

基于激光点云数据的复杂植物叶片重建方法

嵇俊, 云挺*, 薛联凤, 张浩平

(南京林业大学 信息科学与技术学院, 江苏 南京 210037)

摘要:植物叶片是植物最重要的器官之一,重建高精度的复杂叶片模型对于后续研究具有重要意义。但由于现实中复杂叶片的点云数据存在噪声、孔洞等问题,所以不易重建出高精度的叶片模型。基于激光点云数据的复杂植物叶片重建方法,该方法首先对原始点云数据进行去噪处理,然后采用三角剖分方法生成网格,再对网格进行优化处理,最后对存在孔洞的地方进行修补。结果表明,本方法能够根据激光点云数据快速重建出复杂植物叶片的高精度模型。

关键词:植物叶片; 点云数据; 去噪; 孔洞修补; 重建

中图分类号:TP391.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2014)05-0064-06

Based on Laser Point Clouds Data of Complex Plant Leaves Reconstruction Method

JI Jun, YUN Ting*, XUE Lian-feng, ZHANG Hao-ping

(College of Information Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: High-precision reconstruction model of complex blade is of great significance for further researches, as leaf is one of the most important organs of plants. However, it is difficult to reconstruct due to the problems that noises and holes may exist in the real point cloud data. A method based on laser point clouds was proposed, which was composed of de-noise processing of laser point cloud, delaunay triangulation to generate mesh surface, and mending of the holes. Experiments showed that the suggested method was of high speed and precision.

Key words: leaf; point cloud data; de-noise; hole filling; reconstruction

树木可视化一直是林学、计算机图形学等众多学科研究的热点问题之一。而树叶不仅是树木的主要组成部分,同时也是植物叶片形态特征分析和冠层光分布计算等研究的基础。关于植物叶片可视化研究已有许多年的历史。Y. Rodkaew^[1]等利用L系统方法和遗传算法生成植物叶片的几何模型,但该方法局限于具有对称叶脉结构的植物叶片,且生成的叶片曲面为二维平面。A. Runions^[2]等通过对叶脉的生长进行建模和可视化,从而模拟植物叶片的动态生长过程,但其算法只实现了2维平面的模拟,同时这种方法生成的叶片边缘也难以控制。近景摄影测量在固定建筑物,尤其是在园林建筑物三维数据采集及三维重建方面的研究取得了一定的进

展^[3]。柳瑞武^[4]等首次尝试将近景摄影测量引入到树木中并获得了高质量的点云数据。但随着科技的进步,更高质量的点云数据可以直接通过地面激光扫描仪得到。

用三维点云数据可以精确地还原出目标体,但由于人为因素和自然因素或扫描仪自身的缺陷,使得获得的三维数据不可避免地带有噪声。并且复杂的植物叶片不同于简单的椭圆形叶片,复杂植物叶片具有复杂的外形轮廓和表面光学特性,加上植物群体冠层中不同器官的相互影响以及获取数据过程中人为等原因,使利用三维激光扫描仪对复杂植物模型扫描获得的点云会存在缺失数据现象,进而形成各种类型的孔洞。而噪声和孔洞会对叶片重建造

收稿日期:2013-12-06 修回日期:2014-01-28

基金项目:国家自然科学基金(31300472);江苏省自然科学基金(BK2012418)。

作者简介:嵇俊,男,硕士研究生,研究方向:图像处理。E-mail:286620982@qq.com

*通信作者:云挺,男,博士,副教授,研究方向:虚拟现实与机器视觉。

成极大的影响。目前点云的去噪算法主要来自网格光顺^[5-6]算法。但是这些方法对于存在大量不规则噪声的叶片点云数据是不合适的。根据噪声自身特点,将噪声点分为 3 类,并依次对这 3 类噪声去噪。由于二维三角剖分算法已经相当成熟,且远比三维数据点的三角化来的容易和简便。所以本研究首先采用二维的 Delaunay 三角剖分算法,接着再将二维三角化得到的点与点之间的关系映射返回到三维空间,最后再对网格优化处理。

