

文章编号:

## 基于多尺度维度特征的激光点云分类算法

刘昌军<sup>1</sup>, 岳冲<sup>1,2</sup>

(1 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2 中国矿业大学(北京)地测学院, 北京, 100083)

**摘要:** 针对复杂地貌条件下的三维激光点云分类问题(如峡谷边坡上的植被、卵石、岩石、沙地等), 提出了一种基于三维几何体维度特征的多尺度点云分类算法, 该方法首先分析不同种类的物体核心点云数据在不同尺度下的维度特征, 通过构建一个多尺度分类器, 自动寻找分类的最佳尺度组合, 最终实现不同类别点云数据的自动分类。基于以上原理, 研发了三维可视化激光点云数据分类软件 LIDARVIEW。将该方法应用于沙丘植被以及大场景下沿河流峭壁岩石植被的分类。应用案例的实验结果表明: (1) 该方法可以有效、快速的实现复杂场景的点云数据的分类, 尤其适用于植被分类, 分类精度大于 97.4%; (2) 多尺度分类方法比单尺度分类方法在地物类别的划分和空间分辨率上有显著优势; (3) 该方法适用复杂地面激光点云数据, 如数据缺失, 阴影区, 扫描点云密度不均匀等情况; (4) 该方法不仅适用于小范围植被的分类, 对于大场景复杂地形地貌的岩石、植被、卵石等分类具有很好的分类效果。

**关键词:** 多尺度; 维度特征; 激光点云; 分类算法; 植被

**中图分类号:** P237 **文献标识码:** A **文章编号:**

**The laser point cloud classification algorithm based on the characteristics of multi-scale dimensionality**

**LIU Changjun<sup>1</sup>, YUE Chong<sup>1,2</sup>**

(1 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, 2Earth Science and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083)

**Abstract :** The article is for three-dimensional laser point cloud classification problems in complex topography conditions (such as vegetation, pebbles, rocks, sand, etc on the canyon slopes), a multi-scale point cloud classification algorithm is proposed based on the dimension characteristics of the 3-D geometry, firstly, analyze the core point data of different types of objects' dimension characteristic at different scales, by constructing a multi-scale classifier, automatic search for the best scale combination for classification ,finally, achieve automatic classification of different types of data. Based on the above principles, research and develop a 3-D visualization classification software LIDARVIEW for the laser point cloud data. The method was applied to the classification of vegetation on the sand dunes and rock vegetation along cliff of the river under big scene. The application case' experimental results showed that : (1) The method can be effectively and rapidly classify complex scenes point cloud data, especially for vegetation classification, classification accuracy is greater than 97.4%; (2)multi-scale classification method has significant advantages than the single-scale classification in the division of categories and spatial resolution; (3) the method is applicable to complex terrestrial laser point cloud data, such as missing data, shaded areas, uneven scanning point cloud density, etc.; (4) this method not only applies to a small range of vegetation classification, but for large complex topography scene like the rock, vegetation, gravel, etc. also has a good classification results.

**Keywords:** multi-scale; dimensional characteristics; laser point cloud; classification algorithm; vegetation

## 0 引言

三维激光扫描技术是上世纪九十年代中期出现的一项高新技术, 其可以快速、不接触、主动性、高密度、高精度获取物体表面的几何特征, 近年来在地形地貌学和地质学等方面得到广泛应用, 如文献[1-3]提到的利用地面扫描仪监测岩石峭壁的侵蚀、滑坡等地质变化。然而, 如何实现三维激光点云精确自动分类仍然是亟待解决的问题。国内外许多文献都对点云分类或滤波问题(对地面点或非地面点进行分类)进行了讨论和研究, 并提出了许多滤波算法, 如基于数学形态学的滤波算法<sup>[4]</sup>, 通过对点云数据进行合理的双重采样, 用多尺度数学形态学滤波后作为初始的 DEM, 通过搜索误分类地面点的方式提高了分类精度达到过滤非地面点目的; 基于坡度的滤波算法<sup>[5]</sup>中先对原始点云数据按地形类别分块, 对各块运用基于坡度的

收稿日期:

第一作者简介: 刘昌军(1978-), 男, 山东郓城人, 高工, 博士, 主要从事地面激光测量、堤坝渗流控制分析、山洪灾害调查评价等方面的研究。E\_mail:lcj2005@iwhr.com

基金项目: 全国山洪灾害防治项目(2013-2015); “十一五”国家科技支撑计划项目(2014bab42b05);

