

从高程数据中提取目标地形坡度和粗糙度方法研究

王若成

(山东英才学院 信息工程学院, 山东 济南 250104)

摘 要: 以地外行星飞行器着陆区目标地形粗糙度和坡度作为主要研究内容, 提出了对地形高程数据预处理, 再进行地形特征信息提取的算法, 并实现了相应的地形特征信息的提取. 分析了基于双线性插值算法的高程数据重采样的基本原理; 研究了地形坡度与粗糙度提取算法, 并建立了相应的数学模型; 应用某数字地形进行仿真实验, 证明了基于高程数据的地形信息提取方法的可行性; 为精确识别目标地形信息并对地形进行风险评估提出了一种新的研究思路.

关键词: 摄影测量; 地形坡度; 粗糙度; 双线性插值

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)03-0177-04

Research of Slope and Surface Roughness Extraction of Target Topography from Elevation Data

WANG Ruo-cheng

(College of Information Engineering, Shandong Yingcai University, Jinan 250104, China)

Abstract: Based on slope and surface roughness of target topography as the main research contents, the preprocessing of topographic elevation data and extraction algorithm of topographic feature are researched, and the corresponding extraction of topographic feature is done. The basic principle of elevation data resample based on bilinear interpolation algorithm is analyzed. The extraction algorithm of topographic slope and surface roughness is researched, and the corresponding mathematical model is established. By simulation and checking calculation of a certain digital topography example, it is proved that the extraction method of topographic information based on elevation data is feasible. It will provide a new research approach for target information recognition and topography risk assessment accurately.

Key words: photogrammetry; topographic slope; surface roughness; bilinear interpolation

1 引言

对地外飞行器而言, 为准确获得安全着陆点, 对已有地外行星目标地形进行数学描述是极其必要的. 不论采用何种算法, 其关键的一点是其计算结果要能够反映不同的地形地貌特征. 着陆点目标地形的坡度和粗糙度对于地外飞行器而言至关重要. 本文将以目标地形粗糙度^[1]和坡度作为主要研究内容, 在已获得的目标地形数字地图的基础上, 通过对灰度图像双线性插值, 并对高程数据预处理^[2], 实现目标地形的坡度和粗糙度的提取.

2 高程数据双线性插值重采样

常用的重采样方法有三种: 第一种是分块平均法, 这在早期地形遥感测量系统中是经常采用的, 其基本原理为在采样数据中, 计算每个采样单元的高程平均值^[3], 以此来近似表示高程数据; 第二种是对目标地形进行随机线性化处理, 这种处理技术常常用在在地形匹配系统中; 第三种方法是对计算单元进行内插值. 其基本原理为首先求出顺序排列的网格点, 它是通过将随机分布的各离散点通过内插算法来实现的, 然后计算每个网格点的高程值^[4]. 比较

这三种重采样算法,各有优劣.分块平均法的易于实现但插值精度较低;而随机线性化处理技术则精度较高,效果理想,但是计算量较大,效率较低;而内插法^[5]可兼顾数据计算量与插值精度的问题,因此被广泛应用于当前数字扫描测量中.本文目标地形高程数据进行重采样,对目标地形点云数据重采样中有两个关键:一是散点数据的规则化;二是缺失数据的插补.具体步骤如下:

(1) 采样点序列排序.在地面坐标系 OXYZ 下,搜索各采样点 $(x_i \ y_i \ z_i)^T$ 对应的测距数据 R_{ii} , R_{ii} 值大者优先处理.

(2) 待处理点定位.设待处理点坐标为 $(x_w \ y_w \ z_w)^T$,则其对应的四个结点坐标依次为: $(\lfloor x_w \rfloor \ \lfloor y_w \rfloor)$ 、 $(\lfloor x_w \rfloor \ \lceil y_w \rceil)$ 、 $(\lceil x_w \rceil \ \lfloor y_w \rfloor)$ 和 $(\lceil x_w \rceil \ \lceil y_w \rceil)$ ，“ $\lfloor \cdot \rfloor$ ”与“ $\lceil \cdot \rceil$ ”分别表示向上、向下取整,各点位置如图 1 所示.

