

DOI:10.13203/j.whugis20150162



文章编号:1671-8860(2018)01-0133-05

# 嫦娥三号月基光学望远镜几何定位精度分析

严 韦<sup>1,2</sup> 刘建军<sup>1,2</sup> 任 鑫<sup>1,2</sup> 王奋飞<sup>1,2</sup>

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:**介绍了嫦娥三号月基光学望远镜的工作原理、涉及的坐标系统及其转换关系,研究探测数据的几何定位方法,并通过算例分析几何定位精度。研究结果显示,通过几何定位能够得到误差小于  $0.2^\circ$  的天体天文坐标,解算精度优于月基光学望远镜的指向精度。

**关键词:**嫦娥三号;月基光学望远镜;几何定位;坐标转换

**中图法分类号:**P226

**文献标志码:**A

嫦娥三号(Chang'E-3, CE-3)月球探测器于北京时间 2013-12-14 成功着陆于雨海地区虹湾东部一个直径约 430 m 撞击坑的东缘( $19.51^\circ\text{W}$ ,  $44.12^\circ\text{N}$ )<sup>[1]</sup>,由着陆器和巡视器两部分组成。月基光学望远镜(Moon-based ultraviolet telescope, MUVT)是 CE-3 着陆器搭载的 4 套科学探测仪器之一。借助月球没有大气干扰、自转速度慢、平台稳定等优势,月基光学望远镜在近紫外波段对含致密星的相互作用双星等天文变源进行了长期连续监测,揭示了各种复杂的光变行为,并对指定天区开展了巡天工作,实现了我国探月工程二期“月基天文观测”的科学目标<sup>[2-3]</sup>。

月基光学望远镜位于 CE-3 着陆仓内部,通过二维转台实现对天体的指向及步进跟踪<sup>[2]</sup>,收集来自天空的辐射,并通过光学系统波长滤波后在焦平面上成像,安装在焦平面上的电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)探测器及后续电路完成光信号到电信号的转换及对模拟信号的量化过程,将指定天区的图像数据记录下来。为了精确确定 CCD 影像上星像对应观测天体的天文坐标,需要进行几何定位,即利用观测天体的天文坐标与 CCD 影像上的星像位置之间的一一对应关系,根据指向反射镜二维转台的俯仰、方位角读数、CE-3 着陆器的月面位置和姿态,以及各坐标系统的连接参数等,基于一系列的坐标转换原则,解算星像对应观测天体的天文坐标。本文将介绍

CE-3 月基光学望远镜的工作原理、涉及的坐标系统及其转换关系,研究探测数据的几何定位方法,利用实测影像数据解算观测天体的天文坐标,分析几何定位精度。

## 1 CE-3 月基光学望远镜

### 1.1 月基光学望远镜任务简介

月基光学望远镜在 CE-3 着陆后的月昼期间择机工作,在指向反射镜的配合下,月基光学望远镜可完成定点观测和巡天观测两种观测任务,实现在近紫外波段进行月基光学天文观测的科学目标<sup>[2-3]</sup>。

望远镜指向反射镜由二维转台搭载,转台方位轴与俯仰轴两轴正交(如图 1 所示),可实现方位和俯仰两个自由度的转动,指向精度  $0.2^\circ$ 。受 CE-3 着陆舱大小的影响,二维转台俯仰角的有效变化范围为  $20^\circ\sim 38^\circ$ ,方位角的有效变化范围为  $-28^\circ\sim 23^\circ$ 。在这样的情况下,如何实现高精度的影像数据几何定位,对于精确解算星像对应观测天体天文坐标、控制二维转台进行天体精确指向及步进跟踪、顺利完成月基光学望远镜的探测任务等都具有十分重要的意义。

