

小天体附着形貌特征快速优选

修文博^{1,2}, 何颖³, 朱圣英^{1,2}, 刘延杰⁴

(1. 北京理工大学深空探测技术研究所, 北京 100081; 2. 深空自主导航与控制工信部重点实验室, 北京 100081;
3. 中国航天科技国际交流中心, 北京 100048; 4. 青岛科技大学自动化与工程学院, 青岛 266042)

摘要: 针对小天体附着过程中形貌特征复杂且数量众多, 导致在线特征选取时特征组合数量多、计算量大、计算效率低等问题, 提出了一种在线形貌特征快速选取方法。利用多类型特征快速评价指标结合搜索区域, 建立了单帧图像特征快速优选的方法。同时, 考虑到小天体附着过程中在线特征选取采样间隔短、帧间图像重合度高、特征继承概率高的特点, 提出了帧间图像特征继承优选方法。仿真实验表明单帧图像搜索区域和帧间图像特征继承的设计, 降低了特征组合数量, 提升了计算效率, 提高了在线特征选取速度。

关键词: 小天体附着; 多类型特征; 特征快速选取; 形貌特征; 视觉导航

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)03-0286-09

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20240036

引用格式: 修文博, 何颖, 朱圣英, 等. 小天体附着形貌特征快速优选[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(3): 286-294.

Reference format: XIU W B, HE Y, ZHU S Y, et al. Morphology feature rapid selection for asteroid landing[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(3): 286-294.

引言

小天体附着是开展原位探测、采样返回的重要手段。为实现精确附着及避障, 着陆器需具备高精度自主导航能力^[1-2]。然而, 小天体与地球距离远, 通过地面站通信的方式具有较大时延, 难以满足小天体附着过程中导航需求^[3]。

光学导航是目前常见的自主导航方案之一^[4-5], 利用导航相机观测小天体表面特征, 并根据几何关系解算着陆器状态, 从而实现高精度导航。最近的小天体附着任务“隼鸟二号”(Hayabusa 2)^[6]和“冥王星”(Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, and Security-Regolith Explorer, OSIRIS-REx)^[7]均采用了光学导航方案, 以确保附着任务成功实施。在着陆过程中, 小天体表面通常可以提取出大量的点特征, 对大量点特征的实时处理和匹配显著增加了计算复杂度和内存使用率^[8]。此外, 小天体表面呈现暗弱^[9]及低纹理特性^[10], 这使得传统的特征提取与匹配方法, 在仅依赖点特征的情况下, 容易出现较多的误匹配。这些误匹配不仅增加了计算负担, 更可能导致导航精度严重下降, 对着陆任务的成功实施构成潜在的威胁。

因此, 有必要研究小天体形貌特征快速优选的方法。小天体表面具有陨石坑、岩石、山脊和沟壑等形貌特征, 这些特征在光学图像中具有独特的形态和纹理, 因此适合作为导航特征。通过对这些形貌特征进行图像处理, 可以提取出多类型特征。例如, 小天体表面的山脊和沟壑等近似直线的纹理特征可以被提取出直线特征^[8], 而陨石坑等圆形或椭圆形结构则可以被提取为二次曲线特征。与点特征相比, 这些特征的数量相对较少, 但具有更高的识别匹配准确性和鲁棒性, 且包含观测信息更多。导航相机观测的图像通常可以提取及匹配较多数量的特征, 在平衡星载计算能力和导航精度时, 需要对形貌特征进行优选。在之前的研究工作中, 离线对点特征进行鲁棒优选以获取最优陆标序列。然而, 在线特征选取的过程中, 由于小天体表面形貌特征的复杂且数量众多, 特征组合的数量庞大, 导致星载计算量增加, 这给有限的星载计算能力及星载计算速度带来了挑战。

面对特征组合数量庞大的问题, 若采用穷举法求解特征优选问题, 计算时间将随着观测到的特征数量或选取特征数量的增加而呈现爆炸式增长^[11-12]。为快速选取最优导航特征, Steiner等^[11]采用贪婪逼近

(Greedy Approximation) 算法对观测特征进行排序, 以提高选取速度。Zhu等则利用模拟退火 (Simulated Annealing) 方法搜索最优导航特征组合, 其优化质量高且鲁棒性强, 尽管收敛速度相对较慢^[12]。此外, Xiu等^[13]采用禁忌搜索 (Tabu Search) 算法进行特征优选。禁忌搜索是一种局部邻域搜索算法的推广, 能有效地避免搜索陷入局部最优, 利用该算法可显著提高特征优选的效率。利用常见的搜索算法应对特征组合数量庞大的问题时, 虽然能较快地选取出最优的特征组合, 但通常需要根据具体问题调整较多参数才能达到理想的效果。

因此, 针对上述问题, 为满足小天体附着过程中实时特征选取的需求, 结合光学导航特点, 提出了一种形貌特征快速优选方法。该方法首先利用星表形貌图像信息建立多类型特征观测模型, 利用解析的多类型特征快速评价指标结合特征搜索区域, 建立了单帧图像特征快速选取方法。同时, 考虑到小天体附着过程中在线特征选取采样间隔短、帧间图像重合度高、特征继承概率高的特点, 提出了帧间图像特征继承优选方法。本文所提出的形貌特征快速优选方法, 旨在降低特征组合数量, 从而减少星载计算量, 优化特征在线选取速度, 并提升导航精度。

