

doi: 10.3788/gzxb20164507.0704002

嫦娥三号极紫外相机几何定位方法及其应用

严 伟^{1,2}, 任 鑫^{1,2}, 刘 建 军^{1,2}, 封 剑 青^{1,2}

(1 中国科学院国家天文台, 北京, 100012)

(2 中国科学院月球与深空探测重点实验室, 北京, 100012)

摘 要: 针对嫦娥三号极紫外相机影像由于缺少控制点约束而无法沿用地球遥感影像几何定位方法的现状, 研究了极紫外相机的工作原理、涉及的坐标系统及其转换关系, 提出了一种基于星上遥测参数和严格坐标转换关系的几何定位方法, 进行了影像数据几何定位及定位精度分析. 研究表明, 该方法能够解算影像拍摄时刻极紫外相机光轴在太阳磁层坐标系中的指向, 以及着陆器在该坐标系中的位置, 精确定位影像中地球质心的位置, 校正相机光轴指向在原始影像中对应的位置, 确保极紫外相机探测数据的科学应用价值, 实现嫦娥三号空间环境探测的科学目标.

关键词: 嫦娥三号; 极紫外相机; 等离子体层; 坐标转换; 几何定位; 影像校正

中图分类号: P226.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)07-0704002-6

The Application of Geometric Positioning for Chang'E-3 Moon-based Extreme Ultraviolet Camera

YAN Wei^{1,2}, REN Xin^{1,2}, LIU Jian-jun^{1,2}, FENG Jian-qing^{1,2}

(1 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

(2 Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Geometric positioning methods for earth remote sensing images cannot be used for Chang'E-3 (CE-3) moon-based Extreme Ultraviolet Camera (EUVC) images because of lack of control points. According to this present situation, working principle and related coordinate systems for EUVC were introduced, and a geometric positioning algorithm was proposed for EUVC observations based on telemetry parameters and strict coordinate transformation relationship. Algorithm of geometric positioning was researched and positioning accuracy was evaluated. The results show that the space pointing of EUVC optical axis and CE-3 lander's position in Solar Magnetic System at image acquisition epochs can be calculated by the proposed algorithm for high-precision geocentric position. Geocentric position results can also be used to correct the original images to ensure the reliability of the EUVC observations and to realize CE-3's scientific objective of the space environment detection.

Key words: Chang'E-3; Extreme ultraviolet camera; Earth's plasmasphere; Coordinate transformation; Geometric positioning; Image rectification

OCIS Codes: 040.1490; 100.0100; 100.3020; 260.7190; 080.0080

0 引言

地球等离子体层是围绕在 $2 \sim 7$ 个 R_E (R_E 约为 6378.5 km, 表示地球半径) 范围内的圆环状致密等离子体区域, 其演化过程将影响地球内部磁层结构和近地空间环境, 具有重要的科学价值和应用价值. 研究地球等离子体层离子分布的最佳方法是对太阳光中的极

紫外辐射进行光学成像, 再通过影像反演得到等离子体层的离子密度分布^[1-2]. 目前, 还没有在轨运行的极紫外探测器, 因此急需一种稳定、连续的光学探测方法. 北京时间 2013 年 12 月 14 日, 嫦娥三号月球探测器 (Chang'E-3, CE-3) 成功着陆于雨海地区虹湾东部一个直径约 430m 撞击坑的东缘 (19.51°W, 44.12°N)^[3], 开展了我国首次月面就位探测和巡视勘测, 其中, CE-3

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 11503055, 41490635, 41374012, 41304021, 41403054) 和中国科学院国家天文台青年人才基金项目资助

第一作者: 严伟 (1983—), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为月球探测、月球遥感数据处理等. Email: yanw@nao.cas.cn

收稿日期: 2015-12-25; **录用日期:** 2016-02-27

<http://www.photon.ac.cn>

着陆器搭载的极紫外相机 (Extreme Ultraviolet Camera, EUVC) 为采用月基极紫外探测方式观测地球等离子体层提供了新的选择。

EUVC 的主要功能是在月球运动轨道的不同侧面上对地球等离子体层的三维结构进行成像, 并通过一定时间的长期连续观测实现对地球等离子体层密度、对地磁活动结构变化过程等内容的监测, 实现 CE-3 空间环境探测的科学目标。

