种可以在轨应用的、基于同名点像面轨迹追踪的拼接配准模型，最后结合实际在轨图像和卫星辅助数据进行计算和分析，对文中模型进行了验证。

1 焦平面 CCD 交错拼接成像特点

以 17 片 TDICCD 交错拼接实例分析成像特性，焦平面组件如图 1 所示，各片 CCD 按照序号依次“品”字形排列。

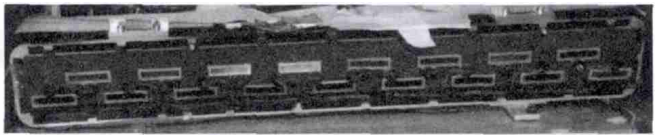
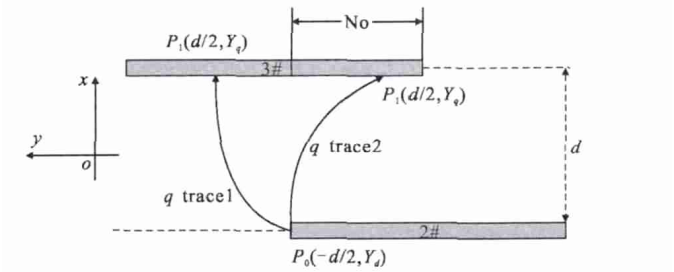


图 1 TDICCD 交错拼接的焦平面组件

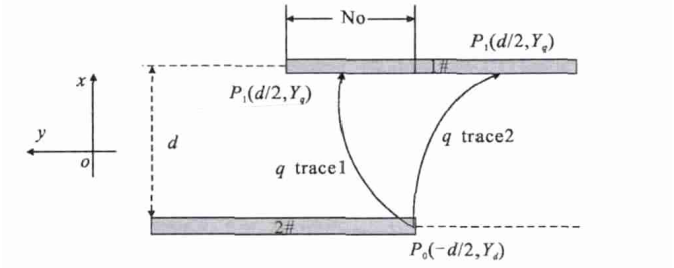
Fig.1 Focal plane of TDICCD interleaving assembly

如图 2 所示，前后两排 TDICCD 间隔为 d，后排 CCD 边缘像元为 P_0，x 方向为飞行方向，记 t_0 时刻 P_0 像元对地面景物所成的像为 q，由于景物点与空间相机之间的相对运动使得像点 q 从 P_0 开始在像面上运动，其可能的运动轨迹因卫星的姿轨参数、相机工作状态的不同而不同，如轨迹 1、2 所示。经过 ΔT 到 t_1 时刻，该同名像点到达前排 CCD，位置记为 P_1。N_p 为初始重叠像元拼接数。



(a) 偶数拼接缝

(a) Assembled gap of even number



(b) 奇数拼接缝

(b) Assembled gap of odd number

图 2 CCD 交错拼接处像点轨迹

Fig.2 Locus of image point for interleaving assembly CCDs

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对于偶数序列拼接缝，如图 2(a)所示，横向像元偏移量 N 为：

$$N=N_p+\frac{Y_q-Y_d}{u} \tag{1}$$

对于奇数序列拼接缝，如图 2(b)所示，横向像元偏移量 N 为：

$$N=N_p-\frac{Y_q-Y_d}{u} \tag{2}$$

公式(1)和(2)中，u 为像元尺寸。

将上述问题表征到图像坐标上，即相邻条带图像的同名像点存在横向偏差像元数 N 和纵向偏差像元数 M，N 如公式(1)和公式(2)所述，M 和时间延迟 ΔT 相关，所以需建立模型计算上述偏差量。

2 同名像点偏差计算模型

2.1 基于共线方程的成像计算模型

图 3 为空间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，$X'-Y'-Z'$ 为地球坐标系，在惯性坐标下绕 Y' 轴逆时针转动。X_i-Y_i 为像面坐标系，$X_j-Y_j-Z_j$ 为卫星轨道坐标系。

