

飞行器着陆安全区自适应选取方法

王雅昕, 贺盈波, 吴云, 张建祥, 华宝成

(北京控制工程研究所, 北京 100190)

摘要: 提出了一种飞行器着陆安全区自适应选取方法, 采用两级障碍检测方法, 一级障碍检测将偏离全图基平面较大的数据判定为障碍区域, 非障碍区划分为子区域进行二级障碍检测, 分区大小可以根据障碍区域所占比例自适应调节。综合考虑子区域与基平面坡度差、障碍值和障碍个数等因素, 提出一种多方面障碍度评价指标, 完成着陆安全区选取。经过激光点云数据的验证, 该方法可以识别出障碍地形, 最终选取的着陆安全区无明显障碍, 方法验证有效。

关键词: 火星采样返回; 软着陆; 避障; 激光点云

中图分类号: V1

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2026)01-0088-09

DOI: 10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20240090

引用格式: 王雅昕, 贺盈波, 吴云, 等. 飞行器着陆安全区自适应选取方法[J]. 深空探测学报(中英文), 2026, 13(1): 88-96.

Reference format: WANG Y X, HE Y B, WU Y, et al. Adaptive selection of safe landing zones for aircraft[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2026, 13(1): 88-96.

引言

火星被认为是距离地球较近, 且与地球条件最相似的星球, 探索火星对于研究太阳系起源及演化、寻找生命存在等重大科学问题具有重要的意义, 同时也在探索将其改造为宜居星球的可能^[1-2], 因此受到了广泛关注。此外, 火星距离地球较近, 人类有望率先登上火星, 因此火星是近年来深空探测的首选目标之一^[3-5]。从20世纪60年代起, 世界各国积极开展火星探测任务的研究, 俄罗斯(包括前苏联)、美国、日本、欧洲航天局(European Space Agency, ESA)、印度、阿联酋、中国等7个国家(组织)均发射过火星探测器^[5]。美国进行了“机遇号”(Opportunity)、“勇气号”(Spirit)、“好奇号”(Curiosity)、“毅力号”(Perseverance)等火星探测任务^[6], 并取得了一系列重大发现, 包括液态水的存在等, 对于探索生命存在具有重要意义。欧洲和俄罗斯进行国际合作, 进行“火星生物学”(ExoMars)^[7-8]任务和火星采样返回任务, 携带的科学仪器对火星大气中的甲烷等微量气体进行监测和研究, 以及在着陆点周围观测火星环境^[9], 该任务第一阶段在着陆时失败坠毁, 第二阶段正在筹备中。中国首颗火星探测器“天问一号”通过一次发射实现了火星环绕、着陆和巡视的全部目标, 对火星开展全球

性、综合性的环绕探测, 并在火星表面开展区域巡视探测, 是中国火星探测的第一步^[9]。

火星采样返回是近年国际上深空探测规划的重点任务。火星采样返回任务通过获取火星表面土壤和岩石样品返回地球, 有助于对火星地理地质进行详细研究, 为未来载人火星飞行奠定坚实基础^[6]。火星采样返回系统复杂, 国际上多个研究机构提出了不同类型的火星采样返回方案^[10]。其中美国的“毅力号”火星车迈出了火星采样返回的第一步, “毅力号”火星车在杰泽罗陨石坑(Jezero Crater)成功着陆, 已发现有机分子, 并采集火星地质学和气候研究相关数据, 同时进行采样并保存样品, 并为载人登陆火星进行相关的准备试验^[11]。

火星进入、下降和着陆过程是火星着陆探测任务最为关键的阶段, 该阶段直接影响任务的成败, 因此如何顺利完成火星表面平稳安全着陆是火星探测中一个关键问题。目前中国飞行器着陆主要采用软着陆方法, 下降过程将主要完成安全着陆区定位, 消除偏差, 以及避障和重规划等^[12]。进行火星采样返回需要飞行器在火星表面完成软着陆, 需要在飞行过程中自主完成安全区定位及避障功能。“嫦娥五号”自主着陆避障系统由光学相机和激光雷达组成, 避障过程采用

两级避障的模式,分别采用光学粗避障和激光精避障识别地形粗糙程度,确定最终安全着陆区^[13]。美国的“火星2020”(Mars 2020)着陆火星,主要采用火星MRO HiRISE相机影像在火面分析障碍,生成安全目标地图作为先验信息,利用器上的着陆视觉系统进行位置估计并确定机动方向和落点位置^[14]。“天问一号”着陆器采用双目视觉避障技术,通过图像障碍识别和双目立体地形感知完成“天问一号”降落过程中的安全着陆点自动选取^[15]。