对点云孔洞区域修补的问题,国内外的不少学者做了深入的研究,并对修补方法做了多种分类。岳杰^[7]等根据孔洞修补中操作对象的不同,将修补方法分为:基于体数据的孔洞修补方法和基于网格的孔洞修补方法。其中基于网格的孔洞修补方法又分为:基于三角剖分的修补方法和曲面拟合的孔洞修补方法。基于体数据的孔洞修补方法^[8-10]分为两部分:体积构造和表面重建。即输入模型首先转化为一个中间的体积栅格,每个栅格点连接着一个正或负的符号,表示其在模型内部还是模型外部;然后,重建一种多边形表面来分离不同符号的栅格点,完成孔洞修补。但基于体表达的方法需要借助中间体结构,输出模型会丢失原始模型的一些结构特征,不能保持与原始模型的一致性,并且会产生大量狭长的三角面片,影响新加入三角片的形状。基于网格的孔洞修补方法^[11-13]是直接在模型上识别孔洞边界并进行孔洞修补的方法。该方法能够有针对性地对网格上具有孔洞的部分进行检测和修补,便于网格拓扑的重新构造,但因为较少考虑孔洞本身的曲面特征,所以对于曲率较大的孔洞不能完成很好的填充。基于这 2 类方法分析的基础上,并结合谢倩茹^[14]等提出的网格模型孔洞修补方法来实现叶片模型的孔洞修补。

1 点云数据采集与处理

1.1 点云数据采集

点云是指通过 3D 扫描仪所取得的数据信息形式。扫描得到的数据以点的形式记录,每一个点包含有三维坐标(x, y, z),有些可能含有色彩信息(R, G, B)或反射强度信息(intensity value)。强度信息的获取是扫描仪接受装置采集得到的回波强度,此强度信息与扫描目标的表面材质,粗糙度,入射角方向,以及仪器的发射能量,激光波长等相关。采用莱卡公司的 Leica Scan Station C10 激光扫描仪(具体参数如表 1)扫描校园内的植物叶片,并使用 Cyclone 软件提取其中几片叶片(图 1)。从图 1 中可

以看出,点云数据中存在大量噪声和一些孔洞。

表 1 Leica ScanStation C10 产品参数

Table 1 Leica ScanStation C10 specifications

测量精度	点位	6 mm
	距离	4 mm
	角度	60 μ rad/60 μ rad(12"/12")
	表面建模精度	2 mm
	标靶获取精度	2 mm
	类型	脉冲式,专用芯片
	颜色	绿色,波长 532 nm
	范围	300 m@90%;134 m@18% 反射率(最短 0.1 m)
	扫描速度	50 000 点/s,最大即时速率
	光斑大小	4.5 mm/0~50 m(全宽半高基准) 7 mm(基于高斯面)
扫描系统	视场角	水平:360°;垂直:270°
	光照环境	白天和夜晚均可