1 形貌特征观测模型

通过对小天体表面形貌进行图像处理, 提取多类型特征, 建立多类型特征光学观测模型。本文利用3个坐标系, 分别是着陆点坐标系 ${}^L\mathcal{F}$ 、相机坐标系 ${}^C\mathcal{F}$ 和着陆器本体坐标系 ${}^B\mathcal{F}$ 。为简化标记, 假设着陆器本体坐标系与相机坐标系重合。在着陆阶段, 着陆表面的起伏高度相对于着陆器与着陆表面之间的距离通常较小。同时, 为了简化推导过程, 通常假设着陆区域相对平坦^[14-15]。

1) 点特征投影模型

点特征作为普遍存在的导航特征, 已成功应用于着陆任务中。常用的点特征包括ORB特征 (Oriented FAST and Rotated BRIEF)、尺度不变特征变换特征 (Scale-invariant feature transform, SIFT)、角点和陨石坑中心点等。在采用小孔投影模型的情况下, 光学相机拍摄的小天体表面上的第 i 个点特征 ${}^L\mathbf{p}_i (i = 1, \dots, n)$ 可表示为

$$\mathbf{u}_i = \begin{bmatrix} p_i \\ l_i \end{bmatrix} = \frac{f}{c_{z_i}} \begin{bmatrix} c_{x_i} \\ c_{y_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: \mathbf{u}_i 为 ${}^L\mathbf{p}_i$ 在像平面中的二维投影; p_i 和 l_i 为 \mathbf{u}_i 中的

两个组成元素, 表示投影点的二维位置坐标; f 为导航相机的焦距; ${}^c x_i, {}^c y_i, {}^c z_i$ 为点特征相机坐标系下的三轴分量; (c_x, c_y) 为像平面中心点的坐标。

2) 直线特征投影模型

在小天体表面对线性自然特征 (如沟壑和山脊) 进行图像处理 (例如, Line Segment Detector, LSD), 以提取线特征。小天体表面上第 i 条直线特征 \mathbf{L}_i 的约束条件可以表达为

$$\mathbf{L}_i^T \tilde{\mathbf{p}} = 0 \quad (2)$$

其中: $\tilde{\mathbf{p}} = [{}^L x, {}^L y, 1]^T$ 为齐次坐标系的形式。

观测的直线特征在相机中像平面的投影满足的约束方程为

$$\mathbf{l}_i^T \tilde{\mathbf{u}} = 0 \quad (3)$$

其中: \mathbf{l}_i 为图像平面中直线特征的一般方程的系数; $\tilde{\mathbf{u}} = [p, l, 1]^T$ 为齐次坐标形式。

3) 二次曲线特征投影模型

对小天体表面特征如陨石坑等进行图像处理, 可提取出其边缘曲线作为二次曲线特征。在着陆点坐标系中, 小天体表面第 i 条二次曲线特征 \mathbf{C}_i 的约束条件为

$${}^L \tilde{\mathbf{p}}^T \mathbf{C}_i {}^L \tilde{\mathbf{p}} = 0 \quad (4)$$

其中: \mathbf{C}_i 为一个对称的满秩矩阵, 在着陆点坐标系中作为二次曲线的矩阵表示 (在相差一个常数因子下, 该表示是唯一的)。

二次曲线特征在图像平面上投影所满足的约束关系为

$$\tilde{\mathbf{u}}^T \mathbf{E}_i \tilde{\mathbf{u}} = 0 \quad (5)$$

其中: \mathbf{E}_i 为像平面二次曲线的矩阵形式。

2 形貌特征快速优选

为实现对多类型特征的快速选取, 本文提出了一种形貌特征快速优选方法。该方法的快速性主要体现在以下3个方面: ①利用解析的评价指标, 降低计算量, 提高特征选取的速度, 增强系统的可观测度; ②在单帧特征选取中, 通过缩小特征搜索范围, 降低待选特征数量, 大幅度缩小特征组合的数量, 从而有效降低星载计算负担, 提高选取速度; ③设计了帧间导航特征继承方法, 继承上一时刻的部分特征用以当前时刻导航, 减少新选取特征的数量, 显著降低了特征组合的数量, 从而降低了星载计算量, 提高了选取速度。形貌特征快速优选方法示意图如图1所示。