几何定位是影像数据预处理的主要内容之一。地球遥感卫星影像 (如 SPOT-5、IKONOS、Quick Bird、OrbView、GeoEye-1、资源一号、资源二号等) 的几何定位通常基于高精度的地面控制点、内方位元素标定结果、轨道姿态数据 (外方位元素) 以及成熟的定位模型, 包括仿射变换模型^[4]、有理函数纠正模型 (Rational Function Model, RFM)^[5]、贝叶斯几何定位模型^[6]、对偶四元数模型^[7]、空三定位网模型^[8-9] 等, 影像特征点的定位精度可达米级。对于 EUVC 影像, 几何定位的主要目的是解算影像拍摄时刻相机光轴在太阳磁层坐标系 (Solar Magnetic Coordinate System, SM) 中的指向, 以及着陆器在 SM 坐标系中的位置, 进而确定地球质心在影像中的位置, 为后续科学研究提供精确的位置信息。然而, 与地球遥感影像不同, EUVC 影像的拍摄对象是地球等离子体层的极紫外辐射, 缺少参考控制点, 无法沿用现有的几何定位方法, 在这样的情况下, 如何根据星上遥测参数 (CE-3 着陆器姿态、EUVC 支撑机构的俯仰、方位转角等信息) 和严格的坐标转换关系实现高精度的 EUVC 影像几何定位, 对于探测数据的科学应用至关重要。

本文介绍 CE-3 极紫外相机的工作原理、涉及的坐标系统及其转换关系, 研究影像数据的几何定位方法, 分析几何定位精度, 并介绍几何定位结果的应用情况。

1 CE-3 极紫外相机

EUVC 由薄膜吸收滤光片、极紫外波段多层膜反射镜、光子计数成像探测器、极紫外相机支撑结构、电子学控制系统和热控单元组成。为了提高 EUVC 在工作波段的能量传输效率, 获得高质量的地球等离子体影像, 在 EUVC 的仪器设计上, 采用了单球面反射镜加曲面微通道板 (Microchannel Plate, MCP) 光子计数探测器的光学结构。EUVC 的主要技术参数见表 1^[10]。

EUVC 影像包含 1500×1500 个像素数据, 每个像素数据量化为 16bit, 影像大小约为 4.3MB。数据按 $(x_1, y_1), (x_1, y_2), \dots, (x_1, y_{1500}), (x_2, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_2, y_{1500}), \dots, (x_{1500}, y_1), (x_{1500}, y_2), \dots, (x_{1500}, y_{1500})$ 的顺序排列, 其中 $x_i, y_i (i=1, 2, \dots, 1500)$ 分别代表影像行和列, 每个像素值代表了在曝光时间内捕获的 30.4 nm 波长段的光子数量。

表 1 EUVC 技术参数

Table 1 Specification for EUVC

Performance parameter	Value
Center wavelength/nm	30.4
Bandwidth/nm	4.6
Field of view/(°)	14.7
Angular resolution/(°)	0.08
Exposure time/min	2, 10, 20
Focal length/mm	148.68

截至 2015 年 1 月 14 日, EUVC 总共获取了 388 幅探测模式影像。探测数据由中国科学院国家天文台月球与深空探测中心进行接收和处理, 原始数据由地面站天线接收后, 经过帧同步、解扰、里德-所罗门码 (Reed-Solomon, RS) 译码后得到成帧数据 (Framed Data, FD), 再经过信道处理、排序、两站优化拼接、去重复等步骤, 提取得到位流数据域中 EUVC 的原始影像数据, 原始影像数据经过 1 级、2 级处理后得到可用于科学研究的数据产品。EUVC 的数据处理流程如图 1。

