

基于圆柱面投影的树干表面重建算法

尤磊^{1,2}, 唐守正^{1*}, 宋新宇³

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; 2. 信阳师范学院计算机与信息技术学院, 河南 信阳 464000;
3. 信阳师范学院数学与信息科学学院, 河南 信阳 464000)

摘要: [目的] 树干在林业生产与科研中具有重要的地位, 树干表面重建对森林可视化与树干参数提取具有重要意义, 本研究以重建树干的精确表面模型为目的。 [方法] 提出了一种基于圆柱面投影的树干表面重建算法, 算法以连续的多个树干分段为重建单元, 以重建单元的质心与直径构建圆柱面, 通过将树干点云投影至圆柱面, 再将圆柱面点云延伸展开得到平面点集, 由平面点集 Delaunay 三角网的连接关系构建重建单元的不规则三角网表面, 连接相邻重建单元的树干表面以获取树干整体的表面模型。 [结果] 在树皮粗糙程度各异的 3 种树干点云上的实验表明: 重建的树干表面能清晰地展示外业时标注的信息, 能有效地反映树干表面的褶皱凹凸特征, 具有更好的可视化效果; 通过从重建表面上定量提取直径的精确性评价表明: 与围尺实测直径相比, 从本文提出的基于圆柱面投影重建的树干表面上提取树干直径的 RMSE 为 0.14 cm, 比基于切平面投影重建方法更精确。 [结论] 本文提出的算法是一种简单高效的树干表面重建算法, 无需计算法向量、重建的树干表面上三角形数量较少, 且能有效地还原树干表面的凹凸特征, 适用于树干表面的精确重建、精确可视化与树干参数提取。

关键词: 树干; 树木模型; Delaunay 三角网; 表面重建; 圆柱面

中图分类号: S718.46

文献标识码: A

An Algorithm of Stem Surface Reconstruction Based on Cylindrical Projection

YOU Lei^{1,2}, TANG Shou-zheng¹, SONG Xin-yu³

(1. Research Institute of Forest Resources and Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
2. College of Computer and Information Technology, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, He'nan, China;
3. College of Mathematics and Information Science, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, He'nan, China)

Abstract: [Objective] To reconstruct the tree stem surface model. [Methods] A three-dimensional stem surface reconstruction algorithm based on cylindrical projection was presented. A number of consecutive slices were viewed as the reconstruction units. A cylinder was constructed by the centroid and diameter of the reconstruction unit. The stem points of reconstruction unit were transformed into cylindrical points, and then the cylindrical points were unfolded extendedly to planar points. The surface of reconstruction unit was reconstructed according to the connection among points in Delaunay triangulation created from planar point. The whole stem surface was obtained by connecting reconstructed surface of adjacent reconstruction unit. [Results] The experiment based on the stem point set of the barks of three tree species with different roughness showed that the reconstructed surface by proposed algorithm can showed information labeled in field work clearly and can exhibit the roughness characteristic of stem bark. By comparing with other three surface reconstruction algorithms, the proposed algorithm showed better visualization

收稿日期: 2016-04-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2012AA102002); 国家自然科学基金(31470641, 61572417, 11501489, 61331018); 河南省省院科技合作专项资金资助项目(122106000052)。

作者简介: 尤磊(1981—), 男, 讲师, 现为中国林业科学研究院资源信息研究所森林经理专业在读博士研究生, 主要研究方向为点云数据处理、数据挖掘。E-mail: yleiou@163.com

* 通讯作者: 唐守正, 中国科学院院士, 研究员。E-mail: stang@caf.ac.cn

effect. Through quantitative analysis of diameter extracting from reconstructed surface, and comparing with the diameter by tape diameter in field work, the *RMSE* value of diameter extracting surface reconstructed by proposed algorithm was 0.14 cm and the surface reconstructed by proposed algorithm was more accurate than the algorithm of tangent based. [Conclusion] The present method is a simple, efficient and accurate one for stem surface reconstruction without calculating the normal vector and needs fewer surface triangles. It can effectively exhibit the surface features of the stem. The proposed algorithm was suitable for surface reconstruction, exact visualization of the stem and extracting stem parameters in an exact way.

Keywords: stem; tree model; Delaunay triangulation; surface reconstruction; cylindrical surface

使用激光点云数据构建植物的三维模型是近年来的一个研究热点^[1]。根据建模方法可将现有基于点云的树干建模分为3类:(1)拟合圆柱体重建^[2-4],将树干点云分段拟合的圆柱体作为树干的表面模型;(2)植物学模型^[1,5-7],从点云中提取直径与树高等参数,再结合植物生长规律通过逐段构建圆柱体以构建树木模型;(3)表面重建,表面重建是根据物体表面抽样得到的点集构建物体表面模型的过程^[8]。高士增以凸包点构建树干表面的不规则三角网模型^[9],唐艺使用 PowerCrust 算法构建树干表面的多边形网格模型^[10]。这3类重建方法各有其优缺点与适用范围。前2类方法使用圆柱体表示树木的模型,满足了树木整体结构可视化的需要,但却无法显示树干表面凹凸不平的特征。第3类方法是一种获取物体表面精确数学模型的建模方法^[11],其具备还原物体表面结构特征的能力。但文献^[9]以凸包为基础重建的表面模型难以显示树干表面凹陷处的特征。PowerCrust 算法是一种基于点云插值的重建方法,其根据插值点生成表面模型。这使得原始点云不一定位于重建表面上,难以准确反映树干真实的表面特征。