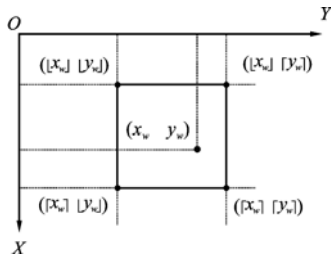


图 1 采样点定位示意图

(3) 高程权值分配.设 $p = x_w - \lfloor x_w \rfloor$ 、 $q = y_w - \lfloor y_w \rfloor$,各结点高程权值为

$$\begin{cases} \omega(\lfloor x_w \rfloor \ \lfloor y_w \rfloor) = (1-p) \cdot (1-q) \\ \omega(\lfloor x_w \rfloor \ \lceil y_w \rceil) = (1-p) \cdot q \\ \omega(\lceil x_w \rceil \ \lfloor y_w \rfloor) = p \cdot q \\ \omega(\lceil x_w \rceil \ \lceil y_w \rceil) = p \cdot (1-q) \end{cases} \quad (1)$$

(4) 计算各单元高程值.数字地图中邻近单元高程都是相关的,根据这一准则,可以确定高程计算公式,它是基于权值分配算法的,即:

$$\begin{cases} z(\lfloor x_w \rfloor \ \lfloor y_w \rfloor) = z_w \cdot \omega(\lfloor x_w \rfloor \ \lfloor y_w \rfloor) \\ z(\lfloor x_w \rfloor \ \lceil y_w \rceil) = z_w \cdot \omega(\lfloor x_w \rfloor \ \lceil y_w \rceil) \\ z(\lceil x_w \rceil \ \lfloor y_w \rfloor) = z_w \cdot \omega(\lceil x_w \rceil \ \lfloor y_w \rfloor) \\ z(\lceil x_w \rceil \ \lceil y_w \rceil) = z_w \cdot \omega(\lceil x_w \rceil \ \lceil y_w \rceil) \end{cases} \quad (2)$$

由此可得,对于双线性插值算法而言,其本质是一种四向外扩展方法,它的扩展中心是单元采样点的数据.这种方法首先选择一个采样点为基准点,根据对该基准点进行插值计算,由计算所得结果推算与其相邻的四个结点信息,这样既能最大程度保留

采样信息,又能够加速地形信息点云数据规则化进程.

经过以上双线性插值方法处理之后,之前随机分布的地形信息点云数据在空间中分布已趋于规则化.而且,相应的缺失数据问题也得以解决.程数据进行预处理,其目的正是在数字地图中从高程数据中提取数据源,该数据源也正是以高程数据的重采样所输出地形特征信息.

3 地形坡度和粗糙度的提取算法

由插值特性可知,网格点的遗漏现象在邻近单元的插值过程中是不可避免的,如图 2 所示.因此,在数据处理之前要进行数据的补漏操作.采样数据经过处理后,将中值平面相对于目标地形水平面倾斜的程度定义为地形坡度,将各采样点的高程数据值与该平面中相对应点的高度的均方差定义为目标地形的粗糙度.算法具体步骤如下:

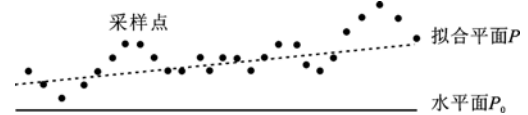


图 2 最小中值平面拟合示意图

(1) 搜索缺失数据结点,由规则化处理过程可得到地形高程矩阵为 $\mathbf{X}_a = (x_a \ y_a \ z_a)^T$ 、 $\mathbf{X}_b = (x_b \ y_b \ z_b)^T$ 、 $\mathbf{X}_c = (x_c \ y_c \ z_c)^T$,由此确定激光雷达扫描到的地形边界为:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{X} + d = 0 \quad (3)$$

相应的平面单位目标的法向量为

$$\mathbf{n} = \frac{(\mathbf{X}_b - \mathbf{X}_a) \times (\mathbf{X}_c - \mathbf{X}_a)}{|(\mathbf{X}_b - \mathbf{X}_a)| \cdot |(\mathbf{X}_c - \mathbf{X}_a)|} \quad (4)$$

平面截距为

$$d = -\mathbf{n} \cdot \mathbf{X}_a \quad (5)$$

(2) 选择插值节点,记当前待插值点为 $(I_{wait} \ J_{wait}) = \text{special}$,插值节点的选择多是基于距离一致性这一观点进行的.插值点分布在四周.搜索方向如图 3 所示.插值点根据路径表现出的属性特征分为对角线和网络线 2 个不同的方向,从各自方向相周边扩散,扩散后,可以捕获到四个目标点,方向一致.第一次沿网格线方向搜索,得到四个目标点为: $(I_{wait} - 1 \ J_{wait})$ 、 $(I_{wait} \ J_{wait} + 1)$ 、 $(I_{wait} + 1 \ J_{wait})$ 和 $(I_{wait} - 1 \ J_{wait} - 1)$;第二次沿对角线搜索的目标为: $(I_{wait} - 1 \ J_{wait} + 1)$ 、 $(I_{wait} + 1 \ J_{wait} + 1)$ 、 $(I_{wait} + 1 \ J_{wait} - 1)$ 、 $(I_{wait} - 1 \ J_{wait} - 1)$;第三次沿网格线搜索的目标为: $(I_{wait} - 2 \ J_{wait})$ 、 $I_{wait} \ I_{wait} + 2)$ 、 $(I_{wait} + 2 \ J_{wait})$ 、 $I_{wait} \ J_{wait} - 2)$;第

四次沿对角线搜索的目标为: $(I_{\text{wait}} - 2, J_{\text{wait}} + 1)$ 、 $(I_{\text{wait}} + 2, J_{\text{wait}} + 1)$ 、 $(I_{\text{wait}} + 2, J_{\text{wait}} - 1)$ 、 $(I_{\text{wait}} - 2, J_{\text{wait}} - 1)$ 。

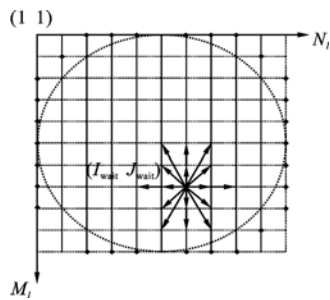


图3 插值节点搜索示意图

(3)当第一步插值搜索完成后,有三种可能性:

①待插值点周围只有一个矩阵元素存在高程值;②有两个以上目标单元存在高程值;③四个目标单元均不存在高程值.第一种情况可直接将该高程值赋给待插值点 $(I_{\text{wait}}, J_{\text{wait}})$;第二种情况需取其均值并赋给待插值点 $(I_{\text{wait}}, J_{\text{wait}})$;第三种情况需继续第二步搜索,插值方法同上述.按照上述步骤依次进行搜索插值,如果仍然没搜索到高程值的结点,则需退出搜索和插值,保持该位置数据不变 $(I_{\text{wait}}, J_{\text{wait}}) = \text{special}$.

(4)如果执行完前三步,依然没有搜索到缺失数据节点的插值点,则需重新定义缺失数据点,通常将第(4)步搜索得到的最后一个点定义为新缺失数据点,并以该点为中心,重复执行第(1)步至第(4)步,直至所有缺失数据节点均被插值.

(5)输出目标地形坡度及粗糙度.将所有高程数据用最小二乘法拟合成一个平面 $Z = Z(x, y)$.定义目标地形的倾斜坡度 λ :目标重力加速度 $\mathbf{n}_g$ 与拟合平面的法向量 $\mathbf{n}_p$ 方向所成锐角,其大小等价于基准平面 P_0 与拟合平面 P 的夹角,计算公式如下:

$$\lambda = \arccos\left(\frac{|\mathbf{n}_p \cdot \mathbf{n}_g|}{|\mathbf{n}_p| \cdot |\mathbf{n}_g|}\right) \quad (6)$$

而地形的粗糙度是一种偏离程度,常常将目标采样单元偏离地形拟合平面的程度定义为地形粗糙度,一般用标准差形式来表示:

$$R = \sqrt{\frac{\sum |Z(x_i, y_i) - Z_i|^2}{D}} \quad (7)$$

式中,参数 Z_i 为目标单元中的高程数据值,其与第 i 个高程点相对应.通过式(8)可以看出,计算得到的目标地形粗糙度是一个变化区间,由双线性插值算法计算得到结果变化范围比较大.

若计算目标区域内的分块单元地形的坡度信息

和粗糙度信息,需要首先对每个采样单元均利用上述高程数据的分析方法,进行插值和处理,经过拼接处理即可得到整个目标地形信息.

4 仿真算例

为验证地形坡度与粗糙度提取算法的检测有效性,设计一个模拟地外行星地形的数字地图.该地形中包含地外行星地形的的基本元素:斜坡、弹坑与岩石,数字地形的分辨率为 0.8 m/pixel ,地形的表面随机散布着最大尺寸为 $0.8 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 的岩石.地图采样区实际尺寸为 $160 \text{ m} \times 160 \text{ m}$.经过计算可以得到地图像素的尺寸,其大小为 $320 \text{ pixel} \times 320 \text{ pixel}$;以及高程节点数,为 320×320 .详细相关地貌、尺寸、最小和最大高程数据参数如表1所示.图4和图5分别为数字地图中三维图数字地形和地形等高线分布图.

表1 数字地形参数表

地貌	尺寸	最小高程	最大高程
弹坑	$50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$	-3.1 m	5.11 m
大斜坡	$25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$	0 m	3.7 m
小斜坡	$16 \text{ m} \times 16 \text{ m}$	0 m	1.9 m
小岩石	$0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$	0 m	0.19 m

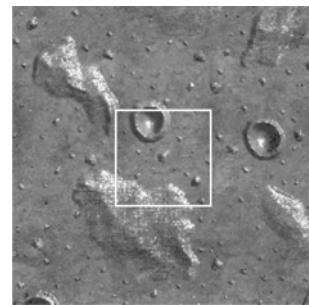


图4 三维数字地形图

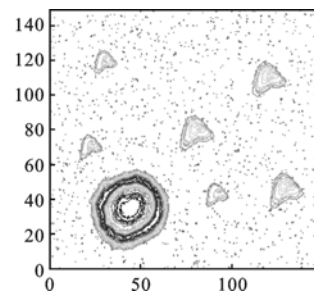


图5 地形等高线分布图

将所计算区域的物理尺寸选为 $15 \text{ pixel} \times 15 \text{ pixel}$.通过文中提出的平面最小中值拟合算法对目标地形的粗糙度分布及等高线分布检测结果如图6

和图 7 所示.

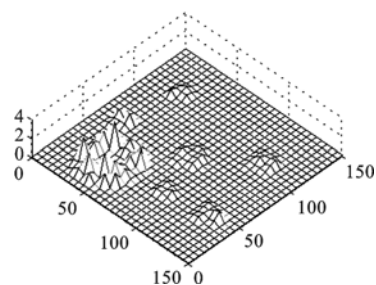


图 6 粗糙度分布图

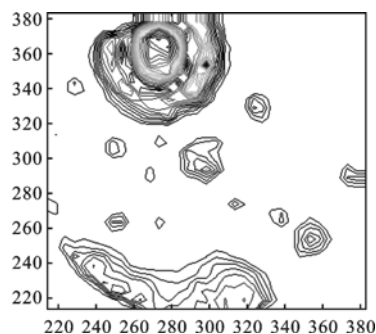


图 7 粗糙度等高线分布图

该算法检测得到的目标粗糙度最大为 1.877 2, 且出现于弹坑的边缘;目标粗糙度最小为 0.100 7, 且出现于地势平缓区域.由图 7 可知,利用该算法检测得到的目标地形粗糙度的变化范围比较大,对目标地形平缓区域中随机分布的尺寸较小岩石的粗糙度检测结果较为清晰,对大尺寸障碍物如弹坑和斜坡的检测效果则更为突出.图 8 和图 9 显示了该算法检测得到的目标地形坡度及坡度等高线分布结果.

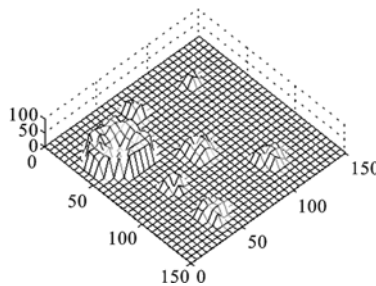


图 8 地形坡度分布图

该算法检测得到的目标地形坡度检测结果为:地形坡度的最大值为 59.5731° .如图 8 所示,坡度最大值出现在弹坑的边缘处,通过反复试验都是如此;而地形坡度最小值为 0° ,且该坡度遍布于整个目标地形平缓处.经过计算可得:两类目标地形斜坡

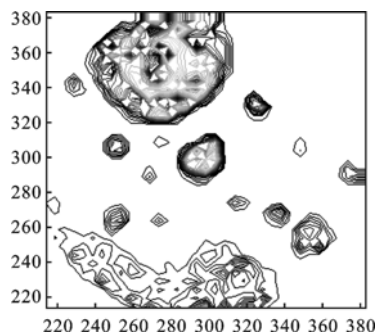


图 9 地形坡度等高线图

的坡度均值分别为 19.2611° 和 15.1257° .由此可以得出这样一个结论,采用平面最小中值拟合算法可用于检测目标地形坡度,且目标障碍物体的物理尺寸越大,目标地地形坡度的提取效果越精确.

5 结束语

本文以地外行星飞行器着陆区目标地形粗糙度和坡度作为主要研究对象,在传统算法的基础上,提出了一种改进的地形坡度与粗糙度提取算法.算法首先预处理地形高程数据,然后进行地形特征信息提取,最终完成目标地地形坡度的提取.实验结果表明本文方法检测得的地形坡度和粗糙度信息比传统方法准确性更高,并且随着目标障碍物体的物理尺寸的增加,目标地地形坡度的提取效果精确度也随这增加,有很强的实际应用价值.

参考文献:

- [1] Clark F. Visual terrain mapping for mars exploration [J]. Advances in Space Research, 2004, 36(12): 1-10.
- [2] Desai N. Mars exploration rovers entry, descent, and landing trajectory analysis [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2004, 29(16): 564-576.
- [3] 郑义. 多层分布式大型差异数据库优化入侵检测仿真 [J]. 计算机仿真, 2013, 11(30): 400-403.
- [4] 潘泉, 于昕, 程咏梅. 信息融合理论的基本方法及进展 [J]. 自动化学报, 2003, 29(4): 599-609.
- [5] 胡艳. 基于邻近样本类别判断的不平衡数据分类算法 [J]. 科技通报, 2013, 10(29): 58-60.

作者简介:

王若成 男, (1973—), 硕士研究生, 讲师. 研究方向为人工智能、GIS.