

# 基于点云数据的株冠体积测量方法

毕银丽, 齐礼帅, 陈书琳, 李丽娟, 刘生

中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

**摘要** 在林业领域,利用地面三维激光扫描(Terrestrial 3D Laser Scanning, TLS)技术可获取测树因子,以辅助林业资源调查,但该技术尚未用于测量灌木植物的体积。在介绍 TLS 系统组成、工作原理的基础上,基于紫穗槐的点云数据,测量 29 株两年生紫穗槐苗的冠高、冠幅直径,采用整体凸包算法、切片凸包算法、切片分割算法和立体栅格算法计算紫穗槐的株冠体积,并对株冠体积与冠高、冠幅直径进行相关性分析,从而选择适合测量灌木植物体积的方法。结果表明,立体栅格算法是计算与紫穗槐有相同结构特征植物株冠体积的最好方法,利用 TLS 技术可监测野外灌木生长状况。

**关键词** 三维激光扫描;体积测量;植物监测

**中图分类号** S24

**文献标志码** A

**DOI** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.27.004

## Canopy Volume Measurement Method Based on Point Cloud Data

BI Yinli, QI Lishuai, CHEN Shulin, LI Lijuan, LIU Sheng

College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

**Abstract** In the field of forestry, the terrestrial 3D laser scanning (TLS) technology is used to obtain the measurement factors in survey, but not so often to measure the volume of shrubs. This paper discusses the TLS system components, the operating principle, based on the point cloud data of the amorpha, and the crown height and the crown diameter of 29 amorpha plants were measured. With the overall convex hull algorithm, the sliced convex hull algorithm, the slice segmentation algorithm and the three-dimensional grid algorithm, the canopy volume was determined, then the canopy volume, the crown height and the crown diameter were correlated, and thus the appropriate measurement method for the shrub volume was selected. The results show that the stereo grid algorithm is the best way to measure the canopy volume of plant, which has the same structural characteristics with amorpha, and can be used as the foundation for the TLS technology to monitor wild shrub growth conditions.

**Keywords** three-dimension scanning; volume measurement; vegetation monitoring

### 0 引言

三维激光扫描测(TLS)量技术是一项空间数据采集的测绘新技术,它通过激光快速扫描获取大面积目标表面的高分辨率点云数据,由过去的单点测量过度到面和影像获取的时代,为快速建立物体三维模型提供了一种全新有效的数据获取手段<sup>[1]</sup>。

三维激光扫描技术具有速度快、非接触性、实时、动态、主动性及高密度、高精度、数字化、自动化等特性<sup>[2]</sup>,并且可以深入到复杂的环境中,实现对各种大型的、不规则的、非标准实体的三维数据的完整采集。目前,国内外的林业工作者已经将该技术用于获取测树因子,对其在森林资源调查中的适用性进行了研究<sup>[3-9]</sup>。中国学者将 TLS 技术应用到林业资源调查中,并进行了一系列的探讨,在甘肃小陇山林区将不同径阶

的 15 株锐齿栎的扫描数据和伐倒木实测数据进行比较,胸径的平均相对误差为 0.56%,树高的平均相对误差为-0.97%,材积的平均相对误差为-1.19%。这表明采用 TLS 技术获取的测树因子的数据可以满足森林资源调查的精度要求<sup>[10,11]</sup>。但至今尚未见有学者将该技术应用于野外灌木植物生长状况的监测。

反映植物生长变化的宏观指标主要有株高、冠高、冠幅直径、地径、三维绿量(植株/冠幅体积),株高、冠幅直径、地径。三维绿量可以直观地表现植物整体的生长状况。一般来说,三维绿量与株高/冠高和冠幅密切相关,对于冠幅直径易受外界环境干扰或枝叶间空隙较大的植物,不能用冠幅直径监测该植物的生长状况,从而由株高/冠高和冠幅计算的株冠体积也不精确。由于林业领域各种计算树木株冠体积的经验

收稿日期:2013-06-03;修回日期:2013-07-19

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)(2013AA102904);国家科技支撑计划(2012BAC10B03);中央高校基本科研业务费项目(2009KD01)

