

一种基于点云自适应切片的树冠体积计算方法

周恒可¹,李海旺¹,赵 兴¹,郭彩玲^{2*},李柏林³

(1. 西南交通大学 唐山研究院,河北 唐山 063000;2. 唐山学院 河北省智能装备数字化设计及过程仿真重点实验室,河北 唐山 063000;
3. 西南交通大学 机械工程学院,四川 成都 610031)

摘要:无人机精准施药有利于节约药液,减少环境污染。针对无人机精准施药中树冠体积计算粗略的问题,提出一种基于点云自适应切片的树冠体积计算方法。首先对树木点云数据进行等间距切片;然后根据相邻树冠点云切片的面积随高度的变化率自适应分层,使用改进的 Graham 凸包算法计算自适应分层前后树冠点云切片面积;最后基于台体与锥体公式累加各层树冠点云之间的体积求得整个树冠的体积。试验结果表明,研究方法确保了树冠点云切片厚度和数量与树冠自身的形状和大小相适应,同时有效缩小树冠点云切片边界空隙,得到较为准确的树冠点云切片面积,进而实现了树冠体积的精细化计算。其计算结果介于 Graham 凸包算法和体元法之间,在精度方面分别提高了 30.89% 和 24.19%,可科学地为无人机施药过程中精准施药策略提供理论依据。

关键词:点云;切片自适应;Graham 凸包算法;边界提取;树冠体积

中图分类号:P234

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)06-0189-07

A Tree Crown Volume Calculation Method Based on Adaptive Slice of Point Cloud

ZHOU Heng-ke¹,LI Hai-wang¹,ZHAO Xing¹,GUO Cai-ling^{2*},LI Bai-lin³

(1. Graduate School of Tangshan, Southwest Jiaotong University, Tangshan 063000, Hebei, China;
2. Tangshan University, Key Lab of Intelligent Equipment Digital Design and Process Simulation, Tangshan 063000, Hebei, China;
3. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Precise application of pesticides by UAV is conducive to saving chemicals and reducing environmental pollution. Aiming at the problem of low accuracy of canopy volume calculation in UAV precision application, this research proposed a method based on point cloud adaptive slicing to improve the calculation accuracy. Firstly, equidistant spacing was performed on the tree point cloud data. Then, according to the area of adjacent canopy point cloud slices with the change rate of height, the improved Graham convex hull algorithm was used to calculate the area of canopy point cloud slices before and after adaptive stratification. Finally, the volume of the entire canopy was obtained by accumulating the volume between the canopy point clouds of each layer based on the formula of table and cone. The experimental results showed that this method ensured that the thickness and number of canopy point cloud slices were suitable for the shape and size of the canopy itself, and at the same time effectively narrowed the boundary gap of canopy point cloud slices, and obtained a more accurate canopy point cloud slice area, and then realized the fine calculation of canopy volume. The calculation results were between those of Graham convex hull algorithm and voxel method, and the accuracy improved by 30.89% and 24.19%, respectively compared to the two methods. The proposed method can scientifically provide a theoretical basis for the precise application strategy in the process of UAV application.

收稿日期:2023-03-01 修回日期:2023-05-08

基金项目:河北省高层次人才项目(A202001095);河北省科技厅重点研发计划(20327107D)。

第一作者:周恒可。研究方向:三维激光点云数据处理。E-mail:1262740978@qq.com

*通信作者:郭彩玲,博士,教授。研究方向:自动化与信息技术。E-mail:gcl@alu.cau.edu.cn

Key words: point cloud; slice adaptive; Graham convex hull algorithm; boundary extraction; canopy volume

无人机通过搭载小型喷雾系统,可以实现跨地形、高效率植保作业,其作业效率是普通植保机械的3倍以上^[1-2]。同时,作业人员通过远程遥控,精确控制无人机飞行速度、高度以及施药量,减少了农药的使用,降低环境污染^[3]。在无人机施药技术中,根据树木三维点云模型获取树冠体积参数进而确定施药量是施药技术中重要的一步,精确的计算树冠体积并与施药量关联,生成施药量处方,有差别有区别的施药可为无人机精准施药提供理论依据^[4]。