滤波算法处理,再运用特征点对点云数据进行拼接,完成滤波;以及基于网格分块和移动最小二乘法的点云分类算法<sup>[6]</sup>,基于聚类特性的点云分类方法<sup>[7]</sup>,等等,也取得了一些研究成果。但这些算法大部分是基于激光点云中高程突变信息进行滤波,对于 2.5 维的机载雷达数据具有一定的可行性。但对于高陡边坡的坡面、河滩中沙、砾石、植被等具有明显三维特性的激光点云数据,现有的算法还不能很好解决。主要原因是:①上述情况下的三维数据与传统的二维高程数字模型(DEM)截然相反,分类数据沿高程不具有突变信息;②分辨率范围和数据的完整性受阴影、点云密度不均匀等影响;③自然地表的异质性和复杂性;④三维激光点云数据量大,不规则、散乱、复杂等性质决定了点云数据分类工作的复杂困难。

国外已经开始从事相关领域的研究,如 A. S. Antonarakis 等人利用地面三维激光扫描仪采集到的数据,依据植被的不同三维结构特征,分辨出不同类别的植被并计算出植被粗糙度以及叶面积指数<sup>[8]</sup>; Nicolas Brodu 和 Dimitri Lague 通过分析对比点云维度信息,提出了点云分类的算法,并利用判别分析等方法构建二元分类器进行地面扫描仪点云数据的分类处理,并运用到分析变形中,取得较好的效果<sup>[9,10]</sup>。

目前国内还没有相关文献介绍对复杂场景的三维激光点云数据(如河谷中岩石、植被、碎石、砂砾等基本类别)进行分类的研究。本文结合水利工程应用需求,提出了一种应用于复杂地貌条件下的三维点云分类新算法,即基于多尺度维度特征的三维激光点云分类算法。该方法针对不同类别的三维几何特征进行多尺度下分类,其具有以下优势:①可以快速、高精度从复杂地貌环境中的点云数据直接识别出植被、岩石、砂卵石等;②直接作用于三维点云上,不受地面遮挡和点密度变化的影响,并允许某种程度的可变性和类别的非均质性;③通过设计分类器,自动寻找最佳比例尺实现地物的精确分类。

本文通过引入多尺度维度特征来描述激光点云数据的局部几何特性,详细介绍了分类器的构建以及利用分类器对两个数据集进行地物的分类,并分析了实验精度,实验证明该算法具有很高的分类精度。

## 1 多尺度维度特征

多尺度维度特征研究的是点云在不同比例尺下的局部维度特征。即通过“局部维度”研究点云的几何特征,使点云在一个给定位置和比例尺下表现为一条线(1D),一个平面(2D),或分布在整个区域(3D)中。如图 1 所示,对同一部分点云,采用不同尺度,球内部点分别呈现不同维度特征<sup>[9]</sup>。如图 2 为某河滩的点云数据,河滩边坡表面由大小不同的岩石,卵石和高低不等的植被等组成:在几厘米的尺度下岩石看起来是二维平面,碎石是三维表面,植被则由一维(茎)和二维(叶片)元素混合组成;在大尺度(如 50 cm)下,岩石大部分呈现为二维,碎石看起来更像二维平面,植被看上去则更像三维。因此我们可以结合不同尺度下的维度特征作为区别不同对象类别的依据。本文提出的点云分类算法是根据不同尺度下的维度特征实现不同种类地物的点云分类,改算法的关键是根据维度特征找到数据分类最佳尺度,实现任意尺度下不同类别的地物的分离(如河岸岩石和植被)。本文阐述的方法能够给出任意尺度下的分辨率,适用于自然场景的分类。

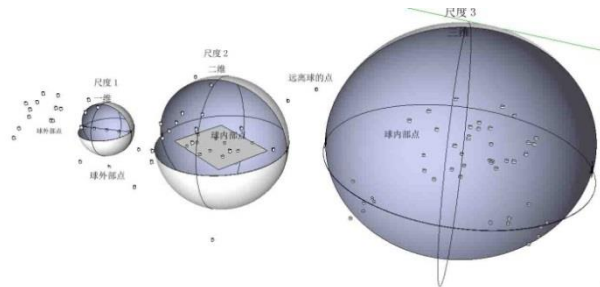
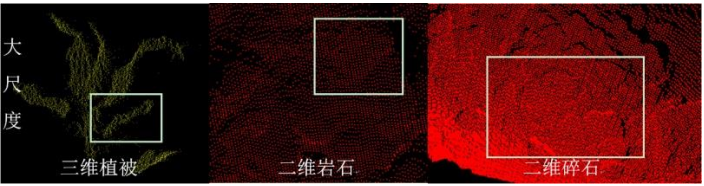
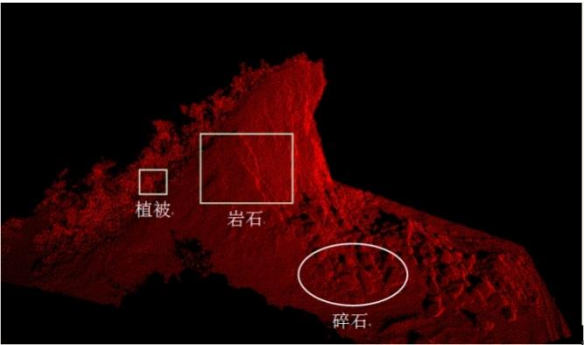