作者简介:毕银丽,教授,研究方向为微生物复垦,电子邮箱:ylibi88@126.com



公式都是以冠幅和冠高为自变量,因此,这些公式不适合计算枝叶间隙较大的植物株冠体积。

本研究在野外实验区扫描 29 株紫穗槐,根据植株点云测量株高、冠高、冠幅直径,比较整体凸包算法、切片凸包算法、切片分割算法和立体栅格算法计算株冠体积的基本原理,并利用这 4 种算法分别计算紫穗槐的株冠体积,对株冠体积与冠高、冠幅直径进行线性回归分析,由回归分析结果比较 4 种算法的优缺点,从而确定立体栅格算法是适合计算与紫穗槐有类似结构特征植物株冠体积的方法。

### 1 工作原理

三维激光扫描测量技术可以自动、连续、快速地获取目标物体表面的三维坐标,以点云形式表现目标物体表面的几何特征。实现了由单点测量到面测量的飞跃,获取的信息也从点的空间位置信息延伸到目标物的纹理信息和色彩信息。仪器主要包括激光测距系统、扫描系统和支架系统、集成 CCD 数字摄影和仪器内部校正等系统。TLS 系统的基本工作原理如图 1 所示。仪器自身发射激光束到旋转式镜头中心,镜头通过快速而有序地旋转,将激光依次扫过被测区域,一旦接触到物体,光束立刻被反射回扫描仪,内部微电脑通过计算光束的飞行时间从而计算出激光光斑与扫描仪两者之间的距离  $S$ ;与此同时,仪器通过内置角度测量系统来量测每一激光束的水平角  $\alpha$  与竖直角  $\beta$ ,从而获得每个扫描点在扫描站坐标系内的空间坐标。三维激光扫描仪在记录激光点三维坐标和物体反射激光点的强度值;内置的数码相机可以方便、快速地获取外界物体真实的色彩信息,因此,点云信息包含三维坐标值、强度信息以及点的 RGB (Red, Green, Blue) 信息。最终由后处理软件对采集的点云数据和影像数据进行处理,转换成绝对坐标系中的空间坐标或模型,以多种格式输出满足空间信息数据库的数据源和不同应用的需要<sup>[2]</sup>。

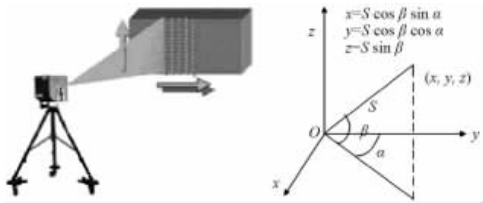


图 1 三维激光扫描测量原理  
Fig. 1 3D laser scanning measurement principle

### 2 数据采集与处理

试验区位于山西、陕西、内蒙交界处的某一采煤沉陷风沙区,该区地势起伏较大,水资源短缺,风沙较多,昼夜温差较大,地表植被杂乱矮小,乔木稀少。试验区的植物主要有紫穗槐及沙蒿等地被植物。本次扫描区是一个 20m×20m 的近似正方形区域,扫描植物是紫穗槐,其直径 1cm 左右,叶片大小 1cm×2cm,高度 20~90cm。为了减少其他植被对紫穗槐扫描精度的影响,将紫穗槐之外的其他植物清除掉。

试验仪器是由北京建筑工程学院提供的瑞士徕卡

scanstation 2,单点定位精度为±6mm/50m(±2mm/25m),单点距离精度为±4mm/50m(±2mm/25m),单点角度精度为水平/垂直±12s,测量距离为 300m(90%反射率),扫描速度为 50000 点/s,扫描密度:最小采样密度 0.1mm。在试验区域共扫描 4 站,架设 5 个平面靶标用于点云数据拼接,其中一个靶标位于扫描区域的中心,另外 4 个靶标分别位于扫描区域的 4 个边上,仪器及靶标的布设如图 2 所示。为确保各站的扫描数据精度相同,每站的扫描参数均相同。用三维激光扫描仪配套的 cyclone v 6.03 对点云数据进行拼接和去噪,然后提取每棵紫穗槐的点云数据,最后将紫穗槐点云数据导入 geomagic studio2012 中量取植株的冠幅直径( $x, y$  两个方向)、株高和冠高。



