

基于点云数据的三维激光扫描测量精度影响因素分析

郭晓锋

辽宁省自然资源卫星应用技术中心, 辽宁 沈阳 110000

[摘要]随着测绘、工程监测以及数字化建模等领域不断快速发展,三维激光扫描技术凭借自身非接触、高精度以及高效率等特性,已然成为获取空间数据的一种极为重要的手段。不过在实际开展测量工作的过程当中,三维激光扫描所得到的结果其精度会受到多种不同因素的影响,像仪器自身的性能状况、外部的环境条件以及被测对象所具有的特征。文中依据点云数据所具备的精度方面的特征,较为系统地分析了那些会对三维激光扫描测量精度产生影响的主要因素,并且还从数据处理以及控制技术层面、算法优化方面以及操作管理环节等多个不同维度出发,提出了具有针对性的改进策略,以此来为提升点云数据的精度以及稳定性给予相应的技术支持。

[关键词]三维激光扫描;点云数据;测量精度;影响因素

DOI: 10.33142/aem.v7i9.18032

中图分类号: P225

文献标识码: A

Analysis of Factors Affecting the Accuracy of 3D Laser Scanning Measurement Based on Point Cloud Data

GUO Xiaofeng

Satellite Application Technology Center of Liaoning Natural Resources, Shenyang, Liaoning, 110000, China

Abstract: With the rapid development of surveying, engineering monitoring, and digital modeling, 3D laser scanning technology has become an extremely important means of obtaining spatial data due to its non-contact, high-precision, and high-efficiency characteristics. However, in the actual process of conducting measurement work, the accuracy of the results obtained by 3D laser scanning will be affected by various factors, such as the performance of the instrument itself, external environmental conditions, and the characteristics of the measured object. Based on the accuracy characteristics of point cloud data, this article systematically analyzes the main factors that affect the accuracy of 3D laser scanning measurement. From multiple dimensions such as data processing and control technology, algorithm optimization, and operation management, targeted improvement strategies are proposed to provide corresponding technical support for improving the accuracy and stability of point cloud data.

Keywords: 3D laser scanning; point cloud data; measurement accuracy; influencing factors

引言

三维激光扫描技术(Three-Dimensional Laser Scanning, 3DLS)借助高速激光测距以及角度测量手段,可迅速获取目标表面的空间坐标,达成对物体或者场景的三维数字化呈现。不过在实际运用当中,扫描精度往往会受到多种因素的干扰,像仪器系统的误差、环境方面的扰动、目标表面的特性以及操作布设不妥当等情况均有可能产生影响。本文选取点云数据当作研究对象,针对三维激光扫描测量里主要的误差来源与影响机理展开系统分析,同时探讨优化与控制的方法,以此为高精度空间测量给予一定的参考。

1 三维激光扫描技术原理

三维激光扫描技术是利用激光测距原理,通过高速激

光扫描测量的方法,快速获取被测物体表面的三维坐标数据。工作原理主要包括:一是激光发射,扫描仪发射激光束,照射到被测物体表面;二是激光反射,激光束在被测物体表面发生反射,反射光被扫描仪接收;三是时间测量,扫描仪通过测量激光发射和接收的时间差,计算激光束从扫描仪到被测物体表面的距离;四是角度测量,扫描仪通过内置的角度测量装置,测量出激光束的发射角度和接收角度;五是坐标计算,根据激光束的距离和角度信息,利用三角函数关系计算被测物体表面点的三维坐标。三维激光扫描系统一般包含激光测距单元、角度测量单元、控制与存储模块还有数据处理软件这些部分。依据测距方式存在差异,能够划分成脉冲式扫描仪以及相位式扫描仪这两

种类型。借助连续且高密度的扫描操作,便可以形成由众多空间点构成的点云数据集合,从而给后续开展的三维建模工作、形态分析事宜以及精度研究方面给予基础数据方面的有力支撑。

