文章编号：1674-9057(2020)03-0568-06 doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2020.03.016

基于多源点云数据融合的单木树形重建

晏娅萍[1,2]，岳彩荣[1]

（1. 西南林业大学 云南高校林业 3S 技术工程研究中心，昆明 650224；2. 云南建投第一勘察设计有限公司，昆明 650031）

摘 要：基于 Smart3D 软件、Maptek 软件分别对无人机倾斜影像和地面三维激光点云数据进行融合处理及树木三维建模。通过点云配准、点云降噪以及坐标纠正等一系列处理，实现了空-地多源点云数据融合技术的树木三维模型重建。基于树木三维重建模型量算的树高、胸径、胸高断面积等几何参数与地面实测的树木参数精度高达 99.7%、97.8%和 94.1%，说明基于不同来源的点云数据的树木三维树型重建可以为森林或城市绿地调查提供准确高效的技术途径，具有广阔的应用前景。

关键词：倾斜摄影测量技术；三维激光扫描技术；点云融合；单木；树形重建；林业

中图分类号：TP79；S771.8 **文献标志码**：A

0 引 言

目前，三维激光扫描技术[1] 作为一种非接触性、效率高、精度高的新型测绘技术，已在城市建设、文物保护、变形监测等领域得到了初步应用，但由于研究物体高大、存在扫描死角或不便设站等原因，无法获取到目标物的全面信息和数据。而摄影测量具有成本低、迅速、非接触、自主性强等特点，应用较为广泛，但由于飞行方式和目标物局部遮挡等原因，导致其精度达不到要求，从而无法获得完整的表面三维信息。

对森林或树木进行现地测量是林业和园林技术人员的基础性工作。森林调查由于受交通、地形或气候的限制，成为了一项极其艰苦的工作。近年来，随着新兴测绘技术的出现，特别是无人机技术和三维激光扫描技术的广泛应用，为森林野外测量工作提供了新的技术方法。在森林调查和城市绿化管理中，将无人机倾斜摄影测量技术和地基三维激光扫描技术融合，可快速准确获取树木几何参数[2]。这些新方法和新技术的应用，将大大降低野外测量工作的工作量，极大地提高数据获取的效率和精度。

单一的采集设备要一次性获得整个目标区域的研究数据比较困难，所以本文结合倾斜摄影测量技术[3-5] 和三维激光扫描技术[6]，使二者优势互补，构成空地一体化，全面获取树木信息并进行树形重建，在现有的研究成果基础上，将多源点云数据的处理技术[7-8] 作为研究重点，从数据的拼接、数据滤波、点云降噪等方面着手，把来源不同的点云数据融合在一起，再将融合后的点云应用于相应软件生成三维模型[9-10]，从而得到所研究的树的三维数字模型，以期实现对树木几何参数的精确量算，为森林调查提供一种新的技术途径。

1 空地点云数据采集

1.1 倾斜摄影测量技术的点云数据

1.1.1 *影像数据采集* 倾斜摄影测量技术是一种从多角度、多方位观察目标物的新型航空摄影技术。它通常从 5 个方位进行数据采集，分为正摄、前视、后视、左视、右视，配合惯导系统获取高精度的位置和姿态信息，再通过坐标纠正、多视影像

收稿日期：2019-06-05
基金项目：国家自然科学基金项目(31260156)；云南省教育厅项目(2018JS330)
作者简介：晏娅萍（1996—），女，硕士，研究方向：资源环境遥感，1422160922@qq.com。
通讯作者：岳彩荣，博士，教授，cryue@163.com。
引文格式：晏娅萍，岳彩荣. 基于多源点云数据融合的单木树形重建［J］. 桂林理工大学学报，2020，40（3）：568-573.

联合平差、配准、拼接等处理得到具有目标物全面信息的数据。此次影像数据采集使用的是大疆飞行器，依据像控点的布设规则[11]，为了使地面上的目标物体和影像进行对照，本次试验设置了 6 个像控点和 8 个检查点，两者结合，合理布置，能够使系统的误差降到最低，此次拍摄成果包括 196 张合格的影像。图 1 是倾斜摄影技术影像的获取方式示意图。

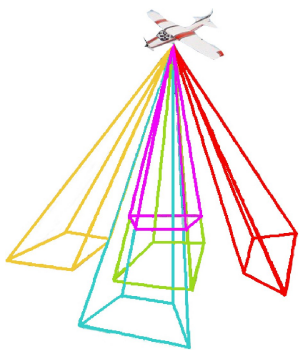


图 1　影像的获取方式

Fig. 1　Image acquisition method

1.1.2　*影像数据处理*　采用 Smart3D 软件对倾斜影像数据进行处理，并对获取三维重建所需的点云数据和正射影像进行研究，数据处理过程包括工程建立、空中三角测量、计算三维模型、点云数据的提取和点云数据的预处理[12]。进行点云数据的转换时必须基于已建好的模型基础上，让空间参考设置与空间框架一致，最后得到 .las 格式的点云数据文件。所得树干模糊的点云数据如图 2 所示。



图 2　摄影测量点云数据

Fig. 2　Photogrammetric point cloud data

1.2　地面三维激光扫描技术的点云数据

1.2.1　*地面三维激光数据采集*　地面三维激光扫描仪的原理是通过激光脉冲[13]来扫描目标物体，利用其速度快、精度高的优点来获取目标物体的三维信息。本次外业数据采集使用的是 Maptek 公司生产的 Maptek I-site 8200 三维激光扫描仪，相应地搭配了三维激光扫描仪配套平板电脑。严格遵循测站选址原则，确保能获取 360°扫描的全景数据，共设置 7 个站，每站的扫描时间为 22 min。图 3 是其中两个站点的相关数据。

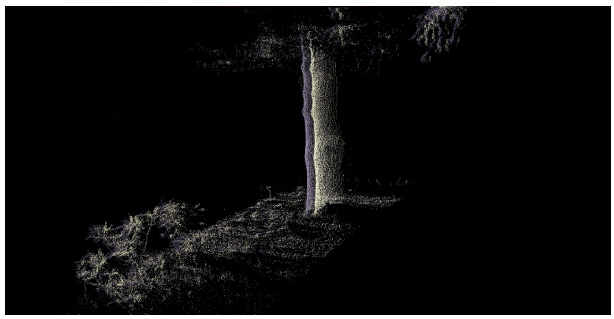


图 3　三维激光扫描仪点云数据

Fig. 3　3D laser scanner point cloud data

1.2.2　*地面三维激光数据处理*　三维激光扫描仪采集数据时因空气中存在悬浮颗粒、仪器自身误差等原因，获取的点云数据会存在许多噪声[14]。因而需要删除散乱点、孤立点或者空洞数据，使点云数据更加均匀，提高建模的精度和效率，构建真实的实体形状。图 4 是去噪前后的对比。

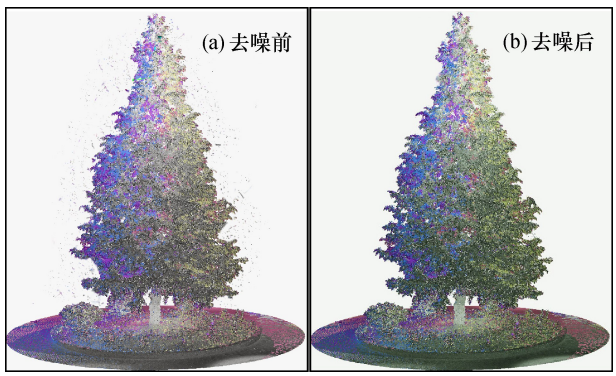


图 4　三维激光点云数据去噪前后

Fig. 4　3D laser point cloud data before and after denoising

要想获取完整的三维数据，必须进行多测站扫描。每一站点云数据的坐标系是相互独立的，因此需要将每站点云数据转换到同一坐标系里，这个过程称为点云数据配准[15]。本次试验采用的是基于同名点的配准方法，同名点可以是特制的标靶球或目标物周围的明显特征点。拼接过程至少需要 4 个同名点，以某一站为基准站，根据同名点求取其

他测站相对基准站的 3 个旋转、3 个平移参数。通过 6 参数模型可以将点云配准到同一坐标系下

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + \boldsymbol{R}_x\boldsymbol{R}_y\boldsymbol{R}_z \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \tag{1}$$

$$\boldsymbol{R}_x\boldsymbol{R}_y\boldsymbol{R}_z = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix}, \tag{2}$$

其中，(x, y, z) 是原始的点云数据坐标；(X, Y, Z) 为配准之后的点云数据的坐标；Δx、Δy、Δz 是平移参数；$\boldsymbol{R}_x\boldsymbol{R}_y\boldsymbol{R}_z$ 是旋转矩阵；α、β、γ 是旋转角度。点云数据配准后结果如图 5 所示。



图 5 三维激光点云数据配准结果

Fig. 5 Registration results of 3D laser point cloud data

2 空地一体点云融合处理

来源于倾斜摄影测量处理得到的点云数据和三维激光扫描仪地面采集到的点云，数据量庞大且含有大量的冗余信息。所以，在进行三维重建之前需要对点云数据进行一定的处理。

2.1 点云配准

用 Maptek 软件将两者的点云数据进行配准，主要包括自动初始化定位和全局配准。全局配准就是将所有数据同时进行拼接，包括固定基准参照数据，这样可以使拼接误差在拼接对象之间均匀分布。其工作原理是从一个可获得数据中随机选择点之间的距离，采用这种测量值来确定一个校正系数，而校正系数的精度，很大程度上取决于提供数据的重叠度和存在的固定参照数据。图 6、图 7 是空地点云数据配准前后对比。

2.2 坐标纠正

在三维激光扫描数据的同时，结合传统测量手段(如全站仪测量)，获取每站点云数据中控制点的坐标和方位，再进行空间坐标转换，就完成了点云数据的空间坐标纠正。本次是将两者数据统一到 1987 年昆明城建坐标系下。

2.3 降噪处理

在进行目标物信息的获取过程中，由于目标物体的材质、表面的粗糙程度不同，扫描仪器的精

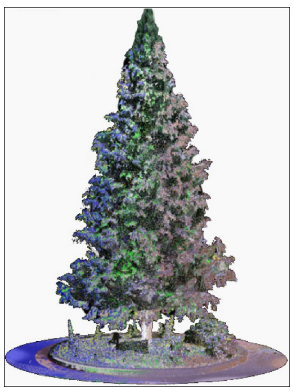
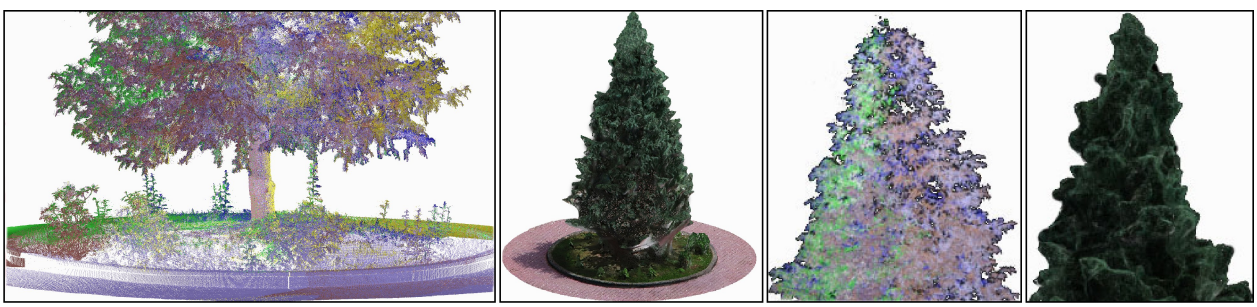


图 7 空地点云数据配准后

Fig. 7 Air-ground point cloud data after registration



(a)三维激光树干(清晰) (b)倾斜影像树干(模糊) (c)三维激光树尖(模糊) (d)倾斜影像树尖(清晰)

图 6 空地点云数据配准前对比

Fig. 6 Comparison of air-ground point cloud data before registration

度、分辨率、振动，以及一些偶然噪声，如行人或车辆从扫描物之间穿过等，会在被测物中形成散乱点或者空洞的噪声。对目标点云数据去除噪声[16] 就是为了去除这些测量噪声、遮挡物的影响。

根据噪声点的分布特征不同，可将其分为飘移点、孤立点、冗余点、混杂点[15] 4 类。不同的噪声点对应不同的去噪方法：对于飘移点、孤立点、冗余点这 3 类噪声点，可采用点云处理软件去除体外孤点、非连接项，或直接将异常噪声点删除；而对于混杂噪声点必须借助点云去噪算法才能处理。通过对去噪算法的分析，同时结合本次实践，归纳总结合理的去噪方法应该满足：1)各向异性：去噪处理后保证模型不变形萎缩，表面不扭曲；2)去噪效率高：点云数据量较大，算法应该具有高效性；3)鲁棒性[17]：对点云多次去噪处理，也不会产生二次噪声。

2.4　点云精简

无论是倾斜摄影技术还是三维激光扫描仪，所获取到的点云数据量都特别大，所以有必要在保证三维重建所必须具有的几何特征条件下对点云数据进行最大程度的精简处理[18]。点云精简的核心就是利用最少最好的点达到最大限度描述目标物体几何结构特征。结合实例，不同的点云数据处理方法不同：对于扫描式的点云数据，采用基于曲率的精简法；对于散乱式点云，采用包围盒法；而要移除一定比例的点云时用随机采样法。

3　点云集成的树形重建

倾斜摄影测量可以获取物体顶部和地面信息，使之与三维激光扫描技术所获取的目标物立面信息相结合，进行模型构建，可以使三维场景达到快速更新。本文在点云数据精简融合处理的基础上，运用 Maptek 软件实现快速建立精细三维模型[19]，为复杂的 3D 表面测量提供了一个简单的解决方案：从点云创建表面，只需输入最小特征尺寸，然后尝试将彼此接近点的表面拼合在一起，不用考虑方位，这种方法可以非常成功地检测合并小缺陷，具体包括：点处理和模型处理过程。

3.1　点处理过程

为了使所处理过的点云数据呈现整齐、规律、有效的特点，以便进行多边形的处理阶段，需要对点云数据进行一定的处理。为了更好更清晰地观察点云数据，需要完成点云着色处理，使其呈现不同的反射效果，如图 8 所示。



图 8　点云着色

Fig. 8　Point cloud shading

3.2　模型处理过程

在点云转换为多边形网格后，多边形网格模型的合法性和正确性都存在一定的问题。针对多边形网格模型出现的一系列问题，应该对于某个具体的模型，针对该模型的具体问题选择具体的操作以处理该模型出现的问题。在处理好网格退化、自交、重叠、孔洞等错误后，就进入到多边形处理阶段，多边形处理阶段就是要对封装好的数据进行进一步处理，得到一个理想的多边形模型，为精细曲面阶段的处理打下基础。最终树形重建模型[20] 如图 9 所示。



图 9　树形重建模型

Fig. 9　Contour reconstruction of single tree model

3.3　结果与分析

由多源点云数据所构建的树模型误差来源主要有点云数据采集误差、点云配准误差和建模误差等，树木(地上部分)是由树枝、树干、树叶等构成的，这些组成部分都会对树型构建的质量造成极大

影响[21]。为了验证重建的树模型能否达到较高的精度，本文将三维激光所建模型、倾斜摄影所建模型以及两者融合后模型进行了对比分析，见表 1。

表 1 各项参数精度分析

Table 1 Accuracy analysis of each parameter

模型类型	测树因子		精度分析	
实测树木	树高/m	13.70		
	胸径/cm	45.86		
	胸高断面面积/m^2	0.17		
地面三维激光扫描仪	树高/m	12.96	绝对误差/m	−0.74
			相对误差/%	−5.40
	胸径/cm	44.89	绝对误差/cm	−0.97
			相对误差/%	−2.12
	胸高断面面积/m^2	0.16	绝对误差/m^2	−0.01
			相对误差/%	−5.88
无人机倾斜摄影测量	树高/m	13.67	绝对误差/m	−0.03
			相对误差/%	−0.22
	胸径/cm	模糊	绝对误差/cm	无法计算
			相对误差/%	
	胸高断面面积/m^2	模糊	绝对误差/m^2	无法计算
			相对误差/%	
两者融合后模型	树高/m	13.67	绝对误差/m	−0.03
			相对误差/%	−0.22
	胸径/cm	44.89	绝对误差/cm	−0.97
			相对误差/%	−2.12
	胸高断面面积/m^2	0.16	绝对误差/m^2	−0.01
			相对误差/%	−5.88

可以看出，地面三维激光扫描仪模型的胸径和胸高断面积的值更接近实测值，绝对误差分别为−0.97 cm 和−0.01 m^2，但其树高与实际树高相差 0.74 m，精度不足；而无人机倾斜摄影测量所测树高最接近真值，绝对误差为−0.03 m，相对误差为−0.22%，胸径和胸高断面积因为模型模糊而无法进行计算。最终的融合模型结合了两者优点，使树模型的各项几何参数值都接近实测值，偏差较小。综上所述，多源点云融合的树模型所提取的各项几何参数都具有较高的精准度。

4 结 论

基于无人机倾斜摄影测量和地基三维激光扫描获取的树木点云数据，采用 Smart3D、Maptek 软件经过配准、降噪等一系列处理后融合起来，最终高效准确地建立了该树木的真实几何形状。研究结果表明：林木三维重建模型的各项参数与地面实测的林木参数相比，精度均达到了要求，说明将三维激光扫描仪与倾斜摄影测量技术相结合在林木调查测量中是完全可行的。该技术在单木建模、森林资源外业调查中有较大的发展空间，可大大节省调查人力物力，降低劳动强度。

目前这两项技术在森林调查中的应用都属于初步阶段，在整个试验过程中还存在许多的困难需要克服和解决(如点云数据的处理过程相对较麻烦,更多依赖于操作人员自身的经验)，因此，如何更好地利用计算机的智能化来完成高质量、高自动化的点云处理，将是日后的研究方向。同时，面对为数不少的倾斜影像，如何快速完成同名点的匹配，也是应该关注的技术问题。总之，融合多源点云数据对地物进行精准建模和重建，对未来森林精准调查和城市三维建模具有广泛的应用前景。

参考文献：

[1] 杨明珠，董燕. 三维激光扫描点云数据处理及建模研究[J]. 价值工程，2017，36（12）：117-119.

[2] 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.

[3] 曹爽，马剑，马立. 基于单镜头无人机似斜摄影的建筑物三维模型构建[J]. 桂林理工大学学报，2019，39（3）：643-649.

[4] 刘洋. 无人机倾斜摄影测量影像处理与三维建模的研究[D]. 南昌：东华理工大学，2016.

[5] 康传利,程耀,石君番. 无人机倾斜建模技术在虚拟现实中的应用[J]. 桂林工大学学报,2020,40(1):138-142.

[6] 朱军桃，王雷，赵苗兴，等. 基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶边界提取[J]. 桂林理工大学学报，2019，39（4）：879-885.

[7] Zhou L B，Xu F L，Liu S H. The research of point cloud data processing technology[J]. Applied Mechanics and Materials，2014，628：426-431.

[8] Zeybek M，Şanlıoğlu İ. Point cloud filtering on UAV based point cloud[J]. Measurement，2019，133：99-111.

[9] 孙华，余锐，欧阳光辉，等. 基于 LiDAR 数据和航空影像的建筑物三维重建技术研究[J]. 城市勘测，2012（2）：60-64.

[10] 陈崇成，李旭，黄洪宇. 基于无人机影像匹配点云的苗圃单木冠层三维分割[J]. 农业机械学报，2018，49（2）：149-155.

[11] 班伟. 无人机航测的像控点布设探讨[J]. 工程技术研究，2019（16）：225-226.

[12] 严剑锋. 地面 LiDAR 点云数据配准与影像融合方法研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2014.

[13] 谢宏全，谷风云. 地面三维激光扫描技术与应用 [M]. 武汉：武汉大学出版社，2016.
[14] 王振，孙志刚. 散乱点云噪声分析与降噪方法研究 [J]. 计算机与数字工程，2015，43 (9)：1668-1673.
[15] 隆华平，胡翔云，胡友健. 机载激光点云与影像数据融合方法的研究 [J]. 地理空间信息，2018，16 (2)：14-15.
[16] Xue F C. Point cloud data preprocessing based on the geomagic [J]. Advanced Materials Research，2013，690-693：2817-2820.
[17] Mehra R，Tripathi P，Sheffer A，et al. Visibility of noisy point cloud data [J]. Computers & Graphics，2010，34：219-230.
[18] 谢宏全，谷风云，李勇，等. 基于激光点云数据的三维建模应用实践 [M]. 武汉：武汉大学出版社，2014.
[19] Fragkos S，Tzimtzimis E，Tzetzis D，et al. 3D laser scanning and digital restoration of an archaeological find [J]. MATEC Web of Conferences，2018，178103013，https：//doi. org/10. 1051/matecconf/201817803013.
[20] Balsi M，Esposito S，Fallavollita P，et al. Single-tree detection in high-density LiDAR data from UAV-based survey [J]. European Journal of Remote Sensing，2018，51 (1)：679-692.
[21] 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.

Contour reconstruction of single tree based on multi-source point cloud data fusion

YAN Ya-ping[1,2]，YUE Cai-rong[1]
(1. College of Forestry，Southwest Forestry University，Kunming 650224，China；
2. Yunnan Construction Investment First Investigation and Design Co.，LTD.，Kunming 650031，China)

Abstract：In the forest survey and urban greening management，the combination of UAV tilt photogrammetric technology and the ground-based 3D laser scanning technology can quickly and accurately obtain the geometric parameters of the trees. Based on Smart3D software and Maptek software，the fusion processing of UAV tilt image，ground 3D laser point cloud data and 3D modeling of trees are carried out respectively. Through a series of processing such as cloud registration，cloud noise reduction and coordinate correction，the 3D tree model reconstruction of air-ground multi-source point cloud data based on fusion technology is realized. The geometrical parameters and ground parameters of tree height，diameter at breast height and sectional area of breast height are measured by 3D reconstruction model. The accuracy is up to 99.7%，97.8% and 94.1%，which indicates that 3D tree reconstruction based on point cloud data from different sources can provide accurate and efficient technical approaches for forest or urban green space investigation，with broad application.

Key words：tilt photogrammetry；3D laser scanning technology；point cloud data fusion；single tree；contour reconstruction；forestry