

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.036

基于改进 Delaunay 算法的树冠三维重构单木因子提取*

巩垠熙¹ 何 诚¹ 冯仲科¹ 李文钊² 闫 飞¹

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 纽卡斯尔大学土木地质学院, 纽卡斯尔 NE17RU)

摘要: 针对树冠结构复杂和点云数据量大的特点, 为了提高测算单木因子中树冠表面积和体积的精度和效率, 通过改进 Delaunay 三角网的算法机制, 提出一种基于空间分割的分块优先级机制的三角网表面重建算法, 用于重构树冠表面, 形成一种高精度高效率的树冠表面积和体积因子提取方法。利用地面三维激光扫描系统获取树冠点云数据, 分别通过传统人工方法、点云量测法、数字高程模型算法与提出的改进 SD Delaunay 算法, 计算实验区域研究对象的树冠表面积与体积, 并进行对比分析, 结果表明提出的算法完全满足计算精度, 同时该计算方法的耗时只有传统人工法的 41%, 数字高程模型法的 62%, 大大提高了运算效率。

关键词: 树冠 改进 Delaunay 算法 地面三维激光扫描系统 单木因子 点云数据

中图分类号: S24; TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)02-0192-08

Amended Delaunay Algorithm for Single Tree Factor Extraction Using 3-D Crown Modeling

Gong Yinxi¹ He Cheng¹ Feng Zhongke¹ Li Wenzhao² Yan Fei¹

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. College of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University, Newcastle Upon Tyne NE17RU, UK)

Abstract: Crown structure is complex and has huge amount of point cloud data. In order to achieve more accurate and more efficient measurement of crown surface area and volume, the characteristics of existing algorithms were analyzed and an improved triangular mesh surface reconstruction algorithm which is based on spatial division block priority mechanism was proposed for the reconfiguration of the crown surface. A precise and efficient factor extraction method for crown surface area and volume was formed. Crown point cloud data obtained through ground 3-D laser scanning system was used. Through the traditional artificial method, cloud point measurement method, the classics digital elevation model algorithm and the proposed algorithm, the crown surface and volume of the experimental subjects was calculated respectively. The inter comparison of the algorithm results fully meets the calculation accuracy. The time consumption of the proposed algorithm only accounts for 41% of the traditional way and 62% of digital elevation model method, which appears to greatly improve the operation efficiency.

Key words: Crown Improved Delaunay algorithm TLiDAR Single tree factor Point cloud data

引言

由于森林环境的复杂多变、树木空间结构的不规则性以及传统人工测树的粗放, 以往的单木因子

测算效率和精度都不甚理想^[1], 但随着地面三维激光扫描技术的日益成熟和成本降低, 其作为一种实现高精度量测并快速构建目标物体空间结构的技术方法, 可以实现树木结构的高精度快速重建^[2], 进

收稿日期: 2012-05-21 修回日期: 2012-06-26

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009AA12Z327)和“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAH34B01)

作者简介: 巩垠熙, 博士生, 主要从事林业装备工程与地理信息系统研究, E-mail: top_speed2@163.com

通讯作者: 冯仲科, 教授, 博士生导师, 主要从事精准林业、测绘与 3S 技术集成研究, E-mail: fengzhongke@126.com

而提取各单木因子及结构参数,因此被越来越广泛地应用于精准林业领域。

地面三维激光扫描技术运用在复杂的森林环境中,是利用了其可以高效、精确的获取扫描物空间信息的特点,但是对目标的精细测量取决于点云数据的处理结果。通常点云数据存在大量冗余,造成点云构网时间较长,同时构网算法的差异也导致同一目标物体点云拟合不一致的结果,甚至由于目标物体表面的复杂性,导致在点云拟合时产生大量的凸出、空洞、压叠、交错等现象,无法直接用于目标物体的各项因子提取,往往需要人工干预处理^[3],因此树冠点云数据的构网问题成为一个难点。

经过长期研究,Richardson 等^[4~12]应用地面三维激光扫描系统结合人机交互方式进行测树因子提取,很大程度上提高了树冠因子测算的自动化水平和数据精度,但这些方法大都基于叶面积指数等理论或根据树种冠形方程求算树冠表面积和体积,解算精度依赖于所建立的反演模型,在应用时具有局限性。近年来也有国内外学者提出利用数字高程模型构建树冠表面模型的方法求算树冠表面积和体积^[7~9],这种方法在树冠因子解算的自动化程度上有了很大的提高,但由于树冠的枝叶结构复杂,导致自动生成的树冠结构往往需要人工干预以使数据合理化,造成了树冠因子提取精度不足,同时这些方法在处理激光点云庞大的数据量时,也耗时较长^[9]。

