

三维激光扫描技术 及其在变形监测中的应用

周保兴 著

山东大学出版社

三维激光扫描技术及其 在变形监测中的应用

周保兴 著



山东大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

三维激光扫描技术及其在变形监测中的应用/周保兴著.
—济南:山东大学出版社,2018.1
ISBN 978-7-5607-5896-1

I. ①三… II. ①周… III. ①激光扫描—应用—变形
观测—研究 IV. ①TV698.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 291924 号

责任策划:宋亚卿
责任编辑:宋亚卿
封面设计:牛 钧

出版发行:山东大学出版社

社 址 山东省济南市山大南路 20 号

邮 编 250100

电 话 市场部(0531)88364466

经 销:山东省新华书店

印 刷:济南华林彩印有限公司

规 格:720 毫米×1000 毫米 1/16

10 印张 185 千字

版 次:2018 年 1 月第 1 版

印 次:2018 年 1 月第 1 次印刷

定 价:30.00 元

版权所有,盗印必究

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社营销部负责调换

前 言

目前,在对建筑物进行建设、安装和运营管理的过程中,为了保证其施工质量和运营安全,需要对建筑物在三维空间中的位置、形状、尺寸等特征参数进行快速、准确的测量,以便获取建筑物的形体特征;不仅如此,还要对建筑物形体特征随时间的变化情况进行监测,以判断建筑物的安全情况。传统测量方法都采用离散的数据采集方式,需要测量设置在重点部位的人工标志点。基于传统测量技术的监测点数量比较少,并且点的代表性不完全可靠,这会导致监测结果中仅包含有限的变形信息,不能对建筑物的真实变形情况进行全面、完整的描述,而且也限制和影响了测量数据及其相关信息资料的充分利用。

三维激光扫描技术是继 GPS 之后出现的测量新技术,利用该技术可以快速、准确地获取建筑物的点云数据,构建出建筑物的精细三维模型,并对建筑物特征进行准确的定量描述。该技术具有常规测量技术无可比拟的优势和广阔的应用前景。对该理论和技术的进一步深入研究,不仅有助于提高其测量和建模的精度,而且可以发挥该技术更大的潜力和作用。

本书主要针对三维激光扫描测量的关键技术及其在变形监测中的应用进行研究,包括多年的研究成果,主要包括:

(1)探讨了三维激光扫描系统的误差模型,设计了相应的精度测试方案,对 FARO FOCUS^{3D} 扫描仪进行了精度检测,分析了不同扫描距离、扫描分辨率和扫描入射角度对扫描精度和点云数据质量的影响规律,并对扫描系统探测变形的能力进行了检测,验证了该系统应用于变形测量的可行性。

(2)基于未确知滤波理论,对趋势面粗差探测方法进行了改进,研究了基于未确知滤波的趋势面粗差探测方法。该方法不仅能探测到较小的粗差,而且还能有效地区分点云数据中的粗差和异常值。探讨了二维小波变换技术

的原理及关键问题,并将其应用到点云数据的光顺去噪,取得了较好的效果。

(3)分析了各种点云数据分割方法的适用性,根据建筑物点云数据的特点,研究了基于DBSCAN密度划分和G-K聚类算法的点云数据多层递进分割策略,并以实测建筑物点云数据为研究对象,验证了该方法应用于建筑物点云数据分割的有效性。

(4)探讨了基于解析几何原理的建筑物规则形体特征提取方法,对建筑物中的规则线、面特征进行了提取,取得了较好的效果。基于点云数据中的反射强度信息,结合小波变换模极大值特征提取技术,研究了基于点云强度图像的建筑物不规则线特征提取方法。以桥梁特征曲线提取为例,验证了该方法的可行性。

(5)根据建筑物的形体特征,对主成分分析(PCA)算法进行了改进,研究了基于点云数据主成分向量的建筑物三维空间姿态确定方法,构建了表征建筑物三维空间姿态的特征坐标系。以此特征坐标系的空间变换为基础,研究了建筑物整体变形的判断方法和具体的操作流程,通过实验验证了该方法的正确性和应用于建筑物整体变形分析的可行性。

(6)从建筑物变形监测对应点的获取方法入手,结合NURBS参数平面与其变形前后的参数曲面相对应的特点,研究了基于NURBS参数曲面的建筑物表面柔性变形分析方法。该方法能够监测建筑物曲面在三维空间中的微小变形。