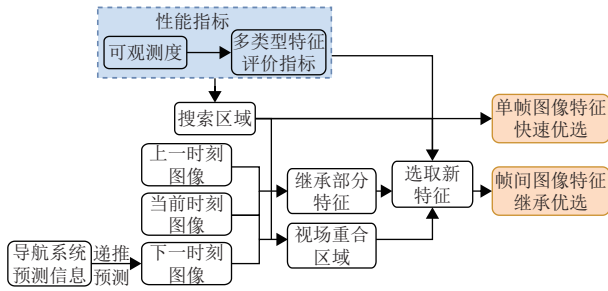


图1 形貌特征快速优选方法示意图

Fig. 1 Diagram of rapid selection of morphological features

2.1 多类型特征快速评价指标

通过提升系统的可观测度, 可有效提高导航的精度。然而, 由可观测性矩阵条件数等定义的系统可观测度虽然通常能够选出导航精度最优的结果, 如最小化 $\text{cond}(\mathbf{J}^T \mathbf{J})$, 最大化特征值 λ_{\min} 和最小化 $\text{tr}((\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1})$ 。这些特征评价指标需要计算6自由度的可观测性矩阵, 并且难以进行解析描述。为提高计算效率, 期待利用一种解析指标来表征系统的可观测度。在提升系统可观测度的过程中, 常见的解析评价指标是通过增强可观测性矩阵的特征值来实现, 例如最大化可观测性矩阵的迹, 即 $\text{tr}(\mathbf{F}) = \sum \lambda_i$, 或者最大化其行列式值, 即 $\det(\mathbf{F}) = \prod \lambda_i$ 。然而, 仅通过增加特征值之和或积来提高系统的可观测性可能存在问题。有时会出现较大的特征值弥补较小的特征值的情况, 导致特征值之和或积仍然保持较高水平, 这并不能真实反映系统的可观测性。以可观测性矩阵的迹作为特征评价指标忽略了构型信息, 进而可能影响导航精度。相比之下, 以行列式值作为特征评价指标时, 尽管其包含了构型信息, 但也需要进行6自由度的计算, 仅利用位置的可观测性分析推导出的评价指标可能会出现多解情况, 这同样会导致某些结果对导航精度产生不利影响。为规避多解问题, 可以通过施加约束条件来实现, 然而这种方法会增加计算的复杂性。之前的研究工作中, 利用Fisher信息矩阵对系统位置可观测性进行了分析^[15]。基于此, 利用上节建立的多类型特征观测模型对系统进行位置可观测性分析。通过引Cramér-Rao不等式($\mathbf{P} \geq \mathbf{F}^{-1}$), Fisher信息矩阵的行列式值与估计误差方差矩阵的行列式值之间的关系可以推导得到不等式, 即

$$\det(\mathbf{P}) \geq \det(\mathbf{F}^{-1}) = \frac{1}{\det \mathbf{F}} = \frac{1}{\prod_{i=1}^n \lambda_i} \quad (6)$$

然而, 由于存在大数值补充小数值的情况, 导致 $\det(\mathbf{F})$ 可能多解问题。为避免这一问题, 可进一步进

行缩放处理, 利用其估计误差下界作为点特征评价指标。

$$F_p = \sum_{i=1}^{n_p(n_p-1)/2} d_i \quad (7)$$

其中: d_i 为不同点特征间的距离。

式(7)给出的评价指标中, 利用像平面中点特征的距离 d 作为变量, 同样也可以利用视线夹角 α 作为特征选取的变量。显而易见地, 在 $[0, \pi]$ 的范围内, d 与 α 正相关。因此, 可以用 α 替代 d 作为特征评价指标的变量。

为此, 可以通过最小化式(8), 来进行点特征优选。

$$F_p = \sum_{i=1}^{n_p(n_p-1)/2} \alpha_i \quad (8)$$

同样, 直线特征的选择标准也可以计算得到, 即

$$F_l = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n_l(n_l-1)/2} d_i + n_l \sum_{i=1}^{n_l} d_{\text{bei}} \\ \sum_{i=1}^{n_l(n_l-1)/2} \alpha_i + n_l \sum_{i=1}^{n_l} \alpha_{\text{bei}} \end{cases} \quad (9)$$

其中: α_{bei} 为直线两端点间的视线夹角。二次曲线特征的选择标准也可以通过同样的方法计算得出, 即

$$F_c = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n_c(n_c-1)/2} d_i + n_c \sum_{i=1}^{n_c} (a_i + b_i) \\ \sum_{i=1}^{n_c(n_c-1)/2} \alpha_i + n_c \sum_{i=1}^{n_c} (\alpha_{ai} + \alpha_{bi}) \end{cases} \quad (10)$$

其中: α_{ai} 和 α_{bi} 为曲线中心点分别和长轴短轴端点间视线夹角。

通过分析上述特征评价指标可知, 直线特征和曲线特征评价指标的后半部分通常远小于前半部分。这表明, 良好的构型通常是影响可观测性的主要因素, 而线段长度或二次曲线的大小则是次要因素。因此, 在同时选择多种类型特征时, 可以先利用式(7)或(8)对点、直线和曲线特征同时进行选取, 然后再考虑次要影响因素, 以便更快速地获得多种类型特征的最优选取结果。

2.2 单帧图像特征快速优选

在单帧形貌特征快速选取方面, 利用评价指标进行特征选取时, 需要对所有特征组合情况进行计算, 严重增加了星载计算负担。值得注意的是, 随着观测陆标数量 n_{ob} 增加, 陆标组合数量 w 爆炸增长。选取 n 个导航特征时候, 满足关系为 $w_{\text{ob}} = n_{\text{ob}}! / (n_{\text{ob}} - n)! n!$ 。

因此, 有必要降低待选特征的数量 n_{ob} , 以降低星载计算量, 提高特征选取速度。

通过Xiu等^[15]的可观测性分析, 说明了最优构型的导航特征, 通常分布在远离视场中心的位置。基于此特性, 设计单帧快速选取方法, 在可观测特征数量较多时, 控制特征搜索区域, 降低待选特征数量, 结合节2.1给出的评价指标, 对多类型特征进行优选, 提高导航精度的同时, 有效地提升选取速度。特征搜索区域如图2所示, 其约束条件可表示为

$$\begin{cases} (p-c_x)^2 + (l-c_y)^2 \geq s^2 \\ 0 \leq p \leq c_x \\ 0 \leq l \leq c_y \end{cases} \quad (11)$$