为了实现单木因子树冠表面积和树冠体积高精度无损测量,同时应对 TLiDAR 庞大数据量计算的运行效率,本文提出一种基于空间分割的分块优先级机制的 Delaunay 三角网表面重建算法。采用地面三维激光扫描系统获取树冠的三维空间点阵数据,通过分块筛选,保留树冠的特征点作为约束条件建立树冠表面三维模型,利用 TIN 三角网数据结构的特点计算树冠表面积和体积。

1 三维激光扫描系统获取信息处理

1.1 实验平台

使用地面三维激光扫描系统 Terrestrial LiDAR (TLiDAR) 作为数据来源,TLiDAR 由地面三维激光扫描仪、电源、数码相机、配准球、支架以及附属设备构成,采用非接触激光测量方式获取目标物体的表面点云数据。该系统以一定序列发射窄束激光脉冲扫描目标物体表面,经过反射后通过同步旋转反射接收镜接收回波脉冲,通过激光脉冲发射和接收的时间差计算扫描仪与目标物体的距离和角度,同时扫描控制模块进行控制和测量,最后由扫描仪自带的坐标系统自动计算出被测物的相对三维坐标。脉

冲激光的测距原理如图 1 所示,扫描点的坐标计算原理如图 2 所示。

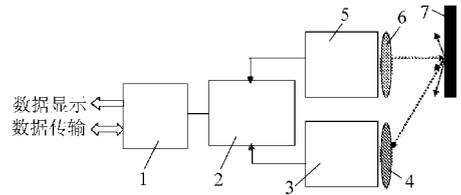


图 1 激光测距原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ranging principle of laser

1. 微计算机 2. 时间测量单元 3. 光电二极管接收器 4. 接收器透镜 5. 激光二极管 6. 发射器透镜 7. 目标

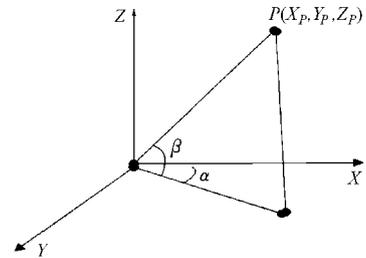


图 2 点云坐标计算原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of point cloud coordinate calculation

扫描点的坐标计算式为

$$\begin{cases} X_p = D \cos \beta \cos \alpha \\ Y_p = D \cos \beta \sin \alpha \\ Z_p = D \sin \beta \end{cases} \quad (1)$$

式中 α ——水平方向角度 D ——斜距

β ——垂直方向角度

X_p, Y_p, Z_p ——扫描点坐标

实验仪器选择 FARO Photon120 型三维地面激光扫描仪,水平扫描角度 360° ,垂直扫描角度为 320° 。该仪器的特点是垂直角度范围广,可以完整扫描树木冠幅,提高不同站点的拼接效率。扫描前在样地均匀布置配准球,利用配准球进行点云拼接,可以大大提高配准的精度和速度。

1.2 数据获取

由于传统树冠表面积、体积量测方法中人为因素在采集数据的误差来源中占主导^[9],因此树木特征因子使用人工采集和点云数据量测 2 种方式。人工采集使用传统的测高器和围尺实地测量树木的树高、冠幅以及胸径等信息。

为了获得树冠的全方位点云信息,对同一棵树至少需要进行 3 个测站的扫描,以获得树冠完整的空间信息。样地扫描遵循的原则为:以最少的测站数获得样地内所有树冠的空间方位信息。因为测站数过多,会给点云数据的拼接带来额外的工作,该问题可以在采集数据的过程中通过优化控制点的布置

来消除。数据采集所使用的控制点布置基本原则,如图3所示。

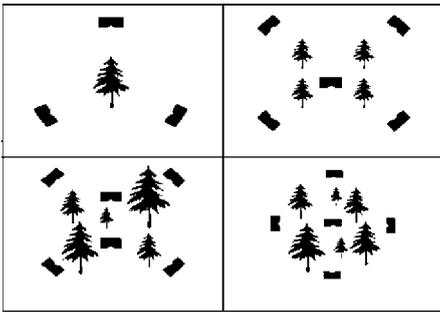


图3 控制点布置原则

Fig.3 Principle of control point arrangement

数据获取步骤为:①分别对实验样地内的30木树木进行每木检尺,测量胸径、树高、冠幅等因子,得到实测数据。②使用相机拍摄实验区域和对象,使用三维激光扫描仪扫描样木的树冠,获得点云数据,经后期处理得到相应胸径、树高、冠幅以及树冠表面点云数据。

1.3 内业处理

点云数据匹配的目的在于定义一个绝对坐标系,匹配不同测站的数据,以完整目标物体的点云信息。为精确地利用参考点来定位,使用 CORS 系统或全站仪进行检验和控制。匹配使用3个平移参数和3个旋转参数,表示为