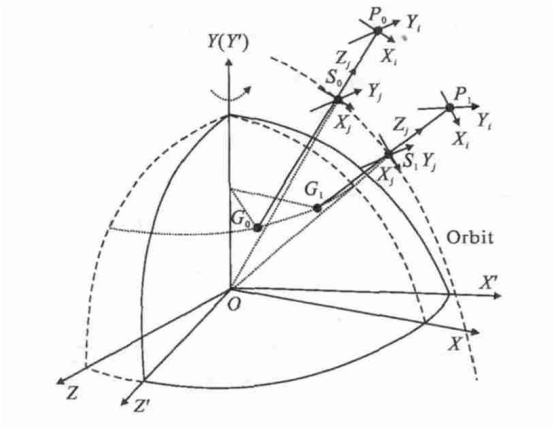


图 3 相机成像示意图

Fig.3 Diagram of camera imaging

卫星沿轨下行成像，设 t_0 时刻 $S_0(X_{s0},Y_{s0},Z_{s0})$ 为卫星摄像中心坐标，$P_0(X_{p0},Y_{p0},Z_{p0})$ 为像面上选取的某一点，G_0 (X_{a0},Y_{a0},Z_{a0}) 为 P_0 所对应成像的地面景物点；经过 ΔT 到 t_1 时刻，摄像中心随卫星运动，在惯性坐标下位置变为 $S_1(X_{s1},Y_{s1},Z_{s1})$，地面景物点随地球自转，由 G_0 运动到 $G_1(X_{a1},Y_{a1},Z_{a1})$，当 ΔT 较小时，该景物点还可被相机像面所捕获，对应成像的像元位置记为 $P_1(X_{p1},Y_{p1},Z_{p1})$。

空间相机符合中心投影成像，将地心惯性坐标系作为空间辅助坐标系，像点、卫星摄像中心和地面景物点在该坐标系下共线，建立三个点之间的共线方程，如 t_0 时刻共线方程为：

$$\begin{bmatrix}X_{p0}-X_{s0}\\Y_{p0}-Y_{s0}\\Z_{p0}-Z_{s0}\end{bmatrix}=\lambda_0\begin{bmatrix}X_{a0}-X_{s0}\\Y_{a0}-Y_{s0}\\Z_{a0}-Z_{s0}\end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：λ_0 为比例因子。

按照上述理论，以 CCD 拼接缝处后排 CCD 端点作为 P_0 点，通过坐标系变换和 t_0 时刻共线方程解得地面景物点 G_0；再将待求 P_1 点约束在相邻的前排 CCD 上，结合坐标位置变换得到的 S_1 点、G_1 点和 t_1 时刻共线方程，得到 P_1 点像面横坐标和成像时间差 ΔT，最后结合相关行频信息可得到同名点间的偏移量。

2.2 目标地物点求解

依 2.1 节所述，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})，通过卫星坐标系→卫星轨道坐标系→惯性坐标系间的坐标变换完成：

$$\begin{bmatrix}X_{s0}\\Y_{s0}\\Z_{s0}\end{bmatrix}=\mathrm{Osat}_0=(R_{r0}\cdot R_{i0})^{\mathrm{T}}\cdot[0\quad 0\quad \mathrm{Length}]^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

其中

$$R_{i0}=\begin{bmatrix}\cos(i_0) & \sin(i_0) & 0\\-\sin(i_0) & \cos(i_0) & 0\\0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{5}$$

$$R_{r0}=\begin{bmatrix}\cos(\mathrm{rout}_0) & 0 & -\sin(\mathrm{rout}_0)\\0 & 1 & 0\\\sin(\mathrm{rout}_0) & 0 & \cos(\mathrm{rout}_0)\end{bmatrix} \tag{6}$$

公式 (4)、(5)、(6) 中相关参数为：Length 为卫星轨道地心距；i_0 为卫星轨道倾角。

t_0 时刻卫星轨道幅角为：

$$\mathrm{rout}_0=\pi-\arcsin(\sin(\mathrm{geolati})/\sin(i_0)) \tag{7}$$

式中：geolati 为 t_0 时刻卫星星下点纬度。

推导 t_0 时刻所选取的像点在惯性坐标系下的坐标 (X_{p0},Y_{p0},Z_{p0})，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。像点在惯性坐标系下坐标为：

$$\begin{bmatrix}X_{p0}\\Y_{p0}\\Z_{p0}\end{bmatrix}=\mathrm{Opxl}_0=(R_{r0}\cdot R_{i0})^{\mathrm{T}}\cdot A_0^{\mathrm{T}}\cdot[x_0\quad y_0\quad f]^{\mathrm{T}}+\mathrm{Osat}_0 \tag{8}$$

