

地面激光扫描数据在建筑物重建中的研究进展

王方建^{1,2}, 习晓环¹, 王成¹, 万怡平^{1,2}

(1. 中国科学院 遥感与数字地球研究所 数字地球重点实验室, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 从地面三维激光扫描数据的预处理(数据组织、噪音去除、数据简化和压缩以及多站点云配准), 点云面片分割和模型重建(边界点提取和边界规则化)等方面, 阐述了该技术在建筑物三维建模过程中的相关算法及研究进展, 分析了各种算法的特点, 最后对利用地面激光扫描数据进行建筑物重建研究中存在的问题和未来发展进行了展望。

关键词: 地面三维激光扫描; 点云数据; 建筑物; 三维重建

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2014.06.023

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2014)136-0000-00

Progress in Building Reconstruction Using Terrestrial Laser Scanning Data

WANG Fang-jian^{1,2}, XI Xiao-huan¹, WANG Cheng¹, WAN Yi-ping^{1,2}

(1. Key Lab of Digital Earth, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Building reconstruction from point clouds acquired by Terrestrial Laser Scanning (TLS) equipment is a hot research topic in digital urban application. Nowadays, there are many algorithms suitable for ALS data and building reconstruction applications, however, they are not always effective or efficient for TLS. The paper analyzed the algorithms and progress in building reconstruction from TLS data, including huge points cloud data organization, filter, reduction and multi-position data registration, as well as facade segmentation and model reconstruction were explored in detail. The merits and shortages of them were explained, and current research problems and suggestions, and future progress in 3D building reconstruction were provided in this paper.

Key words: 3D terrestrial laser scanning; point cloud; building; 3D reconstruction

1 引言

机载激光雷达技术(Airborne Laser Scanning, ALS)可以快速获取城市建筑物顶面高精度、高密度的三维空间信息, 但是因为缺乏建筑物立/侧面数据, 尤其对于大型、复杂建筑物, 模型信息损失严重。地面三维激光扫描技术(Terrestrial Laser Scanning, TLS)可以直接、快速、多视角地对目标进行扫描, 经数据配准后可得到建筑物表面完整的空间信息, 从而为三维重建提供了数据源保障^[1]。

基于激光测距技术的建筑物重建已有十多年的研究历史。Norbert 等^[2]较为全面地介绍了 ALS 和 TLS 技术在建筑物三维重建中的流程和算法。通常 TLS 的建筑物重建大致可分为数据预处理、面片分割、边界提取、规则化以及建立模型; 算法思想主要来源于数字图像处理及早期发展的 ALS 数据处理相关算法。但 TLS 数据往往密度非常高、数据量大, 因此数据处理算法也在不断改进与创新。本文系统分析了 TLS 技术在建筑物三维建模中的研究进展和存在的问题, 提出了初步的研究思路。

收稿日期: 2013-10-09 修订日期: 2014-02-19

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ120343); 国家自然科学基金项目(41301485); 中国科学院百人计划专项(09ZZ06101B)。

作者简介: 王方建(1986~), 男, 博士研究生, 研究方向为激光雷达三维建模。

E-mail: fjjwang@ceode.ac.cn

2 TLS 数据预处理

2.1 数据组织

TLS 系统的脉冲频率很高(如 FOCUS 3D,其脉冲频率可达到 100 万赫兹以上),实际扫描工程中每站点获取的点云可达到几百万甚至上亿个,因此数据组织管理尤为重要,直接影响后续去噪、分割等的处理效率。目前对于三维数据空间索引主要包括八叉树和 Kd 树^[3]。八叉树^[4]即将原始点云作为根节点,将其最小外包立方体分割为 8 个大小相同的小立方体作为子节点,再对子节点继续划分并迭代,直到子节点点云数低于所设置的阈值;中间节点存储点云的索引信息,叶子节点存储点云,从而建立散乱点云的几何拓扑关系,优点是速度快。Kd 树^[5]是一种面向维空间数据组织的二叉树结构。每个非叶节点被一超平面分割成两个子空间,子空间又以相同方式递归分割,中间节点存储点云索引,叶子节点存储点云,其邻近搜索效率更高。近年来也有学者综合八叉树和 Kd 树各自的优势,建立混合型的点云数据组织结构^[6],即首先通过设定深度阈值和节点点云数据阈值建立八叉树,再对八叉树叶节点建立 Kd 树索引。