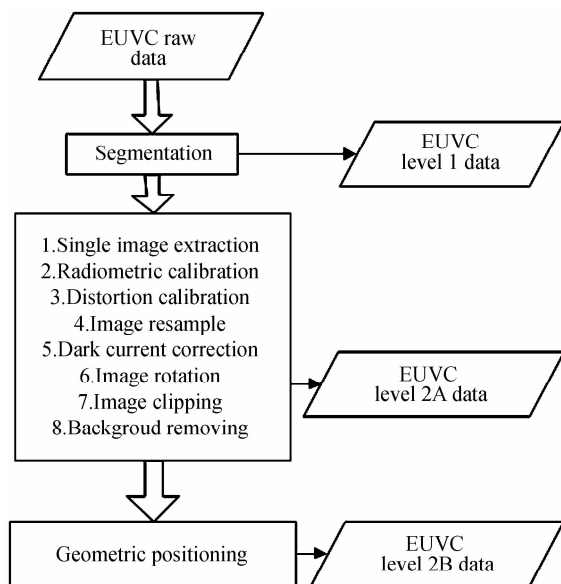


图 1 EUVC 数据处理流程

Fig. 1 EUVC data processing flow

由图 1 可知, 几何定位是为 EUVC 科学数据产品提供几何信息、实现 EUVC 科学探测目标的关键步骤。

2 EUVC 几何定位方法

2.1 坐标系统及其转换关系

EUVC 几何定位涉及一系列的坐标转换, 严格定义各坐标系统并实现它们之间的精确转换, 是进行影像数据几何定位的关键。

各坐标系的具体定义为:

1) 太阳磁层坐标系 (SM 坐标系)。原点为地球质心, Z 轴平行于地球北磁极, Y 轴垂直于地球-太阳位置连线方向并指向黄昏 (即与地球公转方向相反), X 轴与 Z 轴和 Y 轴构成右手笛卡尔直角坐标系 (简称右手

系).可以看出,在 SM 坐标系中, X 轴并非严格指向太阳,它与地球-太阳位置连线之间存在一个周期变化的夹角,该夹角称为偶极倾角(Dipole Tilt Angle, DTA).由于地球偶极轴与 SM 坐标系 Z 轴平行,偶极子磁场和磁层顶部的横截面在该坐标系中非常容易表达,因此被广泛使用.极紫外相机光轴指向、着陆器位置的几何定位输出结果在该坐标系中定义,记做(X_{SM}, Y_{SM}, Z_{SM}).

2) J2000.0 平地球赤道坐标系.原点为行星(包括地球、月球等)质心或太阳系质心,基准面、 X 轴指向、 Y 轴指向和 Z 轴指向平行于 J2000.0 地心平赤道坐标系^[11],右手系,记做($X_{J2000}, Y_{J2000}, Z_{J2000}$).

3) 月固坐标系.采用 IAU 推荐的平地球/极轴坐标系^[11],原点为月球质心,基准面为月球赤道面, Z 轴垂直于基准面指向北极, X 轴在基准面内指向经度原点方向(即平均地球方向), Y 轴与 Z 轴和 X 轴构成右手系.坐标由月固经度和月固纬度表示,记做(λ, φ), CE-3 着陆器月面位置、姿态在此坐标系中定义.

4) 着陆器站心坐标系.原点为着陆器在月球表面的位置(即站心), X 轴位于过站心的月面切平面内,指向月球正东方向, Y 轴位于过站心的月面切平面内,指向月球正北方向, Z 轴与 X 轴和 Y 轴构成右手系.该坐标系是连接月固坐标系与着陆器本体坐标系的过渡坐标系,记做($X_{landerlocal}, Y_{landerlocal}, Z_{landerlocal}$).

5) 着陆器本体坐标系(如图 2).是 CE-3 着陆器整体的参考坐标系,用于着陆器上各种仪器设备的安装.原点位于着陆器与运载火箭对接法兰的理论圆心, X 轴垂直于器箭分离面指向主结构方向, Z 过坐标原点指向巡视器转移机构方向, Y 轴与 Z 轴和 X 轴构成右手系,记为($X_{lander}, Y_{lander}, Z_{lander}$).

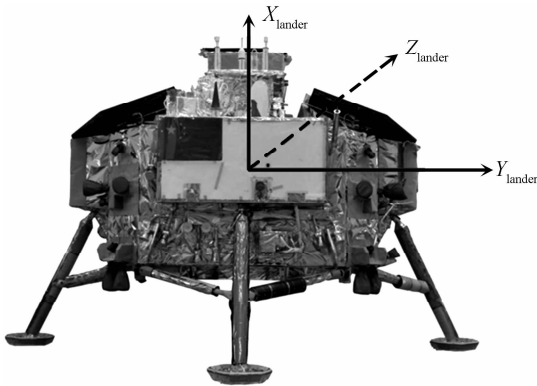


图 2 CE-3 着陆器本体坐标系

Fig. 2 CE-3 lander body coordinate system

6) 极紫外相机支撑结构坐标系(如图 3).原点位于支撑结构俯仰轴和偏航轴的交点, Y 轴沿支撑结构俯仰轴和偏航轴所确定平面的法线方向, X 轴沿支撑结构偏航轴指向对月面的反方向, Z 轴与 X 轴和 Y 轴构成右手系,记为($X_{holder}, Y_{holder}, Z_{holder}$).可以看出,支

