0254-6124/2018/38(2)-239–10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

PU Junyu, ZHENG Yong, CHEN Shaojie, LI Chonghui, WANG Dingwei, HE Donghan. Geocentric position extraction algorithm for Earth sensor image of lunar rover (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2018, **38**(2): 239-248. DOI:10.11728/cjss2018.02.239

月球车地球敏感器图像地心位置提取算法 *

蒲俊宇[1] 郑 勇[1] 陈少杰[1] 李崇辉[1]
王鼎蔚[2] 何东汉[1]

1(信息工程大学地理空间信息学院 郑州 450001)

2(西安卫星测控中心 西安 710043)

摘 要 地球是月球上可视半径最大的天体, 且在天球上运动范围较小, 不存在升降现象. 当月球车在月球对地面区域活动时, 利用地球敏感器对地球成像可实现月球车长期自主天文导航. 地球图像地心位置提取是利用地球敏感器进行天文导航的关键技术之一, 直接决定了地球敏感器的观测精度. 本文通过研究地球敏感器镜头投影模型分析地球成像规律, 提出一种不受地相变化约束的地球敏感器图像地心位置提取算法, 采用取半搜索法和循环搜索法两步实现地球真实边缘线的充分筛选, 并基于此拟合地心位置. 半物理仿真实验校验结果表明, 本算法能针对不同地相图像有效提取地球中心, 外符合平均精度约为 $9.78''$~$16.68''$, 在实验条件随机改变的情况下, 地心位置外符合精度标准差互差最大不超过 $0.98''$.

关键词 天文导航, 地球敏感器, 地相, 地心位置, 半物理仿真

中图分类号 V 448.22

Geocentric Position Extraction Algorithm for Earth Sensor Image of Lunar Rover

PU Junyu[1] ZHENG Yong[1] CHEN Shaojie[1] LI Chonghui[1]
WANG Dingwei[2] HE Donghan[1]

1(*Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou* 450001)

2(*Xi'an Satellite Control Center, Xi'an* 710043)

Abstract The Earth is the largest visible celestial body on the moon, whose range of motion on the celestial sphere is small. Moreover, it has no phenomenon of rise and set. When lunar rover is exploring on the moon surface facing toward the Earth, the Earth sensor can be used to photograph the Earth, thus achieving long term autonomous celestial navigation. Geocentric position extraction algorithm for Earth image is one of the key techniques of celestial navigation using Earth sensor, which directly determines the precision of the sensor. In this paper, the Earth imaging law is analyzed by studying the projection model of Earth sensor lens. An algorithm for extracting the geocentric

* 国家自然科学基金项目资助 (11673076, 41604011, 41704006)
2017-04-02 收到原稿, 2017-10-09 收到修定稿
E-mail: pyf1992@126.com

position of the Earth sensor image free from Earth phase change is presented. Two steps are proposed to realize full screening of the real edge of the Earth, including semi search method and cyclic search method, and then geocentric position can be fitted. The semi-physical simulation experiments show that the algorithm can effectively extract geocentric positions for different phase images and it earns the external average accuracy of 9.78″∼16.68″. Under the circumstance of random change of experimental conditions, the maximum difference of standard deviations of external accuracy exceeds no more than 0.98″.

Key words Celestial navigation, Earth sensor, Earth phase, Geocentric position, Semi-physical simulation

0 引言

月球车自主导航系统是其提高自身生存能力并顺利开展科学任务的基础和关键. 随着深空探测技术的发展, 任何单一导航方法都不能满足月球车高精度实时导航控制的需求 [1,2]. 2013 年 12 月 14 日 21:11 BLT, 中国探月工程第二阶段登月探测器嫦娥三号成功软着陆于月球雨海西北部, 15 日 04:35 BLT, 月面巡视探测器 (玉兔号月球车) 与着陆器成功分离, 并陆续完成一系列科学探测任务. 玉兔号月球车导航系统采用惯性导航加里程计的航迹推算法与基于双目相机的视觉导航相结合的方式 [3,4]. 然而航迹推算法存在系统累积误差, 且易受车轮打滑的影响; 视觉导航受月球表面无规则景物纹理特征不明显的制约, 存在图像匹配困难的缺点. 地球敏感器是一种通过观测地心方向矢量确定载体航向、姿态及位置信息的图像传感器. 基于地球敏感器的天文导航方法具有自主性强、连续性好、可靠性高、无误差累积的优点. 此外, 在月球对地面大约 90°W−90°E 范围内, 始终能观测到地球, 而且地月之间没有任何天体干扰, 地球可观测性很强. 月球车在这一区域范围内探测时, 地球是稳定可靠的天文导航观测目标 [5]. 因此, 基于地球敏感器的天文导航方法可为中国月球车导航技术发展提供参考.