运用三维激光扫描仪确定树冠体积参数指导无人机施药技术,可实现地空资源结合。三维激光扫描仪可高密度、高精度获得树冠三维结构信息,并通过软件建立目标树的三维模型^[5-6],已经广泛应用于树冠表面积和树冠体积等测树因子的估算^[7]。目前,基于三维激光点云数据进行树冠体积计算的方法主要有体元法与切片法,韦雪花等^[8]利用体元法计算树冠的体积,因忽略内部结构枝叶遮挡的点云数据,其计算结果往往相较于真实情况偏小。利用切片法计算树冠体积是将树冠自上而下分为不同的层,通过累加各层树冠点云之间的体积求得整个树冠的体积。董亚涵等^[9]利用切片法提出了一种迭代渐进的凸包算法计算树冠体积,可剔除树冠点云切片外部存在的较大空隙。程钢等^[10]利用切片法提出一种改进 α -shape 算法的树冠体积计算方法,无论对高密度还是低密度树冠都具有很好的稳定性。林松等^[11]利用切片法提出了一种改进过滤三角网的树冠体积计算方法,有效收缩了树冠点云切片外部存在的空白区域。3种算法均采用均匀切片的思想进行求解,然而,相同或不同物种的单个树木的树冠形状和大小存在差异,且对树冠体积的计算有很大的影响^[12],因此不适合在垂直方向以均匀厚度切片树冠点云,在树冠切片区域,相邻树冠点云切片面积变化相对缓慢的无须单独成层。因此,本研究利用切片法提出一种基于点云自适应切片的树冠体积计算方法,通过使用改进 Graham 凸包算法计算树冠点云切片面积,根据相邻树冠点云切片面积随高度变化率自适应确定切片厚度与切片数量,并采用台体与锥体公式计算树冠体积,以期实现树冠体积的精细化计算。

1 材料与方法

1.1 材料

研究区域位于河北省唐山学院南校区校园内,

地处 $118^{\circ}9'52''E, 39^{\circ}39'23''N$, 采用 Trimble TX8 地面三维激光扫描仪进行树木点云数据采集,采集时间在 2022 年 6 月 3 日,天气为晴天。树木种类有柏树、雪松和白松。扫描设计 4 个测站,围绕树木一周进行点云数据的获取,即每隔 90° 设置 1 个测站,测站与树木之间的距离设置为 20 m,在树木附近还设有 4 个公共标靶球,公共标靶球的位置选在 4 个测站都能扫描到的无遮挡位置,扫描仪分辨率设置为 28.2 MPTS,扫描尺寸为 $8\ 192 \times 3\ 413$ pt,扫描时间控制在 5 min 之内。扫描场景如图 1 所示。对采集的树木点云数据输入到扫描仪自带的软件 Realworks 中进行点云去噪、拼接、配准与裁剪以获取完整树冠点云数据。本研究同时选用 Maxtree Plant Models Vol 17 高精度 3D 植物模型中的 16 棵树木点云模型为试验树木数据,用于验证所提方法计算树冠体积的稳定性和准确性,树木种类有白蜡树、悬铃木、三角枫和银杏树,树冠形态差异较大。20 棵试验树木点云平均间距 0.1 m,平均每个试验树木有 486 619 个树点(图 2)。经测量,其中最大树高为 12.881 m、最小树高为 3.914 m、树冠最大直径为 10.889 m、树冠最小直径为 3.180 m、平均冠径为 6.016 m。

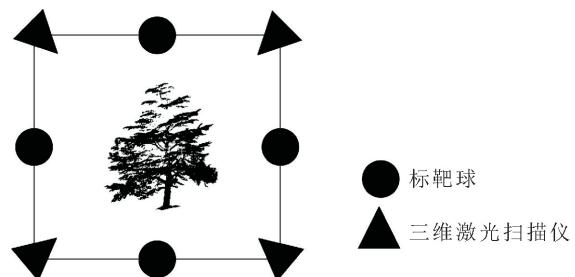


图 1 测站布置示意图

Fig. 1 Layout diagram of measuring station

1.2 研究方法

研究方法主要包括 2 个阶段:改进 Graham 凸包算法计算树冠点云切片面积和树冠自适应切片,技术流程见图 3。

1.2.1 改进 Graham 凸包算法计算树冠点云切片面积 平面上 M 个点的凸包是包含这 M 个点的最小简单凸多边形,它是描述物体形状和提取特征的重要结构之一,已经广泛应用于图像处理、不规则三角网的生成和现代化农业等领域^[13-14]。目前在众多计算平面离散点集凸包的算法中, Graham 凸包算法^[15-16]是其中较为常用的算法, Graham 凸包算法

首先以点集中位于最左下角的点为原点建立坐标系,将其他点和原点连线与 x 轴的夹角按从小到大进行排序,最终得到一个逆时针排列有序的凸包顶点。有限的凸包顶点所形成的凸包边界存在较大空隙,迭代渐进的凸包算法^[9]虽然在一定程度上去除了树冠点云切片外部存在的较大间隙,但没有统一的边长阈值选取原则,在取值过大时得到的树冠切片外轮廓依然含有空白区域。因此,本研究对初始凸包边界进行每条边的迭代收缩,直至所有边以该边为直径的圆内无树冠点,进而收缩树冠点云切片外部空隙,避免动态阈值对于树冠点云切片外轮廓描述导致的切片面积精度不一问题。改进 Graham 凸包算法计算树冠点云切片面积的具体步骤如下。

1) 对树冠点云切片使用 Graham 凸包算法进行外层凸包构建,生成初始凸包边界点集。

校园内采集的树木	柏树1	柏树2	雪松	白松
白蜡树	01	02	03	04
悬铃木	05	06	07	08
三角枫	09	10	11	12
银杏树	13	14	15	16