2 三维激光扫描测量精度的主要影响因素分析

2.1 仪器性能因素

仪器性能是决定三维激光扫描测量精度的重要因素。其中,激光测距精度、角度分辨率、扫描频率以及系统稳定性这些方面,都会对点云数据的精确性产生直接的影响。测距精度在很大程度上取决于激光脉冲的时间测量能力以及电子处理系统的响应速度。如果时间分辨率比较低或者信号噪声比较高,那么在距离计算的时候就容易出现系统偏差。角度测量单元的分辨率和精密度决定了点云空间定位的角度误差,当扫描角误差不断累积起来的时候,就会造成点云出现局部的畸变或者是空间上的错位。除此之外,仪器的标定精度、光学系统质量以及机械结构稳定性等因素,也都对测量结果有着一定的影响。比如说,扫描镜组哪怕只有微小的振动或者是光轴存在偏差,都会导致数据出现偏移的情况。而且,在仪器经过长期使用之后,还可能出现仪器老化或者是内部热漂移等情况,这同样有可能会降低测距的稳定性。所以说,要保持仪器性能的稳定,定期对仪器进行校准以及维护工作,这是确保扫描精度最为关键的条件之一。

2.2 环境条件因素

外界环境对于三维激光扫描的精度有着不容忽视的影响。大气条件会发生改变,而这种改变又会使激光的传播特性随之发生变化。具体而言,温度、湿度以及气压等出现变动的情况下,激光的折射率就会产生波动,如此一来便对测距的结果产生了影响。当空气当中悬浮颗粒或者水汽的浓度比较高的时候,那么光束所呈现出的衰减情况以及散射效应都会有所增强,与此信号回波的强度也会相应地减弱,最终使得测距的误差不断增大。光照强度产生变化以及反射受到干扰同样会对扫描的精度造成影响,尤其是在户外那种强光的条件之下,背景光极有可能对接收器识别反射信号形成干扰。除此之外,风力的作用以及机械震动的情况也能够致使仪器的姿态出现微小的偏移,而这种偏移又会引发点云坐标的漂移或者数据出现错位的现象。为了能够将环境误差尽可能地减小,就需要在测量开始之前针对气象条件展开相应的监测工作并做出修正,而且在有必要的情况下,可以采取遮挡、减震或者是时间窗口控制等一系列的措施,以此来确保数据采集过程的稳定状态。

2.3 被测对象特征因素

被测对象的表面性质在很大程度上决定了激光反射与接收的效果。不同的材料其反射率存在明显差异,像金属或者光亮材料这类高反射率的表面,有可能会让信号出现饱和的情况;而像黑色或者粗糙物体这样的低反射率表面,则有可能致使信号产生衰减,并且还会造成回波丢失。表面的粗糙程度会对激光的散射模式产生影响,粗糙的表面容易引发漫反射现象,这会使回波信号变得较为微弱并且不够稳定,进而导致测距精度有所降低。除此之外,被测对象的几何形态复杂程度同样会带来遮挡效应或者多路径反射的问题,在那些结构比较密集或者曲面形态较为复杂的场景当中,部分区域很可能会出现数据空洞或者是点云重叠的现象。通过恰当地去选择测量的角度,增加扫描站点的数量,或者采用多视角重建的技术手段,是能够有效地减少这类误差给精度所带来的影响的。

3 点云数据处理与精度控制技术研究

3.1 点云配准与坐标系统转换误差

点云配准属于关键环节,它是把不同站点或者不同时间所获取的点云数据对齐到统一的坐标系统当中,其精度对整体数据的空间一致性以及模型质量有着直接的影响,在配准的过程中,常见的误差来源有初始配准误差、坐标系统转换误差以及算法迭代误差,倘若初始对齐点或者是特征匹配点选择得当,那么配准就可能出现局部偏移或者整体旋转误差,传统的依靠人工目标的配准方法受到目标布设精度以及稳定性的限制,而自动化特征匹配法尽管能够提高效率,但是容易受到噪声以及点密度不均的影响,进而降低鲁棒性,在坐标系统转换的过程中,要是控制点精度不够或者转换参数估计存在偏差,就会致使整体坐标出现漂移,为了减小这类误差,需要在采集之前合理规划控制点布设的位置,提高配准目标的稳定性和识别精度,与此采用多特征约束的迭代最近点(ICP)算法或者是基于语义特征的配准方法,能够有效地提升配准的精度以及自动化水平,通过对配准残差进行定量分析以及加权优化,还能够进一步控制坐标系统转换误差,让多源点云在空间上达成高精度的融合。

