玉兔二号月面大间距变倾角成像的空间分辨率建模及其应用分析

王泰杰¹, 苏建华^{1,4}, 刘传凯^{2,3*}, 黄开启¹, 薛栋娥¹, 王晓雪^{2,3}, 袁春强^{2,3}, 王俊魁^{2,3}

1. 江西理工大学电气工程与自动化学院, 赣州 341000;

2. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094;

3. 航天飞行动力学技术重点实验室, 北京 100094;

4. 中国科学院自动化研究所, 北京 100190

* E-mail: ckliu2005@126.com

收稿日期: 2019-10-09; 接受日期: 2019-11-14; 网络版发表日期: 2020-04-15

国家自然科学基金面上项目(编号: 61972020)资助

摘要 玉兔二号月球车在月面巡视探测通过地面遥操作规划控制完成. 为了最大化每次规划的行驶距离, 每次行进通常在6~9 m之间, 使得相邻导航站点距离较大, 所拍摄图像的尺度、旋转、平移上有较大的变化, 图像重叠度较低且重叠区分辨率与形态差异很大, 为站点间图像的自动匹配带来极大困难, 进而影响相邻站点视觉定位的自动化进程. 针对此问题, 本文在前期关于图像像素空间分辨率建模的基础上, 结合任务实际新增月面凹凸倾斜等因素对像素空间分辨率的影响, 建立了更为通用的像素空间分辨率模型. 在此基础上, 推导了不同站点距离、成像距离和月面倾角等因素影响像素空间分辨率的等效关系, 确立了两两因素影响分析的最少组合. 最后结合玉兔二号第一、二月昼间所有的站点数据, 分析了像素空间分辨率比值对图像匹配成功率的影响关系, 对不同类型的影响情况进行分类, 总结了不同因素对图像匹配成功率影响的一般性规律, 给出了实际任务中视觉定位对相邻导航点相对距离和位置选择的约束准则, 这对巡视探测任务中导航站点选择规则的制定和视觉自动定位能力的提升具有重要的指导意义.

关键词 玉兔二号, 月球车导航定位, 成像尺度分析, 像素空间分辨率

1 引言

2019年1月3日, 嫦娥四号探测器成功在月球背面的艾特肯盆地软着陆, 22时22分, 玉兔二号月球车从嫦娥四号着陆器完成分离, 成功踏上月面并开始了世界首次月球背面巡视探测之旅. 月球车在月面环境开

展巡视勘察和科学探测的过程中, 必须具备精确导航与定位能力, 以保证其能够安全行驶和完成探测任务^[1]. 目前月面或火星探测车定位的最成功案例是美国的勇气号(Spirit)和机遇号(Opportunity)火星车的导航定位系统, 其综合采用了无线电测控定位、航迹推算、太阳图像确定方位角、视觉测程、光束法平差、

引用格式: 王泰杰, 苏建华, 刘传凯, 等. 玉兔二号月面大间距变倾角成像的空间分辨率建模及其应用分析. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1081–1094
Wang T J, Su J H, Liu C K, et al. Modeling and application analysis of the pixel-spatial resolution of Yutu 2 rover with large-scale transformed images (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 1081–1094, doi: [10.1360/SST-2019-0350](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0350)

地面影像与高分辨率卫星影像对比等多种方法^[2,3]。美国最新发射的火星探测器好奇号(Curiosity), 其导航定位系统与勇气号、机遇号非常相似^[4], 主要在光束法平差定位自动化能力方面进行了提高^[5], 并引入了基于火星侦查卫星(MRO)高分辨率科学成像仪(HiRISE)影像的定位方法^[6-10]。

我国玉兔系列巡视器在月面巡视与探测中采用惯导与视觉定位结合的方法以实现巡视器的精确定位^[11], 其中惯导获得的定位结果仅作为视觉定位方法的初始参考, 通过视觉定位方法实现巡视器的精确定位。巡视器视觉定位是利用安装在巡视器上的预先精确标定的双目导航相机, 在不同站点拍摄序列图像, 通过图像匹配与图像特征点的三维空间关系解算获得巡视器的位置和姿态^[12,13]。由于前后导航站点的距离较远, 获取的前后站点图像存在较大的尺度差别, 甚至存在较大变形, 玉兔系列月球车采用的是基于Affine-SIFT^[14]算子的图像匹配算法。在成功完成前后站点大尺度差与形变图像的精确匹配的基础上, 利用巡视器前后站点图像中提取的观测点, 基于光束法平差(bundle adjustment, BA)的定位模型^[15-17]实现巡视器各个导航点位置的精确解算。

由于我国玉兔二号月球车自主能力不强, 在月面复杂环境(遍布石块和凹坑)中的行驶路线需要依靠地面遥控操作人员规划实现, 地面为月球车指定了多个导航点^[1,18], 在每个站点进行感知与规划操作, 控制月球车沿着地面规划的路径行进, 行进过程通过盲走模式实现, 不进行自主视觉导航与避障。因月面路况复杂, 月球车越障能力有限, 每次规划通常耗费2~4 h。为了能够实现单次规划行驶距离的最大化, 减少规划次数, 提升月球车行进效率, 通常每次行进距离设定在6~9 m之间。两站距离较大, 导致两站对月面的成像为大倾角图像, 呈现近处像素空间分辨率高、远处像素空间分辨率低的现象, 使得图像不同对应区域的像素空间分辨率差异不同, 对图像特征的匹配存在较大影响^[19,20]。

对于不同像素空间分辨率(尺度)图像的匹配问题, 最典型的工作是Lowe^[21,22]关于尺度空间和特征提取的分析工作, 他利用图像降采样和高斯差分的方式构建了多个尺度空间(金字塔)的模拟图像, 通过在不同尺度空间的模拟图像上提取特征和构建特征描述子, 实现了图像特征的跨尺度空间匹配, 提出了尺度不变

形特征^[22]。然而该工作认为图像的尺度差异需要限定在一定比例范围内, 以满足有限的尺度空间相关联的条件。为了实现尺度跨度很大图像的匹配, Zhou等人^[23]基于尺度空间理论提出了一种两步算法, 首先进行尺度级匹配, 近似得到尺度一致性的相关尺度范围, 然后按照尺度范围生成尺度空间模拟图像, 进行尺度感知匹配和图像相似性的计算, 通过在相近的尺度空间中找到精确的特征对应关系并最终实现了尺度差异图像的匹配。该工作仍是以图像尺度金字塔为基础, 假设图像中的像素近似在同一尺度(空间分辨率)下, 并未考虑同一图像尺度跨度很大的情况, 对于大倾角成像条件下图像尺度变化的情况并没有考虑。