图 2 试验样本树木

Fig. 2 Test sample trees

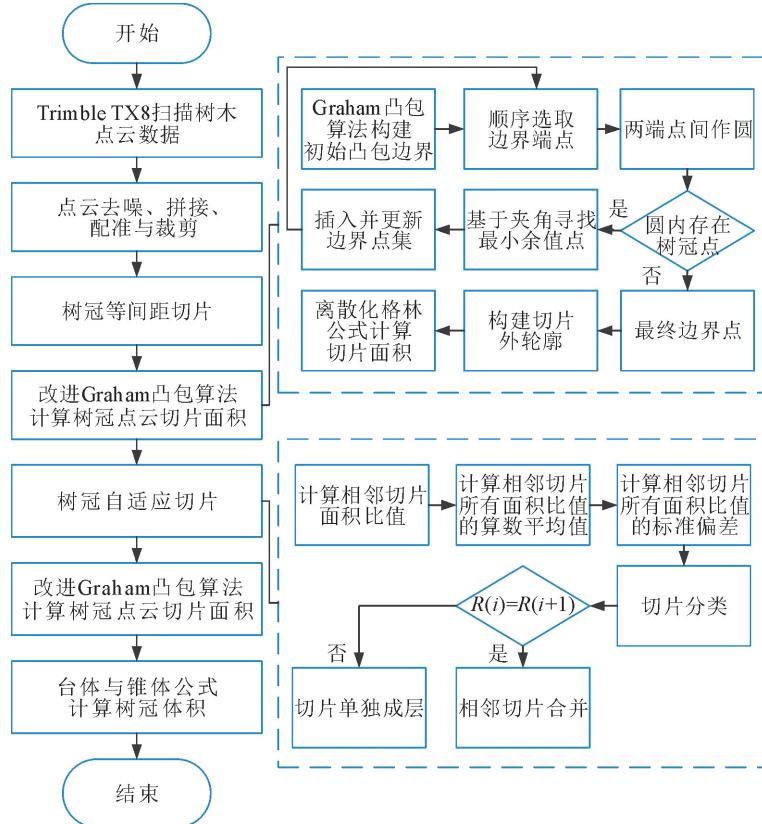


图 3 本研究所提方法技术流程

Fig. 3 Workflow of the proposed strategy

2) 以初始凸包边界的每条边线两端点之间的间距为直径作圆形区域,基于夹角寻找圆内树冠点中与直径端点组成最小余弦值的点,插入边界点集。

3) 重复步骤(2)直至所有边以该边为直径的圆内无树冠点,迭代完成,将更新后的边界点储存到新的点集 Q 中。

4) 遍历点集 Q 中所有边界点,基于 MATLAB 求解器寻找经过所有边界点的最短唯一路径,构建

最终树冠点云切片外轮廓。

5) 离散化格林公式计算每层树冠点云切片面积。计算公式为

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (x_i y_i + 1 - y_i x_i + 1) \quad (1)$$

式中: S 为树冠切片面积; k 为单层树冠切片边界点总数量; (x_i, y_i) 为 i 点的二维投影坐标; $(x_i + 1, y_{i+1})$ 为 $i + 1$ 点的二维投影坐标。

图 4(a)为 Graham 凸包算法提取的树冠点云切片边界,图 4(b)为改进 Graham 凸包算法一次迭代后提取的树冠点云切片边界,图 4(c)为改进 Graham 凸包算法最终提取的树冠点云切片边界。图 4(d)、图 4(e)、图 4(f)分别为树冠点云顶层、中层和底层切片边界提取的结果,其中外围黑色边界线是

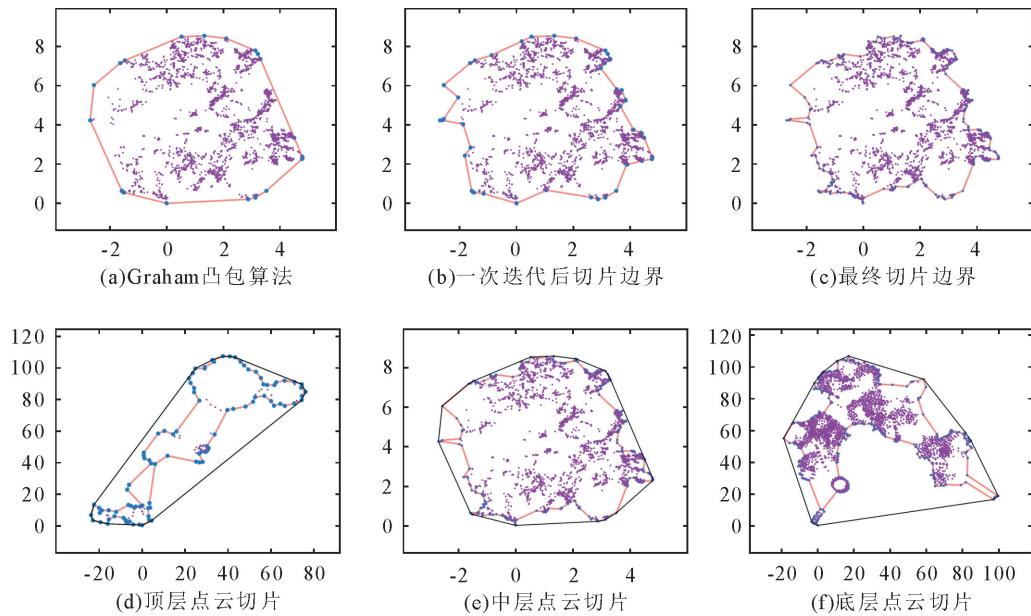


图 4 Graham 凸包算法与本研究方法的边界提取算法比较

Fig. 4 Comparison between Graham convex hull algorithm and boundary extraction algorithm of this research method