### 1.2 坐标系统及其转换关系

月基光学望远镜的观测过程涉及多种坐标系,严格定义各坐标系并实现它们之间的精确

收稿日期:2015-11-30

资助项目:国家自然科学基金(41490635, 41304021, 41374012);中国科学院国家天文台青年人才基金。

第一作者:严韦,博士,助理研究员,主要从事月球探测、月球遥感数据处理等领域的研究。yanw@nao.cas.cn

通讯作者:任鑫,博士,副研究员。renx@nao.cas.cn

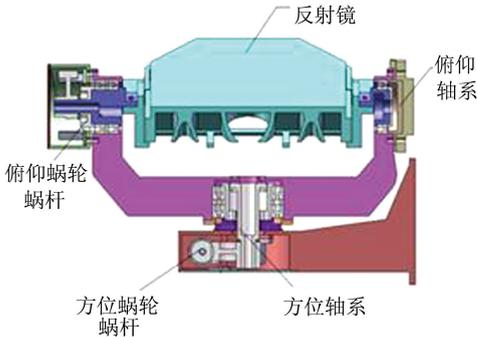


图1 月基光学望远镜转台结构

Fig.1 Structure of MUVT Turntable

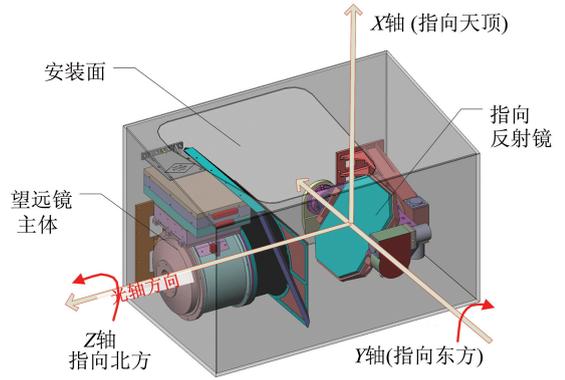


图2 月基光学望远镜本体坐标系

Fig.2 Body-Fixed Coordinate System of MUVT

转换,是进行探测数据几何定位的关键。

1) 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<sup>[4]</sup>,右手笛卡尔直角坐标系(以下简称右手系)。坐标由平赤经和平赤纬表示,记做 $(\alpha, \delta)$ 。月基光学望远镜的观测天体在此坐标系中描述。

2) 月固坐标系。采用国际天文学联合会(International Astronomical Union, IAU)推荐的平地球/极轴坐标系<sup>[4]</sup>,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(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 $(\lambda, \delta)$ 。CE-3着陆器月面位置、姿态在此坐标系中定义。

3) 望远镜本体坐标系(如图2所示)。原点为望远镜反射镜的不动点,理想情况下,坐标系Z轴为反射镜的南北方向旋转轴,实现镜面法线的方位旋转,与光轴平行,取向北为正;Y轴为反射镜的东西方向旋转轴,实现反射镜法线的高度旋转,取向东为正,X轴与Z轴和Y轴构成右手系。此处,坐标系的正北、正东指向与CE-3着陆器在月面上的位置有关,进一步考虑望远镜安装参数、着陆器在月面上的姿态等参数,可实现望远镜本体坐标系与月固坐标系之间的相互转换。坐标称为望远镜本体方位角和本体俯仰角,记做 $(\omega, \theta)$ 。

实际应用中,定义反射镜法线指向和光轴(Z轴)重合时,本体俯仰角为 $90^\circ$ ,定义反射镜法线在子午面(Z-X平面)时,本体方位角为 $0^\circ$ ,逆时针转向Z、Y轴增加方向时的角度为正。

4) 望远镜本体像场理想坐标系。原点为望远镜的光学主点,3个坐标轴的指向和望远镜本体坐标系平行。规定在此坐标系中,处于理想焦面的星像经心射投影后均处在一个切平面内,其

切点为Z轴和理想焦面的交点,星像在切平面内沿经度和纬度方向的坐标用 $(\xi, \eta)$ 表示。此坐标系为过渡坐标系,描述了像场内目标的理想位置,即不考虑光学系统畸变、焦面倾斜和不均匀等情况对星像实际位置的影响,用于建立望远镜本体坐标系和望远镜 CCD 量度坐标系之间的联系。

5) 望远镜 CCD 量度坐标系。原点为经过 CCD 零点、垂直于且距离 CCD 靶面一倍焦距处的点,X轴为 CCD 象素阵列的行方向,Y轴为 CCD 象素阵列的列方向,Z轴垂直于 CCD 靶面向里与X轴和Y轴构成右手系。坐标用 $(x, y)$ 表示,其中 $x, y$ 为星像在影像中的行、列号。CCD 影像中星像的实际位置在此坐标系中描述。