针对上述问题, 我们在前期工作中假设月面为水平面, 仅考虑倾斜成像距离对图像重叠与缩放的影响, 提出了图像像素空间分辨率模型^[20], 将像素空间分辨率表达为与两站距离和特征点位置的函数。实际应用月中月面常常存在凹坑和突起石块, 使得月面并非水平表面。为了克服月面水平这一假设的局限性, 本文综合考虑站点距离、观测位置和月面倾角等因素的影响, 建立了更为通用的图像像素空间分辨率模型, 增强了该模型对倾斜月面情况的适应性。由于月面倾角变量的增加使得对像素空间分辨率影响的组合关系翻倍增加, 为此推导了不同变量影响像素空间分辨率的等效关系, 确立了两两因素影响分析的最少组合, 全面地分析了不同因素相互组合对图像尺度及特征匹配的影响。为了验证算法的有效性, 对玉兔二号一、二月昼所有站点图像的像素空间分辨率差异进行了分类定量分析, 总结了不同因素对图像匹配成功率影响的一般性规律, 为站点距离选定、最优重叠图像配对和特征匹配可行性等方面提供了指导性意见, 对后续工程任务的高效实施具有重要意义。

2 相邻站点图像像素的空间分辨率建模

玉兔二号月球车利用导航相机对前方月面环境以较大的倾角进行感知成像, 图像像素的空间分辨率(单个像素对应月面区域的尺寸)受到观测点位置和月面法向的影响。在实际应用中, 不同站点对同一观测点的像素空间分辨率差异将直接影响两个站点图像自动匹配的成功率, 从而影响视觉定位操作流程和计算时间, 最终影响任务实施效率。文献^[20]从基本的透视投影

变换关系出发, 考虑观测点月面法向等因素, 将像素空间分辨率 $\|\Delta\mathbf{X}_p\|$ 表达为相机高度和成像光线方向的函数:

$$\|\Delta\mathbf{X}_p\| = f(D_i, \alpha_i, \delta),$$

$$= D_i \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \alpha_i} + \frac{1}{\cos^2(\alpha_i + \delta)} - \frac{2 \cos \delta}{\cos \alpha_i \cos(\alpha_i + \delta)}}, \quad (1)$$

式中, D_i 为相机高度, 即光心到水平月面的距离, α_i 为从光心指向月面点 P 的方向向量与水平月面法向量的夹角, δ 为微小角度变化量. 基于此对巡视器在两个不同的位置成像的像素空间分辨率比值 $s_{\Delta X}$ 进行计算:

$$s_{\Delta X} = \frac{\|\Delta\mathbf{X}_{p1}\|}{\|\Delta\mathbf{X}_{p2}\|} = \frac{f(D_1, \alpha_1, \delta)}{f(D_2, \alpha_2, \delta)}. \quad (2)$$

本节在上述计算关系的基础上, 考虑月面倾角对像素空间分辨率的影响, 提出了更加通用的像素空间分辨率比值关系模型, 模型推导过程如下.

对月面相邻站点前方任意点拍摄的成像关系描述如图1所示. 假设月球车的左导航相机的光心分别位于 O_1 和 O_2 , 以 O_1 为原点建立坐标系, $O_1^\perp$ 和 $O_2^\perp$ 分别为 O_1 和 O_2 在月表平面的投影, x 轴与 $O_1^\perp O_2^\perp$ 方向平行, z 轴垂直于月表平面向下, O_2 相对于 O_1 的偏移矢量记为 $\Delta\mathbf{X}_r = [\Delta X_r, \Delta Y_r, \Delta Z_r]$, P 点为倾斜月面上的一点, 其相对于 O_1 和 O_2 的偏移矢量分别为 $\mathbf{X}_{p1}$ 和 $\mathbf{X}_{p2}$, $\mathbf{X}_{pi} = [X_{pi}, Y_{pi}, Z_{pi}]^T$. 令 $L_i = \|\mathbf{X}_{pi}\|$, 则其在月表平面的投影长度分别记为 $L_1^\perp$ 和 $L_2^\perp$, $O_1^\perp P$ 与 $O_2^\perp O_2^\perp$ 的夹角为 β . 设过点 P 且与 $O_1 O_2 P$ 垂直的任意朝向的平面 S (实际月面), 其法向量 $\mathbf{n}$ 可由月表平面法向量 $\mathbf{n}_0 = [0, 0, 1]^T$ 旋转得到, 旋转

图1 (网络版彩图)月球车在相邻站点对前方任意点成像示意图

Figure 1 (Color online) Imaging of lunar rover at adjacent stations towards an arbitrary point ahead.

的偏航角和俯仰角分别为 κ 和 φ , 则满足:

$$\mathbf{n} = R_z(\kappa) R_y(\varphi) \mathbf{n}_0$$

$$= [\cos \kappa \sin \varphi, \sin \kappa \sin \varphi, \cos \varphi]^T, \quad (3)$$

其中, $\kappa \in [\arctan(Y_{p1}/X_{p1}) + 90^\circ, \arctan(Y_{p1}/X_{p1}) - 90^\circ]$, $\varphi \in [0, 90^\circ]$, 令 α_1 为平面 S 的法向量 $\mathbf{n}$ 与 $O_1 P$ 的夹角, α_2 为 $\mathbf{n}$ 与 $O_2 P$ 的夹角, 则 α_1 和 α_2 可计算为

$$\alpha_i = \arccos(\mathbf{n}^T \mathbf{v}_3^i),$$

$$\mathbf{v}_3^i = \mathbf{X}_{pi} / L_i, \quad i = 1, 2, \quad (4)$$

式中, $\mathbf{v}_3^i$ 的物理含义为从 i 站点的相机光心出发指向 P 点的方向向量. 由此可将 P 点在两个相机图像中对应像素的空间分辨率 $\Delta\mathbf{X}_{p1}$ 和 $\Delta\mathbf{X}_{p2}$ 计算为 $\mathbf{X}_{pi}$, κ 和 φ 的函数, 即

$$\Delta\mathbf{X}_{pi} = f(D_i, \alpha_i, \delta)$$

$$= f(\mathbf{X}_{pi}, \kappa, \varphi, \delta), \quad (i = 1, 2), \quad (5)$$

其中 $\Delta\mathbf{X}_{p2} = \Delta\mathbf{X}_{p1} + \Delta\mathbf{X}_r$. 巡视器在两个不同的位置 O_1 和 O_2 对同一点 P 进行成像, 获取的两幅图像像素空间分辨率的比值 $s_{\Delta X}$ 计算为

$$s_{\Delta X} = \frac{\|\Delta\mathbf{X}_{p1}\|}{\|\Delta\mathbf{X}_{p2}\|} = \frac{f(D_1, \alpha_1, \delta)}{f(D_2, \alpha_2, \delta)}$$

$$= f_s(\mathbf{X}_{p1}, \Delta\mathbf{X}_r, \kappa, \varphi, \delta). \quad (6)$$