地球敏感器图像地心位置提取是月球车利用地球实现天文导航的关键技术, 其目的是确定地球中心在图像中的准确成像位置, 为后续解算过程提供基础参数. 地球敏感器得到的图像因日、地、月三者空间关系变化存在地相周期性变化, 绝大部分时间呈现出一个由晨昏分界线与地球真实边缘组成的缺面, 这种多变的地相给地心确定带来了困难. 文献 [5] 将晨昏分界线部分视为粗差, 采用非线性模型抗差最小二乘估计方法提取地球敏感器图像中心, 在一定程度上削弱了解算精度对未知参数近似值的依赖. 然而该方法的提取精度随地球圆盘缺失程度的增加不断下降, 当缺失严重时解算不收敛. 由于月球也有月相的变化, 因此可以借鉴解决绕月卫星紫外月球敏感器月心矢量求解问题的原理和方法. 文献 [6] 依据月球晨昏分界线亮度低于真实边缘的特点, 采用辐射线检测法判断月球边缘. 然而该方法在月球视半径较小的情况下鲁棒性不强, 不适合用于月球车地球敏感器地心确定. 文献 [7] 根据月球边缘点到月心的欧氏距离在月球半径附近出现最大集中的情况, 提出拟合寻优算法, 较好地解决了月心确定问题, 但却没有给出不同月相图像的月心提取精度. 文献 [8] 通过寻找月球图像对称轴的方法确定月球真实边缘的三点, 进而通过圆拟合确定月心位置. 该方法仅用三点拟合月心, 边缘提取的粗差会大大降低中心提取精度.

本文提出一种能够适应地相变化的月球车地球敏感器图像中心提取算法, 利用自行开发的仿真平台生成地相, 使用 HASSELBLAD HCD 4/28 镜头与 FLI ML50100 深空 CCD 组成地球敏感器, 对仿真地相成像. 图像分析处理结果证明了该方法的有效性.

1 地球投影原理

1.1 镜头投影模型

在月球上观测地球, 地球角半径约为 0.9°∼1°, 且地球的方位角和高度角变化范围较小, 没有升降现象. 因此, 地球敏感器镜头的选择对视场大小没有过高要求. 除部分超广角及鱼眼镜头外, 一般视场镜

头投影模型均为针孔成像模型, 成像原理基于高斯光学, 满足物点、光学中心、像点三点共线, 属于理想投影模型, 成像时仅存在部分加工和装配原因造成的光学畸变, 模型上没有畸变. 这里实验使用的 HASSELBLAD HCD 4/28 镜头即采用了针孔投影模型. 针孔投影模型成像公式为

$$r = f\tan\theta. \tag{1}$$

其中, θ 为像点对应的半视场角, f 为镜头焦距, r 为像平面内投影点到像主点的距离.

1.2 地相变化

地球本身不发光也不透明, 在太阳光的照射下, 面向太阳的半球为昼半球, 背向太阳的半球为夜半球, 二者交界边缘线为晨昏分界线. 随着日、地、月相对位置的变化, 地球昼半球有时面向月球, 有时部分面向月球, 有时背向月球, 这样就出现了地相变化. 地相由晨昏分界线与地球真实边缘线组成, 一般呈现为一个缺面.

1.3 地球成像规律

由圆锥曲线几何定义可知, 用平面截取圆锥面时, 若平面不过锥顶且不平行于任一母线, 则截线为椭圆; 若平面不过锥顶且平行于一条母线, 则截线为抛物线; 若平面不过锥顶且平行于两条母线, 则截线为双曲线的一支 [9]. 如图 1 所示, 由于地球真实边缘一般为半圆, 根据针孔成像投影规律, 其光路经投影后形成半个圆锥面, 与像平面相交形成圆锥曲线. 图 1 中 α 为地球角半径, 由上述定义, 主光轴与地心矢量夹角 (范围为 0°~90°) 小于 $90°-\alpha$ 时, 该圆锥曲线为椭圆; 等于 $90°-\alpha$ 时该圆锥曲线为抛物线; 大于 $90°-\alpha$ 时该圆锥曲线为双曲线的一支. 根据 1.1 节介绍, 在月球上观测地球, 其角半径很小, 因此可以认为地球真实边缘经针孔投影在像平面上形成椭圆, 而晨昏分界线形成不确定曲线.

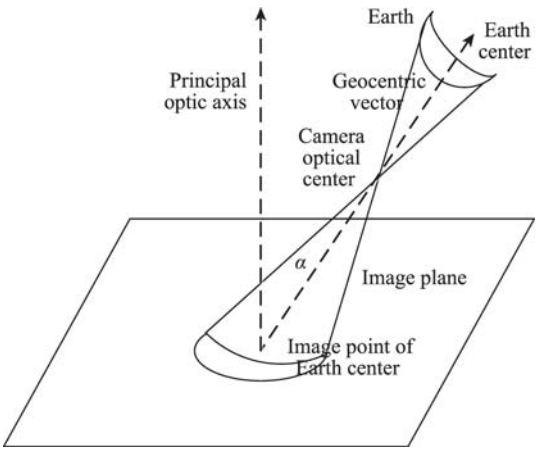


图 1 针孔投影地球成像

Fig. 1 Schematic of pinhole projection Earth imaging

2 地心提取算法

2.1 地相边缘检测方法

为保证对地球中心的高精度拟合, 需要对地相进行亚像素级边缘检测. 已有文献从理论和实验数据上证明了 Zernike 矩的亚像素边缘检测算子对加性噪声不敏感, 具有很好的抗噪性能和边缘定位精度 [10,11]. 此外, 为提高边缘检测效率, 可将像素级边缘检测 Sobel 算子与 Zernike 矩算子结合使用, 称其为 Sobel-Zernike 矩算子. 采用 Sobel 算子对图像进行像素级边缘粗检测, 然后对每一个像素级边缘点某领域范围的像素灰度值与事先推导的模板进行卷积运算得到 Zernike 矩, 从而实现边缘的亚像素级精确检测 [12−14]. 为兼顾精度和效率, 这里使用 Sobel-Zernike 矩算子实现地相图像边缘检测, 并采用 Gao 等推导的 7×7 阶 Zernike 矩模板系数 [15].

