Y1526700

分类号:P22

10710-20050186

长安大学

硕士学位论文

机载 LIDAR 技术用于数字地面的应用研究

何正斌

导师姓名职称	田永瑞 副教授		
申请学位级别	硕士	学科专业名称	大地测量学与测量工程
论文提交日期	2008 年 5 月 11 日	论文答辩日期	2008 年 5 月 29 日
学位授予单位	长安大学		
答辩委员会主席	杨永崇 教授		
学位论文评阅人	刘长星 副教授　杨建华 副教授		

摘 要

随着计算机技术、空间技术和信息技术的迅猛发展，人类社会已经步入了信息时代，空间信息的获取、处理和应用成为研究的三大热点。人们在空间数据的获取手段虽然已有很大的进步，但数据的获取的质量、周期与成本等仍需进一步的提高和改进。20 世纪 80 年代末，机载 LIDAR 技术在三维地球空间信息的实时获取方面产生了突破性的进展，为获取高时空分辨率地球空间信息提供了一种全新的技术手段。使人们从传统的人工单点数据获取变为连续自动数据获取，使数据处理的自动化、智能化程序提高。虽然该技术发展时间较短，但硬件技术已能满足生产的需要，而数据后处理还存在着许多不足。

本文系统地探讨了机载 LIDAR 技术的应用、数据滤波和分类处理的理论和方法。首先，介绍了机载 LIDAR 技术的发展及国内外的研究现状，分析了机载 LIDAR 技术在一些领域的应用；其次，详细探讨了机载 LIDAR 技术的系统组成以及工作原理；最后，在点云数据滤波处理中，对现有各种滤波算法进行了综合评价，指出了现有方法的不足，在此基础上分别用局部多项式最小二乘曲面拟合、移动窗口最小二乘曲面拟合和基于坡度的伪扫描线三种不同的滤波方法对点云数据进行了滤波处理，取得一定的滤波效果，并对滤波结果进行定性和定量的评价，并得出一些结论。

关键词：机载 LIDAR、点云数据、滤波、数字地面模型

ABSTRACT

With the rapid development of the computer technology, spatial technology and information technology, human community has already followed an information ages. The acquisition, processing and application of the spatial information have been the three greatly research focus. Though we have had greatly progress in means of the spatial data acquisition, the aspects about the quality, period and cost of the spatial data acquisition are needed to be enhanced improved. By the end of 80s in 20 centuries, in the aspect of many grades and 3D earth spatial information acquisition, LIDAR have produce the gross breakthrough, which offered a kind of completely new technical means for the high temporal-spatial resolution spatial information acquisition, which made the people in the aspect of data acquisition to change from traditional artificial single point to continual and automatic acquisition ,and which made the data processing automation and intellectualization to be possible. Though the development time of this kind of technology is shorter, the hardware technology has already satisfied to the production demand, while there still have some shortages about the after treatment of the data.

This thesis discusses systemically the application of LIDAR and the theory and method of data filtering and classify. Firstly, this thesis introduces the development of LIDAR measuring high technology and domestic and international research present conditions. Secondly, this thesis discusses the system compositions and operational principle of LIDAR in detail; Finally, this thesis depicts all kinds of the filtering wave arithmetic; Based on this, we use three methods: Filtering of Least Square Method for Interpolation Polynomial, Filtering of Least Square Method for Interpolation Polynomial with moving window, Filtering of False Scanning Line Basing on Slope. And make quantitative and qualitative evaluation of the filtering results and get some conclusion.

Key words: LIDAR, points cloud, filtering, DEM

论文独创性声明

本人声明：本人所呈交的学位论文是在导师的指导下,独立进行研究工作所取得的成果。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：何正斌　　2008 年 6 月 3 日

论文知识产权权属声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属学校。学校享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为长安大学。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

论文作者签名：何正斌　　2008 年 6 月 3 日

导师签名：田永清　2008 年 6 月 3 日

第一章 绪论

1.1 引言

激光是20世纪人类最重要的发明之一。由于激光具有单色性、方向性、相干性，具有很高的单光子辐射能量，在大气传输中很少发生绕射，所以在军事、环境、工业、医学和航空航天等许多方面得到了广泛的应用。而激光扫描技术LIDAR (Light Detection And Ranging) 正是一种利用激光(束)所具有的这些特性来探识物体和测定距离的系统。随着相关技术的发展以及社会需求的不断扩大，机载LIDAR技术已成为一种新兴的高新技术。机载LIDAR系统能够快速地获取精确的高分辨率的数字地面模型（DTM-Digital Terrain Model）以及地面物体的三维坐标，进而获取地表物体的垂直结构形态，同时配合地物的视频或红外成像成果，增强了对地物的认识和识别能力。它的发展为获取高时空分辨率的地球空间信息提供了一种全新的技术手段，使人们从传统的人工单点数据获取变为连续自动数据获取，提高了观测精度和速度，使数据的获取和处理向智能化和自动化的方向发展。机载LIDAR是激光测距技术、计算机技术、高精度动态载体姿态测量（也叫惯性导航系统INS-Inertial Navigation System）技术和高精度动态GPS（全球定位系统，Global Position System）差分定位技术迅速发展的集中体现，代表了目前航测技术的尖端。

1.2 选题的背景和意义

1.2.1 选题的背景

机载LIDAR传感器发射的激光脉冲能部分地穿透树林遮挡，直接获取真实地面的高精度三维地形信息，具有传统摄影测量方法无法取代的优越性，而且机载LIDAR不受日照和天气条件的限制，能全天候地对地观测，这些特点使它在灾害监测、环境监测、海岸观测、资源勘察、森林调查、测绘和军事等方面的应用具有独特的优势，在某些情况下，有其他传感器不可替代的优势。在一些特殊领域，比如森林地区，机载LIDAR技术相对于传统测绘手段而言又显示出其独特的优越性。对于同一项任务，利用机载LIDAR技术来完成比用传统技术手段完成更方便、更容易、更省时省力、更容易实现自动化。

1.2.2 LIDAR 技术的优势

LIDAR 作为信息获取的一种新模式，其理论依据、集成方案和相关技术、数据处理等方面与传统的遥感系统有所不同。相比而言，LIDAR 在应用中主要有以下几个方面的优势：

第一、LIDAR 采用主动性的工作方式，主动发射测量信号，通过探测自身发射光的反射来获得目标信息，无需借助外部光源，因此不受日照和天气条件的限制，能够全天候实施对地观测，这些特点使它在灾害监测、环境检测、资源勘察、军事等方面的应用具有独特的优势。

第二、LIDAR 发射的激光脉冲具有很强的穿透能力，能部分地穿透树林遮挡，直接获取真实地面的高精度三维地形信息。

第三、LIDAR 能快速获取大面积的目标空间信息，实现空间数据的及时采集，从而可以应用于需自动监控的行业。

第四、LIDAR 通过对目标的直接扫描来描述目标特征，使用庞大的点阵和浓密的格网来获取目标信息，采样点之间的间距很小，具有精度高、密度大的特点。

第五、LIDAR 作业安全，它能进行危险地区（如沼泽地带、大型垃圾堆等）的测图工作。

第六、LIDAR 既可以作为获取地表资源、环境信息的一种重要技术手段，又可以同其它技术手段集成使用（例如可与传统的航空摄影测量、数字摄影测量、以及红外遥感等结合组成一套新的功能更强的遥感系统），为数字地球信息智能化的处理提供新的融合数据源。

第七、LIDAR 作业周期快，易于更新，而且时效性强，24 小时内可提取测区 DEM 数据。

1.2.3 研究的意义

机载 LIDAR 系统作为一种主动式对地观测系统，通过激光雷达传感器发射的激光脉冲经地面反射后被 LIDAR 系统接收能直接获取高精度三维地表地形数据，这是对传统摄影测量技术在高程数据获取及自动化快速处理方面的重要技术补充。它不仅能快速

获取高程数据，且在遥感测图及其它领域取得了一系列技术突破，如在地形测绘、环境检测、三维城市建模地球科学、行星科学等诸多领域具有极好的发展前景和很强的竞争力，而且整体经济效益明显优于普通摄影测量。在过去几十年中，数字摄影测量是获取数字高程模型（DEM-Digital Elevation Model）数据的主要途径。但是由于航空影像存在模糊、失真、深度断裂和相互遮挡等复杂情况，使影像信息经常出现不完全性和多义性，这使得现有的自动测图算法适应性差，还无法完全代替机助测图。近年来，LIDAR技术的革命性发展，使快速和低成本的大面积地面测量成为可能。利用 LIDAR 数据记录多次回波信号和直接获取地表高程信息的特点，通过对 LIDAR 原始数据的自动处理获取 DEM 成为目前世界范围内的一个热门的研究内容，也是 LIDAR 技术在目前阶段的一个主要应用。本文在后面部分主要研究了机载 LIDAR 的点云数据滤波处理，这是由点云数据生成 DEM 前的关键步骤。

1.3 机载 LIDAR 国内外的发展与现状

在地球科学和行星科学领域机载激光扫描有着广泛的应用。利用激光作为遥感设备可追溯到 30 多年以前。从 20 世纪 60 年代到 70 年代这段时期，人们进行了多项试验，结果都显示了利用激光进行遥感的巨大潜力，其中包括激光测月和卫星激光测距。美国早在 20 世纪 70 年代阿波罗登月计划中就应用了 LIDAR 技术。20 世纪 80 年代，LIDAR 得到了迅速发展，包括当时美国 NASA 研制的大气海洋 LIDAR 系统(AOL-Atmosphere Ocean Lidar)以及机载地形测量设备(ATM-Airborne Terrain Measurement)等机载系统。但机载/空载激光扫描测高技术直到最近十几年才取得了重大进展，研制出精确可靠的激光测高传感器。1984 年就有研究者从事机载激光地形测量的研究[1]；德国斯图加特大学摄影测量学院在 1988 年开始研究机载 LIDAR 地形断面测量系统，目前在 LIDAR 数据的地物提取、城市建模等方面有一定的研究成果；德国汉诺威大学制图与地理信息学院（Instiute for Cartography and Geoinformatics，University of Hannover，Germany）在建筑物自动提取与重建方面成果也较为突出；荷兰测量部门自 1988 年就开始从事利用激光扫描测量技术提取地形信息的可行性研究，其中荷兰 Delft 技术大学地球观测与空间系（DEOS，Delft University of Technology，Netherlands）在植被及建筑物的高速自动识别与分类以及道路的半自动提取等方面取得了初步成果[2]；加拿大卡尔加里大学 1998 年进行了机载 LIDAR 系统的集成与试验，通过对所购得的激光扫描仪与 GPS、INS 和数据通讯设备的集成实现了一个机载 LIDAR 三维数据获取系统，并进行了一定规模的试

验，取得了理想结果；日本东京大学 1999 年进行了地面固定激光扫描系统的集成与试验。20 世纪 90 年代，随着相关技术的不断成熟，机载 LIDAR 技术得到了蓬勃发展，欧美等发达国家先后研制出多种机载 LIDAR 系统，如 TopScan、Optech、TopEye、Saab、Fli_map、TopoSys、HawkEye 等多种实用系统。Leica 公司也推出了机载 LIDAR 测高仪 Leica ALS50[3]。

机载 LIDAR 技术的研究在国内起步较晚。北京遥感应用研究所李树楷教授等研究的机载激光扫描测距/成像系统于 1996 年完成了该系统原理样机的研制，该系统还有别于目前国际上流行的机载 LIDAR 系统，它将激光测距仪与多光谱扫描成像仪共用一套光学系统，通过硬件实现了 DEM 和遥感影像的精确匹配，直接获取地学编码影像[4]。武汉大学李清泉教授等开发研制了地面激光扫描测量系统[5]。由于国内目前还没有高精度的 INS 系统以及性能(激光强度、激光功率、脉宽、测距精度)可靠的激光扫描测距装置，所以，国内目前还没有成熟的机载 LIDAR 系统，也没有生产可供商业运行的 LIDAR 设备厂家，只有一些提供 LIDAR 技术服务和设备销售的公司，如提供国外 LIDAR 设备代理的中翰仪器有限公司、富斯达电子科技有限公司；采购了 LIDAR 设备具有获取和代理 LIDAR 数据的公司有北京星球数码科技公司、山西亚太数字遥感新技术有限公司、广西桂能信息工程有限公司；提供对 LIDAR 数据的处理公司有陕西煤航以及各地的大型勘测遥感院。LIDAR 技术系统在国内的理论算法研究只有少数几个单位开展，如中科院遥感所、武汉大学测绘学院、中国测绘科学研究院等，相关研究主要集中在激光测高数据的滤波和建筑的三维重建等。如移动曲面拟合滤波算法[6]、自适应形态学滤波法[7]，还有一些建筑物重建方法[8-11]。这些都只是对特定问题的数据处理算法的研究，目前国内还没有自行研制的成熟的 LIDAR 数据处理软件出现。

尽管机载LIDAR技术发展已有十几年的历史，硬件技术也不断发展，绝大部分属于硬件技术及系统集成的问题已得到解决，已有不少成熟的商用系统，但数据后处理的研究还相对滞后[12]。国际上今后一段时间的发展方向是开发研制出实用、可靠的激光扫描数据处理软件。