其中: s 为控制搜索区域的因子, 其值越大则搜索区域越小, 反之则搜索区域越大, 满足 $0 \leq s < \frac{\sqrt{2}}{2} \min\{c_x, c_y\}$ 。

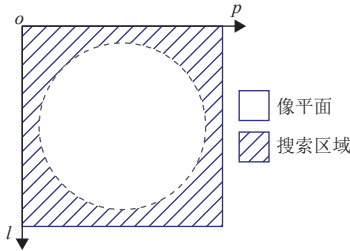


图2 特征搜索区域
Fig. 2 Feature search region

在单帧特征选取方法中, 选取速度主要取决于特征组合的计算效率。为准确对比控制搜索区域方法与不考虑搜索区域方法在计算量的差异, 采用特征组合数量的比值来量化这种差距, 从而体现出计算速度的优势性。当控制搜索区域的方法待选的特征数量为 n_s 时, 特征组合数量满足 $w_s = n_s! / (n_s - n)!n!$ 。其中: $n_s \leq n_{ob}$ 。特征组合数量比值 σ_s 如式(12)所示, 利用所提的控制搜索区域的方法, 计算量可以缩小 σ_s 倍。

$$\sigma_s = \frac{w_{ob}}{w_s} = \frac{\prod_{i=n_{ob}-n+1}^{n_{ob}} i}{\prod_{i=n_s-n+1}^{n_s} i} \quad (12)$$

在可观测的特征数量较多时, 满足 $n \ll n_s < n_{ob}$, 此方法对计算速度的提升尤为显著。在可观测特征分布均匀的情况下, 可利用面积法替代特征数量比值, 计算量比值的极限可表示为

$$\lim_{\frac{n}{n_s} \rightarrow 0} \sigma = \left(\frac{n_{ob}}{n_s} \right)^{n-1} = \frac{1}{\left(1 - \frac{\pi s^2}{d^2} \right)^{n-1}}, \quad 0 \leq s \leq \frac{d}{2} \quad (13)$$

2.3 帧间图像特征继承优选

随着着陆过程的进行, 导航相机的视场会不断变化, 导致导航特征逐渐移出视场范围。因此, 需要不断地提取和匹配新的特征以支持导航。然而, 基于可观测性的特征评价指标在优先选取可观测度最高的特征时, 往往会加剧导航特征的切换次数, 这无疑对星载计算能力构成了挑战。考虑到小天体附着过程中在线特征选取采样间隔短、帧间图像重合度高、特征继承概率高的特点, 并为了降低星载计算量并减少导航特征的切换次数, 提出了一种帧间图像特征继承方法。考虑到上一时刻的某些导航特征在当前时刻可能仍然靠近视场边缘, 且具备较好的可观测性, 因此在导航精度允许阈值下, 可将其继承并用于当前时刻的导航。这样的方法减少了新选取特征的数量, 进而降低了计算量, 提高了特征选取的速度。此外, 通过导航系统预测着陆器状态信息, 结合Xiu^[15]提出的视场计算方法, 预测下一时刻的视场, 并确定视场的重合区域。在特征选取过程中, 优先选取位于视场重合区域内的特征, 这有助于降低特征提取与匹配的计算量。此外, 结合节2.2中提出的搜索区域方法, 可以进一步控制特征的选取区域, 从而显著提升特征选取的速度和效率, 帧间图像特征继承示意图如图3所示。

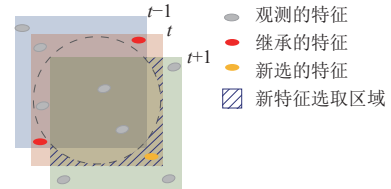


图3 帧间图像特征继承示意图
Fig. 3 Inheritance of inter-frame image features

前述的分析与讨论表明, 在特征选取的过程中, 除了特征评价指标外, 特征组合的数量是决定选取速度的关键因素。所提出的帧间图像特征继承方法, 其快速性主要体现在减少新特征的数量、缩小特征搜索区域以及降低特征切换次数, 进而减少特征提取与匹配的计算量, 最终实现特征的快速选取。值得注意的是, 该方法本身的计算量相对较小, 确保了在实际应用中的高效性和实用性。在继承前一时刻导航特征方面, 为在导航精度所允许的范围内选取适用于当前时刻导航的继承特征, 设计控制搜索区域因子 s 的参数, 以选取前一时刻特征应用于当前时刻导航。当继承特征数量为 ϵ 个时, 满足 $1 \leq \epsilon \leq n, \epsilon \in \mathbb{N}^+$ 。待选特征组合的数量为 $w_\epsilon = n_{ob}! / (n_{ob} - n + \epsilon)!(n - \epsilon)!$, 计算量减少 σ_ϵ 倍, 表示为

$$\sigma_o = \frac{W_{ob}}{W_\epsilon} = \frac{\prod_{i=n_{ob}-n+1}^{n_{ob}-n+\epsilon} i}{\prod_{i=n-\epsilon+1}^n i} \quad (14)$$