2.2 地心位置拟合方法

地相由晨昏分界线与地球真实边缘线组成, 其中仅有地球真实边缘线可用于拟合提取地心位置. 根据 1.3 节所得的地球投影成像规律, 为筛选地球真实边缘线并以此拟合地心位置图像坐标, 引入直接最小二乘椭圆拟合方法 [16], 其基本思想如下.

椭圆的一般方程为

$$\begin{aligned} &\alpha x^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0,\\ &b^2 - 4ac < 0. \end{aligned} \tag{2}$$

为计算方便, 取

$$4ac - b^2 = 1, \tag{3}$$

引入系数向量

$$\boldsymbol{A} = (a, b, c, d, e, f)^{\mathrm{T}}, \tag{4}$$

引入坐标向量

$$\boldsymbol{P} = (x^2, xy, y^2, x, y, 1), \tag{5}$$

令

$$F(x, y) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f, \tag{6}$$

则 $F(x,y)$ 可改写为向量形式, 即

$$\boldsymbol{F}_A(\boldsymbol{P}) = \boldsymbol{P}\boldsymbol{A}. \tag{7}$$

定义 $|\boldsymbol{F}_A(P_i)|$ 为坐标 (x_i,y_i) 到拟合椭圆曲线 $F(x,y)=0$ 的代数距离, 其反映了点 (x_i,y_i) 处的拟合残差. 因此所有参与拟合点的代数距离向量模可作为拟合内符合精度指标, 使该值最小的向量 $\boldsymbol{A}$ 即为椭圆系数直接最小二乘拟合值.

设有 M 个点 $(x_1,y_1)\cdots(x_M,y_M)$ 参与椭圆拟合, 令

$$\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i^2 & x_iy_i & y_i^2 & x_i & y_i & 1 & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_M^2 & x_My_M & y_M^2 & x_M & y_M & 1 & \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{8}$$

则拟合求解问题可改写为 [17]

$$\min_A \|\boldsymbol{D}\boldsymbol{A}\|, \quad \text{s.t.} \quad \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}\boldsymbol{A} = 1. \tag{9}$$

该约束条件下的最小化问题可以依据广义特征值问题求解:

$$\begin{cases} \boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{A} = \lambda\boldsymbol{C}\boldsymbol{A}, \\ \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}\boldsymbol{A} = 1. \end{cases} \tag{10}$$

可以证明, 该广义特征值系统有且仅有一个正特征值 [18], 该特征值对应的特征向量即为所求椭圆系数向量.

2.3 地球真实边缘线筛选方法

为保证地心位置的高精度拟合, 需要充分精确筛选地球真实边缘线. 为此, 基于 Sobel-Zernike 矩算子检测出的地相边缘, 分两步实现地球真实边缘线的筛选, 即利用取半搜索法进行初步筛选, 循环搜索法进行精化筛选.

2.3.1 取半搜索法初步筛选

图 2 为地相变化示意, 其中实线部分为地球真实边缘线, 虚线部分为晨昏分界线. 通常地球真实边缘线长度始终大于晨昏分界线长度, 由于经针孔投影真实边缘线在像平面成像为椭圆线, 晨昏分界线成像为不确定曲线, 取地相边缘点总数的一半作为搜索步长, 以代数距离向量模 (式 9 中 $\|\boldsymbol{D}\boldsymbol{A}\|$) 作为边缘点集合椭圆拟合精度指标, 对应模最小的一半点理论上必属于地球真实边缘线的一部分. 具体实施步骤如下.

(1) 任意取检测出的边缘点总量的连续一半点 $[N/2]$ (取整) 进行椭圆拟合.

(2) 以 $[N/2]$ 为搜索步长, 逐次往前搜索, 直至搜索点与第一次所取点重合, 这样需要进行 N 次椭圆拟合.

(3) 计算 N 次椭圆拟合的代数距离向量模.

(4) 取模最小的一个点集, 该点集属于地球真实边缘线的一部分.

图 3 为 $N=13$ 时的搜索结果.

2.3.2 循环搜索法精化筛选

利用上述方法可以得到地球真实边缘线上的部分点, 如果仅利用这些点去拟合地心坐标会损失部分精度, 尤其是出现图 2(d) 情况时, 晨昏分界线退化, 会损失大部分精度, 需要进一步精化搜索可用的地球真实边缘点. 为此提出了基于代数距离均值的循环搜索法, 其基本思想是在剩余边缘点中, 以代数距离均值为度量, 取代数距离小于均值的点作为地球