图 2 野外测量现场  
Fig. 2 Field measurement site

### 3 株冠体积算法

#### 3.1 整体凸包法

该方法主要采用凸包(Convex hull)算法,在三维空间中,对植株的点云数据建立一个能包围所有点云数据的最小凸包,它的边界由许多 Delaunay 三角行组成。Matlab 函数工具箱中 convhulln 函数用于计算三维凸包。计算凸包主要有 4 种方法:递增法、礼品盒、切分合并法、快速包围法。本文采用的 convhulln 函数是基于快速包围法,其算法步骤主要如下。

(1) 选取点云中 6 个坐标点(包含坐标的最大和最小值)生成一个不规则的八面体。因此会有一些点包含在八面体外部,而这些点就成为建立凸包的边界,而且被分成 8 个独立的区域。在建立多面体时,多面体内的点会被删除。

(2) 在被分成的 8 个区域的点中,选择距离所对应的平面最大的点,就有 8 个点被选中,这样共有 14 个((1)中的 6 个,(2)中的 8 个)点被选中,建立 24 个新的三角形,而且在多面体内的点会被删除。

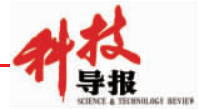
(3) 重复步骤(2),选择距离每个新的三角平面最远的点,然后建立新的多面体,并删除多面体内部的点,直至多面体外面没有点为止。最终形成一个  $n$  边的凸包,将这个多面体的体积作为株冠的体积。

#### 3.2 切片凸包体积法

该方法主要按照一定的切片间距  $d$ (本研究选择  $d=5\text{cm}$ )将点云在  $z$  方向上进行分割,将点云分割成  $(z/d)+1$  个部分。对每部分分割的点云进行凸包计算,最后计算所有切片凸包体积之和就是株冠的体积。

#### 3.3 切片分割法

该方法利用方法 2 将点云在  $z$  方向上进行分割,为了避免切片上出现无点现象,设置一个切片厚度,将这个厚度范围内的点看成是在同一个平面内,计算每个切片内的点围成



的凸多边形的面积,然后由式(1)计算两个切片围成的体积,最后将各个分割的体积之和作为株冠的体积。

$$V = \frac{S_1 + S_2}{2} \times \Delta h \quad (1)$$

式中,  $S_1$ 、 $S_2$  分别是上下切片的面积,  $\Delta h$  是相邻切片的距离。

### 3.4 立体栅格法

立体栅格法<sup>[13-15]</sup>主要是将点云用一定规格的小立方体表示,统计包含株冠点云的立方体个数,已知小立方体的体积,由立方体个数和小立方体体积就可以计算株冠的体积。其具体步骤如下。

(1) 计算点云数据  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的最大和最小值,这样就可以建立一个包围株冠点云最小的包围盒。

(2) 计算均分这个包围盒空间的格网点,本文在  $x$ 、 $y$ 、 $z$

方向选择的步长均是 1cm。这样就生成将这个包围盒进行划分的格网点。

(3) 计算以每个格网点为中心 1cm 为边长的小立方体  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的最大和最小值,然后遍历点云数据的坐标,判断以该格网点为中心点的小立方体是否包含点云数据;若该小立方体包含点云数据,则以该格网点为中心建立小立方体,否则,不建立小立方体。