2.2 噪音去除

在利用 TLS 获取数据时不可避免的会引入各种噪音,包括系统噪音、目标噪音和环境噪音。系统噪音主要来源于设备抖动、信号信噪比、激光发散等因素,因影响小可以不予考虑;目标噪音来自扫描目标回波信号低、目标边缘小角度回波不稳定、多路径效应等,导致目标表面点云不平整;环境噪音是在扫描过程中行人、车辆和其他非目标的点云。后两种噪音在数据处理中都应该去除,一方面可减少数据量,另一方面可大幅提高最终模型的精度。

传统的激光点云去噪/滤波方法很多,包括数学形态学滤波、渐进式三角网加密滤波、坡度变化滤波、不规则三角网滤波、多分辨率方向预测滤波等^[7-8],但多数是针对 ALS 点云数据,并不完全适用于 TLS。羌云娟等^[9]提出一种分步滤波方法,即通过分块找出高程最低点进行距离加权平均拟合高程,剔除粗差点,再利用三角网拟合平面剔除混合噪声。这种方法只适用于非建筑区且相对平坦或坡度较小的地表。杜小燕等^[10]借鉴图像处理中的双边滤波器算法,通过计算 p 点的 k 邻近点,拟合最小二乘平面,利用点间平面距离及法矢夹角两个权重进行双边滤波和平滑点云。黄森等^[11]基于测量点法矢修正算法,计算 p 点的 k 邻近点间法矢夹角变化,选择性使用 Kuwahara 或拉普拉斯滤波算子调整点

位置平滑点云。这两种方法没有剔除粗差且只能处理小数据量。李元旺等^[12]通过构造三维栅格阵列,在栅格空间中拟合最佳逼近平面和多面体来滤除大振幅噪音点。该方法易检测滤除离群点,但阈值选择难以自适应且内存开销大。Bahadir^[13]基于数学表面聚类技术,通过采样点定义平面方程并调整平面参数,定义由坐标、倾斜角和仿射变换距离组成的滤波函数,达到滤除离群点的目的,同时得到参数平面。该算法一定程度上达到点云分割目的,但不适用于远距离点云数据且处理数据量较小的情况。将扩散滤波思想应用到激光点云滤波^[14]中是一种基于点云强度滤波的新方法,通过建立点云强度的三维扩散滤波方程,计算最佳扩散滤波尺度参数,从而实现滤波并具备一定的保留边缘特征及去噪能力。

2.3 点云配准

由于扫描对象的复杂性,在应用 TLS 设备进行扫描时通常要架设几个甚至几百个站点,而每个测站的扫描数据都有其各自的坐标系,在处理时需将多站点数据高精度配准,得到扫描对象在同一坐标系下的完整点云数据。

点云配准即站点数据之间空间坐标的刚性变换,一般采用 7 参数法,包括 3 个角元素(Ω, σ, κ)、三个平移参数($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)和 1 个尺度系数(λ , TLS 中固定为 1,实际上就是 6 参数法)。Besl 等^[15]提出迭代最邻近点配准法(Iterative Closest Point, ICP),是一种点集到点集的、基于自由形态曲面的配准方法,也是目前众多点云配准方法的基础,但存在计算量大、易陷入局部最优解的缺点,很多学者对其进行了改进。罗先觉等^[16]通过在扫描前预先设置的特征点(参考板)计算初始变换参数,再对初始配准的重叠部分寻找匹配点对,利用 ICP 算法完成配准,但在自动化程度和处理大数据量方面需要改进。周春艳等^[17]首先采用主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)和最小包围盒调整坐标完成粗配准,再通过去除非目标点和精度较低点以减少数据量,重采样得到控制点集并精简匹配点对,最后利用 ICP 算法完成精细配准,计算量较大。王蕊等^[18]提出一种基于几何特征点云配准算法,以点云曲率为联系特征搜索匹配对集,并通过相似性度量提取有效匹配对,选取最佳匹配对进行粗配准,利用 ICP 算法实现精细配准。该算法不考虑点云初始位置,自动化程度和精度有所提高,但空间开销及计算量较大。Khalil^[19]提出了一种基于影像的配准方法(Image-Based Registration, IBR),在获取数据时首先对扫描仪携带的相机进行校正,再由图像