1.2.2 树冠自适应切片 树冠的形状和大小对树冠体积计算影响较大,从而影响无人机施药量预测,使用等间距切片的方法很难为树冠点云的每一层确定合适的切片厚度,取决于树冠形状和大小的不同结果证实了需要更具体的树冠点云切片方法^[17],为此本研究提出了一种根据相邻树冠点云切片的面积随高度的变化率自适应确定树冠点云切片厚度和切片数量的切片方法,仅当沿高程方向的树冠点云切片面积变化较大时才创建切片,该方法可以反映出树冠点云在垂直方向上的变化,确保树冠点云切片厚度和切片数量与树冠自身的形状和大小相适应。树冠自适应切片算法步骤具体如下。

1) 对树冠点云数据按高程方向进行等间距切片,本研究使用初始分层间距 $h_0 = 0.1$ m。由于树冠点云数据切片后部分切片存在不足 3 个点的情况,而改进的 Graham 凸包算法构建树冠点云切片边界至少需要 3 个点,因此将树冠切片中少于 3 个点的切片与上一层合并,记录初始分层数量 N 。

2) 使用改进 Graham 凸包算法计算各层树冠点云切片面积 S_i 。

3) 依次计算相邻树冠点云切片的面积比值 P_i 、所有面积比值的算术平均值 P_{ave} 以及所有面积比

基于 Graham 凸包算法提取的边界,内部红色边界线是基于改进 Graham 凸包算法提取的边界。分析图 4 可知,改进的 Graham 凸包算法提取的树冠点云切片边界去除了外部轮廓存在较大的空隙,更符合树冠点云切片的实际边缘轮廓。

值的标准偏差 P_{sd} ,计算公式为

$$P_i = \frac{S_i}{S_{i-1}} \quad (2)$$

$$P_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} P_i}{N-1} \quad (3)$$

$$P_{sd} = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^{N-1} (P_i - P_{ave})^2} \quad (4)$$

式中: S_i 、 S_{i-1} 为第 i 、 $i-1$ 层切片面积; P_i 为第 i 层切片与第 $i-1$ 层切片的面积比值; P_{ave} 为所有面积比值的算术平均值; P_{sd} 为所有面积比值的标准偏差; N 为初始分层切片数量。

4) 将上述计算结果代入式(5)中,以所有相邻树冠点云切片面积比值的平均值为起点,以标准偏差为间距进行切片,如果相邻切片满足 $R(i) = R(i-1)$,则认为相邻树冠点云切片的形状和面积相似,并进行合并,否则,认为相邻树冠点云切片的形状和面积变化较大,切片单独成层。 $R(i)$ 、 $R(i-1)$ 为第 i 、 $i-1$ 层切片分类结果。

$$\begin{aligned} R(i) &= \text{Round}\left(\frac{P_i - P_{ave}}{P_{sd}}\right) + 1, \text{if } P_i < P_{ave} \\ R(i) &= \text{Round}\left(\frac{P_i - P_{ave}}{P_{sd}}\right) - 1, \text{if } P_i \geq P_{ave} \end{aligned} \quad (5)$$

式中:*Round* 为只保留参数整数部分的取整函数。

5) 最终统计自适应切片得到的切片总数量 *n* 以及各层的厚度 *h_i*。

树冠自适应切片分类结果如图 5 所示, 图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)、图 5(d) 分别代表树冠点云切

片合并的 4 层切片, 经改进 Graham 凸包算法计算的面积分别为 8.451、8.542、7.556、7.807 m², 切片形状和面积差别不大。I 是初始分层结果, 分层数量 164 层; II 是自适应分层结果, 分层数量 74 层。