撑结构初始状态下极紫外相机支撑结构坐标系 Y 轴与着陆器本体坐标系 Y 轴平行,而每个瞬时状态下的支撑结构坐标系在着陆器本体中的姿态是不同的,与支撑结构的俯仰与偏航状态有关.支撑机构的转动实现极紫外相机对地球的跟踪和拍摄,影像数据的初始观测矢量在该坐标系中定义.

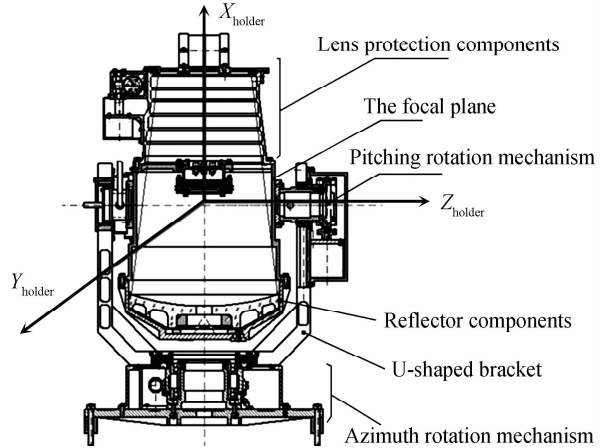


图 3 EUVC 支撑结构坐标系

Fig. 3 EUVC support structure coordinate system

对于影像拍摄时刻相机光轴在 SM 坐标系中指向的解算,仅需考虑各坐标系之间的旋转,因此几何定位过程中可以认为是 1)~6) 所有坐标系原点重合.具体地,SM 坐标系与地心/月心 J2000.0 平地球赤道坐标系之间的转换可根据天文公式解算得到^[12-13];月心 J2000.0 平地球赤道坐标系与月固坐标系之间的转换通过正交旋转矩阵实现,建立转换矩阵所需的月球天平动等参数可通过 JPL DE421 精密行星星历插值得到^[14];月固坐标系与着陆器本体坐标系之间的转换可根据着陆器在着陆器站心坐标系中的姿态解算;着陆器本体坐标系与极紫外相机支撑结构坐标系之间的转换根据 EUVC 的实时方位、俯仰角度解算,方位、俯仰角度由星上遥测参数提供.

对于观测瞬间着陆器在 SM 坐标系中位置的解算,则可先根据 JPL DE421 精密行星星历计算着陆器在地心 J2000.0 平地球赤道坐标系中的位置,再根据 SM 坐标系与地心 J2000.0 平地球赤道坐标系之间的转换解算其在 SM 坐标系中的位置.

2.2 几何定位流程

根据 2.1 节中定义的坐标系及其相互转换关系,可以确定 EUVC 光轴指向、以及 CE-3 着陆器位置的几何定位方法,具体解算流程为:

1) 根据仪器的几何参数、安装参数,构建相机光轴指向在支撑结构坐标系中的观测矢量 V_{holder} .由图 3 可知,相机光轴与支撑结构坐标系 X 轴重合,因此可得 V_{holder} 的单位矢量表达式为

$$V_{holder} = (1, 0, 0)^T \quad (1)$$

式中,上标 T 表示矩阵转秩.

2) 根据极紫外相机支撑结构俯仰角、偏航角参数,构建着陆器支撑结构瞬时坐标系与支撑结构初始坐标系的转换矩阵 $T_{\text{holder} \leftarrow \text{holder}0}$. 转换矩阵为正交旋转矩阵,即绕空间坐标系的轴 $i(X/Y/Z)$ 旋转角度 θ ,通过该转换矩阵,可以得到原始坐标系中某矢量在目标坐标系中的坐标转换结果. 绕各轴旋转所得的转换矩阵具体表达式为

$$\begin{cases} T_X(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \\ T_Y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \\ T_Z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

3) 构建支撑结构初始坐标系与着陆器本体坐标系的转换矩阵 $T_{\text{holder}0 \leftarrow \text{lander}}$,由 2.1 节中坐标系的定义可知 $T_{\text{holder}0 \leftarrow \text{lander}}$ 为单位矩阵.