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = R(w, j, k) \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 x_i, y_i, z_i ——平移参数结果

x_c, y_c, z_c ——平移参数

x_t, y_t, z_t ——平移参数增量

$R(w, j, k)$ ——旋转参数

参考点的坐标通过实际观测获取,利用这些已知位置的坐标转换参数可以建立线性方程。已知点的准确坐标可以当作扫描布设点,实现多组数据在绝对坐标下的准确拼接,从而更加精确地获取目标物三维构造信息。

TLiDAR 可以获取树冠的点云数据,但在数据采集时树干会不可避免被扫描入点云数据中,为了获得纯粹的树冠点云,本文通过在 Cyclone 中对点云进行旋转、缩放,剔除树干部分的点云,获得纯粹的树冠表面点云,以便于树冠表面模型的建立并获取树冠表面积、体积数据。

2 计算方法

2.1 经典树冠表面积、体积计算模型

传统树冠体积与表面积的计算方法:以树冠的

冠幅与冠高作为参数,模拟为规则几何体计算体积,人工采集树木特征因子,并根据每种模拟的几何体求解树冠体积和表面积,具体如表1所示^[9~10],表中 x 为冠幅, y 为树高。

表1 树冠模拟几何体体积计算公式
Tab.1 Formula for calculating volume corresponding to crown geometry

冠形	计算公式
球形	$\pi x^2 y / 6$
圆锥形	$\pi x^2 y / 12$
球扇形	$\pi(2y^3 - y^2 \sqrt{4y^2 - x^2}) / 3$
球缺形	$\pi(3xy^2 - 2y^3) / 6$

将树冠由高度差 h_i 分为 l 段, S_0, S_i, S_n 分别表示树冠底部、中部和顶端的横切面面积。则由各层截面求树冠表面积 S 的计算公式为

$$S = \sum_{i=1}^l \left((\sqrt{S_{i-1}} + \sqrt{S_i}) \sqrt{S_{i-1} + S_i - 2\sqrt{S_{i-1}S_i} + \pi h_i^2} \right) \quad (3)$$

式中 i ——断层序号

2.2 数字高程模型算法

利用离散点建立数字高程模型拟合树冠表面最常用的算法是 Delaunay 三角形法,其计算效率优于基于等高线的方法,同时与规则网格相比又减少了数据冗余^[13~15]。Delaunay 三角形由对应的 Voronoi 多边形共边的点构成。Voronoi 多边形是一组由连接相邻两点直线的垂直平分线组成的连续多边形。在平面上的互不重叠的多个点,依据最邻近原则划分,每个点与其最近的邻域相关联。相邻 Voronoi 多边形之间的共享边互相连接形成 Delaunay 三角形。其中,每个 Voronoi 多边形的公共顶点必然是相关联的 Delaunay 三角形外接圆的圆心,从中可以看出 Delaunay 三角形遵守平面图形的欧拉定理^[14],如图4所示。

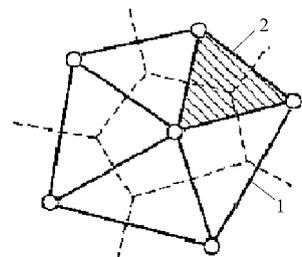


图4 Delaunay 三角形示意图

Fig.4 Lustration of Delaunay triangularization

1. Voronoi 图 2. Delaunay 图

2.3 Delaunay 三角网生成算法

树冠表面往往含有较多的成簇状不均匀分布的凸出和空洞,较地表更加复杂,通常的 Delaunay 三

角网算法对这些细节往往不进行表达,否则将产生物体表面扭曲或打结的情况^[13]。本文算法通过建立空间分割网格的分块优先级机制,经过分块筛选,保留树冠的特征点作为约束条件,同时进行局部的三维LOP优化,既避免了发生三角形空洞和错误的现象,又可以有效地拟合树冠表面的凹凸细节,使得对树冠表面的识别更加精确。同时为了规避由于常规TLIDAR数据量过于庞大,落入每个格网的点都要经过构网检索而导致Delaunay三角网算法效率低下的问题,提出的Spatial Division Delaunay(SD Delaunay)三角网生成算法通过对点云数据的空间分割对点云进行筛选,从而提高运算效率。

为了提高点云空间检索的效率,明确数据以及对象之间的关系,便于空间点云数据的存储和构网,本文方法改进了以往Delaunay三角网数据结构^[13-14]。改进的数据结构包括:点、基线和网格。

点结构包含点的空间三维坐标与点的状态信息。点的状态信息用来指示该点目前为有效点或内部点。若该点当前是一条乃至数条基线的端点,或者该点从未被连接过,则称其为有效点。若其被连接过,而且当前又不是任何一条基线的端点,则可以设定该点为内部点,从而避免重复计算点状态对计算时间的影响。

基线结构包含2个端点的唯一标识符FID。每条基线生成或者被删除时,都需要修改该基线端点的状态信息。这种简洁的结构有效地降低了算法的复杂度,提高了局部的LOP效率。