本书的出版得到了山东省高等学校科技计划项目“融合多源空间数据的城市真三维模型构建技术研究”(J14LG07)、山东省交通运输厅科技计划项目“钢丝绳MPC符合材料进行空心板梁桥加固设计研究”(2017B97)、山东交通学院博士科研启动基金、山东交通学院教改课题“基于虚拟现实技术的三维实践教学平台构建研究”的资助。

由于作者水平有限,研究内容难免出现问题和错误,不当之处,希望得到各位专家和学者的指正。

作者

2017年10月15日

目 录

第 1 章 变形监测技术发展概况	(1)
1.1 研究目的及意义	(1)
1.2 建筑物常规变形监测技术	(3)
1.2.1 传统大地测量技术	(3)
1.2.2 智能全站仪测量技术	(4)
1.2.3 GPS 测量技术	(4)
1.2.4 激光跟踪测量技术	(4)
1.2.5 摄影测量技术	(5)
1.3 三维激光扫描技术的研究进展	(5)
1.3.1 点云数据采集技术	(6)
1.3.2 数据预处理技术	(7)
1.3.3 曲面重建技术	(10)
1.3.4 特征提取技术	(13)
1.3.5 三维激光扫描技术的应用	(14)
第 2 章 地面三维激光扫描系统原理	(19)
2.1 三维激光扫描系统的工作原理	(19)
2.1.1 激光测距系统	(20)
2.1.2 激光扫描系统	(21)
2.1.3 CCD 相机	(21)
2.2 三维激光扫描系统的精度分析	(21)
2.2.1 影响三维激光扫描精度的因素	(21)
2.2.2 三维激光扫描系统的精度检测	(24)

2.3	三维激光扫描系统探测变形能力的检测	(33)
2.3.1	实验方案	(33)
2.3.2	实验数据处理及分析	(34)
2.4	三维激光扫描系统作业流程	(36)
第3章	点云数据噪声剔除方法研究	(38)
3.1	点云数据噪声分布的特点	(38)
3.2	点云数据的降维处理	(39)
3.2.1	点云数据降维的主要方法	(39)
3.2.2	变换坐标系的确定	(40)
3.2.3	坐标转换的原理	(41)
3.3	基于趋势面滤波的粗差探测方法	(42)
3.3.1	趋势面模型的建立	(42)
3.3.2	模型参数的确定	(42)
3.3.3	粗差判定准则的确定	(43)
3.3.4	实验数据处理与分析	(43)
3.4	改进的趋势面粗差探测法	(46)
3.4.1	未确知有理数的数学基础	(46)
3.4.2	二维未确知滤波的原理	(47)
3.4.3	基于二维未确知滤波的趋势面粗差探测方法	(47)
3.4.4	实验数据处理与分析	(49)
3.5	基于小波变换的点云光顺方法	(54)
3.5.1	小波变换技术的基本原理	(54)
3.5.2	基于小波变换的去噪方法	(56)
3.5.3	点云图像的去噪效果评价	(58)
3.5.4	实例数据处理与分析	(59)
第4章	点云数据分割及模型构建技术研究	(62)
4.1	建筑物形状特征分类	(62)
4.2	建筑物点云数据分割	(63)
4.2.1	DBSCAN 聚类算法	(64)
4.2.2	G-K 聚类算法	(67)
4.2.3	基于聚类分析的点云数据多层递进分割算法	(69)
4.2.4	点云数据分割实例分析	(72)