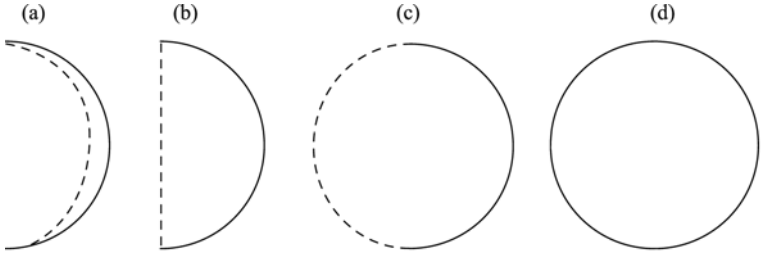


图 2 地相变化示意

Fig. 2 Schematic of Earth phase change

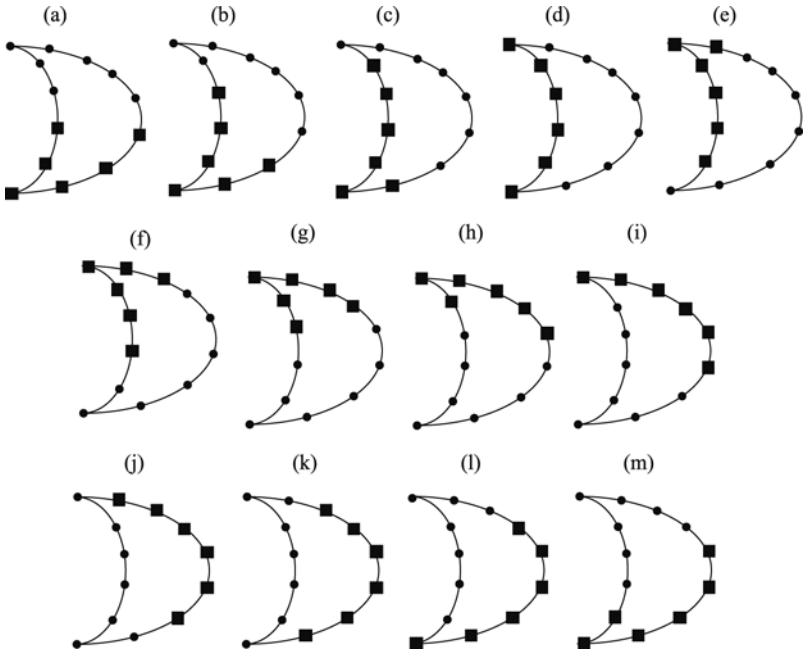


图 3 $N = 13$ 时取半搜索法结果

Fig. 3 Schematic of semi-search method at $N = 13$

边缘点并循环筛选. 具体实施步骤如下 (见图 4).

(1) 设边缘点总数为 N 个, 采用取半搜索法初步筛选出的 $[N/2]$ 个地球真实边缘点分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \cdots, (x_i, y_i), \cdots, (x_{[N/2]}, y_{[N/2]})$, 拟合得到的椭圆系数向量为 A_1, 令

$$\boldsymbol{P}_i = (x_i^2, x_i y_i, y_i^2, x_i, y_i, 1), \tag{11}$$

则这些点到拟合椭圆的代数距离均值为

$$\bar{d}_1 = \frac{1}{[N/2]} \sum_{i=1}^{[N/2]} |P_i A_1|. \tag{12}$$

(2) 设剩余某点为 (x_i, y_i), 则

$$\boldsymbol{P}_t = (x_t^2, x_t y_t, y_t^2, x_t, y_t, 1), \tag{13}$$

该点到拟合椭圆的代数距离为

$$d_t = |\boldsymbol{F}_{A_1}(\boldsymbol{P}_t)| = |\boldsymbol{P}_t \boldsymbol{A}_1|. \tag{14}$$

(3) 若 $d_t < \bar{d}_1$, 则认为点 (x_t, y_t) 为地球真实边缘点.

(4) 设步骤 3 筛选出 W 个符合条件的点, 则可得到 $[N/2] + W$ 个地球真实边缘点, 令其分别为

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \cdots, (x_i, y_i), \cdots, (x_{[N/2]+W}, y_{[N/2]+W}).$$