网格结构中包含网格内所有点的序号、网格内所有基线及数量,以及网格内有效点的数量。这些信息随网格内基线和点的状态的变化而自动更新,这样的分块结构减少了同时参与计算的数据单元数量。

建立空间分割网格机制的目的是提高构网效率,降低冗余点对解算速度的影响,具体算法为:

(1)按照点云数据的空间分布将点云分割成 $n \times m$ 个网格(n, m 都是整数),分别存放在网格结构 $P[i, j]$ 中,其中 $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m, n$ 与 m 的大小取决于树冠的大小。而以 $P[i, j]$ 中的某点为起点的基线也存放在 $P[i, j]$ 中。

(2)对每个网格中的点进行排序,在每个网格中选取数据点,查找以该点为顶点的所有基线。

(3)求该点的各相邻两条基线的两两法向量夹角,并求出其中最大夹角 θ_{\max} ,将 θ_{\max} 与设定的阈值 F 作比较,如果 θ_{\max} 小于 F ,删除该点,否则,保留该点。

(4)重复步骤(2)、(3),继续处理下一个网格,

直到将所有网格处理完。

(5)为了避免搜索无效的空网格,采用了剔除无效网格的策略,找到第一个有效的网格,找到格网内 Y 坐标最大的第一个点 A ,并找到与该点最近的另一个点 B ,获得初始基线 AB ,如图5所示。

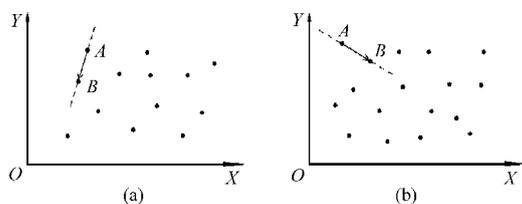


图5 基线示意图

Fig.5 Schematic of baseline

(a) 初始基线获得 (b) 初始基线调整后

(6)从基线 AB 的中点出发,利用空外接圆的属性搜索 AB 左侧一定范围内符合Delaunay三角形的另一点 C ,这样就避免了空腔的生成。若找不到有效点 C ,则扩大搜索半径至某个阈值。若找不到点 C ,反而找到某内部点符合Delaunay三角形的条件,则删除该基线。若搜索范围超出点云占据的空间区域依然找不到点 C ,且该基线是初始基线,则逆转 AB 为 BA ,初始基线之后的新基线不允许逆转,而是直接删除。

(7)获得2条新基线 CA 和 BC ,检索基线表,如果发现已经存在 CA 或 BC ,则将重合的基线删除;否则,将新的基线添加入基线表。

(8)按网格编号顺序遍历网格,闭锁所有遍历到的基线数量和有效点数量都为零的网格。以后将不再检索已闭锁的网格。检索到第一个网格内基线数量都非零的网格,取该网格的任一条基线作为新的基线。

(9)重复步骤(6)~(8),完成局部三角网建立。

(10)进行三维LOP优化以减少三角网的空洞重叠以及压盖的情况,通过计算 S_i 的正负符号,快速判断相邻三角形所构成的四边形中某一顶点与另一三角形的位置关系。若 S_i 结果符号为正,则 D 点在 $\triangle ABC$ 的LOP球面之外;若为负,则可判断 D 点位于 $\triangle ABC$ 的LOP球面之内,从而决定 $ABCD$ 构成的四边形是否满足交换对角线的条件,得到优化后的局部网格(图6)。 S_i 计算式为

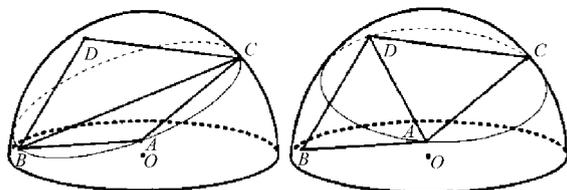


图6 三维LOP优化示意图

Fig.6 Schematic of optimized 3-D LOP

$$S_i = \begin{vmatrix} X_A - X_D & Y_A - Y_D & Z_A - Z_D \\ X_B - X_D & Y_B - Y_D & Z_B - Z_D \\ X_C - X_D & Y_C - Y_D & Z_C - Z_D \end{vmatrix} \quad (4)$$

式中 X_A, Y_A, Z_A ——A 点空间坐标
 X_B, Y_B, Z_B ——B 点空间坐标
 X_C, Y_C, Z_C ——C 点空间坐标
 X_D, Y_D, Z_D ——D 点空间坐标

(11)重复步骤(6)~(10),完成三角网的建立。

2.4 树冠表面积与体积计算

基于三角网的面积计算较简单,将每个三角形单元当作平面处理,由三点构成的三角形表面积为

$$S_i = \sqrt{P(P-a)(P-b)(P-c)} \quad (5)$$

其中 $P_c = \frac{1}{2}(a+b+c)$ (6)