图 1 不同尺度下点云的维度特征



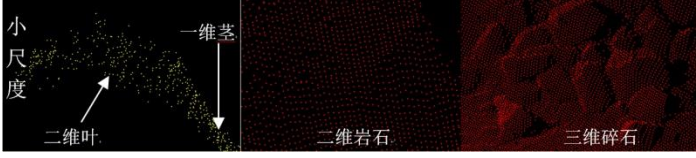


图 2 河滩边坡点云图

## 2 局部维度与多尺度特征

设有三维激光点云集  $M$ ，其中点坐标  $P_{O_i} = (x_i, y_i, z_i), i = 1 \cdots N$ 。以点云集  $M$  中感兴趣的一点为圆心  $O$ ，以尺度  $D$  为球直径画球，如图 1，为对应尺度  $D$  下的点云的局部维度特性。对于场景中的每个点附近球都参与尺度  $D$  下的计算，对球内笛卡尔坐标系下点进行主成分分析(PCA)，由 PCA 求解的特征值为  $t_i, i = 1, 2, 3$ ，其中， $t_1 \geq t_2 \geq t_3$ 。由特征值得到的方差比例为： $P_i = t_i / (t_1 + t_2 + t_3), i = 1, 2, 3$ 。特征值的比例决定了尺度  $D$  下一维、二维、三维点云数量。当只有一个特征值  $t_1$  时，说明临近球内的点在参考点附近呈一维分布（图 2 中 A 点）；当有两个特征值说明点云呈二维分布（图 2 中 B 点）；一个完全的三维点云中  $t_1 = t_2 = t_3$ （图 2 中的 C 点）。通过约束条件  $P_1 + P_2 + P_3 = 1$  以及两个参数特征就能量化在给定任意比例和点云下一维、二维、三维点云的显示。方差比例的坐标系如图 2 所示，A 点  $(1, 0, 0)$  处点云呈一维分布，B 点  $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$  处点云呈二维分布，C 点  $(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$  处点云呈完全的三维分布。C 点垂直投影到  $P_1OP_2$  平面内的 D 点  $(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, 0)$ ， $\Delta ABD$  可以用于表示三维点云主成分分析的方差比例值的域值范围。

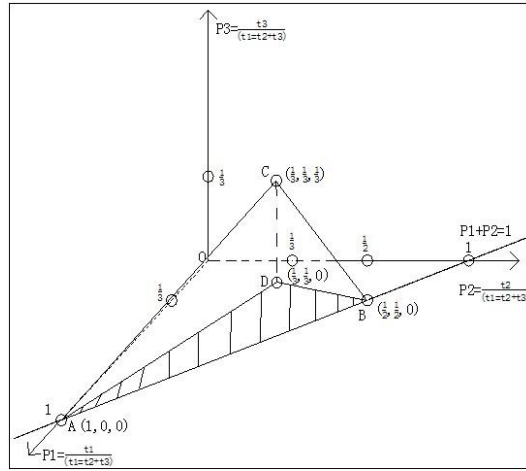


图 2 特征值方差比例坐标系

本文的方法不仅考虑图 3 中  $\Delta ABD$  内所有特征值的比例，还考虑跨尺度的维度特性。假设给定  $N_d$  个不同尺度，场景中每个点的特征向量有  $|N_d|$  个相应值。向量  $N_d$  描述了多尺度下局部点云维度特征。多尺度下的维度特征主要用于确定点云数据的可分离性，在某尺度下三维性越强（越接近 C 点  $(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$ ，点三维特征越明显），点云数据越容易进行分类。算法针对地面雷达数据存在扫描密度不均匀、存在遮挡、尺度缺失等问题，设计了采用大尺度下邻近的点特征值作为缺失点云几何特征的代替，以便获得整个区域均匀的多尺度维度特征。

## 3 分类

为实现地物的分类，最重要的是找到最佳尺度组合，实现两类或两类以上类别的分离。由于很难靠视觉分辨自然界中物体的大小和形状的变化，本文通过设计一个自动分类器，自动寻找尺度的最佳组合，实现不同尺度不同地物的精确分类。

### 3.1 设计分类器

分类器的设计需要点云在多尺度下拥有完整的维度空间特征，在符合条件的情况下分类器首先将点云数据垂直投影到水平面上，以便实现不同类别的最大可分离性，平面可分离性是为了优化类别分类标准，直观上类似于主成分分析，都保留两个主成分；然后在平面上进行不同类别的分类工作。整个处理过程存在一个简单的监督分类过程，能直观的实现数据的分类。任何的分类器都允许在子空间投影上进行迭代分析（如非线性分类器<sup>[11]</sup>）。分类器的设计采用了支持向量机（SVM）<sup>[12-14]</sup>的线性分类器进行了点云数据分类工作。支持向量机方法是根据有限的样本信息在模型的复杂性和学习能力之间寻求最佳折衷，以获得最好的推广能力。