4) 根据着陆器的姿态参数,构建着陆器本体坐标系与着陆器站心坐标系的转换矩阵 $T_{\text{lander} \leftarrow \text{landerlocal}}$.

5) 根据 EVUC 影像的拍摄时刻、着陆器月固坐标系下的位置、JPL DE421 精密行星星历等参数,构建着陆器站心坐标系与月固坐标系、月心 J2000.0 坐标系、SM 坐标系间的转换矩阵 $T_{\text{landerlocal} \leftarrow \text{SM}}$.

6) 根据 1)~5) 步骤结果,解算相机光轴指向在 SM 坐标系下的观测矢量 V_{SM}

$$\begin{aligned} V_{\text{holder}} &= T_{\text{holder} \leftarrow \text{holder}0} T_{\text{holder}0 \leftarrow \text{lander}} T_{\text{lander} \leftarrow \text{landerlocal}} \\ & T_{\text{landerlocal} \leftarrow \text{SM}} V_{\text{SM}} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, V_{holder} 为相机光轴指向在支撑结构坐标系下的矢量, V_{SM} 为相机光轴指向在 SM 坐标系下的矢量.

7) 根据 EVUC 影像的拍摄时刻、着陆器月固坐标系下的位置、JPL DE421 精密行星星历等参数,解算着陆器在地心 J2000.0 坐标系中的位置 $V_{\text{lander}_{J2000}}$,构建地心 J2000.0 坐标系、SM 坐标系间的转换矩阵 $T_{J2000 \leftarrow \text{SM}}$,则 SM 坐标系下的着陆器的位置矢量 $V_{\text{lander}_{\text{SM}}}$ 为

$$V_{\text{lander}_{J2000}} = T_{J2000 \leftarrow \text{SM}} V_{\text{lander}_{\text{SM}}} \quad (4)$$

3 EUVC 几何定位结果及其应用

3.1 EUVC 几何定位结果

EUVC 影像的几何定位结果包括影像拍摄时刻相机光轴在 SM 坐标系中的指向,以及着陆器在 SM 坐标系中的位置. 其中,着陆器位置表示为笛卡尔三维坐标,该位置距地心距离的量级为 10^5 m (即地月距离),与美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 行星在线坐标转换工

具^[15]的解算结果相比,位置分量误差在 1m 以内;光轴指向表示为空间单位矢量,本文重点研究光轴指向几何定位精度的分析方法.

通过对 EUVC 影像的处理,可以重构地球的等离子体层^[16]. 图 4 给出了基于 EUVC 影像的地球等离子体层重构结果示意图,该影像以光轴指向在 EUVC 影像中对应的位置为圆心,按 15° 圆视场截取原始影像得到,呈约 150 像素半径的圆形. 圆心在原始影像中的坐标由地面标定并固定,星上不再进行在轨标定.

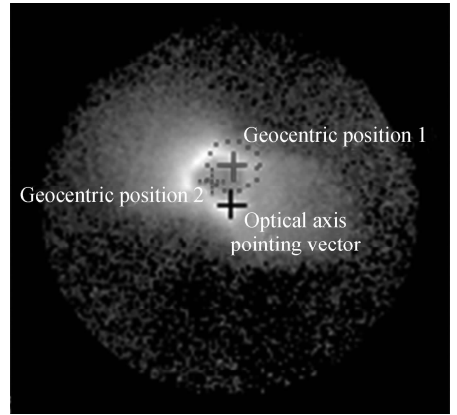


图 4 地球等离子体层重构结果

Fig. 4 Reconstruction of Earth's plasmasphere

图 4 中椭圆光斑区域代表地球等离子体层的分布及其密度,图中实线十字代表影像的中心位置,对应 EUVC 的光轴指向. 根据 EUVC 光轴指向、着陆器位置在 SM 坐标系中的几何定位结果,可以解算地球质心在 EUVC 影像中的位置,图 4 中虚线圆中心十字标示的地心位置 1 即为根据几何定位结果解算的地心位置;另一方面,由于地球质心位于等离子体层中心,即影像中椭圆光斑区域的中心,因此,根据影像识别的方法同样可以定位影像中的地心位置^[16],解算结果为图 4 中虚线十字标示的地心位置 2. 可以看出,地心位置 1 和地心位置 2 存在偏差. 分析地球质心的正确位置,对于评价 EUVC 几何定位精度至关重要.

