

# 火星车多光谱相机桅杆精确指向控制方法

卢皓<sup>1,2</sup>, 张辉<sup>2</sup>, 张朕<sup>2</sup>, 于天一<sup>2</sup>, 崔晓峰<sup>2</sup>, 胡晓东<sup>2</sup>, 费立刚<sup>1</sup>

(1. 北京空间信息中继传输技术研究中心, 北京 100094; 2. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094)

**摘要:** 为解决火星车桅杆搭载小视场多光谱相机对特定目标精确指向的问题, 设计了火星车桅杆精确指向方法, 对火星车桅杆机构运动学过程进行了建模, 设计了桅杆控制参数迭代求解方法以及火星车对目标探测工作流程, 对提出的控制方法进行了误差分析。经过中国首次火星探测任务实践证明, 设计的方法可满足多光谱相机精确指向的要求。

**关键词:** “祝融号”火星车; 桅杆控制; 精确指向; 齐次变换; 多光谱相机探测

**中图分类号:** TP249

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2023)01-0066-06

**DOI:** 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20220007

**引用格式:** 卢皓, 张辉, 张朕, 等. 火星车多光谱相机桅杆精确指向控制方法[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(1): 66-71.

**Reference format:** LU H, ZHANG H, ZHANG Z, et al. Accuracy mast pointing control method for multi-spectral camera of Mars rover[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(1): 66-71.

## 引言

“祝融号”(Zhurong)火星车于2021年5月15日成功着陆火星, 标志着中国首次火星探测任务的圆满成功。火星车上搭载着多种科学载荷。对科学载荷探测任务的规划控制是火星车遥操作的关键技术之一<sup>[1]</sup>。与“玉兔号”(Yutu)月球车红外光谱探测器相似, 火星车上搭载多光谱相机, 此相机设置8个波段, 可根据光谱特征识别火星表面的矿物类型<sup>[2-4]</sup>。此类相机针对的是科学探测场合, 因此在设计时均选用较高分辨率以及较高位深度的光电转换器件(10 bit/pixel, 2 048 × 2 048)。实际运用时, 若对全幅图像(约64 Mb)直接下传, 一次探测将对火星车链路造成极大的压力<sup>[5-7]</sup>。同时, 探测目标通常是石块等较小物体, 因此, 仅对图像上的感兴趣区域(Region Of Interest, ROI)实施下传即可完成探测目标。然而这种策略为探测的指向精准度提出了更高的要求。在以往的月球车导航相机指向控制过程中, 由于相机视场较大, 同时链路可以承受大视场全幅图像的下传, 因此在控制过程中, 仅仅考虑相机的旋转, 不考虑相机质心的变化, 控制过程较为简化, 难以适用于需要精确指向的场合。

多光谱相机ROI策略下传缩小有效视场, 要求机构指向精度更高, 针对以上问题, 本文设计了火星车桅杆精确指向控制方法, 对火星车桅杆机构进行了运动学建模, 设计了火星车多光谱相机探测工作流程,

经过中国首次火星探测任务实践证明, 设计的流程及方法满足小视场相机精确指向的要求。

## 1 火星车桅杆构型与坐标系定义

火星车桅杆由展开机构、偏航机构、俯仰机构、压紧释放机构、臂杆组件和结构件等组成, 如图1所示, 具有展开、偏航、俯仰3个自由度。其中, 展开后在火星车初始化后不再实施控制, 通过偏航、俯仰轴两个自由度实施对桅杆相机指向的控制。为了实现相机和目标精确指向的描述, 定义坐标系如下。