3.2 数据滤波与噪声抑制方法

在点云数据采集之时,总会遭受环境干扰、仪器噪声或者反射异常等因素的影响,进而出现孤立点、悬浮点亦或是异常密集区域等情况。这些噪声的存在,一方面会对后续的建模以及特征提取产生影响,另一方面还会致使整体测量精度有所降低。对于这一问题,常用的一些滤波与噪声抑制方法有统计滤波、半径滤波以及基于曲率的自适应

应滤波等。统计滤波是凭借计算点云局部邻域的平均距离与方差来把异常偏离点剔除掉；半径滤波是以点密度作为依据，对孤立或者稀疏区域予以清除；而基于曲率的滤波方法则可在保留细节特征的前提下，抑制随机噪声。除此之外，机器学习与深度学习技术的引入，给点云噪声识别与修复开辟了新的途径。比如，借助卷积神经网络（CNN）或者图神经网络（GNN），能够自动识别异常点分布模式，进而达成智能化滤波的效果。合理的滤波策略需要同时考虑数据完整性和精度平衡这两个方面，既要确保关键特征不会被过度平滑处理，又要尽可能最大程度地抑制噪声干扰，以此为后续的精度分析以及曲面重建筑牢可靠的基础。

3.3 曲面重建与模型拟合精度分析

曲面重建属于点云数据后处理里极为重要的一环，它的主要目的在于把呈离散状态的点集转变成连续的几何曲面模型，进而达成对空间对象较为精确的呈现。在这一过程当中，拟合算法的具体选择情况、点云密度的分布状况以及局部曲率所发生的变动情况，都会对最终模型的精度带来颇为显著的影响。要是点云密度呈现出分布不均的情况，又或者存在局部出现空洞的现象，那么在进行曲面重建的时候，就极有可能会变形或者不连续这样的状况。常见的曲面重建方法包含了基于三角网格的 Delaunay 三角化操作、依靠隐式函数展开的 Poisson 重建方式以及凭借样条函数实施的拟合办法。Poisson 重建由于其具备较强的全局约束力，而且平滑性表现良好，所以在复杂曲面建模领域得到了广泛的运用，然而在针对边界进行处理的时候，它却容易滋生出模糊误差。要想提升拟合精度，就需要在开展重建工作之前，先对点云进行分区操作，同时还要做好加权采样方面的处理事宜，以此来保证数据在那些关键结构所在的区域能够维持相对较高的空间分辨率^[1]。与此还可以引入那种基于法向量一致性特点的优化算法，从而确保在曲面拟合的过程当中，既能保持几何连续性，又能保证法向平滑性。通过针对重建所得的结果展开残差分析以及精度评估等相关工作，便能够将拟合误差的来源予以量化处理，并且还能对后续模型优化工作给出相应的数据方面的依据。

4 提高三维激光扫描测量精度的优化对策

4.1 仪器校准与检测体系优化

仪器校准在保障三维激光扫描测量精度方面占据着极为重要的位置，其称得上是首要环节。激光扫描仪在长时间的使用进程里，会受到诸多因素的作用，像是温度出现变化、存在机械磨损情况、光学系统逐步老化以及电子元件产生漂移等等，这些因素都可能导致测距以及角度测