3.2 EUVC 几何定位精度

EUVC 在轨运行过程中,为了实现一定时间内对地球等离子体层密度的监测,同一工作时段内俯仰和方位角将保持不变,即相机光轴的空间指向是固定不变的;然而,月球和地球是不断运动的,因此着陆器与地心的连线在空间中的指向(简称地心指向)不断变化. 因此,定义每幅影像对应光轴指向与地心指向之间的夹角 (Angle between Optical Axis Pointing and Geocentric Pointing, AOG),对应图 4 中的地心位置 1 和地心位置 2,存在两种类型的 AOG,分别标记为 AOG_1 和 AOG_2 ,本文通过 AOG_1 和 AOG_2 随时间的变化趋势分析地心位置的解算精度.

选取了 2014 年 4 月 21 日拍摄的 11 幅 EUVC 影像进行 AOG 变化趋势分析,这些影像的编号为 096~

106,采样间隔约 10min. 解算结果如图 5.

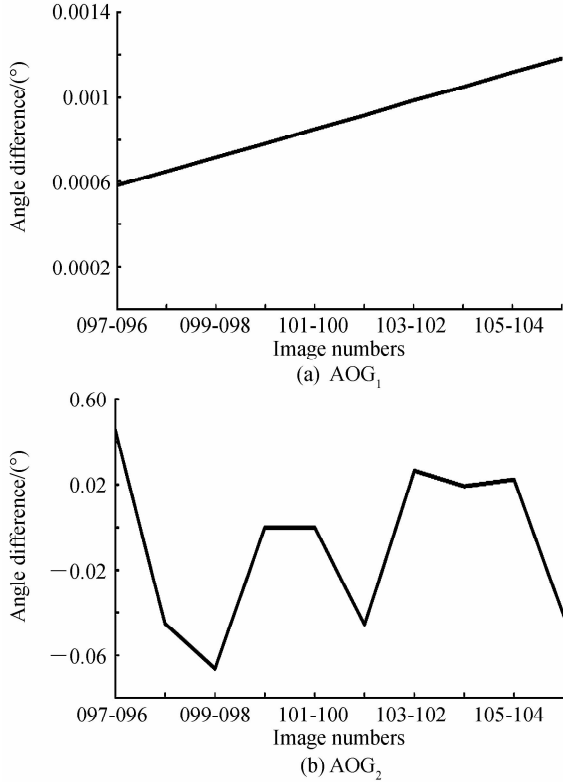


图 5 AOG 变化趋势

Fig. 5 Change trend of AOGs

由图 5 可以看出, AOG_1 呈现线性变化趋势, 角度变化量级为 10^{-4} , 该变化趋势符合光轴指向不变、地心指向随地月系统运动匀速变化的自然规律; 而 AOG_2 则呈现出不规则的变化趋势, 并且角度差异量级远大于 AOG_1 . 分析结果表明, 几何定位解算结果正确且精度较高, 而影像识别解算的地球质心在影像中的位置有误, 影响 EUVC 影像数据的科学应用.

3.3 EUVC 影像数据校正

进一步分析发现截取影像中的圆心位置, 即相机光轴指向在 EUVC 原始影像中位置的地面标记存在偏差, 导致以该位置为圆心的截图与以实际位置为圆

心的截图存在偏差, 使得截图中影像识别方法确定的地心位置和几何定位方法确定的地心位置不一致. 由于几何定位基于严格的坐标系转换关系和高精度的 JPL DE421 精密行星星历, 精度分析结果表明几何定位能够精确解算 EUVC 影像拍摄时刻月球质心、着陆器、地球质心之间的相对位置关系, 因此, 利用几何定位结果有望对光轴指向在 EUVC 原始影像的位置进行校正.