4.3 规则曲面的建模方法研究	(75)
4.3.1 平面拟合	(75)
4.3.2 球面拟合	(76)
4.3.3 圆柱面拟合	(76)
4.3.4 抛物面拟合	(77)
4.4 自由曲面的构建方法研究	(79)
4.4.1 NURBS 曲面的定义	(79)
4.4.2 NURBS 曲面插值	(79)
4.5 点云模型的精度评定	(83)
4.5.1 规则曲面模型的精度评定	(84)
4.5.2 自由曲面模型的精度评定	(84)
4.6 散乱点云数据的规则化	(86)
4.6.1 点云数据规则化原理	(86)
4.6.2 实例分析	(88)
第 5 章 基于点云数据的建筑物形体特征提取技术研究	(89)
5.1 建筑物形体特征分析	(89)
5.1.1 建筑物中的点特征	(90)
5.1.2 建筑物中的线特征	(90)
5.1.3 建筑物中的面特征	(91)
5.2 基于点云数据的建筑物特征提取方法	(91)
5.2.1 建筑物点特征的提取	(92)
5.2.2 建筑物线特征的提取	(94)
5.2.3 建筑物面特征的提取	(100)
5.3 建筑物曲面之间的几何关系特征	(102)
5.3.1 建筑物曲面约束的定义与分类	(103)
5.3.2 建筑物曲面约束关系识别	(105)
5.3.3 实例数据处理与分析	(107)
第 6 章 基于三维激光扫描的建筑物变形分析方法研究	(110)
6.1 基于建筑物特征的变形分析方法	(110)
6.1.1 点特征的变形	(110)
6.1.2 线特征的变形	(111)
6.1.3 面特征的变形	(113)

- 6.2 基于主成分分析的建筑物整体变形分析 (114)
 - 6.2.1 点云模型的特征提取 (114)
 - 6.2.2 基于特征坐标系的点云模型变形分析 (121)
 - 6.2.3 实验数据处理与分析 (124)
- 6.3 基于 NURBS 曲面的建筑物表面变形分析 (129)
 - 6.3.1 算法描述 (130)
 - 6.3.2 基于 NURBS 曲面的对应点确定 (130)
 - 6.3.3 变形量的计算 (132)
 - 6.3.4 实验数据处理与分析 (132)
- 参考文献 (138)

第 1 章 变形监测技术发展概况

1.1 研究目的及意义

随着社会的进步和经济的不断发展,大量的工程建设在各地展开,开始出现造型奇特、规模庞大的建筑物,这在工业工程与水利工程中最为普遍,如大型机械设备、大型体育场、大型天线、大型闸门和隧道等等。建筑物在设计、施工质量等方面的缺陷,会导致其相关部位或结构在施工和运营期间发生变形。若变形超出极限,就会影响到正常的使用,甚至发生灾难性事故,如溃坝、桥梁与建筑物的倒塌等。因此,在建筑物的建造、安装、运营过程中,为了保证工程施工质量和运营安全,对其空间位置、形状、尺寸等参数的控制都提出了较高的要求。这就需要对建筑物的结构或相关部位的形体特征进行精密测量,并对其在空间中的静态或动态变形情况进行监测。建筑物相关部位或结构的变形监测能够为判断工程建筑物的安全性提供必要的信息,其意义主要表现在两个方面:第一,掌握建筑物结构的稳定性,为建筑物的安全运营提供必要的信息,以便发现问题并且及时采取措施;第二,理解变形的机理,对建筑物的设计理论进行验证,可以进行反馈设计并确定建筑物的变形预报模型。当工程建筑物的安全受到威胁或者破坏性影响时,如何快速提供变形大小、预报变形趋势和分析变形原因,迅速采取措施,确保工程建筑物的结构和运营安全,就成为设计者面临的问题。因为建筑物及其结构的变形会导致比较大的灾害,因此,对建筑物的相关部位或结构进行变形监测和分析的研究在国内外受到了广泛重视。

传统测量方法,比如全站仪、GPS 接收机等,都采用离散的数据采集方式。也就是说,无论是对测量物体的形状进行测量,还是对测量物体的变形情况进行监测,都需要在建筑物的特征部位建立人工标志点(或观测墩)。这种离散测量点的数量较少,会导致监测结果中仅包含有限的变形信息,不能对建筑物的真实

变形情况进行全面完整的描述,而且也限制和影响了测量数据及其相关信息资料的充分利用。

三维激光扫描技术出现在 20 世纪 90 年代中期,是在 GPS 测量技术之后出现的测量新技术,是三维空间数据获取和重构的新技术,与传统的测量技术之间有很大的区别。它通过直接测量仪器中心到测量目标的距离和角度,计算出测量目标的三维坐标数据。该技术在扫描测量时,不需要在测量物体上设置任何专用测量标志,可以直接对其进行快速测量,并获取高密度的坐标数据,得到一个表示测量物体的点集,称为“点云数据”。它对传统的单点测量技术进行了彻底变革,使原有的“单点测量”方式变为“形体测量”方式。地面三维激光扫描仪已经开始出现在测绘行业,主要测量公司已经进入这一领域,并生产出了应用于测绘行业的扫描仪器。这标志着,三维激光扫描技术在测绘领域获得了认可。相对于传统的测量技术,三维激光扫描仪可以获取测量对象或表面的高分辨率点云数据,可以由方格网或者三角网对其进行快速建模,并且可以探测到测量物体局部细节的变形;对建筑物的形体测量和变形分析起着重要的作用。