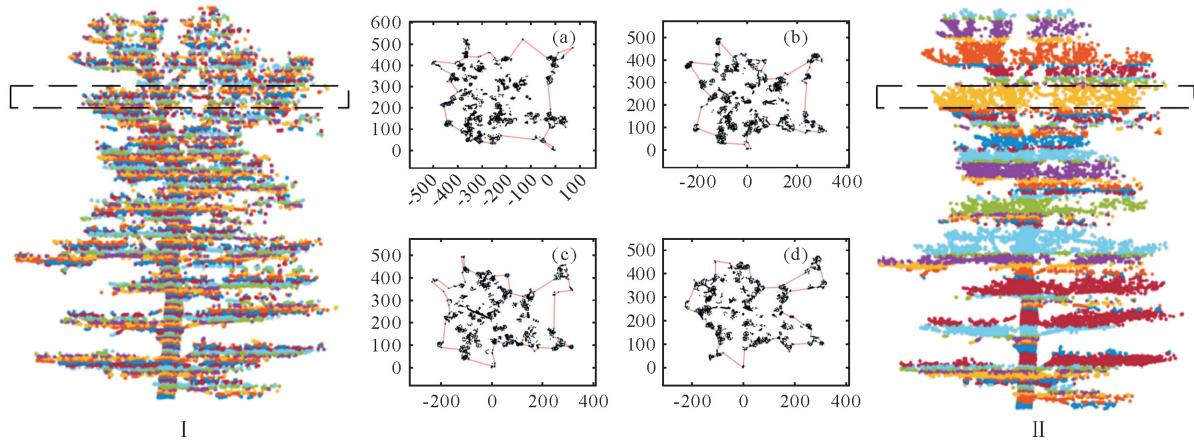


图 5 树冠自适应切片分类结果

Fig. 5 Classification results of adaptive slice of tree crown

1.2.3 树冠体积计算 使用上述树冠自适应切片方法, 将树冠体积划分为 *n* 层, 改进的 Graham 凸包算法计算每层切片面积, 累加各层树冠点云之间的体积可求得整个树冠的体积, 本研究基于台体与锥体公式计算树冠体积, 即将整个树冠视为由许多个台体和顶部一个锥体的几何体, 树冠体积等于前 *n*-1 个台体和第 *n* 个锥体的总和。计算公式为

$$V = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{n-1} (S_i + \sqrt{S_i S_{i-1}} + S_{i-1}) h_i + \frac{1}{3} S_n h_n \quad (6)$$

式中: *V* 为树冠体积; *n* 为树冠切片的总数量; *S_i*、*S_{i-1}* 为第 *i*、*i*-1 层树冠点云切片面积; *h_i* 为第 *i* 层切片高度; *S_n* 为第 *n* 层切片面积; *h_n* 为第 *n* 层切片高度。

2 结果与分析

试验运行环境采用 CPU 为 Intel(R) Core(TM) i5-5350U CPU @ 1.80 GHz, 内存为 8 GB, 64 位 Win10 操作系统的 PC 机, 试验算法开发平台均在 MATLAB R2022a。分别使用 Graham 凸包算法、体元法和本研究方法计算树冠体积。经试验证明, 当体元边长为树冠平均冠径的 1/10 时, 体积值趋于稳定值, 根据试验树木平均冠径, 体元边长取值 0.1 m, 通过 3 种方法得到的 20 棵树的树冠体积如表 1 所示, 从表中可以看出 20 棵树的树冠体积因树种和生长阶段差异明显, 其中 Graham 凸包算法计算的树冠体积 *V₁* 为 9.391~356.838 m³, 体元法计算的树冠体积 *V₂* 为 2.749~238.336 m³ 以及本研

究方法计算的树冠体积 *V₃* 为 4.782~299.026 m³。在相同初始分层间距下, 本研究方法计算的树冠体积结果介于 Graham 凸包算法和体元法之间。由于树冠的真实体积无法获取, 本研究采用 3 种方法计算的树冠体积的平均值为参考值, 来衡量本研究方法计算的精度。由表 1 可知, 本研究方法计算的树冠体积与平均值之间的最大相对误差为 15.98%, 最小相对误差为 0.32%, 平均相对误差为 7.19%。对比其他 2 种方法, Graham 凸包算法计算的树冠体积与平均值之间的最大相对误差为 66.48%, 最小相对误差为 13.67%, 平均相对误差为 38.08%。相较于 Graham 凸包算法, 本研究方法计算的树冠体积的相对平均误差减少了 30.89%, 其主要原因是 Graham 凸包算法在构建树冠点云切片外轮廓时包含了大量空白区域, 导致计算的树冠点云切片面积过大, 高估了树冠体积值。体元法计算的树冠体积与平均值之间的最大相对误差为 56.85%, 最小相对误差为 17.04%, 平均相对误差为 31.38%。相较于体元法, 本研究方法计算的树冠体积的平均相对误差减少了 24.19%, 其主要原因是体元法在计算树冠体积时忽略了内部少量被枝叶遮挡的点云, 低估了树冠体积值。

对表 1 数据进行详细分析, 图 6 显示了用本研究方法计算的树冠体积与 Graham 凸包算法计算的树冠体积的散点图和线性拟合, 使用 Graham 凸包算法计算的树冠体积比本研究方法计算的均值大 20.941 m³。图 6(a) 散点图中含有离群点, 为获取

稳定的拟合结果,去除离群点后2种方法计算的树冠体积的散点图与线性拟合如图6(b)所示。拟合结果的t检验显示,在5%显著性水平上存在显著差异($P<0.001$),使用本研究方法计算的树冠体积小