在着陆避障及安全区选取中,目前飞行器主要通过相机和激光雷达两种方式进行,其中激光点云数据具有精度高、不受外界光照影响的特点,往往是进行着陆点选取的最后一环,也是确保安全着陆的关键。目前的基于激光点云数据的着陆安全区选取方法主要采用全图或固定区域障碍检测的方法^[13,16],该方法运算量及时间较为固定,针对全图区域进行障碍度判断,并未对不同的地形进行自适应调整,对于崎岖地形和平坦地形判断尺度大小一致。针对火星采样返回任务,目前也进行了火星地貌相关的研究^[17-18],根据“天问一号”得到的数据分析,火星地形更加崎岖,具有较多的陨坑、岩石、断层等^[15,19],安全区选取更加具有挑战性。传统的安全点的选取方式有一定局限性,安全点判断尺度固定,当尺度较大时容易对稍小的障碍漏检,尺度较小时运算量增加,对实时性产生不利影响。因此需要针对火星的特殊地形进行适应性尺度划分,以保证安全性和实时性,地形平坦时适当增大尺度,地形崎岖时适当减小尺度。在航天器着陆过程中,在保证着陆安全性的同时,需要在更短时间内完成避障安全区的选取,因此需要准确、快速识别火星表面的障碍并迅速给出合理的着陆区,以便更充分地完成着陆位置和姿态控制。本文提出了一种飞行器着陆安全区自适应选取方法,首先完成全图坡度平面的拟合,将偏离拟合平面较远的数据判定为障碍区域,在其余较为平坦区域进行分区域障碍检测,并提出一种多方面障碍度评价指标完成避障。其中分区大小可以根据障碍区域所占比例自适应调节,在整体较为平坦的地形区选择较大的区域划分方式以减小模型计算量,在整体更崎岖的地形区选择较小的区域划分方式以获得更精确的避障结果。该避障安全区选取方法可以自适应完成子区域划分,对崎岖地形适应更强,同时可以更快速完成安全着陆区选取,可以实现动态过程着陆,为控制落点提供更充分的运动时间,为火星采样返回等飞行器软着陆场景提供新的思路。

1 问题分析

1.1 飞行器着陆方式

飞行器着陆分为两种方式,分别为硬着陆和软着陆。硬着陆一般无需对着陆飞行器进行减速保护,大多为破坏性着陆;软着陆则需要保证飞行器平稳安全地着陆在行星表面,往往被用于探测及载人任务。火星探测任务需要采用软着陆方法,以保证飞行器的后续工作。在飞行器软着陆过程中,由于行星地表情况存在不确定性,为了保证任务的成功,飞行器需要自主完成避障安全区的选取^[20]。

1.2 数据获取方式

为了实现自主避障,飞行器需要配备相应的敏感器,对火星表面数据进行采集分析,选取合适的着陆区。目前主要通过光学相机和激光雷达两种方式进行数据采集,光学相机获取火星表面的二维信息,激光雷达可以获取火星表面的三维点云信息^[20]。光学相机精度稍差,可见范围广,往往用于粗略避障。激光点云数据精度高、不受外界光照影响,在着陆点选取中得到更多的应用,也是确保安全着陆的关键^[21]。

1.3 激光雷达着陆区选取方法

自主避障过程中,如何选取合理的安全着陆区是需要重点关注的问题,针对该问题,研究者已经进行了相关的研究。吴伟仁等^[20]提出了一种月面软着陆方法,将激光点云数据进行单元格划分,采用最小二乘法拟合平面,用残差定义粗糙度进行避障区选取。“嫦娥五号”月面软着陆采用了两级避障策略,激光避障中提出了新的平面拟合方法,提高了实时性和坡度检测的鲁棒性,设计了安全评价系数选取着陆点^[13]。Mango等^[16]提出了一种激光点云避障算法,引入参考地平面概念,基于随机抽样一致算法(RANdom SAMple Consensus, RANSAC)进行平面拟合,并进行粗略和精细着陆区选择。Cui等^[22]首次提出将安全点选取作为优化问题,同时考虑油耗等因素对着陆安全的影响,提出了一个综合指标以评估着陆安全度,简单的一维搜索即可得到着陆点。

火星地形较为复杂,安全区选取更加具有挑战性。本文提出了一种着陆安全区自适应选取算法,自适应完成子区域划分,对复杂地形适应更强,同时可以更快速完成安全着陆区选取。

2 着陆安全区自适应选取算法

2.1 算法说明

飞行器着陆安全区自适应选取方法首先需要对激光雷达点云数据进行预处理,滤除明显偏离实际范围

的点, 避免在避障过程中引入异常值影响避障结果。本文提出的避障安全区选取算法分为两级, 分别针对不同大小的障碍进行检测和划分: 一级障碍检测关注于较大的陨坑、断层、石块等, 为首要避开区域; 二级障碍检测侧重于较小的障碍。首先完成基平面的拟合, 即全图平面拟合, 并进行一级障碍判别, 将偏离基平面的点视为障碍点, 不参与后续障碍检测运算。完成一级障碍检测后, 根据障碍占比选择相应的点云划分区域大小, 在每个子区域内进行二级障碍检测, 并根据障碍度指标进行排序, 选择障碍度最低的区域作为安全点区域, 完成激光点云避障过程。