将该技术引入建筑物形体测量与变形分析中,可充分利用测量物体上的大量自然地物作为测量点,来完成测量及变形分析工作。利用该技术进行测量和变形分析具有如下的优点:

(1)扫描测量的快速性。传统的经纬仪、全站仪等,它们对于采集复杂结构的海量点云数据有很大的困难,而三维激光扫描系统可以在短时间内快速获取建筑物表面的大量点云数据。

(2)扫描测量的高密度、高精度特性。在进行扫描作业时,可以对该系统的扫描间隔进行设置,获取高密度的点云数据。扫描测量的精度是由扫描仪本身的测量精度和模型构建精度决定的,目前扫描测量数据的建模精度可以达到 2 mm。

(3)扫描测量的自动化。该系统不仅可以直接获取建筑物的距离信号,而且可以控制其扫描过程,实现测量数据的自动化输出,具有良好的可靠性。

(4)扫描方式的实时、动态和主动性。由于三维激光扫描系统可以快速地扫描建筑物,获取三维点云数据,这就表现出实时、动态的特征;同时,该仪器为主动式扫描设备,可以随时对建筑物进行扫描测量,不受时间与空间的限制。

(5)扫描测量的非接触性。由于该扫描系统进行测量作业时并不需要接触被扫描的物体,因此,该系统可以测量那些不容易到达的目标物。在变形体进入加速变形甚至剧变破坏阶段,快速获取变形体的变形值对于准确预测灾害发生的具体时间起着重要的作用。地面三维激光扫描仪可不受干扰而独立地进行监测体的面式测量,并且可以利用快速、高密度采集的点云数据,对实体目标的三

维模型进行重构,全面地反映了被测物体的形状特征,可以为准确预测变形发生的时间提供第一手连续、可靠的数据及其相关信息资料。

(6)数据信息的丰富性。直接获得激光点所接触的物体表面的空间位置、反射强度和颜色等信息,可以在短时间内对所扫描测量的区域建立详细的三维立体模型,并能提供准确的定量分析。

(7)监测信息的可融合性。将全站仪、GPS等定位系统获取的坐标数据同点云数据进行联合处理,利用点云数据处理软件进行坐标转换,可以获得满足于各种工程需要的不同坐标下的三维点云坐标数据。

(8)对外界环境要求低。该技术不需要预先设置专用的瞄准和测量标志,无论白天还是夜间,都可以在复杂的现场和空间对被测物体进行快速的网格式扫描测量。

因此,将这种独特的、基于“面”式的空间观测技术引入建筑物相关部位或结构的形状测量和变形监测领域,探索其在该领域内的应用方法及理论,具有如下现实意义:

(1)提高了获取建筑物空间信息自动化的程度。扫描测量的点云数据可以详细地表达建筑物的细节信息,扫描测量受外界环境影响小,不需要布设专用的测量标志,可以密集、完整地对所测量的区域进行数据采集。

(2)利用三维激光扫描测量技术得到的建筑物点云模型,是海量离散采样点对建筑物的完整描述,该模型的数据结构比较简单,数据的存储空间比较小。

(3)点云数据经处理及建模后,可以得到整个建筑物表面的变化信息,对该测量结果进行研究,可以掌握建筑物变形的发展规律,进行建筑物安全状况的预报研究,使生命和财产的损失降到最低点。

目前,基于三维激光扫描技术的建筑物形体测量及变形监测理论的研究和应用已经逐步得到关注,但是与其相关的理论体系和通用数据处理方法还没有形成。各种工程应用也正迫切地希望得到三维激光扫描技术的支持。鉴于三维激光扫描技术的应用前景以及国内应用相对滞后的现状,根据大型建筑物施工、安装、运行的特点,结合三维激光扫描技术的原理,研究操作简便、适应性强、点云数据处理方便快捷的建筑物形体测量及变形监测技术具有较高的工程实用价值。