假设点云通过一条直线或一个平面分开，方程为： $f(x)=\omega \cdot x+b$ ，其中， $\omega$ 和 $x$ 是向量（“ $\cdot$ ”表示向量的点积），当向量 $x$ 的维度为2时， $f(x)$ 为二维空间的直线，当 $x$ 的维度为3时， $f(x)$ 表示三维空间的一个平面，当的 $x$ 维度 $>3$ 时，表示为 $n$ 维空间中的 $n-1$ 维超平面。对于 $N_D$ 个尺度下的点云，我们用 $(x_i, y_i), i=1 \cdots N_D, x \in R^d$ 表示维空间点集， $y \in \{+1, -1\}$ 是类别标号，用于标注点云集来区别不同的类别（如植被为+1和地面即为-1）。假设样本点集被超平面（式3-1）线性分割为两类。

$$\omega \cdot x + b = 0 \quad (3-1)$$

最优分类超平面转换为约束条件：

$$y_i(\omega \cdot x_i + b) > 1, i=1 \cdots N_D \quad (3-2)$$

下求 $\frac{1}{2}\|\omega\|^2$ 最小值的问题。 $\omega$ 和 $b$ 的优化条件是使两类样本到超平面最小的距离之和 $\frac{2}{\|\omega\|^2}$ 最大，等

价于使 $\|\omega\|^2$ 最小。即为求解 Lagrange 函数的鞍点，构造函数：

$$L(w, b, a) = \frac{1}{2}\|\omega\|^2 - \sum_{i=1}^{N_D} a_i \{y_i [\omega \cdot x_i + b] - 1\} \quad (3-3)$$

分别对 $w$ 和 $b$ 求偏导数为零时的最优解。得到最优分类函数为：

$$f(x) = \text{sgn} \left\{ \sum_{i=1}^{N_D} a_i^* y_i (x_i \cdot x) + b^* \right\} \quad (3-4)$$

$x_i$ 是支持向量， $a_i$ 是对应 Lganarge 乘子， $b^*$ 是分类阈值。样本到超平面的距离 $d$ 对应于分类置信度，根据逻辑函数估计：

$$p(d) = q / (1 + \exp(-ad)) \quad (3-5)$$

将样本点集投影到超平面上，计算每个点到超平面的距离 $d_1 = \omega_1^T \cdot x - b_1$ 。得到两个距离值 $d_1$ 和 $d_2$ 使得两方向正交，即定义 $(d_1, d_2)$ 为二维平面的最大可分离坐标。存在一个自由度在选择 $\omega$ 、 $b$ 时使得 $\omega^T \cdot x - b = 0$ ，因此两条轴线可以重新调整，使得 $a = 1$ 。坐标 $(d_1, d_2)$ 对于分类的精度是一致的。此时大部



分的分类数据会朝  $X=Y$  对角线方向压缩。当分类的精度一致时旋转平面使几个不同的类别的中心与  $X$  轴对齐, 然后缩放  $Y$  轴使分类的类别在两个方向上有相同的平均方差。最后分类器在平面上会自动画一条直线(根据最后旋转和缩放定义的最佳分类直线)如图3(b)所示, 分类器使用的数据为图3(a)所示的数据, 分类器在给定尺度下沿  $X$  轴95%可信。