分析式(14)可以看出,在导航精度允许的条件下,通过继承上一时刻的部分导航特征并减少新选取的特征数量,可以极为显著地降低计算量。这一策略不仅优化了特征选取过程,也提高了整体算法的运行效率。在可观测的特征数量较多时,满足 $1 \leq \epsilon \leq n \ll n_{ob}$, σ_o 的范围为

$$\frac{n_{ob}}{n} \leq \sigma_o \leq w_{ob} \quad (15)$$

通过式(15)可以看出,继承特征在提升特征选取的快速性方面起到重要作用。为实现在当前时刻选取的特征能够顺利继承至下一时刻,提出特征继承方法。通过导航系统预测信息来递推下一时刻着陆器的状态,并利用视场计算方法,预测下一时刻视场。通过选取当前时刻视场与下一时刻视场重合区域内特征,通过控制特征选取区域,不仅降低了计算量,还为下一时刻的特征继承奠定了基础。这一策略对于提升特征选取的效率和连续性具有重要意义。此外,在视场重合区域选取特征的过程中,可以考虑节2.2中提出的控制搜索区域方法,进一步缩小特征选取区域,降低计算量,如图3所示。当利用此方法待选的特征数量为 n_d ,继承前一时刻特征数量为 ϵ ,特征组合数量满足 $w_d = n_d! / (n_d - n + \epsilon)!(n - \epsilon)!$ 。其中: $n_d < n_s < n_{ob}$, $1 \leq \epsilon \leq n$ 。特征组合数量比值 σ_d 如式(16)所示,计算量可以缩小 σ_d 倍。

$$\sigma_d = \frac{W_{ob}}{W_d} = \frac{\prod_{i=n_{ob}-n+1}^{n_{ob}} i}{\prod_{i=n_d-n+\epsilon+1}^{n_d} i \prod_{i=n-\epsilon+1}^n i} \quad (16)$$

同样地,当观测特征数量较多时,满足 $1 \leq \epsilon < n \ll n_d < n_{ob}$, σ_d 的范围可以表示为

$$\frac{\prod_{i=n_{ob}-n+1}^{n_{ob}} i}{n \prod_{i=n_d-n+2}^{n_d} i} \leq \sigma_d \leq w_{ob} \quad (17)$$

3 仿真分析

本节将通过仿真来验证本文提出的形貌特征快速优选方法,仿真实验CPU为12核的AMD Ryzen 9 5900X。选取4769 Castalia作为目标小天体,其平均直

径为1.4 km,自转周期为4.095 h。针对优化选取问题,由于直接采用穷举法来搜索满足约束的最优导航特征组合,计算量较大。为验证所提出的形貌特征快速选取方法,采用文献[13]的禁忌搜索算法进行对比实验。光学相机、着陆器状态及禁忌搜索法参数见表1,其中着陆器位置表示在小天体固连坐标系下,着陆器姿态用欧拉角表示,选取的特征数量 $n = 4$ 。

表1 光学相机、着陆器状态及禁忌搜索法参数
Table 1 Parameters of optical camera, spacecraft status and tabu search

参数	数值
焦距 f /mm	20
视场角 $fov/^\circ$	30
图像分辨率 $w \times h$ /pixel	1024×1024
着陆器位置 r /m	[-81.132 7, 32.680 9, 858.885 7] ^T
着陆器姿态 $\varphi_1/^\circ$	[13.9134, -9.669 5, 129.4240] ^T
禁忌搜索候选解数量	80
禁忌搜索最大迭代次	40
禁忌长度	$\lceil \sqrt{n_{ob}(n_{ob}-1)/2} \rceil$

1) 多类型特征选取结果

为验证节2.1采用的多类型特征评价指标对形貌特征选取的有效性,对比利用优选特征和随机特征的导航精度。对图像进行处理,提取及匹配到113个点特征、15个直线特征和13个曲线特征。利用多类型特征评价指标对其进行优选,优选结果如图4所示。

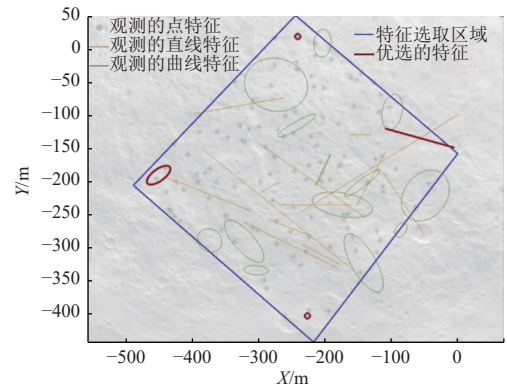


图4 多类型特征优选结果
Fig. 4 Multi-type feature selection results

通过图4可以看出,为提高系统的可观测度,优选的特征均匀分布在视场的边缘。为验证优选特征对导航精度的影响,利用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法进行了1000次模拟。仿真条件如表1所示,着陆器位置误差为10 m,图像测量误差为0.5个像素,特征位置误差为0.5 m。优选特征和随机特征位置估计误差的蒙特卡罗仿真对比如图5所示。