其中，t_0 时刻姿态旋转矩阵如下：

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$A_0=\begin{bmatrix}\cos\psi_0 & \sin\psi_0 & 0\\ -\sin\psi_0 & \cos\psi_0 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\theta_0 & 0 & -\sin\theta_0\\ 0 & 1 & 0\\ \sin\theta_0 & 0 & \cos\theta_0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\varphi_0 & \sin\varphi_0\\ 0 & -\sin\varphi_0 & \cos\varphi_0\end{bmatrix} \tag{9}$$

式中：φ_0、θ_0、ψ_0 分别为 t_0 时刻卫星横滚角、俯仰角、偏航角，横滚角、俯仰角根据卫星机动情况设定，偏航角为相机像移模型计算值[7-8]。

设后排 CCD 边缘像元的像面坐标为(x_0,y_0)，其中 y_0 为 TDICCD 焦面横向坐标，即为图 2 中 Y_d，$x_0=-d/2$，f 为相机焦距。在星下点纬度、姿态角和像面坐标确定的情况下，在惯性坐标系下的像元坐标可以确定。将共线方程组公式(3)消元转化得方程组：

$$\begin{aligned}X_{p0}-X_{s0}&=\frac{(X_{a0}-X_{s0})(Z_{p0}-Z_{s0})}{Z_{a0}-Z_{s0}}\\ Y_{p0}-Y_{s0}&=\frac{(Y_{a0}-Y_{s0})(Z_{p0}-Z_{s0})}{Z_{a0}-Z_{s0}}\end{aligned} \tag{10}$$

地球旋转椭球面方程为公式(11)，其中 a_e，b_e 分别是地球的长短半轴：

$$\frac{X_{a0}^2}{a_e^2}+\frac{Z_{a0}^2}{a_e^2}+\frac{Y_{a0}^2}{b_e^2}-1=0 \tag{11}$$

联立上述方程组可解 X_{a0}、Y_{a0}、Z_{a0} 三个待求量。理论上视线会与地球椭球面有两个交点，根据物理意义取$|Y_{a0}-Y_{s0}|$绝对值小的一组作为有效解，得到 t_0 时刻目标地物点在惯性坐标系下的坐标。

2.3 目标地物点对应的同名像点轨迹计算

目标地物点所对应的像点在像面上随着卫星和地球的相对运动而移动，建立 t_1 时刻共线方程求解像点轨迹穿过前排 CCD 时的像面坐标 Y_q 和时间差 ΔT。地物点经过 ΔT 时间后仅随地球自转发生运动，坐标为：

$$\begin{bmatrix}X_{a1}\\ Y_{a1}\\ Z_{a1}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos(\omega\Delta T) & 0 & \sin(\omega\Delta T)\\ 0 & 1 & 0\\ -\sin(\omega\Delta T) & 0 & \cos(\omega\Delta T)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_{a0}\\ Y_{a0}\\ Z_{a0}\end{bmatrix} \tag{12}$$

式中：ω 为地球自转角速率。

t_1 时刻相机摄像中心在惯性坐标系下的坐标(X_{s1},Y_{s1},Z_{s1})为：

$$\begin{bmatrix}X_{s1}\\ Y_{s1}\\ Z_{s1}\end{bmatrix}=\text{Osat}=(R_{r1}\cdot R_{i0})^{\mathrm{T}}\cdot[0\quad 0\quad \text{Length}]^{\mathrm{T}} \tag{13}$$

其中

$$R_{r1}=\begin{bmatrix}\cos(\text{rout}_1) & 0 & -\sin(\text{rout}_1)\\ 0 & 1 & 0\\ \sin(\text{rout}_1) & 0 & \cos(\text{rout}_1)\end{bmatrix} \tag{14}$$

t_1 时刻卫星轨道幅角：

$$\text{rout}_1=\pi-\arcsin(\sin(\text{geolati})/\sin(i_0))+\Omega\Delta T \tag{15}$$