当前，激光扫描技术总的发展趋势是：

1、激光扫描的脚点密度会不断提高，可提供越来越多次的回波分析。同时，通过对大激光束脚点的回波信号的波形分析来进行森林资源普查以及测定植被参数也是今后发展的一个热点方向。

2、将实现多传感器平台的集成，目前主流的激光扫描仪生产厂商推出的新产品大都同时搭载有中小像幅的数码相机。由于激光扫描仪提供的近红外波段的强度信号质量较差，一些系统还提供由集成传感器生成的红外图像。由于任何方法都具有局限性，因此多源数据的融合、多种处理方法的集成将是数据采集的发展方向[13]。

3、在激光数据的处理技术方面还存在相当大的发展空间，主要针对数据的压缩、滤波、分类、识别、回波强度分析。

4、由于在地物提取和房屋建模上存在困难，需要将多种数据结合起来进行处理，从而获得更大的信息量。例如，综合GIS 的二维信息[14]，由点云引导的数字影像上特征匹配与编组，城市建模三维模型中纹理的自动粘贴；最终实现多数据源的完全融合。

5、不同种传感器的配准算法也从早期的基于点特征逐步发展到点、线特征联合处理，并在配准中利用稳健估计的方法提高算法的稳定性和精度。吸收和借鉴其它学科（如计算机视觉）取得的研究成果，使配准算法具有更高的自动化处理能力。

6、地物的自动提取会从低级的视觉处理算法（如特征提取和编组），逐步发展到高一级的处理（如引入知识推理、使用更多的语义信息），利用更多的数学工具如神经网络、遗传算法等等。

1.4 本文研究的主要内容

本文主要研究的内容包括：

1、论述了机载 LIDAR 研究背景、LIDAR 技术的优势、及国内外的发展状况。

2、介绍了机载 LIDAR 系统的工作原理及系统组成；从不同方面对 LIDAR 与航测进行了比较；介绍了机载 LIDAR 的主要应用领域。

3、阐述了机载 LIDAR 扫描数据处理的一般流程，总结了点云数据的特点以及点云数据组织的方法。

4、阐述了机载 LIDAR 扫描数据滤波的方法并进行了讨论，介绍了本文数据处理的方法，以及方法间的比较和评价指标，并举例验证算法。

5、探讨了点云数据的地物提取的方法。

第二章 机载 LIDAR 技术

2.1 机载 LIDAR 原理

机载 LIDAR 对地定位原理：若空间有一向量，其模为 S，方向为（φ，ω，κ）如能测出该向量起点 O_s 的坐标（X_s，Y_s，Z_s），则该向量的另一端点 P 的坐标（X，Y，Z）可唯一确定。对于机载 LIDAR 系统来说，起点 O_s 为遥感器光学系统的投影中心，其坐标（X_s，Y_s，Z_s）可利用动态差分 GPS 求出；向量 S 的模 S 是由激光测距系统测定的机载激光测距仪测量投影中心到地面激光脚点间的距离，姿态参数（φ，ω，κ）可以利用高精度姿态测量装置进行量测获得。但还必须顾及到一些系统参数，包括激光测距光学投影中心相对于 GPS 天线相位中心的偏差，激光扫描器机架的三个安装角，即倾斜角、仰俯角和航偏角，还包括 IMU(惯性测量单元 Inertial Measurement Unit)相对于 GPS 的位置偏差及 IMU 机体同载体坐标轴系间的不平行等。这些参数都需要通过一定的检校方法确定。

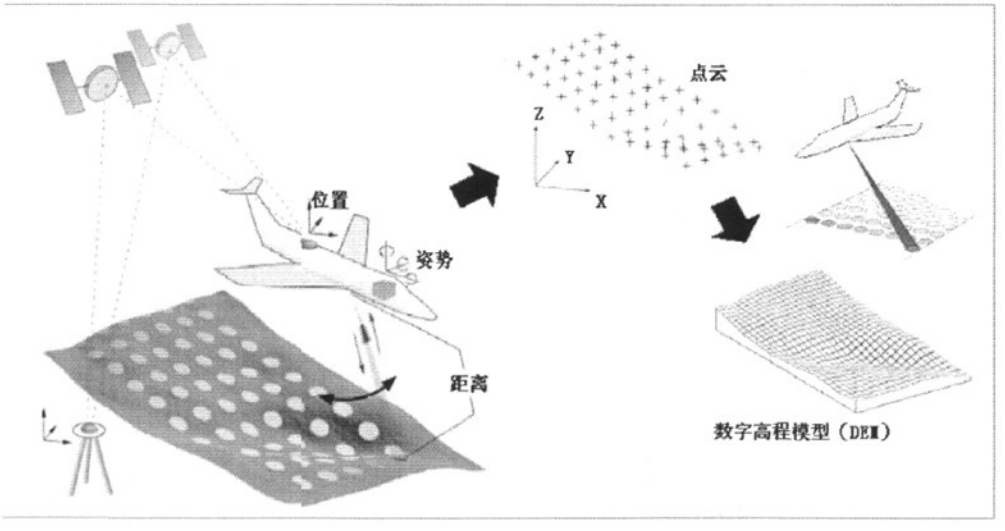


图 2.1 为机载 LIDAR 系统工作示意图

2.2 系统的组成

2.2.1 系统结构

机载 LIDAR 系统主要包括:

1、动态差分 GPS 接收机，用于确定扫描投影中心的空间位置;

2、姿态测量装置(IMU)，用于测量扫描装置主光轴的空间姿态参数;

3、激光扫描测距系统，用于测量传感器到地面点的距离;

4、一套成像装置(现在主要是数码相机)，用于获取对应地面的彩色数码影像，用于最终制作正射影像。



图 2.2 机载 LIDAR 系统的核心

工作原理参照全站仪。但数据发射量和功率非常大，每秒中最多可发射12.5万个激光点，测量距离为离地面30－2500米。测量到地面的激光点密度最高可达100个/m²，正常飞行高度情况下（航高800米），在植被比较茂密的地区也有一定量的激光点射到地面上。利用专业软件对数据进行处理辨别出地面点或是植被点等。

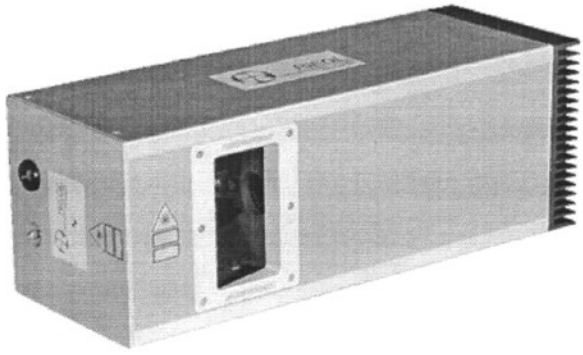


图 2.3 LMS-Q560 波形数字化机载激光扫描仪

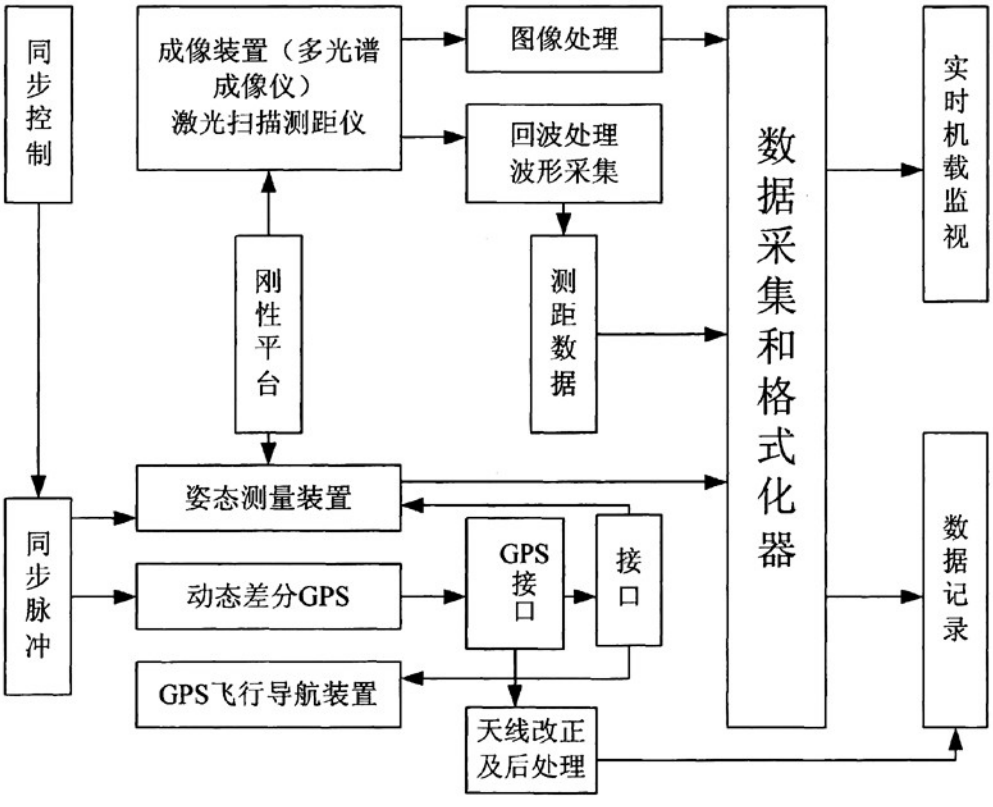


图 2.4 机载 LIDAR 系统组成框图

2.2.2 激光测距和多光谱扫描成像组合传感器

机载 LIDAR 系统是以一种组合式传感器为特点的。这个组合式传感器将扫描激光测距仪和多光谱扫描仪密切组合，以共用一套光学系统实现对地面点同步测距和成像。

大口径高速扫描系统是信号获取的窗口，它是由扫描镜、驱动电机、光电编码器和动平衡机构装置组成的。扫描镜的光学薄膜在接收弱光信号时应具有很高的反射率，在

很宽的光谱范围内保持高反射率是保证后续探测元件接收信息的关键。而在激光发射时，扫描镜又应该具有承受高密度激光能量轰击的能力。在高速旋转的工作过程中，整个扫描系统应当作业高度增加，还应考虑扩大接收口径，提高回波探测和光谱探测效果。

组合传感器所接收的信号包括激光回波和地物对于太阳辐射的反射光谱信号，对分色器件提出了很高的要求，要将激光回波和成像光束很好的分离，分色器必须具有高反射率和高透射率的光谱分离能力。

激光测距过程中必须具有很高的动态激光脉冲测距精度，关键因素是测时分辨率和时延估计精度。机载 LIDAR 测距不同于地面固定平台上的激光测距，由于始终处于运动状态，一旦有几个激光脉冲不能形成距离数据，是无法补救的。另外激光器件必须适应飞机上的振动、冲击等工作环境。一般来说，必须采用高性能、高重复频率、大功率、窄脉冲的固体激光器[15]。

机载 LIDAR 系统是一个动态的测量系统，对其中硬件系统的各种误差必须加以严格的控制，采用有效的检测技术，保证激光测距点与相应成像像元时空准确匹配，保证光学像质的稳定性，使整个系统能够成功的运作。

2.2.3 差分 GPS 装置

GPS 在机载 LIDAR 系统中起到非常重要的作用。为了提高定位的精度，一般采取实时差分 GPS(DGPS)或实时载波相位差分（RTK)方法。在地面设置一个 GPS 基准站，飞机上的 GPS 称作流动站，需要实时地将基准站上的有关数据（一套数据连）传送给机上 GPS 接收机，以便机上进行很高精度的定位。

在整个机载 LIDAR 系统中，GPS 的功能有三项：其一，提供组合传感器在空中的准确位置数据，一般是传感器扫描中心像元成像时刻主光学系统后节点的三维地理坐标。其二，与姿态测量装置相结合，构成 INS/GPS 复合姿态测量装置，以便进行 GPS 和 INS 数据组合滤波，提高三轴姿态量测精度。其三，向导航显示系统提供飞机飞行时的三维位置数据，提高机上自动驾驶仪的领航精度，或使轻型飞机上人工驾驶准确地保持航线，实现高精度导航。

2.2.4 姿态测量装置（IMU)

IMU 诞生于军事工业，最初用于导弹、飞机、舰艇等军事目标的惯性制导。IMU 可以量测加速度和角速度，以此可以计算出速度、位置和姿态参数。但是惯性导航系统

存在如下缺点：定位误差随时间积累；每次使用前初始对准时间长；设备价格昂贵等。随着 20 世纪 70 年代 GPS 的出现，这种高精度、低成本、误差不随时间积累的卫星导航定位迅速应用到各个领域，也为 INS 惯性导航系统提供了最佳的惯性组合。GPS/INS 组合克服了各自缺点，取长补短，组合后的导航精度高于两个系统独立工作的精度[16]。

应用于航空遥感领域的导航以及姿态测量系统主要有卫星无线电导航（如全球定位系统 GPS）以及惯性导航系统（INS）。INS 姿态测量主要是利用惯性测量单元（IMU）来遥测飞机或其他载体的加速度，经过积分运算，获取载体的速度和姿态（如位置及旋转角度）等信息。