3 相邻站点图像像素的空间分辨率比分析

基于上一节的模型, 对相邻站点图像像素空间分辨率的差异性进行计算分析. 上述模型中共涉及 $\Delta\mathbf{X}_{p1}$, $\Delta\mathbf{X}_r$, κ , φ , δ 9个参数, 通过建立第2节中的坐标系令 x 轴与 $O_1^\perp O_2^\perp$ 方向平行, 可使得 ΔY_r 为定值0; δ 为一个可预先设定的微小量; Z_{p1} 为相机光心离地高度; ΔZ_r 为巡视器在两站的高度差, 由于在实际任务中其值变化较小, 对该模型影响甚微, 因此可固定为常值; 另外 κ 和 φ 共同决定了实际月面与水平面的夹角, 其中 κ 决定了夹角的方向, φ 决定了夹角的大小, 因此这两个参数对空间分辨率的影响可近似简化为一个参数 φ 进行描述. 因此对上一节所述的像素空间分辨率变化模型的分析中, 主要考虑 X_{p1} , Y_{p1} , ΔX_r , φ 4个参数对 $s_{\Delta X}$ 的影响.

为了能够直观表达不同参数对 $s_{\Delta X}$ 的影响关系, 我们对任意两个参数对 $s_{\Delta X}$ 的影响进行分析和可视化仿

真. 按照月面倾角 φ 固定与变化, 将其他参数对 $s_{\Delta X}$ 的影响关系分为两组, 首先分析固定月面倾角 φ 的情况, 然后考虑月面倾角变化与其他变量组合对 $s_{\Delta X}$ 的影响, 具体分析如下.

3.1 月面倾角固定的像素空间分辨率比对分析

当 φ 为固定值时, 即S面为倾角固定的月面, 不失一般性, 将月面固定为水平方向, 即将 φ 设为0, 此时 κ 的取值不再对S面产生影响. 设 Z_{P1} , δ 为定值, $\Delta Z_r=0$, 则 $s_{\Delta X}$ 表述为 X_{P1} , Y_{P1} , ΔX_r 的函数:

$$s_{\Delta X} = \frac{\|\Delta \mathbf{X}_{P1}\|}{\|\Delta \mathbf{X}_{P2}\|} = f(D_1, D_2, \alpha_1, \alpha_2) \\ = f_s(X_{P1}, Y_{P1}, \Delta X_r),$$

其中, D_i 和 α_i 可用 X_{P1} , Y_{P1} , ΔX_r 表达:

$$D_i = L_i \cos \alpha_i, i = 1, 2,$$

$$\alpha_1 = \arctan(L_1^\perp / Z_{P1}),$$

$$\alpha_2 = \arctan[L_2^\perp / (Z_{P1} + \Delta Z_r)],$$

$$L_1 = \sqrt{Z_{P1}^2 + (L_1^\perp)^2},$$

$$L_2 = \sqrt{(Z_{P1} + \Delta Z_r)^2 + (L_2^\perp)^2},$$

$$L_1^\perp = \sqrt{X_{P1}^2 + Y_{P1}^2},$$

$$L_2^\perp = \sqrt{(X_{P1} + \Delta X_r)^2 + Y_{P1}^2}.$$

由上述公式可知, X_{P1} , Y_{P1} , ΔX_r 的变化使得 $L_1^\perp$ 和 $L_2^\perp$ 发生变化, X_{P1} , Y_{P1} , ΔX_r 对 $s_{\Delta X}$ 的影响可以通过两个变量对 $s_{\Delta X}$ 的影响表达. 不失一般性, 将 $s_{\Delta X}(X_{P1}, Y_{P1}, \Delta X_r)$ 简化表达为 $s_{\Delta X}(X_{P1}, \Delta X_r)$, 等效表达关系论述如下: 分别考虑固定 X_{P1} 和 ΔX_r 时, $s_{\Delta X}(Y_{P1}, \Delta X_r)$ 和 $s_{\Delta X}(X_{P1}, Y_{P1})$ 与 $s_{\Delta X}(X_{P1}, \Delta X_r)$ 的等效表达关系.

$$(1) s_X(Y_{P1}, X_r)|_{X_{P1}} \Leftrightarrow s_X(X'_{P1}, \Delta X'_r)|_{Y'_{P1}}$$

令 $X_{P1}=D_X$ 为一常量, 则

$$L_1^\perp = \sqrt{D_X^2 + Y_{P1}^2}, L_2^\perp = \sqrt{(D_X + \Delta X_r)^2 + Y_{P1}^2};$$

令 $Y_{P1}=D_Y$ 为一常量,

$$X'_{P1} = \sqrt{D_X^2 + Y_{P1}^2 - D_Y^2},$$

$$\Delta X'_r = \sqrt{(D_X + \Delta X_r)^2 + Y_{P1}^2 - D_Y^2} - X'_{P1},$$

则

$$L_1^\perp = \sqrt{X_{P1}^2 + D_Y^2} = L_1^\perp,$$

$$L_2^\perp = \sqrt{(X_{P1} + \Delta X_r)^2 + D_Y^2} = L_2^\perp,$$

因此 $s_{\Delta X}(Y_{P1}, \Delta X_r)$ 可通过 $s_{\Delta X}(X_{P1}, \Delta X_r)$ 等效表达.

$$(2) s_X(X_{P1}, Y_{P1})|_{X_r} \Leftrightarrow s_X(X'_{P1}, \Delta X'_r)|_{Y'_{P1}}$$

同理令

$$\Delta X_r = \Delta D_X, Y'_{P1} = D_Y,$$

$$X'_{P1} = \sqrt{X_{P1}^2 + Y_{P1}^2 - D_Y^2},$$

$$\Delta X'_r = \sqrt{(X_{P1} + \Delta D_X)^2 + Y_{P1}^2 - D_Y^2} - X'_{P1},$$

则

$$L_1^\perp = \sqrt{X_{P1}^2 + D_Y^2} = \sqrt{X_{P1}^2 + Y_{P1}^2} = L_1^\perp,$$

$$L_2^\perp = \sqrt{(X'_{P1} + \Delta X'_r)^2 + D_Y^2} \\ = \sqrt{(X_{P1} + \Delta D_X)^2 + Y_{P1}^2} = L_2^\perp,$$

$s_{\Delta X}(X_{P1}, Y_{P1})$ 可通过 $s_{\Delta X}(X_{P1}, \Delta X_r)$ 等效表达.

基于上述结论, 对 $s_{\Delta X}(X_{P1}, Y_{P1}, \Delta X_r)$ 的分析可通过 $s_{\Delta X}(X_{P1}, \Delta X_r)|_{Y_{P1}}$ 代替. 在文献[20]中对固定 $Y_{P1}=0$ 的情况进行了详细描述与分析, 可知: 巡视探测的单次行进距离不宜太远, 否则前后站图像像素的空间分辨率差异较小的重叠区域将会较小, 使得自动匹配难度较大.