于Graham凸包算法计算的树冠体积,可避免Graham凸包算法在提取树冠点云切片外轮廓时未能有效去除外部较大间隙导致树冠体积的高估问题。

表1 3种方法计算的树冠体积

Table 1 Three calculation methods to calculate crown volume comparison

试验树木	点数量	树冠参数/m		树冠体积/ m^3			$ V_1 - V_m $	$ V_3 - V_m $	$ V_2 - V_m $	
		树高	冠径	Graham 凸包算法 V_1	本研究 方法 V_3	体元法 V_2	平均值 V_m	$\frac{ V_1 - V_m }{V_m}$ (%)	$\frac{ V_3 - V_m }{V_m}$ (%)	$\frac{ V_2 - V_m }{V_m}$ (%)
柏树1	221 279	9.809	3.357	31.489	28.581	20.679	26.916	16.98	6.18	23.17
柏树2	131 454	8.324	3.461	31.574	29.094	22.657	27.775	13.67	4.74	18.42
白松	750 170	7.153	6.107	103.964	94.334	73.203	90.501	14.87	4.23	19.11
雪松	458 772	12.881	10.889	356.838	299.026	238.336	298.067	19.71	0.32	20.03
白蜡树1	266 871	3.914	3.180	9.391	4.782	2.749	5.641	66.48	15.22	51.26
白蜡树2	226 792	4.352	3.737	13.976	7.808	3.659	8.481	64.79	7.93	56.85
白蜡树3	242 081	4.509	4.102	16.017	8.984	4.469	9.823	63.05	8.54	54.50
白蜡树4	252 933	5.174	4.099	19.987	11.090	6.592	12.556	59.17	11.67	47.50
悬铃木1	637 357	9.392	8.026	115.713	87.753	60.704	88.056	31.40	0.34	31.06
悬铃木2	502 813	7.929	7.680	106.761	81.309	57.875	81.982	30.22	0.82	29.40
悬铃木3	559 457	11.159	9.181	148.157	109.242	86.001	114.466	29.43	4.56	24.86
悬铃木4	591 372	9.803	8.389	139.980	105.824	76.381	107.395	30.34	1.46	28.87
三角枫1	586 399	5.575	3.923	20.732	14.519	13.472	16.241	27.65	10.60	17.04
三角枫2	610 629	5.419	4.110	21.280	13.549	12.586	15.805	34.64	14.27	20.36
三角枫3	561 846	5.552	5.010	35.950	21.570	17.934	25.151	42.93	14.23	28.69
三角枫4	545 602	8.912	5.598	83.695	47.250	37.772	56.239	48.82	15.98	32.83
银杏树1	1 149 737	13.415	8.765	163.591	132.753	104.961	133.768	22.29	0.75	21.53
银杏树2	592 589	11.088	7.991	120.094	83.210	54.494	85.93	39.75	3.16	36.58
银杏树3	362 929	9.888	6.121	69.799	45.792	34.020	49.87	39.96	8.17	31.78
银杏树4	481 301	10.673	6.593	95.457	59.171	43.787	66.13	44.32	10.53	33.79

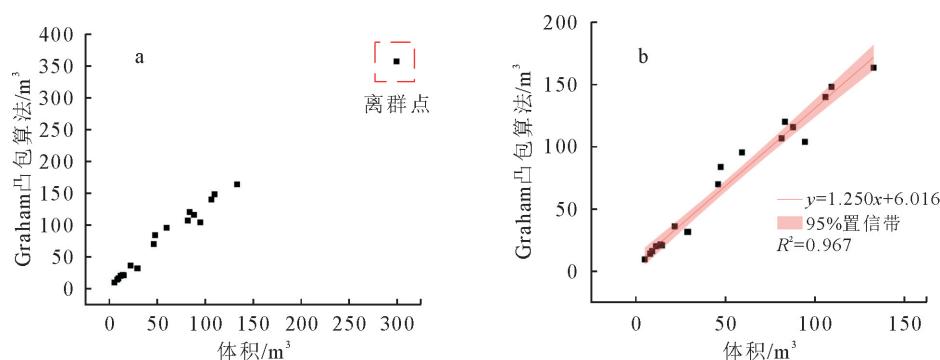


图6 本研究方法与Graham凸包算法计算的树冠体积的散点图与线性拟合

Fig. 6 Scatter plot and linear fitting of canopy volume calculated by this research method and Graham convex hull algorithm

图7显示了用本研究方法计算的树冠体积与体元法计算的树冠体积的散点图和线性拟合。图7(a)散点图中含有离群点,为获取稳定的拟合结果,同样,去除离群点后2种方法计算的树冠体积的散点图与线性拟合如图7(b)所示。在5%显著性水平上对拟合结果进行t检验($P<0.001$),结果显示使用本研究方法计算的树冠体积大于体元法计算的树冠体积,可避免体元法因忽略含有少量点云的遮挡面而产生体积的低估问题。本研究方法将相邻面