飞机姿态测量装置实时提供组合传感器主光学系统主光轴的姿态角，即俯仰角、侧滚角和航向角，以便于 GPS 定位数据结合起来，对激光扫描和多波段成像数据进行快速定位。姿态测定精度的高低对于能否获得高精度的定位精度起着主导作用。姿态测量装置中的陀螺仪是高精度液悬浮陀螺，陀螺悬浮在氟油中，陀螺马达密封在一个球体内，整个球体的重力与氟油的浮力精确平衡。陀螺仪内设置有高精度、高稳定度的力矩器。加速度计时一种夜浮摆式单轴加速度计，采用微型导电环，摩擦力矩极小，精度可达到秒级。

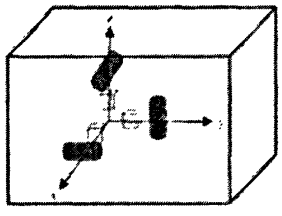


图 2.5 惯性测量装置

限制 IMU 系统精度的主要因素有两个[17]：（1）测角精度和加速度精度；（2）测时精度。即使目前 IMU 生产厂家能提供复杂的高精度的惯性平台系统，但当我们把它安置到运动载体上进行工作时，还要受到其他作业条件等因素的影响，如当运动载体过度倾斜或转弯时，由于重力作用，可能会使系统挂起而无法正常工作。此外，还有其他一些因素如陀螺仪漂移，误差累积会使观测值发生偏离。GPS/IMU 组和姿态确定的系统能大幅度的提高姿态参数的测定精度，克服 IMU 系统的误差累计。

2.2.5 目前主要商业机载 LIDAR 系统及其主要技术参数

当今世界比较著名的商业机载 LIDAR 系统有：加拿大的 ALTM3100，美国的 ALS50

和 SHOLAS，德国 IGI 的 Litermapper 5600 和 TopoSy 系统，它们主要的性能如下：

表 2.1 主要商业化机载 LIDAR 系统性能比较

系统名称	ALTM3100 EA	ALS50	SHOALS	Falcon II	LM5600
生产厂家	加拿大 Optech	美国 Leica	美国 Leica	德国 TopoSys	德国 IGI
飞行高度	80-3500m	500-4000m	200-800m	1600m	850-1500m
扫描角(度)	0-25	10-75	0-40	28	45-60
波长(微米)	1.047	1.064	1.064/0.532	1.560	1.550
扫描频率（KHz）	0-70	>83	0.4	83	100
高程精度（cm）	<0.35m(飞行高度 3000m)	6-10	15	15	13(飞行高度 785 米)
平面精度（m）	1/5500 航高	1	2	2.5	4(飞行高度 785 米)
图像	4K×4K 数码相机	摄像机	成像光谱仪，用 GPS 时间来记录同步，事后再与成像光谱仪书记联系	配备 RGB 线扫描仪	5440×4080 数码相机
接收回波	首末回波	4 次回波	9 次回波	首末回波	多次回波
扫描方式	线扫描	线扫描	线扫描	光纤扫描	平行线扫描
运载平台	直升机或固定翼飞机	直升机或固定翼飞机	直升机或固定翼飞机	直升机或固定翼飞机	直升机或固定翼飞机

2.3 机载 LIDAR 与航测的比较

机载 LIDAR 主要用于获取地形、地貌数据，是地形图测绘的全新手段，具有强大的生命力和良好的发展前景，已经引起摄影测量工作者的极大的关注，被认为是对传统的摄影测量方法的巨大挑战。

航空摄影测量与机载 LIDAR 在某些方面具有一定的相似性：（1）当前机载 LIDAR 系统均配备 GPS/INS，用于实时确定传感器的位置和方向。同样，现在越来越多的摄影测量系统也集成了 POS 系统（Position and Orientation System 即机载传感器定位定向系统）；（2）机载 LIDAR 可以直接获取目标的三维点云数据，而摄影测量通过匹配算法也可以获得密集的匹配点云；（3）摄影测量获取的是数字图像，而机载 LIDAR 数据经过格网内插后也能形成数字图像，同样可以应用各种图像分析以及算法进行后续处理。

虽然航空摄影测量与机载 LIDAR 具有上述相似性，但是两者的差异还是显而易见的，可以从以下几个方面进行比较：

2.3.1 传感器方面的对比

航测所用的光学传感器多种多样，成像几何形态各不相同，像幅大小各异，具有不同几何分辨率、辐射分辨率和光谱分辨率（包括波段数、中心波长和波段宽度等），存储介质分为模拟的和数字的，几何精度、重量、功耗、成本也不尽相同。机载 LIDAR 系统所用的传感器就很少，全色、多光谱或高光谱数字传感器主要为线阵或面阵 CCD，且和激光器同时使用，呈不断增长的趋势。

2.3.2 平台以及定位定向系统方面的对比

航测光学传感器几乎可以装载到所有可能的飞行平台上，包括气球到空间站。机载 LIDAR 系统只能装载在直升机和其他飞机上，飞行高度主要在 1000m 以内，新型的系统可以达到 6000m。只有极少数空间平台上装载激光扫描系统。飞行高度受限于激光器功率，探测器灵敏度以及与最大测距相关的最高脉冲发射率。最低飞行高度则严格限制在保护眼睛的范围内。飞行速度受限于系统参数如扫描频率，要考虑采用 GPS/INS 为激光束定位定向过程中 GPS/INS 数据内插最小误差，在地形起伏较大情况下要确保航带之间重叠度等。有些航测系统，特别是线阵 CCD 也对飞行高度和飞行速度有较严

格的要求。

2.3.3 飞行计划方面的对比

航测飞行计划比较简单，易于很好地制定出来。而对于机载 LIDAR 系统，则是很复杂的事情。因为扫描带很窄，特别是低飞的平台，而且有时可能没有采用差分 GPS 导航，出于产出/成本比的考虑，航带重叠度一般很小，所以即使在平地，飞行航带之间都会出现空缺遗漏，需要补飞。部分矛盾的要求也是产生这种情况的原因，如最大测距要求以地域中最低点为基础，而足够的重叠度则要求考虑地域中的最高点。在地形复杂的地区，如沿着深山山谷飞行，迎面又是隆起的高山，这时飞行计划就变得十分复杂，至少需要有 DTM，哪怕精度很低，以便在制定飞行计划时作为参考。而飞行平台则可能是直升机。对于航测系统，只要保证足够的航向和旁向重叠度，就可以满足区域成图几何条件，而且一定的冗余数据时十分必要的。例如闭塞地域成图，就希望有更大的重叠度以利于数据分析。采用激光扫描系统进行大范围成图需要仔细选择一定数量和分布较好的地面参考站，一般要求可以找到 5~6 颗 GPS 卫星，而在高山深谷中，常常看不到一颗 GPS 卫星，这就为制定飞行计划带来很大的困难。只要出现严重误差，就必须重飞。而对于航测系统几乎没有重飞的事，误差一般很小，而且可以通过后期处理加以补偿。如在 GPS 和 INS 失效的情况下，框幅式传感器可以利用控制点进行定位定向。

由于机载 LIDAR 系统要求飞行高度和飞行速度都低于航测系统，而且视场一般都比较小，扫描角度通常在 20-40 度，而航测系统的视场较大，航摄相机视场可达 75 度，所以一般来说机载 LIDAR 系统在相同时间内的探测成像范围是比较小的。

2.3.4 其他方面的比较

（1）生产 DEM/DSM。机载 LIDAR 可以方便的获取 DEM，通过对获取的三维激光点云数据进行去除噪声和滤波处理，可以直接得到数字表面模型 DSM 和 DEM。但是机载 LIDAR 数据处理算法还不太成熟。而航测是通过立体像对，利用共线方程的原理间接获取 DEM，周期较长，在一些特殊地区使用航测较为困难，利用航测技术获取数字表面模型（DSM）也比较困难，人工干预工作量很大。

（2）精度比较。与航测相比，机载 LIDAR 所受的误差影响因素很多，理论推导误差传播模型更为复杂；对摄影测量来讲，平面和高程相互独立，能分开加以考虑；另外，机载 LIDAR 中存在的常数项误差较摄影测量系统中的该项要大[18]。机载 LIDAR 所受的

姿态误差对高程精度的影响会随着扫描角的增大而增大，尤其是飞行高度较高时。机载 LIDAR 提供商给出的精度统计较为乐观，高程方向的精度要高出平面精度 2-5 倍。一般来讲，对于 400-1000m 范围内相同飞行高度，摄影测量所获得的精度要比机载 LIDAR 获取的精度要略好些，当然有时候后者比前者好。对于更高的飞行高度，如果姿态精度较高并且有足够的激光回波能量，那么后者所获取的精度要比前者高[19]。摄影测量所获取的平面精度要高出高程精度 1/3；而机载 LIDAR 高程方向的精度要高出平面精度 2-5 倍，对于机载 LIDAR 而言，在坡度较大的地方平面位置的精度也会影响高程方向的精度[18]。

（3）地形质量。尽管机载 LIDAR 的原始数据精度较高密度也较大，但由此获得的 DEM 的地形质量并非总是令人满意，因为机载 LIDAR 具有一定的盲目性，数据采样时并不能保证在关键地形点采样。除了缺乏明显的特征线和特征点模型，最主要的原因还是用于过滤原始数据的滤波算法并非智能化的图像处理方法，有时不能区分有用信息和需要过滤掉的目标物体。所以用机载 LIDAR 所获取的 DTM 往往较平滑而丢掉一些重要的地形特征信息[20]。在裸露地区，获取高地形质量 DTM 的最好方法还是传统航空摄影测量手段[19]。

（4）生产时间。毫无疑问机载 LIDAR 系统直接获取距离观测值，DTM 的生产要比航空摄影测量快的多。

（5）成本。就生产 DTM 而言，机载 LIDAR 要比航空摄影测量手段更便宜。德国国家测绘局通过成本效益分析计算表明：对于同一项任务，用机载 LIDAR 技术实现的成本仅为用航空摄影测量技术实现成本的 25%到 33%。

当然就将来的发展而言，机载LIDAR技术具有更大的发展潜力，它是一种新技术，还有许多发展空间，特别是在数据处理算法以及软件和系统的开发等方面。随着用户数量的增加，其应用领域将越来越广，特别是随着激光技术的进一步发展，将促进机载LIDAR技术的革新，诸如星载激光对地观测，包括军事方面的运用，这要求提高激光的测距和成像能力。系统还要能记录激光回波信号的特性
(amplitude ,polarization ,phase ,frequency shifts and vertical profile)以大大提高机载LIDAR物体分类和识别的能力。目前乃至将来一段时间，机载LIDAR和航空摄影测量将并存，相互补充，相互竞争.部分作业将由机载LIDAR取代航空摄影测量。未来的发展方向是多种传感器的高度集成，多源数据的融合处理，从而提高数据分类和物体识别的能力。机载LIDAR系统同被动光学传感器以及GPS/INS系统的集成将给整个航空摄影测量领域

产生一场新的技术革命。

表2.2 航空摄影测量同机载LIDAR技术的主要区别

航空摄影测量	机载LIDAR
被动式测量	主动式测量
透视几何原理	极坐标几何定位原理
采用覆盖整个摄影区域	逐点采样
间接获取地面三维坐标	直接获取地面三维坐标
获取高质量的灰度影像或多光谱数据	不成像
软硬件经多年发展较成熟	新技术需不断发展，具有很大发展潜力
可以利用的传感器类型很多（光学摄影机，多光谱，线阵CCD）	可选择的传感器类型较少
飞行计划相对简单	飞行计划相对复杂，要求较苛刻
相同的飞行高度下飞行带宽，覆盖面积大	飞行带宽较窄，容易形成漏飞区域
受天气影响较大	理论上能全天候采集数据，实际上背景反射越弱，测距效果越好
数据处理自动化程度低，特别是处理航片时需要人工干预	容易实现自动化
瞬间获取地面一个区域的数据，不能直接获取地面点三维坐标	逐点采样，可以直接获取地面点三维坐标
IMU/DGPS可选	IMU/DGPS价格昂贵
飞行航高较高	航高较低，大多数在2000米以下，ALS50航高可达4000米
细小目标（如电力线）的探测能力较弱	探测能力较强
不太适合获取沙漠，雪山，森林，大面积水域，沿海滩涂等地区的DEM和正射影像	很适合获取同类地区的DEM和正射影像
可以进行立体测图，检查编辑DEM和测图	无立体，无法测图

提供产品周期较长	提供产品周期较短

2.4 机载 LIDAR 的主要应用领域

迄今为止，机载 LIDAR 主要用于获取大范围高精度的 DTM 以及城市数字表面模型（DSM）；测量绘制带状目标地形图；测绘线状地物如电线等电力设施、气体管道或高速公路，城市排水管线设计等；测量绘制输电线和电线杆（塔）线路图，无线电远程通讯中继站线路设计；直接获取森林地区真实地表的高精度三维信息，生成林区 DTM 以及进行森林植被参数测定，并获取森林垂直结构参数；海岸地带地形测绘，包括沙丘和湿洼地，监测海岸变化以及动态侵蚀情况；高精度及很高的空间采样密度的地形测量，如洪涝灾害评估，大型采石场及煤田等地大型堆积物的体积测量，生成采矿区 DTM 和堆积量测及道路建模；生成城市地区的 DTM 和 DSM，自动提取城市房屋和道路；三维城市景观模型，并用于虚拟现实；城市规划；自然灾害三维实时监测；GIS 数据采集；土地剖面测量；冰面变化监测；危险区域的测绘，如沼泽地及其他无法到达的区的测绘，如沙漠面积监测，有毒废物场及工业垃圾堆积测绘。具体来讲主要包括以下几个方面的应用：

1、林业上的应用

地面上或树冠上的三维精确信息，对林业和自然资源管理是非常重要的，树的高度和密度的精确信息也是至关重要的，用常规技术来做事相当困难，机载 LIDAR 可以对树冠下方的地面以及树高同时测量，然后通过数据的后处理能产生裸地的 DTM 或精确导出植被参数如数高、树的密度、树冠直径、森林边界和生物量评估。

2、测量绘制带状地形图

如电力输送项目，极大地方便了电网布设于维护管理工程。在进行电力线路设计时，通过 LIDAR 数据可以了解整个线路设计区域的地形和地物要素的情况。尤其是在树木密集处，可以估算出需要砍伐树木的面积和木材量。在进行电力线抢修和维护时，根据电力线路上的 LIDAR 数据点和相应得地面裸露点的高程可以测算出任意一处线路距离地面的高度，这样就可以便于抢修和维护。

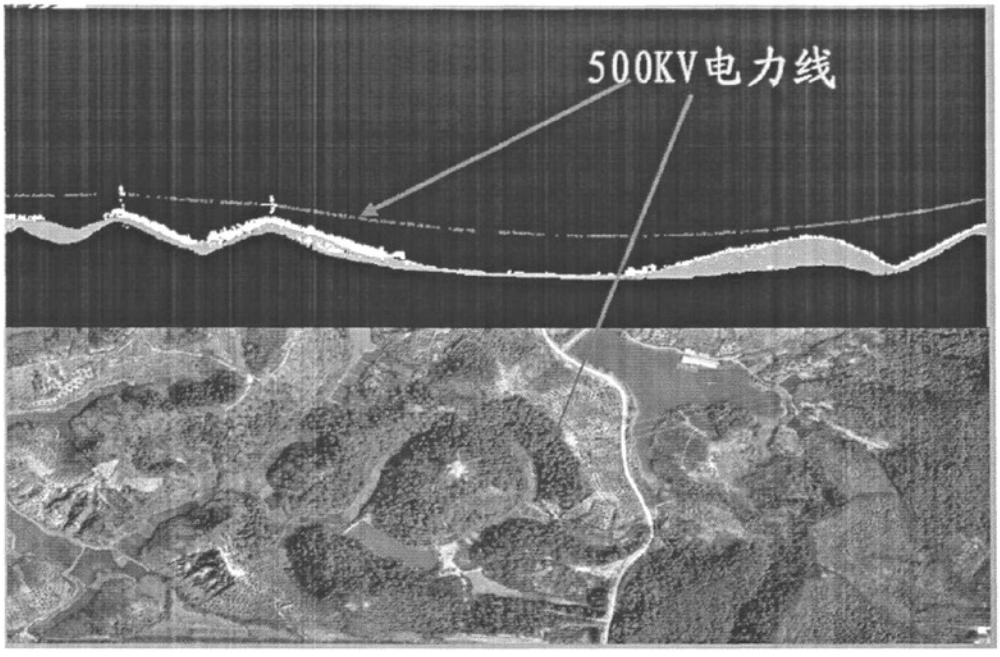


图 2.4.1 电力线路选线设计中的应用

1、灾害调查与环境监测

主要应用于自然灾害（如地震，洪水等）的灾后评估和影响。

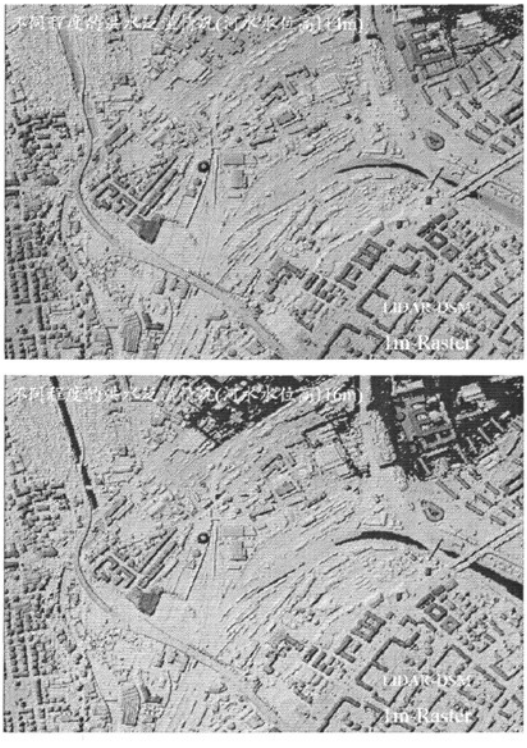




图 2.4.2 灾害调查监测

2、线路勘测设计

LIDAR 技术为公路、铁路设计提供高精度的 DEM，以方便线路设计和施工土方量的精确计算。由于采用 LIDAR 技术在较短的时间内就可以提供详细而准确且能满足设计部门要求的纵断面图，而绝大多数公路建设项目的第一步是工程设计。在选择准确的道路走向和道路类型之前，工程师都需要有拟建道路地区的精确断面图。传统方法是用地面测量或航空摄影测量的方法获取。这两种数据采集和处理方法都是很费时的。因此 LIDAR 技术的引入将大大缩短获取断面图的时间。同样在进行油管、气管线路设计时也有着重要的应用价值。

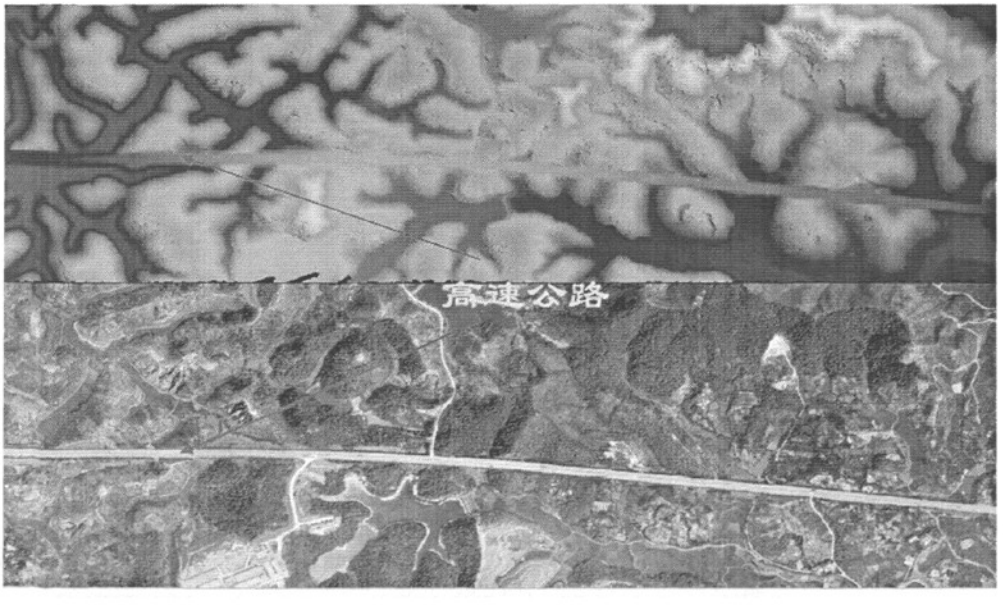


图 2.4.3 高速公路

3、城市规划与三维建模

高密集的机载 LIDAR 数据在 3D 城市模型领域有着广泛的应用前景，有望彻底解决利用摄影测量手段建立三维城市模型的瓶颈问题。结合高密度的激光扫描数据和地面二维平面数据建立 3D 城市模型的技术已有研究；机载 LIDAR 可以提供高密度和高精度的观测值，根据这些高程数据的集合变化纹理特性能探测、重建 3D 建筑物模型。建筑物的三维重建比用影像匹配更容易，比手工处理更快，具有很广阔的应用前景。

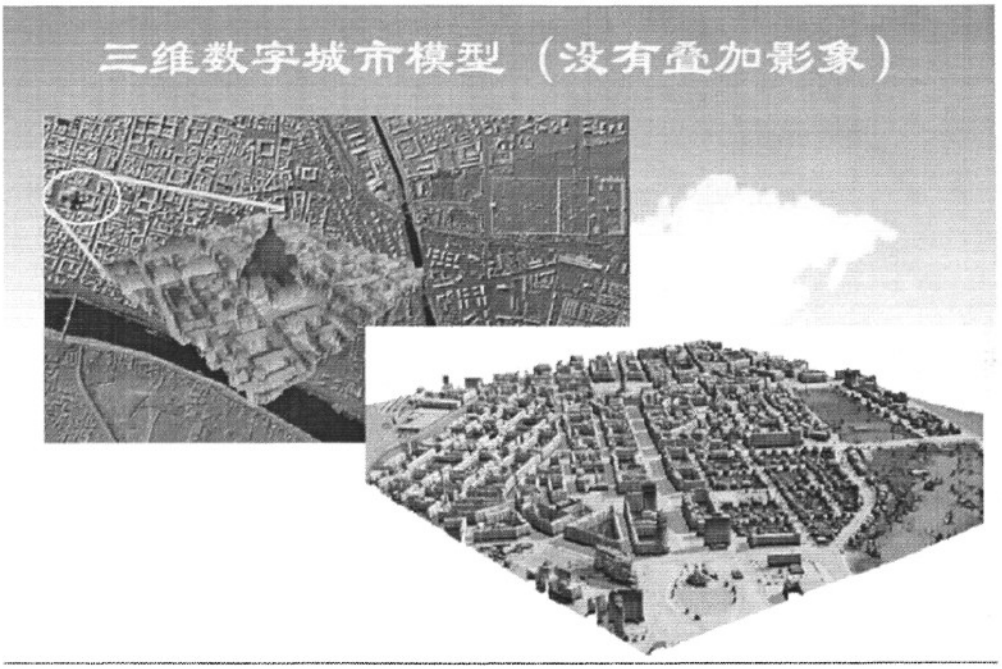


图 2.4.4 三维数字城市模型

4、海岸带侵蚀情况监测

海滩、海岸以及近海区域是一个特殊区域，传统测量和航测都受到一定的限制，作业非常困难。利用机载 LIDAR 这种主动传感技术，能以低成本做高动态环境下常规基础海岸线测量，且具有一定的水下探测能力，可测量近海水深 70m 内水下地形，可用于海岸带、海边沙丘、海边堤防和海岸森林的三维测量和动态监测。

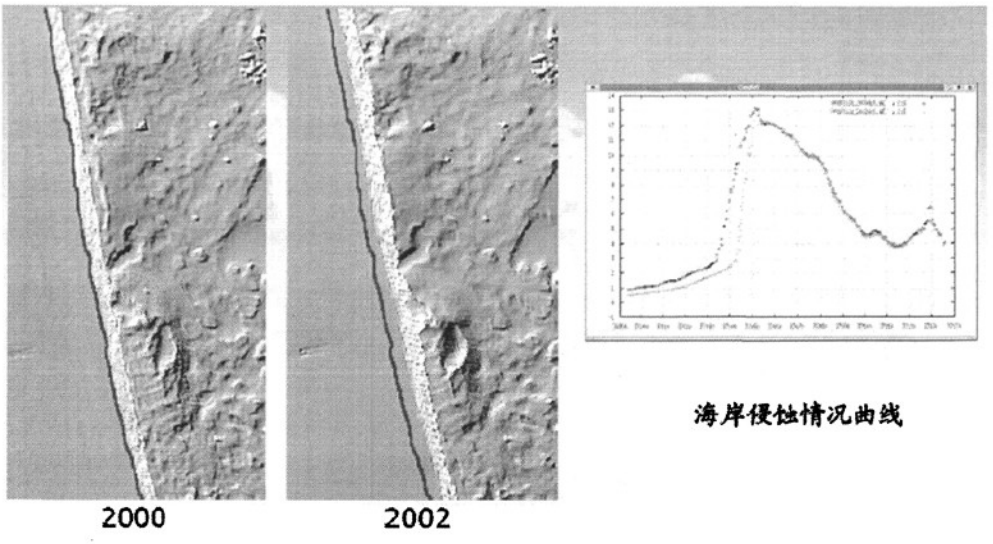


图 2.4.5 海岸侵蚀情况

5、恶劣环境和其他受限制地区的测量

许多环境恶劣地区如沼泽、湿地、大海、冰山，以及植被茂密地区，传统的摄影测量评估比较困难。受限制的地区如有毒的废物场或工业废料，而机载 LIDAR 系统能够快速测量该地区。

6、文化遗产保护

大型的文物古迹和室外的不可以移动文物，需要测量其三维数据，以便进行修复和保护。对于处于恶劣测量环境下（如险峻的长城）或不可直接触摸的文物，激光扫描技术就成为了一种直接获取三维数据很好的解决方案。

第三章 机载 LIDAR 数据的处理一般流程及数据特点

3.1 机载 LIDAR 一般处理流程

3.1.1 航飞采集激光扫描数据以及数码影像

1、在航飞前要制定飞行计划。航飞计划应包括航带划分，确定飞行高度、速度、激光脉冲频率、航带宽度、激光反射镜转动速度、数码相机方位元素以及定位、相机拍摄时间间隔等，并将各航带的首位坐标以及其他导航坐标输入导航计算机内，在飞行导航控制软件的辅助下进行飞行作业。

2、安置 GPS 接收机。为保证飞机飞行各时刻的三维坐标 数据的精度，需要在地面沿航线布设一定数量的 GPS 基准站，同时将 GPS 流动站安置在飞机上。

3、激光扫描测量。预先设置好扫描镜的摆动方向和摆动角度，当飞机飞行时，红外激光发生器向扫描镜上不停地发射激光，通过飞机的运动和扫描镜的运动反射，使激光束打到地面并覆盖测区，当激光束到达地面或遇到其它障碍时被反射回来，被一光电接收感应器接收并将其转换成电信号。根据激光发射至接收的时间间隔即可精确测出传感器至地面的距离。

4、惯性测量。当飞机飞行时，惯性测量装置同时也将飞机的飞行姿态测出来，并和激光有关的数据、扫描镜的扫描角度一起记录在磁带上。

5、数码相机拍摄。利用数码相机进行拍摄时，需要对其拍摄时间间隔和拍摄位置进行控制。通常时用 GPS 系统进行时间和位置控制。

6、数据传输。航飞数据采集结束后，将所有的激光扫描测量数据、数码影像数据、GPS 数据以及惯性测量数据都传输到计算机中，为后续数据处理做准备。

3.1.2、内业数据处理

机载 LIDAR 在外业采集得到的数据需要进行一定的处理才能得到需要的信息。数据处理的内容：

1、确定航迹。将地面的 GPS 基准站和飞机上的 GPS 流动站的测量数据进行联合差分解算，即可精确确定飞行航迹。

2、激光扫描测量数据处理。利用仪器厂家提供的随机软件，对飞机 GPS 航迹数

据、飞机姿态数据、激光测量数据以及激光扫描镜的摆动角度数据进行联合处理，最后得到各测点的三维坐标数据，即点云数据。

3、数据分类处理。在对点云数据进行分类处理前，首先应当对数据进行检验，剔除错误的点和高程异常的点，如特别低的点（地面以下的点）或特别高的点（云或飞行中的鸟）。然后建立地面数据类型，分离出非地面的数据。再根据顾客的要求，对非地面数据进行分类，如建筑物类数据、输电线路数据、铁路类数据等等。另外，可以根据高出地面的高度对非地面点数据进行分类，如可以对不同的植被进行分类。然后输出分类的数据。

4、坐标匹配。在一幅点云图中，扫描点间的相对位置关系是正确的，而不同点云图间点的相对位置关系的正确与否，则取决于它们是否处于同一坐标系下。大多数情况下，一幅点云图无法建立物体的整个模型，因此，需要将多幅点云图精确的“装配”在一起，使点处于同一个坐标系下。

5、影像数据的定向和镶嵌。数字影像先进行解压处理，再结合航片的内外方元素进行空中三角测量，然后结合激光扫描测量的 DTM 数据进行定向镶嵌，形成正射影像图。

6、建立三维地形模型。

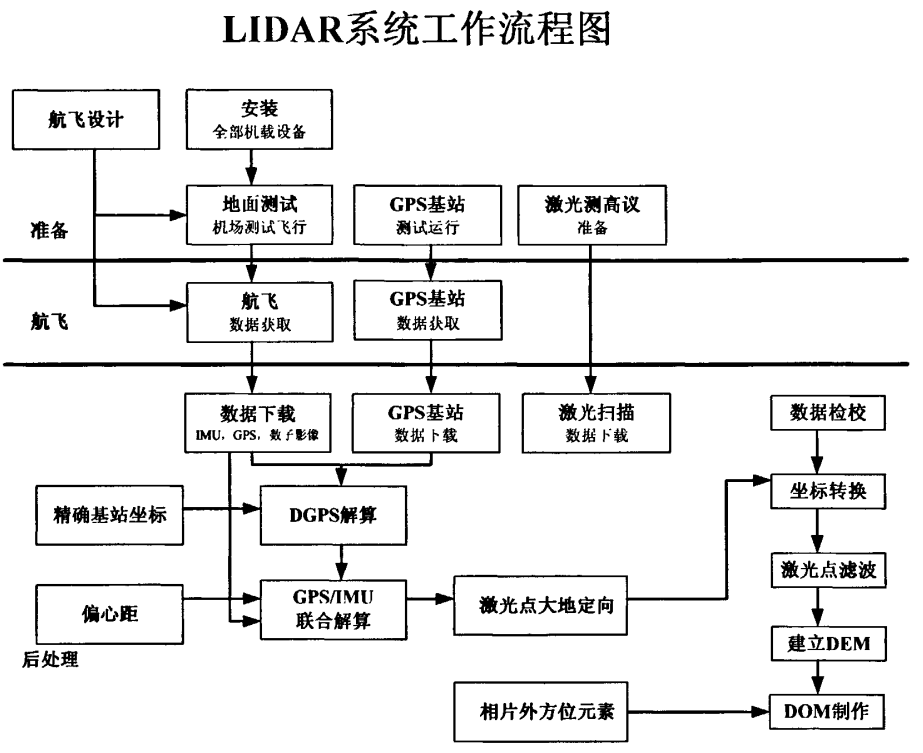


图 3.1 系统工作流程图

本文使用的数据是经过坐标转换处理的点云数据，也没有影像数据，这里主要是对点云数据的分类处理进行了研究。

3.2 点云数据的特点

第一、从内容上讲，激光雷达数据是分布于对象表面的一系列三维点坐标。Baltsavias(1999) 将这种情况称为在地面上“成像”。

第二、激光雷达数据在形式上呈离散分布。这里 “离散”是指数据点的位置、间隔等在三维空间中的不规则分布与数字影像像元间彼此独立的概念有所不同。地表形态的多样性和数据获取方式是这一特点的主要成因。离散数据的一个优点是允许相同平面坐标对应几个高程值，这更有利于表现细节信息和变化剧烈的地形/地物(前者如输电线路中的电线、树冠结构等；后者如峭壁、建筑物等)。另一方面 ，这种形式也有自身的不足，如同名点难以选取等。

第三、数据形式的另一个特点是扫描带中数据分布不均匀 ——不同位置的光斑密度不同 ，造成这种情况的主要原因是激光扫描仪所采用的扫描方式。

第四、光谱信息较弱，反射强度值是另一个有用的信息源，它简单的反映了地表物体对激光信号的响应，目前可以用于滤除部分的植被点。

第五、由于城市高大建筑物的遮挡，导致部分区域没有数据点，而水面的吸收也能造成河流或湖泊等区域出现空白区域。

还有如下特点：

- LIDAR 数据反映了真实的三维地面；
- LIDAR 数据点平面分布均匀，精度一致；
- LIDAR 数据高程相对航测精度高，达到 15cm；
- LIDAR 数据可达到很高的密度，例如每米一个点或更高。这样的密度可直接用来建立城市三维模型；
- LIDAR 系统可在短时间内覆盖大面积；
- LIDAR 的数据量非常大。

3.3 点云数据组织

激光扫描获得的结果是三维点云，这与传统摄影测量与遥感处理的数字图像有很大的不同。由于数据处理中涉及到大量的邻域处理，因此数据的表达和结构直接影响到算法的可行性与效率。激光扫描数据的一个重要的处理步骤就是滤波，这包括两方面的工作：

1.目前大多数主流的激光扫描仪在获取三维坐标的同时，还可以得到强度值，由之可生成强度图像。激光脉冲的成像方式造成了强度图像噪声非常大，因此需要对它进行滤波去噪。

2.对于激光扫描生成的三维点云，一个重要处理步骤就是将地面上的地物分离出来。借用了信号处理里滤波的概念，将地面视为信号，而将地物点(房屋、树木等)视为噪声，从而得到 DTM 的过程就构成了 LIDAR 数据的滤波。

激光扫描仪从原始的观测值(机载 LIDAR 为 GPS、IMU 和测距值；地面系统为扫描角和测距值)计算出每个点的三维坐标，即三维点云，同时附带有强度信号和多次回波信息。这些数据处理方式与算法均与传统的基于图像的算法有很大不同，为了能有效地提取出数据中的信息，需要寻找一种适合的数据结构来对激光扫描数据进行表示和组织。下面将介绍几种经常用到的数据表达方式。

3.3.1 深度图像的表示

深度图像(Range Image)，也被称为距离图像，是一类特殊形式的图像。由于它是图像的一种，因而也遵从图像的基本格式，即是由一组按照矩阵形式逐行逐列进行组织的像素构成。 它与我们最为常见的灰度图像的不同之处就在于两者的像素所表示的内容不同。灰度图像的像素值表示的是该点感光的强度或灰度；而对于距离图像而言，像素值则表示了扫描点的距离信息。当然表示距离信息也可以有多种形式，比如可以直接记录一个距离值的标量，也可以记录下该点的三维坐标值。

3.3.2 机载 LIDAR 数据带拓扑关系的表示

（1）、规则格网的表示

这种表示方法将覆盖区域划分为规则排列的正方形格网，DEM 实际就是规则间隔的正方形格网点，每一个格网点与其它相邻格网点之间的拓扑关系都已经隐含在该阵列的行列号当中。这时，根据该区域的原点坐标和格网间距，对任意格网点的平面位置可用相应矩阵元素的行列号经过简单的运算而获得。这实际上也是一种 2.5 维的表示方式，一个 XY 坐标只对应一个 Z 值，由于格网与数字图像的表示方式相同，它最大的好处就是可以利用现有的图像处理算法对 DEM 进行处理。它的缺点是：对于复杂的地形地貌特征，难于确定合适的格网大小。

（2）、不规则三角网 TIN 的表示

若将按地表采集的点根据一定的规则连接成覆盖整个区域且互不重叠的多个三角形，即可构成一个不规则三角网(TIN-Triangulated Irregular Network)。TIN 的表示方法对于分离出的 DTM 的表示是有效的，但是对于原始的扫描数据在一个局部的二维区域内有多个不同高程的数据点交替起伏，会产生严重的锯齿现象(图 3.2 C)，不利于处理。另一种方法是对二维邻域中的点取最高点的表示，也就是仅生成 DSM (图 3.2 D)，但这样会丢失房屋墙面上或穿透植被树冠的多次回波点，造成了数据损失。

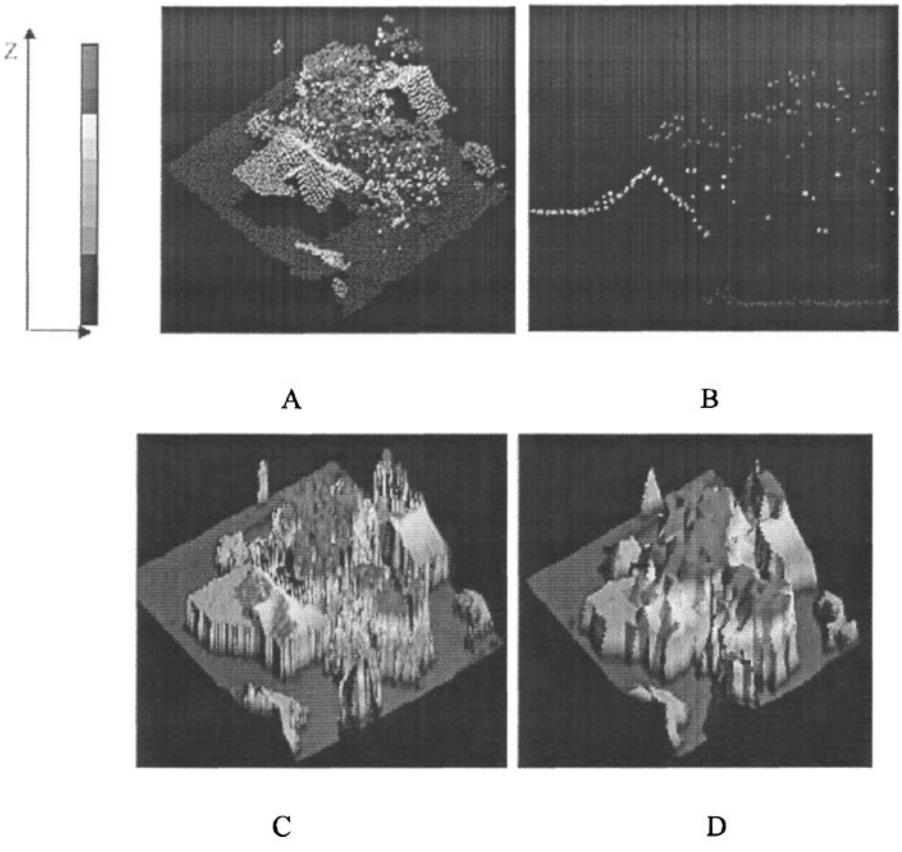


图 3.2 激光数据的表示

（3）、扫描线排列的点集表示

激光扫描系统所获取的三维点云数据，它包含有比 2.5 维表面模型更多的信息，如目标多次回波信息，而不仅仅是高程信息。点的密度并不均匀，主要与飞行高度有关，同时也与平台飞行速度、视场（FOV-Field of View）、采样频率有关。美国摄影测量与遥感协会(ASPRS)与 2002 年定义了机载 LIDAR 数据的数据格式 LAS1.0，后来 LAS 格式逐渐被全球各主要激光扫描仪厂商认定为标准的数据交换格式。原始 LIDAR 数据为 WGS84 坐标系统下的三维点，根据国际标准格式(.las)以每条扫描线排列方式存放，包含激光点三维坐标及反射强度值等，文件中同时储存有多重回波信息。此时的 las 文件是最原始的点云(一整条航带)，只有在最后生成格网化 DEM 及 DSM 时，可将其储存为记录三维坐标的 xyz 文件，或其它 DEM 格式。

3.3.3 点集的直接表示方法和几何索引

前面论述的三种数据表示方法都显式地或隐含地定义了点间的拓扑结构。而在很多数据中并没有原始扫描线排列信息，在这种情况下，需要直接以三维点云的点集存储和处理(如图 3.2 A)。然而在对点云处理中需要大量的邻域处理，而点集的表示方法没有拓扑关系，这就需要一个高效的检索数据结构或算法。

几何检索或者称几何查找是指在属性相同的一批几何对象（此处为点）中定位某个指定的几何对象，或者在某个特定的域中寻找该域所包含的具有某种属性的所有几何对象。一批几何对象所对应的数据称为“文件”，而指定的几何对象所对应的数据称为样本。几何查找就是在文件中查找样本。这里的查找通常不是把样本与文件中的项目匹配，而是在相关文件中定位样本。如果在文件中仅执行一次查找，那么就没有必要对文件进行预处理，否则，就有必要预处理文件。所谓预处理文件是指将一批几何对象所对应的数据按一定的结构存放。在分析几何查找复杂性时，预处理所需要的时间和存储空间不能忽略。一般来说，几何查找的耗费包括询问时间（回答一次询问所要的时间）、存储（数据结构占用的内存）、预处理时间（组织数据或某种结构的时间）、修改时间（指定几何对象所对应的数据插入数据结构或从数据结构中删去所需要的时间）。一些常用的空间几何索引数据结构和方法为：

1)、BSP 树（二叉空间分割）

在 BSP 树中，每个结点用它的线性半空间等式来表示，在二维空间中它是一条直线，在三维空间中它是一个平面。同样在二维空间中每个结点块是个凸多边形。而在三维空间中它是一个凸多面体。

2)、四叉树/八叉树

四叉树的每个内部节点对应于二维空间中的一个正方形区域，八叉树是三维空间的三维立方体，外部结点对应于存放空间中点的块。以二维的情形为例，如果一个正方形中的点数不比一个块中能存放的数多，那么我们就把这个正方形看作树的叶结点，该结点就表示成存放它的点的块；如果矩形中还有太多的点以至于一个块存放不下，那么我们把这个正方形看作内部结点，它的子结点对应于它的四个象限。

3)、K-D 树（多维二叉搜索树)

K-D 树是二叉检索树的扩展，K-D 树的每一层将空间分成两个。树的顶层结点按一维进行划分，下一层结点按另一维进行划分，以此类推，各个维循环往复。划分要使得

在每个结点，大约一半存储在子树中的点落入一侧，而另一半落入另一侧。当一个结点中的点数少于给定的最大点数时，划分结束。可以支持范围查询：给定的范围可能引向结点的一棵子树，但如果给定的范围跨越了结点的划分值，则必须考察它的两个子树。由于 K-D 树在范围查询(给定平行于坐标轴的闭合空间查询落入其中的点数)以及搜索当前位置的 m 个最邻近点都有较高的效率，它在离散数据的表示与检索中有着广泛的应用。

第四章 点云数据滤波

LIDAR 点云数据处理的基本任务是将数据进行分解，将地面及其覆盖物如房屋、植被以及其他地物等分开，得到数字地面模型 DTM。DTM 被认为只是所量测到的数字表面模型 DSM 的一个子集。这里借用了数字信号处理中滤波的概念，即把地形表面当作信号，而将地物(建筑物、树木等)当作噪声，滤波算法就是从 DSM 得到 DTM 的过程。

4.1 点云滤波算法综述

大部分激光扫描点滤波算法的思想基于如下假设：临近激光脚点间的局部不连续（高程突变）一般不是由地形的起伏所造成，而是突变点位于非地面之上。高程突变的表现形态也不相同，例如陡坎只引起某个方向的高程突变，而房屋所引起的高程突变在四个方向都会形成阶跃边界。当激光束投射到植被上时，激光点间的高程也会出现局部不连续的情况，但其表现形态与前者有显著的差异。两邻近点间距离越近，两点高差越大，较高点位于地形表面的可能性就越小。因此，判断某点是否位于地形表面时，要顾及该点到参考地形表面点的距离，随着两点间距离的增加，判断的阈值也应放宽[21]。考虑到地形起伏产生的高程变化，两地面点之间的距离越远，可能出现的高差会越大。

目前用于机载 LIDAR 数据滤波的方法概括来讲大致可以分为形态学滤波法；移动窗口法；线性预测法；基于地形坡度滤波；移动曲面拟合滤波方法；三角网迭代法；基于数据分割等几种方法。

4.1.1 数学形态学方法

数学形态学（mathematical morphology）诞生于 1964 年的法国巴黎矿业学院，奠基人是 G.matheron 和 J.Serra。利用数学形态学中腐蚀运算、膨胀运算和开运算、闭运算对离散的点云数据或是栅格化的点云数据的高程影像进行滤波。这在图像处理中获得了广泛的应用。但这些算法大都采用规则格网数据结构，而机载 LIDAR 数据是随机离散分布的三维数据点集。将原始离散的激光数据内插成规则格网数据将造成精度损失，为了保留地形信息，应尽量在原始的数据上作处理。Kilian[22] 等人采用形态学开运算，使用一个移动窗口对测区做卷积，窗口内最低的点就认为是地面点，高程值高出该点一定范

围的其它点也认为是地面点，并结合动窗口的尺寸大小给以一定的权，可结合不同尺寸大小的窗口重复进行，结果是地面上的点得到较大的权，而非地面的点得到较小的权，最后由各点的权内插 DEM。

4.1.2 移动窗口滤波法

该方法先定义一个很大的窗口（Grid），找出该窗口中的最低点作为地形点，移动窗口到下一个区域再找出最低点，直到遍历所有数据。通过找出的最低点，拟合一个曲面或 TIN 作为初步的地形模型，并利用该 DTM 于所有测量点之间的残差进行判断，将不需要的点剔除，然后调小窗口的尺寸和判断的阀值，再遍历所有数据生成新的 DTM 进行数据过滤，往复几次后得到的非常逼近的 DTM。在使用该算法前，一般需要对数据进行一次预处理，剔除原始数据中可能包含的粗差点。这些粗差点的主要来源于电力线路以及空中飞行的鸟的激光回波等，通常表现为与周围背景高程相比其高程异常。Axelsson[23]，Sohn[24]，Yong Hu[25]分别在他们的论文中阐述了其移动窗口滤波法和改进算法，在他们的方法中主要使用了 TIN 作为拟合的 DTM 进行多次的迭代判断。该方法目前应用日益增多，且被商业运营公司 TopScan 所采用。

窗口的大小和阈值的大小会影响最终结果。窗口太大，就可能将地面“平滑”，使微小的地形变化部分被滤除，而窗口太小，则会将一些大屋顶点保留下来；阈值太大，会将一些植被点作为地面点保留下来，阈值太小，又可能将真实的较小的地形突变点去掉。所以窗口的大小和阈值的大小是关键的参量，与实际地形地貌密切相关，不同的地区如平原、丘陵、山地，应该有不同的参量。

4.1.3 线性预测法

线形预测法，也叫迭代线性最小二乘内插模型残差法滤波，最初是由奥地利维也纳大学的 Kraus 和 Pfeifer [20]等提出，在该方法中，DEM 内插以及数据过滤同时进行。其核心思想就是基于地物点的高程比对应区域地形表面激光脚点的高程高，线性最小二乘内插后激光脚点高程拟合残差（相对于拟合后的地形参考面）不服从正态分布。高出地面的地物点高程拟合残差都为正值，且偏差较大。该方法需要迭代进行，首先用所有点的高程观测值按等权计算出表面模型，该表面实际上是界于真实地面（DTM）或植被覆盖面（DSM）之间的一个面。其结果是拟合后真实地面点的残差是负值的概率大；

而植被点的残差有一小部分是绝对值较小的负值，另一部分残差是正的。然后用这些计算出来的残差 v 来给每一个点的高程观测值定权 p_i 。稳健估计的权函数关系式为：

$$p_i=\begin{cases}1 & v_i \le g \\ \dfrac{-1}{1+(a(v_i-g)^b)} & g \le v_i \le g+w \\ 0 & g+w \le v_i\end{cases} \qquad (4.1)$$

式中参数a 和b 决定于权函数的陡峭程度。参数g 选择一个合适的负数，这就使得拟合面越来越向地面靠近，可根据残差统计直方图确定g 的取值。

计算出每个观测值的权 p_i 后，就可以进行下一步的迭代计算。其依据就是，负得越多的残差对应的点应赋以更大的权，使它对真实地形表面计算的作用更大。而居于中间残差的点赋以小权，使它对真实地形表面计算的作用更小。当剔除掉这些地物点重新计算出地形表面后，可重新计算这些被剔除掉的点的残差。如果其残差落在本次的观测值的吸收域内（v<g+w），那么这些在前一次判定为地物点而被剔除的点，可重新吸收为地形点。

该方法比较适用于森林密集覆盖的地区的DTM 生成。在这些地区，机载LIDAR系统的激光波束能部分地穿过植被覆盖空隙到达地面并反射回去由系统接收。到底有多少激光点能够到达地面并反射回去主要取决于植被结构，飞行季节（冬天还是夏天），树种等因素。这些因素就决定了穿透率（到达地面并反射回去的激光点数量占总激光脚点数的百分比）。

4.1.4 基于坡度变化的滤波方法

基于坡度变化的滤波算法同数学形态学方法相似，根据地形坡度变化确定最优滤波函数。为了保留倾斜地形信息，要适当调整滤波窗口尺寸的大小，并增加筛选阈值的取值，以保证属于地面点的激光点不被过滤掉。当然这些滤波参数的最优值随着地形的变化而变化。

对于给定的高差，随着两点间距离的减少，高程值大的激光脚点属于地面点的可能性就越小。造成相邻两点间高程变化明显的原因可能是两激光脚点分别位于地形表面和植被、或房屋之上。该方法是通过比较两点间的高差值的大小来判断拒绝还是接收所选择的点。两点间高差的阈值定义为两点间距离的函数$\max \Delta h\,(d)$，即所谓的滤波核函数，

通常该函数是非递减函数。确定核函数的方法都是尽量使DEM 保留重要的地形特征信息，这可能造成过滤条件太宽松，而在保留绝大部分地面点的同时接收了一些不属于地面点的点。即减少了第 I 类误差（拒绝了本属于地形表面点的点）的数量，加大了第 II 类误差（接收了不属于地形表面点的点）的数量。

提高分类精度的另一个方法是首先对测区进行预分割，每块的地形变化具有一定的均一性。对于每种地形的数据应选择不同的数据训练集来推求最优的滤波函数。

4.1.5 移动曲面拟合滤波方法

该算法的基本思想是基于如下假设：可以假设地形表面是一个复杂的空间曲面，任何一个复杂的空间曲面在其局部面元可以利用一个简单的二次曲面去拟合，当局部面元小到一定程度，甚至可以将该局部面元近似表达成一个平面。基于上述假设，首先将离散点数据进行二维排序，然后在区域内找彼此相互靠近的最低的三个点作为初始地面点，既初始拟合面。然后将临近的备选点的平面坐标带入平面方程，既可计算出备选点的拟合高程值，拟合高程值同该点的观测高程之差如果超过给定的阀值，就认为该激光点不在地面上而被过滤，否则就接受该点为地面点。当拟合点数为6时，保持点数不变，新增一个地面点，就丢掉一个最老点，这样直到结束。

该方法的优点是对原始数据不需要重采样，也不需要预先剔除粗差，保证了原始数据精度不被破坏。另外一个优点是该算法运算速度较快，但是该算法要求地面连续，激光点必须保持一定的密度，并且阀值的选取必须反复进行，直至找到最佳的值。

4.1.6 三角网迭代滤波法

该算法是先取一个足够大的窗口(由先验的知识它应超过最大地物的尺寸)，对整个区域做一次卷积，每次取该窗口中的最小的点，构成一个初始的DTM。然后再缩小窗口继续做卷积，并定义最大地形坡度max_grade、最大内插角度max_angle、最大内插距离max_distans，仍然取窗口中的最低点，如果这个新点到最近的三角网定点的角度和它离三角形平面的距离都满足事先设定的阈值max_angle 和max_distans，并且三角形的坡度满足max_grade 则收入新的点，对三角网更新，重复这个过程直到d%的数据都被划成的地面，最后用并行算法统计每个点到地面的距离，小于阈值即可划为地面点。该方法对于地形起伏不大的地区是有效的。

4.1.7 基于数据分割的滤波算法

利用各种分割规则，可以对原始的点云数据或由点云数据生成的深度影像进行数据分割，将地形点从原始的LIDAR数据中提取出来。其中区域增长算法是最主要的方法，前提是所有的激光点都属于不同的物体（即区域）。该方法首先需要选出合适的种子，以种子为开始点，按照一定的规则，如高度梯度、方向、纹理等，将种子点附近的点不断聚类直到增长成为一个完整的具有相同属性的区域。依次找出其他区域，这些区域没有交集，且并集为全部点。最终，不同区域增长为各自同一属性的片断，再将这些片断分类为地形、建筑物和植被等。

数据的分割在传统的遥感影像处理中占有十分重要的地位，是影像处理的常用算法，目前利用区域增长法对深度影像进行分割的占多数，而对原始点云数据直接分割的较少。Sithole[26]在他的文章中描述了一个基于领域高差变化来进行LIDAR数据的分割的算法；Nardinocchi[27]应用基于高差的区域增长技术进行LIDAR数据的分割；Jacobsen和Lohmann[28]应用分割片断的紧密程度和高度差进行分割提取； Schiewe[29]用最大和平均梯度进行数据分割。

4.1.8 其它方法

点云数据处理还有其他一些滤波方法，如利用对原始点云数据生成等高线提取地形地物；通过结合反射强度对点云数据进行分割等算法；融合其他数据，如高分辨率影像进行地形的提取等。

通过前面的分析可以看出几乎每种方法都具有其自身的缺陷，有些方法需要分步反复迭代进行，这些方法大都强调高程低的点属于地面点，高程较高的点属于地物点，而实际情况有时并非如此，这就可能带来一定的系统误差。所以在处理之前，需要先进行预处理。

4.2 点云数据预处理

在 LIDAR 原始点云数据中，由于外界环境因素的影响，获取的扫描点云数据内可能包含不稳定的点和错误的点。这些点包括：

(1)、极高点：这些点通常并不属于地表，他们的出现一般源自于空中物体如鸟、

低空飞行器等。这类数据点在点云数据中很少，也因为与地表高差明显而十分容易滤除。

(2)、极低点：这些点同样不属于地表，他们的出现源自于系统的粗差。

这些数据点如果不从原始数据中剔除，在生成 DEM 的运算过程中，会造成很大的处理错误。尤其是当假设点云中高程较低的点是真实地面点时，极低点会被误当作地面点而造成地形严重下陷。这些点呈孤立分布，与正常点群的高程值不连续。如果不将极低点从 LIDAR 点云中剔除，会对最终 DEM 的生成产生较大影响——地势下陷。

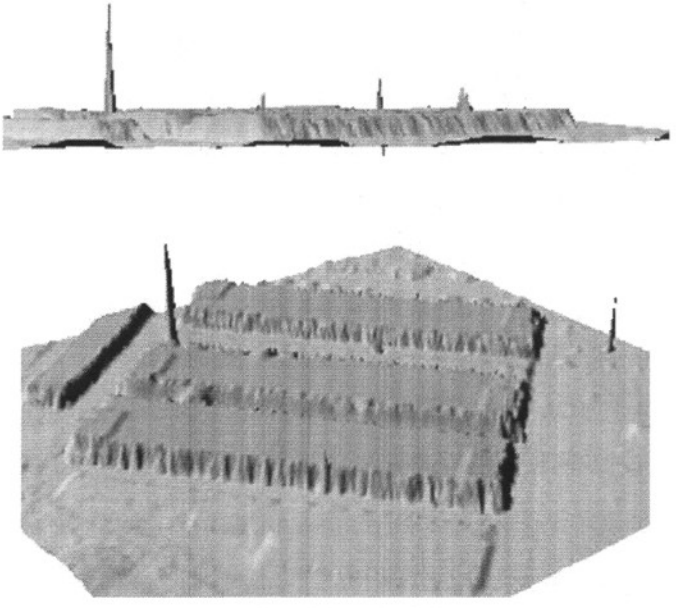


图 4.1 点云中存在极高点与极地点

所以，在使用这些数据之前，首先应将这些极高点和极低点进行剔除。极高点和极低点通过直方图分析可以很容易判断出是否存在。由于在 DEM 的生成过程中，极高点比普通地物还要容易辨别和剔除，而极低点却很容易被当作地面点保留，这里仅强调对极低点剔除的预处理。处理方法如下：

从未经过处理的 LIDAR 点云数据中，以其中的任意点 P_i 为目标点，r 为搜索圆的半径，搜索临近点。若对于任意点 P_j：

$$P_j \in A \text{且} Z_j - Z_i \geq \Delta Z_{\max} \tag{4.2}$$

(其中 A 为搜索区域，ΔZ_{max} 为设定的局部最大高差)

则点 P_i 极有可能为极低点，应当将其从点云中剔除。

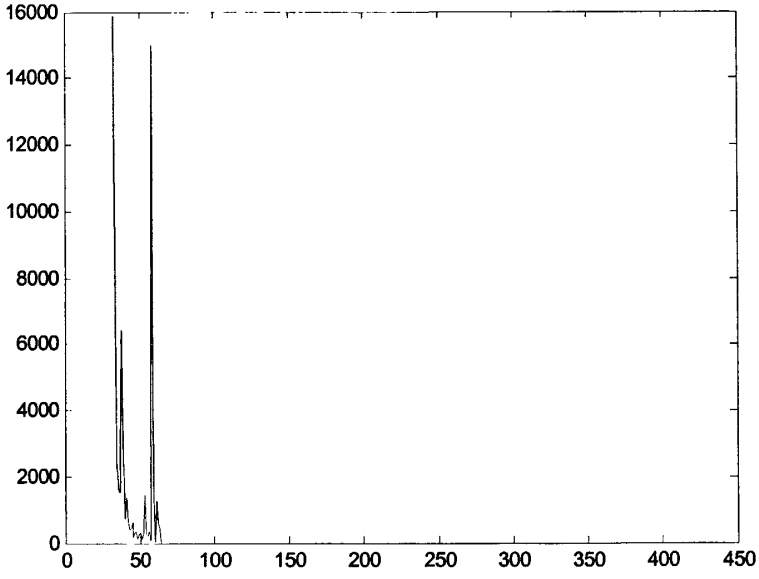


图 4.2 LIDAR 数据中极高点的存在

（直方图横轴表示高程值，纵轴表示对应某高程值的统计点数）

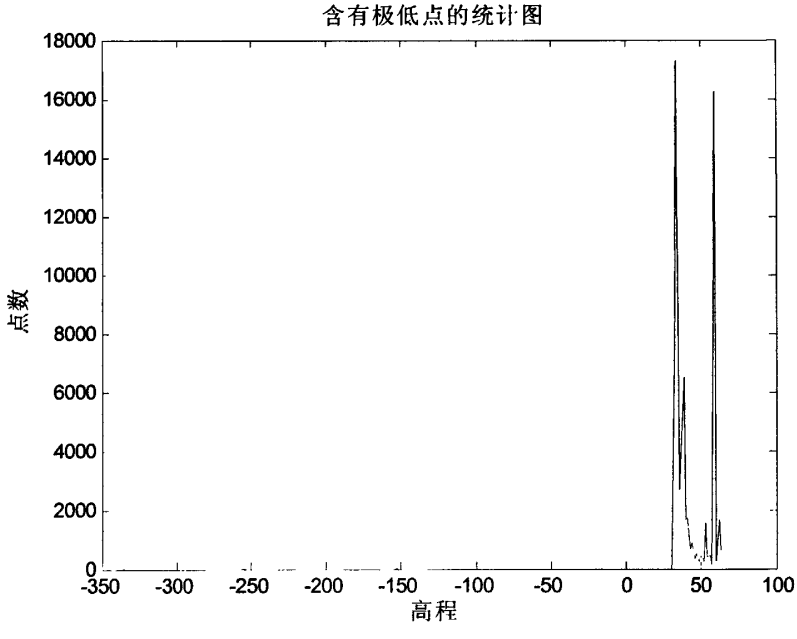


图 4.3 LIDAR 数据中极低点的存在

（直方图横轴表示高程值，纵轴表示对应某高程值的统计点数）

使用该方法对点云数据中的所有数据点进行判断，并将判断出的极低点从点云数据中剔除。这样，就可以避免由于极低点噪声引起的处理错误。

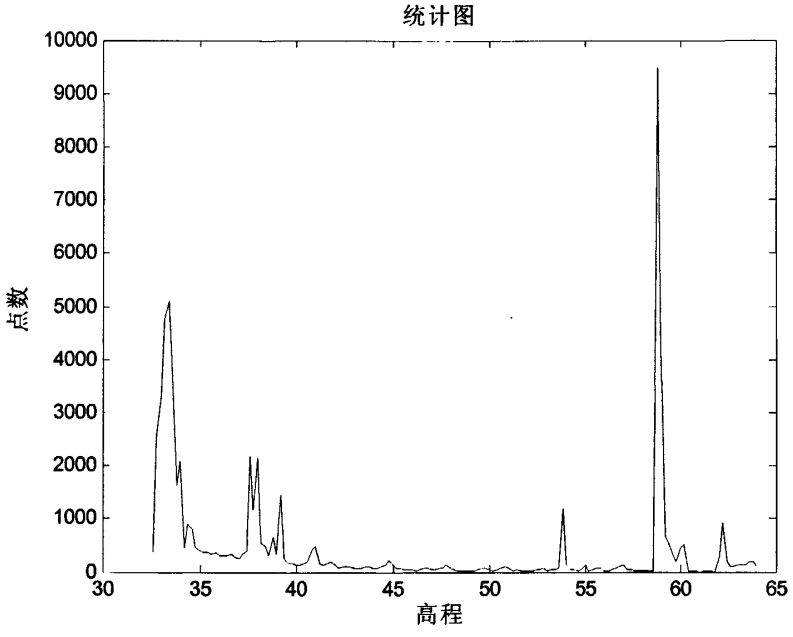


图 4.4 除去极值点的统计图

从图中可以很容易的看出点云数据中已经去除了高程极大值与极小值。相对来说，点的高程都集中在一个比较小的范围内(30m-65m)。该图只能说明点云数据不存在极值，存在峰值，说明有一部分可能是地面点，另一部分可能是地物点，更有可能是的大型建筑物。

其次，就可以进一步的进行数据分解，即根据点的位置、高程进行“分拣”，将非地面点（房屋和植被）与地面点区分开来。采用不同的滤波算法，如形态滤波和自回归方法等。滤波处理可以针对原始数据，也可以针对由原始数据内插后的规则格网数据。规则格网数据的生成，由于内插造成了一定的误差，在滤波过程中，会形成误差传播。但有利的一面是，影像处理中已有的滤波方法可以发挥作用，而对于不规则的原始数据，是无法采用类似方法的。在规则格网 DEM 的内插过程中，由于大部分情况下几个点会一起落入一个网格内，在算法中需要考虑加权。另外，在有的区域如密林中，激光量测常会产生遗漏点和空缺处，这就需要填补空缺。在滤波和 DEM 内插之后，因为生成的数据量很大，而许多商用软件只能处理有限量的数据，如 DEM 的可视化等，所以要采取一定的方法减少数据量。在整个处理过程的各个环节中，常常要将数据显示并做人工编辑。因此，处理软件显得非常重要，DEM、DSM 和城市模型的质量除了取决

于量测密度和激光扫描系统精度外，主要取决于处理软件。目前用于处理数据的时间大约是数据获取所需时间的 3 倍。

4.3 局部多项式最小二乘曲面拟合方法

本文这里利用局部多项式最小二乘曲面拟合方法进行地物点的剔除。通过在局部区域使用最小二乘方法拟合曲面来检测点云点的属性(地面点还是地物点)，将绝大部分地物点从点云中剔除。

4.3.1 算法原理

对经过极低点剔除的 LIDAR 点云进行逐点处理，以任意点 P_i 为目标点，以一个半径为 R 的较大的圆形搜索区域进行搜索，以搜索区域内的所有点的观测值，使用最小二乘方法拟合出一个最近似的曲面。拟合曲面可以选择平面、双线性曲面或者二次曲面，其对应的表达式如下：

$$z = a_0 + a_1 x + a_2 y \tag{4.3}$$

$$z = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy \tag{4.4}$$

$$z = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy + a_4 x^2 + a_5 y^2 \tag{4.5}$$

这里以二次曲面为例进行解算，其误差方程为：

$$v_i = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i + a_3 x_i y_i + \mathrm{a}_4 x_i^2 + a_5 y_i^2 - z_i^0 \tag{4.6}$$

式中，a_0、a_1、a_2、a_3、a_4、a_5 为模型的待定参数。因此，在点云数据拟合区域至少需要 6 个公共点。当公共点多于 6 个时，由区域内的 n 个观测点列出的误差方程为：

$$V = XA - z^0 \tag{4.7}$$

式中，

$$V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix}; X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1 y_1 & x_1^2 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2 y_2 & x_2^2 & y_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_n y_n & x_n^2 & y_n^2 \end{bmatrix}; z^0 = \begin{bmatrix} z_1^0 \\ z_2^0 \\ \vdots \\ z_n^0 \end{bmatrix}。 \tag{4.8}$$