(4) 循环步骤(3)遍历所有的格网点,由小立方体个数和小立方体体积计算株冠的体积。

## 4 数据处理与分析

### 4.1 不同算法对同株紫穗槐株冠体积的影响

实验区紫穗槐的冠高、冠幅直径、株冠体积如表 1 所示。

表 1 冠高、冠幅直径、体积的计算结果

Table 1 Calculation results of crown height, crown diameter and volume

编号	冠高/cm	冠幅直径/cm			冠幅体积/dm <sup>3</sup>			
		南北 $\Delta y$	东西 $\Delta x$	均值	整体凸包	切片凸包	切片分割	立体栅格
1	39.07	37.87	36.78	37.33	24.875	16.529	26.027	5.216
2	41.58	44.04	36.46	40.25	39.781	24.060	40.391	4.749
3	17.33	18.88	17.81	18.35	2.245	1.356	2.684	0.461
4	7.58	24.48	31.33	27.90	15.722	9.933	16.775	2.614
5	23.00	25.14	21.91	23.53	4.904	3.696	6.523	1.304
6	25.34	21.27	22.93	22.10	4.956	3.730	5.768	0.831
7	49.49	49.50	53.70	51.60	53.538	37.129	55.901	6.051
8	23.12	44.95	23.42	34.18	13.266	10.066	15.142	1.451
9	19.24	22.08	20.19	21.13	3.604	2.625	4.296	0.688
10	33.02	32.73	34.54	33.64	19.242	10.295	21.241	2.085
11	19.92	18.38	21.05	19.72	3.224	2.030	3.643	0.538
12	40.19	38.48	35.93	37.20	25.875	12.94	26.487	2.444
13	52.76	37.13	51.39	44.26	45.341	22.246	44.180	2.706
14	37.63	38.13	35.06	36.59	23.945	13.388	24.931	2.081
15	20.32	16.50	16.85	16.67	2.626	1.965	3.043	1.096
16	47.39	37.35	52.06	44.71	40.368	21.643	38.986	4.552
17	61.75	43.19	59.62	51.40	76.832	38.914	68.496	4.610
18	30.65	29.77	31.97	30.87	13.344	8.210	12.305	1.127
19	24.07	27.96	27.27	27.62	8.361	4.833	8.950	1.098
20	39.82	37.38	33.78	35.58	23.871	16.161	24.610	4.012
21	31.46	32.72	31.28	32.00	14.847	8.824	16.027	3.000
22	44.11	40.31	36.46	38.39	32.245	12.926	28.168	2.225
23	32.64	38.10	33.41	35.75	20.215	11.442	20.733	1.923
24	39.08	23.58	28.34	23.58	11.812	3.480	8.602	0.676
25	11.42	16.38	15.62	16.00	1.157	0.799	1.876	0.262
26	27.96	25.61	33.37	29.49	8.084	4.637	8.717	1.274
27	19.71	21.34	21.46	21.40	4.829	3.447	4.854	1.163
28	23.44	17.79	20.32	19.06	4.663	3.299	4.758	1.042
29	17.72	21.24	24.94	23.09	4.362	2.839	4.819	0.995
最大值	61.75	49.50	59.62	51.60	76.83	38.910	68.500	6.051
最小值	11.42	16.38	15.62	16.00	1.157	0.799	1.876	0.262
平均值	32.10	29.77	31.35	30.81	18.90	10.81	15.14	2.147
标准偏差	12.23	9.821	11.42	10.07	18.10	10.02	17.07	1.602



对同一植株,整体凸包算法计算的体积最大,切片分割算法次之;切片凸包算法和立体栅格算法计算的体积相对较小,但是立体栅格算法计算的体积最小;整体凸包算法计算的体积“最大值”是立体栅格算法计算的体积“最大值”的 10 倍左右,且立体栅格算法计算的株冠体积的标准差最小。计算结果的显著差异和算法特点与紫穗槐结构特征密切相关。

#### 4.2 不同算法的比较分析

如图 3 所示,在点云所在的扫描测量坐标系中展示 4 种算法计算紫穗槐体积的形态。由图 3(a)知,紫穗槐的干颈细、枝叶间的空隙大,点云能体现株冠的内部和外部形态。图 3

表明,整体凸包算法是以株冠点云为一个整体建立最小凸包,因此将枝叶间的空隙作为株冠的一部分,计算的体积大于株冠的实际体积;切片凸包算法和切片分割算法均是以部分点云为计算对象,建立的切片凸包和分割形体仍包含许多空隙,计算的体积也大于株冠的实际体积;立体栅格算法是以茎叶的点云为载体建立小立方体,避免了枝叶间空隙的影响,因此该算法计算的体积最小;整体凸包算法计算的株冠体积均值、标准偏差最大,而立体栅格算法计算的株冠体积均值、标准偏差最小,这表明枝叶间的空隙是影响株冠体积的主要因素。