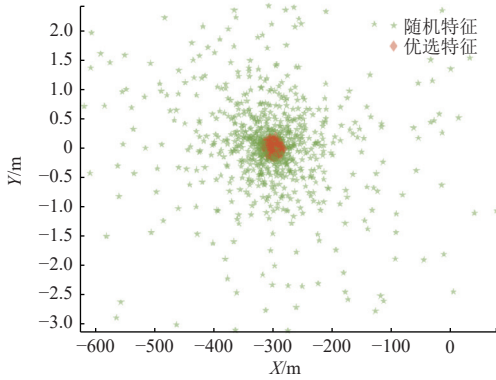


图 5 优选和随机特征位置估计误差蒙特卡罗仿真

Fig. 5 Monte Carlo simulation of position estimation error for selected and random features

图5表明, 优选的多类型特征位置估计误差椭圆明显小于随机4个特征的位置估计误差椭圆, 表明多类型特征选取可有效地提升导航的精度。

2) 单帧图像特征快速优选

为验证所提出的单帧图像特征快速优选方法对计算效率的提升, 导航相机和着陆器状态采用表1中的参数。以点特征为例, 视场内可观测特征为74~209个, 取 $s = d/2$, 仿真结果如图6所示, 利用所述的特征评价指标计算各观测特征数量下特征选取时间, 计算时间结果如表2所示。

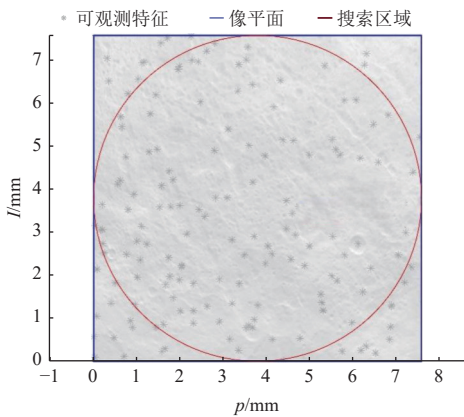


图 6 单帧图像特征搜索区域

Fig. 6 Single frame image feature search region

表2中, $s = 0$ 时即为不考虑特征搜索区域的方法, $s = d/2$ 通过此表可以看出, 结合特征搜索区域的选取方法可以显著提高计算效率, 随着可观测特征数量的增加, 计算时间也随之增大, 这是由于单帧图像特征优选方法减少了待选特征的数量, 随着相机视场内可观测特征的增加, 待选特征数量也随之增加。在一定条件下, 此方法计算速度优于禁忌搜索法。禁忌搜索法结合搜索区域时, 计算速率也有一定提升。在

可观测特征数量较少时, 控制搜索区域的方法优选速度较快, 在可观测特征数量较多时, 可以结合禁忌搜索算法, 进一步提升选取速度。本仿真实验说明了单帧图像特征快速优选方法可以有效提高特征选取的计算效率, 根据实际情况可以适当调节 s 的参数, 以提高特征优选速度。

表 2 单帧图像特征优选方法对计算时间影响

Table 2 Influence of single frame image feature selection method on calculation time

数量	穷举法 ($s = 0$)	#1 ($s = d/2$)	禁忌搜索法 ($s = 0$)	#1结合禁忌搜索法 ($s = d/2$)
74	1.696 6	0.007 8	0.110 4	0.076 5
96	4.722 0	0.018 1	0.138 4	0.088 7
113	9.128 6	0.055 9	0.158 6	0.091 8
151	29.351 2	0.299 6	0.204 5	0.097 9
168	45.122 1	0.322 5	0.233 5	0.103 1
187	69.539 5	0.411 6	0.549 3	0.106 6
209	109.533 1	0.638 9	0.641 2	0.110 1

注: #1表示单帧图像特征优选方法。

3) 帧间特征继承优选

为验证所提出的帧间特征继承方法对计算效率的提升, 以连续3帧图像为例, 导航相机和着陆器 t_1 时刻下状态参数如表1所示, 着陆器 t_2 和 t_3 时刻下状态参数如表3所示。 t_1 为前一时刻, 导航特征如图7所示, 利用本文所提出的图像特征继承优选方法, 对 t_2 时刻视场(当前视场)和 t_3 时刻视场(预估视场)内特征进行优选, t_2 和 t_3 时刻视场内分布特征均为105个。同样采用所述的特征评价指标对视场内特征进行优选, 并对比单帧特征选取结果及考虑帧间特征继承的选取结果。每帧选取特征 $n = 4$, t_2 时刻继承 t_1 时刻导航特征和 t_3 时刻继承 t_2 时刻导航特征为 $\epsilon = 0 \sim 3$ 个, $\epsilon = 0$ 时即为不考虑特征继承的方法, 选取结果如图7所示, 选取时间如表4所示。

表 3 着陆器 t_2 和 t_3 时刻下状态参数

Table 3 Spacecraft state parameters at t_2 and t_3

参数	数值
着陆器位置 r_2/m	$[-82.622\ 1, 30.534\ 8, 850.079\ 1]^T$
着陆器姿态 $\varphi_2/(\circ)$	$[13.480\ 1.8, 997\ 7, 131.491\ 0]^T$
着陆器位置 r_3/m	$[-84.027\ 4, 28.419\ 7, 841.108\ 7]^T$
着陆器姿态 $\varphi_3/(\circ)$	$[13.057\ 5, -8.346\ 5, 133.573\ 6]^T$

通过表4可以看出在参数固定下, 特征继承数量 $\epsilon = 0 \sim 3$ 个时, 禁忌搜索算法计算时间基本一致, 帧间特征继承方法对计算效率提升显著, 这是由于继