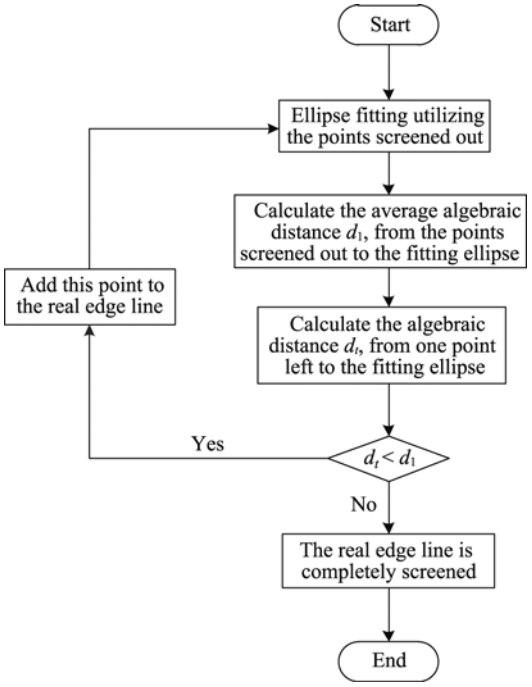


图 4 循环搜索法流程

Fig. 4 Flow chart of cyclic search method

设由这些点进行第二次椭圆拟合得到的系数向量为 A_2, 同理, 这些点到拟合椭圆的代数距离均值为

$$\bar{d}_2 = \frac{1}{[N/2] + W} \sum_{i=1}^{[N/2]+W} |P_i A_2|. \tag{15}$$

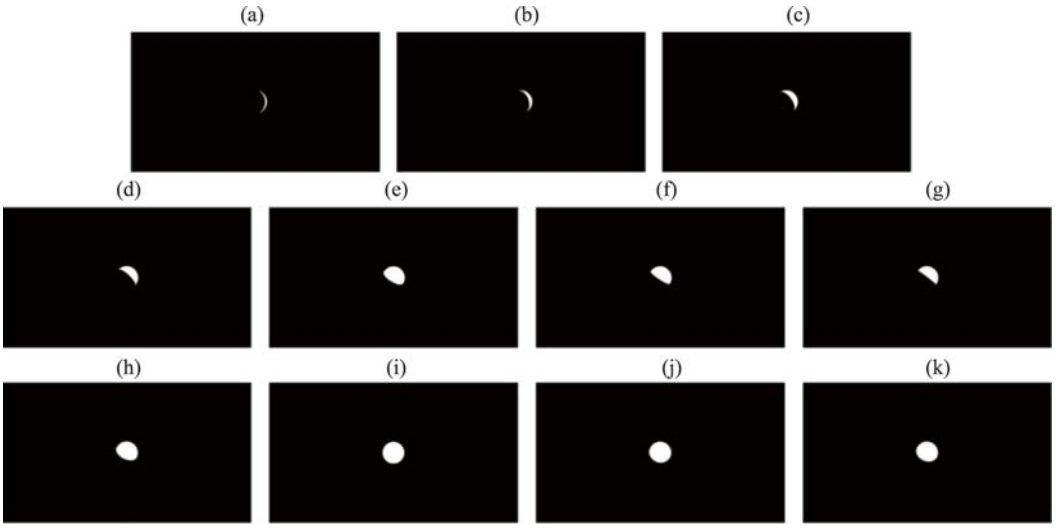


图 5 仿真地相结果

Fig. 5 Simulation images of Earth phases

(5) 参考步骤 2 和 3, 计算剩余边缘点到第二次拟合椭圆的代数距离并判断其是否为地球真实边缘点. 以此类推, 直至所有剩余边缘点到拟合椭圆的代数距离均大于已筛选出的地球真实边缘点到拟合椭圆的代数距离均值为止, 此时地球真实边缘点可视为筛选完全.

3 实验校验

考虑到月球周边没有大气层, 地球敏感器在月球成像时没有成像色散的影响, 地相边缘轮廓一般较为理想. 为此提出利用地球敏感器对仿真地相拍照成像完成半物理仿真实验, 以校验算法的有效性并评估精度.

3.1 地相仿真

为完成实验校验开发了地相仿真平台, 该平台可依据时间、位置、仿真屏幕尺寸以及地球敏感器光学中心与仿真屏幕几何中心距离实时改变地球成像半径, 以保持地球角半径的真实性.

图 5 所示为仿真地相结果, 保持地球敏感器光学中心与仿真屏幕几何中心相距 1.32 m, 生成月球某地 11 幅地相图, 基本模拟了地相变化过程的一个周期, 每幅图对应物方空间半视场角为 21.09°.

3.2 地球敏感器

为构建地球敏感器, 这里选用哈苏公司研制的 HASSELBLAD HCD 4/28 镜头, 如图 6 所示. 其标称焦距为 28.9 mm, 水平方向标称视场为 83°. CCD选用美国 FLI 公司生产的 ML50100, 其具有灵敏度高、噪声低、分辨率高的特点, 分辨率为 8176×6132 pixel, 像元尺寸为 6 μm×6 μm.



图 6 地球敏感器和待拍摄的仿真地相

Fig. 6 Earth sensor and simulation Earth phases waiting to be shot

3.3 中心提取

利用地球敏感器对生成的仿真地相拍照, 并对得到的图像进行分析处理, 结果如图 7 所示. 图 7 中粗线部分为筛选出的地球真实边缘线, 细线部分为剩余晨昏分界线, 叉号中心为利用地球真实边缘线拟合得到的地心位置. 从图 7 可直观看出, 利用该算法提取地球敏感器图像地心位置, 可以准确检测出不同地相图像边缘并成功筛选出地球真实边缘实现地心位置拟合.

3.4 精度评估

仿真地相时地心准确位置已知, 为评估算法的外符合精度, 仿真时将地心位置所在像素点亮, 使用地球敏感器对其成像, 并利用灰度质心法提取中心, 所得坐标可作为外符合精度参考基准. 依据 HASSELBLAD HCD 4/28 镜头针孔投影模型, 可计算理想状况下 FLI ML50100 CCD 一个像素对应的半视场角分辨率. 由式 (1) 可得

$$\theta = \arctan\left(\frac{r}{f}\right). \tag{16}$$

对式 (16) 取微分可得

$$\Delta\theta = \frac{f}{f^2 + r^2}\Delta r. \tag{17}$$

式 (17) 建立了像方空间坐标与物方空间坐标的数量关系, 可将地心拟合位置的像方偏差换算为物方偏差. 由于 CCD 像元尺寸为 $6\,\mu\text{m}\times 6\,\mu\text{m}$, 即一个像素对应 CCD 上 $6\,\mu$m, 而 f 为 28.9 mm, 根据式 (17) 可知, 像主点位置的轻微偏差对半视场角分辨率的计算影响很小, 因此可以认为像主点位于 CCD 像平面中心. 表 1 为中心提取的外符合精度统计结果, 其中 r 为地心外符基准位置与像主点的距离, Δr 为地心拟合位置的像方偏差, $\Delta\theta$ 为其物方偏差, time_edge 为 Matlab2014 环境下图像处理亚像素边缘提取耗时, time_total 为图像处理总耗时. 图 8 为物方偏差统计结果.