Ω 为卫星轨道运动相对地心角速率；t_1 时刻像点在惯性坐标系下的坐标(X_{p1},Y_{p1},Z_{p1})为：

$$\begin{bmatrix}X_{p1}\\ Y_{p1}\\ Z_{p1}\end{bmatrix}=\text{Opxl}=(R_{r1}\cdot R_{i0})^{\mathrm{T}}\cdot A_1^{\mathrm{T}}\cdot[x\quad y\quad f]^{\mathrm{T}}+\text{Osat} \tag{16}$$

φ_1、θ_1、ψ_1 分别为 t_1 时刻卫星横滚角、俯仰角、偏航角。由于待求的 t_1 时刻像点约束在前排 CCD 上，所以在公式(16)中 $x=d/2$，y 即为待求像点横坐标 Y_q。将像点、相机摄像中心、地面景物点建立共线方程，转换得方程组：

$$\begin{aligned}X_{p1}-X_{s1}&=\frac{(X_{a1}-X_{s1})(Z_{p1}-Z_{s1})}{Z_{a1}-Z_{s1}}\\ Y_{p1}-Y_{s1}&=\frac{(Y_{a1}-Y_{s1})(Z_{p1}-Z_{s1})}{Z_{a1}-Z_{s1}}\end{aligned} \tag{17}$$

将公式(12)、(13)、(16)中的坐标分量表达式分解，如公式(18)所示。

$$\begin{cases}X_{a1}=F_{xa}(\Delta T);Y_{a1}=F_{ya}(\Delta T);Z_{a1}=F_{za}(\Delta T)\\ X_{s1}=F_{xs}(\Delta T);Y_{s1}=F_{ys}(\Delta T);Z_{s1}=F_{zs}(\Delta T)\\ X_{p1}=F_{xp}(\Delta T,Y_q);Y_{p1}=F_{yp}(\Delta T,Y_q);Z_{p1}=F_{zp}(\Delta T)\end{cases} \tag{18}$$

式中：X_{a1}、T_{a1}、Z_{a1}、X_{s1}、Y_{s1}、Z_{s1}、Z_{p1} 均为关于 ΔT 的函数，X_{p1}、Y_{p1} 为关于 ΔT 和 Y_q 的函数，代入方程组(17)，方程组中仅有 ΔT 和 Y_q 两个待求量，方程组可解。

2.4 同名点偏差量计算

如第 1 节所述，相邻条带图像的拼接配准需得到待配准像点与其同名像点在图像平面上的偏差量。将相邻两片 CCD 所成图像置于同一图像坐标系下，设纵坐标为 M，横坐标为 N，M 轴左侧为后排 CCD 图像，右侧为前排 CCD 图像，M 轴方向为 CCD 积分方向，如图 4 所示。

选取后排 CCD 边缘像元所成像点作为待配准像点，图中箭头位置示意的为对应的同名点。设 t_0 时刻为相机开始成像时刻，所成像为 $P_b^0(0,M_b^0,t_0)$，经 ΔT_0 到达前排 CCD，所成像为 $P_f^0(N_0,M_f^0,t_0+\Delta t_0)$，该时段内前排 CCD 的行转移时间为 T_f^0。

该对同名像点间横向偏移量即为 N_0，将 2.3 节

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

中 Y_q 代入公式(1)、(2)即可求解,其他同名像对的横向偏移量 N_i 的计算同理。

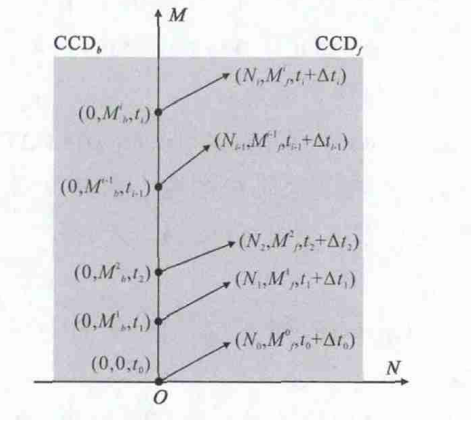


图 4 同名点配准示意图

Fig.4 Diagram of homologous points registration

同名像点间纵向偏移量为 M_0,易推导得:

$$\begin{cases} M_b^0=0 \\ M_f^0=\dfrac{\Delta T_0}{T_f^0} \\ M_0=M_f^0 \end{cases} \tag{19}$$