对于 $s_{\Delta X}(Y_{P1}, \Delta X_r)$ 和 $s_{\Delta X}(X_{P1}, Y_{P1})$ 的分析, 可通过 $s_{\Delta X}(X_{P1}, \Delta X_r)|_{Y_{P1}}$ 近似描述. 但被忽略的变量 Y_{P1} 的变化会对等效的 X'_{P1} , $\Delta X'_r$ 产生影响, 影响关系描述如下: 当观测点在垂直于站点连线方向的距离 Y_{P1} 增大时, 如图2中的 P_0 点到 P_1 点. 可等效为分析 $s_{\Delta X}(X'_{P1}, \Delta X'_r)$ 时, X'_{P1} 不变而将当前站与上一站的距离 $\Delta X'_r$ 拉近, 如图2中 P_0 点不变而 $O_2^\perp$ 移到 $O_2'^\perp$; 或者等效为 $\Delta X'_r$ 不变而将月面观测点与当前站的距离 $L_2^\perp(X'_{P1} - \Delta X'_r)$ 拉远, 如图2中的 $O_2^\perp$ 点不变而 P_0 移动到 P_2 . 即 $s_{\Delta X}(Y_{P1}, \Delta X_r)$ 和 $s_{\Delta X}(X_{P1}, Y_{P1})$ 中 Y_{P1} 的增大, 可等效为 $s_{\Delta X}(X'_{P1}, \Delta X'_r)$ 中 X'_{P1} 的增大或 $\Delta X'_r$ 的减小, 使得 $s_{\Delta X}$ 减小, 更有利于图

图2 (网络版彩图)不同观测点位置时的图像像素空间分辨率分析

Figure 2 (Color online) Analysis of pixel spatial resolution of images with respect to the different distance of observation points.

像匹配的成功。

3.2 月面倾角可变的像素空间分辨率比对分析

当月面倾斜角 φ 可变时, 假设 P 为月面上位于两个相机 O_1 和 O_2 正前方的任意一点, 即 P 点在 XOZ 平面上, Y_{P1} 为定值0, P 点处的切平面 S 与 XOZ 平面垂直, 即 $\kappa=0$, 此时 S 平面的法向量 $\mathbf{n}$ 与月表平面的夹角为 $90^\circ-\varphi$; 令相机光心高度 $Z_{P1}=1.6$, $\Delta Z_r=0$, $\delta=46.4/1024$, 则巡视器在两个不同的位置 O_1 和 O_2 对同一点 P 进行成像, 获取的两幅图像像素的空间分辨率的比值 $s_{\Delta X}$ 计算为

$$s_{\Delta X} = \frac{\|\Delta \mathbf{X}_{P1}\|}{\|\Delta \mathbf{X}_{P2}\|} = f_s(X_{P1}, \Delta X_r, \varphi). \quad (7)$$

(1) 情况一: 分析观测点距离和月面倾斜角对 $s_{\Delta X}$ 的影响. 将 ΔX_r 设为固定值, 可以分析 X_{P1} , φ 的变化对 $s_{\Delta X}$ 的影响. 令 $\Delta X_r=7$, $X_{P1} \in [8, 25]$, $\varphi \in [0, 90^\circ]$, 对 $s_{\Delta X}(X_{P1}, \varphi)$ 进行可视化仿真如图3所示.

(2) 情况二: 分析站点间距离和月面倾斜角对 $s_{\Delta X}$ 的影响. 将 X_{P1} 设为固定值, 可以分析 ΔX_r , φ 的变化对 $s_{\Delta X}$ 的影响. 令 $X_{P1}=15$, $\Delta X_r \in [5, 14]$, $\varphi \in [0, 90^\circ]$, 对 $s_{\Delta X}(\Delta X_r, \varphi)$ 进行可视化仿真如图4所示.

从图3和4中可以看出, 当站点间距离为定值而观测点距离越大时, 或者当观测点距离为定值而站点间距离越大时, 上一站图像像素的空间分辨率会远低于当前站, 使得对应的比例关系值较大, 反之则两个站点图像像素的空间分辨率较为相近, 对应的比例关系值较小. 因此, 前后站点图像匹配时, 应选择观测点距离相对于当前站较远处所对应的图像重叠区进行匹配, 匹配成功率将更高.

(3) 情况三: 当 Y_{P1} 为变量时, 可分析不同偏航方向(Y_{P1} 变化)的观测点和月面倾斜角对 $s_{\Delta X}$ 的影响. 令 $X_{P1}=15$, $\Delta X_r=7$, $Z_{P1}=1.6$, $\Delta Z_r=0$, $\kappa=0$, $\delta=46.4/1024$,

图3 (网络版彩图)像素的空间分辨率比值随观测点距离和月面倾斜角的变化

Figure 3 (Color online) The variation in the ratio of pixel spatial resolution with respect to the distance of observation points and inclination angle.

图4 (网络版彩图)像素的空间分辨率比值随站点间距离和月面倾斜角的变化

Figure 4 (Color online) The variation in the ratio of pixel spatial resolution with respect to the distance between stations and inclination angle.

$Y_{P1} \in [0, 15]$, $\varphi \in [0, 90^\circ]$, 对 $s_{\Delta X}(Y_{P1}, \varphi)$ 进行可视化仿真如图5所示.

从图5中可以看出, 当站点间距离和 x 轴方向上的距离为定值时, 观测点偏航方向越小, 前一站点图像像素的空间分辨率远低于当前站点, 对应的比例关系值较大, 反之则两个站点图像像素的空间分辨率较为相近, 对应的比例关系值较小. 因此, 前后站点图像匹配时, 应选择观测点与两站点连线成一定角度所对应的图像重叠区进行匹配, 匹配成功率将更高.

图 5 (网络版彩图)像素的空间分辨率比值随观测点偏航方向和月面倾斜角的变化
Figure 5 (Color online) The variation in the ratio of pixel spatial resolution with respect to points in different areas ahead and inclination angle.