表面重建的关键问题是构建点集间的拓扑结构,伍龙华和黄惠^[12]总结分析了点云表面重建算法的几类算法。其大致可分为隐式与显式重建。隐式重建本质上是一种表面逼近算法,其代表性算法包括构建等值面的重建算法,零值面即是所求的表面模型。包括基于有向距离^[13]、径向基函数^[14]与 Poisson 方程^[15]构建等值面。此类算法易受点云噪声、密度及法向量精确性的影响而导致零值面偏离模型表面^[12]。显式重建包括参数曲面重建(Bezier 曲面或 NURBS 曲面)与基于 Delaunay 三角剖分的表面重建算法。参数曲面重建需合理有效地选择插值点。因基于 Delaunay 三角剖分的表面重建算法能获得高质量的不规则三角网的表面模型而受到广泛

关注。代表性算法有 PowerCrust 算法与基于切平面投影的重建算法^[16]。

根据上述,为构建能准确反映树干表面凹凸不平特征的树干表面模型,结合二维平面点集 Delaunay 三角剖分的唯一性与合理性^[17],本研究提出一种基于圆柱面投影的树干表面重建算法。算法采用表面重建的技术,通过圆柱面投影将树干点云转换为平面点集,根据平面点集 Delaunay 三角网的构网关系构建树干点云的不规则三角网表面,并将其作为树干的表面模型。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究取两次外业扫描获取的树干点云为数据来源。第一次外业扫描时间是2015年3月,在河南省信阳市罗山县高店乡扫描的杨树(*Populus sp.*)树干点云。外业时使用绿色油漆在树干上标注树号后再使用地面三维激光扫描仪扫描。第二次外业扫描是2015年11月在中国林业科学研究院院内,共扫描洋白蜡树(*Fraxinus pennsylvanica* Marsh.)2株、大叶白蜡树(*Fraxinus chinensis* var. *rhynchophylla* Hemsl.)1株、一球悬铃木(*Platanus occidentalis* L.)1株、臭椿(*Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle)1株及一端去皮后的一段落叶松(*Larix gmelini* (Rupr.) Rupr.)原木(室内扫描)。外业时使用围尺在树干不同位置处测量直径,并使用彩色粉笔沿着围尺轨迹画环标识围尺测径轨迹、使用颜色各异大小不同的彩色纸条标注树干方位,共测量直径数据31条。两次外业扫描仪器均为 FARO X330 的地面三维激光扫描仪。使用 FARO Scene 5.0 点云处理软件经点云配准、去噪、移除树枝点等操作后提取树干点云数据。

1.2 圆柱面投影的表面重建算法

树干形状复杂,在不同高度处存在着不同程度

的弯曲与扭曲;树干表面粗糙、凸凹不平;在扫描过程中,受扫描仪与树木位置不同、风扰、树木相互遮挡及点云配准等因素的影响,导致树干点云密度不均匀且存在离散噪声点。这些因素都增加了重建树干表面的难度。

考虑到树干变化的连续性。对于一段长度不超过5 cm的树干,其扭曲程度较小、树干横断面形状也大致相同。因此,树干表面重建可通过局部表面重建逐步实现。本文将用于局部表面重建的一段树干点云称为一个重建单元。

对于一个重建单元,以重建单元中心位置的一条直线作为圆柱体的轴线,以重建单元的某一个横断面直径的整数倍为圆柱体直径构建一个圆柱体。将重建单元中的树干点云投影至圆柱体表面上得到一个圆柱面点云。则圆柱面上投影的拓扑结构与重建单元中树干点云的拓扑结构近似相同。沿着圆柱面的一条母线将圆柱面剪开,可将圆柱面点云平铺为一个长方形状的平面点云(如图1所示)。因圆柱面在局部上可以与平面建立保长对应,即曲面上一点及其邻域点展开到平面后其几何拓扑关系是不变的。因此,可将树干点云中点的拓扑关系映射到平面点集中。又因平面 Delaunay 三角网具有局部性,一个点只与其邻域附近的几个点构成三角形。因此,可将展开平面上构建的二维 Delaunay 三角网的连接关系映射到重建单元的树干点云中得到重建单元的树干点云对应的重建表面。