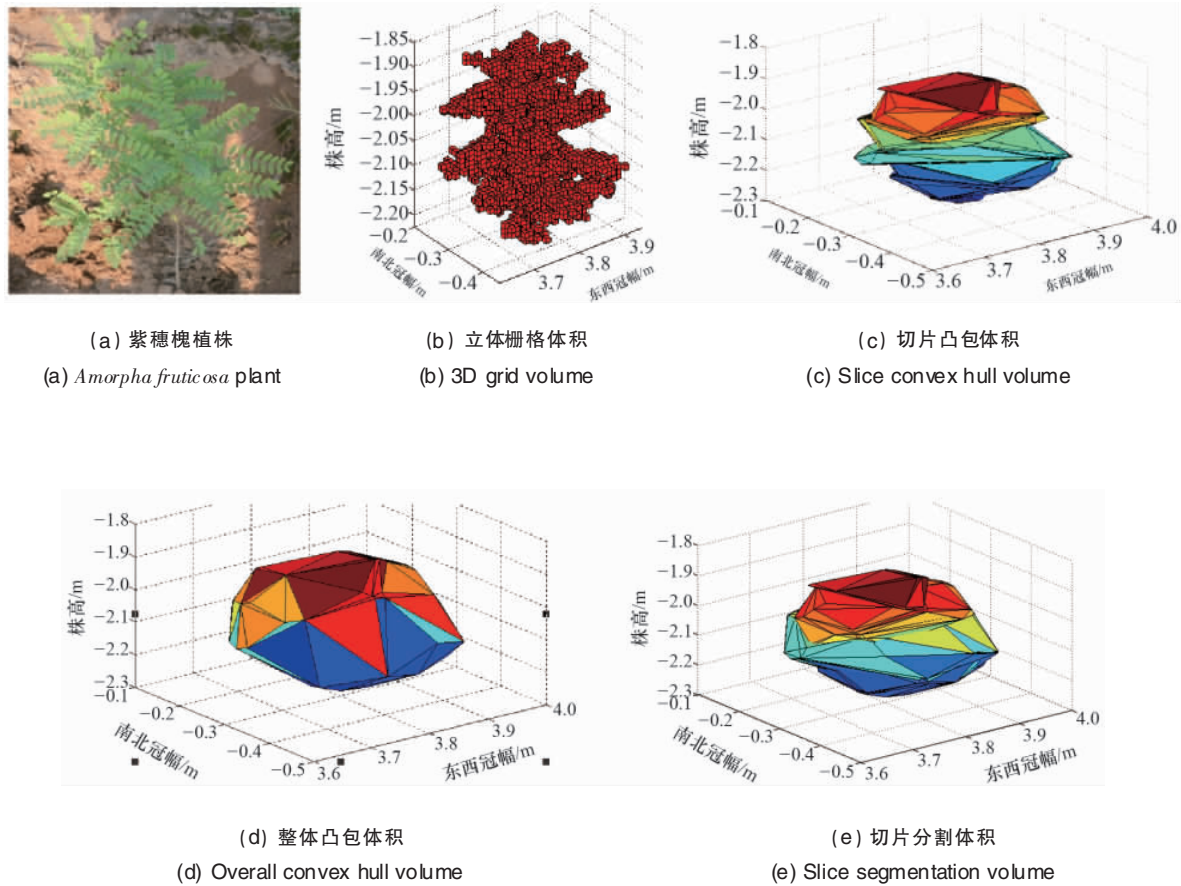


图 3 基于点云数据的 4 种体积算法示意

Fig. 3 Four volume algorithm schematic based on point cloud data

#### 4.3 不同算法的株冠体积与冠高、冠幅的相关性分析

株冠体积与冠高、冠幅直径的散点示意图如图 4 所示,由图 4 可知体积与冠高、冠幅直径有二元线性关系,由于 8 和 24 号植株受损,在图 4 中显示为噪点,将 8 和 24 号植株的数据删除后再进行体积与冠高、冠幅的相关性分析。由表 2 可知,由立体栅格算法求得的株冠体积与冠高、冠幅的复相关性最小, $R=0.8578$ ,其他 3 种算法与株高、冠幅的相关系数都接近于 1。