由图3~5可共同得知,月面倾斜角越小,两个站点图像的像素空间分辨率差异越大,反之则两个站点图像像素的空间分辨率较为相近,对应的比例关系值较小。因此,前后站点图像匹配时,应选择观测点位于倾斜月面时所对应的图像重叠区或图像进行匹配,将提高图像的匹配成功率。

4 基于玉兔二号月面图像数据的空间分辨率比对分析

在嫦娥四号任务中,玉兔二号月球车离开着陆器到达月面建立初始站点X,并以此时的月球车中心为原点建立北东地工作坐标系(x轴指北,y轴指东,z轴指地),随后依次经过正南侧A站点、南偏西侧B站点、北偏西侧的C站点、D站点和S1站点。经过第一月昼后,在第一月昼的最后一个站点S1重新建立北东地工作坐标系,随后往西北方向依次经过E1, E2, E3, E4 4个站点;为减少累积误差,在E4站点再次重新建立北东地工作坐标系,往西南方向依次经过E5, E6, E7, E8, E9, E10 6个站点。玉兔二号月球车至第二月昼结束时共行驶了约110 m,并对15个站点进行了视觉定位,其中有8站成功地实现了自动匹配定位,6站自动匹配定位失败。一、二月昼的行驶路线图如图6所示。

对上述16个站点的数据进行分析,根据匹配定位结果可分为两类:自动匹配定位成功和自动匹配定位

图 6 (网络版彩图)玉兔二号月球车一二月昼行驶路径图
Figure 6 (Color online) The route of Yutu 2 rover in the first and second lunar day.

失败;其中自动匹配定位成功包括月面水平状态下的自动匹配定位成功和月面倾斜状态下的自动匹配定位成功;自动匹配定位失败其原因可分为空间分辨率比值过大和横纵压缩比差异过大,以及在定位失败后通过换图来重新成功地实现自动匹配定位;具体如表1所示。

4.1 自动匹配定位成功

一、二月昼间共有8个站点自动匹配定位成功,空间分辨率分析如表2所示。本实验所需的成像光线方向数据由 $\mathbf{X}_c^w$ 和 $\mathbf{R}_c$ 和图像特征点位置三者共同确定,其中 $\mathbf{X}_c^w$ 为工作坐标系下相机光心的位置, $\mathbf{R}_c$ 为相机姿态。

相机光心位置 $\mathbf{X}_c^w$ 可根据车体位置进行多次平移与旋转变换得到,即

表 1 一、二月昼站点自动匹配定位结果
Table 1 Automatic positioning results of Yutu 2 rover in the first and second lunar day

结果	站点	状态描述
成功	A-B, B-C, S1-E1, E1-E2, E2-E3, E7-E8, E9-E10	月面水平状态下
	C-D	月面倾斜状态下
失败	X-A, E4-E5	大部分重叠区的点 $s_{\Delta x} > 8$
	D-S1, E5-E6, E8-E9	横纵压缩比差异过大
	E3-E4	定位有误差换图定位成功

表 2 8个定位成功站点的像素空间分辨率对比分析

Table 2 Analysis of pixel spatial resolution of 8 stations with successfully automatic positioning

站点	图像拍摄信息	$s_{\Delta X}$ 范围	$s_{\Delta X} < 5$
A-B	A(偏航: -80.12° , 俯仰: -2.88°) B(偏航: -6.88° , 俯仰: -30.90°)	(2.4028, 4.4798)	100%
B-C	B(偏航: 13.14° , 俯仰: -30.90°) C(偏航: 39.88° , 俯仰: -30.13°)	(3.4806, 10.147)	54.72%
C-D	C(偏航: -0.07° , 俯仰: -33.22°) D(偏航: -10.13° , 俯仰: -28.92°)	(1.362, 1.5102)	100%
S1-E1	S1(偏航: 0.09° , 俯仰: -24.13°) E1(偏航: -79.90° , 俯仰: -30.90°)	(1.9795, 5.3319)	99.74%
E1-E2	E1(偏航: 0.09° , 俯仰: -26.11°) E2(偏航: 10.09° , 俯仰: -30.90°)	(2.1423, 3.7677)	100%
E2-E3	E2(偏航: 29.88° , 俯仰: -26.13°) E3(偏航: -0.09° , 俯仰: -29.91°)	(2.3212, 19.078)	80.96%
E7-E8	E7(偏航: 0.15° , 俯仰: -25.95°) E8(偏航: -10.13° , 俯仰: -29.93°)	(3.2259, 11.212)	50.07%
E9-E10	E9(偏航: -50.19° , 俯仰: -29.91°) E10(偏航: -90.14° , 俯仰: -29.91°)	(2.0082, 6.0944)	96.05%

$$\mathbf{X}_c^w = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{rc} & \mathbf{T}_{rc}^w \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{X}_r^w,$$

式中, $\mathbf{X}_r^w$ 表示车体在工作坐标系中的位置, $\mathbf{R}_{rc}$ 表示车体到相机的旋转变换矩阵(即桅杆的三轴旋转矩阵, 亦为由桅杆展开和云台俯仰共同确定的旋转矩阵), $\mathbf{T}_{rc}^w$ 为工作坐标系下相机光心相对于车体坐标系原点的平移量, 亦可表示为车体姿态旋转矩阵与车体坐标系下相机光心位置的乘积, 即 $\mathbf{T}_{rc}^w = \mathbf{R}_{wr} \mathbf{T}_{rc}^r$, 其中 $\mathbf{R}_{wr}$ 表示车体姿态旋转矩阵, $\mathbf{T}_{rc}^r$ 为车体坐标系下相机光心的位置. 此外, 相机姿态 $\mathbf{R}_c$ 可计算为 $\mathbf{R}_c = \mathbf{R}_{wr} \mathbf{R}_{rc}$, 即相机姿态由车体姿态和桅杆三轴旋转量确定. 下面分两种情况分析.

(1) 情况一: 月面倾角固定(近似水平). 一、二月昼共有7站为月面水平状态时自动匹配定位成功. 下面以E2-E3站点为例进行空间分辨率比对分析.

E2站点和E3站点相距7.94 m, 两站采用E2(Y: 29.88° , P: -26.13°)和E3(Y: -0.09° , P: -29.91°)图像(此处Y为偏航Yaw, P为俯仰Pitch, 下同)时自动匹配定位成功. 进行前后站点特征匹配与视觉定位计算, 前后站点图像匹配结果如图7(a)和(b)所示. 图中的特征点对应的投影点在月球表面的x和y范围分别为(15.412, 24.301), $(-21.302, -12.69)$. 用本文的方法计

图 7 (网络版彩图) (a) E2站点导航相机以偏航 29.88° 俯仰 -26.13° 拍摄图像匹配结果; (b) E3站点导航相机以偏航 -0.09° 俯仰 -29.91° 拍摄图像匹配结果

Figure 7 (Color online) (a) Matching results of images taken by navigation cameras at station E2 with imaging orientation of yaw 29.88° and pitch -26.13° ; (b) matching results of images taken by navigation cameras at station E3 with imaging orientation of yaw -0.09° and pitch -29.91° .

算E2-E3站点的空间分辨率差异图, 如图8所示. 该区域内点的 $s_{\Delta X}$ 范围为(2.3212, 19.078), 且有80.96%的点 $s_{\Delta X} < 5$.

(2) 情况二: 考虑月面倾角影响情况. 一、二月昼有1站为月面倾斜状态时自动匹配定位成功, 即C-D站.