式中 S_i ——三角形面积
 a, b, c ——三角形 3 条边长
 P_c ——三角形周长的 1/2

整个树冠的表面积则是树冠表面模型中每个三角形面积的和。

基于三角网的体积计算需要 2 个模型,即树冠表面模型和基底表面模型,将 2 个模型叠加后对应的三角形单元所夹体积即所求体积。针对树冠的空间形态特点,本研究的基底表面模型选择能够竖直平分树冠的平面。首先,选择基底平面将树冠分为左、右两部分,进行坐标轴旋转,将左、右两部分分别在 X 轴方向上旋转 -90° 和 90° 。之后平移坐标轴,使基底表面的高程为零,从而获得树冠表面的 DEM 数据。最后利用 CAD 软件的土方量计算工具处理上述获得的 DEM 数据,即可得到完整的树冠体积。

坐标轴旋转计算式为

$$\begin{cases} x' = x_p \cos\theta \cos\gamma + y_p (\sin\mu \sin\theta \cos\gamma - \cos\mu \sin\gamma) + z_p (\cos\mu \sin\theta \cos\gamma + \sin\mu \sin\gamma) \\ y' = x_p \cos\theta \cos\gamma + y_p (\sin\mu \sin\theta \cos\gamma - \cos\mu \cos\gamma) + z_p (\cos\mu \sin\theta \sin\gamma + \sin\mu \cos\gamma) \\ z' = x_p \sin\theta + y_p \sin\mu \cos\theta + z_p \cos\mu \cos\theta \end{cases} \quad (7)$$

式中 x_p, y_p, z_p ——旋转前目标点空间坐标

x', y', z' ——旋转后目标点空间坐标

μ, θ, γ ——沿 X、Y、Z 轴的旋转角度

对左半部分,整体沿 X 轴旋转 -90° ,沿 Y 轴旋转 0° ,沿 Z 轴旋转 -90° ;对右半部分,整体沿 X 轴旋转 90° ,沿 Y 轴旋转 0° ,沿 Z 轴旋转 90° 。

3 结果与分析

3.1 算法效果分析

在算法复杂度方面,对于某个包含 M 个点的区域,如果基线要在该区域找到符合条件的顶点,须对该区域内的 M 个点遍历分析。假设点云共有 N 个点,则每个区域算法复杂度的均值为 $O(M \times N)$ 。本文算法平均每次检索的网格块数为 K,则算法复杂度为 $O(M \times K \times N)$ 。其中 M 根据点云密度设置,通常比 N 小很多, K 由计算机根据点云密度自行调整。同时该算法中参与计算的点云数量 N 也远少于传统 Delaunay 算法中参与计算的点云数量 N_0 ,本文算法的复杂度小于经典 Delaunay 三角网生长法的复杂度为 $O(N_0 \lg N_0)$ 。而且传统的构网方法占用内存较大,对于离散点超过 1 000 万的数据构网,实验使用的 4 GB 内存计算机就会因内存不足而中断;而本算法采用分块法构网,内存占用较小,对点数的限制较小,能对千万点级别的 TLiDAR 数据正确构网。本研究使用文献[15]的经典 Delaunay 构网算法和本文算法在不同构网间隔下对同一点云树冠进行构网实验,分别对算法的构网时间和效果进行对比。

由表 2 可以看出,对于同一点云树冠,本文方法参与构网的离散点数量明显低于传统的 Delaunay 方法,三角网的构网耗时也与参与构网的离散点个数显著相关。对比总耗时发现,本文的构网方法执行效率较高,提高了 58.6%。同时,针对树冠点云的特点,本文算法在 20 cm × 20 cm 的构网间隔下的执行效率相对于其他构网间隔更加合理,更加适合 TLiDAR 获得的树冠点云数据构网。

图 7 为对同一树冠分别使用文献[15]Delaunay 算法和本文算法在构网间隔为 20 cm × 20 cm 下的构网效果对比图。

表 2 算法复杂度测试结果

Tab. 2 Test results of complexity of algorithm

方法	构网点数量	三角形数量	构网间隔/cm × cm	构网耗时/ms	分割耗时/ms	总耗时/ms
Delaunay 构网	26 913	51 637		246.7		246.7
	15 832	31 719	10 × 10	91.2	43.3	134.5
SD Delaunay 构网	13 751	26 532	20 × 20	71.5	30.7	102.2
	12 107	24 986	30 × 30	69.2	39.1	108.3