配准得到转换参数,结合重建时提取的相机与扫描仪空间关系即得到多站点点云数据间的转换关系。该方法优点是无需 ICP 迭代,速度快。缺点是需要指定同名点配准影像且精度不高。Kwang 等^[20]在充分总结前人点云配准算法的基础上,提出了一种完善的几何基元 ICP-随机采样一致性算法(Geometric Primitive ICP with the RANSAC, GP-ICPR)。该方法首先搜索 k 邻近点并计算协方差矩阵的特征值和特征向量,评估法向量、角度变化及曲率变化;选择同名点,然后通过计算相关统计性误差设置阈值,分层次选择已有或改进的算法,达到全局收敛;最后通过改进的随机采样一致性算法(RANdom SAmple Consensus, RANSAC)剔除粗差点。该方法配准精度高且能平滑去噪,缺点是需要初始化且计算量大。Grant 等^[21]提出了一种点到面(Point-to-plane, P2P)的配准方法,通过建立两站点云间的 P2P 关系,计算法向量和入射角,建立协方差矩阵,由初始刚体变换参数经随机模型的权重最小二乘平差迭代运算得到最终的刚体变换参数。该方法在精度和效率方面都优于传统配准方法。王永波等^[22]提出了线状特征约束下基于四元数描述的激光电影配准方法,计算基于四元数的旋转矩阵并求解平移及缩放系数,有效削弱了点云本身误差影响,减少了线性化导致的精度损失。陈西江等^[23]通过在罗德里格矩阵的基础上推导出异常同名点探测算法,分解同名点向量矩阵,有效改善点云配准中异常同名点的问题。

2.4 点云压缩

利用 TLS 技术采集的建筑物点云数据量按照场景的大小、复杂度及设置的分辨率不同,可以从百万到百亿级别甚至更高,并且随着 TLS 硬件的不断升级,可获取的数据量必然会越来越大。为了有效地存储、显示,方便建模等应用,很多研究提出了适用的数据压缩算法。谢瑞等^[24]应用点云距离、角度、密度、法向量、曲率等为压缩准则,开发了采样法、弦高法、角度法、包围盒法、聚类法等压缩算法。程效军等^[25]开发的基于自适应八叉树的点云压缩算法,利用包围盒建立点云 K 邻域进而计算法向量,得到八叉树节点;利用多分辨率 LOD(Level Of Detail)结构及网格内部压缩方法实现点云数据压缩;缺点是八叉树节点及阈值难以最优选择。王玉国等^[26]提出一种基于曲线拟合与采样的压缩算法,首先对散乱点云截面进行 B 样条曲线拟合,然后基于曲率采样拟合曲线实现点云数据压缩;缺点是误差大且适用性有限。李海英等^[27]利用扫描线计算曲率,对变化剧烈区域保留较多点云以保留特征。