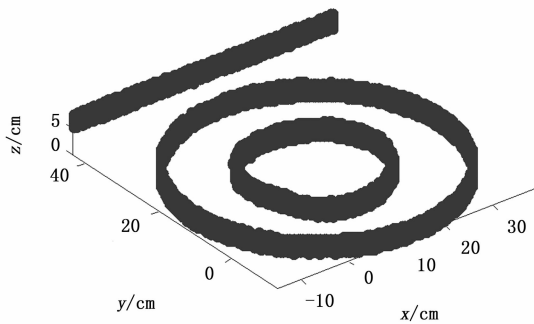


图1 树干点云、圆柱面点云及平面点云示意图

较环状点云是一个重建单元的树干点云,较大环状点云是圆柱面点云、长方形状点云是圆柱面展开后的部分平面点云。

图1 树干点云、圆柱面点云及平面点云示意图

为了便于连接上下两个重建单元的重建表面,本文首先对树干点云分段,再以连续的 k (默认值5)个分段构成一个重建单元 $U_j = S_i \cup S_{i+1} \dots \cup S_{i+k-1}$ 。相邻重建单元 U_{j-1} 与 U_j 中包括一个相同的点云分段。算法流程图如图2所示。

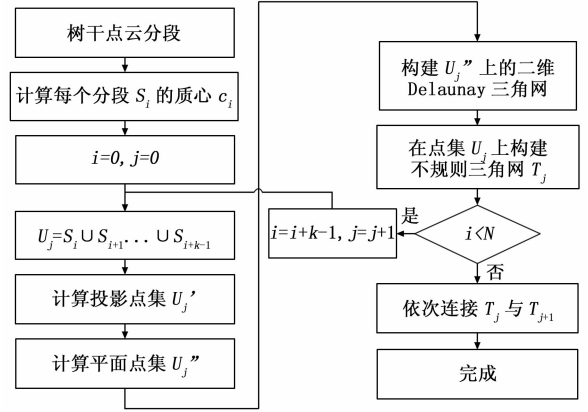


图2 算法流程图

1.2.1 点云分段及分段的质心 根据点云集 P 在 Z 轴的最大值 z_{\max} 、最小值 z_{\min} 及每个分段的厚度 h_{sec} (默认值0.5 cm)将树干点云划分为若干个分段,其中分段的高度值 h_i 定义为:

$$h_i = z_{\min} + (i + 0.5) * h_{\text{sec}} \quad (1)$$

为提高质心计算的准确性,减少受树干点云密度不均匀的影响,本研究采用分段点云在 XY 平面投影的凸包构成凸多边形的质心作为分段的质心。计算过程如下:首先求点云分段 S_i 在 XY 平面投影的凸包点 $Q_i = \{q_0, q_1, \dots, q_n\}$,再计算以凸包点为顶点的凸多边形的质心,凸多边形质心的 x 与 y 坐标就是 c_i 的 x 与 y 坐标, c_i 的 z 坐标等于当前分区的高度 h_i 。分段的质心计算如公式(2)所示。其中 A_i 为凸包点 Q_i 形成的凸多边形的面积,用 $q_{i,x}$ 表示点 q_i 的 x 坐标。

$$\begin{cases} c_{i,x} = \frac{1}{6A_i} \sum_{j=1}^n (q_{j,x} + q_{j+1,x}) \begin{vmatrix} q_{j,x} & q_{j+1,x} \\ q_{j,y} & q_{j+1,y} \end{vmatrix} \\ c_{i,y} = \frac{1}{6A_i} \sum_{j=1}^n (q_{j,y} + q_{j+1,y}) \begin{vmatrix} q_{j,x} & q_{j+1,x} \\ q_{j,y} & q_{j+1,y} \end{vmatrix} \\ c_{i,z} = h_i \end{cases} \quad (2)$$

1.2.2 圆柱面投影点集的计算 本研究假设过点 $c_{i+k/2}$ 的横断面与 XY 平面平行,若不平行则将此重建单元的点云旋转至与 XY 平面平行。为了确保重建单元中点之间的拓扑关系与圆柱面上对应投影点拓扑关系的一致性,要求圆柱面的中心线应位于重建单元的中心位置,且要求圆柱面的直径应大于横断面的最大直径。为此,构建过分段 $S_{i+k/2}$ 的质心 $c_{i+k/2}$ 且方向向量为 $(0,0,1)$ 的直线作为圆柱面的中心线 l ,分段 $S_{i+k/2}$ 直径 $d_{i+k/2}$ 的2倍为圆柱面的直径构建圆柱面,圆柱面的方程可表示为:

$$\| (t_i - (c_{i+k/2,x}, c_{i+k/2,y}, t_{i,z})) \times (0,0,1) \| - d_{i+k/2} = 0 \quad (3)$$

其中 t_i 是圆柱面上的点, \times 表示向量的外积, $\|\dots\|$ 表示向量的模。对于 U_j 中的点 p_i , 其在圆柱面上的投影点 p'_i 满足方程:

$$\|(p'_i - (c_{i+k/2,x}, c_{i+k/2,y}, p_{i,z})) \times (0, 0, 1)\| - d_{i+k/2} = 0 \quad (4)$$