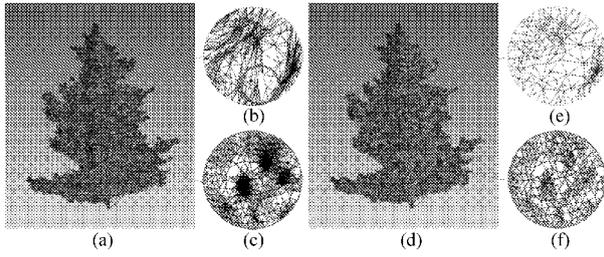


图7 树冠构网效果对比

Fig. 7 Comparison with TINs of crown

(a) Delaunay 构网 (b) Delaunay 构网局部效果 1

(c) Delaunay 构网局部效果 2 (d) SD Delaunay 构网

(e) SD Delaunay 构网局部效果 1 (f) SD Delaunay 构网局部效果 2

对比图 7a 与图 7d 可知, Delaunay 算法与本算法在整体上的构网效果相差不多, 都较正确地反映了树冠的表面形状。但是将树冠表面放大后可以发现, 在表面的不规则处, Delaunay 算法会出现空洞

(图 7b), 破坏了三角网的完整性; 而本文算法可以很好地避免这种情况, 构成完整的三角网(图 7e)。在点云分布变化较大的区域, 由于树冠表面的不规则变化出现了三角网簇状重叠错误(图 7c); 而本文算法在经过点云数据的分割筛选后可以极大地改善此类问题(图 7f)。

3.2 实验结果分析

本文使用传统的人工测量方法、点云量测方法^[5~11]、Delaunay 构网算法^[15]以及改进的 SD Delaunay 算法, 算法使用 VC++6.0 编程实现, 硬件配置为奔腾 E5700 CPU, 4 GB DDR2 内存, 对 30 组树木点云数据拟合树冠表面, 实现了树冠表面积与树冠体积的计算, 分别对各方法的计算效果和效率进行分析, 表 3 为各种方法的计算结果。

表 3 树冠表面积与体积比较

Tab. 3 Comparison of crown surface area and volume calculation

序号	人工测量法		点云量测法		Delaunay 算法		SD Delaunay 算法	
	表面积/m ²	体积/m ³						
1	172.373	91.125	179.690	96.313	173.521	91.875	175.910	92.370
2	115.679	52.076	122.576	52.756	125.318	53.975	128.274	54.013
3	110.365	42.815	102.773	39.112	108.395	39.171	110.780	39.641
4	90.152	34.991	92.695	35.698	91.421	36.415	93.025	36.618
5	162.756	68.885	157.238	69.769	150.118	66.164	154.817	67.024
6	186.025	75.871	175.701	71.569	184.943	72.659	191.524	73.191
7	273.736	156.073	261.051	150.364	250.745	142.321	254.291	143.478
8	181.623	108.634	193.267	116.761	193.643	107.869	191.472	107.738
9	43.610	25.167	46.881	26.946	44.192	23.232	46.098	23.523
10	54.468	26.026	50.365	25.279	55.128	25.697	52.877	25.397
11	51.954	21.005	52.737	22.883	50.361	20.257	47.412	19.777
12	51.379	24.510	47.354	24.687	44.618	21.732	46.456	22.037
13	47.158	21.368	41.967	18.227	44.563	18.562	46.432	18.969
14	68.966	31.735	67.461	31.319	65.715	29.561	64.620	29.334
15	79.672	42.976	77.607	43.228	73.217	39.873	74.901	40.272
16	46.134	20.769	46.951	21.587	55.959	23.824	57.192	24.196
17	60.682	37.931	58.117	37.134	63.307	37.512	62.262	37.268
18	98.326	61.371	110.650	62.895	118.485	67.987	120.535	68.183
19	43.491	17.657	40.276	16.357	38.248	15.934	40.290	16.132
20	35.380	14.867	36.618	16.217	33.856	13.391	33.280	13.283
21	113.352	39.984	101.584	39.684	97.425	35.167	98.932	35.403
22	83.471	31.012	79.637	29.416	82.473	30.697	84.837	31.170
23	46.553	17.950	43.553	20.234	43.897	16.851	39.979	16.620
24	42.731	17.916	41.189	17.387	40.070	15.601	38.824	15.336
25	92.193	33.019	90.811	33.751	96.420	34.128	96.878	34.303
26	113.297	52.917	103.702	48.297	107.121	51.251	110.656	52.071
27	64.790	27.321	65.379	28.649	61.813	26.331	63.811	26.556
28	104.865	45.781	94.612	43.851	98.158	40.581	100.808	41.271
29	54.234	23.357	51.299	21.649	53.169	22.857	55.913	23.134
30	47.097	19.860	47.097	17.227	49.797	19.735	52.394	20.021

由得出的结果可知, 4 种方法计算的树冠表面积与体积结果较为相近, 但是人工测量的结果与基于点云量测得出的结果相比, 波动性较大, 这是由于

人工测量时人为因素干扰较大, 含有较大的粗差。点云量测的结果与 Delaunay 和 SD Delaunay 的结果变化较为接近, 说明从点云数据直接量测的结果较