一级避障主要考虑较为明显的障碍, 如较大的陨坑、石块等, 由于高度起伏较大, 容易在一级避障时通过与基平面的离散差异判别, 该区域被认定为障碍区域, 不再参与后续运算, 从而减小后续障碍检测的计算量。

二级避障则关注较平缓的障碍分布, 主要包括一些小陨坑、石块、较小的坡度地形等障碍, 该障碍起伏值较小, 需要进行更精细的障碍检测。因此采取分区障碍检测的方法, 将全图划分为若干个子区域, 在每个子区域内进行障碍检测, 并提出一项障碍度指标, 该指标受到坡度与基平面差值大小、障碍偏离度、障碍个数3个因素影响, 进行更全面的障碍检测评估。其中子区域划分大小根据一级障碍检测中障碍占比进行自适应调整。

完成两级避障后, 根据障碍度指标进行排序, 选取障碍度最低的区域作为安全着陆区。

激光点云避障安全区选取算法流程图如图1所示。

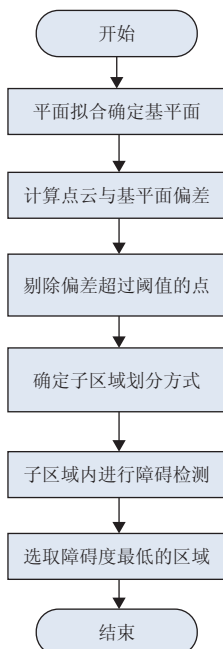


图1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow chart

2.2 一级障碍判别

1) 基平面拟合

对激光点云数据进行坡度拟合, 目前坡度拟合算法主要包括最小二乘法、特征值法等, 但以上方法具有迭代速度慢等问题, 时间开销较大, 本文应用基于数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 数据的坡度拟合方法^[23], 该方法已被用于地外星球着陆, 计算实时性高, 对于较小坡度检测同样具有较好的精度和鲁棒性。通过坡度拟合算法, 确定激光点云数据的基平面和基平面的坡度, 后续一级二级障碍检测算法均基于该基础平面确定。

平面方程如下

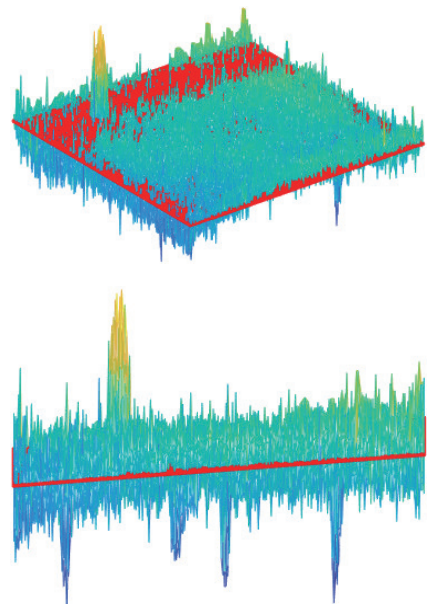
$$K_1X + K_2Y + K_3 = Z \quad (1)$$

坡度计算如下

$$\theta = \arcsin \left(\sqrt{1 - \frac{1}{K_1^2 + K_2^2 + 1}} \right) \quad (2)$$

确定平面方程 Z_1 后, 可以得出相应的法向量以及基平面坡度 θ_0 , 各个激光点云在基平面投影位置等信息。

图2为基平面拟合场景, 可以看出各个激光点云数据距离基平面的偏离程度。



注: 红色平面为基平面, 蓝色部分为激光点云分布。

图2 基平面拟合

Fig. 2 Base plane fitting

2) 一级障碍判别

完成基平面拟合后, 根据激光点云数据偏离基平

面的程度, 进行一级障碍判别。将激光点云数据投影至基平面, 并与对应的激光点云数据作差, 得到的差值即为激光点云数据偏离度, 设定相应的判别阈值, 偏离度大于阈值 T_1 的部分判定为障碍区域, 该障碍区域不再参与后续运算。障碍判别公式如下

$$\begin{cases} D_i - Z_{li} > T_1, \text{障碍点} \\ D_i - Z_{li} < T_1, \text{非障碍点} \end{cases} \quad (3)$$