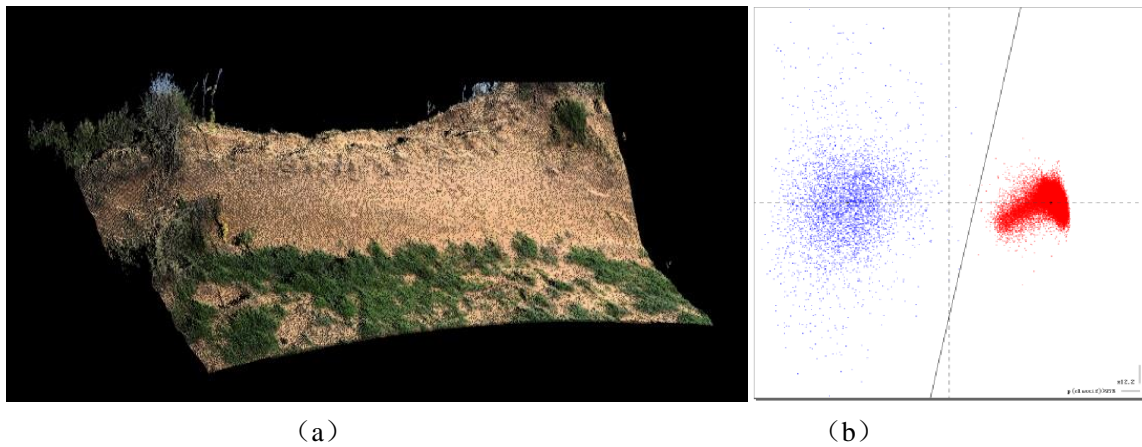


图3 线性分类使用的点云数据与分类结果

### 3.2 分类器功能与优化

分类器通过半监督学习方式在减少用户输出的同时最大化分类能力, 半监督学习主要考虑如何利用少量的标注样本和大量的未标注样本进行训练和分类的问题, 半监督学习可以减少标注代价, 提高学习机器性能。分类器的主要思想是: 利用标注的样本计算平面最大可分离性, 在平面上计算一个方向, 使得沿此方向的点云密度(标注和未标注)最小, 同时将标注的样本分离出来; 不同的类别在投影空间中形成点集, 未标注的样本密度越小, 点集的边界越容易被找到, 当所有的样本都标注了, 不同的类别以等概率的直线加以划分。因为分类器使用的是基本二元分类器, 如果场景中的类别很多, 一些未标注的点集会和一些未标注的类混合到一起, 影响点云最小密度取值, LIDARVIEW 软件中提供了利用手动分离点集功能, 用于解决上述问题。

本文重点研究地面激光扫描仪获取的三维激光点云数据, 地面三维激光点云数据存在密度不均匀的现象, 导致有些区域点云过于稠密, 有些地方过于稀疏。数据的这些特性造成算法运算时间较长, 主要原因是计算不同尺度下邻近点云的主成分分析变换以及支持向量机特定训练样本的耗时较长。为了提高现场操作和可视化的效率, 算法在运算中采用核心点代替原始点云的方法, 既保证了点云的密度满足计算要求, 又避免了对高密度区域内每个点进行尺度特征的计算, 但是高密度区域内的点云依旧用于主成分分析计算来提高计算精度, 并且算法中保留局部密度信息和分类的置信度作为判别精度的标准。

## 4 实验结果与分析

作者采用交互式数据语言(IDL)开发了三维可视化激光点云数据处理软件 LIDARVIEW<sup>[15, 16]</sup>, 并基于所述算法原理和分类器的设计思路, 将地物分类的功能模块合成到软件中, 图4给出了软件中地物分类的工作界面示意图。

### 4.1 简单环境的分类应用

将分类器应用于简单环境下的地物分类, 类别选择为沙丘上植被与细沙。选择激光点云总数共约200000个, 其中利用人工方法分类得到地面点约120000个, 植被点约80000个。将点云数据导入激光点云数据处理软件 LIDARVIEW, 利用软件中地物分类功能, 实现多尺度地物分类功能, 其中, 选择1-100cm的多尺度范围(尺度间隔为10cm, 分类器自动划分11个尺度等级进行计算), 过程共耗时约7min。实验点云数据为图3(a)所示区域内的点云, 分类结果如图4所示:

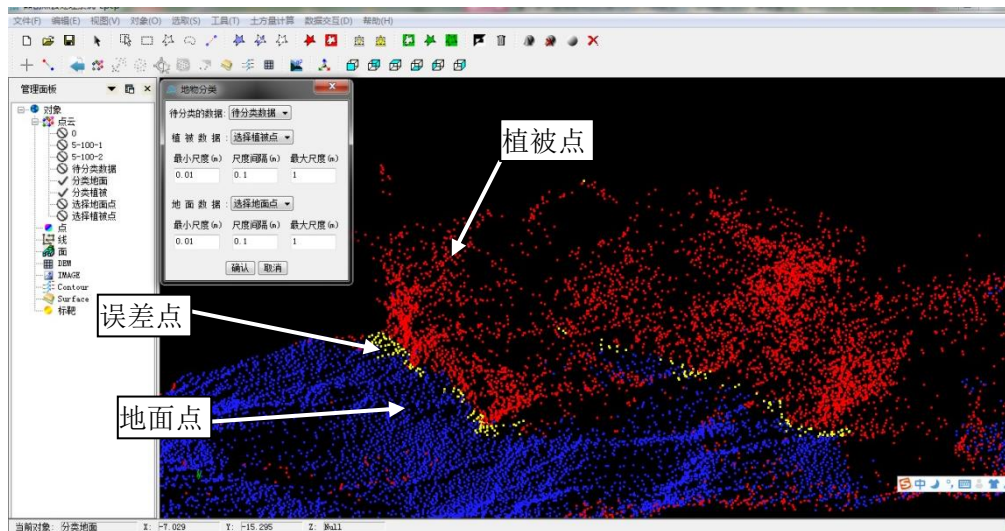


图 4 实验点云与分类结果

图 4 为软件操作界面和分类器分类结果，蓝色点为分离出的地面点，红色点为分离出的植被点，黄色点为分类误差点，从图中可以看出该算法对于密度不均匀、有遮挡区域和波纹的点云依旧具有较好处理效果。

#### 4.1.1 分类精度分析

为对比多尺度分类器与单一尺度下分类结果，实验选择 1cm、5cm、10cm、30cm、60cm、80cm、100cm 七个单一尺度和 1-100cm 的多尺度（尺度间隔为 10cm，分类器自动划分 11 个尺度等级进行计算）进行植被与沙地分类，分别得到单一尺度和多尺度的分类精度结果，具体结果见表 1：

表 1 单一尺度与多尺度平衡精度

尺度 (cm)	点云类别	$\Delta_1$	$\Delta_2$	分类精度 (%)	平衡精度 (%)
1-100	地面点	1273		96.3	97.4
	植被点		4777	98.4	
1	地面点	72287		50.4	51.2
	植被点		122359	52.0	
5	地面点	40163		61.1	63.6
	植被点		79158	66.1	
10	地面点	37022		67.7	67.8
	植被点		59320	67.9	
30	地面点	23524		74.9	75.9
	植被点		41666	76.9	
60	地面点	17658		81.0	81.3
	植被点		29165	81.6	
80	地面点	8125		91.6	91.1
	植被点		11402	90.6	
100	地面点	3348		92.7	94.3
	植被点		9791	95.9	

以  $a$ 、 $b$  分别表示地面点和植被点的真值，其中本次实验样本经过手工标注区分后，得到  $a=124333$ ， $b=78311$ 。 $\square_1$ 、 $\square_2$  分别表示为地面点和植被点分类误差值，平衡精度  $w$  表示为： $w=\frac{1}{2}[(\frac{a}{a+\square_2})+(\frac{b}{b+\square_1})]$ 。

用平衡精度对分类器的性能进行量化，以获得不同类别的点云数目。 $w$  值越大说明分类器的类别识别率越



高（50%表示随机识别的概率）。从表格数据可以看出：分类器在多尺度条件下能够实现 97.4% 的准确分辨率；单一尺度下  $w$  值并不随着尺度的减小而增加，在尺度为 1cm 的条件下分类基本上属于随机识别，相反随着尺度增大  $w$  值逐渐增大，单一尺度下尺度大的分类结果要比尺度小的分类好很多。从实际的点云分类结果看出相比单一尺度，多尺度的方法更精确的分离植被边缘，小尺度的植被也被很好的分离出来，精度有了很大提高；多尺度对灌木的分类明显比单一尺度要好。

#### 4.2 大场景复杂环境的应用

文章作者将基于多尺度维度特征的三维激光点云分类算法应用于大场景复杂环境中，以检验算法的实用性，实验结合水利工程应用需求，选择河流岸边悬崖峭壁地面三维激光扫描点云数据作实验数据，数据内共含有三维激光点约 230 万个，实验区域长约 600m，最高处 160m，峭壁上长满茂密的植被，岩石与植被交叉存在，并有山洞等复杂地形地貌，目前已有的分类方法均无法实现上述复杂区域的岩石与植被的点云分类。

利用激光点云数据处理软件 LIDARVIEW 结合分类器进行地物分类操作，实验数据中尺度范围是：1cm~300cm，尺度间隔为 10cm，处理时间约 13min。分类结果如图 5 所示（其中红色区域为岩石，绿色区域为植被），图 6（a）和图 6（b）分别为图 5 中的 a 和 b 处的放大图。