为了对光轴指向在 EUVC 原始影像的位置进行校正, 在极紫外相机支撑结构坐标系中增加除光轴观测矢量外的另外 4 个观测矢量, 构成 15° 圆视场, 即组成重构地球的等离子体层所需截图包含的区域, 观测矢量被标记为 $P_1 \sim P_4$ (如图 6), 由于 $P_1 \sim P_4$ 以及光轴指向 (对应影像中心) 在 EUVC 影像中的位置是固定的, 通过解算这五个点的几何定位结果, 可以解算出相机光轴指向在 EUVC 原始影像的正确位置.

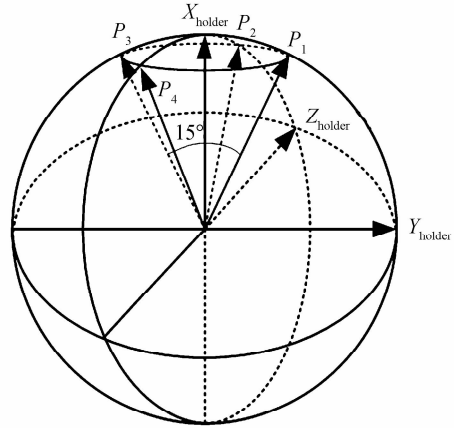


图 6 $P_1 \sim P_4$ 位置

Fig. 6 Position of $P_1 \sim P_4$

$P_1 \sim P_4$ 在极紫外相机支撑结构坐标系中的观测矢量分别记为 $[\sin 72.5^\circ, \cos 72.5^\circ, 0.0]^T$, $[\sin 72.5^\circ, 0.0, \cos 72.5^\circ]^T$, $[\sin 72.5^\circ, -\cos 72.5^\circ, 0.0]^T$, $[\sin 72.5^\circ, 0.0, -\cos 72.5^\circ]^T$.

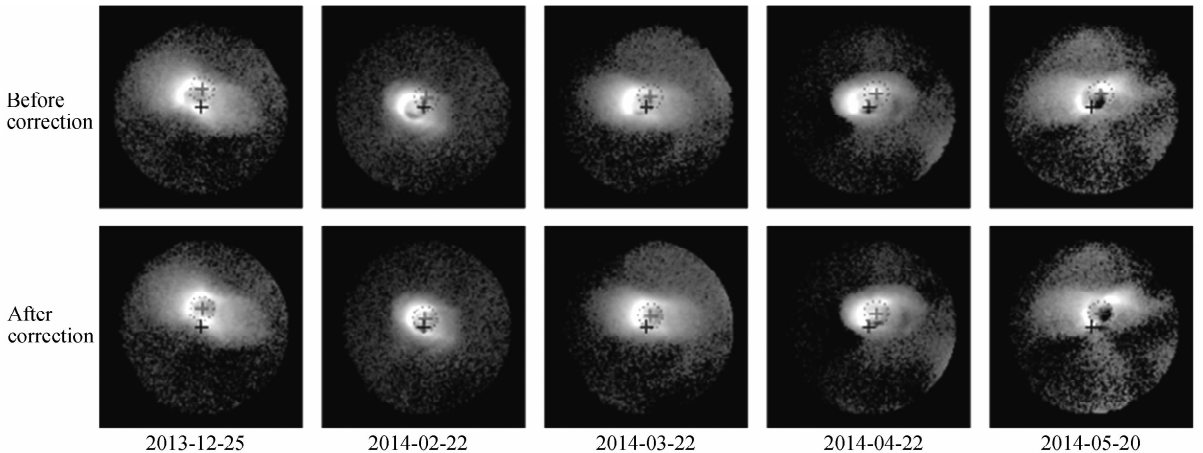


图 7 EUVC 影像纠正结果 (示例)

Fig. 7 Correction of original EUVC images (samples)

按照 2.2 节的流程解算 $P_1 \sim P_4$ 及光轴指向在 SM 坐标系中的几何定位结果, 根据该结果对光轴指向在 EUVC 原始影像的位置进行校正, 校正效果如图 7.

选取了不同时期拍摄的 EUVC 影像进行了相机光轴对应位置的校正, 并重新截取 15° 圆视场的影像数据, 如图 7, 其中第一行为校正前影像, 第二行为校正后影像. 同样地, 影像中实线十字代表影像中心位置 (即 EUVC 光轴指向), 虚线圆中心十字代表根据光轴指向、着陆器位置的几何定位结果解算的地球质心位置 (即地心位置 1). 可以看出, 通过相机光轴对应位置的校正, 所截取的 EUVC 影像整体发生了平移, 平移后几何定位结果解算的地心位置与影像识别方法解算的地心位置吻合, 即位于影像椭圆光斑区域的中心, 满足科学应用的需求.