其中: D 为激光点云数据; i 为激光点云序号; Z_i 为第 i 个激光点云数据相对于基平面的投影点。

2.3 二级障碍判别

一级障碍识别已经完成了大障碍物避障, 在此基础上, 对一级障碍识别中的非障碍点进行二级障碍判别, 以识别偏离基平面较小的区域内的起伏障碍。该部分障碍主要包括较小的陨坑、石块、缓坡等。二级障碍识别是较小范围内的精细避障, 因此需要将原始数据划分为若干个子区域, 在每个子区域内进行障碍识别和评价, 最终选取障碍度最低的区域作为着陆区。

1) 子区域划分

将原始激光点云数据均匀划分为 $M \times M$ 个子区域, M 取值根据一级障碍识别中的障碍个数进行自适应调整。若障碍个数过多, 则增大 M , 以划分更多的子区域以参与障碍检测, 避免一级障碍过多导致子区域数量过少的情况。若一级障碍个数较少, 则认为整体较为平坦, 可以选择较小的 M 值, 即扩大子区域的范围, 减小运算量。

考虑一级障碍识别中的障碍个数占比 α , U 为式(3)中满足 $D_i - Z_{li} > T_1$ 的所有元素的集合。

$$\alpha = \frac{|U|}{N} \quad (4)$$

其中: N 为激光点云数据总点数; $|U|$ 为集合中元素总个数。

自适应调节子区域个数 M , 同时兼顾运算速度, 确定 M 取值公式为

$$M = \left\lceil \frac{1}{1 + e^{-\alpha \times 100}} \times A \right\rceil \quad (5)$$

其中: A 为算法允许的子区域最多划分个数, 与平台最大算力相关; $\lceil x \rceil$ 为向下取整。

根据 M 取值将原始激光点云数据均匀划分为 $M \times M$ 个子区域, 并对每个子区域进行标志判别

$$flag_i = \begin{cases} \text{danger}, & D_{ij} - Z_{lij} > T_1 \\ \text{safe}, & D_{ij} - Z_{lij} < T_1 \end{cases} \quad (6)$$

其中: $flag_i$ 为第 i 个子区域的障碍标志; D_{ij} 和 Z_{lij} 分别

为第 i 个子区域中的第 j 个点的激光数据和相对于基平面的投影点。

2) 障碍度评价指标

完成子区域划分后, 在每个子区域内进行坡度拟合, 坡度拟合方式和前文一致, 完成坡度拟合后, 得出子区域的拟合平面 Z_m , 并计算每个子区域的坡度 θ_m , 并和基平面坡度作差, 并取其绝对值, 得出相对坡度值 $\Delta\theta_m$, 计算方式如下

$$\Delta\theta_m = |\theta_m - \theta_0| \quad (7)$$

相对坡度值表征地形的起伏变化, 地形出现起伏时, 相对坡度值也随之增大。

得到子区域的拟合平面 Z_m 后, 与一级障碍判别采用类似的方法, 将子区域内的激光点云数据投影至子区域拟合平面, 并与对应的激光点云数据做差, 得到的差值即为子区域内的激光点云数据偏离度, 该偏离度用 ΔH 表示, 计算方式如下

$$\Delta H_{mi} = D_{mi} - Z_{mi} \quad (8)$$

其中: D_m 为第 m 个子区域内的激光点云数据; i 为激光点云序号, 偏离度表征激光点云相对于子区域拟合平面的地形起伏程度, 偏离度越大表示地形起伏越大, 可能具有石块或陨坑。

此外, 统计每个子区域内, 偏离度超过阈值 T_2 的点云个数 N_m , 障碍个数越多, 代表子区域内的障碍点位数越多。

本文提出一种障碍度评价指标 P , 定义如下

$$P_m = \Delta\theta_m * \frac{\sum_{i \in L_m} (\Delta H_{mi} - T_2)^2}{N_m} \quad (9)$$

其中: P_m 表示子区域 m 的障碍度评价指标; L_m 为该子区域内的所有点云; T_2 为探测阈值, 考虑在总偏离度累加和确定的情况下, 障碍点个数越少则代表障碍偏离程度越大, 从而表示障碍点更为尖锐, 具有的危害更大, 因此在实际着陆过程中, 尤其注意避开此类尖锐障碍区域。