依次类推 t_1、t_2、…、t_i 时刻的待配准像点与其同名点之间的纵向偏移量:

$$\begin{cases} M_b^i=\dfrac{t_i-t_{i-1}}{T_b^i}+M_b^{i-1} \\ M_f^i=\dfrac{(t_i+\Delta t_i)-(t_{i-1}+\Delta t_{i-1})}{T_f^i}+M_f^{i-1} \\ M_i=M_f^i-M_b^i \end{cases} \tag{20}$$

式中:T_f^i 为前排 CCD 在 $t_{i-1}+\Delta t_{i-1}$~$t_i+\Delta t_i$ 时段内的行转移时间;T_b^i 为后排 CCD 在 t_{i-1}~t_i 时段内的行转移时间。

按上述过程即得到同名像对间的横向偏差和纵向偏差。该模型不需对图像进行大范围的遍历与搜索,不需要预知具体图像内容,即可完成对条带图像的拼接处理。通过进一步工程化可实现图像拼接的在轨应用。

3 样例计算与误差分析

结合实际在轨图像计算来验证模型,可以最大程度地还原相机工作状态。卫星姿轨数据、CCD 的成像行编号、成像时刻、行频、积分级数和增益等信息都可通过卫星辅助数据得到,如图 5 所示。

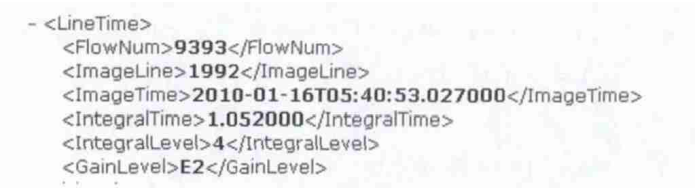


图 5 辅助数据示意图

Fig.5 Diagram of assistant data

某相机轨道高度 1 200 km,轨道倾角 100°,焦距 1.95 m。焦平面由 17 片 TDICCD 拼接,每片 4 096 个像元,像元尺寸 8.5 μm,前后 CCD 间隔 d=22.8 mm。

选取 2010 年 1 月 16 日对洛杉矶地区所成的一景遥感图像作为样本,选择第 2 片和第 3 片 CCD 条带图像进行匹配,以该景开始成像时刻作为 t_0,待配准像点 P_b^0 如 2.4 节所述。每隔 1 s 选取一个像点,选 50 个待配准像点。通过模型和辅助数据计算同名点间的横向偏差 N 和纵向偏差 M,间隔 10 组抽取计算结果如表 1 所示,M 随着成像时间推移逐渐变大,这是由于卫星在北半球下行成像时,纬度越低地球半径越大,相机视线越短,像移速度更快所致。N 受偏流角和卫星姿态变化影响,相对波动存在不确定性。

表 1 同名像对偏差像元数

Tab.1 Displacement pixel number of homologous points

Sequence of homologous points	Transverse displacement	Longitudinal displacement
1	23.26	2 700.47
10	23.09	2 765.23
20	23.41	2 837.05
30	21.21	2 906.41
40	19.43	2 974.08
50	19.65	3 048.26

以高精度图像配准算法匹配相邻条带图像重叠区域的同名像对[4],计算其对应同名点的横向偏差量 N_r 和纵向偏差量 M_r,并作为置信值以比较文中模型结果。

计算文中模型对该景图像配准的均方根误差 ΔN 和 ΔM,如公式(21)。i 为拼接缝编号,每条拼接缝选取 50 组同名像对作计算,j 为同名像对编号。

$$\begin{cases} \Delta N=\sqrt{\dfrac{1}{i\cdot j}\sum\limits_{\substack{i=1\\ j=1}}^{i\cdot j}(Nr_i^j-N_i^j)^2}\ (1\leqslant i\leqslant 16) \\ \Delta M=\sqrt{\dfrac{1}{i\cdot j}\sum\limits_{\substack{i=1\\ j=1}}^{i\cdot j}(Mr_i^j-M_i^j)^2}\ (1\leqslant j\leqslant 50) \end{cases} \tag{21}$$