承了上一时刻部分特征,减少了新选特征数量,从而大幅度降低特征组合数量,极大地提高了计算效率,并且随着继承特征数量的增加,计算效率提升越发显著,说明了特征继承对于计算效率的提升至关重要。

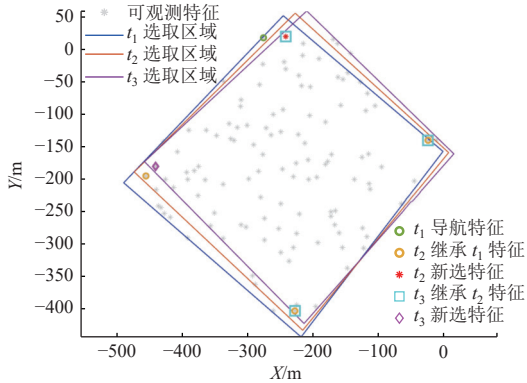


图7 帧间图像特征继承优选

Fig. 7 Inter-frame image feature inheritance selection

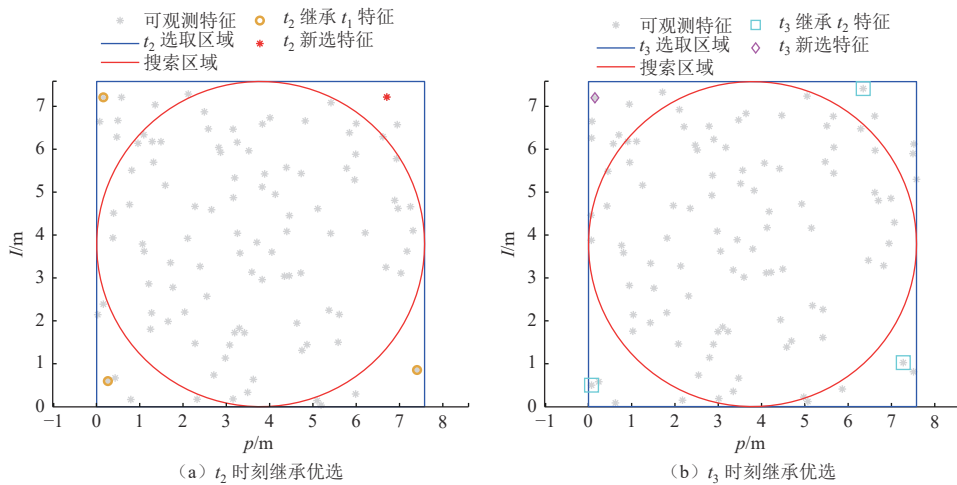


图8 考虑搜索区域的图像特征继承优选

Fig. 8 Inter-frame image feature inheritance selection with region considered

4 结论

针对小天体附着过程中形貌特征复杂且数量众多,导致在线特征选取时特征组合数量多、计算量大、计算效率低的问题,本文提出了一种在线形貌特征快速优选方法。首先建立了星表形貌多类型特征观测模型,并利用解析的多类型特征快速评价指标结合特征搜索区域,设计了单帧图像特征快速优选方法,同时,考虑到小天体附着过程中在线特征选取采样间隔短、帧间图像重合度高、特征继承概率高的特点,提出了帧间图像特征继承优选方法。通过仿真实验验证,单帧图像控制搜索区域和帧间图像特征继承方法

表4 帧间图像特征继承优选对计算时间影响

Table 4 Influence of interframe image feature inheritance selection on calculation time

继承特征数量	穷举法 ($s=0$)	#1 ($s=d/2$)
#2 ($\epsilon=0$)	47.193 0	0.373 8
#2 ($\epsilon=1$)	1.820 9	0.051 3
#2 ($\epsilon=2$)	0.052 8	0.005 1
#2 ($\epsilon=3$)	0.001 2	0.000 6
禁忌搜索法 ($\epsilon=0\sim 3$)	0.281 6	0.166 4

注: #1表示单帧图像特征优选方法, #2表示帧间图像特征继承优选。

结合2.2和2.3节所提出的方法,将搜索区域引入到帧间图像特征继承方法中,设计参数 $s=d/2$,结合搜索区域的选取结果如图8所示。特征选取时间如表4所示。通过表4可以看出,将2.2节提出的控制搜索区域方法引入到帧间图像特征继承优选方法中,可以进一步显著提升计算效率。在可观测特征数量较多情况下,可以利用搜索区域和帧间图像特征继承结合的方法进行优选。

的设计,降低了特征组合数量,提升了计算效率,为未来小天体附着实时特征选取奠定了基础。

参考文献

- [1] YU M, CUI H T. Robust hazard matching approach for visual navigation application in planetary landing[J]. Aerospace Science and Technology, 2015(47): 378-387.
- [2] 于正泥, 崔平远. 行星着陆自主导航与制导控制研究现状与趋势[J]. 深空探测学报(中英文), 2016, 3(4): 345-355.
- [3] YU Z S, CUI P Y. Research status and development trend of the autonomous navigation, guidance, and control for planetary landing[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(4): 345-355.
- [3] 崔平远, 张成宇, 朱圣英, 等. 小天体柔性附着技术[J]. 宇航学报,