立体栅格算法计算紫穗槐体积由上到下的 4 个切片如图 5 所示。由图 5 可知,立体栅格算法能最大限度的避免空隙的影响,其与冠高、冠幅直径不直接相关;由图 3 可知,立体栅格算法得到的紫穗槐体积形态与其真实形状相似,而其他 3 种算法得到的紫穗槐体积形态与其整体轮廓接近,体积轮廓主要由冠高和冠幅直径决定,因此立体栅格算法计算的体积与冠高、冠幅的复相系数  $R=0.8578$ ,其他算法计相关系数都接近于 1,表 3 中体积与冠高、冠幅的相关性也说明了这一点。

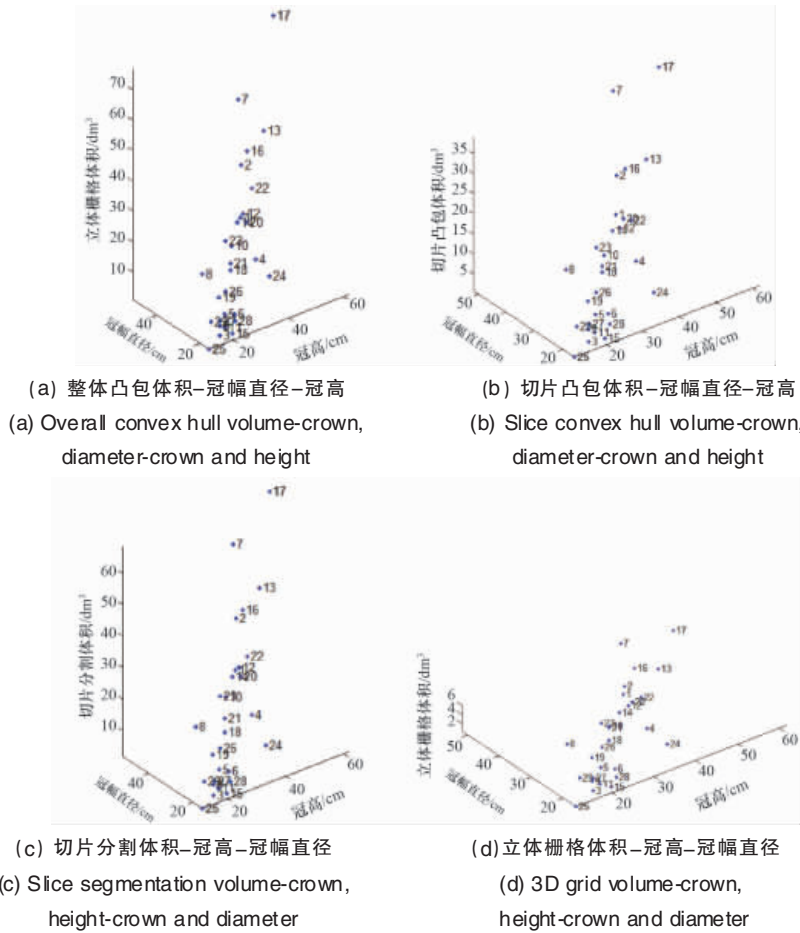


图 4 株冠体积-冠高-冠幅直径三维散点示意图

Fig. 4 Schematic diagram of 3D scattering points of crown volume-crown height-crown diameter

表 2 体积-冠高-冠幅直径二元线性回归分析

Table 2 Binary linear regression analysis for volume-crown height-crown diameter

名称	线性方程表达式	复相关系数 (R)	决定系数 (R <sup>2</sup> )
整体凸包体积-冠高-冠幅	$V = -30.1491 + 0.8752x + 0.6904y$	0.9557	0.9134
切片凸包体积-冠高-冠幅	$V = -16.9172 + 0.2447x + 0.6512y$	0.9413	0.8860
切片分割体积-冠高-冠幅	$V = -28.5060 + 0.6356x + 0.8888y$	0.9633	0.9279
立体栅格体积-冠高-冠幅	$V = -1.9117 + 0.0130x + 0.1202y$	0.8578	0.7358