由于CE-3月基光学望远镜的指向精度有限( $0.2^\circ$ ),理论上低于 $18''$ 的天文效应影响均可被忽略,因此几何定位过程中可以认为以上所有坐标系原点重合。本文选取月球质心作为各坐标系的原点,对于观测太阳系外的恒星而言,由此引起的误差仅在亚毫角秒量级。

各坐标系的相互转换关系如图3所示,反之亦然。其中,观测天体日心J2000.0平地球赤道坐标系与月心J2000.0平地球赤道坐标系之间的周年光行差等系统修正可根据天文公式解算得到;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,建立旋转矩阵所需的月球天平动等参数可通过JPL DE421精密行星历插值得到;9参数 $(a_{11}, a_{12} \dots a_{33})$ 用于建立月固坐标系到望远镜本体坐标系的转换矩阵,由星上定标确定,考虑了月基光学望远镜在CE-3着陆器上的安装参数、着陆器在月固坐标系下位置、姿态等;平面反射定律、心射投影等坐标转换遵循严格的光线几何关系;6底片参数 $(a, b, c, a', b', c')$ 为本体像场理想坐标系到 CCD 量度坐标系的转换参数,同样由星上定标确定。

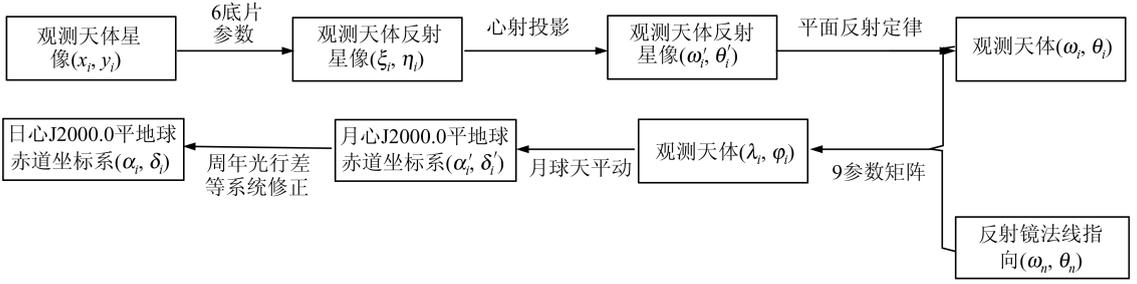


图 3 各坐标转换关系

Fig.3 Conversion Relationship of Various Coordinate Systems

根据以上坐标转换关系,可以确定影像数据的几何定位方法,精确解算 CCD 影像中星像对应观测天体的天文坐标。

## 2 月基光学望远镜几何定位

### 2.1 几何定位流程

1) 根据望远镜 CCD 量度坐标系的星像量测结果,构建观测天体在望远镜 CCD 量度坐标系下的观测矢量  $V_{\text{foc}}$  :

$$V_{\text{foc}} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \times D_s \\ J \times D_s \\ -f \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $(I, J)$  为图像的行号和列号,范围为  $(1\ 024 \times 1\ 024)$ ;  $D_s = 13\ \mu\text{m}$  为像元尺寸大小;  $f = 562.5\ \text{mm}$  为月基光学望远镜的焦距。

2) 根据  $V_{\text{foc}}$  和 6 底片参数,计算观测天体在望远镜本体像场理想坐标系下的观测矢量  $V_{\text{lut}}$  :

$$V_{\text{lut}} = \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ a' & b' & c' \\ 0 & 0 & f \end{bmatrix}^{-1} V_{\text{foc}} \quad (2)$$

式中,  $(a, b, c, a', b', c')$  即为 6 底片参数,初始值为星上标定结果。然而,实测数据解算结果显示星上标定结果将引起观测天体赤经、赤纬最大约  $0.9^\circ$  的解算误差,大于转台指向精度,且呈现非系统性。因此,本文利用最小二乘原理<sup>[5-6]</sup>对 6 底片参数进行了重新标定,以满足探月工程和科学应用的需求。

3) 根据  $(\xi, \eta)$  和心射投影转换关系,计算观测天体经平面镜反射后的星像在望远镜本体坐标系的观测矢量  $V'_{\text{lut}}$  :

$$V'_{\text{lut}} = \begin{bmatrix} \cos\omega' \cos\theta' \\ \sin\omega' \cos\theta' \\ \sin\theta' \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\omega' = \arccos\left(\frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}}\right) \quad (4)$$

$$\theta' = \arcsin\left(\frac{1}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2 + 1}}\right)$$