C站点和D站点相距8.33 m, 两站采用C(Y: -0.07° , P: -33.22°)和D(Y: -10.13° , P: -28.92°)图像时自动匹配定位成功. 进行前后站点特征匹配与视觉定位计算, 前后站点图像匹配结果如图9(a)和(b)所示. 图中的特

图 8 (网络版彩图)E2-E3站点的空间分辨率差异图
Figure 8 (Color online) Spatial resolution differences of image pixels in E2-E3 stations.

图 10 (网络版彩图)C-D站点的空间分辨率差异图
Figure 10 (Color online) Spatial resolution differences of image pixels in C-D stations.

图 9 (网络版彩图) (a) C站点导航相机以偏航 -0.07° 俯仰 -33.22° 拍摄图像匹配结果; (b) D站点导航相机以偏航 -10.13° 俯仰 -28.92° 拍摄图像匹配结果
Figure 9 (Color online) (a) Matching results of images taken by navigation cameras at station C with imaging orientation of yaw -0.07° and pitch -33.22° ; (b) matching results of images taken by navigation cameras at station D with imaging orientation of yaw -10.13° and pitch -28.92° .

征点对应的投影点在倾斜月面的 x 和 y 范围分别为 $(27.457, 29.959)$, $(-1.9431, 1.8515)$. 用本文的方法计算C-D站点的空间分辨率差异图, 如图10所示. 该区域内点的 $s'_{\Delta x}$ 范围为 $(1.362, 1.5102)$. 可见当匹配点位于倾斜月面且距离较远时, 两个站点图像像素的空间分辨率较为相近, 对应的比例关系值较小.

4.2 自动匹配定位失败

一、二月昼间共有6个站点自动匹配定位失败, 下面分三种情况分析.

(1) 情况一: 空间分辨率比值过大时. 一、二月昼共有2个站点由于空间分辨率比值过大使得自动匹配

定位失败: X-A和E4-E5站点.

X站点和A站点相距7.27 m, 两站采用X(Y: -16.17° , P: -26.87°)和A(Y: 19.91° , P: -31.86°)时自动匹配定位失败. 利用空间分辨率模型计算, 前后站点图像中主体重叠区内的点的 $s_{\Delta x}$ 范围为 $(5.3894, 19.75)$, 且有61.07%的点 $s_{\Delta x} > 8$.

E4站点和E5站点相距7.61 m, 两站采用E4(Y: -19.89° , P: -26.13°)(图11(a))和E5(Y: -30.13° , P: -25.91°)(图11(b))时自动匹配定位失败, 图11(a)中的梯形实线区域为仿射投影区, 图11(b)中实线区域为主体重叠区, 虚线区域为 $s_{\Delta x} > 8$ 的区域. 对主体重叠区的空间分辨率差异性进行计算, 结果如图12(a)所示, 该

图 11 (网络版彩图) (a) E4站点导航相机以偏航 -19.89° 俯仰 -26.13° 拍摄图像; (b) E5站点导航相机以偏航 -30.13° 俯仰 -25.91° 拍摄图像
Figure 11 (Color online) (a) Matching results of images taken by navigation cameras at station E4 with imaging orientation of yaw -19.89° and pitch -26.13° ; (b) matching results of images taken by navigation cameras at station E5 with imaging orientation of yaw -30.13° and pitch -25.91° .

图 12 (网络版彩图) (a) E4-E5站点的空间分辨率差异图; (b) E4-E5站点空间分辨率比值大于8的图像统计

Figure 12 (Color online) (a) Spatial resolution differences of image pixels in E4-E5 stations; (b) calculation of image with pixel spatial resolution greater than 8 in E4-E5 stations.

区域内的 $s_{\Delta X}$ 范围为(4.8209, 20.547), 且有52.40%的点 $s_{\Delta X} > 8$, 如图12(b)所示, 其中中部弧形分界线上方区域的点 $s_{\Delta X} < 8$.

这两个站点因主体重叠区内大部分的点空间分辨率比值较大, 使得视觉定位计算中两站图像未能自动匹配成功.

(2) 情况二: 横纵压缩比差异过大时. 一、二月昼共有3个站点由于横纵压缩比差异过大使得自动匹配定位失败: D-S1, E5-E6和E8-E9站点.

D站点和S1站点相距7.07 m, 两站采用D(Y: -169.90° , P: -28.90°)和S1(Y: 178.87° , P: -32.92°)图像时自动匹配定位失败. 利用空间分辨率模型计算, 前后站点图像中主体重叠区内的点的 $s_{\Delta X}$ 范围为(2.2076, 3.7957).

E5站点和E6站点相距7.86 m, 两站采用E5(Y: 0.11° , P: -22.13°)和E6(Y: -110.16° , P: -29.88°)图像自动匹配定位失败. 利用空间分辨率模型计算, 前后站点图像中主体重叠区内的点的 $s_{\Delta X}$ 范围为(2.5865, 8.4806), 且有79.87%的点 $s_{\Delta X} < 5$.

E8站点和E9站点相距8.91 m, 两站采用E8(Y: 0.11° , P: -25.91°)即图13(a)和E9(Y: 10.11° , P: -29.91°)即图13(b)自动匹配定位失败, 图13(a)中的箭头为前一站点的拍摄方向, 图13(b)中的箭头为当前站点的拍摄方向, 其中实线区域为主体重叠区, 虚线区域为 $s_{\Delta X} < 5$ 的区域. 对主体重叠区的空间分辨率差异性进行计算, 结果如图14(a)所示, 该区域内的 $s_{\Delta X}$ 范围为(1.7388, 6.9512), 且有84.37%的点 $s_{\Delta X} < 5$, 如图14(b)所

图 13 (网络版彩图) (a) E8站点导航相机以偏航 -0.11° 俯仰 -25.91° 拍摄图像; (b) E9站点导航相机以偏航 10.11° 俯仰 -29.91° 拍摄图像

Figure 13 (Color online) (a) Matching results of images taken by navigation cameras at station E8 with imaging orientation of yaw -0.11° and pitch -25.91° ; (b) matching results of images taken by navigation cameras at station E9 with imaging orientation of yaw 10.11° and pitch -29.91° .

示, 其中弧形分界线右边区域的点 $s_{\Delta X} > 5$.

尽管这三个站点的空间分辨率比值大部分小于5, 但由于前后站点图像的拍摄方向接近于 90° , 使得重叠区中前一站点图像像素在横向上的变化对应后一站点像素纵向上的变化, 因此前后两站的像素空间分辨率比值较小; 而前后两站像素的比例差异主要体现在前一站点纵向变化和当前站点的横向变化上, 这个方向上的差异性较大, 空间分辨率比值约在10以上, 因此导致匹配失败. 后续我们将发展针对该类情况下更加通用的分析模型.