1) 定点坐标系 $O_p-X_pY_pZ_p$

$X_pY_pZ_p$ 三轴分别指向北东地方向, 原点 $O_p$ 为人为确定的火面位置。此坐标系通常用于描述火星车位置姿态。

2) 机械坐标系 $O_x-X_xY_xZ_x$

$X_x$ 轴垂直于底板指向天,  $+Z_x$ 轴指向前进方向,  $Y_x$ 指向 $Z_x-X_x$ 方向的右手方向。

3) 桅杆安装座坐标系 $O_b-X_bY_bZ_b$

$X_bY_bZ_b$ 三轴理论指向与 $X_xY_xZ_x$ 平行, 原点 $O_b$ 为安装座上某一参考点。

4) 展开坐标系 $O_z-X_zY_zZ_z$

$Y_z$ 沿展开机构轴线, 方向同整器机械坐标系 $Y_x$ 轴;  $X_z$ 轴平行于偏航机构与展开机构轴线间公垂线, 理论情况下桅杆各驱动机构均处于零位状态时方向同整器机械坐标系 $X_x$ 轴。

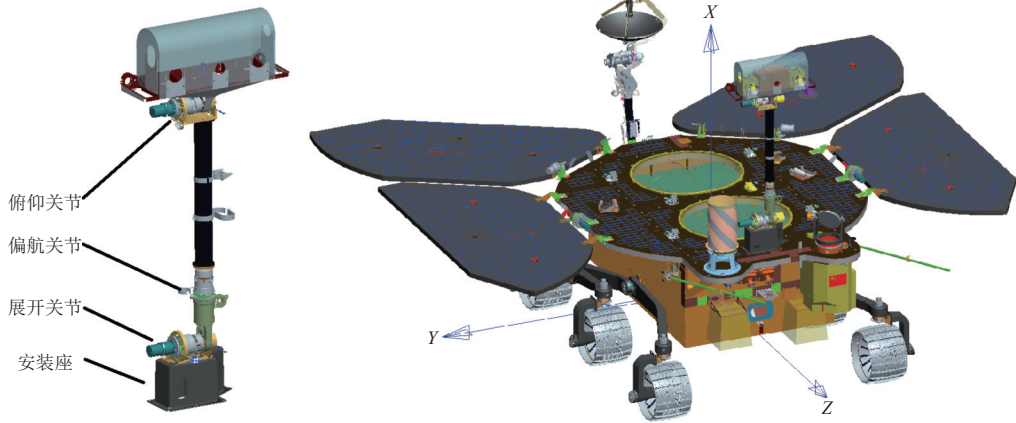


图 1 桅杆展开状态下“祝融号”火星车构形示意图  
Fig. 1 Structure of Zhurong Mars rover under mast deployment

5) 偏航机构坐标系  $O_y-X_yY_yZ_y$

$X_y$ 沿着偏航机构轴线, 理论情况下桅杆各驱动机构均处于零位状态时方向同整器机械坐标系  $Z_x$ 轴;  $Z_y$ 平行于偏航机构轴线与展开机构轴线间的公垂线, 理论情况下桅杆各驱动机构均处于零位状态时方向同整器机械坐标系  $X_x$ 轴;  $Y_y$ 指向  $X_x-Z_z$ 右手方向。

6) 俯仰机构坐标系  $O_f-X_fY_fZ_f$

$Y_f$ 沿俯仰机构轴线, 理论情况下桅杆各驱动机构均处于零位状态时方向同整器机械坐标系  $Y_x$ 轴;  $X_f$ 轴平行于偏航机构与展开机构轴线间公垂线, 理论情况下桅杆各驱动机构均处于零位状态时方向同整器机械坐标系  $X_x$ 轴,  $Z_f$ 指向  $X_f-Y_f$ 右手方向。

7) 多光谱相机坐标系  $O_m-X_mY_mZ_m$

原点为多光谱相机某参考点,  $Z_m$ 轴沿光轴方向,  $Y_m$ 轴理论情况下桅杆各驱动机构均处于零位状态时方向同整器机械坐标系  $Y_x$ 轴,  $X_m$ 指向  $Y_m-Z_m$ 右手方向。