翟跃华等^[28]提出的算法与之类似,区别在于其利用包围盒分割点云,继而计算邻域点云曲率实现压缩。这两种方法的缺点是计算量大且不适用于 TLS 数据。邢正全等^[29]提出基于栅格划分和法向量估计的压缩算法,首先对原始数据进行栅格化,计算栅格点云法向量,根据相邻点的法向量夹角设置阈值进行压缩;缺点是计算量巨大且阈值难以设置。李德江等^[30]提出基于特征点的压缩方法,即通过对点云数据分层投影,计算每层点云的中心点及相对方位角,由切面点云斜率变化求取特征点,在保留散乱点云特征点的同时实现压缩,点云特征信息损失少。基于快速成型技术的压缩算法^[31]对原始点云数据分层,将等高距和其允许误差设为阈值实现压缩,效率高但信息损失较大。方芳等^[32]提出海量散乱点云快速压缩算法,在对原始散乱点云分层基础上,利用弦高差法判断并保留特征点实现压缩并有效保留了特征信息;缺点是分层数(厚度)及弦高差阈值难以最优设置。田丰瑞等^[33]则对分层投影后的特征点云数据的 X 、 Y 、 Z 3 个方向分别进行再投影,并以曲率为筛选准则提取特征点,然后融合 3 个方向的提取成果实现压缩,避免了单一方向分层导致的数据空洞及特征信息损失,但其计算量较大。

3 面片分割

大多数的建筑物形状比较规则,建模目标是得到其外轮廓的线框模型,通过提取建筑物屋顶、墙面、窗户、门洞等表面的点云,分别建立其规则化线框,最后通过整合、规则化、布尔运算等得到完整的表面模型,因此分割建筑物点云得到面片点云是重建过程中的关键。Vosselman^[34]将面片分割方法分为两类,一类是由点云数据本身聚类,一般是基于邻近点和(或)局部表面法向量相似性准则进行分割;另一类是先建立面片参数模型,通过在参数空间中聚类和定位极值点,直接估算表面参数实现分割。

区域增长(Region Growing, RG)算法是 Vosselman^[34]定义的标准的第一类分割算法,来源于二维数字图像处理领域;在三维(3D)点云分割方面,也可以认为点云集中的部分点云属于某一平面或与平面距离很近,从而可通过定义的种子点进行生长完成聚类。基于此,很多学者开发了多种适用于 3D 点云分割的新算法。Gorte^[35]提出了一种基于不规则三角网(Triangulated Irregular Network, TIN)的 RG 算法,使用 TIN 描述表面基本元素,比较邻接三角形平面方程来判断平面。Tovari 等^[36]在算法中寻找点云的 k 邻近点并计算法向量,在生

长阶段加入法向量相似性和点到生长面距离两个生长阈值实现面片分割。Rabbani^[37]和Rusu^[38]在计算邻近点法向量同时计算局部曲率,以邻近点法向量夹角和曲率变化阈值判断是否聚类 and 是否作为新种子点。Pu^[39]基于Vosselman方法提出了表面生长算法(Surface Growing),通过指定种子点数量、表面生长半径、表面间最大距离等一系列参数进行聚类。一般而言,RG分割算法适用于ALS点云数据,但是对参数敏感,容易产生过分割或次分割现象,且算法依赖种子点,抗噪性不强。

基于参数模型的点云分割算法比较典型的有RANSAC和三维霍夫变换算法(Three Dimension Hough Transformation, 3DHT)。Fischler等^[40]提出了经典的RANSAC算法,目前已广泛应用于点云聚类方面。其基本原理是通过随机采样确定基元(线、面等)模型参数,评估模型聚类点云。以RANSAC算法为基础,Tarsha等^[41]提出扩展RANSAC算法,通过重采样及低通滤波提高原始点云质量;在评价面片时,除点云数量外还考虑标准偏差,该方法主要针对ALS屋顶面片分割。Schnabel等^[42]提出了一种高效RANSAC算法,通过八叉树组织点云数据,采用局部采样方法提高算法效率,应用面片评估函数提高聚类精度;该方法适用于大数据量的TLS点云分割,缺点是算法参数难以控制。Tarek等^[43]提出了一种Seq-NV-RANSAC(Sequentially-Normal Vectors-RANSAC)算法,在RANSAC算法中加入正交向量检验,并且在剩余点中不断重复处理直到无点云面片;该算法提高了分割的自动化程度和效率,避免伪面片,缺点是参数设置难以自适应,易产生过分割或次分割。Vosselman等^[44]使用3DHT检测点云中的空间平面,随后按照霍夫变换原理进行扩展,提取其他三维几何体形状。3DHT使用3个参数 $\{\theta, \phi, \rho\}$ 表示一个空间平面,其中 ρ 表示平面到坐标原点的距离, $\cos\theta, \cos\phi$ 表示平面的方向余弦。算法将 θ, ϕ 分别离散化,然后依次求 ρ ,统计每个平面(用 $\{\theta, \phi, \rho\}$ 唯一表达)包含点云数据的个数,进而判断该平面是否可作为可能的平面。算法缺点是参数设置比较困难,时间和空间消耗也比较大;如3个参数的步长较小时,虽然能提高平面检测的精度,但内存消耗和时间消耗大大增加。Tarsha^[45]综合比较了RANSAC和3DHT算法,结果显示在处理效率、鲁棒性和分割效果上RANSAC算法优于3DHT。