- 2023, 44(6): 805-816.
- CUI P Y, ZHANG C Y, ZHU S Y, et al. Technologies for flexible landing on small celestial bodies[J]. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(6): 805-816.
- [4] 吴伟仁, 于登云. 深空探测发展与未来关键技术[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2014, 1(1): 5-17.
- WU W R, YU D Y. Development of deep space exploration and its future key technologies[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014, 1(1): 5-17.
- [5] 崔平远, 朱圣英, 崔祐涛. 小天体软着陆自主光学导航与制导方法研究[J]. *宇航学报*, 2009, 30(6): 2159-2164.
- CUI P Y, ZHU S Y, CUI H T. Autonomous optical navigation and guide method for soft landing on small bodies[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(6): 2159-2164.
- [6] TSUDA Y, YOSHIKAWA M, SAIKI T, et al. Hayabusa 2-sample return and kinetic impact mission to near-earth asteroid Ryugu[J]. *Acta Astronautica*, 2019(156): 387-393.
- [7] MCCARTHY L K, ADAM C D, LEONARD J M, et al. OSIRIS-Rex landmark optical navigation performance during orbital and close proximity operations at asteroid Bennu[C]//*Proceedings of AIAA SciTech 2022 Forum*. San Diego, CA: AIAA, 2022.
- [8] 邵巍, 顾天昊. 一种基于星表特征直线匹配的着陆器位姿估计算法[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2017, 4(3): 281-286.
- SHAO W, GU T H. A new approach based on line correspondences for attitude and position estimation of lander[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(3): 281-286.
- [9] 崔平远, 贾贺, 朱圣英, 等. 小天体光学导航特征识别与提取研究进展[J]. *宇航学报*, 2020, 41(7): 880-888.
- CUI P Y, JIA H, ZHU S Y, et al. Research progress on optical navigation feature recognition and extraction technologies for small body exploration[J]. *Journal of Astronautics*, 2020, 41(7): 880-888.
- [10] NAOYA T, YUICHIRO C, ERI T, et al. Development of image texture analysis technique for boulder distribution measurements: applications to asteroids Ryugu and Itokawa[J]. *Planetary and Space Science*, 2021(9): 105249.
- [11] STEINER T J, BRADY T M, HOFFMAN J A. Graph-based terrain relative navigation with optimal landmark database selection[C]//*Proceedings of 2015 IEEE Aerospace Conference*. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2015.
- [12] ZHU S Y, LIU D C, LIU Y, et al. Observability-based visual navigation using landmarks measuring angle for pinpoint landing[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 155: 313-324.
- [13] XIU Y, ZHU S Y, XU R, et al. Optimal crater landmark selection based on optical navigation performance factors for planetary landing[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(3): 254-270.
- [14] XU C, WANG D Y, HUANG X Y. Autonomous navigation based on sequential images for planetary landing in unknown environments[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2017, 40(10): 2587-2602.
- [15] XIU W B, LONG J T, ZHU S Y, et al. Landmark robust selection for asteroid landing visual navigation[J]. *Acta Astronautica*, 2024, 214: 665-676.

作者简介:

修文博(1996-), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 深空探测自主导航、制导与轨迹优化。

通信地址: 北京市海淀区中关村南大街5号北京理工大学宇航学院(100081)

电话: 18801339661

E-mail: xiuwenbo@bit.edu.cn

朱圣英(1982-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 深空自主导航与控制、多约束轨迹优化与制导。**本文通信作者**。

通信地址: 北京市海淀区中关村南大街5号北京理工大学宇航学院(100081)

电话: (010)68913550

E-mail: zhushy@bit.edu.cn

刘延杰(1988-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向: 深空探测器轨道设计与优化、飞行器导航制导与控制、指挥信息系统总体技术研究。**本文通信作者**。

通信地址: 青岛市崂山区松岭路99号(266042)

电话: 13770536752

E-mail: lyj8760rus@qust.edu.cn

Morphology Feature Rapid Selection for Asteroid Landing

XIU Wenbo^{1,2}, HE Ying³, ZHU Shengying^{1,2}, LIU Yanjie⁴

(1. Institute of Deep Space Exploration, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Autonomous Navigation and Control for Deep Space Exploration, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100081, China; 3. International Cooperation Center of China Aerospace, Beijing 100048, China;

4. College of Automation & Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: Given the complex and numerous morphological features during asteroid landing, which lead to challenges such as huge number of feature combinations, high computational load in online feature selection and low computational efficiency, in this paper an online multi-type feature rapid selection method was proposed. Using rapid selection criteria for multi-type features combined with search region, a method for selecting single-frame image features was established. Additionally, considering the short sampling interval, high inter-frame image overlap, and high feature inheritance probability during asteroid landing, a method for inter-frame image feature inheritance selection was proposed. Simulation experiments show that the design of single-frame image search regions and inter-frame image feature inheritance methods substantially reduces the number of feature combinations, thereby greatly enhancing the efficiency of computational and online feature selection.

Keywords: asteroid landing; multi-type feature; rapid feature selection; morphology feature; visual navigation

Highlights:

- A rapid selection method for multi-type feature is proposed, which significantly improves the speed of feature selection.
- A single frame image feature selection method is proposed, which reduces the number of features to be selected and the number of feature combinations.
- An inter-frame image feature inheritance selection method is introduced, which reduces the number of newly selected features and the number of feature combinations.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]