式中,  $(\omega', \theta')$  为经平面镜反射后的星像在望远镜本体坐标系的球面坐标。

4) 根据  $V'_{\text{lut}}$  和平面反射定律,计算观测天体在望远镜本体坐标系中的观测矢量  $V_T$  :

$$V_T = \frac{2 \times (V'_{\text{lut}} \cdot n) \times n - V'_{\text{lut}}}{|2 \times (V'_{\text{lut}} \cdot n) \times n - V'_{\text{lut}}|} \quad (5)$$

式中,  $n$  为望远镜本体坐标系中月基光学望远镜反射镜的法线矢量:

$$n = \begin{bmatrix} \cos\omega_n \cos\theta_n \\ \sin\omega_n \cos\theta_n \\ \sin\theta_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中,  $\omega_n$  为观测时的转台方位角度;  $\theta_n$  为观测时的转台高度角,即转台俯仰角的余角 ( $\theta_n = 90^\circ - \text{转台俯仰角}$ )。

5) 根据  $V_T$  和坐标转换 9 参数,计算观测天体在月固坐标系下的观测矢量  $V_{\text{ler}}$ 。

$$V_{\text{ler}} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}^{-1} V_T \quad (7)$$

式中,  $(a_{11}, a_{12} \dots a_{33})$  即为坐标转换 9 参数,由星上标定确定。

6) 根据  $V_{\text{ler}}$  计算观测天体在月心 J2000.0 平地球赤道坐标系下的观测矢量  $V_{\text{mj2000}}$ <sup>[7,8]</sup> :

$$V_{\text{mj2000}} = (R_X(-0.30'') R_Y(-78.56'') \cdot R_Z(-67.92'') R_Z(\psi) R_X(\theta) R_Z(\varphi))^{-1} V_{\text{ler}} \quad (7)$$

式中,  $R_X, R_Y, R_Z$  是月固坐标系分别绕 X、Y、Z 轴进行右手旋转获得的正交旋转矩阵;  $(\psi, \theta, \varphi)$  为月球物理天平动参数,通过 JPL DE421 精密行星星历插值得到。

7) 在  $V_{\text{mj2000}}$  解算结果基础上进行观测天体相

对于月球质心的自行和视向运动、月球周年视差、太阳引起的光线引力偏折、月球周年光行差等系统误差修正<sup>[9-10]</sup>,最终可以计算观测天体日心 J2000.0 平地球赤道坐标系下的观测矢量  $V_{sj2000}$ ,进而解算观测天体的天文赤经、赤纬。

### 2.2 几何定位精度分析

通过几何定位能够解算月基光学望远镜影像数据中星像对应观测天体在日心 J2000.0 平地球赤道坐标系中的赤经和赤纬,解算精度要求优于二维转台指向精度,即  $0.2^\circ$ 。截至 2015 年 5 月,月基光学望远镜是 CE-3 唯一仍在正常工作的科学载荷,每个月昼都将获取大量的影像数据,本文随机选取一幅月基光学望远镜实测影像,提取影像中的星像坐标进行几何定位精度分析,由于月基光学望远镜工作平台稳定,数据处理过程中所有影像数据采用的几何定位算法及流程均相同,

随机选取的影像数据的几何定位结果具有一定的代表性。

实验数据由探月工程地面应用系统提供(见表 1),该数据观测时间为 2013-12-18 T 11:50:52 (UTC),望远镜二维转台方位角为  $-82098''$ ,俯仰角  $95404''$ ,坐标转换所需的 9 参数为 2013-12-27 的星上定标结果,6 底片参数为最小二乘原则下的标定结果,分别如表 2、表 3 所示。需要指出,表 1 中观测天体的赤经、赤纬为各天体的实际位置,是后期根据影像中星像的相对位置关系进行天体识别,并查询第谷第二星表获得的(总位置精度  $60\text{ m}''$ ),并非几何定位算法的实时解算结果,本文将此作为分析几何定位精度的标准;星像坐标  $(x, y)$  为望远镜 CCD 量度坐标系下的量测值,即星像在影像中的行号和列号;星像坐标  $(512.00, 512.00)$  处为影像中心,对应光轴指向。