1.2 建筑物常规变形监测技术

1.2.1 传统大地测量技术

传统大地测量技术主要以经纬仪、水准仪、全站仪等大地测量手段为主,其

测量内容包括角度测量、距离测量和高度变化的测量,该技术被广泛地应用于各种建筑物的形体测量及变形监测。其测量的精度可达到毫米级,可以满足建筑物测量的精度要求,目前已成为建筑物形体测量和变形监测中最广泛应用的一种方法。其特点为操作简单、易行,成本低,数据处理简单。但是该方法在有限的时间内能够获取的监测点的密度较小,并且只能获得预先设置好的监测目标的点位,不易实现自动化,测量效率低。

1.2.2 智能全站仪测量技术

智能全站仪又称为“智能型电子全站仪”或“测量机器人”,它可以代替人工进行自动搜索、跟踪、识别以及精确瞄准测量目标,测量出所需要的距离、角度、三维坐标以及影像等空间信息。该仪器具有电动马达驱动和相应的程序控制系统,并利用了通信系统、激光及 CCD 测量技术,可以实现全自动化的测量工作,包括目标自动识别、照准、测距、测角、目标跟踪、记录等测量工作。智能全站仪可以自动寻找并快速、精确地照准测量目标,在很短的时间内观测完一目标点,并能够对成百上千个测量目标进行持续和重复观测,可以对建筑物等目标的变形情况进行自动化的监测。但是该方法在有限的时间内能够获取的测量点的密度较小,是一种离散的数据采集方式。

1.2.3 GPS 测量技术

GPS 测量以其测站点之间无须通视、全天候观测、可以获取三维信息、测量范围大等特点,已经成为现代测量的主要技术手段。但在 GPS 测量系统中应用的电磁波传播速度非常快,当电磁波信号穿过非真空状态的大气层时,要受到大气中电离层和对流层的多次干扰。虽然 GPS 系统可以对此进行处理计算,但在某些特殊的区域仍会存在系统性的误差;除此之外,城市高层建筑物或山区树木等对信号的影响,会导致信号传播的多路径效应,在位置计算时也会出现一定的测量误差。因此, GPS 测量技术比较适合在视野比较开阔、障碍物比较少的工程建设或野外勘探定位中应用,在城区等建筑物比较密集的区域,使用该技术,会出现接收不到卫星信号或者卫星信号的质量不佳等情况,致使定位测量误差比较大,不能显示出 GPS 测量技术的优越性。

1.2.4 激光跟踪测量技术

激光跟踪测量系统是由单频激光干涉测距测量方式构成的球坐标测量系统,其测量的基本原理同全站仪基本相同,但是其进行距离测量的方法与全站仪不同。利用干涉法进行距离测量的精度比较高,速度快,同全站仪相比较,其整

体测量性能好,并且测量精度高。该仪器在 50 m 的测量范围内,其坐标重复测量精度可以达到 5 ppm($5 \mu\text{m}/\text{m}$),坐标测量精度达到 10 ppm($10 \mu\text{m}/\text{m}$)。对于某些测量指标,如测角精度,与全站仪相比要低一些,其测量的范围也比全站仪要小。

1.2.5 摄影测量技术

摄影测量技术是基于立体视觉原理来确定出测量物体的三维形状,它主要应用于测量目标的三维特征尺寸测量,但测量时需要设置一些特制的标志,比如在被测物体的表面粘贴一些反射标志。在传统的针孔模型的基础上,发展出了摄影测量的一般模型,但要进行高精度的测量计算,还需要对透镜畸变的影响等因素进行考虑。根据建立的摄影模型对测量目标进行三维测量时,首先要确定出传感器的内部参数和外部参数。因此,在利用该技术进行测量前,需要借助精密标靶,获取该标靶的像面坐标及其对应的空间坐标系中的坐标,根据两坐标的转换关系求得转换参数,完成内部参数和外部参数的标定。

因此,该技术对测量的角度和位置提出了较高的要求,并且测量的数据为照片影像,要得到测量目标的立体模型就要利用影像照片构建立体像对。因此,在进行外业测量时需事先设置大量的物方控制点,而且要求控制点的空间分布合理。这限制了该技术在复杂测量环境中的应用。