4 模型重建

建筑物的重建即建立反映建筑物表面特征的外

轮廓线框模型,再经过分割得到建筑物的面片(屋顶、墙面、窗体、门洞等)点云数据,在此基础上提取这些面片的边界(含内边界和外边界)点云并绘制边界线。因为可能存在点云缺失、分割不准确(过分割、错分割)等导致边界线不平滑、不共面、拓扑关系混乱等问题,需要应用规则化算法进行调整。因此基于TLS数据的建筑物模型重建一般分边界点提取和边界规则化。

4.1 边界点提取

Sampath等^[46]使用改进的凸包(Convex Hull)算法提取边界点,较准确地拟合出面片的边界线,但该算法无法提取内边界且抗噪性不强。Pu等^[47]使用凸包算法提取面片外边界,结合三角网方法提取内外边界点,即首先构建三角网,设定边长阈值同时得到内外边界点,再利用三角网点的连接关系聚类边界点,最后利用已知的关系(如内边界点所在三角形相邻三角形有3个,而外边界点只有1~2个等)提取内外边界点,优点是能有效地提取墙体及门窗等边界点云,缺点是边长阈值不易控制且三角网计算量大。Joaquin等^[48]利用三角网边长阈值提取边界点,但提出了一种加速方法,即首先通过凸包运算得到面片面积及点密度,将面片分为细节层(门、窗)和面片层(墙),对于细节层直接提取边界点,而对面片层则先抽稀再提取,从而达到加速目的,但是抽稀比例、抽稀前后边长阈值等参数的设置难以控制。Boulaassal等^[49]首先对面片点云进行主成分分析,使用前两个分量将点云转换到新坐标系,再构建狄洛尼三角网,使用边长阈值提取内外边界点。该算法没有区分内外边界,且同样存在阈值设置难以自适应和计算量大的问题。

Dorninger等^[50]、Shen等^[51]将2D α -shapes算法应用于建筑物面片边界点云的提取,基本原理是对点集 S ,用一个半径为 α 的圆在点集上滚动,只要 α 足够大,这个圆即可沿着点集边缘滚动而不会落入点集内部,从而获得点集边缘形状;如果点集内部有空洞且 α 设置合理,算法能同时获得点集的内外边界。该算法对凸凹多边形都适用并具有一定的滤波功能,但是提取效果严重依赖于 α 值的设置,如周飞^[52]通过构建狄洛尼三角网过滤点云,再应用2D α -shapes算法从一大堆无序的点集中重建对象的几何形状,一定程度上提高了边界点的提取效率。

4.2 边界规则化

完成边界点提取后,由于点云误差、缺失、分割及提取误差,直接连接边界点得到的闭合线段会存在很多问题,如不共线、不平滑(锯齿状)、不规则(不平行或不垂直)、不邻接等,需要应用一定算法进行规则