8) 多光谱相机镜头坐标系  $O_l-X_lY_lZ_l$

原点为相机主点, 三轴平行于多光谱相机坐标系。

上述各个坐标系的转换关系及活动机构的布置如图 2~4 所示。

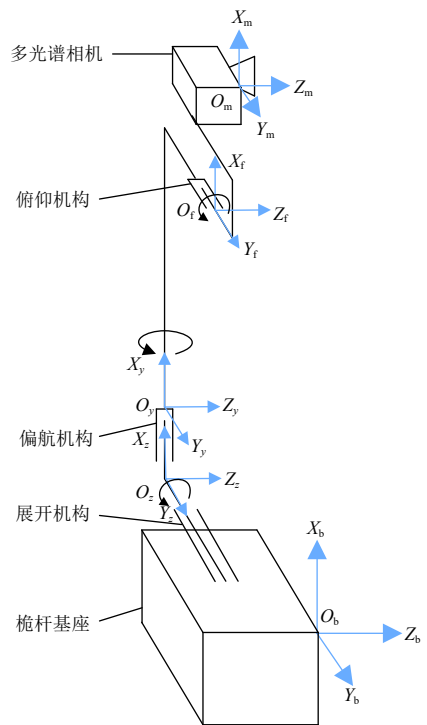


图 3 桅杆安装座坐标系至多光谱相机坐标系的转换关系  
Fig. 3 Transformation from mast mounting base coordinate system to multi-spectral camera coordinate system

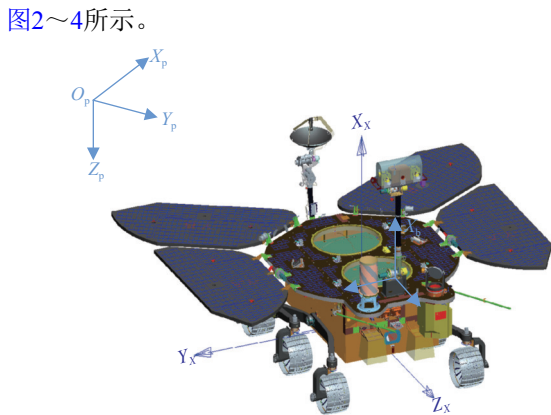


图 2 定点坐标系至桅杆安装座坐标系转换关系  
Fig. 2 Transformation from special point coordinate system to the mast mounting base coordinate system

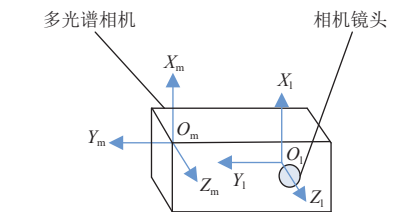


图 4 多光谱相机坐标系至相机镜头系的转换关系  
Fig. 4 Transformation from multi-spectral camera coordinate system to camera lens coordinate system

## 2 探测控制模式及需求

多光谱相机搭载在火星车桅杆上, 其指向受到桅

杆运动的控制。相机位置、目标位置和相机姿态决定了探测点最终在多光谱相机视场中的位置。桅杆的安装构型及机构的运动会造成多光谱相机外参数的变化,包括相机姿态和相机位置。

在多光谱相机探测桅杆的控制任务中,根据任务实际情况将控制划分为策略层和运动层控制。火星车桅杆上3个活动机构的运动受步进电机驱动,运动状态由旋变测量。火星车根据数管计算机中控制率,实现对机构运动角度的精确控制,机构运动层面的控制由火星车自主完成<sup>[8-9]</sup>。此部分内容不在本文讨论。策略层的控制由地面完成,地面根据桅杆构型以及精测参数,计算运动控制策略,控制桅杆3个机构达到目标的构型,使得开窗视场可以准确对目标进行探测。本文重点讨论策略层控制。

火星车多光谱相机有效像元数量 $2\ 048 \times 2\ 048$ 像素的8谱段变焦相机,位深度10 bit<sup>[3]</sup>。为了实现科学探测数据的高效下传,探测数据采用开窗模式下传,火星车可以在 $2\ 048 \times 2\ 048$ 像素图像上按照 $8 \times 8$ 的网格开窗( $256 \times 256$ 像素)下传感兴趣区域的图像,如图4所示。为了描述开窗视场的要求,设置焦距为4 818像素。经过计算,如图5所示的开窗视场角为 $6^\circ \times 9^\circ$ 。