(3) 情况三: 定位有误差时换图定位成功. 一、二月昼中E3-E4站点虽特征匹配成功, 但视觉定位结果与惯导定位结果有偏差, 换图后定位成功.

图 14 (网络版彩图) (a) E8-E9站点的空间分辨率差异图; (b) E8-E9站点空间分辨率比值小于5的图像统计

Figure 14 (Color online) (a) Spatial resolution differences of image pixels in E8-E9 stations; (b) calculation of image with pixel spatial resolution less than 5 in E8-E9 stations.

E3站点和E4站点相距8.55 m, 两站采用E3(Y: 19.86° , P: -29.91°)和E4(Y: -40.12° , P: -29.91°)图像时自动匹配成功, 但定位结果与惯导定位的结果相比存在3 m左右的偏差. 前后站左图像匹配结果如图15(a)和(b)所示, 图中的特征点对应的投影点在月球表面的x和y范围分别为(20.515, 20.904), $(-24.941, -24.344)$. 用本文的方法计算此时E3-E4站点的空间分辨率差异图, 如图16(a)所示. 该区域内点的 $s_{\Delta x}$ 范围为(4.8348, 5.4629), 且有82.39%的点 $s_{\Delta x} > 5$.

当两站换图为E3(Y: -19.93° , P: -26.13°)和E4(Y: -79.90° , P: -29.91°)时, 自动匹配定位成功. 进行前后站点特征匹配与视觉定位计算, 前后站左图像匹配结果如图15(c)和(d)所示. 图中的特征点对应的投影点在月球表面的x和y范围分别为(23.292, 26.041), $(-23.256, -21.793)$. 用本文的方法计算E3-E4站点换图后的空间分辨率差异图, 如图16(b)所示. 该区域内点的 $s_{\Delta x}$ 范围为(2.5894, 3.8369). 因换图后空间分辨率差异性得到显著降低, 使得E3-E4站点的视觉定位计算中两站图像能够自动匹配成功.

4.3 小结

通过对玉兔二号月球车一、二月昼间的16个站点的的数据进行分析, 可得出如下结论.

(1) 当前后站点图像重叠区有大部分的点空间分辨率比值小于5时, 则自动定位成功, 如A-B, B-C, C-

D, S1-E1, E1-E2, E2-E3, E7-E8和E9-E10站点; 当前后站点图像重叠区有大部分的点空间分辨率比值大于8时, 则自动定位会失败, 如X-A和E4-E5站点; 而空间分辨率比值在5~8之间的区域在匹配时则具有较大的不确定性, 与月面纹理、光照等有关, 因此建议选择空间分辨率比值小于5区域较大的图像进行匹配以提升自动定位成功率.

(2) 对于部分站点, 尽管前后图像重叠区虽有大部分的点空间分辨率比值小于5, 但由于与前后站点图像的拍摄方向接近 90° 导致的横纵压缩比差异过大, 使得自动匹配与定位失败, 如D-S1, E5-E6和E8-E9站点. 此类特殊工况条件下的定位问题需要后续进一步开展理论分析.

(3) 对于个别站点, 前后站点图像存在一定重叠区, 但重叠区的空间分辨率比值偏大(大部分重叠区的像素空间分辨率比值大于5), 虽存在部分点自动匹配成功, 但由于配对点较为集中, 使得特征点与光心连线形成的光束夹角较小, 基于这些特征点计算的定位结果易产生误差, 如E3-E4站点, 此时需要通过手动添加与这些特征点距离较远的特征点作为补充进行定位, 或者更换重叠区内像素空间分辨率比值更优的图像组进行匹配, 提升自动定位结果的可信度.

(4) 存在部分站点利用同向拍摄的最中间图像进行自动匹配时失败, 更换为不同偏航角的图像匹配时成功, 这与第3节分析的结论一致, 即在沿两站连线方

图 15 (网络版彩图) E3-E4站点导航相机拍摄图像. (a) E3偏航 19.86° 俯仰 -29.91° ; (b) E4偏航 -40.12° 俯仰 -29.91° ; (c) E3偏航 -19.93° 俯仰 -26.13° ; (d) E4偏航 -79.90° 俯仰 -29.91°

Figure 15 (Color online) Matching results of images taken by navigation cameras at station E3 and E4. (a) E3 with imaging orientation of yaw 19.86° and pitch -29.91° ; (b) E4 with imaging orientation of yaw -40.12° and pitch -29.91° ; (c) E3 with imaging orientation of yaw -19.93° and pitch -26.13° ; (d) E4 with imaging orientation of yaw -79.90° and pitch -29.91° .

图 16 (网络版彩图) (a) E3-E4站点的空间分辨率差异; (b) E3-E4站点换图后的空间分辨率差异

Figure 16 (Color online) (a) Spatial resolution differences of image pixels in E3-E4 stations; (b) spatial resolution differences of image pixels in E3-E4 stations after changing images.

向距离不变条件下, 月面观测点垂直于连线方向增大距离时, 如E3-E4站点, 此时等效为将当前站与上一站

的距离拉近或者观测点与当前站的距离拉远, 减小了前后站图像的像素空间分辨率比值, 使得自动匹配与

定位成功率提升.

基于上述4个方面的结论, 得出实际任务中视觉定位对相邻导航点相对距离和位置选择的约束准则: 假设月球车在相邻两站点以 20° 为偏航角间隔分别拍摄7对序列图像, 要求在这些序列图像中前后站点至少存在一对图像具有空间分辨率比值小于5的重叠区域, 且重叠区必须超过一定宽度(如100像素), 重叠区内各点对应的两站成像方向的夹角均应小于一定角度(如 60°).

5 结论

本文针对玉兔二号月球车在月面大间距行进间中前后站图像尺度、形变差异很大条件下的特征匹配与视觉定位问题, 提出了通用的图像像素空间分辨率比对分析模型. 该模型是在前期论文的基础上, 增加考虑了月面倾角等因素对图像尺度变化的影响, 使得适

用范围更广, 不但能够应用于近似水平月面, 对于月面存在凸起石块和凹陷坑面的情况也能够更好地适应和准确地计算. 基于该模型, 分析了不同因素组合对像素空间分辨率影响的相互包含与等价关系, 确立了多种因素影响的简化方式与准则. 在此基础上分析了观测距离、月面倾角等不同因素变化条件下图像尺度差异的定量关系, 发现当站点间距离越小, 且选择观测点距离相对于当前站较远处、观测点与两站点连线成一定角度或观测点位于倾斜月面所对应的图像重叠区时, 图像的尺度差异越小, 图像匹配的成功率将更高. 最后结合玉兔二号一、二月昼站点的视觉定位数据, 利用图像像素空间分辨率模型分析了这些站点自动匹配与定位成功或失败的原因, 提出了定位结果有效的判断准则和可靠性提升策略, 验证了本文所述模型的有效性, 为将来行星表面巡视探测大间距行进距离的选择和自动定位能力的提升提供了有力的理论与技术支撑.