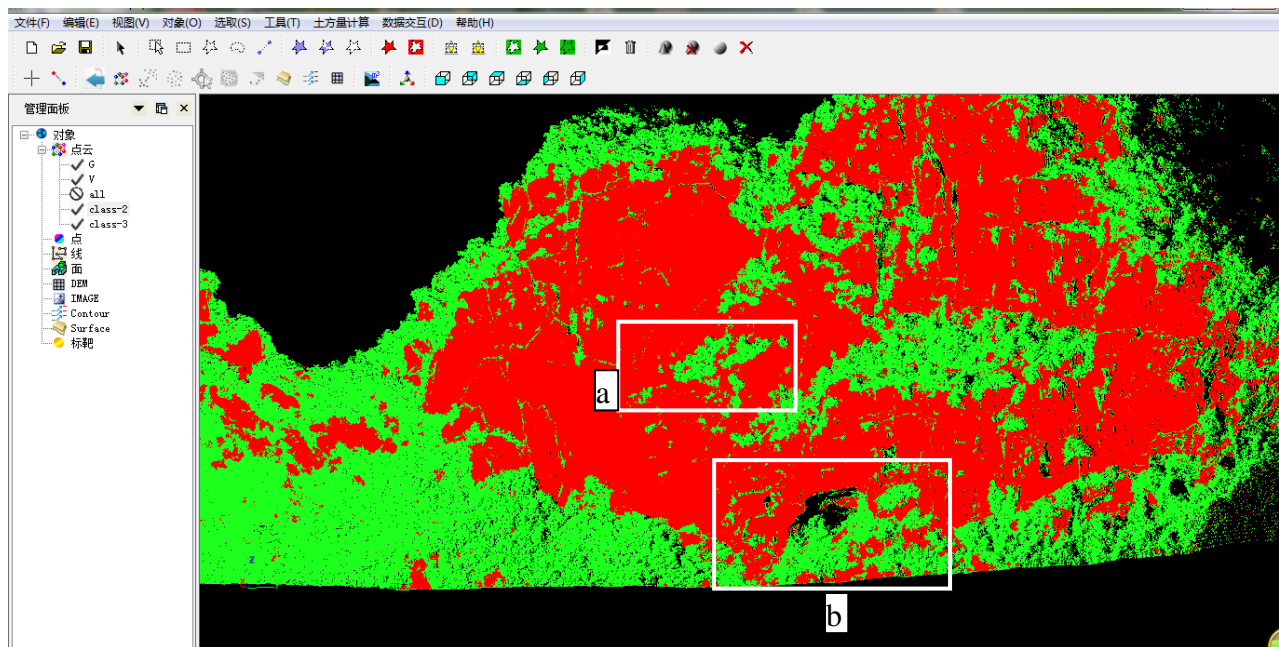


图 5 整体分类示意图

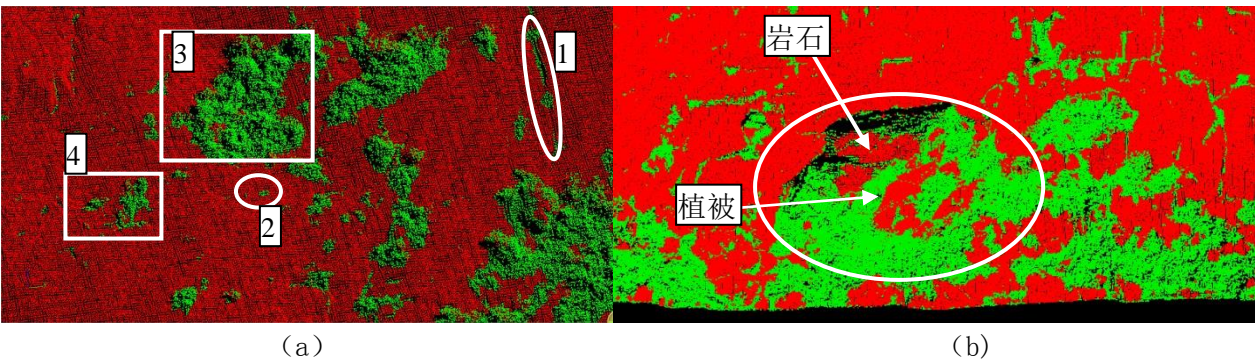


图 6 局部分类示意图

由分类结果中可以看出，实验区内植被和岩石得到精确地分类，分类效果较好，从局部分类示意图（图 6）的(a)图可以看出峭壁上的植被得到很好的分类，植被边界分类的精确度很高，图中共标记四处植被分类结果，可以看出，算法不仅适用于较大尺度下植被的分类（图 6（a）中 3、4 处），对于特别小尺度的植被也有很高的分辨率（如图 6（a）中 2 处），并且对于岩石峭壁缝隙内的植被也能进行准确的分类（如图 6（a）中 1 处），因此算法完全适用于复杂自然环境下不同尺度的地物分类；图 6(b)图为山洞内的局部分类细节图，可以看出：山洞内部的块状岩石和植被得到很好分类，并没有因为山洞的延伸和空间形态

影响到算法的应用,分类结果与实际情况相符,再次检验算法的实用性。实验结果表明基于多尺度维度特征的三维激光点云分类算法适用于大场景复杂的自然环境地物的分类,分类的精度很高,受地形地貌的影响很小。

## 5 结论

- 1) 实验结果证明利用支持向量机(SVM)的线性分类器适用于点云分类,能够实现点云的自动分类,分类器绘制的最佳分类直线,给定尺度下沿X轴95%可信。
- 2) 针对复杂场景的三维点云数据,提出的基于多尺度维度特征的激光点云分类算法,通过沙丘上植被的分类精度实验验证,精度达到97.4%,分类精度、地物分辨率明显高于单一尺度分类方法。
- 3) 结合算法原理和分类器的设计思路采用IDL语言开发的三维可视化激光点云数据处理软件LIDARVIEW,将地物分类的功能模块合成到软件,实验应用效果非常好。
- 4) 复杂环境下的大场景实验结果表明,算法具有很高的实用性,能分辨峭壁上不同尺度的植被,对洞穴内地物具有较好的分辨能力。复杂地形地貌、激光点云密度不均匀、数据缺失、波纹状的点云等对分类器影响不大。