对于子区域划分时存在一级障碍的子区域, 不再进行障碍评价指标计算, 认为 $P_m \rightarrow +\infty$ 。

完成每个子区域内指标的评价后, 根据实际需要的着陆区域选取相应范围的子区域大小 $n \times n$, 总的障碍度指标为各个子区域的障碍度指标的平均值

$$\bar{P}_m = \frac{\sum_{i=1}^{n \times n} P_{mi}}{n \times n} \quad (10)$$

结合以上分析, 可以认为总障碍度指标与该区域内的整体障碍度成正比, 在安全区选择时选择总障碍度最小的区域作为最终的着陆区。

3 试验结果分析

针对上文提出的避障安全区选取方法, 通过试验进行验证, 以验证避障安全区选取的效果, 是否满足避障要求。

3.1 雷达点云数据

激光雷达点云数据一般采用飞行时间方法测量, 激光点云噪声来源主要为探测噪声, 该噪声量级与激光雷达探测特性相关, 认为高度噪声服从零均值的正态分布, 其标准差为 σ , 激光点云数据噪声 S 服从正态分布, 概率分布图如图3所示。

$$S \sim N(0, \sigma^2) \quad (11)$$

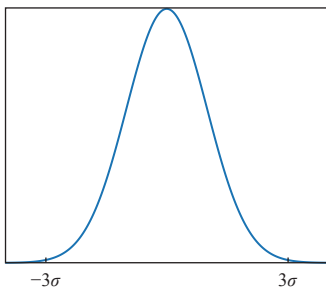


图3 概率分布图
Fig. 3 Probability distribution plot

为减小由于噪声带来的地形起伏影响, 保证避障安全区选取的有效性, 障碍探测阈值 T_2 一般至少为 3σ 。探测阈值过小容易受到噪声影响, 虚警率提高。本次试验中障碍探测阈值 T_2 设置为0.1。

试验验证数据通过激光雷达实测地形得出, 噪声来源包括大气气溶胶、激光雷达实际探测噪声等。点云分辨率 256×256 , 点云中包含石块、坑等障碍, 并存在相对平坦区域, 可以用于避障安全区选取的验证。

由于火星存在大气, 在实际应用中可能出现气溶胶等的影响, 会导致激光雷达数据部分点位置为气溶胶回光数据, 该数据距离范围一般为10 m以内, 如不进行处理, 该数据可能会被判定为障碍, 影响安全区的选取。因此需要进行数据有效性判断, 剔除气溶胶等杂点影响。目前激光雷达可以直接进行距离限制, 以去除气溶胶影响。同时算法中也增加了数据有效性判断, 设置相应的有效性阈值, 本文实验中阈值设置为10 m。

3.2 着陆安全区选取

点云数据及基平面拟合效果如图4所示, 图4(a)为原始点云数据分布情况, 可以看出图中存在若干坑包等障碍, 并存在一个较大的凸起。基平面拟合后的结果如图4(b), 拟合后的基平面用红色表示, 点云图像用渐变色表示, 图中可以看出, 基平面拟合后, 点云数据在基平面的上下浮动, 较大的障碍偏离基平面较远, 可以通过阈值判定完成有效的识别。

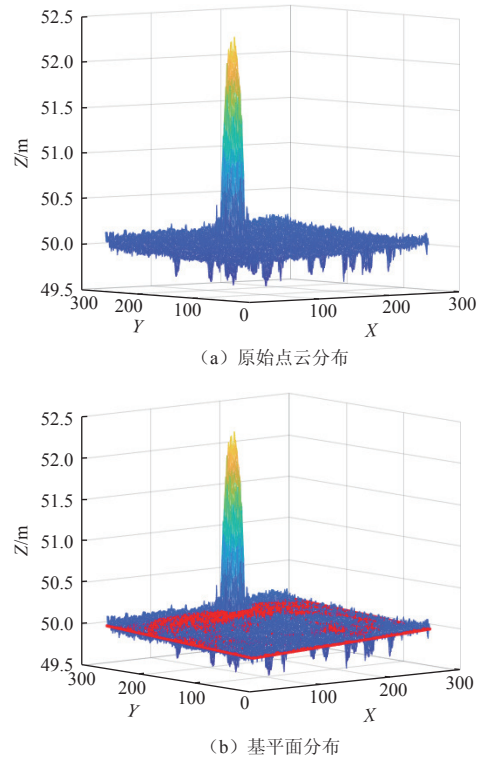


图4 原始点云及基平面分布
Fig. 4 Raw point cloud and base plane

通过一级障碍判断后的图像如图5所示, 其中图5(a)为原始数据, 图5(b)为剔除一级障碍后的数据, T_1 阈值设置为1 m, 可以看出较大的障碍已经被有效识别并剔除, 一级障碍判断有效。其余区域存在小于阈值的起伏障碍。

完成一级障碍判别后, 将点云数据划分为子区域。一级障碍占比0.5%, 占比较小, 根据障碍占比自适应选择较小的子区域个数, 以减小计算量, 根据公式计算, 此时对应的 M 值为8, 子区域网格划分方式如图6所示, 激光点云图像被均匀划分为 8×8 区域。由于一级障碍区的存在, 其相应的子区域位置标志被判断为障碍区域, 不再参与后续的子区域运算, 障碍度可视为无穷大, 即黑色部分。