表 1 月基光学望远镜星上观测数据实例

Tab.1 Example of MUVT Measured Data

观测天体赤经/ $(^\circ)$	观测天体赤纬/ $(^\circ)$	星像坐标 $x$ /像素	星像坐标 $y$ /像素
236.988 197	56.143 330	512.00	512.00
238.068 817	55.826 904	105.89	193.75
236.644 012	55.475 067	116.84	857.24
236.803 985	55.392 322	31.13	821.52
236.876 556	56.616 893	855.45	404.42
236.948 059	56.109 874	496.26	538.00

表 2 月基光学望远镜 6 底片参数最小二乘标定结果

Tab.2 Calibration Results of 6 Image Parameters Based on Least Squares Principle

$a$	$b$	$c$	$a'$	$b'$	$c'$
0.556 576 2	0.001 017 9	0.006 655 0	0.003 403 4	0.563 627 1	0.006 656 4

表 3 月基光学望远镜坐标转换 9 参数(2013-12-27 星上标定结果)/ $(^\circ)$

Tab.3 Calibrated Results of 9 Parameters on 2013-12-27/ $(^\circ)$

$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$	$a_{31}$	$a_{32}$	$a_{33}$
0.703 74	-0.232 80	0.675 28	0.325 13	0.944 15	-0.014 33	-0.644 45	0.233 97	0.738 58

如各坐标系转换关系正确,转换参数足够精确,星像坐标的几何定位结果应与观测天体的实际坐标吻合。从表 4 中可以看出,星像的几何定位结果与观测天体实际赤经、赤纬的偏差呈现系统性,且均小于  $0.2^\circ$ ,优于二维转台指向精度。为了进一步验证几何定位方法的正确性,本文另

外选取了 2013-12-18 拍摄的 74 幅影像共 740 个星像进行了几何定位精度统计,结果显示,观测天体赤经解算结果的平均偏差为  $0.006^\circ$ ,赤纬解算结果的平均偏差为  $-0.111^\circ$ 。该偏差是由于星上俯仰机构的度数和其实际转动角度不一致造成的,反映了望远镜二维转台的指向精度。

表 4 月基光学望远镜几何定位结果

Tab.4 Geometric Positioning Results of MUVT Observations

观测天体赤经	观测天体赤纬	几何定位结果赤经	几何定位结果赤纬	结果偏差赤经	结果偏差赤纬
236.988 197	56.143 330	237.007 154	55.963 356	0.019	-0.180
238.068 817	55.826 904	238.081 835	55.646 998	0.013	-0.180
236.644 012	55.475 067	236.664 223	55.295 058	0.020	-0.180
236.803 985	55.392 322	236.822 887	55.213 334	0.019	-0.179
236.876 556	56.616 893	236.895 542	56.437 863	0.019	-0.179
236.948 059	56.109 874	236.967 038	55.929 858	0.019	-0.180

可见,利用本文研究的几何定位方法及 6 底片参数的最小二乘标定结果,能够解算满足应用需求的观测天体天文坐标。

### 3 结 语

本文介绍了 CE-3 月基光学望远镜的工作原理、涉及的坐标系及其转换关系,研究了月基光学望远镜影像数据的几何定位方法,利用实测影像数据进行了几何定位精度分析。结果显示,根据最小二乘标定的 6 底片参数结果和本文研究的几何定位方法,能够获得精度优于  $0.2^\circ$  的观测天体天文坐标,满足探月工程和科学应用的需求。

#### 参 考 文 献

[1] Li Chunlai, Mu Lingli, Zou Xiaoduan, et al. Analysis of the Geomorphology Surrounding the Chang'E-3 Landing Site[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, 14(12): 1 514-1 529

[2] Wen Weibin, Wang Fang, Li Chunlai, et al. Data Preprocessing and Preliminary Results of the Moon-based Ultraviolet Telescope on the CE-3 Lander[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, 14(12): 1 674-1 681

[3] Jia Yingzhuo, Dai Shuwu, Wu Ji, et al. Chang'E-3 Lander's Scientific Payloads[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2014, 34(2): 219-225 (贾瑛卓, 代树武, 吴季, 等. 嫦娥三号着陆器有效载荷[J]. 空间科学学报, 2014, 34(2): 219-225)