化,并且对于一些点云缺失部分,也要在一定的假设前提下进行估计以得到完整闭合的建筑物线框模型。

Dorninger 等^[50]根据屋顶面片的边缘位置和长度选择性进行相交(平行、垂直、相交融合)得到屋顶模型,垂直投影到地面得到建筑模型。Zhou 等^[53]通过计算每个点的切向量来确定两个主方向,再在此基础上进行平行正交处理。Sampath 等^[46]提出一种分层规则化算法,首先选择几条长线段,判断其水平或垂直,然后计算水平或垂直线段方程,最后计算其余线段,以斜率为阈值进行规则化。这些算法主要针对机载点云数据,只考虑屋顶面片,而几乎没有考虑墙面如门、窗等。沈蔚等^[54]使用改进的管子算法(Sleeve Algorithm)得到边界线的特征点和由特征点构成的骨架线,再针对矩形和凹多边形的骨架线,分别应用矩形外接圆法和分类强制正交法进行规则化。

Pu 等^[39,47,55]针对地面激光点云数据,提出了一套完整的、基于知识的(Knowledge based)建筑物重建方法,可以重建包括门窗等在内的细部特征。该方法在点云面片分割基础上,加入对面片语义特征的计算和分类,定义了7种特征约束,包括地面、墙、窗、屋顶、门、伸出物及嵌入物,计算每个面片的凸包,由其面积、中心点、法向量等参数判别类别,由其类别约束的先验知识进行模型重建。重建方法为:应用最小二乘法拟合墙面上方水平轮廓,空隙处进行水平或垂直连通;对于屋顶及凸出物应用凸包算法拟合凸多边形,应用霍夫变换拟合凹多边形;应用最小包围盒法拟合门窗对象,基于点云计算或指定固定包围盒深度;最后对于点云缺失部分基于一定先验知识或假设进行估计。这套方法能够有效地检测和重建包括门窗等细部对象在内的建筑物模型,精度和鲁棒性均较高,但不适于复杂建筑物的模型构建。

参考文献:

- [1] 梁欣廉,张继贤,李海涛,等. 激光雷达数据特点[J]. 遥感信息,2005,20(3):71-76.
- [2] NORBERT H, MARTIN K. An update on automatic 3D building reconstruction[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2010,(65):570-580.
- [3] 左小清,李清泉. 一种面向道路网3维数据的空间索引方法[J]. 测绘学报,2006,35(1):57-62.
- [4] 李泽宇,李德华,胡汉平,等. 基于八叉树的三维散乱数据点的法矢的估计[J]. 计算机与数字工程,2000,28(4):62-66.
- [5] 吴涵,杨克俭. 基于Kd树的多维索引在数据库中的运用[J]. 自动化技术与应用,2007,26(9):37-39.
- [6] 廖丽琼,白俊松,罗德安. 基于八叉树及KD树的混合型点云数据存储结构[J]. 计算机系统应用,2012,21(3):87-90.
- [7] 王金亮,陈联军. 激光雷达点云数据的滤波算法述评[J]. 遥感技术与应用,2010,25(5):632-638.
- [8] MAAS H G, VOSSelman G. Airborne and terrestrial laser scanning[M]. UK: CRC Press Inc,2010.
- [9] 羌云娟,吴侃,秦臻. 地面点云噪声数据分布剔除方法[J]. 中国科技论文在线,2010,5(11):890-893.
- [10] 杜小燕,姜晓峰,郝传刚,等. 点云模型的双边滤波去噪算法[J]. 计算机应用与软件,2010,27(7):245-247.
- [11] 黄森,马丽,高敬礼,等. 一种基于法矢修正的散乱点云数据平滑处理算法[J]. 计算机时代,2009,(11):45-48.

5 结束语

总体而言,针对 TLS 数据的建筑物重建的相关算法已经比较成熟。数据预处理方面,点云数据的组织管理方式可以提高后续处理的效率;点云的去噪借鉴了很多数字图像处理算法,但普遍效率不高;点云配准多数是基于 ICP 算法或者各种改进 ICP 算法。点云面片分割是模型重建最为关键的一环,RANSAC 和 Efficient RANSAC 分割效率和效果更优。最终的模型重建中,当前的几种算法均可快速精确地建立包括门窗等细部对象在内的建筑物模型,而且算法流程清晰严密,鲁棒性强。