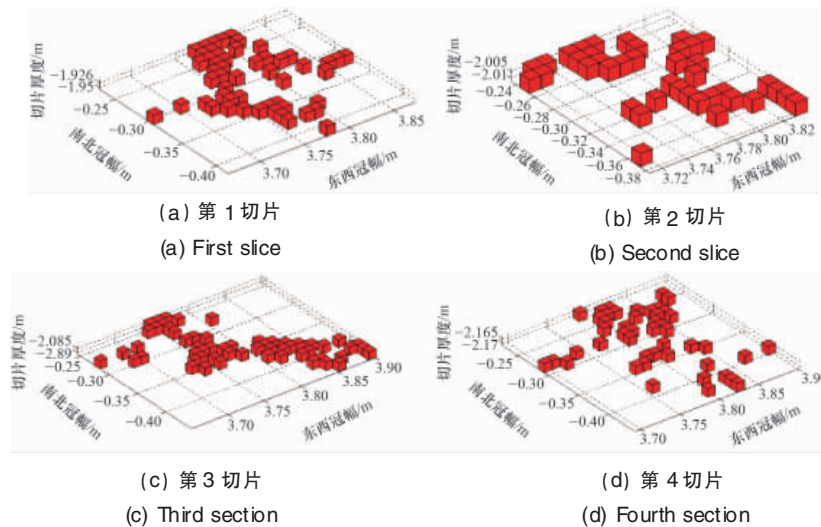


图 5 立体栅格算法由上到下 4 个栅格切片

Fig. 5 Four grid slices from top to bottom of three-dimensional grid algorithm

表 3 株冠体积-冠高/冠幅直径一元线性回归分析

Table 3 Linear regression analysis for crown volume-crown height/crown diameter

名称	整体凸包体积	切片凸包体积	切片分割体积	立体栅格体积
冠高	$y=1.4x-25 (R=0.930)$	$y=0.72x-12 (R=0.884)$	$y=1.28x-22.35 (R=0.922)$	$y=0.10x-1.18 (R=0.790)$
冠幅	$y=1.7x-33 (R=0.931)$	$y=0.93x-18 (R=0.935)$	$y=1.61x-30.58 (R=0.948)$	$y=0.14x-2.02 (R=0.850)$

### 5 结论

4种基于点云数据的株冠体积算法为监测植物生物量的变化提供了良好的方法,每种方法各有优缺点,要综合考虑植物的形态结构确定合适的株冠体积测量方法。

(1) 整体凸包算法、切片凸包算法和切片分割算法计算的株冠体积与冠高、冠幅有很强的相关性,对于同一株紫穗槐,三者计算的体积均大于实际的株冠体积,都不能抵抗枝干间隙对体积的影响,但切片凸包算法能在一定程度上抵抗枝干间隙对体积的影响。

(2) 立体栅格算法计算的体积最接近株冠的实际体积,可以抵抗枝干间隙对体积的影响。对于有较多间隙、茎叶结构分明的植株,多站扫描的点云数据可以表现其内部的空间结构,立体栅格算法适合计算这类植物株冠的体积。

(3) 对于枝叶稠密的植物,多站扫描数据不能完整地呈现植物的内部形态,但是可以呈现植物的外部形态,立体栅格算法计算的体积小于株冠的实际体积,需要选择其他3种算法计算株冠的体积。

紫穗槐点云数据是本文植物体积算法的实验数据,在后续研究中,还需要将不同类别植物的点云作为实验数据,从而验证分析本文体积算法的可靠性和适用性。

### 参考文献 (References)

[1] 徐进军, 张民伟. 地面三维激光扫描仪: 现状与发展 [J]. 测绘通报, 2007(1): 47-50, 70.  
Xu Jinjun, Zhang Minwei. Bulletin of Surveying and Mapping, 2007(1): 47-50, 70.