从表 1 可知, 在物方空间, 地球中心拟合位置外符合精度范围为 3.73″~15.75″. 从图 8 可知, 11 幅图像地心拟合位置外符合精度总体上呈现先升高再降低最后再升高的趋势. 如图 5(a)~(c) 所示, 晨昏分界线与地球真实边缘线非常接近时, 二者分界点附近的少量晨昏分界线边缘点被错误筛选为地球真实边缘点参与中心提取, 导致中心提取外符合精度较低; 如图 5(d)~(g) 所示, 随着地球明亮部分面积增加, 晨昏分界线与地球真实边缘线逐渐分离, 这时本文算法能较准确地筛选出真实边缘点, 故外符合精度升高; 如图 5(h)~(j) 所示, 当晨昏分界线与地球真实边缘线分离至其接近圆弧时, 二者分界点附近的少量晨昏分界线边缘点被错误筛选为地球真实边缘点参与中心提取, 导致外符合精度降低; 如图 5(k) 所示, 当晨昏分

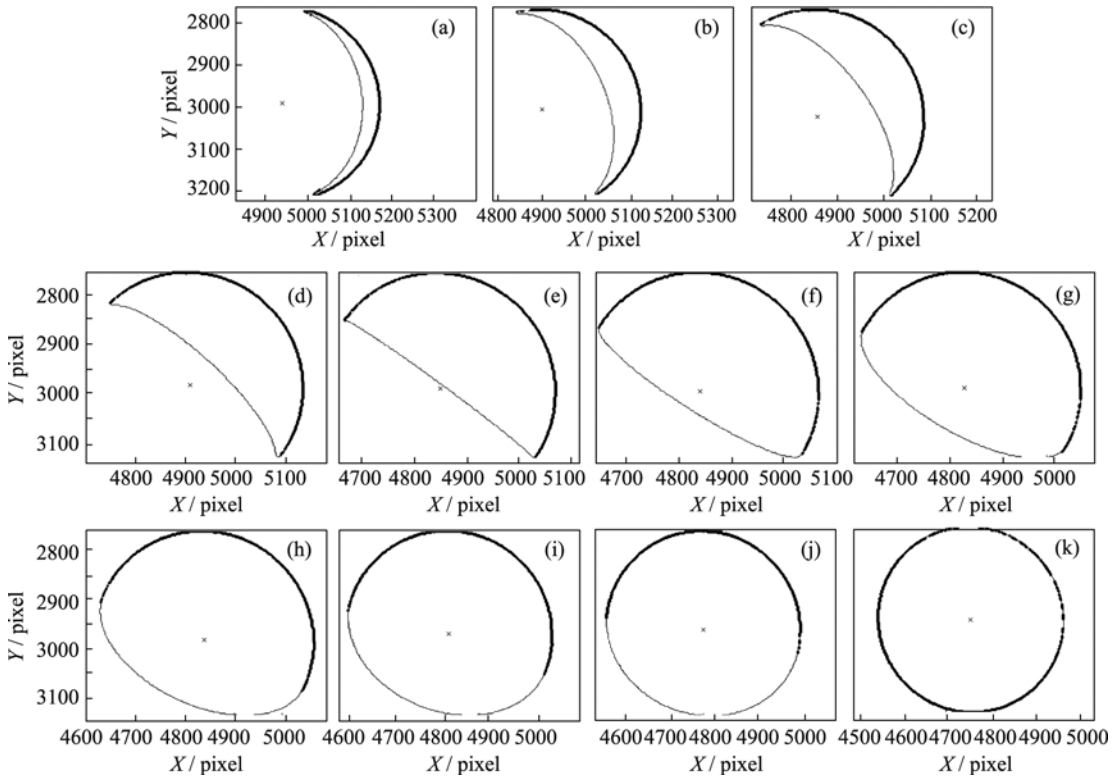


图 7 地球真实边缘点筛选过程

Fig. 7 Screening real edge points of the Earth

表 1 外符合精度统计结果

Table 1 External accuracy statistical results

图号	r/pixel	Δr/pixel	$\Delta\theta/('')$	time_edge/s	time_total/s
(a)	872.63	0.31	12.86	2.2152	2.9467
(b)	885.96	0.29	12.02	2.0207	2.9469
(c)	882.58	0.18	7.46	2.0039	3.0203
(d)	868.75	0.23	9.54	2.0086	2.9246
(e)	877.67	0.11	4.56	2.0606	2.9613
(f)	866.56	0.25	10.38	2.1024	2.9987
(g)	886.34	0.22	9.12	2.0714	3.0060
(h)	885.23	0.27	11.19	1.9655	3.0428
(i)	876.45	0.36	14.93	2.0295	3.0678
(j)	883.36	0.38	15.75	2.1037	3.1303
(k)	869.29	0.09	3.73	2.0157	3.1555

注 (a)~(k) 对应图 5 和图 7 中 11 幅子图.