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31	32
33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48
49	50	51	52	53	54	55	56
57	58	59	60	61	62	63	64

图5 图像开窗位置图

Fig. 5 Region of interest position on image

### 3 桅杆运动建模

#### 1) 正向运动学问题

正向运动学问题可简述为已知整车姿态和各关节转动角度,求解相机位姿。采用齐次变换描述机构运动关系,每个连杆由固连其上的坐标系描述其位置和姿态,固连坐标系的原点表述了关节的空间位置,三轴表示了连杆的空间姿态。以定点坐标系作为基准坐标系( $O_p-X_pY_pZ_p$ 系),依次为每个连杆建立坐标系,给出正向运动学模型。

整车坐标系到定点坐标系的转换矩阵为

$${}^p\mathbf{T} = \begin{bmatrix} {}^p\mathbf{A} & {}^p\mathbf{t} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: ${}^p\mathbf{A}$ 为整车相对于定点系的方向余弦矩阵,由车体姿态得到; ${}^p\mathbf{t}$ 为整车原点在定点系中的位置。

桅杆安装座坐标系到机械坐标系的转换矩阵为

$${}^b\mathbf{T} = \begin{bmatrix} {}^b\mathbf{A} & {}^b\mathbf{t} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: ${}^b\mathbf{A}$ 为桅杆安装座相对于机械系的方向余弦矩阵,通过精测得到; ${}^b\mathbf{t}$ 为桅杆安装座原点在机械系中的位置。

同理,根据精测值,可以获得 ${}^z\mathbf{T}$ 、 ${}^y\mathbf{T}$ 、 ${}^f\mathbf{T}$ 、 ${}^m\mathbf{T}$ 、 ${}^1\mathbf{T}$ ,以上矩阵分别为展开坐标系到桅杆安装座坐标系、偏航坐标系到展开坐标系、俯仰坐标系到偏航坐标系、多光谱相机基准镜坐标系到俯仰坐标系以及多光谱相机镜头坐标系到多光谱相机基准镜坐标系安装矩阵。

由于桅杆偏航机构与俯仰机构转动,机构运动的齐次矩阵表示为 ${}^y\mathbf{T}$ 与 ${}^f\mathbf{T}$

$${}^y\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos y & \sin y & 0 \\ 0 & -\sin y & \cos y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^f\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos f & 0 & -\sin f & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin f & 0 & \cos f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: $y$ 与 $f$ 分别为桅杆运动的偏航角与俯仰角。

由以上位姿矩阵可得到多光谱相机镜头坐标系相对于定点坐标系的位姿矩阵,即正向运动学模型

$${}^p\mathbf{T} = {}^p\mathbf{T}_x {}^x\mathbf{T}_z {}^z\mathbf{T}_y {}^y\mathbf{T}_f {}^f\mathbf{T}_m {}^m\mathbf{T}_1 \mathbf{T} \quad (5)$$

同理,亦可得到多光谱相机镜头坐标系相对于机械坐标系的位姿矩阵

$${}^b\mathbf{T} = {}^b\mathbf{T}_z {}^z\mathbf{T}_y {}^y\mathbf{T}_f {}^f\mathbf{T}_m {}^m\mathbf{T}_1 \mathbf{T} \quad (6)$$

针对定点坐标系下的目标点,可以得出多光谱相机镜头系下点的位置为

$${}^1\mathbf{P} = {}^1\mathbf{T}^p \mathbf{P} \quad (7)$$

若给出的是机械系下的目标点,可以得出多光谱相机镜头系下点的位置为

$${}^1\mathbf{P} = {}^1\mathbf{T}^b \mathbf{P} \quad (8)$$

#### 2) 桅杆控制参数迭代求解方法

根据式(5)和式(6),由于安装误差的存在,偏航轴和俯仰轴之间存在一定的失调偏差,采用解析解法求桅杆运动较为繁琐。本文采用迭代法求解桅杆运动角度,在一定容差下求解的桅杆运动角度在任务中获得了验证。