[4] Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 30112-2013 The Lunar Coordinate System[S]. Beijing: Standards Press of Chi-

na, 2013 (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)

[5] Tao Benzao, Qiu Weining, Huang Jiana, et al. Error Theory and Foundation of Surveying Adjustment [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009 (陶本藻, 邱卫宁, 黄加纳, 等. 误差理论与测量平差基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009)

[6] Wei Erhu, Yin Zhixiang, Li Guangwen, et al. On 3D Coordinate Transformations with Virtual Observation Method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(2): 152-156 (魏二虎, 殷志祥, 李广文, 等. 虚拟观测值法在三维坐标转换中的应用研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版. 2014, 39(2): 152-156)

[7] 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]. *Celest Mech Dyn Astr*, 2011, 109:101-135

[8] Liu Jingnan, Wei Erhu, Huang Jinsong, et al. Applications of Selenodesy to Lunar Detection [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(2): 95-100 (刘经南, 魏二虎, 黄劲松, 等. 月球测绘在月球探测中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(2): 95-100)

[9] Liu Xuefu. Fundamental Astronomy [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004 (刘学富. 基础天文学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004)

[10] Ye Shuhua, Huang Cheng. Astrogeodynamics [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 2000 (叶淑华, 黄城. 天文地球动力学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2000)

## Accuracy Analysis of CE-3 Moon-Based Ultraviolet Telescope Geometric Positioning

YAN Wei<sup>1,2</sup> LIU Jianjun<sup>1,2</sup> REN Xin<sup>1,2</sup> WANG Fenfei<sup>1,2</sup>

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:** The Moon-based ultraviolet telescope (MUVT) is one of the payloads on the Chang'E-3 (CE-3) lunar lander. Because of the advantages of having no atmospheric disturbances and the slow rotation of the Moon, many scientific researches which cannot be completed on Earth can be carried out by MUVT such as making long-term continuous observations of a series of important celestial objects in the near ultra-violet band (245~340 nm) Geometric positioning of MUVT observation data is

(下转第 166 页)

multi-scale representation. On the basis of related research, a graph match approach is proposed to recognize the typical letter-like patterns in building groups. Typical letter-like pattern templates are extracted and analyzed, and selected as elementary units and described by a attributed relational graph using attribute and structure parameters. A template library was established. Buildings to be abstracted and reduced are translated into field model based on the attributed relational graph. Typical letter-like patterns are recognized by solving the imprecise sub-graph isomorphism problem with the Ullman algorithm. Experiments show that this approach is effective, feasible, and practical for typical letter-like pattern recognition and the results agree with human spatial cognition, providing a new concept in cartographic generalization.

**Key words:** cartographic generalization; building groups; typical letter-like pattern; graph match; pattern recognition

**First author:** GONG Xianyong, PhD candidate, specializes in cartographic generalization and spatial data mining. E-mail: gongxygis@whu.edu.cn

**Corresponding author:** WU Fang, PhD, professor. E-mail: wufang\_630@126.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41471386, 41301524; the Open Research Fund Program of State Key Laboratory of Geo-information Engineering, No.SKLGIE2013-M-4-6.

.....  
(上接第 137 页)

crucial for the successful implementation of moon-based astronomical observations, which is one of scientific objectives of China's second phase lunar exploration mission, by accurately obtaining the celestial coordinates of each star image in the telescope images. In this paper, working principle and related coordinate systems for MUVT of CE-3 lander will be introduced. Then the algorithm of geometric positioning for MUVT observations will be researched and the positioning accuracy will be evaluated. The results show that high-precision astronomical coordinates within  $0.2^\circ$  can be obtained by the geometric positioning algorithm studied in this paper.

**Key words:** Chang'E-3 mission; the Moon-based ultraviolet telescope; geometric positioning; coordinate conversion

**First author:** YAN Wei, PhD, assistant researcher, specializes in lunar exploration and planetary remote sensing. E-mail: yanw@nao.cas.cn

**Corresponding author:** REN Xin, PhD, associate researcher. E-mail: renx@nao.cas.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41490635, 41304021, 41374012; the Young Researcher Grant of National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences.