0254-6124/2014/34(6)-858–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Mu Rongjun, Gao Mingyang, Liu Bin, Hu Ying. Research on characterized graphics matching method of autonomous optical navigation for lunar explorer (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(6): 858-866, doi:10.11728/cjss2014.06.858

探月飞行器软着陆光学自主导航的特征图形匹配方法研究 *

穆荣军[1] 高铭阳[1] 刘 斌[1] 胡 颖[2]

1(哈尔滨工业大学航天学院 哈尔滨 150001)

2(湖北三江航天红峰控制有限公司 孝感 432000)

摘 要 对基于特征图形匹配的月面精确着陆光学导航方法进行了研究, 包括图像特征点提取、特征图形构建以及特征图形匹配. 利用特征点间相对距离不变的特性, 确立特征点的连通规则, 解决存在平移、旋转和放缩等情况下的图形匹配问题. 利用多幅月面真实图片对算法进行仿真测试, 仿真结果验证了其有效性. 以所提出的特征图形匹配方法为基础, 设计仿真算例对导航方法进行验证, 结果表明, 基于特征图形匹配的光学导航方法可实时确定飞行器的位置和速度信息且精度较高, 是适用于探月飞行器精确着陆导航的有效途径.

关键词 特征图形, 图形匹配, 月面着陆, 光学导航

中图分类号 V 416

Research on Characterized Graphics Matching Method of Autonomous Optical Navigation for Lunar Explorer

MU Rongjun[1] GAO Mingyang[1] LIU Bin[1] HU Ying[2]

1(*School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150001)

2(*Hubei Sanjiang Space Hongfeng Control Equipment Company Limited, Xiaogan* 432000)

Abstract This paper focuses on the characterized graphics matching based navigation method of precise landing on the moon, which mainly consists of feature point extracting, characterized graphics constructing and matching. Based on the property that the relative distance between two characterized points is unchanged, by establishing the connected rules of two characterized points, the method is adopted to overcome the problem of graphics matching with translation, rotation and scale changes. The algorithm is tested with multiple real lunar pictures, and the emulational experiment results approve the effectiveness of the method. Navigation method based on the characterized graphics matching is validated by designing a numerical simulation. The simulations reveal that the

* 深空探测国防重点学科实验室开放基金课题项目资助 (HIT.KLOF.2011.078, HIT.KLOF.2012.077)

2013-11-25 收到原稿, 2014-07-24 收到修定稿

E-mail: MY.Gao@hit.edu.cn

method that can gain the position and speed of vehicle with high precision in nearly real-time is an effective solution to lunar precise landing.

Key words Characterized graphics, Graphics matching, Lunar landing, Optical navigation

0 引言

导航技术作为探月飞行器设计的关键技术之一, 近年来逐渐成为研究热点 [1]. 现阶段探月飞行器的导航主要依赖于全球深空网, 但由于飞行器距离地球较远且月球会对飞行器造成遮挡, 基于全球深空网的导航方式无法满足实时性要求 [2]. 传统的惯性导航由于初始误差、测量偏差及测量噪声的存在而导致误差积累, 飞行器最终着陆误差将达到 10 km, 也无法满足精确着陆任务对导航精度的需要 [3]. 因此, 研究飞行器的光学导航不仅可以提高飞行器月面着陆精度, 还可提高飞行器的可靠性与生存能力 [4].

基于特征图形匹配的光学导航系统通过将拍摄的月面图像与飞行器携带的月面特征点数据库进行比对匹配来实现飞行器的自主导航, 其通过对月面图像特征图形的提取实现快速图形匹配, 从而获取飞行器的位置和速度信息. 特征图形匹配方法具有如下优点.

(1) 利用图像特征点的匹配解算探月飞行器的位置和速度, 计算量小, 计算周期短, 适用于快速运动飞行器的位置测量和速度测量.

(2) 提取出的图形信息比较稳定, 不易受到光学效应影响, 不会出现严重降质、模糊和位移的现象, 提高了图像的可用性和匹配成功率.

(3) 图形信息包含多个特征点, 采用多个特征点的联合可以较大幅度提高解算精度.

本文基于光学导航的自主性以及精度不随时间积累等特点, 提出一种基于特征图形匹配的飞行器自主导航方法, 利用图论等理论和方法对传统的图像匹配方法进行改进, 以简化计算, 提高匹配效率和匹配精度, 从而提高导航解算的实时性及精度, 为未来探月飞行器着陆提供一种新的导航方法.

1 月面图像特征点提取

月面图像携带有大量光学信息, 其反映了月球表面的地形地貌特征. 其中最为常见的是陨石坑, 即环形山. 有的环形山信息边缘模糊或破损, 但是相当一部分具有完整边缘, 拥有较为一致的几何形状和清晰轮廓 [5−6], 受光照变化影响小, 作为导航路标易于匹配和跟踪 [7]. 因此, 环形山作为一种最为重要的导航路标, 在月球探测方面得到了研究和应用 [8−9].

假设月面上的环形山均为圆形或近似圆形的椭圆形状, 由于其形状具有对称性, 环形山的中心点位置受光照条件、拍摄方位以及高度影响很小. 将提取出的环形山中心点作为图像特征点具有很好的稳定性. 特征点的提取可以分为以下几个步骤.

步骤 1 边缘检测: 检测月面图像上环形山边缘.

步骤 2 边缘标记: 筛选环形山边缘, 剔除过小的环形山 (< 5 pixel), 并将筛选出的环形山边缘的关键点进行标记.

步骤 3 边缘配对: 将属于同一组的环形山配对.

步骤 4 特征点提取: 根据环形山边缘的关键点计算中心点位置.

1.1 边缘检测及标记

月球表面环形山在太阳光照下可分为两部分: 亮区和暗区. 亮区与暗区之间有明显的分界线, 即像素梯度变化, 通过图像处理, 可以提取出环形山的亮暗边缘. 关于边缘的检测已存在较多成熟的方法, 通过实验比较, 采用 Canny 检测方法对边缘信息进行提取 [10]. Canny 检测法可以检测到图像中灰度变化大的点, 如图 1(a) 所示. 但这些点集并非都是所需要的环形山边缘, 美国喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 的 Yang 等 [5] 提出一种通过约束条件筛选环形山边缘的方法, 具体约束条件如下.

(1) 光照方向与环形山梯度矢量之间的夹角一般小于 90°, 如图 1(a) 所示. 为减少误报, 只选择梯度矢量与光照方向夹角小于 50° 的边缘, 即

$$(G_x S_x + G_y S_y)/(G_x^2 + G_y^2)^{1/2} > 0.64. \tag{1}$$

式中, S_x, S_y 分别为光源方向分量.

(2) 剔除尺寸小于 5 pixel 的环形山和图像中出现的直线.

通过上述两个约束条件对检测出的每一条环形山边缘进行筛选, 筛选结果如图 1(b) 所示. 然后对筛选出的环形山边缘及其关键点按以下方式进行标记.

(1) 标记环形山边缘上的关键点. 如图 2 所示, 每一条环形山边缘有 4 个关键点, 分别为边缘端点 A_1, A_2 以及 A_0 和 B 点. 其中,

$$A_0 = \frac{1}{2}A_1 + A_2. \tag{2}$$

A_0 为边缘端点 A_1, A_2 连线的中心, B 为边缘上所有点坐标的均值, 即该边缘的几何中心.

(2) 标记环形山边缘. 用来判断该边缘弧段属于环形山亮区还是暗区. 通过对月面图像处理的分析可知, 环形山的两个边缘一个为亮区边缘, 一个为暗区边缘, 所以需要对每个边缘 (L) 的亮暗属性进行标记, 亮区边缘标记为 1, 暗区边缘标记为 0. 标记方法为

$$L = \begin{cases} 1, & \text{亮区}(\overrightarrow{A_0B} \text{ 与光源方向相同}); \\ 0, & \text{暗区}(\overrightarrow{A_0B} \text{ 与光源方向背离}). \end{cases} \tag{3}$$

将标记好的环形山边缘所携带的标记信息映射到一个二维数组中, 如表 1 所示. 为边缘配对及特征点的提取做准备, 标记图像仿真结果如图 3 所示.

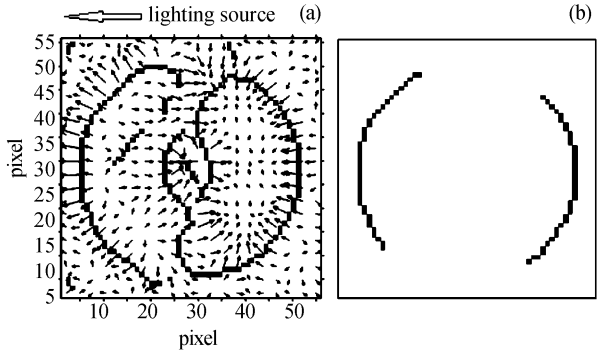

图 1 边缘筛选方法. (a) 光照方向与像素梯度, (b) 边缘筛选仿真结果

Fig. 1 Edge selected method. (a) is direction of lighting source and gradient, and (b) is simulation result of edge selection

1.2 边缘配对及特征点提取

对标记好的亮暗环形山边缘进行配对, 考虑到导航的实时性要求, 需设计一个小的搜索域, 约束条件如下.

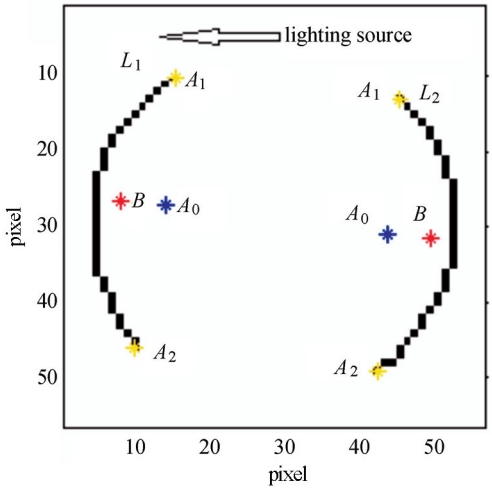

图 2 边缘标记方法

Fig. 2 Edge marking method

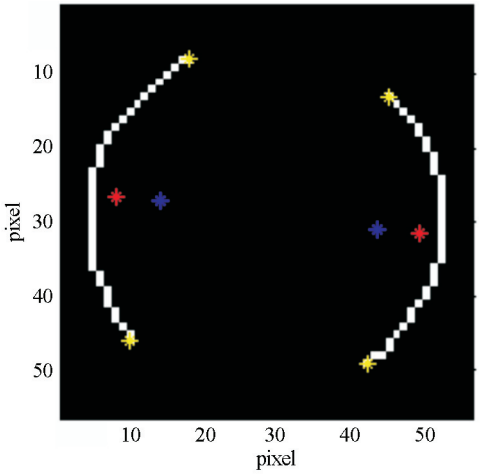

图 3 边缘关键点标记

Fig. 3 Key point marking

表 1 边缘标记信息

Table 1 Edge marking information

边缘序号	A_0 坐标	A_1 坐标	A_2 坐标	B 坐标	亮暗区域	配对标记
1	(14, 27)	(18, 8)	(10, 46)	(8.075, 26.525)	1	1
2	(43.5, 31)	(45, 13)	(42, 49)	(49.237, 31.447)	0	1

(1) 亮边缘与暗边缘长度比例应接近 1, 即

$$1/t < L_1/L_2 < t. \tag{4}$$

式中, L_1, L_2 分别为亮暗边缘长度; t 为大于 1.0 的阈值.

(2) 两个边缘之间的距离 (即两个 B 点间的距离) 既不应太近也不应太远, 而应在 1/2 短边缘长度与二倍长边缘长度之间.

通过以上两个约束条件检测, 环形山的两条边缘得到匹配, 此时可根据边缘像素坐标位置提取环形山的中心点作为特征点, 有

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} x(i)}{n}, \tag{5}$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} y(i)}{n}. \tag{6}$$

式中, (x_0, y_0) 为环形山中心点坐标; (x, y) 为环形山边缘坐标; n 为边缘像素个数. 仿真结果如图 4 所示, 中心点的像素坐标为 (28.75, 29).

2 特征图形匹配

特征图形匹配是光学导航的研究重点, 匹配结果的好坏直接影响到导航精度. 特征图形匹配需先由特征点构造特征图形矩阵, 然后根据特征图形矩阵进行匹配.

2.1 特征图形构造

特征图形的构造主要基于图论的基本原理. 由于图论是根据特征点之间的连通关系对图形矩阵进行表述的, 因而由飞行器光学成像视角改变所引起的图形畸变并不会引起特征点之间连通关系的改变, 因此图论具有解决图形畸变的能力. 由图论可知, 特征图形矩阵构建的关键在于特征点之间连通关系的确定, 本文提出一种利用特征点间相对距离不变的特性确立特征点之间连通规则的特征图形构造方法.

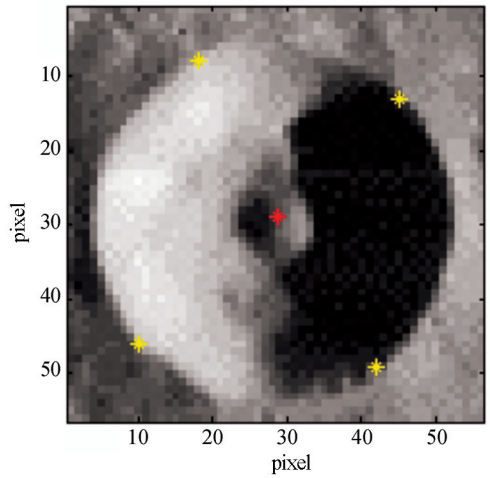

图 4 特征点提取仿真结果

Fig. 4 Simulation result of feature point extraction

由于环形山之间相对距离保持不变, 可据此建立特征点 (即环形山中心点) 之间的距离矩阵

$$\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} d_{1,1} & \cdots & d_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n,1} & \cdots & d_{n,n} \end{bmatrix}. \tag{7}$$

$\boldsymbol{D}$ 中的元素 $d_{i,j}$ 表示第 i 个特征点与第 j 个特征点之间的距离, 有

$$d_{i,j} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}, \tag{8}$$

式中, (x, y) 为特征点坐标.

对需要匹配的两幅月面图片 P_n 和 P_m 分别建立距离矩阵 $\boldsymbol{D}_n$ 和 $\boldsymbol{D}_m$, 下角 n 和 m 为两幅月面图片所包含的特征点个数, 用大小为 $n \times m$ 的计数矩阵 $\boldsymbol{C}_d$ 记录距离匹配信息. 对给定的偏差阈值 ε_d, 用矩阵 $\boldsymbol{D}_n$ 第 i 行中的每个元素与矩阵 $\boldsymbol{D}_m$ 第 j 行的每个元素进行比较, 如果满足

$$\mathrm{abs}[\boldsymbol{D}_n(i,q) - \boldsymbol{D}_m(j,p)] < \varepsilon_d, \tag{9}$$

则在计数矩阵 $\boldsymbol{C}_d$ 中的对应元素 $c(i,j)$ 位置加 1.

对计数矩阵 $\boldsymbol{C}_d$ 每一列中的元素最大值进行筛选排序, 按筛选出的列元素最大值的大小确定特征点之间的连通关系, 具体数学表达式为

$$\boldsymbol{C}_d(i,j) = \begin{bmatrix} c_{1,1} & \cdots & c_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n,1} & \cdots & c_{n,m} \end{bmatrix},$$

$$(i = 1, 2, \cdots, n;\ j = 1, 2, \cdots, m). \tag{10}$$

计数矩阵 $\boldsymbol{C}_d$ 记录两幅月面图片 P_n 和 P_m 的距离匹配信息, 将矩阵 $\boldsymbol{C}_d$ 每一列的元素互相比较, 选择每一列中元素最大值 c_k 组成序列 $\boldsymbol{C}$.

$$c_k = \max(c_{k,1}, c_{k,2} \cdots c_{k,n}) \quad (k = 1, 2, \cdots, m). \tag{11}$$

如果 $c_k < (2/3)\min(m, n)$, 则从 $\boldsymbol{C}$ 序列中剔除该数据, 剩下的 $\boldsymbol{C}$ 序列中的元素个数即为两幅图片匹配

成功的特征点个数. 再将 $\boldsymbol{C}$ 序列中元素按照从大到小的顺序排序, 则每幅图片中特征点的连通规则为: $\boldsymbol{C}$ 序列中数值最大的特征点与数值次最大的特征点之间连通, 依次连通下去. 以此规则构建图片 P_n 的特征图形矩阵 $\boldsymbol{G}_n$ 和图片 P_m 的特征图形矩阵 $\boldsymbol{G}_m$, 有

$$\boldsymbol{G}_n=\begin{bmatrix} g_{1,1} & \cdots & g_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{n,1} & \cdots & g_{n,n} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} g_{a,b}=1, \quad c_a>c_b, c_a\in\boldsymbol{C}, c_b\in\boldsymbol{C}; \\ g_{b,c}=1, \quad c_b>c_c, c_b\in\boldsymbol{C}, c_c\in\boldsymbol{C}; \\ \vdots \\ \text{其他 } g_{i,j}=0. \end{cases} \tag{12}$$

$$\boldsymbol{G}_m=\begin{bmatrix} g_{1,1} & \cdots & g_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m,1} & \cdots & g_{m,m} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} g_{a,b}=1, \quad c_a>c_b, c_a\in\boldsymbol{C}, c_b\in\boldsymbol{C}; \\ g_{b,c}=1, \quad c_b>c_c, c_b\in\boldsymbol{C}, c_c\in\boldsymbol{C}; \\ \vdots \\ \text{其他 } g_{i,j}=0. \end{cases} \tag{13}$$

该连通规则既考虑到特征点之间的位置关系, 又避免了由于个别特征点误匹配造成的匹配误差. 由于采用少量适当的特征点构造特征图形来实现匹配即满足导航解算的要求, 因此采用特征图形匹配的方法能极大减少匹配过程中的计算量, 并且由于图形特征点的相对位置比较稳定, 因而特征图形也比较稳定, 不易受到光学效应及震动等干扰因素影响, 且当采用多个特征点联合的方法时, 将能够进一步提高导航解算的精度.

2.2 仿真算例及分析

为验证特征图形匹配法对于月面环形山的匹配效果, 利用美国月球勘测轨道飞行器 LRO 拍摄的月面图片进行仿真实验分析. 将用于仿真分析的图片 A 经过平移、旋转和放缩得到图片 B, 具体参数列于表 2.

应用特征点提取及特征图形构造方法进行仿真, 结果如图 5 所示. 图 5 中红色点为仿真提取到的图形特征点, 即环形山中心点; 连接特征点的蓝色线段表示特征点之间的连通关系; 这些特征点和连通关系构成了特征图形.

从仿真结果可以看出, 从图片 A 中提取得到 15 个特征点, 从图片 B 中提取得到 18 个特征点, 同一区域的环形山图片经过平移、旋转和放缩变换后, 检测到的特征点有不同之处, 但是两幅图片的连通关系完全相同, 即该区域的特征图形得到了正确匹配. 通过仿真结果和以上分析可知, 特征图形匹配方法是行之有效的.

将拍摄的月面图片与飞行器计算机中所携带的特征点数据库进行匹配, 其中 A 图片作为数据库图片, B 图片为在 A 图片局部区域剪切得到的拍摄图片, 仿真结果如图 6 和图 7 所示. 图 6 为拍摄图片 B

表 2 平移、旋转和放缩参数

Table 2 Parameter of translation, rotation and scale changes

平移/pixel		旋转角度 /(°)	放缩比例
x 方向	y 方向		
10	20	35	1.1

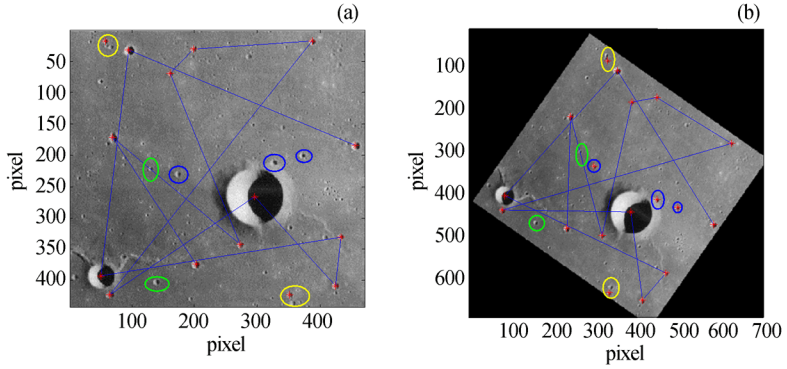

图 5 平移、旋转和放缩后匹配结果. (a) 图片 A, (b) 图片 B

Fig. 5 Matching result of translation, rotation and scale changes. (a) Picture A, (b) Picture B

与数据库图片 A 直接匹配的仿真结果, 图 7 为拍摄图片 B 经过较大旋转及放缩后与数据库图片 A 匹配的结果.

由仿真结果可以看出, 由于图 7 中 B 图片发生了较大的平移旋转变换, 所以构造的特征图形与图 6 不同, 但是两组匹配结果中 B 图片与 A 图片的特征图形完全相同, 即两种情况均能准确匹配, 说明特征图形匹配方法具有稳定性. 同时也间接预示着以其为基础的探月飞行器光学导航方法具有较高的稳定性和可靠性.

以下对算法的计算量及实时性进行仿真分析. 对 128 幅月面图像 (512×512 pixel) 进行特征点提取, 并与其他特征匹配算法 SIFT[11−12] 的仿真时间进行比较, SIFT 算法特征点提取时间数据取自文献 [12], 特征点提取时间列于表 3, 特征图形匹配时间如图 8 所示.

3 导航解算

本文在提出探月飞行器特征图形匹配方法的基础上, 设计提出了一条简化的月面软着陆下降段轨道 [13−14], 进行导航解算, 并通过仿真实验验证该图

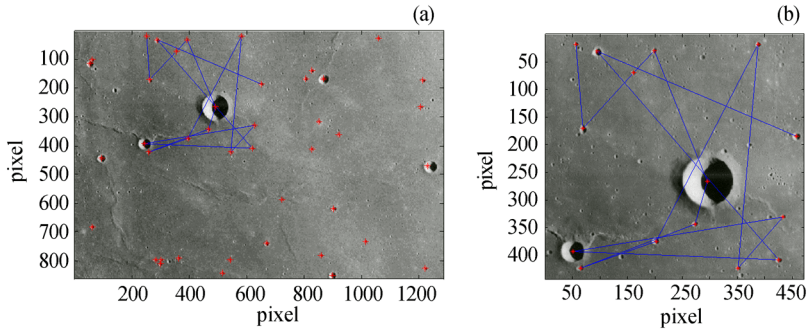

图 6 拍摄图片与数据库图片匹配仿真结果. (a) 图片 A, (b) 图片 B

Fig. 6 Simulation results of image matching. (a) Picture A, (b) Picture B

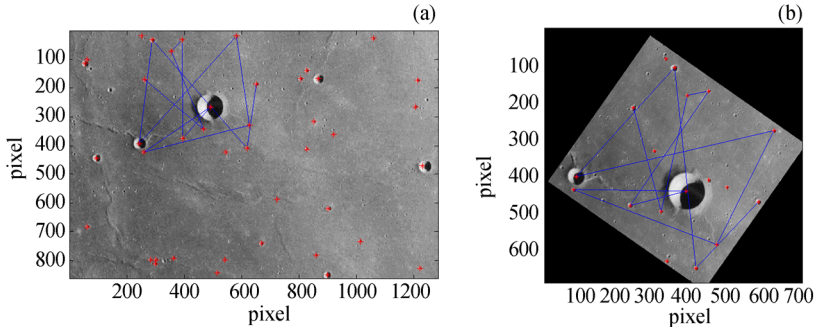

图 7 较大变换后的拍摄图片与数据库图片匹配仿真结果. (a) 图片 A, (b) 图片 B

Fig. 7 Simulation results of larger transformation image matching. (a) Picture A, (b) Picture B

表 3 特征点提取时间

Table 3 Time of feature point extraction

特征点提取算法		最少耗时/s	最多耗时/s	平均耗时/s
SIFT 算法	月球静海图像	2.148	3.739	2.763
	莫斯科海月面图像	2.55	5.071	4.497
	第谷图像	1.859	5.527	3.824
特征图形匹配法	环形山月面图片	0.526 628	1.187 428	0.822 857

形匹配方法的光学导航性能. 实现探月飞行器软着陆需要对飞行器进行几次制动来降低飞行器的速度, 本文设计的轨道为飞行器经过制动后、不考虑制动影响的软着陆下降段轨道 [15]. 由于飞行器速度较小, 基本不会受到月球自转的影响, 所以选取着陆点固连坐标系为导航坐标系 [16]. 月球软着陆下降段轨道初始条件列于表 4, 生成的着陆下降段轨道如图 9 所示.

根据中国探月工程的着陆计划 [17], 选取月球的虹湾区为着陆区, 对虹湾区域的月面图像实时匹配, 图片来源为美国月球勘测轨道飞行器拍摄的虹湾区照片. 获取用于导航解算的实时航拍照片方法为: 设定起始点运动学参数, 按运动学变化规律生成着陆轨道, 以轨道高度为判别条件模拟生成月面图片系列, 如图 10 所示. 图片采集周期为 1 s, 共生成航拍照片 26 幅.

图 10 所示的中央大图片为月球的虹湾区照片, 其中红色标记点为通过上文特征点提取方法提取的环形山中心点, 即特征点. 这些特征点构成了月球虹湾区特征点数据库. 蓝色标记点为导航相机光轴中心在月面的投影点, 所以蓝色标记点组成的轨迹为飞行器航迹在月面的投影. 黄色矩形框框出的区域即导航相机在第 0 秒、第 5 秒、第 10 秒、第 15 秒、第 20 秒和第 25 秒的成像区域.

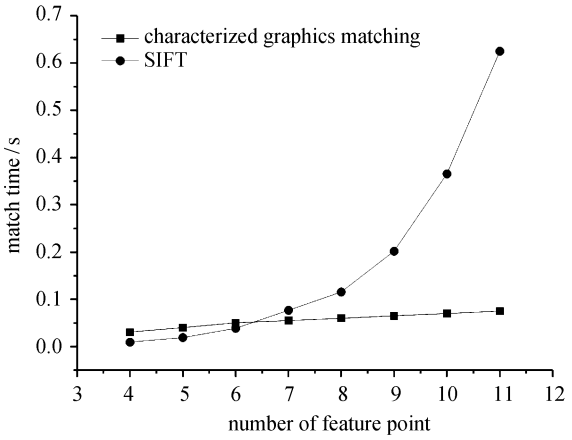

图 8 特征图形匹配时间

Fig. 8 Time of feature graphics matching

表 4 月球软着陆下降段轨道参数

Table 4 Orbital parameters of lunar soft landing

着陆点位置	着陆点坐标系	
	初始位置/m	初始速度/(m·s^{-1})
(35°W, 45°N)	[17 568.2 0 1000]	[500 0 0]

通过生成的月面航拍图片与虹湾区特征点数据库进行匹配, 可以得到航拍照片中心点 (即导航相机光心) 在月面的位置. 由于假设导航相机与飞行器本体坐标系重合, 可以认为导航相机光心的位置即为飞行器的位置. 图 11 给出的是第 0 秒、第 5 秒、第 10 秒、第 15 秒、第 20 秒和第 25 秒的匹配情况. 从仿真结果可以看出, 特征图形匹配方法可以通过构造简单的特征图形达到月面图片快速匹配的目的.

通过已知月面特征点在导航坐标系下的位置坐标, 利用特征点在着陆点固连坐标系中坐标与图像坐标之间的转换关系就可以确定相机光心在导航坐标系下的位置坐标, 从而达到确定飞行器位置坐标的目的. 再利用图形特征点间位移的差分即可获得飞行器的速度信息, 实现探月飞行器的位置速度解算. 仿真结果如图 12 和 13 所示.

从仿真结果可以看出, 位置精度均在 50 m 以内, 速度误差小于 10 m·s^{-1}. 用于导航解算的虹湾区照 片是月球勘测轨道飞行器在 50 km 轨道高度拍摄的分辨率为 100 m 的月面图片. 在实际飞行过程中, 随着飞行器高度的不断下降, 成像分辨率将逐步提高. 当飞行器轨道高度降低至 1 km 左右时, 照片的分辨率将远高于 100 m, 位置误差也将远小于 50 m.

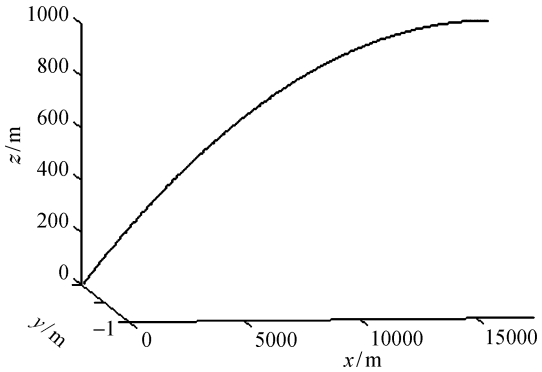

图 9 月球软着陆下降段三维轨迹曲线

Fig. 9 Three-dimensional trajectory curve of lunar soft landing

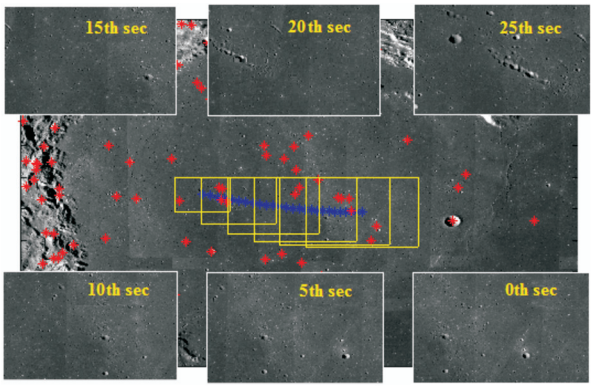

图 10 月球虹湾区航拍照片

Fig. 10 Photographs of the moon rainbow bay area

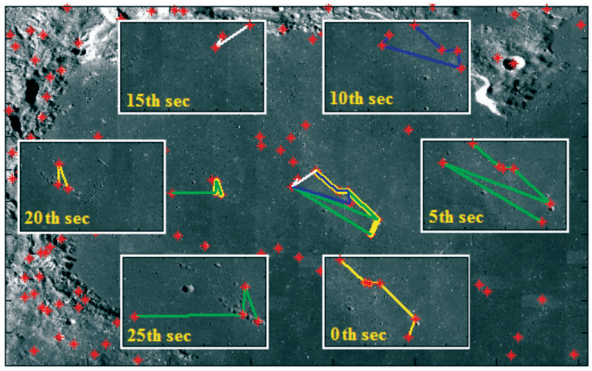

图 11 匹配结果

Fig. 11 Matching results

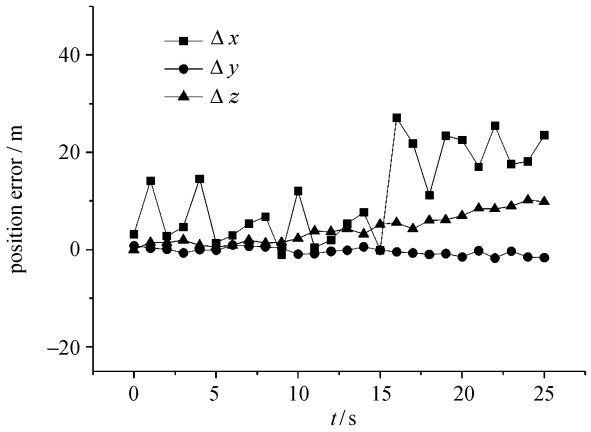

图 12 位置误差曲线

Fig. 12 Position error

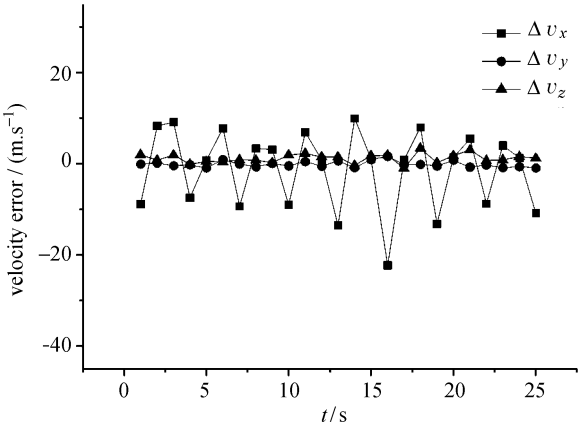

图 13 速度误差曲线

Fig. 13 Velocity error

虽然目前尚无法获得更为清晰的近景月面图片, 但上述仿真算例已足可说明通过该方法可以获得较高的着陆导航精度.

4 结论

针对探月飞行器月球表面精确着陆问题, 研究了基于特征图形匹配的光学导航方法. 利用该方法相对距离不变特性, 解决了存在平移、旋转和放缩等情况下的图形匹配问题. 利用多幅月面真实图片对算法进行了仿真测试, 获得了理想的匹配效果. 以所提出的特征图形匹配方法为基础, 设计仿真算例对导航方法进行了验证. 仿真结果表明, 基于特征图形匹配的光学导航方法可实时确定飞行器的位置及速度信息且精度较高, 是适用于探月飞行器精确着陆导航的有效途径.