输入: ${}^x\mathbf{P}$  ( ${}^p\mathbf{P}$ )

步骤1:在桅杆零位状态下计算桅杆俯仰系下目标

点在计算初值偏航角 $y_0$ 及俯仰角 $f_0$ 。

步骤2: 迭代求解偏航角 $y$ 及俯仰角 $f$ 。

当  $|x| > \varepsilon$  且  $|y| > \varepsilon$  时

计算当前偏航角 $y$ 及俯仰角 $f$ 条件下目标点在多光谱相机镜头坐标系下的俯仰角 $d_p$ , 并更新 $f$ 。

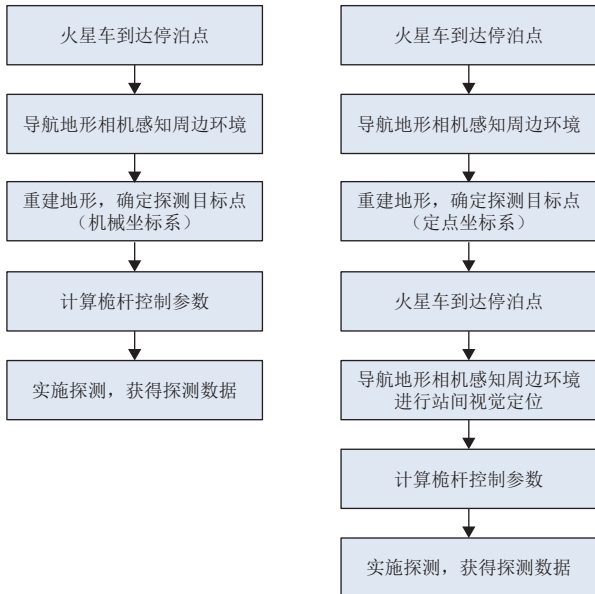
计算当前偏航角 $y$ 及俯仰角 $f$ 条件下目标点在多光谱相机镜头坐标系下的偏航角 $d_y$ , 并更新 $y$ 。

步骤3: 得到最终偏航角 $y$ 及俯仰角 $f$ 。

## 4 工作流程

探测过程基于大视场的导航相机对于周边环境的认知, 由科学家在导航相机图像上确定探测目标。由于导航相机同样安装在桅杆上, 在获取导航相机图像后, 要根据导航相机成像时桅杆的角度对周边的地形进行重建, 获得数字高程图 (Digital Elevation Model, DEM) 和正射影像图 (Digital Orthophoto Map, DOM) [10]。

当科学家在数字地形上确定出探测点的坐标时, 可估算出传感器距离目标点的距离, 比较科学家对于探测距离的要求, 可将探测流程分为本站探测流程和跨站探测流程。若传感器距离目标点的距离满足距离要求, 使用本站探测流程。反之, 则使用跨站探测流程。探测流程如图6所示。



(a) 本站探测流程

(b) 跨站探测流程

图 6 多光谱相机探测工作流程

Fig. 6 Work flow of Multi-spectral camera exploration

需要说明的是, 跨站探测流程需要使用导航相机地形站间图像中共同的目标点求解相机的位移, 以支撑站间探测对于相机位置的需求。

## 5 误差分析

误差项主要分为探测点定位误差和多光谱相机位姿误差。探测点位置是由导航相机双目视觉重建后获得的。在此过程中, 桅杆控制误差和精测误差、相机参数误差均会传递至探测点定位精度上, 由于双目视觉重建不是本文研究的内容, 误差传递过程, 在本文中不赘述。桅杆控制误差、桅杆及相机精测误差均会影响多光谱相机位置与姿态的精度, 下面将重点分析桅杆控制误差及探测点定位误差引起的瞄准误差。