对于点 p_i , 公式(4)产生两个解, 取距离 p_i 近的点为投影点 p'_i 。

树干表面的粗糙性及树干点云的散乱性可能会导致树干点云中不同的点在圆柱面上的投影点相同。若出现投影点重合, 则删除在树干点云中邻域点集密度较小点的投影点。

1.2.3 平面点集的计算与三角网筛选

(a) 平面点集的计算

设圆柱面上的点 p'_i 在展开平面上的点为 p''_i 。对于圆周上的一点 p'_i , 圆心 o 的 XY 坐标为质心 $c_{i+k/2}$ 的 XY 坐标, α 为线段 op'_i 与 X 轴夹角的弧度值(下同)。结合圆柱面的方程, 本研究以 $\alpha = 0$ 时的母线展开圆柱面得到平面点集, 则 p''_i 的计算如公式(5)所示。

$$\begin{cases} p_{i,x}'' = c_{i+k/2,x} + \alpha d_{i+k/2}, 0 \leq \alpha < 2\pi \\ p_{i,y}'' = c_{i+k/2,y} \\ p_{i,z}'' = p_{i,z}' \end{cases} \quad (5)$$

中心线 l 方向向量为 $(0, 0, 1)$, 根据公式(7), p''_i 中所有点的 y 坐标值都等于 $c_{i+k/2,y}$, 即 p''_i 的集合等价于 XZ 平面上的一个平面点集。树干点云、圆柱面点云与展开平面点集如图1所示。

(b) 平面点集的延伸与三角网的构建

圆柱面上 $\alpha = 0$ 附近的点应该与其周围的点构成三角网。然而展开到平面后, 有些点(如弧度接近 2π 的点)成了边缘点, 这将导致 $\alpha = 0$ 附近的点只能与其周围弧度大于 0 的点构建三角网, 这是不合理的。可在圆柱面展开时进行延伸以避免这种不合理性。

将弧度值 α 的取值范围调整为 $0 \leq \alpha < 2\pi + \pi/2$ 。即将第1象限的点展开2次, 第1次正常展开, 第2次展开使第1象限的点紧跟在第4象限点的后面。点集的延伸使得在 $\alpha = 0$ 附近的点在 $\alpha = 2\pi$ 附近不再是边缘点, 从而能在平面点集上无缝地构建 $\alpha = 2\pi$ 附近的三角网。然而对于第1次展开时 $\alpha = 0$ 附近的点与第2次展开时 $\alpha = 2\pi + \pi/2$ 附近的点依然是边缘点, 这需要对平面点集构建的 Delaunay 三角网进行合理的筛选。

本文采用以优先点为中心的 Delaunay 构网算

法^[18]构建平面点集上的 Delaunay 三角网。

(c) 三角网筛选

尽管 $\alpha = 0$ 与 $\alpha = 2\pi + \pi/2$ 附近的点依然是边缘点, 但经平面延伸后, 这些点可在 $\alpha = 2\pi$ 与 $\alpha = \pi/2$ 处得到合理的构建。因此, 只需要选择合适的弧度起始参数将平面点集的网络关系映射到圆柱面上即可。为此, 本研究设置弧度参数 $\alpha_0 = \pi/6$ 与 $\alpha_1 = \pi/4 + 2\pi$ 对平面三角网进行筛选: 删除圆柱面上弧度小于 α_0 与大于 α_1 的点在平面上构建的三角网(因 $\alpha_1 - \alpha_0 > 2\pi$, 此时平面三角网上还有重复的三角形, 然而正是这种重复能确保不会漏掉在弧度值在 α_0 与 α_1 附近的顶点构成的三角形), 再删除平面三角网中重复的三角形。

在平面点集的 Delaunay 三角网中, 点集的凸包点会与其它点形成狭长的三角形。即凸包点会与其距离较远的点构成 Delaunay 三角形。若将这些狭长的三角形映射到树干点云中, 会在树干内部形成三角形, 显然这不是表面的三角形, 应当移除。1个内角的角度值较小是狭长三角形的一个显著特征。因此, 本文对平面点集的 Delaunay 三角网进一步筛选: 删除平面点集的凸包点形成的且有1个内角的角度值小于5度的三角形。

经过平面点集的延伸与平面三角网的筛选后, 将平面点集上 Delaunay 三角网的构建关系映射到重建单元得到一个重建单元的重建表面。

1.2.4 相邻重建单元的表面连接 为连接相邻重建单元的表面以形成一个完整的树干表面, 将分段 i 分别参与重建单元 j 与 $j+1$ 的重建过程中, 然后在保留分段 i 与 $i-1$ 、 $i+1$ 分段表面连接关系的基础上, 使用 $j+1$ 重建单元中3个顶点同属于第 i 个分段的三角形作为第 i 个分段的表面。图3所示是相邻重建单元的分段间的关系示意图。