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

经遍历计算,横向配准误差 ΔN 为 0.69 个像素,纵向配准误差 ΔM 为 0.81 个像素。图 6 是第 2 片和第 3 片 CCD 拼接缩略图, 图 7 是缩略图中白色方块区域的放大图。拼接后的整体图像视觉感知评价良好,达到了预期拼接效果。

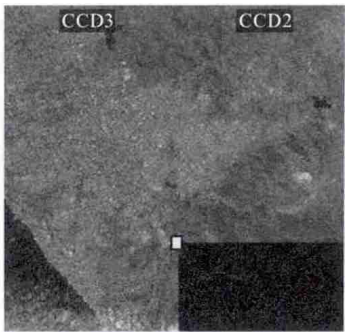


图 6 条带拼接缩略图

Fig.6 Abbreviative image of assembly bands

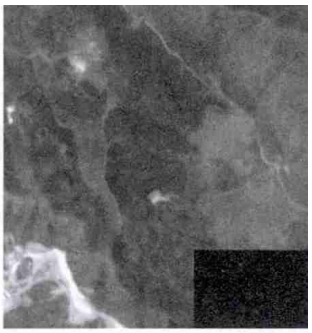


图 7 局部放大图

Fig.7 Local amplificatory image

卫星和相机的内外方位元素标定和姿轨参数精确测量是后续进一步提高模型配准精度的重要因素。如第二节所述,对于每一对同名点都包含两个成像时刻 t_0 和 t_1, 由于两个成像时刻之间仅为 2 s 左右,显然对于相机安装位置误差、焦距测量误差、卫星速度控制误差、卫星地心距误差等都不存在变化,或变化极小可近似忽略。这些相对稳定的误差源对同名像对之间的配准偏差量影响很小, 也可以通过标定解决。由于卫星会存在各种频率的颤振,不同时刻的姿态具有一定的不确定性, 所以对匹配结果影响最大。

设卫星三轴姿态角允许的测量误差为 σ_φ,σ_θ,σ_ψ,即卫星姿轨控系统的测量精度。t_0 时刻的三轴姿态测量误差为 $\Delta\varphi_0$,$\Delta\theta_0$,$\Delta\psi_0$,t_1 时刻的三轴姿态测量误差为 $\Delta\varphi_1$,$\Delta\theta_1$,$\Delta\psi_1$,上述 6 个随机变量符合正态分布。如第二节所述,由于推导解析式展开后很复杂,采用全微分法求解结果的估值误差将会遇到极大的困难,通过蒙特卡洛(Monte-Carlo)方法可以解决该问题。通过正态分布矩阵反映姿态测量误差,如表 2 所示。

表 2 误差矩阵表

Tab.2 Random error computation table

Index	Normal distribution random matrix $T_{i,j}$	Random error
1	$T_{i,1}$	$\Delta\varphi_0=T_{i,1}\cdot\sigma_\varphi$
2	$T_{i,2}$	$\Delta\theta_0=T_{i,2}\cdot\sigma_\theta$
3	$T_{i,3}$	$\Delta\psi_0=T_{i,3}\cdot\sigma_\psi$
4	$T_{i,4}$	$\Delta\varphi_1=T_{i,4}\cdot\sigma_\varphi$
5	$T_{i,5}$	$\Delta\theta_1=T_{i,5}\cdot\sigma_\theta$
6	$T_{i,6}$	$\Delta\psi_1=T_{i,6}\cdot\sigma_\psi$

表 2 中,$T_{i,j}(j=1,2,\cdots,6)$是-1~1 之间的服从正态分布的随机数组成的矩阵;i 是误差统计的样本点数。

随机选取 500 组误差样本点,代入解析式计算,解析式简记为 Fgroup,如公式(22)中所示,并和理想情况对比得到计算结果估值误差。如当配准估值误差要求小于 2 个像素时, 三轴姿态测量误差 σ_φ、σ_θ、σ_ψ 至少要优于 0.001°。在具体工程实现时还需根据卫星姿控能力来平衡相关指标。

$$\begin{cases}F_{\text{group}}(\varphi_0+\Delta\varphi_0,\theta_0+\Delta\theta_0,\psi_0+\Delta\psi_0,\varphi_1+\Delta\varphi_1,\theta_1+\Delta\theta_1,\psi_1+\Delta\psi_1\\F_{\text{group}}(\varphi_0,\theta_0,\psi_0,\varphi_1,\theta_1,\psi_1)\end{cases}\tag{22}$$