考虑桅杆旋转过程, 将式 (6)、式 (8) 展开并化简为

$${}^1P = {}^1_f T_f^f T_f^y T_y^y T_y^x T_x^x P \quad (9)$$

其中: 考虑桅杆偏航轴、俯仰轴存在运动误差 $f^f E$ 与 $y^y E$ , 目标点存在定位误差 $\Delta^x P$ , 则方程变化为

$${}^1P' = {}^1_f T_f^f E_f^f T_f^y T_y^y E_y^y T_y^x T_x^x ({}^x P + \Delta^x P) \quad (10)$$

则误差方程 $\Delta^1 P'$ 为

$$\Delta^1 P' = {}^1P' - {}^1P \quad (11)$$

下面分别分析机构运动误差和目标点定位误差的影响。

设置俯仰轴与偏航轴运动误差为 $0.2^\circ$  ( $1\sigma$ ), 分析平面位于车体坐标系 $-0.3$  m, 暨通常情况下的火面高度, 相机坐标系下误差的均值如图7所示。

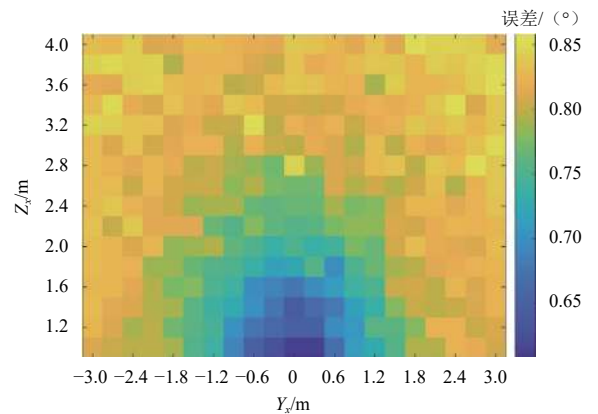


图 7 桅杆控制误差引起的瞄准误差 (机械坐标系)  
Fig. 7 Aiming error caused by mast control error (mechanical coordinate system)

设置定位误差为 $0.1$  m ( $1\sigma$ ), 分析平面位于车体坐标系 $-0.3$  m, 暨通常情况下的火面高度, 相机坐标系下误差的均值如图8所示。

由图7与图8可知, 误差与目标在车体系下的位置呈相关性。桅杆控制误差引起的瞄准误差基本与双轴的控制误差相近, 呈现靠近桅杆处误差小、远离桅杆

处误差大的特征。目标点定位误差引起的目标点定位误差引起的瞄准误差在大部分区域内小于机构误差引起的瞄准误差,呈现靠近桅杆处误差大、远离桅杆处误差小的特征。根据第3节中对于开窗视场分析的结论 $6^\circ \times 9^\circ$ 为控制要求,在火星车机械坐标系 $6\text{ m} \times 4\text{ m}$ 范围内,桅杆控制误差引起的瞄准误差不超过 $0.85^\circ (3\sigma)$ ,目标点定位误差引起的瞄准误差不超过 $0.4^\circ (3\sigma)$ ,综合误差限 $1.25^\circ (3\sigma)$ 。综上,误差条件下可以确保目标点出现在 $6^\circ \times 9^\circ$ 开窗视场中,满足探测要求。

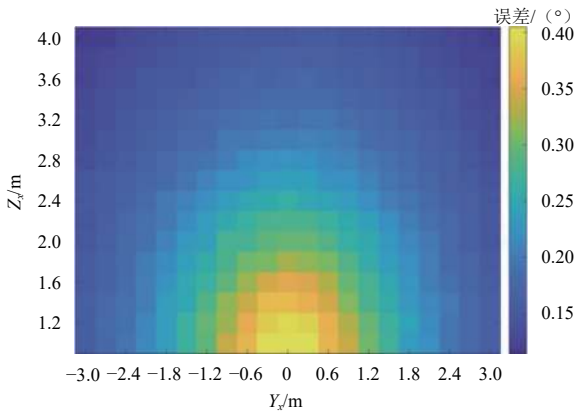


图8 目标点定位误差引起的瞄准误差(机械坐标系)  
Fig. 8 Aiming error caused by Target point positioning error (mechanical coordinate system)