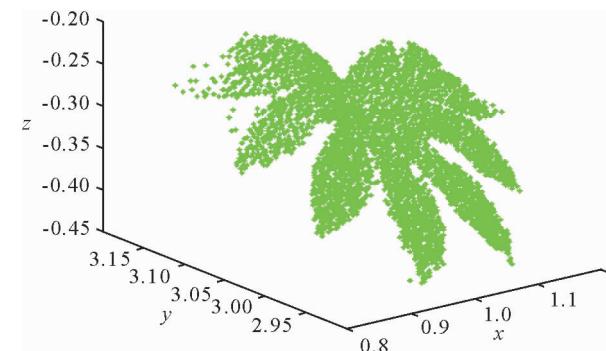


图 1 八角金盘的点云数据

Fig. 1 Point cloud data of fatsia japonica

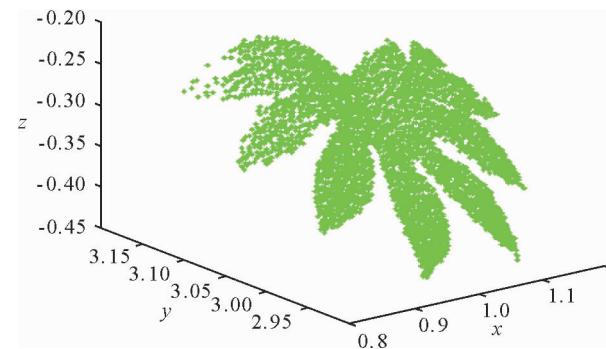


图 2 预处理后的点云数据

Fig. 2 Point cloud data after preprocessing

1.2 点云去噪

根据噪声点特点将噪声点分为 3 类:第 1 类是距离大片中心点云较远、小而密集的点云;第 2 类是偏离点云较远,悬浮在点云上方的离散、稀疏点;第 3 类是噪声点和真实点混合在一起的点,该种点云的形态呈分层状。

由于第 1 类噪声点较明显,所以采用手动剔除就能达到很好的效果。第 2 类噪声也比较明显,但如果采用手动剔除,将导致工作量太大。所以对第

2类噪声采用以下步骤实现去噪:1)找到 x 、 y 、 z 坐标的最大值和最小值,从而形成一个与坐标轴平行的长方体包围盒,包围所有数据点。2)根据数据点的密度将长方体包围盒划分成小立方体栅格。3)判断每个数据点所在的立方体栅格,并将数据点的序号追加到该立方体栅格内。4)如果栅格内点云数据的数目小于阈值 r (一般 $r=2$),则删除该栅格中的数据点。

针对第3类噪声点,采用以下步骤实现去噪:1)根据前面的栅格,求出各个定点的 N 个最近点。2)用这 N 个点拟合出一个最小二乘意义下的二次曲面: $Z = Ax^2 + By^2 + Cxy + Dyz + Ex + Fy + G$ 。3)设定顶点到自身二次曲面的方向距离阈值,小于阈值的顶点保留,大于阈值的点删除。

在对叶面进行网格重建之前,先对经过去噪的点云数据进行拟合。根据每个点与其 N 个最近点构造最小二乘曲面,然后把这些点映射到这张曲面上,这样可以使叶片更接近现实情况。

2 叶面网格重建与优化

2.1 Delaunay 三角剖分

三角形网格能够表示任意拓扑结构、任意形状的几何物体,并且有利于计算机的存储、分析、计算和绘制。因此,三角形网格已成为曲面重建中的主流曲面描述方式并得到了许多的几何造型软件的支持,广泛应用于反求工程(reverse engineering)中。目前最为流行的三角剖分方法是Delaunay三角剖分。理论上严格证明,当给定的结点分布中不存在四点或四点以上共圆时,Delaunay三角划分有唯一的最优解,即所有的三角形单元中最小内角值之和最大,能够保证划分出的三角网格尽量均匀规范^[15]。

由于二维数据点的Delaunay三角剖分已比较成熟,且远比三维数据点的Delaunay三角化来得容易和简便,所以可以直接使用二维的三角剖分算法。需要注意的是此方法对卷曲很严重的叶片不能很好地处理。具体步骤(图3)如下:1)将三维数据点集投影到某一固定平面上,如 xoy 面。2)进行二维Delaunay三角化得到点与点之间的关系。3)再将这些连接关系映射回到三维空间,形成点集的空间三角化。

2.2 网格优化

三角剖分后的叶片网格在叶轮廓外会生成冗余边,这样网格化的结果会掩盖植物叶片本来的边缘形态,并且叶片轮廓是孔洞修补的基础。因此需要删除这些冗余的边来优化三角形网格。冗余边一般

是边界点的错误连接导致的,这些边明显比一般的网格边要长很多,且集中在叶片边缘的凹区域(图4)。采用孙智慧^[16]等提出的优化算法并结合本研究实际情况。算法处理过程如下:1)计算整个网格的边的平均长度 \bar{E} 。遍历所有的三角形边,计算所有三角形边的长度和,然后除以三角形边的个数,得到 \bar{E} 。即 $\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |E_i|$,其中, E_i 为第*i*条边, $|E_i|$ 为边 E_i 的长度, n 为边的总数。2)遍历整个网格,计算每条边 E_i 的长度与平均边长的比值 $\lambda_i = |E_i|/\bar{E}$,保存到 λ 数组。3)遍历整个网格,寻找出只属于一个三角面片的边(只有边界边属于且仅属于一个三角面片),保存到边界边数组 R 中。4)输入一个用户指定的阈值 η ,要求 $\eta > 1$,让 η 递减逼近于1,遍历整个 λ 数组,若 $\eta < \lambda_i$,则判断 E_i 是否在边界边数组 R 中,若 E_i 在边界边数组 R 中,则删除 E_i 并把与 E_i 同属于一个三角形面片的另2个边加入边界边数组 R 中,若 E_i 不在边界边数组 R 中则保留 E_i ,遍历完检测优化的网格效果,若得到较好的结果则终止,若有明显的狭长边则重复步骤4)。

当点云数据较密集时,经过4~5次的迭代就能得质量很好的网格,但当点云数据是精简后的数据,经过几次迭代后,可能出现少量冗余边并没得到剔除,可采取手动的方式删除这些边。

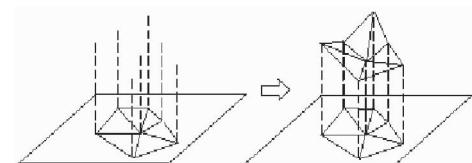


图3 三角剖分过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the triangulation process

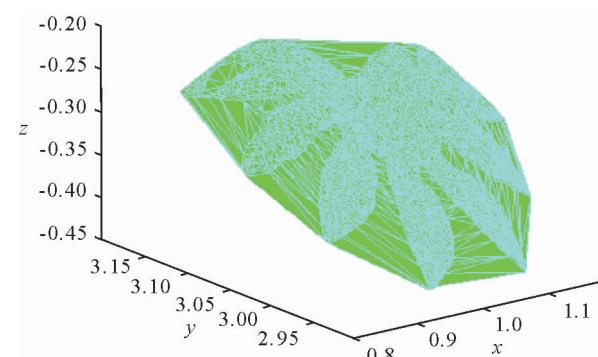


图4 Delaunay 三角剖分结果

Fig. 4 Delaunay triangulation

3 孔洞边界识别与修补

3.1 孔洞边界识别

从图5中可以看出,重建后的叶片模型中存在

孔洞的问题,所以需要进行孔洞修补。但在进行孔洞修补前,首先需要识别孔洞的边界。三角网格模型是由许多点和连接这些点的三角形构成。所以很容易想到当一个边仅属于一个三角形时,这个边就是边界边。边界边上面的点称为边界点。边界三角形是指拥有一个或两个边界点的三角形。依据三角网格模型这样的性质,将网格面进行遍历后,并找出这样的边,并将它们首尾相连就构成了孔洞的边界。具体实现的方法如下:1)对于叶片模型表面 Ω 上的任意顶点 v ,获取其邻接点和邻接三角形的信息。2)比较该点的邻接点和邻接三角形数目。若相等,读取邻接点返回 1);若不等,标记 v 为边界点,存入边界点集合并读取邻接点 v' ,重复 2)。3)重复上述步骤,直到边界点集合不产生新的点。4)连接边界边,形成闭合环,得到孔洞边界。

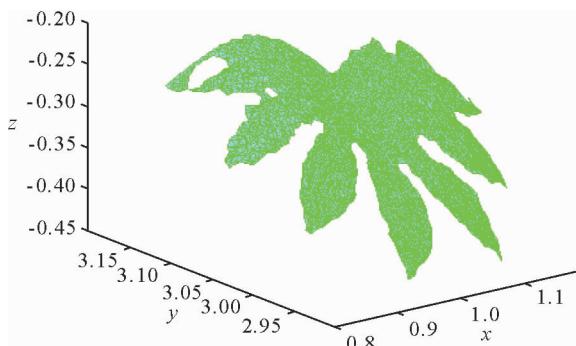


图 5 三角网格优化结果

Fig. 5 Triangular mesh optimization

3.2 波前法修补孔洞

Lohner S. H. Lo^[17]等提出的波前法(advancing front method, AFM)来进行初始网格的生成。波前法运用了递归的思想,可以有效降低算法的时间复杂度,具有实现简单、速度快和生成的网格可控性好的优点,它已经成为网格生成最重要的算法之一。其基本思想是首先初始化待剖分区域的边界成为首尾相连的有向边的集合,称为波前。以当前边界为起点,不断向内产生三角形,更新波前,逐步收缩边界直到波前为空。波前法通常是选择具有最小夹角的边界边上的顶点作为当前点。算法的实现步骤如下:1)使用孔洞的边界点初始化波前。2)计算波前每一个顶点 v_i 相邻边(l_i, l_{i+1})的夹角 v_0 。3)从最小夹角对应的顶点开始,根据新增三角形的规则(图 6)在 l_i 与 l_{i+1} 决定的平面上生成三角形。4)将新构造的三角形的波前单元边添加到波前单元集合中。5)重复 4),直到波前单元集合为空。

对于叶片模型,采用波前法时,叶片轮廓会被误判为一个孔洞的边界。因此利用波前法前应去除一个最大闭合环。波前法是以原有的孔洞边界为基础

进行三角形划分的,因此它生成的网格可以形成对任何形状孔洞的完全覆盖,这样就保证了算法的鲁棒性。算法中, $v_i v_{i+1}$ 是根据最小角原则新生成的有向边, v_{new}, v_{new1} 和 v_{new2} 是新生成的顶点,并与原有的顶点组成新的有向边,加入到波前单元集合中,取代原有的波前;然后再对新的波前进行再一次的划分,直到孔洞多边形被全部划分成三角形为止。这个递归算法的最大时间复杂度和平均时间复杂度都比传统修补算法的时间复杂度低很多,提高了孔洞三角化的速度(图 7)。

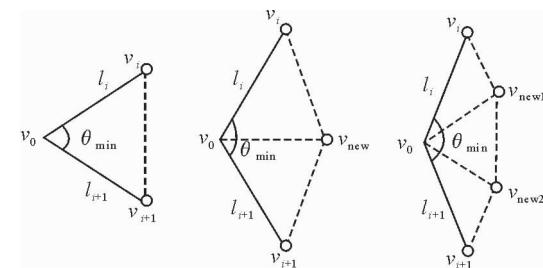


图 6 新增三角的规则

Fig. 6 The rules of new triangle

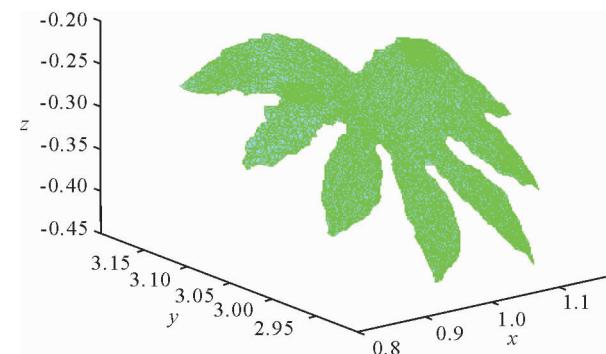


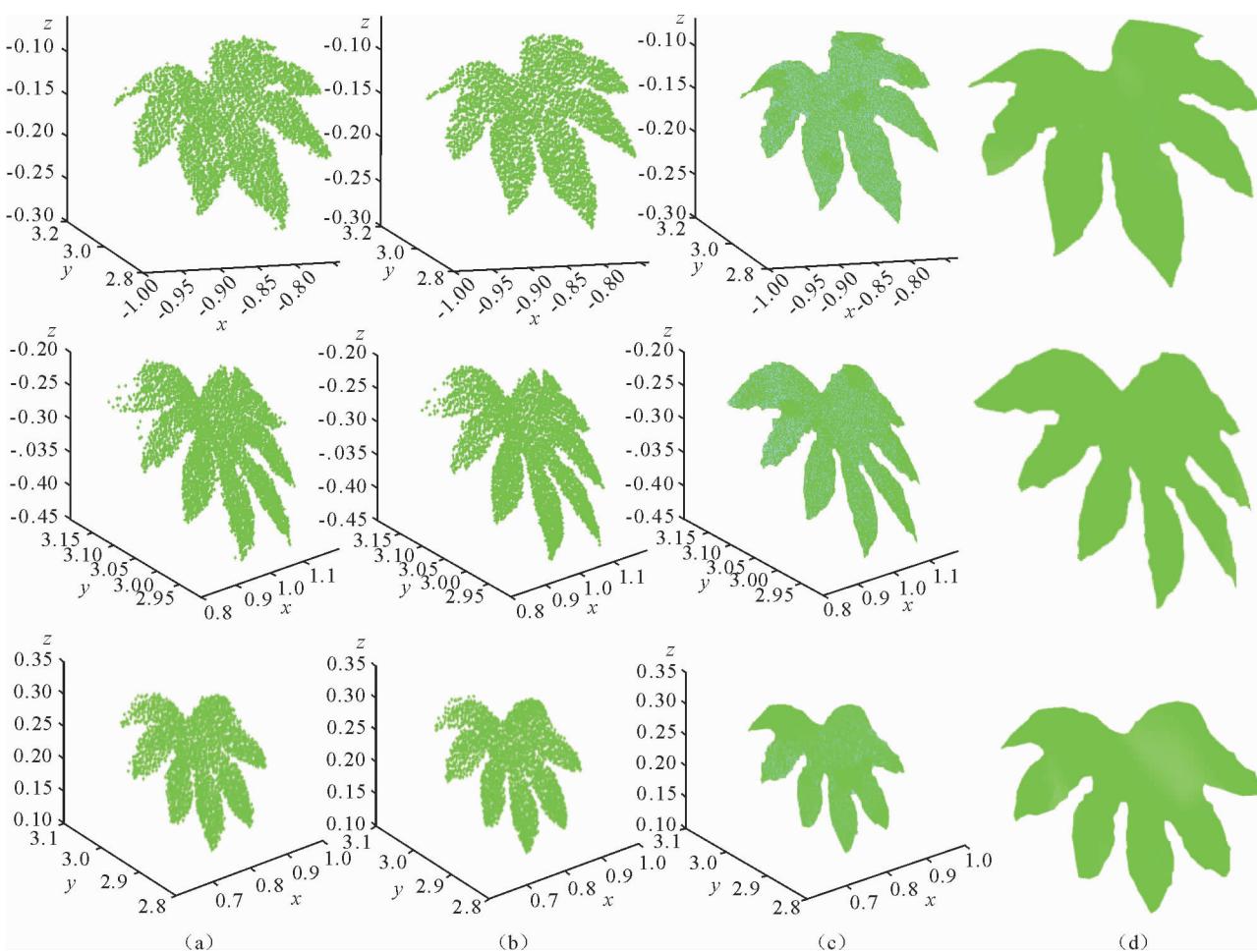
图 7 孔洞修补后的叶片网格模型

Fig. 7 Leaf grid model after hole fitting

4 结果与分析

本研究试验平台是 matlab R2012a。以八角金盘(八角金盘形状复杂,裂叶约 7~9 片)为例,演示建模方法的效果,并应用该方法对不同的八角金盘叶片点云数据分别作了试验测试。图 8 从左往右分别是原始点云数据、预处理后的点云数据、优化网格并修补后的模型、OpenGL 绘制的结果图。从上到下分别是几片不同的八角金盘叶片。表 2 给出了这 3 片叶片的原始点云和预处理后点云的数目、优化后的网格数和修补后的网格数。为了验证重建误差,通过使用便携式叶面积仪(AM-300)测量出真实叶面积,AM-300 是一种便携式手持叶面积仪,可快速、精确、无损地在野外测量植物叶面积及相关参数。其中测量面积精度为 $\pm 2\%$ 。将 AM-300 测量出的叶面积和重建后的叶面积相比较,重建后的叶