[2] 张会霞, 陈宜金, 刘国波, 等. 基于三维激光扫描仪的校园建筑物建模研究[J]. 测绘工程, 2010, 19(1): 32-34, 38.  
Zhang Hui Xia, Chen Yijin, Liu Guobo, et al. Engineering of Surveying and Mapping, 2010, 19(1): 32-34, 38.

[3] 邓向瑞, 冯仲科, 罗旭. 三维激光扫描系统在林业中的应用研究[J]. 北京林业大学学报, 2005(S2): 43-47.  
Deng Xiangrui, Feng Zhongke, Luo Xu. Journal of Beijing Forestry University, 2005(S2): 43-47.

[4] Weiß J. Application and statistical analysis of terrestrial laser scanning and forest growth simulations to determine selected characteristics of Douglas-Fir stands [J]. Folia Forestalia Polonica, Series A, 2009, 51(2): 123-137.

[5] Koukoulas S, Blackburn G A. Mapping individual tree location, height and species in broadleaved deciduous forest using airborne lidar and multi-spectral remotely sensed data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(3): 431-455.

[6] Aschoff T, Spiecker H. Algorithms for the automatic detection of trees in laser scanner data [J]. International Archives of Photogrammetry, Remote

Sensing and Spatial Information Sciences, 2004, 36(8): 66-70.

[7] 赵阳, 余新晓, 信忠保, 等. 地面三维激光扫描技术在林业中的应用与展望[J]. 世界林业研究, 2010, 23(4): 41-45.  
Zhao Yang, Yu Xinxiao, Xin Zhongbao, et al. World Forestry Research, 2010, 23(4): 41-45.

[8] 何诚, 冯仲科, 袁进军, 等. 基于数字高程模型的树木三维体积测量[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 195-199.  
He Cheng, Feng Zhongke, Yuan Jinjun, et al. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(8): 195-199.

[9] 邓向瑞, 冯仲科, 马钦彦, 等. 三维激光扫描系统在立木材积测定中的应用[J]. 北京林业大学学报, 2007(S2): 74-77.  
Deng Xiangrui, Feng Zhongke, Ma Qinyan, et al. Journal of Beijing Forestry University, 2007(S2): 74-77.

[10] 冯仲科, 罗旭, 马钦彦, 等. 基于三维激光扫描成像系统的树冠生物量研究[J]. 北京林业大学学报, 2007(S2): 52-56.  
Feng Zhongke, Luo Xu, Ma Qinyan, et al. Journal of Beijing Forestry University, 2007(S2): 52-56.

[11] 罗旭, 冯仲科, 邓向瑞, 等. 三维激光扫描成像系统在森林计测中的应用[J]. 北京林业大学学报, 2007(S2): 82-87.  
Luo Xu, Feng Zhongke, Deng Xiangrui, et al. Journal of Beijing Forestry University, 2007(S2): 82-87.

[12] 马立广. 地面三维激光扫描仪的分类与应用[J]. 地理空间信息, 2005(3): 60-62.  
Ma Liguang. Geospatial Information, 2005(3): 60-62.

[13] Fernández-Sarria A, Martínez L, Velázquez-Martí B, et al. Different methodologies for calculating crown volumes of *Platanus hispanica* trees using terrestrial laser scanner and a comparison with classical dendrometric measurements [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 90: 176-185.

[14] Stoker J. Visualization of multiple-return lidar data: Using voxels[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2009, 75(2): 109-112.

[15] Park H J, Lim S, Trinder J C, et al. Voxel-based volume modelling of individual trees using terrestrial laser scanners [C]//Proceedings of 15th Australasian Remote Sensing & Photogrammetry conference, Alice Springs, Australia. 2010: 1125-1133.

(责任编辑 吴晓丽)

### 《科技导报》“书评”栏目征稿

“书评”栏目发表图书评论文章,被评论的图书以高级科普、学术专著及科学文化图书为主,兼顾科学精神、科学方法、科技哲学、科学人文、科学家传记、经典科学著作、科学通俗读物、科学道德等内容。欢迎投稿,择优刊登。每篇书评以2100字左右为宜,需配书影,并含书名、作者、出版单位、出版年份、定价等信息。栏目责任编辑:陈广仁,投稿邮箱:chenguangren@cast.org.cn。