## 6 验证结果

“祝融号”火星车着陆后,自从2021年5月15日着陆至进入日落前,共实施16次多光谱相机探测,共采集32个火星表面的岩石及土壤的多光谱图像数据。探测效果如图9、图10所示。实施结果表明,该方法可以有效规划火星车桅杆的精确指向,在指定的视场内精确地指向目标。

## 7 结论

本文设计了桅杆精确指向方法,对桅杆机构运动学过程进行了建模,设计了对目标探测工作流程。经过为期3个月的火面工作,共实施了16次多光谱相机探测,获得了火面岩石和土壤的探测数据。经过实验验证表明,设计的工作流程及方法满足小视场相机精确指向的要求。

目前的方法均基于发射前的地面精测数据对桅杆的运动学进行建模。在经过深空探测器长期飞行以及进入、下降、着陆过程等恶劣环境后,机构的安装参数必然会发生微小的变化,未来将根据实际工作数据获得控制的偏差量,回归分析并实时修正模型的误差。

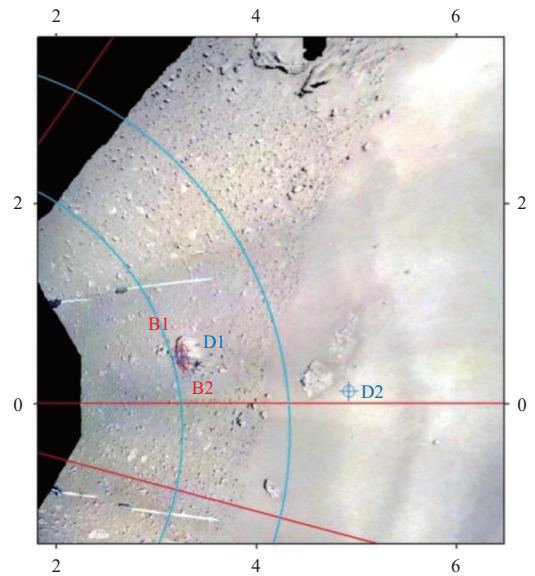
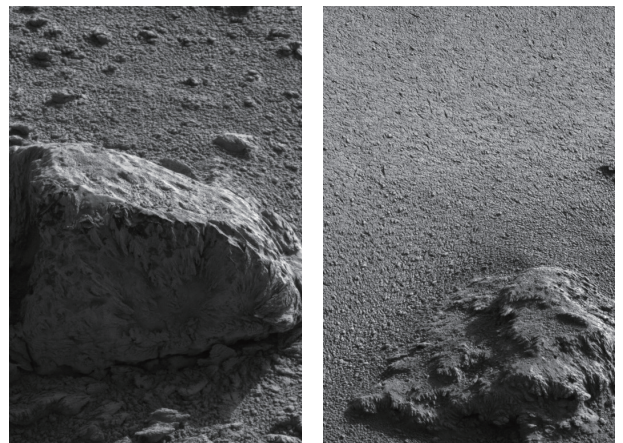


图9 DOM图像中的期望探测点(D1和D2为期望的多光谱探测点,B1和B2为表面成分测量仪的期望探测点)  
Fig. 9 Desired exploration points in DOM image (D1 and D2 were exploration points for multi-spectral camera, B1 and B2 were exploration points laser-induced breakdown spectroscopy)



(a) 对应D1 (b) 对应D2

图10 多光谱相机探测结果  
Fig. 10 Images of multi-spectral camera exploration

## 参 考 文 献

- [1] 张辉,卢皓,于天一,等.“祝融号”火星车遥操作技术[J].深空探测学报(中英文),2021,8(6):582-591.  
ZHANG H, LU H, YU T Y, et al. Teleoperation technology of Zhurong Mars rover[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(6): 582-591.
- [2] TIAN H, ZHANG T, JIA Y, et al. Zhurong: features and mission of China's first Mars rover[J]. The Innovation, 2021(3): 24-25.
- [3] 谢涓,闫凯,康志忠,等.“祝融号”火星车多光谱相机岩矿类型识别的地面验证研究[J].遥感学报,2021,25(7):1385-1399.  
XIE J, YAN K, KANG Z Z, et al. Verification study for the mineral and rock identification using multispectral camera of the “Zhurong” Mars rover on the Earth[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021,