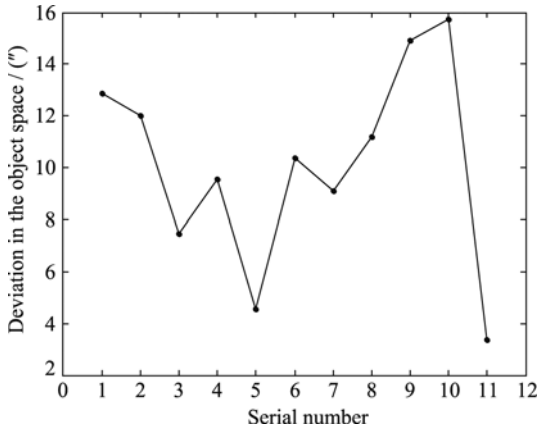


图 8 地心位置物方偏差统计结果

Fig. 8 Object space deviation of geocentric position

界线完全退化时, 地相图像边缘点均为地球真实边缘点, 故中心提取外符合精度升高. 此外, 在上述大致趋势下, 11 幅图像的中心提取外符合精度存在一定的随机性, 这可能是由于拍摄的地相图像边缘点坐标粗差造成的, 这些粗差包括相机成像噪声、镜头畸变引入的成像随机粗差以及 Sobel-Zernike 矩算子边缘检测方法引入的边缘检测随机粗差等.

11 幅图像处理平均耗时 3.0183 s, 其中亚像素边缘提取平均耗时 2.0543 s, 占总耗时的 68.1%. 因此算法的主要计算量在于亚像素边缘提取. 事实上, 除算法本身因素外, 图像处理耗时与程序运行环境、CCD 分辨率、感光性能及输出图像格式等因素均有关, 在应用中应根据实际需要合理调配.

为测试算法的稳定性, 排除特例实验的影响, 随机变换时间、位置信息以及地球敏感器光学中心到仿真屏幕几何中心的距离进行实验, 记录每次实验的外符合最低精度、最高精度、平均精度以及精度标准差, 统计结果列于表 2. 从表 2 可知, 本文算法在半物理仿真实验条件随机改变的情况下, 地心位置提取外符合平均精度浮动范围为 $9.78''$~$16.68''$, 各次实验地心位置外符合精度标准差互差最大不超过 $0.98''$. 这些结果表明, 本文算法在半物理仿真条件下具有较高精度和一定程度的鲁棒性.

3.5 精度分析

在航天任务中需要综合考虑仪器特性的影响. 本文半物理仿真实验使用的镜头与 CCD 不一定适用于实际航天工程应用, 而镜头焦距与 CCD 分辨率对地心位置提取精度均有影响. 以图 5(a) 为例, 当 CCD 不变而镜头焦距变化时, 提取精度变化如图 9(a) 所示; 当镜头不变, CCD 分辨率为原分辨率 n 倍, 即像元尺寸变为原尺寸 $1/n$ 时, 提取精度变化如图 9(b) 所示.

由图 9 可知, 地心位置提取精度理论上随镜头焦距的拉长与 CCD 分辨率的提升而提高. 在航天任务中建议根据实际情况选择合适的镜头与 CCD.

4 结论

在分析地球敏感器投影成像规律的基础上, 利用

表 2 实验统计结果

Table 2 Experimental statistical results

实验次数	图幅数	距离/m	最低精度/(″)	最高精度/(″)	平均精度/(″)	标准差/(″)
实验 1	11	1.32	15.75	3.73	10.14	3.84
实验 2	12	1.12	13.89	2.12	9.78	3.23
实验 3	10	0.97	17.23	1.89	13.20	4.14
实验 4	13	1.57	18.12	5.23	12.11	3.19
实验 5	11	1.79	16.10	5.13	11.73	3.55
实验 6	14	2.04	19.12	3.23	16.68	4.17
实验 7	12	2.27	18.21	4.21	13.23	4.06
实验 8	11	2.46	14.31	6.43	10.92	3.28
实验 9	13	2.69	18.23	6.32	14.43	3.53
实验 10	14	2.81	16.76	5.29	12.39	3.65

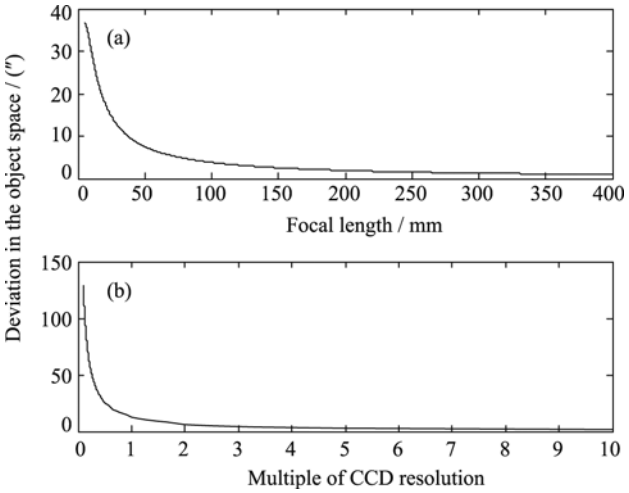


图 9 地心提取精度影响因素

Fig. 9 Influence factors of Earth center extraction accuracy

Sobel-Zernike 矩算子对地球敏感器图像进行亚像素级边缘检测, 分两步筛选地球真实边缘线并以此拟合提取地心位置. 基于自主开发的仿真平台生成不同地相, 并使用高灵敏度地球敏感器进行半物理仿真实验, 实验结果证明了本文算法的有效性和鲁棒性. 该算法可为基于地球敏感器的月球车天文导航系统提供技术参考, 并为丰富月球车自主导航手段, 实现未来全源高精度导航提供可能的思路.

此外, 在地球上及环月轨道上观测月球同样有月相变化, 月相图像月心位置提取是地基测月天文导航及绕月卫星测月自主天文导航中会遇到的问题. 当太阳被遮挡时, 其图像也呈现一个缺面, 退化的太阳图像质心提取是测日天文导航中会遇到的问题. 本文算法对上述问题均具有一定借鉴意义.