人工方法更为精确。同时 Delaunay 与 SD Delaunay 算法获得的结果相近,但是通过 SD Delaunay 算法计算的树冠表面积较传统 Delaunay 算法计算结果相差略大,平均误差达到 1.31 m^2 ,说明 SD Delaunay 算法拟合的树冠表面拥有更多的细节信息,而利用两种算法在计算树冠体积时,计算结果差异不大,平均误差仅有 0.23 m^3 。

为验证本文方法的有效性,将点云量测计算出的各样木树冠表面积和体积作为实测值,将 SD Delaunay 算法计算的各样木树冠表面积和体积作为理论值进行了误差估测和置信度 0.05 下的置信椭

圆概率检验来测算精度,检验结果如表 4 所示。

从表 4 可以看出,SD Delaunay 算法在用于计算树冠表面积时效果好于计算树冠体积。各样木树冠表面积的平均相对误差为 2.95%,而树冠体积的平均相对误差为 2.51%;在精度检验中显示出较高的检验精度,均大于 93%。检验结果表明,在置信度 0.05 下树冠表面积和体积的计算值与实测值之间的显著性均为不显著,说明该方法的适用性优良。因此,通过本文提出的 SD Delaunay 算法构建的树冠表面可以有效地计算不同条件下的树冠表面积和树冠体积。

表 4 SD Delaunay 算法计算树冠表面积和体积的检验结果

Tab. 4 Test results of crown surface area and volume calculating by SD Delaunay algorithm

变量	平均误差	平均相对误差/%	平均绝对误差	精度/%	F	显著性
树冠表面积	-1.82 m^2	2.95	4.55 m^2	94.72	0.0815	不显著
树冠体积	1.03 m^3	2.51	2.60 m^3	96.72	0.3517	不显著

本文对 3 种不同的点云树冠表面积和体积测算方法所耗时间和两种构网算法的每株三角形数量进行了实验统计,其中利用数字高程模型计算所耗时间的不同是由于不同构网算法的复杂度决定的。本文算法和传统人工方法对 30 株不同的树木计算树冠表面积和体积所耗费的时间对比如图 8 所示。

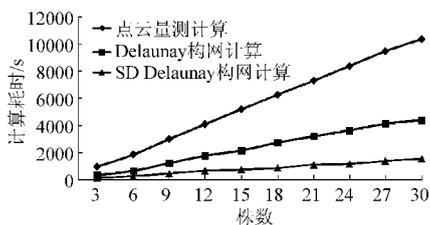


图 8 各种方法耗时对比

Fig. 8 Time consuming comparison of various methods

由图 8 可以看出,各种方法的耗时随树木株数的增加而增加,呈线性增长趋势,并且 SD Delaunay 的增长幅度较小,所耗时间不到文献 [15] 中 Delaunay 方法的一半,执行效率较高。

由此可知本文方法的计算效率要明显高于点云量测和经典 Delaunay 构网计算的效率,验证了该方法的快速性和在计算树冠表面积和体积方面的优越性,既能避免树冠表面的部分细节被填补和忽略的问题,又大大地提高树冠表面积与体积的计算精度

和速度。同时本文提出的 SD Delaunay 构网算法对海量的 TLiDAR 数据的树冠表面重建尤为有效。

4 结束语

基于 TLiDAR 系统采集的树冠点云数据,采用改进的 Delaunay 三角网生长算法 SD Delaunay 用于构建树冠表面模型进而计算树冠表面积与体积。该算法源于 Delaunay 三角网生长法的计算思想,在改进原有数据结构的基础上,通过分块筛选的机制并保留树冠的特征点作为约束条件,渐进地扩展覆盖整个树冠表面。利用本文方法计算的树冠表面积和体积与传统测树方法相比^[6-10],计算结果的精度均大于 93%,并通过了置信椭圆概率检验,说明该方法计算精度高,具有良好的适用性。SD Delaunay 算法的特性避免了以往数字高程模型在应用于树冠体积与表面积计算时树冠表面细节被填补或被忽略的问题,从而较以往的方法有更高的精度。该算法充分考虑了 TLiDAR 树冠点云数据的特点,并保留树冠的特征点,去除较平坦面的数据点,从而降低了数据的冗余度,同时,在不影响数据精度的前提下提高了树冠点云数据的运算效率,适用于海量点云构建三角网,所构成的三角网错误率较低。

参 考 文 献

- 1 陈军,李春平,关文彬,等. 林带小钻杨树冠的分维结构[J]. 林业科学,2006,46(12):6~12.
Chen Jun, Li Chungping, Guan Wenbin, et al. Fractal characteristics of tree crown of populus xiaozhuanica in shelter belts[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 46(12):6~12. (in Chinese)
- 2 Garber S M, Monserud R A, Maguire D A. Crown recession patterns in three conifer species of the northern Rocky mountains[J]. Forest Science, 2008, 54(6):633~646.
- 3 高智,仲思东,宋丽华. 基于激光雷达数据的三维模型重建[J]. 仪器仪表学报,2004,25(增刊4):495~499.