需要指出的是,在针对 TLS 数据的建筑物重建中,依然还存在很多需要解决的问题:(1)海量数据的精简压缩。目前尽管已经开发了很多针对 TLS 点云数据的压缩算法,但多数算法都是以损失特征信息为代价且压缩效率不高,尚缺乏可靠的针对 TLS 数据的精简或压缩算法;(2)建筑物重建的自动化程度不高。整个算法流程多需要人为控制或设置相关合理参数,且主要针对表面规则的建筑物,对于一些曲面如球面、圆锥、带有烟囱等复杂建筑表面很难适应;(3)建筑模型纹理的准确映射方面,目前国内外也有很多学者研究模型纹理坐标的映射,但主要是在古建方面,针对城市建筑的纹理映射,主要使用比较粗糙的贴图方式,而且需要大量的人机交互操作;(4)数据质量评价方面,当前针对 TLS 建模流程各个环节包括配准、分割、重建等的质量评价多为定性,缺乏合理有效的定量评价方法;(5)多源数据融合,激光雷达技术已经发展出包括星载、机载、车载、船载、地面等各种平台的激光扫描技术,各有其优缺点,针对建筑物建模而言,如何有效融合机载、车载和地面的 LiDAR 点云数据进行建筑物模型快速重建是一项值得深入研究的工作。

- [12] 李元旺,黄文明,温佩芝,等.空间超限领域点云去噪算法的研究与实现[J].计算机系统应用,2010,19(3):35-38.
- [13] BAHADIR E. A novel 3D geometric object filtering function for application in indoor area with terrestrial laser scanning data[J]. Optics & Laser Technology, 2010, (42): 799-804.
- [14] 张毅,闫利.地面激光点云强度噪声的三维扩散滤波方法[J].测绘学报,2013,42(4):568-573.
- [15] BESL P, MCKAY N. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14 (2): 239-256.
- [16] 罗先觉,钟约先,李仁举.三维扫描系统中的数据配准技术[J].清华大学学报(自然科学版),2004,44(8):1104-1106.
- [17] 周春燕,李勇,邹峥嵘.三维点云 ICP 算法改进研究[J].计算机技术与发展,2011,21(8):75-81.
- [18] 王蕊,李俊山,刘玲霞,等.基于几何特征的点云配准算法[J].华东理工大学学报(自然科学版),2009,35(5):768-773.
- [19] KHALIL A. Registration of terrestrial laser scanner data using image[J]. The Photogrammetric Record, 2006, 21(115): 255-268.
- [20] KWANG H, DEREK D. A method for automated registration of unorganized point clouds [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2008, (63): 36-54.
- [21] GRANT D, JAMES B, MELBA C. Point-to-plane registration of terrestrial laser scans [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, (72): 16-26.
- [22] 王永波,杨化超,刘燕华,等.线状特征约束下基于四元数描述的 LiDAR 点云配准方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2013,38(9):1057-1062.
- [23] 陈西江,花向红,鲁铁定,等.点云配准中异常同名点探测方法研究[J].大地测量学与地球动力学,2013,33(3):64-67.
- [24] 谢瑞,肖海红.地面三维激光扫描点云压缩准则[J].工程勘察,2013,(4):64-68.
- [25] 程效军,李伟英,张小虎.基于自适应八叉树的点云数据压缩方法研究[J].河南科学,2010,28(10):1300-1304.
- [26] 王玉国,周来水,安鲁陵.一种基于曲线拟合与采样的点云数据压缩方法[J].机械科学与技术,2006,25(8):989-992.
- [27] 李海英,花向红,陈远.三维激光点云扫描线曲率压缩算法研究[J].测绘信息与工程,2009,34(5):43-45.
- [28] 翟跃华,卢章平.反求工程点云数据压缩技术研究[J].制造业自动化,2012,34(1):21-22.
- [29] 邢正全,邓喀中,薛继群.基于栅格划分和法向量估计的点云数据压缩[J].测绘通报,2012,(7):50-52.
- [30] 李德江,殷福忠,孙利民.基于特征点的点云压缩方法研究[J].测绘通报,2012,(1):39-41.
- [31] 万程辉,程效军,贾东峰.基于快速成型技术的点云压缩算法研究[J].测绘通报,2012,(6):10-12.
- [32] 方芳,程效军.海量散乱点云快速压缩算法[J].武汉大学学报(信息科学版),2013,38(11):1353-1357.
- [33] 田丰瑞,胡荣.基于分层投影的特征点点云数据压缩算法研究[J].铁道勘察,2013,(1):12-16.
- [34] VOSELMAN G, GORTE B, SITHOLE G, et al. Recognizing structure in laser scanner point clouds[J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2004, 46 (Part 8/W2): 33-38.
- [35] GORTE B. Segmentation of TIN-structured surface models[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2002, 34(4): 5.
- [36] TOVARI D, PFEIFER N. Segmentation based robust interpolation— A new approach to laser data filtering [J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2005, 36(3/W19): 79-84.
- [37] RABBANI T. Automatic reconstruction of industrial installations using point clouds and images[D]. Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, 2006: 154.
- [38] RUSU R. Semantic 3D object maps for everyday manipulation in human living environments[D]. Technische Univesitaet München, Munich, Germany: 91-93.
- [39] PU S, VOSELMAN G. Automatic extraction of building features from terrestrial laser scanning [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2006, 36(5): 5.
- [40] FISCHLER M, BOLLES R. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.
- [41] TARSHA K, LANDES T, GRUSSENMEYER P. Extended RANSAC algorithm for automatic detection of building roof planes from LiDAR data[J]. The Photogrammetric Journal of Finland, 2008, 21(1): 97-109.
- [42] SCHNABEL R, WAHL R, KLEIN R. Efficient RANSAC for point-cloud shape detection [J]. Computer Graphics Forum, 2007, 26(2): 214-226.
- [43] TAREK M, ZHU Q, DU Z Q, et al. An improved segmentation approach for planar surfaces from 3D point clouds[J]. The Photogrammetric Record, 2010, 25(129): 5-23.