参考文献

[1] FANG Jiancheng, NING Xiaolin. Deep Space Probe Autonomous Celestial Navigation Methods [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2010: 1-9 (房建成, 宁晓琳. 深空探测器自主天文导航方法 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010: 1-9)

[2] NING Xiaolin, FANG Jiancheng. A new autonomous celestial navigation method for deep space probe and its observability analysis [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, **25**(4): 286-292 (宁晓琳, 房建成. 一种深空探测器自主天文导航新方法及其可观测性分析 [J]. 空间科学学报, 2005, **25**(4): 286-292)

[3] MA Youqing. Research on Navigation and Localization of CE-3 Lunar Rover [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014 (马友青. 嫦娥三号月面巡视探测器导航定位技术研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2014)

[4] WU Weiren, ZHOU Jianliang, WANG Baofeng, *et al.* Key technologies in the teleoperation of Chang'E-3 "Jade Rabbit" rover [J]. *Sci. Sin. Inform.*, 2014, **44**(4): 425-440 (吴伟仁, 周建亮, 王保丰, 等. 嫦娥三号"玉兔号"巡视器遥操作中的关键技术 [J]. 中国科学: 信息科学, 2014, **44**(4): 425-440)

[5] YUE Fuzhan, CUI Pingyuan, CUI Hutao, *et al.* Earth sensor and accelerometer based autonomous heading detection algorithm research of lunar rover [J]. *J. Astron.*, 2005, **26**(5): 553-557 (岳富占, 崔平远, 崔祜涛, 等. 基于地球敏感器和加速度计的月球车自主定向算法研究 [J]. 宇航学报,

2005, **26**(5): 553-557)

[6] WANG Yanbao, WANG Li, CAI Wei. The solution of moon center vector and distance for Ultra-Violet lunar sensor [J]. *Control Eng. China*, 2005, (3): 9-15 (王艳宝, 王立, 蔡伟. 紫外月球敏感器月心矢量及月心距求解 [J]. 控制工程, 2005, (3): 9-15)

[7] WANG Li, HAO Yuncai. Three axis attitude determination method research for lunar imaging sensor halfway to the moon [C]//Academic Conference of Committee of Deep Space Exploration Technology Chinese Society of Astronautics. Beijing: Chinese Society of Astronautics, 2005 (王立, 郝云彩. 月球成像敏感器奔月段三轴定姿方法研究 [C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员第二届学术会议论文集. 北京: 中国宇航学会, 2005)

[8] PARK K J, MORTARI D. Planet or moon image processing for spacecraft attitude estimation [J]. *J. Electron. Imaging*, 2008, **17**(2): 023020

[9] Mathematics Handbook Writing Group. Mathematics Handbook [M]. Beijing: Higher Education Press, 1979: 289-290 (数学手册编写组. 数学手册 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1979: 289-290)

[10] GHOSAL C, MEHROTRA R. Detection of composite edges [J]. *IEEE Trans. Image Proc.*, 1994, **3**(1): 14-25

[11] YANG Bingbing. Study on Sub-Pixel Image Edge Detection Method [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015 (杨兵兵. 亚像素图像边缘检测方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015)

[12] QU Yingdong, CUI Chengsong, CHEN Shanben, *et al*. A fast subpixel edge measurement method based on Sobel-Zernike moment operator [J]. *Opto-Electron. Eng.*, 2003, **30**(5): 59-61 (曲迎东, 崔成松, 陈善本, 等. 利用 Sobel-Zernike 矩算子的快速亚像素边缘检测方法 [J]. 光电工程, 2003, **30**(5): 59-61)

[13] YANG Peng, XIE Li, LIU Jilin. Zernike moment based high-accuracy sun image centroid algorithm [J]. *J. Astron.*, 2011, **32**(9): 1963-1970 (杨鹏, 谢立, 刘济林. 基于 Zernike 矩的高精度太阳图像质心提取算法 [J]. 宇航学报, 2011, **32**(9): 1963-1970)

[14] ZHAN Yinghu, ZHENG Yong, ZHANG Chao, *et al*. Image centroid algorithms for sun sensors with super wide field of view [J]. *Acta Geodaet. Cartograph. Sin.*, 2015, **44**(10): 1078-1084 (詹银虎, 郑勇, 张超, 等. 超大视场太阳敏感器图像质心提取算法 [J]. 测绘学报, 2015, **44**(10): 1078-1084)

[15] GAO Shiyi, ZHAO Mingyang, ZHANG Lei, *et al*. Improved algorithm about subpixel edge detection of image based on Zernike orthogonal moments [J]. *Acta Automat. Sin.*, 2008, **34**(9): 1163-1168 (高世一, 赵明扬, 张雷, 等. 基于 Zernike 正交矩的图像亚像素边缘检测算法改进 [J]. 自动化学报, 2008, **34**(9): 1163-1168)

[16] FITZGIBBON A W, PILU M, FISHER R B. Direct least squares fitting of ellipses [C]//Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition. Vienna, Austria: IEEE, 1996: 253-257

[17] HALÍŘ R, FLUSSER J. Numerically stable direct least squares fitting of ellipses [C]//Proceedings of the 6th International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization. Plzen, Bory: WSCG, 1998

[18] GANDER W. Least squares with a quadratic constraint [J]. *Numer. Math.*, 1980, **36**(3): 291-307