4 结论

本文介绍了 CE-3 极紫外相机的工作原理、涉及的坐标系统及其转换关系, 在此基础上研究了极紫外相机的几何定位方法, 并进行了几何定位精度分析. 解算结果表明, 几何定位能够为极紫外相机影像科学应用提供高精度的地心位置信息, 并且能够根据影像的几何定位结果对原始影像数据中相机光轴指向对应的位置进行校正, 确保影像数据的可信性和科学价值.

参考文献

- [1] CARPENTER D L. Remote sensing the Earth's plasmasphere [J]. *Radio Science Bulletin*, 2004, **308**(1): 13-29.
- [2] HE Fei, ZHANG Xiao-xin, CHEN Bo, *et al.* Calculation of the extreme ultraviolet radiation of the earth's plasmasphere [J]. *Science China Technological Sciences*, 2010, **53**: 200-205.
- [3] LI Chun-lai, MU Ling-li, ZOU Xiao-duan, *et al.* Analysis of the geomorphology surrounding the Chang'E-3 landing site [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, **14**(12): 1514-1529.
- [4] HU An-wen, ZHANG Zu-xun. Discussion on strict geometric model based on affine transformation for remote sensing image with high resolution[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, **31**(2): 104-107.
胡安文, 张祖勋. 对高分辨率遥感影像基于仿射变换的严格几何模型的讨论[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2006, **31**(2): 104-107.
- [5] ZHANG Li, ZHANG Jix-ian, CHEN Xiang-yang, *et al.* Block-adjustment with SPOT-5 imagery and sparse GCPs based on RFM[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, **38**(4): 302-310.
张力, 张继贤, 陈向阳, 等. 基于有理多项式模型 RFM 的稀少控制 SPOT-5 卫星影像区域网平差[J]. *测绘学报*, 2009, **38**(4): 302-310.
- [6] LUO Xiao-bo, LIU Qiang, LIU Qin-huo. Exterior orientation elements' Bayesian estimation model under insufficient ground control[C]. Beijing: 18th International conference on Geoinformatics, 2010.
- [7] SHENG Qing-hong, JI Ting, LIU Wei-wei, *et al.* Geopositioning line-array CCD images with dual quaternion[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, **17**(10): 1319-1326.
盛庆红, 姬亭, 刘微微, 等. 对偶四元数阵遥感影像几何定位[J]. *中国图象图形学报*, 2012, **17**(10): 1319-1326.
- [8] ZHI Xi-yang, ZHANG Wei, HOU Qing-yu. Effects of geometric specification difference on stereoscopic mapping for dual-linear-array CCD camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4): 425-429.
智喜洋, 张伟, 候晴宇. 两线阵 CCD 相机几何指标差异对立体测绘的影响[J]. *光子学报*, 2012, **41**(4): 425-429.
- [9] YAN Li, MA Zhen-ling, WANG Qiong-jie, *et al.* Geopositioning for optical satellite images using spatial triangulated network[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, **40**(7): 938-942.
闫利, 马振玲, 王琼洁, 等. 利用空三定位网进行光学卫星影像几何定位[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2015, **40**(7): 938-942.
- [10] FENG Jian-qing, LIU Jian-jun, HE Fei, *et al.* Data processing and initial results from the CE-3 extreme ultraviolet camera[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, **14**(12): 1664-1673.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 30112-2013, 月球空间坐标系[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [12] 刘学富. 基础天文学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [13] 叶淑华, 黄斌. 天文地球动力学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2000.
- [14] ARCHINAL B A, A'HEARN M F, BOWELL E, *et al.* Report of the IAU working group on cartographic coordinates and rotational elements: 2009[J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2011, **109**: 101 - 135.
- [15] Space physics data facility, NASA. coordinate calculator[EB/OL]. <http://sscweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/CoordCalculator.cgi>
- [16] HE Fei, ZHANG Xiao-Xin, CHEN Bo, *et al.* Reconstruction of the plasmasphere from Moon-based EUV images[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**: A11203.