针对其他误差源对配准误差的影响, 同理适合采用蒙特卡罗方法进行数学解算。卫星三轴姿态角的测量误差、卫星速度测量误差是由卫星的姿轨控系统决定的,陀螺仪和星敏感器是用来测量姿态,飞轮和矢量推进装置是起到调姿和推进的作用, 需要根据所计算的指标来优化卫星上述部件。安装位置误差等固定误差源需通过地面机械装调, 或是在轨对地面特征靶标成像进行校正。

4 结 论

根据相机CCD 交错拼接的成像特点,文中将以往静态的图像配准问题转换为动态的同名像点追迹问题。建立了严格的数学模型以实现对同名像点的轨迹追踪, 通过推导转化为图像面上同名像对的偏差量。结合实际在轨图像和卫星辅助数据,对样例进

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

行计算和分析,经验证模型算法准确可行。相比传统的遥感图像配准算法, 文中方法并不需要已知图像内容,对于缺乏层次和纹理的海面、沙漠等地区具有同等的适应能力,具有很强的预测性,属于一种“盲配准”方法。通过进一步提高配准精度和实现工程转化,可在轨对遥感图像拼接配准。

参考文献:

[1] Wang Xinhua, Huang Wei, Ouyang Jihong, et al. Real- time image registration of the multi -detectors mosaic imaging system[J]. ***Chinese Optics***, 2015, 8(2): 211-219.
王新华, 黄玮, 欧阳继红, 等. 多探测器拼接成像系统实时图像配准[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 211-219.

[2] Sun Bin, Li Jinglin, Zhang Xingxiang, et al. Interleaving assembly of TDICCDs on 600 mm focal plane [J]. ***Opt Precision Engineering***, 2014, 22(11): 2908-2913. (in Chinese)
孙斌, 李景林, 张星祥, 等. 600 mm 长焦平面时间延迟积分 CCD 的交错拼接 [J]. 光学 精密工程, 2014, 22(11): 2908-2913.

[3] Chen J, Tian J. Real-time multi-modal rigid registration based on a novel symmetric-SIFT descriptor[J]. ***Progress in Natural Science***, 2009, 19(5): 643-651.

[4] Lu Jinbo, He Bin. Automatic mosaic method of large field view and multi-channel remote sensing images of TDICCD cameras[J]. ***Chin J Space Sci***, 2012, 32(1): 154-160. (in Chinese)
禄金波, 何斌. TDICCD 相机大视场多通道遥感图像自动拼接方法[J]. 空间科学学报, 2012, 32(1): 154-160.

[5] Chang Lin, Jin Guang, Yang Xiubin. Fast registration algorithm design and analysis of TDICCD camera assembly imaging[J]. ***Acta Optica Sinica***, 2014, 34(5): 0511001. (in Chinese)
常琳, 金光, 杨秀彬. 航天 TDICCD 相机成像拼接快速配准算法设计与分析[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0511001.

[6] Ren Bingwen, Jin Guang, Zhang Yuan, et al. Influence of image motion on TDI imaging camera by distortion effect[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(12): 3951-3957. (in Chinese)
任秉文, 金光, 张元, 等. 畸变对 TDI 成像相机的像移影响研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 3951-3957.

[7] Wu Xingxing, Liu Jinguo. Image motion compensation of scroll imaging for space camera based on earth ellipsoid[J]. ***Opt Precision Eng***, 2014, 22(2): 352-359. (in Chinese)
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.

[8] Sun Yang, Xue Donglin, Zheng Ligong, et al. Real-time drift angle compensation based on speed vector model for space camera on circular orbit [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(7): 2185- 2191. (in Chinese)
孙阳, 薛栋林, 郑立功, 等. 基于速度矢量模型的圆轨道空间相机偏流角实时补偿[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2185-2191.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net