由以上分析可知,传统的大地测量技术都是基于单点数据采集技术的,其外业测量的工作量比较大,观测的时间比较长,对外界条件要求比较高,测量得到的数据比较离散,不能描述测量目标的细部特征。而利用地面三维激光扫描系统扫描测量的点云数据可以很好地解决上述问题,地面三维激光扫描技术的出现克服了野外测量获取数据不足及测量工作量大的缺点,不仅可以获取高精度的测量数据,与干涉雷达、摄影测量、机载激光雷达等测量技术相比,其成本也较低。

1.3 三维激光扫描技术的研究进展

目前,随着科技的不断发展,三维激光扫描技术的硬件性能越来越高,数据处理软件功能越来越完善。凭借数据采集及处理方法的方便快捷、稳定、高效等特点,地面三维激光扫描系统在地形测量、工程测量、建筑物和文物保护以及变形监测等领域已经得到广泛应用。

1.3.1 点云数据采集技术

按数据采集方法的特性和应用,点云数据采集技术可分为接触式测量与非接触式测量两大类。接触式测量方法的优点是对测量物体表面的颜色和光照没有特别要求,能比较精确地测量物体的轮廓边缘,并且测量精度高;缺点是测量速度较慢,测量效率比较低,并且不能测量容易变形、容易破碎、质地比较柔软以及超薄的物体。非接触式测量方法主要是利用光学、磁学、声学等领域中的基本原理进行数据采集,将一定的物理量通过适当的算法转换为被测实物模型表面的坐标点。非接触式测量方法的优点是测量速度快,且能测量软质物体;缺点是基于光学的非接触式测量方法不容易确定物体的轮廓边缘,并且受光照条件和被测实物模型表面状况的影响较大。

目前,用于建筑物形体测量和变形监测的三维激光扫描系统主要为非接触式的。日本的东京大学在1997年进行了该测量系统的集成和研究,取得了一定的成果。除此之外,美国、德国和中国香港的一些大学及研究机构也积极开展了这方面的研究工作。1998年,美国的斯坦福大学进行了地面固定激光扫描系统的集成和实验,并取得了良好的效果,随后该大学开展了较大规模的研究工作。在意大利的佛罗伦萨,1999年,来自华盛顿大学的学者利用三维激光扫描技术对米开朗基罗的大卫雕像进行了扫描测量,包括激光扫描和获取彩色数码相片。为了使三维激光扫描系统逐步产业化,国际上许多研究机构及公司对地面三维激光扫描系统进行了研发,并推出了各自的相关产品,它们分别是 Surphaser、Optech、Leica、Trimble、Z+F、I-Site、Faro、Topcon、RiegI 等。从低端到高端,从近距离测量到远距离测量,从相位式到脉冲式,各式各样的扫描仪竞相出现,种类繁多。

我国在“863”计划中重点支持三维激光扫描系统的研究,并取得了许多成果。为了测量大型工业及复杂场景的三维信息,西北工业大学和法国 MENS I 公司在2000年12月成立了联合研发中心。同时,国产三维扫描仪的研制计划也开始在“863”项目中出现。在深入研究了三维激光扫描技术与现代测量理论的基础上,武汉大学地球空间信息技术研究组研发出了“LD 激光自动扫描测量系统”,该系统为集成多传感器自动化三维激光测量系统。除此之外,天远三维激光扫描仪(OKIO)已在世界同类产品显示出较强的竞争能力。在以上各个领域所开展的研究和实验工作推动着三维激光扫描技术的不断发展。表 1-1 列出了不同生产厂家生产的地面三维激光扫描系统的性能对比。

表 1-1 常见地面三维激光扫描系统的参数对比

系统	HDS3000	RieglZ420i	ILRIS-3D	Imager5003	I-site4400
产地	美国	奥地利	加拿大	德国	澳大利亚
测距精度	±4 mm	A: ±5 mm M: ±10 mm	±7 mm/100 m	±1 mm	50 mm@400 m
测程	150 m	250~800 m	3~1500 m	—	3~400 m
采样频率	1000 p/s	8000 p/s	2000 p/s	1500 p/s	4400 p/s
测角精度	±12"	H:0.0025° V:0.002°	1.6"	H:0.02° V:0.02°	2 mrad
点位精度	±6 mm	±5 mm	10 mm/100 m	—	—
扫描视场	V:270° H:360°	V:80° H:360°	V:±20° H:40°	V:310° H:360°	V:80° H:360°
光斑大小	<6 mm@50m	30 mm@100m	0.17D+12 mm	3~5 mm	12 mm
激光光源	532 nm 3R 级	CLASS-1 红外光源	CLASS-1	3R 级	3R 级
相机	内置	外置	内置	—	内置

注:V 表示垂直角度;H 表示水平角度;A 表示平均值;M 表示最大值;D 表示扫描距离;R 表示激光安全等级。

不同三维激光扫描仪器的工作原理不同,其应用领域也有所不同。脉冲式三维激光扫描仪适用于扫描距离较远的工作,但是测量精度较差,扫描速度较慢,可进行水利水电测量、隧道测量、矿山测量、地质变形监测、铁路测量、城市规划测量等大场景测量工作;而相位式则具有扫描速度较快、要并列精度较高,但是扫描距离短的特点,因此适合于考古、飞机和轮船等制造业、石油钻井、医学、影视、科研等领域,进行密集复杂的测量工作。所以针对不同的应用情况,需要选用不同的三维激光扫描仪进行工作。

1.3.2 数据预处理技术

由于扫描系统本身的缺陷、扫描测量方法和物体表面特性等因素的影响,扫描测量得到的点云数据不可避免地会存在一些缺陷,比如点云数据的噪声、模型表面数据的缺失、多视测量、数据失真和数据冗余等问题。此外,随着各种测量方法速度和效率的不断提高,测量过程中往往产生非常大的数据量,所以还需进

行数据的精简。因此,为了能更精确地从测量数据中重建曲面,需要对测量数据进行预处理,主要包括如下几个环节:

1.3.2.1 点云数据去噪技术

由于扫描测量仪器受外界环境的影响而产生振动以及被测量目标表面粗糙或镜面反射等因素,测量数据中会包含噪声。这会严重影响重建曲面的精确性和光顺性,所以在曲面重建前必须对数据进行光顺去噪处理。根据点云模型的不同,去噪算法大致可分为三类:

(1)基于网格的点云去噪算法:Taubin(2001)等提出了基于拉普拉斯的平滑算法。该方法比较简单、容易实现,但采用统一的处理方式对不同方向的曲面数据进行处理时,若遇到不规则的连通网格,比较容易出现网格形状的变化,使点云数据不稳定;当处理大型网格数据时,其收敛速度比较慢,并且对全局行为控制能力不足。Desbrun等(1999)和 Ohtake等(2003)将拉普拉斯算法推广到非规则网格。但上述方案都是各向同性的,对特征点与噪声点不加区别地进行平滑,这严重限制了该方法的广泛应用。

针对各向同性算法的缺点,Perona和Malik(1990)改进了传统的变分方程,提出了一种非线性的、可以用于图像边缘检测的各向异性噪声剔除方法。该方法既能剔除噪声,又能保持图像的边缘特征,减弱了图像边缘处的平滑强度。为了能在平滑过程中保持模型的特征,Clarenz等(2000)将各向异性的几何流离散化,并应用于三角网格。Desbrun等(2000)为了能够对高维空间中的双变量进行去噪并保持特征,将各向异性扩散用于高度场;Tasdizen等(2002)则将各向异性扩散应用到表示曲面的水平集的法线;而Bajaj和Xu(2003)为将各向异性思想推广到三角网格上,将各向异性扩散与Loop子分的限定方程组合,提出了各向异性几何流的网格去噪算法。以上各算法能够保持点云数据的特征,但却需要利用高阶的几何流,其算法的复杂程度比较高。

Fleishman等(2003)和Jones等(2003)借鉴图像处理中双边滤波器的思想,在三维网格模型去噪时,应用了高斯(Gauss)滤波和保特征权函数相结合的方法,在去除噪声的同时,较好地保持了点云模型的特征。

基于网格的方法要对待平滑点的邻域构造一个局部拓扑结构或对这个局部邻域进行参数化。但由于点云模型数据中不包含任何拓扑信息,若要对点云模型进行散乱点建模、三角化或者参数化,则需付出很大的代价。

(2)基于曲线或面逼近的去噪平滑算法:该方法的去噪原理为根据点云数据构造相应的曲线或曲面,使得曲线或曲面在规定的条件下最接近扫描测量的点云数据,然后把偏离曲线或曲面的点看作噪声点予以剔除。基于最小二乘的原理,Hosaka(1969)提出了一种既可以用于曲线光顺,也能用于网格光顺的空间