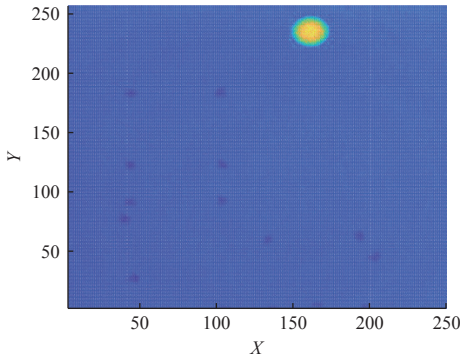
在其余各个子区域中, 根据式(9)进行障碍度指

标计算, 障碍探测阈值 T_2 设置为0.1, 得出每个子区域对应的障碍度指标, 各个子区域的障碍度分布如图7所示, 黄色区域表示障碍度大, 蓝色区域表示障碍度较小, 黑色区域为一级障碍判定障碍区, 不参与计算。与上图6进行对比, 可以看出图像中存在障碍的位置, 其对应的子区域的障碍度较高, 因此该障碍度指标可以较好地表征地形的起伏程度, 从而避开存在障碍点的子区域。

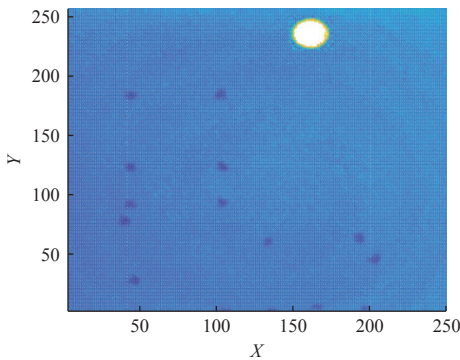


图 7 障碍度分布
Fig. 7 Obstacle distribution

本文选取的最终着陆安全区大小为 3×3 个子区域大小, 实际使用时该尺寸大小受到实际激光雷达扫描范围、着陆器尺寸以及冗余控制的多重限制, 该安全区尺寸可设置, 应用时选择的尺寸可以根据实际探测器情况进行对应的调整。经过式(10)平均值求解出总障碍评价指标并排序后, 得出障碍度最低的区域, 作为最终的避障安全区输出, 如图8所示。图中绿色方框为最终的避障安全区, 红色十字为区域中心。



(a) 原始点云数据



(b) 剔除一级障碍后的点云数据

图 5 剔除一级障碍后的数据
Fig. 5 Data after removing first level obstacles

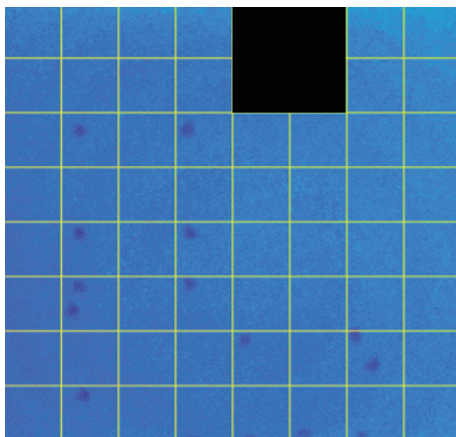
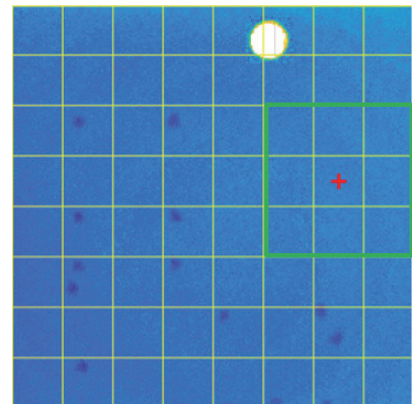
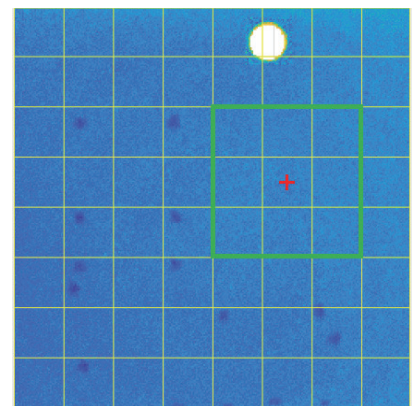


图 6 子区域划分方式
Fig. 6 Sub-region division method



(a) 避障区域1



(b) 避障区域2

图 8 避障区域选择结果
Fig. 8 Obstacle area selection results

图中可以看出,选取的2个安全区域均避开了明显的石块等障碍,选取的区域内较为平坦无较大的起伏,在实际选取中,两个安全区均视为有效,因此本文提出的方法有效完成了避障安全区的选取。

此外,对该方法的运算时间及噪声干扰影响进行评估。由于该方法采用两级避障策略,并根据一级障碍占比自适应选择相应的划分方式,因此大幅度降低了运算量,与现有“嫦娥五号”着陆算法相比,运算时间减小了12.57%。试验数据为实测数据,激光雷达探测精度为0.1 m,实验中设置的较小障碍高度约0.2 m,可以完成有效识别。分析噪声对安全区选取的影响,人为施加0.1 m噪声,此时受到噪声影响,障碍值增多,各区域障碍评价指标差异降低。人为施加0.2 m噪声后,此时噪声影响较大,无法识别障碍,因此结合探测器的实际能力以及实际地形,为保证较好的安全区选取,探测器噪声一般小于实验中需要避开障碍高度。

4 结论

本文提出了一种基于激光雷达点云数据的避障安全区自适应选取方法,采用两级障碍判别方法,首先根据点云偏离基平面的偏离度确定一级障碍区域,不再参与后续运算。并根据障碍占比,确定二级障碍判别方法的子区域划分方法,以减小运算量。提出了一种多方面障碍度评价指标,用于计算每个子区域内的障碍度,表征地形的起伏程度,根据该指标完成避障安全区的选取。通过点云数据进行避障选取验证,试验证明该方法可以有效避开激光点云数据中的障碍地形,避障区域选取合理,该方法有效。

该避障安全区选取方法在工程化后,可以应用于飞行器软着陆场景中,为飞行器实时提供着陆选择信息。该方法运算速度快,更适用于火星表面的崎岖地形,对于火星采样返回任务提供了新的思路和借鉴。

参考文献

- [1] 于登云,孙泽洲,孟林智,等. 火星探测发展历程与未来展望[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2016, 3(2): 108-113.
YU D Y, SUN Z Z, MENG L Z, et al. The development process and prospects for Mars exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016, 3(2): 108-113.
- [2] 李春来,刘建军,耿言,等. 中国首次火星探测任务科学目标与有效载荷配置[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2018, 5(5): 406-413.
LI C L, LIU J J, GENG Y, et al. Scientific objectives and payload configuration of China's first Mars exploration mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(5): 406-413.
- [3] LI C L, ZHANG R Q, YU D Y, et al. China's Mars exploration mission and science investigation[J]. *Space science reviews*, 2021, 217(4): 57(1-24).
- [4] 耿言,周继时,李莎,等. 我国首次火星探测任务[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2018, 5(5): 399-406.
GENG Y, ZHOU J S, LI S, et al. China's first Mars exploration mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(5): 399-406.
- [5] 张荣桥,耿言,孙泽洲,等. 天问一号任务的技术创新[J]. *航空学报*, 2022, 43(3): 1-7.
ZHANG R Q, GENG Y, SUN Z Z, et al. Technological innovations of the Tianwen-1 mission[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(3): 1-7.
- [6] 汪中生,周文艳,田百义,等. 火星采样返回任务轨道方案初步设计[J]. *中国科学:物理学、力学、天文学*, 2019, 49(2): 152-167.
WANG Z S, ZHOU W Y, TIAN B Y, et al. Preliminary orbital design for the Mars sample return mission[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2019, 49(2): 152-167.
- [7] CASSI C. ExoMars 2016 mission: an overview of the phase C activities progress[C]//*Proceedings of the 64th International Astronautical Congress*. Beijing: IAC, 2013.
- [8] FIGUEROA O. Mars program planning group final report [R]. [S. l]: NASA, 2012.
- [9] YE P J, SUN Z Z, RAO W, et al. Mission overview and key technologies of the first Mars probe of China[J]. *Science China Technological Sciences*, 2017, 60(5): 649-657.
- [10] WOLF A A, ACIKMESE B, CHENG Y, et al. Toward improved landing precision on Mars[C]//*Proceedings of Aerospace Conference*, 2011 IEEE. [S. l]: IEEE, 2011.
- [11] 张扬眉. 美国成功发射毅力号火星车,迈出火星采样返回第一步[J]. *国际太空*, 2020(8): 43-48.
- [12] 徐西宝,白成超,陈宇桑,等. 月/火探测软着陆制导技术发展综述[J]. *宇航学报*, 2020, 41(6): 719-729.
XU X B, CHENG C, CHEN Y S, et al. A survey of guidance technology for Moon/ Mars soft landing[J]. *Journal of Astronautics*, 2020, 41(6): 719-729.
- [13] 王立,刘洋,华宝成,等. 嫦娥五号探测器自主着陆视觉避障方法与评价[J]. *宇航学报*, 2021, 42(8): 975-981.
WANG L, LIU Y, HUA B C, et al. Evaluation for Chang'e 5 visual autonomous hazard avoidance landing method[J]. *Journal of Astmnautics*, 2021, 42(8): 975-981.
- [14] FARLEY K A, WILLIFORD K H, STACK K M. Mars 2020 mission overview[J/OL]. *Space Science Reviews*, 2020, 216(8): 142. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-020-00762-y>
- [15] 华宝成,李涛,刘洋,等. 天问一号着陆器双目视觉避障技术[J]. *宇航学报*, 2022, 43(1): 56-63.