-
- [44] VOSSelman G, DIJKMAN S. 3D building model reconstruction from point clouds and ground plans[J]. IAPRS, 2001, 34(part 3/W4):37-43.
- [45] TARSHA F, LANDES T, GRUSSENMEYER P. Hough-transform and extended RANSAC algorithms for automatic detection of 3D building roof planes from LiDAR data[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2007, 36 (3/W52):407-412.
- [46] SAMPATH A, SHAN J. Building boundary tracing and regularization from airborne LiDAR point clouds [J]. Photogrammetric engineering and remote sensing, 2007, 73(7):805-812.
- [47] PU S, VOSSelman G. Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, (64):575-584.
- [48] JOAQUIN M, ALEX S M, PEDRO A, et al. Automatic processing of terrestrial laser scanning data of building façades [J]. Automation in Construction, 2012, (22):298-305.
- [49] BOULAASSAL H, LANDES T, GRUSSENMEYER P. Automatic extraction of planar clusters and their contours on building façades recorded by terrestrial laser scanner[J]. International Journal of Architectural Computing, 2009, 7(1):1-20.
- [50] PETER D, PFEIFER N. A comprehensive automated 3D approach for building extraction, reconstruction, and regularization from airborne laser scanning point clouds[J]. Sensors, 2008, 8(11):7323-7343.
- [51] SHEN W, ZHANG J, YUAN F. A New Algorithm of building boundary extraction based on LiDAR data[J]. 19th International Conference on Geoinformatics, ShangHai, 2011:1-4.
- [52] 周飞. 利用 Alpha Shapes 算法提取离散点轮廓线[J]. 湖北广播电视大学学报, 2010, 30(2):155-156.
- [53] ZHOU Q Y, NEUMANN U. Fast and extensible building modeling from airborne LiDAR data[J]. Proceedings of the 16th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems, 2008, (7):8.
- [54] 沈蔚, 李京, 陈云浩, 等. 基于 LiDAR 数据的建筑轮廓线提取及规则化算法研究[J]. 遥感学报, 2008, 12(5):692-699.
- [55] PU S. Generating building outlines from terrestrial laser scanning[J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008, 37(5):451-456.