积差异较小的树冠点云切片进行合并,同时计算出较为准确的树冠点云切片面积,进而实现了树冠体积的精细化计算,精度上优于Graham凸包算法和体元法。

3 结论与讨论

精确计算树冠体积信息,将对应喷头喷雾区域的树冠体积转化为控制高速电磁阀启闭的脉宽调制(pulse width modulation,PWM)信号,利用无线数

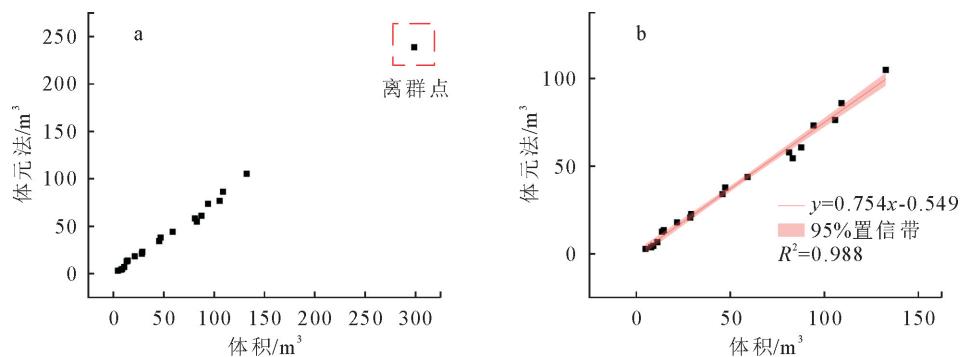


图7 本研究方法与体元法计算的树冠体积的散点图与线性拟合

Fig. 7 Scatter plot and linear fitting of canopy volume calculated by this research method and volume element method

传模块控制无人机喷雾,可满足无人机精准施药技术需求。本研究根据树冠自身形状和大小的复杂性,提出了一种基于点云自适应切片的树冠体积计算方法。

1)该方法确保了每层切片的厚度和切片数量与树冠自身的形状和大小相适应,同时有效缩小树冠点云切片边界空隙,切片边界趋于真实边界,得到较为准确的树冠点云切片面积,从而达到精细化计算树冠体积的目的。

2)为提高算法的准确性和稳定性,本研究运用Trimble TX8三维激光扫描仪采集树木完整点云数据,同时应用多棵高精度树木三维模型数据集,对形状不一的7种类别的20棵树木的树冠点云数据进行了实例分析。试验结果表明,本研究方法计算的树冠体积精度较高,相较于已有的其他方法,其结果在Graham凸包算法和体元法之间,在精度方面分别提高了30.89%和24.19%,树冠体积值更接近真值。

将树冠体积信息转化为PWM占空比,有差别有区分的施药将是下一步研究的重点。此外,初始分层厚度对本研究方法计算的树冠体积有一定的影响,最佳初始分层厚度的确定也将在今后的研究中进行。

参考文献:

- [1] RUITAO G, JIAN S, ZHOU Y, et al. Real-time interpretation system of variable spray prescription map based on plant protection UAV[J]. Journal of Jilin University. Engineering and Technology Edition, 2020, 50(1): 361-374.
- [2] 王玲, 兰玉彬, HOFFMANN W C, 等. 微型无人机低空变量喷药系统设计与雾滴沉积规律研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 15-22.
WANG L, LAN Y B, HOFFMANN W C, et al. Design of variable spraying system and influencing factors on droplets deposition of small UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 15-22. (in Chinese)
- [3] 王大帅, 张俊雄, 李伟, 等. 植保无人机动态变量施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 86-93.
- [4] LAN Y, CHEN S, FRITZ B K. Current status and future trends of precision agricultural aviation technologies[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(3): 1-17.
- [5] 杨玉泽, 林文树. 基于激光点云数据的树木枝叶分割和三维重建[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(3): 171-176.
YANG Y Z, LIN W S. Segmentation and 3D reconstruction of tree branches and leaves based on laser point cloud data[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(3): 171-176. (in Chinese)
- [6] 赵晨阳, 邢艳秋, 霍达, 等. 基于机载LiDAR落叶松树冠几何形状三维重建关键技术研究[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(2): 186-190.
ZHAO C Y, XING Y Q, HUO D, et al. Key technologies of three-dimensional geometric reconstruction of larch crown shape based on lidar data[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(2): 186-190. (in Chinese)
- [7] 王祺, 胡洪, 吴艳兰, 等. 基于点云数据的树冠体积自动求算方法[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(2): 242-246.
WANG Q, HU H, WU Y L, et al. Automatic tree crown volume calculation method based on point cloud data[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(2): 242-246. (in Chinese)
- [8] 韦雪花, 王永国, 郑君, 等. 基于三维激光扫描点云的树冠体积计算方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 235-240.
WEI X H, WANG Y G, ZHENG J, et al. Tree crown volume calculation based on 3D laser scanning point clouds data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 235-240. (in Chinese)
- [9] 董亚涵, 李永强, 李鹏鹏, 等. 基于改进凸包算法的树冠轮廓点提取与体积计算[J]. 测绘工程, 2018, 27(8): 66-71.
DONG Y H, LI Y Q, LI P P, et al. Tree crown outline points extracting and volume calculation base on improved convex hull algorithm[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2018, 27(8): 66-71. (in Chinese)