- HUA B C, LI T, LIU Y, et al. Evaluation for stereo-vision hazard avoidance technology of Tianwen-1 Lander[J]. *Journal of Astmnautics*, 2022, 43(1): 56-63.
- [16] MANGO D, OPROMOLLA R, SCHMITT C. Hazard detection and landing site selection for planetary exploration using LIDAR[C]// *Proceedings of 2020 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace*. [S. l.]: IEEE, 2020.
- [17] 张诗琪, 赵健楠, 张恒, 等. 火星Cerulli区域的地质特征及其对未来采样返回任务的启示[J]. *遥感学报*, 2025, 29(2): 462-477.
- ZHANG S Q, ZHAO J N, ZHANG H, et al. Geological characteristics of the Cerulli region on Mars and its implications for future sample return missions[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2025, 29(2): 462-477.
- [18] 李建龙, 张立华, 何梨梨, 等. 轻量化类火星地貌快速识别分类方法研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2025(1): 115-123.
- LI J L, ZHANG L H, HE L L, et al. Research on lightweight rapid identification and classification method for Martian-like landforms[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2025, 12(1): 115-123.
- [19] 刘佳, 刘斌, 邸凯昌, 等. “天问一号”着陆区地貌解译与定量分析[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2022, 9(3): 237-247.
- LIU J, LIU B, DI K C, et al. Geomorphologic interpretation and quantitative analysis of the Tianwen-1 landing area[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(3): 237-247.
- [20] 吴伟仁, 王大轶, 黄翔宇, 等. 月球软着陆自主障碍识别与避障制导方法[J]. *中国科学: 信息科学*, 2015, 45: 1046-1059.
- WU W R, WANG D Y, HUANG X Y, et al. Autonomous hazard detection and avoidance guidance for lunar soft landing[J]. *Scientia Sinica Informations*, 2015, 45(9): 1046-1059.
- [21] 徐超, 王大轶, 黄翔宇, 等. 基于序列图像的火星软着陆自主导航避障方法[J]. *中国科学*, 2022, 52(1): 30-38.
- XU C, WANG D Y, HUANG X Y, et al. Autonomous navigation and obstacle avoidance method for Mars soft landing based on image sequences[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2022, 52(1): 30-38.
- [22] CUI P Y, GE D T, GAO A. Optimal landing site selection based on safety index during planetary descent[J]. *Pergamon*, 2017, 132: 326-336.
- [23] 王立, 周建涛, 杨春河, 等. 一种基于DEM 数据的坡度拟合方法: 中国, CN103440358B[P]. 2015.
- WANG L, ZHOU J T, YANG C H, et al. A slope fitting method based on DEM data: China, CN103440358B[P]. 2015-10-21.
- 作者简介:
王雅昕(1998-), 女, 工程师, 主要研究方向: 深空探测光学激光敏感器算法。
通信地址: 北京控制工程研究所(100190)
电话: (010)68379659
E-mail: wangyaxin714@163.com
华宝成(1982-), 男, 研究员, 主要研究方向: 深空探测光学敏感器及算法等。**本文通信作者**。
通信地址: 北京市 5142 信箱 139 分箱(100094)
电话: (010)68744840
E-mail: 85340287@qq.com

Adaptive Selection of Safe Landing Zones for Aircraft

WANG Yaxin, HE Yingbo, WU Yun, ZHANG Jianxiang, HUA Baocheng

(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract: An adaptive selection method for aircraft landing safety zones was proposed. A two-level obstacle detection method was adopted, where the first level obstacle detection identified data deviating significantly from the base plane as obstacle area and non-obstacle areas were divided into sub-areas for second level obstacle detection. The partition size could be adaptively adjusted according to the proportion of obstacle areas. Taking into account factors such as slope difference with base plane, obstacle value, and number of obstacles, a multi-faceted obstacle degree evaluation indicator was proposed to complete the selection of obstacle avoidance safety zones. Experimental verification with laser point-cloud data shows that this method can identify obstacle terrain, and the selected obstacle avoidance safety zone has no obvious obstacles, indicating the effectiveness of the method.

Keywords: MSR; soft landing; obstacle avoidance; laser point-data

Highlights:

- An adaptive safe zone selection method is proposed.
- The two-level obstacle avoidance method is adopted, adaptively selecting the second level obstacle avoidance area based on the proportion of first level obstacles.
- The effectiveness of the method has been verified through experiments, and the selection of obstacle avoidance areas can be completed.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]