参考文献

[1] Mu Rongjun, Han Pengxin, Cui Naigang. Navigation device scheme and information processing method of RLV [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(1):117-123. In Chinese (穆荣军, 韩鹏鑫, 崔乃刚. RLV 导航系统硬件配置方案及信息处理技术 [J]. 空间科学学报, 2009, **29**(1):117-123)

[2] Xiong Weiming, Xie Chunjian, Liang Xianfeng, *et al.* Deep space TT&C equipments of YH-1 [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(5):490-494. In Chinese (熊蔚明, 谢春坚, 梁显锋, 等. 萤火一号深空测控设备 [J]. 空间科学学报, 2009, **29**(5):490-494)

[3] Chirold D E, Edward A R, Brady T. Autonomous landing and hazard avoidance technology (ALHAT) [C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings, Big Sky, 2008:243-249

[4] Ansar A, Yang C. An analysis of spacecraft localization from descent image data for pinpoint landing on Mars and other cratered bodies [J]. *Photogr. Eng. Remote Sens.*, 2005, **71**(10):1197-1204

[5] Yang C, Johnson A E, Matthies L H, *et al.* Optical land-

mark detection for spacecraft navigation [C]//Proceedings of the 13th Annual AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting. Ponce, PR, 2003:1785-1803

[6] Yang C. Landmark based position estimation for pinpoint landing on Mars [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005: 4470-4475

[7] Tian Yang. Autonomous Navigation and Control Methods Research for Planet Lander [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. In Chinese (田阳. 行星着陆器自主导航与控制方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009)

[8] Feng Junhua. Research On Autonomous Optical Navigation for Pinpoint Lunar Soft Landing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. In Chinese (冯军华. 月球探测器软着陆自主光学导航方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010)

[9] He Jiang, Cui Hutao, Feng Junhua. Edge information based crater detection and matching for lunar exploration [C]//International Conference on Intelligent Control and Information Processing, Dalian, 2010:302-307

[10] Feng Junhua, Cui Hutao, Cui Pingyuan, Tian Yang. Autonomous crater detection and matching on planetary surface [J]. *Acta Aeron. Astron. Sin.*, 2010, **31**(9):1858-1863. In Chinese (冯军华, 崔祜涛, 崔平远, 田阳. 行星表面陨石坑检测与匹配方法 [J]. 航空学报, 2010, **31**(9):1858-1863)

[11] Jie Ming, Yin Hang, Huang Xianlin. On 3D reconstruction technology of lunar lander autonomous soft landing [J]. *J. Astron.*, 2007, **28**(4):966-971. In Chinese (介鸣, 尹航, 黄显林. 月球探测器自主软着陆中的三维重构技术研究 [J]. 宇航学报, 2007, **28**(4):966-971)

[12] Jiang Xiaonan. Vision-based Navigation for Lunar Probe Soft Landing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. In Chinese (姜肖楠. 月球探测器软着陆视觉导航方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010)

[13] Huang Guoqiang. Global 4D trajectory optimization design for lunar vertical soft landing [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(3):313-318. In Chinese (黄国强. 月球探测器垂直软着陆 4D 轨道全局优化 [J]. 空间科学学报, 2014, **34**(3):313-318)

[14] Lin Shengyong, Li Zhuji, He Xingsuo. Preliminary design and characteristics of vertical [J]. *Chin. Space Sci. Technol.*, 2005:47-51. In Chinese (林胜勇, 李珠基, 何兴锁. 月球垂直软着陆轨道初步设计 [J]. 中国空间科学技术, 2005:47-51)

[15] Cui Wen, Zhang Shaoyu, Zhang Shuyu, Baoyin Hexi. Research on optical autonomous navigation for approach phase of Mars exploration [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(2):313-319. In Chinese (崔文, 张少愚, 张树瑜, 宝音贺西. 火星探测接近段的光学自主导航研究 [J]. 空间科学学报, 2013, **33**(2):313-319)

[16] Wang Pengji, Zhang He, Qu Guangji. Design and optimization of the descending trajectory and guidance of lunar soft-landing [J]. *J. Astron.*, 2007, **28**(5):1175-1179. In Chinese (王鹏基, 张熇, 曲广吉. 月球软着陆下降轨迹与制导律优化设计研究 [J]. 宇航学报, 2007, **28**(5):1175-1179)

[17] Wang Jie, Zeng Zuoxun, Yue Zongyu, Hu Ye. Research of lunar tectonic features: Primary results from Chang'E-1 lunar CCD image [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(4):482-491. In Chinese (王杰, 曾佐勋, 岳宗玉, 胡烨. 月球主要构造特征: 嫦娥一号月球影像初步研究 [J]. 空间科学学报, 2011, **31**(4):482-491)