## 参考文献

- [1] Rabatel A, Deline P, Jailliet S, et al. Rock falls in high - alpine rock walls quantified by terrestrial lidar measurements: A case study in the Mont Blanc area[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(10).
- [2] Renard F, Voisin C, Marsan D, et al. High resolution 3D laser scanner measurements of a strike - slip fault quantify its morphological anisotropy at all scales[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(4).
- [3] Rosser N J, Petley D N, Lim M, et al. Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2005, 38(4): 363-375.
- [4] 罗伊萍,姜挺,王鑫,等.基于数学形态学的LiDAR数据滤波新方法[J].测绘通报,2011,3:007.
- [5] 杨洋,张永生,邹晓亮,等.一种改进的基于坡度变化的机载激光雷达点云滤波方法[J].测绘科学,2009(S1).
- [6] LIU Changjun, LI Jian, DING Liujian, et al. A Point Clouds Filtering Algorithm Based on Grid Partition and Moving Least Squares[C]//Proceedings of 2012 international conference on modern hydraulic engineering. 2012(3): 476-483.
- [7] 刘昌军,黄乾,唐瑜,等.基于FCM的机载LIDAR数据的建筑物和植被分类方法[J].中国水利水电科学研究院院报, 2013(3):189-94.
- [8] Antonarakis A S, Richards K S, Brasington J, et al. Determining leaf area index and leafy tree roughness using terrestrial laser scanning[J]. Water Resources Research, 2010, 46(6).
- [9] Brodu N, Lague D. 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, 68: 121-134.
- [10] Lague D, Brodu N, Leroux J. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ)[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 82: 10-26.
- [11] Maszczyk T, Duch W. Support vector machines for visualization and dimensionality reduction[M]//Artificial Neural Networks-ICANN 2008. Springer Berlin Heidelberg, 2008: 346-356.
- [12] 叶志刚.SVM在文本分类中的应用[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006.
- [13] King D E. Dlib-ml: A machine learning toolkit[J]. The Journal of Machine Learning Research, 2009, 10: 1755-1758.
- [14] Shalev-Shwartz S, Singer Y, Srebro N, et al. Pegasos: Primal estimated sub-gradient solver for svm[J]. Mathematical[38] Shaw P J A. Multivariate statistics for the environmental sciences[M]. London: Arnold, 2003.
- programming, 2011, 127(1): 3-30.
- [15] 刘昌军,赵雨,叶长锋,等.基于三维激光扫描技术的矿山地形快速测量的关键技术研究[J].测绘通报,2012,6:014.
- [16] 刘昌军,丁留谦,孙东亚.三星堆月亮湾城墙遗址覆土方量计算[J].水利水电科技进展,2011,31(2):81-84.



# 中国水利水电科学研究院第十二届青年学术交流会

## 基于多尺度维度特征的激光点云分类算法

刘昌军<sup>1</sup>, 岳冲<sup>1,2</sup>

(1 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2 中国矿业大学(北京)地测学院, 北京, 100083)

### 摘要

针对复杂地貌条件下的三维激光点云分类问题(如峡谷边坡上的植被、卵石、岩石、沙地等),提出了一种基于三维几何体维度特征的多尺度点云分类算法,该方法首先分析不同种类的物体核心点云数据在不同尺度下的维度特征,通过构建一个多尺度分类器,自动寻找分类的最佳尺度组合,最终实现不同类别点云数据的自动分类。基于以上原理,研发了三维可视化激光点云数据分类软件 LIDARVIEW。将该方法应用于沙丘植被以及大场景下沿河流峭壁岩石植被的分类。应用案例的实验结果表明:(1)该方法可以有效、快速的实现复杂场景的点云数据的分类,尤其适用于植被分类,分类精度大于 97.4%;(2)多尺度分类方法比单尺度分类方法在地物类别的划分和空间分辨率上有显著优势;(3)该方法适用复杂地面激光点云数据,如数据缺失,阴影区,扫描点云密度不均匀等情况;(4)该方法不仅适用于小范围植被的分类,对于大场景复杂地形地貌的岩石、植被、卵石等分类具有很好的分类效果。

### 关键词

多尺度; 维度特征; 激光点云; 分类算法; 植被

刘昌军(1978-),男,山东郓城人,高工,博士,主要从事地面激光测量、堤坝渗流控制分析、山洪灾害调查评价等方面的研究。  
E\_mail:lcj2005@iwhr.com

注:论文未公开发表过。