面积通过将三角网格模型中的所有三角形相加得到 (表 3)。



注:(a)叶片原始的点云;(b)预处理后的点云;(c)重建并修补后的效果;(d) OpenGL 绘制的结果图。

图 8 3 片八角金盘叶片重建结果

Fig. 8 Reconstruction results of three leaves of fatsia japonica

表 2 3 片八角金盘叶片的原始点云数目与预处理后的点云数目和优化后的网格数目与修补后的网格数目

Table 2 The number of original point clouds data and after preprocessing of point clouds data; the number of grids after optimized and after hole fitting

叶片编号	个			
	原始点 云数目	预处理后的 点云数目	优化后的 网格数目	修补后的 网格数目
1	3 731	3 321	7 147	7 507
2	3 226	2 989	6 141	6 580
3	2 837	2 574	5 305	5 615

表 3 AM-300 测量出的叶面积与重建后的叶面积

Table 3 Measured leaf area by AM-300 and leaf area after the reconstruction

叶片序号	AM-300 测量的 叶面积/cm ²	重建后 叶面积/cm ²	两者误差/%
第 1 片	344.32	325.71	5.40
第 2 片	418.19	435.67	4.01
第 3 片	303.74	288.04	5.17

结果表明,本文去噪、修补等方法能够从扫描获得的三维点云数据中重建出复杂植物叶片的高精度

网格模型。重建后模型面积与仪器测量出的面积误差均在±6%。

5 结论

本研究提出了一种基于点云数据的复杂植物叶片重建的方法。该方法首先对叶片点云数据进行去噪,然后对去噪后的点云数据拟合并进行三角化和网格优化,最后再通过孔洞修补算法,修补模型中的孔洞,以得到高质量的植物叶片三维网格模型。由于数据是基于真实的三维数据,因此重建的模型更加真实有效。重建后模型面积与仪器测量出的面积误差均在±6%。但本工作只是针对卷曲不严重叶片的三维重建,要实现对卷曲很严重的叶片以及整株植物的高精度三维重建,将会遇到更多的问题,这也是下一步主要的研究内容。

参考文献:

- [1] RODKAEW Y, LURSINSAP C, FUJIMOTO T, et al. Mod-

- eling leaf shapes using L-systems and genetic algorithms[C]// International Conference Nicograph, 2002: 73-78.
- [2] RUNIONS A, FUHRER M, LANE B, et al. Modeling and visualization of leaf venation patterns[J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 702-711.
- [3] 刘千里,李春友,柳瑞武,等.多基线数字近景摄影测量系统在古典园林建筑物三维重建中的应用[J].西北林学院学报,2009,24(4): 224-227.
- LIU Q L, LI C Y, LIU R WU, et al. Application of multi-baseline digital close-range photogrammetry system in 3D modeling of classical garden buildings[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(4): 224-227. (in Chinese)
- [4] 柳瑞武,李春友,孟平,等.树木形态结构快速精确测定方法初探[J].西北林学院学报,2011, 26(1): 176-180.
- LIU R W, LI C Y, MENG P, et al. Preliminary study on fast and accurate determination method of tree morphostructure[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(1): 176-180. (in Chinese)
- [5] FLEISHMAN S, DRORI I, COHEN-OR D. Bilateral mesh denoising[J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 950-953.
- [6] JONES T R, DURAND F, DESBRUN M. Non-iterative, feature-preserving mesh smoothing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 943-949.
- [7] 岳杰,陆声链,孙智慧,等.三维点云孔洞修补算法及在植物形态重建中的应用[J].农机化研究,2013, 35(5): 190-195.
- [8] BISCHOFF S, PAVI D, KOBELT L. Automatic restoration of polygon models[J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(4): 1332-1352.
- [9] TAO J. Robust repair of polygonal models[J]. ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH'04), 2004(4): 888-895.
- [10] JOSHUA P, SZYMON R. Atomic volumes for mesh comple-
- tion[C]// Eurographics Symposium on Geometry Processing, 2005.
- [11] 张洁,岳玮宁,王楠,等.三角网格模型的各向异性孔洞修补算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2007,19(7): 892-897.
- ZHANG J, YUAN W N, WANG N, et al. Anisotropic hole filling algorithm for triangle mesh models[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 19(7): 892-897. (in Chinese)
- [12] ZHAO W, GAO S M, LIN H W. A robust hole-filling algorithm for triangular mesh[J]. The Visual Computer, 2007, 23(12): 987-997.
- [13] 杜信,张丽艳,王宏涛,等.基于径向基函数的三角网格曲面孔洞修补算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(9): 1976-1982.
- DU J, ZHANG L Y, WANG H T, et al. Hole repairing in triangular meshes based on radial basis function[J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 17(9): 1976-1982. (in Chinese)
- [14] 谢倩茹,耿国华.三维模型孔洞修补方法的研究[J].计算机应用研究,2013, 30(10): 3175-3177.
- XIE Q R, GENG G H. Research on hole-filling algorithm for 3D models[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(10): 3175-3177. (in Chinese)
- [15] 肖双九.反求工程中三角网格划分及其应用的关键算法研究[D].西安:西北工业大学,2002.
- [16] 孙智慧,陆声链,郭新宇,等.基于点云数据的植物叶片曲面重构方法[J].农业工程学报,2012, 28(3): 184-190.
- SUN Z H, LU S L, GUO X Y, et al. Surfaces reconstruction of plant leaves based on point cloud data[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(3): 184-190. (in Chinese)
- [17] LO S H. Volume discretization into tetrahedra-I. verification and orientation of boundary surfaces[J]. Computers & Structures, 1991, 39(5): 493-500.

(上接第 63 页)

- [10] QIAN N, SEJNOWSKI T J. Predicting the secondary structure of globular protein using neural network models[J]. Mol. Biol., 1988, 202: 865-884.
- [11] 须文波,陆克中.神经网络在蛋白质二级结构预测中的应用[J].生物信息学,2006, 3(4): 26-29.
- [12] 何琴,高建华,刘伟.蛋白质二级结构预测的人工神经网络方法研究[J].分析科学学报,2006, 22(4): 438-440.
- HE Q, GAO J H, LIU W. Study of neural network methods in predicting protein secondary structures[J]. Journal of Analytical Science, 2006, 22(4): 438-440. (in Chinese)
- [13] 王化坤,钱伟懿.神经网络方法在蛋白质结构预测中的研究与应用[J].黑龙江科技信息,2008(4): 23-23.
- [14] 孙海军,阮晓钢.用多模神经网络预测蛋白质二级结构[J].昆明理工大学学报:理工版,2004, 29(5): 64-70.
- SUN H J, RUAN X G. Protein secondary structure prediction using multi-modal neural network[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Nat. Sci. Edi., 2004, 29(5): 64-70. (in Chinese)
- [15] BERMEN H M, WESTBROOK J, FENG Z. The protein data bank[J]. Nucleic Acids Research, 2000, 28 (1): 235-242.
- [16] 马栋萍,阮晓钢.基于改进 BP 神经网络预测蛋白质二级结构[J].北京联合大学学报:自然科学版,2005, 19(2): 70-73.
- MA D P, RUAN X G. Prediction protein secondary structure by improved BP neural network[J]. Journal of Beijing Union University: Nat. Sci. Edi., 2005, 19(2): 70-73. (in Chinese)
- [17] 阮晓钢,孙海军.编码方式对蛋白质二级结构预测准确度的影响[J].北京工业大学学报,2005, 31(3): 229-235.
- RUAN X G, SUN H J. Research on encode influencing protein secondary structure prediction[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2005, 31(3): 229-235. (in Chinese)