- Gao Zhi, Zhong Sidong, Song Lihua. 3D-model reconstruction based on data of laser radar[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(Supp.4):495~499. (in Chinese)
- 4 Richardson J J, Moskal L M, Kim S H. Modeling approaches to estimate effective leaf area index from aerial discrete return LiDAR [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(6~7): 1 152~1 160.
- 5 Danson F M, Hetherington D. Forest canopy gap fraction from Terrestrial laser scanning[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(1):157~160.
- 6 Cote J F, Widlowski J L, Fournier R A, et al. The structural and radiative consistency of three-dimensional tree reconstructions from Terrestrial LiDar[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5): 1 067~1 081.
- 7 Solanelles F, Escola A, Planas S, et al. An electronic control system for proportional pesticide application to the canopy volume in tree crops[C]//EFITA/WCCA Joint Congress on IT in Agriculture, 2005: 25~28.
- 8 Akira K, Moskal L M, Peter S, et al. Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne LiDAR data[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(6): 1 148~1 162.
- 9 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, 29(增刊 2): 52~56.
Feng Zhongke, Luo Xu, Ma Qinyan, et al. An estimation of tree canopy biomass based on 3D laser scanning imaging system[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(Supp.2): 52~56. (in Chinese)
- 10 周平, 赵春江, 王纪华, 等. 基于机器视觉的鸡蛋体积与表面积计算方法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5): 168~171.
Zhou Ping, Zhao Chunjiang, Wang Jihua, et al. Egg geometry calculations based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 168~171. (in Chinese)
- 11 周梦维, 柳钦火, 刘强, 等. 机载激光雷达的作物叶面积指数定量反演[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 207~213.
Zhou Mengwei, Liu Qinhua, Liu Qiang, et al. Inversion of leaf area index based on small-footprint waveform airborne LiDAR [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 207~213. (in Chinese)
- 12 Hudak A T, Crookston N L, Evans J S, et al. Nearest neighbor imputation of species-level, plot-scale forest structure attributes from LiDAR data[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(5): 2 232~2 245.
- 13 刘学军, 龚健雅. 约束数据域的 Delaunay 三角剖分与修改算法[J]. 测绘学报, 2001, 30(1): 82~88.
Liu Xuejun, Gong Jianya. Delaunay triangulation of constrained data set[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(1): 82~88. (in Chinese)
- 14 Marevan K, Maarten L, Rodrigo I S. Optimization for first order Delaunay triangulations[J]. Computational Geometry, 2010, 43(4): 377~394.
- 15 宋晓宇, 戚爱伟, 王永会, 等. 基于分治策略的快速构建 Delaunay 三角网算法[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2007, 23(5): 862~865.
- 16 王晓东, 刘文耀, 金月寒, 等. 嵌入式 DSP 激光雷达距离图像处理系统[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(10): 1 043~1 046.
Wang Xiaodong, Liu Wenyao, Jin Yuehan, et al. Embedded DSP system of laser radar range image processing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(10): 1 043~1 046. (in Chinese)
- 17 Hamid G, John S, Ziji W. Boundary recovery for Delaunay tetrahedral meshes using local topological transformations[J]. Finite Elements in Analysis & Design, 2010, 46(1~2): 74~83.
- 18 刘涛, 周明全, 武仲科. 针对颅面点云数据的 Deluney 三角网构建方法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(22): 153~155.
Liu Tao, Zhou Mingquan, Wu Zhongke. Deluney triangulation of craniofacial point cloud [J]. Computer Engineering Applications, 2011, 47(22): 153~155. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 204 页)

- 14 程国平, 齐晓红. 基于 BP 神经网络的私募股权投资项目评价[J]. 清华大学学报, 2011, 51(12): 1 917~1 920.  
Cheng Guoping, Qi Xiaohong. The project evaluation of private equity on the basis of BP neural network[J]. Tsinghua Science and Technology, 2011, 51(12): 1 917~1 920. (in Chinese)
- 15 韩磊, 李锐, 朱会利. 基于 BP 神经网络的土壤养分综合评价模型[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 109~115.  
Han Lei, Li Rui, Zhu Huili. Comprehensive evaluation model of soil nutrient based on BP neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 109~115. (in Chinese)
- 16 Dorvlo A S S, Jervelo J A, Al-Lawati A. Solar radiation estimation using artificial neural networks[J]. Applied Energy, 2002, 71(4): 307~319.
- 17 Leeghim H, Seo I H, Bang H. Adaptive nonlinear control using input normalized neural networks[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(6): 1 073~1 083.
- 18 Fortin J G, Anctil F, Parent L É, et al. A neural network experiment on the site-specific simulation of potato tuber growth in Eastern Canada [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 73(2): 126~132.
- 19 Abu-Mostafa Y S. Learning from hints in neural networks [J]. Journal of Complexity, 1990, 6(2): 192~198.