(下转第202页)

- pine meadow and desert in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(3): 1194-1208. (in Chinese)
- [13] 程文举,席海洋,司建华,等.内陆河流域浅山区土壤水热时空动态及其对气象因子的响应[J].高原气象,2022,41(6):1435-1445.
- CHENG W J, XI H Y, SI J H, et al. Temporal and spatial dynamic change of soil water-heat and its response to meteorological factors in an inland river basin in low coteau area[J]. *Plateau Meteorology*, 2022, 41(6): 1435-1445. (in Chinese)
- [14] 崔梦瑞,白林燕,冯建中,等.京津唐地区臭氧时空分布特征与气象因子的关联性研究[J].环境科学学报,2021,41(2):373-385.
- CUI M R, BAI L Y, FENG J Z, et al. Analysis of temporal and spatial variations of ozone coupling with dynamics of meteorological factors in the Beijing-Tianjin-Tangshan region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(2): 373-385. (in Chinese)
- [15] 杨中杰,包永红,王立中.基于遥感图像的复杂种植区施肥均匀性监测[J].计算机仿真,2022,39(11):244-247,370.
- YANG Z J, BAO Y H, WANG L Z. Monitoring of fertilization uniformity in complex planting areas based on remote sensing images[J]. *Computer Simulation*, 2022, 39 (11): 244-247, 370. (in Chinese)
- [16] 韩新生,许浩,刘广全,等.不同时间尺度山杏树干液流密度对环境因子的响应[J].西北林学院学报,2023,38(3):31-39.
- HAN X S, XU H, LIU G Q, et al. Responses of the tree trunk sap flow density of *Armeniaca sibirica* to environmental factors in different time scales[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023, 38(3): 31-39. (in Chinese)
- [17] 黄悦,李思恩.气象因素对民勤地区参考作物腾发量变化的贡献分析[J].中国农业大学学报,2021,26(5):118-128.
- HUANG Y, LI S E. Contribution analysis of meteorological factors on the variation of reference crop evapotranspiration in Minqin area [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(5): 118-128. (in Chinese)
- [18] 冯万富,申明海,单燕祥,等.河南鸡公山林区PM_{2.5}污染与气象因子全年时尺度相关性分析[J].西北林学院学报,2022,37(3):37-44.
- FENG W F, SHEN M H, SHAN Y X, et al. Correlation analysis between PM_{2.5} pollution and meteorological factors in Jigong mountain forest area of Henan Province[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(3): 37-44. (in Chinese)

(上接第 195 页)

- [10] 程钢,王敬宇,杨杰,等.基于改进 α -shape 算法的三维点云树冠体积计算方法[J].农业机械学报,2021,52(5):175-183.
- CEHNG G, WANG J Y, YANG J, et al. Calculation method of 3D point cloud canopy volume based on improved α -shape algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(5): 175-183. (in Chinese)
- [11] 林松,田林亚,毕继鑫,等.三维激光扫描数据的单木树冠体积精确计算[J].测绘科学,2020,45(8):115-122.
- LIN S, TIAN L Y, BI J X, et al. Accurate calculation of single-tree crown volume based on 3D laser scanning data[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, 45 (8): 115-122. (in Chinese)
- [12] FRANCESCHI E, MOSER-REISCHL A, RAHMAN M A, et al. Crown shapes of urban trees-their dependences on tree species, tree age and local environment, and effects on ecosystem services[J]. *Forestry*, 2022, 13(5): 748.
- [13] 刘凯,夏苗,杨晓梅.一种平面点集的高效凸包算法[J].工程科学与技术,2017,49(5):109-116.
- LIU K, XIA M, YANG X M. An effective 2D convex hull algorithm[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49 (5): 109-116. (in Chinese)
- [14] 刘斌,王涛.一种高效的平面点集凸包递归算法[J].自动化学报,2012,38(8):1375-1379.
- LIU B, WANG T. An efficient convex hull algorithm for planar point set based on recursive method[J]. *Acta Automatica Sinica* 2012, 38(8):1375-1379. (in Chinese)
- [15] 吴文周,李利番,王结臣.平面点集凸包 Graham 算法的改进[J].测绘科学,2010,35(6):123-125.
- WU W Z, LI L F, WANG J C. An improved Graham algorithm for determining the convex hull of planar set[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2010, 35 (6): 123-125. (in Chinese)
- [16] 王凯,支煜,陈浩,等.一种基于 Graham 扫描算法的空间点云结构化算法研究[J].现代电子技术,2018,41(14):139-142.
- WANG K, ZHI Y, CHEN H, et al. Research on space point cloud structuring algorithm based on Graham scanning algorithm[J]. *Modern Electronics Technique*, 2018, 41(14): 139-142. (in Chinese)
- [17] CHENG L, WU Y, CHEN S, et al. A symmetry-based method for lidar point registration[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(1):285-299.