致谢 论文在北京航天飞行控制中心遥操作团队其他同事的通力协助下得以顺利完成, 在此深表感谢.

参考文献

- 1 Liu C K, Wang B F, Wang J, et al. Integrated INS and vision-based orientation determination and positioning of CE-3 lunar rover (in Chinese). *J Spacecr TT&C Tech*, 2014, 33: 250–257 [刘传凯, 王保丰, 王稼, 等. 嫦娥三号巡视器的惯导与视觉组合定姿定位. *飞行器测控学报*, 2014, 33: 250–257]
- 2 Di K C. A review of spirit and opportunity rover localization methods (in Chinese). *Spacecr Eng*, 2009, 18: 1–5 [邸凯昌. 勇气号和机遇号火星车定位方法评述. *航天器工程*, 2009, 18: 1–5]
- 3 Li R, Di K, Matthies L H, et al. Rover localization and landing-site mapping technology for the 2003 Mars exploration rover mission. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2004, 70: 77–90
- 4 Grotzinger J P, Crisp J, Vasavada A R, et al. Mars Science Laboratory mission and science investigation. *Space Sci Rev*, 2012, 170: 5–56
- 5 Wang J. Modeling and matching of landmarks for automation of Mars Rover localization. Dissertation for Doctoral Degree. Columbus: Ohio State University, 2008
- 6 Li R, Hwangbo J W, Chen Y, et al. Rigorous photogrammetric processing of HiRISE stereo imagery for Mars topographic mapping. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2011, 49: 2558–2572
- 7 Li R, He S, Chen Y, et al. MER Spirit rover localization: Comparison of ground image- and orbital image-based methods and science applications. *J Geophys Res*, 2011, 116: E00F16
- 8 Graf J E, Zurek R W, Eisen H J, et al. The Mars reconnaissance orbiter mission. *Acta Astronaut*, 2005, 57: 566–578
- 9 Parker T J, Golombek M P, Calef F J, et al. High-resolution basemaps for localization, mission planning, and geologic mapping at Meridiani Planum and Gale crater. In: *Lunar and Planetary Science Conference*. The Woodlands, 2012. 2535
- 10 Parker T J, Malin M C, Calef F J, et al. Localization and ‘Contextualization’ of Curiosity in Gale Crater, and other landed mars missions. In: *Lunar and Planetary Science Conference*. The Woodlands, 2013. 2534
- 11 Wu W R, Zhou J L, Wang B F, et al. Key technologies in the teleoperation of Chang’E-3 “Jade Rab-bit” rover (in Chinese). *Sci Sin Inf*, 2014, 44:

- 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. 中国科学: 信息科学, 2014, 44: 425–440]
- 12 Peng B. Research on the key technology of stereo-vision odometry and its application (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Hangzhou: Zhejiang University, 2008 [彭勃. 立体视觉里程计关键技术与应用研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2008]
- 13 Nistér D, Naroditsky O, Bergen J. Visual odometry. In: Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. Washington, DC: IEEE, 2004. 1–1
- 14 Morel J M, Yu G. ASIFT: A new framework for fully affine invariant image comparison. *SIAM J Imag Sci*, 2009, 2: 438–469
- 15 Li R, Squyres S W, Arvidson R E, et al. Initial results of rover localization and topographic mapping for the 2003 Mars Exploration Rover mission. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2005, 71: 1129–1142
- 16 Di K, Xu F, Wang J, et al. Photogrammetric processing of rover imagery of the 2003 Mars Exploration Rover mission. *ISPRS J Photogram Remote Sens*, 2008, 63: 181–201
- 17 Li R, Ma F, Xu F, et al. Localization of Mars rovers using descent and surface-based image data. *J-Geophys-Res*, 2002, 107: FIDO 4-1–FIDO 4-8
- 18 Liu C K, Wang B F, Shen J S, et al. A positioning method of Chang'E-3 Rover in large-span states based on cylindrical projection of images. In: Proceedings of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation. Shenyang, 2014. 2475–2480
- 19 Liu C K, Wang B F, Yang X, et al. Introducing projective transformations into lunar image correspondence for positioning large distance rover. In: 2016 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Guilin, 2016. 1206–1211
- 20 Liu C K, Wang T J, Dong W H, et al. Modeling and analysis of spatial resolution of images from Yutu 2 lunar rover in large-span movements (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 1275–1285 [刘传凯, 王泰杰, 董卫华, 等. 玉兔2号月球车大间距导航成像的空间分辨率建模分析. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 1275–1285]
- 21 Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant features. In: Proceedings of the International Conference on Computer Vision. Corfu, 1999. 1150–1157
- 22 Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int J Comput Vision*, 2004, 60: 91–110
- 23 Zhou L, Zhu S, Shen T, et al. Progressive large scale-invariant image matching in scale space. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Venice, 2017. 2362–2371

Modeling and application analysis of the pixel-spatial resolution of Yutu 2 rover with large-scale transformed images

WANG TaiJie¹, SU JianHua^{1,4}, LIU ChuanKai^{2,3}, HUANG KaiQi¹, XUE DongE¹,
WANG XiaoXue^{2,3}, YUAN ChunQiang^{2,3} & WANG JunKui^{2,3}

¹ School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

² Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China;

³ Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics, Beijing 100094, China;

⁴ Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

In Chang'E-4 lunar exploration mission, Yutu 2 rover tasks are planned and controlled by teleoperation. The rover usually travels between 6 and 9 m to cover a large distance for each planned travel; as a result, the images taken by the Yutu 2 rover differ saliently in scale, rotation, and translation. Consequently, the overlap areas of these images have small sizes, especially when the resolution and morphology of the overlap areas are very different, thereby resulting in image matching difficulties to image matching, and hindering automatic visual positioning between adjacent stations. In this paper, a general pixel-spatial resolution model focusing on lunar images is proposed by introducing the inclination angle to existing models. We further discuss in detail the variation of image scales and the rate of feature matching in terms of station distances, imaging distances, and lunar surface inclination angles or their combinations, and develop the mechanism to choose the equivalent minimal factor subset. Finally, the proposed model is evaluated by using the station data of the Yutu 2 rover collected on the first and second lunar days. Our analysis classified the influence of the pixel-spatial resolution ratio on the rate of image matching into four types. Thus, a general rule was given for describing the image matching rate under different stations, and the constraints to determine the distance and location of adjacent stations in actual tasks were presented. The proposed approach exhibits the potential to be utilized for improving the automation of localization in subsequent lunar explorations.

Yutu 2, visual positioning of lunar rover, image scale analysis, pixel spatial resolution

doi: [10.1360/SST-2019-0350](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0350)