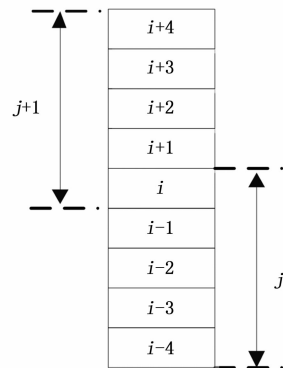


图3 重建单元重叠示意图

1.3 表面模型评价

本研究提出一种定量评价树干表面模型的方法:通过从重建表面上提取的树干直径与实测的树干直径的精确性比较来判断重建表面模型的精确性。树皮的粗糙性会通过树干点云间接反映在重建的树干表面上,在相同的位置上,在重建的树干表面上提取的直径与使用围尺测量的直径值越接近,则重建表面的效果越好。定量评价指标采用平均绝对百分比误差 $MAPE$ 与均方根误差 $RMSE$,其计算公式分别如下:

$$MAPE = 100 \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |D_i - \hat{D}_i| / D_i \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_i - \hat{D}_i)^2} \quad (7)$$

其中, D_i 为围尺实测直径, \hat{D}_i 为从树干重建表面上提取的直径。从重建树干表面上提取直径的过程简介如下:根据外业时使用彩色粉笔标注的围尺轨迹提取树干点云,由此构建两个相互平行的横切面使得围尺轨迹刚好位于两个横切面之间,这两个横切面称为上下限平面;然后再构建多个平行的平面且位于上下限平面之间,根据这些平面与重建表面上多边形的相交关系取得重建表面上的横断面

点云;将横断面点云投影至上限平面上得到平面投影点云,再通过模拟围尺测径的方式提取树干直径(模拟围尺轨迹提取直径的算法将另文描述)。

本文先通过重建树干表面模型的可视化效果来评价表面模型的优劣,然后使用本文提出的定量评价方法对可视化效果较好的表面重建算法再进行评价以选择最优的树干表面重建算法。

2 结果与分析

本研究采用 VC++2010 开发环境,使用 PCL 点云库^[19]中点云数据处理的相关类,在型号 Think-CenterM8500t、内存 8GB、处理器 I7-4770 的台式机上开发实验程序。

2.1 不同树种树干表面重建结果

为清晰显示重建效果,本文分别展示一段树干的重建效果。图4是一段杨树树干表面重建的效果图,图中所示处直径大约是 25 cm。图5是一段洋白蜡树干表面重建的效果图,图中所示处直径大约是 37 cm。图6是一段有伤疤的大叶白蜡树干表面重建的效果图,图中所示处直径大约是 35 cm。其中重建表面上多边形的颜色是其顶点颜色的加权。