量的准确性慢慢有所降低，进而致使系统性误差不断累积起来。建立起较为完备的仪器检测与校准体系，对于保持设备性能的稳定状态有着非常关键的作用^[2]。校准工作一般涵盖对测距精度、角度精度、扫描平面平整度、光轴对准性以及内部时钟同步性等多个方面的检测。在实际的操作环节当中，可以借助高精度的基准装置或者标准靶标，凭借对比测量的方式去确定仪器的误差参数，之后再开展模型化的修正操作。除此之外，把定期在室内进行的静态标定和在现场实施的动态检核相互结合起来，能够有效地消除仪器在不同环境条件之下所产生的偏差。为了提高校准的效率以及可重复性，近些年来部分相关研究引入了自动化标定平台以及智能检测算法，这使得误差识别与补偿的过程变得更加高效且精确。通过构建起系统化、标准化的仪器检测体系，不但能够保证扫描结果的稳定状况，而且还能为后续的数据处理以及模型重建给予可靠的基础精度保障。

4.2 测量流程与方案设计改进

在三维激光扫描项目当中，科学且合理的测量流程以及方案设计，其对于最终所获取数据精度所产生的影响同样是极为关键的。在进行测量方案设计的时候，务必要充分考量场景所具有的特征、所使用的设备性能状况、目标所需要的精度水平以及外部环境的具体条件，从而达成点位布局较为合理、扫描能够充分覆盖、数据重叠程度也较为充足的良好效果^[3]。为了避免出现遮挡以及盲区这样的现象，应当依据被测对象的几何特征来对多站点的布置加以规划，并且要设置适量的重叠区域，如此一来，在后续开展配准时才能够拥有足够的公共特征点。就室外场景而言，还必须充分考虑到气象条件方面可能出现的变化、太阳辐射所造成的影响以及地表反射呈现出的特性，合理地去选择扫描的时段和角度，从一开始便着手减少来自外部的干扰情况。测量之前所做的外业准备工作同样有着不容忽视的重要性，这其中包含了控制点的布置工作、基准坐标系统的构建事宜以及针对仪器稳定性所进行的检查事项。在现场实施测量操作之时，必须要严格遵循分层扫描的相关规定，并且要实时对数据进行监控，以便能够及时察觉到异常点或者误测的现象，并对其进行修正处理。测量工作完成之后，应当马上开展数据的备份操作以及初步的质量评估工作，以此来防止出现信息丢失或者是误差不断积累的情况。通过对测量流程加以优化，进而达成从任务规划阶段、数据采集环节一直到后期处理整个链条的全方位质量控制，如此便可以大幅度提升点云数据的一致性以及整体的精度水平。

5 结语

基于点云的三维激光扫描技术因其具备高效、非接触以及全空间采集的优势特点,在工程测量、建筑数字化、地形建模、文物保护以及智能制造等诸多领域均得到了较为广泛的运用。本文全面且细致地分析了各类误差的具体来源及其相应的产生机理,深入探讨了点云处理环节以及精度控制方面的诸多关键技术要点,并且还提出了从仪器校准工作、测量方案的设计环节一直到算法优化层面的综合性提升策略方案。在未来的发展进程中,随着人工智能技术、传感融合技术以及自动化控制技术的不断进步与发展,三维激光扫描测量技术将会在测量精度、自适应性以及应用深度等方面持续不断地得到提升改进,进而为数字

化工程以及智慧城市建设给予更加可靠的数据支撑保障。

[参考文献]

- [1]王朔.三维激光扫描技术在地理信息与工程测量中的应用[J].数字技术与应用,2025,43(9):135-137.
- [2]黄悦东,张森原.三维激光扫描技术在复杂工程测量中的应用及其精度优化[J].科技视界,2025,15(9):66-69.
- [3]田正华,李庚新,汤伏全.基于残差改正模型的三维激光扫描点云坐标转换[J].地理空间信息,2019,17(8):98-101.

作者简介:郭晓锋(1980.7—),毕业院校:辽宁工程技术大学,所学专业:工程测量,当前就职单位:辽宁省自然资源事务服务中心,职务:专技八级,职称级别:高级工程师。