- 25(7):1385-1399.
- [4] 张宽, 卢皓, 邹雪梅, 等. 玉兔二号复杂月表环境下的定点探测控制方法[C]//2020年中国航天大会论文集. 北京: 中国宇航出版社, 2020.
- [5] 李亨, 詹亚峰, 裴玉奎. 测控数传通信系统初步设计[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第十届学术年会. 太原: 中国宇航学会, 2013.
- [6] 关昭, 乔卫东, 杨建峰, 等. 火星多光谱相机的地面几何标定研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2018, 5(5): 465-471.  
GUAN Z, QIAO W D, YANG J F, et al. Ground geometric calibration of Mars multispectral camera[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(5): 465-471.
- [7] EDWARDS C D. Relay communications for Mars exploration[J]. International Journal of Satellite Communications & Networking, 2010, 25(2): 111-145.
- [8] 李惠军, 高海波, 邓宗全. 月球车桅杆机构设计与分析[J]. 机器人, 2008, 30(1): 13-16.  
LI H J, GAO H B, DENG Z Q. Design and analysis of the lunar rover mast mechanism[J]. Robot, 2008, 30(1): 13-16.
- [9] 周东, 徐晓伟, 贾阳, 等. 火星车机构集成控制系统设计与实现[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(5): 450-457.  
ZHOU D, XU X W, JIA Y, et al. Design and implementation of integrated control system for Mars rover mechanism[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(5): 450-457.
- [10] 谢圆, 周建亮, 王永. 面向月球车任务规划的环境建模技术[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010(S1): 292-296.  
XIE Y, ZHOU J L, WANG Y. Environment modeling for mission planning for lunar rovers[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010(S1): 292-296.
- 作者简介:  
卢皓(1989-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向: 航天测控、空间机器人任务规划。  
通信地址: 北京市5130信箱104分箱(100094)  
电话: (010)66363122-607  
E-mail: luhaoak47@126.com  
费立刚(1968-), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向: 航天测控、卫星通信。本文通信作者。  
通信地址: 北京市门头沟区永定镇冯村北坡甲9号(102308)  
电话: (010)66877008  
E-mail: feifrank@163.com

## Accuracy Mast Pointing Control Method for Multi-Spectral Camera of Mars Rover

LU Hao<sup>1,2</sup>, ZHANG Hui<sup>2</sup>, ZHANG Zhen<sup>2</sup>, YU Tianyi<sup>2</sup>, CUI Xiaofeng<sup>2</sup>, HU Xiaodong<sup>2</sup>, FEI Ligang<sup>1</sup>

(1. Beijing Space Information Relay Transmission Technology Research Center, Beijing 100094, China;

2. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China)

**Abstract:** To achieve the goal of accurately pointing to particular targets for the narrow-FOV multi-spectral camera on the mast, an accuracy mast pointing method was proposed. The mast kinetic model, the iterative solution method of mast control parameters, and the working flow of rover target detection were designed. An error analysis of the method was conducted. Through the practice of China's first Mars exploration mission, the method is proved to satisfy the demand for accuracy pointing of the multi-spectral camera.

**Keywords:** Zhurong Mars rover; mast control; accuracy pointing; homogeneous transformation; multi-spectral camera detection

### Highlights:

- An accuracy mast pointing control method for narrow-FOV strategy of multi-spectral camera exploration of Mars rover was proposed.
- The work flow of multi-spectral camera exploration for different scenarios was designed.
- The proposed method in the article was verified through China's first Mars exploration mission.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]