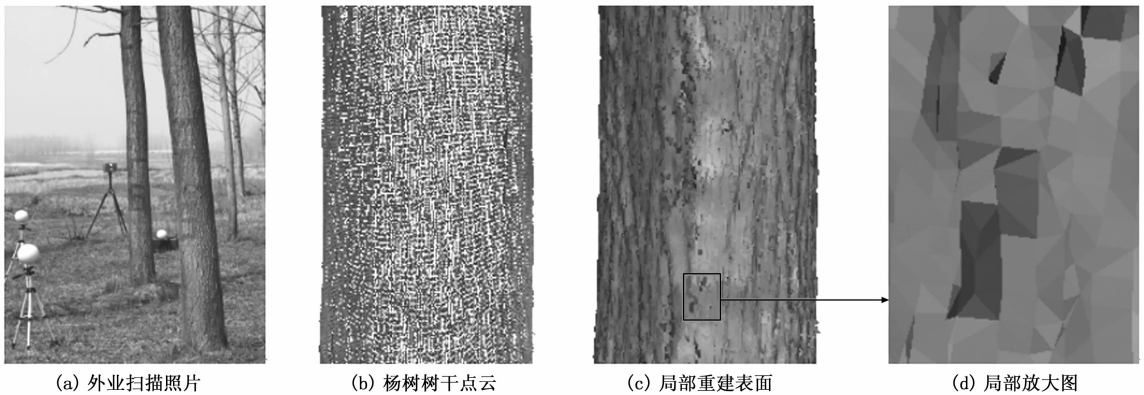


图4 杨树树干点云及重建的表面

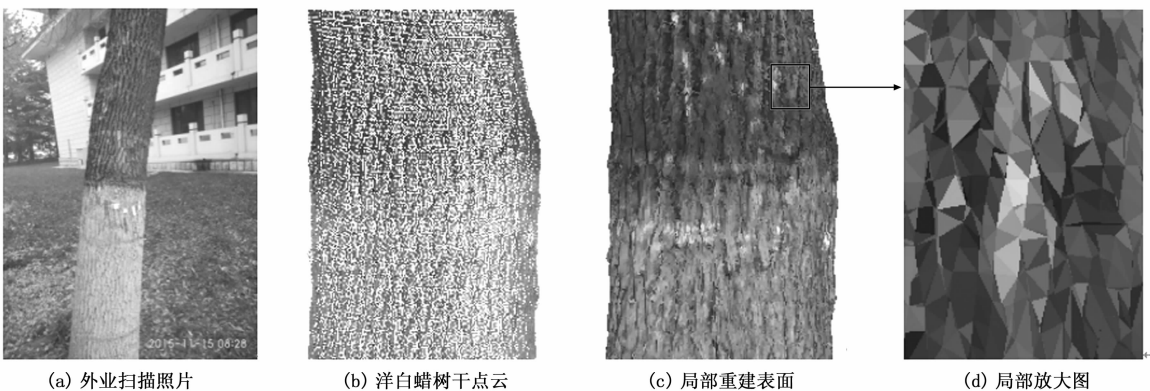


图5 洋白蜡树干点云及重建的表面

图4(c)中重建的表面能清晰地显示出外业扫描时标注的数字,而在同等缩放比例下,树干点云隐约可见数字信息。图4(d)是图4(c)中看似黑点处表面的一个放大效果图,可以看出这部分区域是树皮褶皱引起的视觉效果。图5(c)与图6(c)中重建的表面都能清晰的展示外业时彩色粉笔标注的环状标志与大小各异的彩色纸带标注,图5(d)是图5(c)中一个白色区域的放大示意图,图5(d)清晰可见白色表面两侧都有个凹陷区域。图6(c)中清晰显示了大叶白蜡树在伤痕导致凹陷处的表面特征,

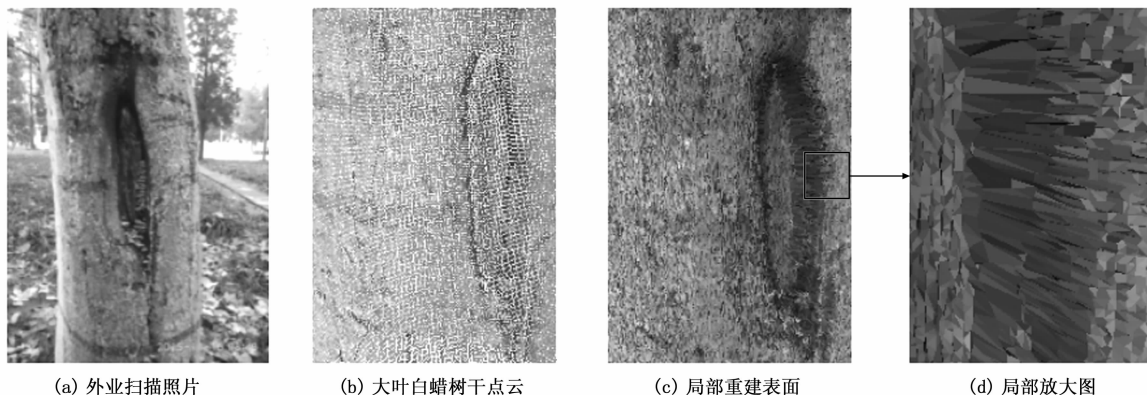


图6 大叶白蜡树干点云及重建的表面

2.2 不同算法重建结果对比分析

结合表面重建的几种算法,本研究将 Hoppe 提出的基于有向距离的隐式表面重建算法^[13]、Amenta 提出的 PowerCrust 算法^[20]、Gopi 提出的基于切平面投影的表面重建算法^[16]与本文提出的算法进行比较。以杨树的一段树干点云(包含 15 000 个点云)为实验数据进行比较。为了清晰展示表面重建效果,不同的表面重建算法在同一个局部的重建效果如图7所示。

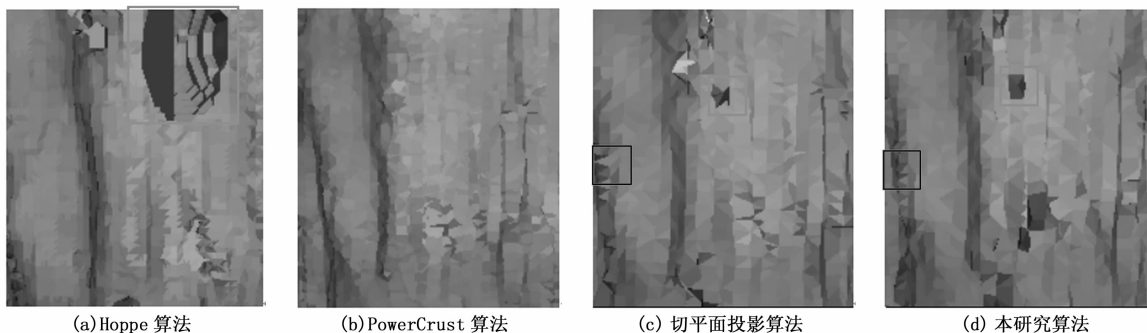


图7 不同重建算法的比较图

从图7中可以看出,在同一个树干的局部表面上,Hoppe 算法重建的树干表面有明显的凸起部分

图6(d)是图6(c)中凹陷处重建表面的放大图,图6(d)中间一些狭长的三角网与其左右区域三角形相连,狭长三角形所在的位置正是发生凹陷的位置。

图4、5与6所示的3个树种中,洋白蜡树皮最粗糙、杨树次之,大叶白蜡的树皮最光滑。无论是粗糙的还是平滑的树皮,重建的树干表面都能呈现出与外业时照片相一致的树干外部特征,这也是树干表面真实特征的一种体现。这证明了本研究提出的树干表面重建算法对树皮粗糙程度的适应性。

Hoppe 算法与 PowerCrust 算法在表面重建过程中插值生成重建表面上多边形的顶点,所以这2种算法重建表面上多边形的顶点与原始点云不仅数量不同,而且位置也有差异,为了显示彩色表面重建图,本研究将插值点的颜色赋值为与其距离最近的原始点云的颜色值。算法运行时间及重建表面前后节点个数的比较结果如表1所示。算法A、B、C、D分别代表 Hoppe 算法、PowerCrust 算法、切平面投影算法与本研究提出的算法。

(零水平集偏离表面模型导致),如图7(a)中方框箭头所示。PowerCrust 算法重建的树干表面并不能反

映出图7(c)与(d)中所示的凹陷特征。而基于切平面投影的重建算法反映了树干凹凸特征更加尖锐,如图7(c)与(d)中方框标注的部分所示。基于切平面投影算法需要根据点及其邻域(本实验使用邻域直径为0.6 cm选择邻域点集)构建切平面,即重建表面的尖锐程度依赖于树干表面切平面的准确构建。

表1 算法比较结果

算法	重建时间/ ms	多边形 数/个	多边形顶 点数/个	多边形 边数/个	是否需要 法向量
A	602 714	367 953	1 103 859	≥ 3	是
B	6 453	78 701	119 315	≥ 3	否
C	1 251 300	33 967	14 994	3	是
D	249 269	29 986	14 990	3	否

从表1可以看出,本文提出算法的时间效率仅次于PowerCrust算法,且重建的表面三角形的个数最少,重建过程无需计算法向量。

2.3 提取直径的定量评价

根据外业围尺实测的31条围尺轨迹,得到重建表面上与之对应的31条直径数据,如表2所示。其中编号是树木的临时编号,高度是围尺测径时树木所在的高度(006是一段原木段,测量直径时未测量高度), D 是围尺实测直径, D_T 是从基于切平面投影重建表面上提取的直径, D_C 是从基于圆柱面投影重建表面上提取的直径。实测直径 D 与从两种重建表面上提取直径的差值图如图8所示。

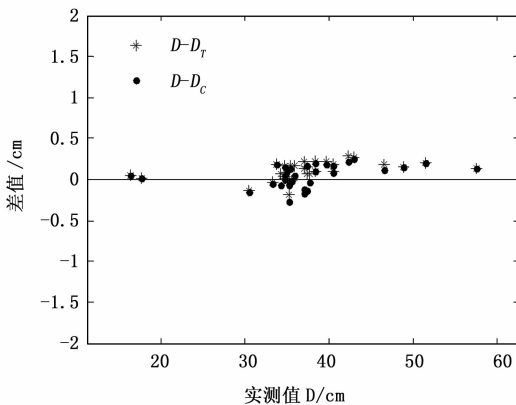


图8 从两种重建表面上提取直径的差值图

从图8中可以看出,从两种重建表面上提取直径的差值都沿着零值线水平分布,从基于圆柱面投影重建的树干表面上提取的直径与围尺实测直径的差值比基于切平面投影重建方法更小。

表2 直径数据

编号	高度/cm	D/cm	D_T/cm	D_C/cm
001	50	46.6	46.42	46.49
001	100	42.2	41.92	41.98
001	130	40.4	40.22	40.23
001	150	39.7	39.48	39.52
001	200	37.7	37.63	37.73
001	300	35.9	35.73	35.85
001	400	37.4	37.34	37.53
002	50	40.4	40.30	40.31
002	100	38.4	38.29	38.30
002	130	37.4	37.24	37.23
002	150	35.35	35.17	35.21
002	200	33.8	33.61	33.62
002	300	33.25	33.29	33.30
003	50	34.7	34.54	34.54
003	80	34.8	34.77	34.74
003	90	34.9	34.81	34.82
003	100	34.8	34.79	34.80
003	130	34.3	34.23	34.38
003	150	35.2	35.23	35.27
003	200	30.4	30.53	30.55
004	70	57.5	57.37	57.37
004	130	51.4	51.20	51.20
004	200	48.8	48.65	48.65
005	50	43	42.73	42.74
005	100	38.4	38.18	38.20
005	130	37	36.78	37.11
005	150	37	36.86	37.18
005	200	35.5	35.51	35.52
005	300	35.15	35.33	35.42
006		16.4	16.34	16.35
006		17.7	17.69	17.68

表3 从不同点云来源中提取直径数据的评价数据

点云来源	MAPE/%	RMSE/cm
切平面投影	0.34	0.15
圆柱面投影	0.32	0.14

从表3可以看出,从基于圆柱面投影的重建表面上提取直径与围尺实测直径的差距更小。这进一步说明了基于圆柱面投影算法重建的树干表面与树干真实表面差距最小,是一种较好的表面重建算法。这从另一方面也说明,可以根据本文构建的树干表面模型中提取树干相关的参数。

以上表明,与其它3类算法相比,本研究提出的树干表面重建算法不仅构建的多边形个数最少,而且可视化效果最好,能较好地反映树干表面凹凸不平的特征;从其重建的树干表面上提取的直径值与实测值更接近,这表明本研究提出的重建算法构建

的树干表面模型更精确。

从表1可以看出,本研究提出的表面重建算法的运行时间并不是最少的,提高算法的运行效率以减少重建时间是需要进一步研究的内容。树干表面的粗糙性导致树干点云分布的散乱性与不规则性,在使用圆柱面投影过程中有可能出现重投影,本研究根据邻域点的密度删除了密度较小的点,这简化了树干的表面模型。删除的重影点对构建的表面模型的影响程度仍需进一步的研究。

3 结论

本研究结合树干横断面是环状几何体的特征,提出了一种基于圆柱面投影重建树干表面三维模型的算法。在对树皮粗糙程度不同的树干表面重建的实验表明:该算法对树皮粗糙程度具有自适应性;与其它几类重建算法的比较实验表明:该算法具有较好的可视化效果;通过从重建表面上提取直径数据的精确性的定量评价表明:本文提出的重建算法重建的树干表面模型更精确。

本研究提出的基于圆柱面投影的树干表面重建算法不仅适用于重建树干的表面模型,也适用于对树枝点云的表面重建。可用于精确展示树木的表面特征及形态结构、树木的三维精确可视化与从重建表面上提取高密度的树木点云及从中提取树干直径与材积等参数。

参考文献:

- [1] 黄洪宇,陈崇成,邹杰,等. 基于地面激光雷达点云数据的单木三维建模综述[J]. 林业科学, 2013,49(4):123-130.
- [2] Ben Gorte, Norbert Pfeifer. Structuring laser-scanned trees using 3D mathematical morphology[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004, 35(B5):929-933.
- [3] Norbert Pfeifer, Ben Gorte, Daniel Winterhalder. Automatic reconstruction of single trees from terrestrial laser scanner data[C]. In Proceedings of 20th ISPRS Congress, 2004, 114-119.
- [4] Jan Hackenberg, Heinrich Spiecker, Kim Calders, et al. Simple-Tree—An Efficient Open Source Tool to Build Tree Models from TLS Clouds[J]. Forests, 2015,6(11):4245.
- [5] Zhanglin Cheng, Xiaopeng Zhang, Thierry Fourcaud, Tree skeleton extraction from a single range image[C]. In Plant Growth Modeling

and Applications, 2006. PMA 06. Second International Symposium on IEEE, Beijing, 2006,274-281.

- [6] Hui Xu, Nathan Gossett, Baoquan Chen. Knowledge and heuristic-based modeling of laser-scanned trees[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2007,26(4):19.
- [7] 王晓辉,黄洪宇,陈崇成,等. 基于激光点云的树木三维几何建模系统的设计与实现[J]. 福州大学学报:自然科学版, 2014,42(5):705-712.
- [8] Peethambaran J, Muthuganapathy R. Reconstruction of water-tight surfaces through Delaunay sculpting[M]. Computer-aided Design, 2015,58:62-72.
- [9] 高士增,张怀清,刘闽,等. 树木枝干 Delaunay 三角网格构建技术[J]. 西南林业大学学报, 2013,33(3):62-68.
- [10] 唐艺. 基于三维激光扫描技术的活立木材积测量方法[D]. 北京:北京林业大学, 2012.
- [11] 金涛,陈建良. 逆向工程技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2002,13(16):1430-1436.
- [12] 伍龙华,黄惠. 点云驱动的计算机图形学综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015,27(8):1341-1353.
- [13] Hugues Hoppe, Tony DeRose, Tom Duchamp, et al. Surface reconstruction from unorganized points[M]. ACM. 1992.
- [14] Jonathan C Carr, Richard K Beatson, Jon B Cherrie, et al. Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions[C]. In Proceedings of the 28th annual conference on computer graphics and interactive techniques ACM, 2001, 67-76.
- [15] Michael Kazhdan, Matthew Bolitho, Hugues Hoppe. Poisson surface reconstruction[C]. In Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing. 2006.
- [16] Gopi M, Shankar Krishnan, Cláudio T Silva, Surface reconstruction based on lower dimensional localized Delaunay triangulation[R]. In Computer Graphics Forum Wiley Online Library, 2000, 467-478.
- [17] Mark De Berg, Marc Van Kreveld, Mark Overmars, et al., Computational geometry[M]. Springer, 2000.
- [18] 尤磊,唐守正,宋新宇. 以优先点为中心的 Delaunay 三角网生长算法[J]. 中国图象图形学报, 2016,26(1):60-68.
- [19] Radu Bogdan Rusu, Steve Cousins, 3d is here: Point cloud library(pcl)[C]. In Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on IEEE, 2011,1-4.
- [20] Nina Amenta, Sunghee Choi, Ravi Krishna Kolluri, The power crust[C]. In Proceedings of the sixth ACM symposium on Solid modeling and applications ACM, 2001,249-266.

(责任编辑:彭南轩)