因为这里使用最小二乘拟合曲面的目的是近似拟合出局部地形的大体走势，从而判断目标点的属性，所以应当对 n 个观测点取等权，使它们对曲面的拟合做出同等的贡献。从而根据平差理论，经过法化求解，得出二次曲面系数的解为：

$$A=(X^TX)^{-1}X^Tz^0 \tag{4.9}$$

根据拟合出的二次曲面，可以对点 P_i 进行重新插值，得到拟合高程：

$$z_i^{'}=a_0+a_1x_i+a_2y_i+a_3x_iy_i+a_4x_i^2+a_5y_i^2 \tag{4.10}$$

若对于点 P_i：

$$z_i^0-z_i^{'}\geq 0 \tag{4.11}$$

则点 P_i 被归为地物点，并被从点云中剔除；反之，若：

$$z_i^0-z_i^{'}<0 \tag{4.12}$$

则点 P_i 被归为地面点，并保留于点云中。

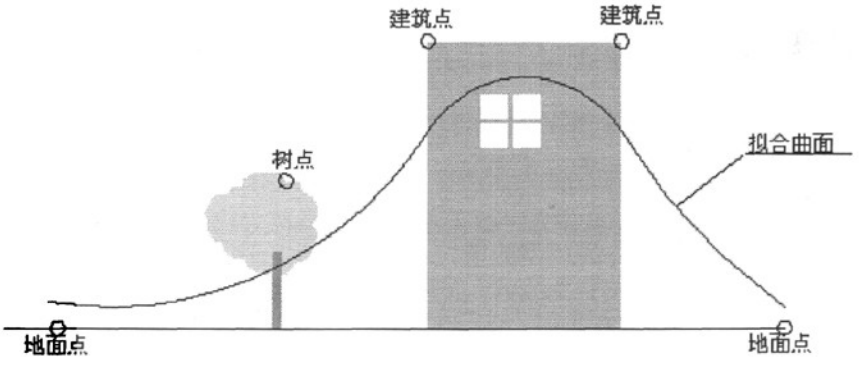


图 4.5 局部曲面拟合效果

图 4.5 表示出了局部曲面拟合的效果。从图中可以看到：对于地物点(包括建筑物，植被和其它点等)，拟合高度会低于原始高度；而对于点云中的地面点，拟合高度会高于原始高度。但当建筑物太大，以建筑物内部点作为目标点进行曲面拟合时无法搜索到足够的地面点，则会出现例外。此时，目标点会被作为地面点保留。这就是用局部移动

曲面拟合判断无法将点云中的所有地物点都剔除的原因。

4.3.2 算法实现

该算法的实现步骤是：1、通过上述的预处理对点云数据进行极大极小点云的剔除；

2、在 XY 平面内，找出 X、Y 坐标的最大最小值，以（X_{min}，Y_{min}）为圆心，以 R 为半径。在这个圆内的点进行局部多项式最小二乘曲面拟合。

3、判断圆内的点和这个曲面的关系，若在曲面以上，则为地物点，否则为地面点。

4、判断完后，圆心先沿 X 轴移动距离 R，同上述的方法再进行判断，直到圆心达到（X_{max}，Y_{min}），然后再沿 Y 轴进行移动判断，直到对整个数据集都判断完毕圆心到达（X_{max} ，Y_{max}）。

5、然后再对判断为地面点的点集，减小半径 R 的值，进行拟合判断，重复操作直到将地物点都去除。

4.3.3 实验分析

点云数据I：对于植被较密集的区域如下所示：点云个数为42052个，面积为22275平方米，点的密度为1.89个/平方米，DSM高程极值分别是，174.91m， 100.56m。



图 4.6 原始的点云数据

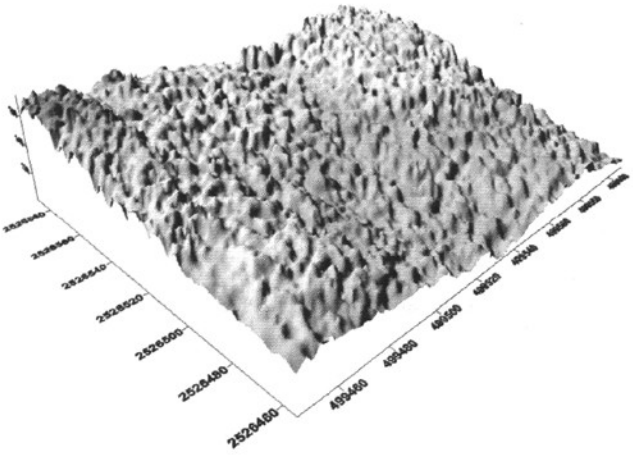


图 4.7 原始的 DSM （Kriging 插值）

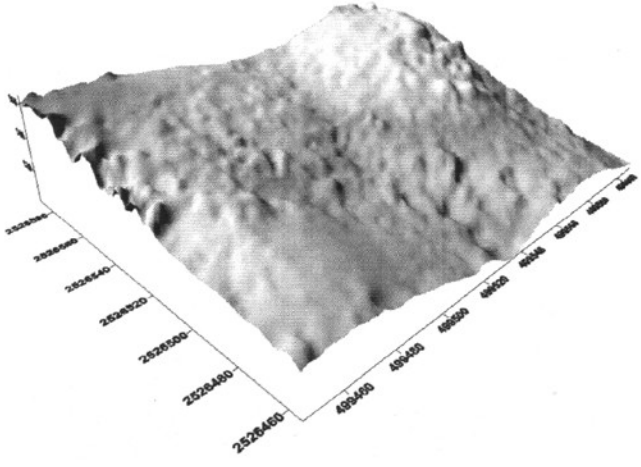


图4.8 局部曲面拟合剔除地物点后的LIDAR点云

使用Kriging插值获得的DSM格网，点数为9526个

由图 4.8 可以看到，经过局部曲面拟合剔除地物点的 LIDAR 点云中，绝大多数地物点都已经被剔除，但是还有部分地物点没有滤除掉，剩下的可能是代表矮小植被的点云。

点云数据 II 如下所示：该地区地势比较平坦，区域内有些房屋，点云总数 15345 个，覆盖面积 14404.286 平方米，点云的密度为 1.1 个/平方米，高程的极值分别为 100.81m，86.98m。

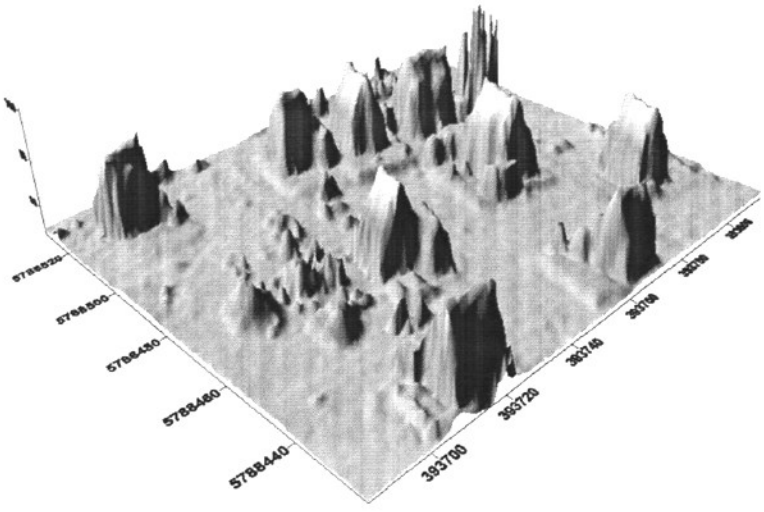


图 4.9 原始点云数据的 DSM 格网

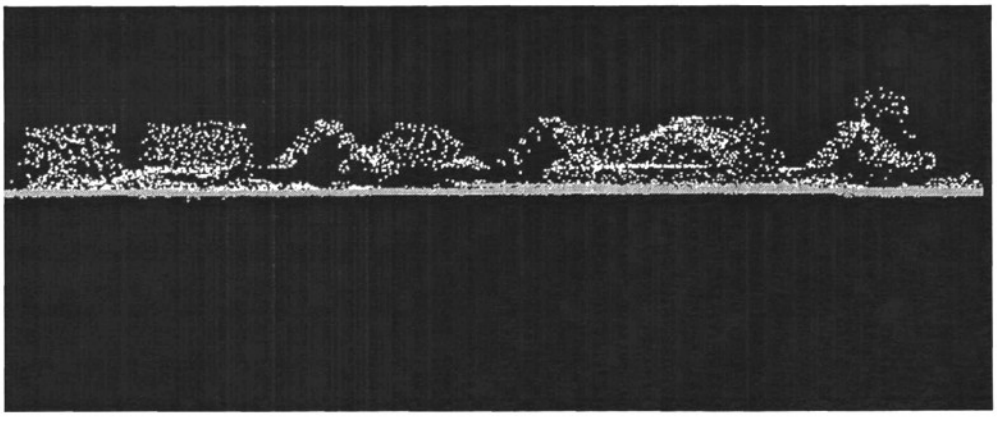


图 4.10 原始点云侧视图

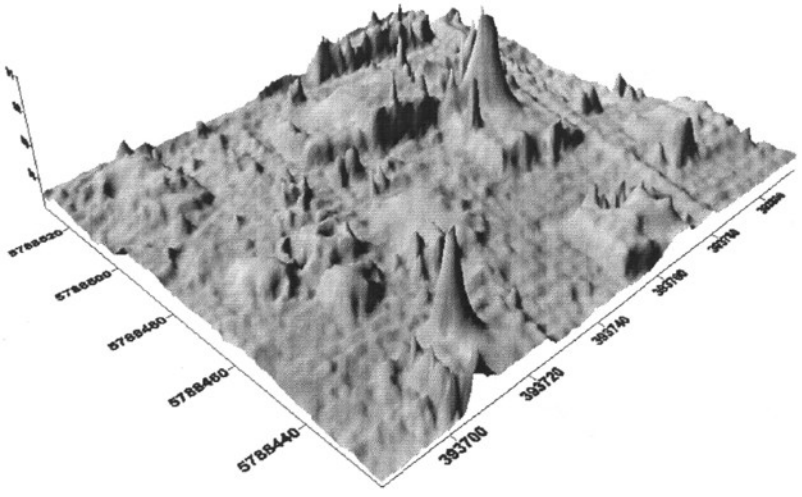


图 4.11 一次局部最小二乘曲面拟合后

（搜索半径 R=35，剩余 12975 个点）

从图4.11可以看出，经过一次局部最小二乘曲面拟合后，区域内已经有部分建筑物和树木被滤除，但还有部分建筑物上的点被保留了下来，这些点可能是建筑物顶部上比最高点低，但又比地面高的点，在这里并没有完全被滤除。

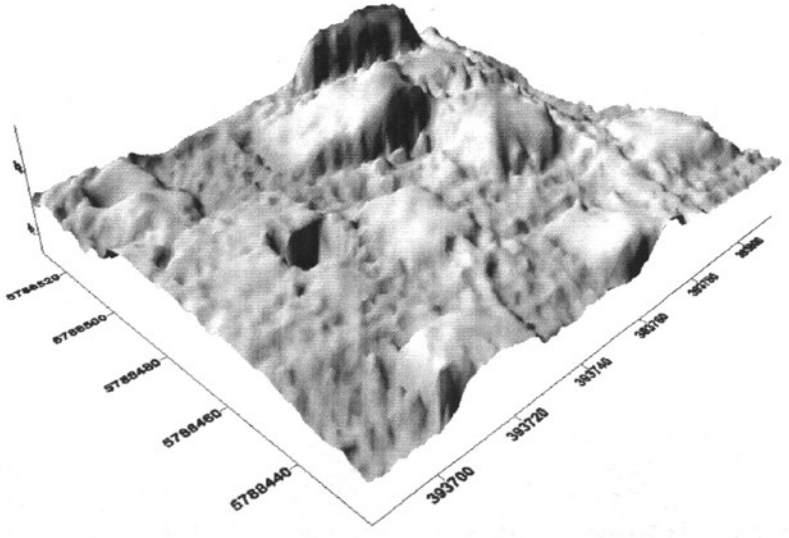


图 4.12 二次局部最小二乘曲面拟合后

（搜索半径 R=15，剩余 9231 个点）

从图 4.12 可以看出，图 4.11 中的那样的尖的凸起已经被抹平了，这说明再经过一次局部最小二乘曲面拟合后，那些在第一次滤波后未被滤除的地物点大部分都被滤除。但是还是存在个别点没有被滤除掉。图 4.12 中的凹凸不平可以说明这点。

对于该平坦区域，从点云数据的统计分布图也能看出局部最小二乘曲面拟合滤波的效果。如图所示：

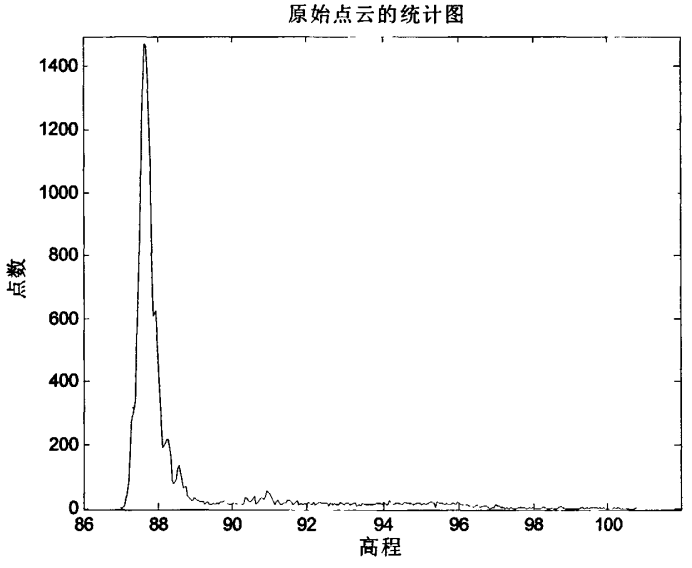


图 4.13 原始点云数据的统计图

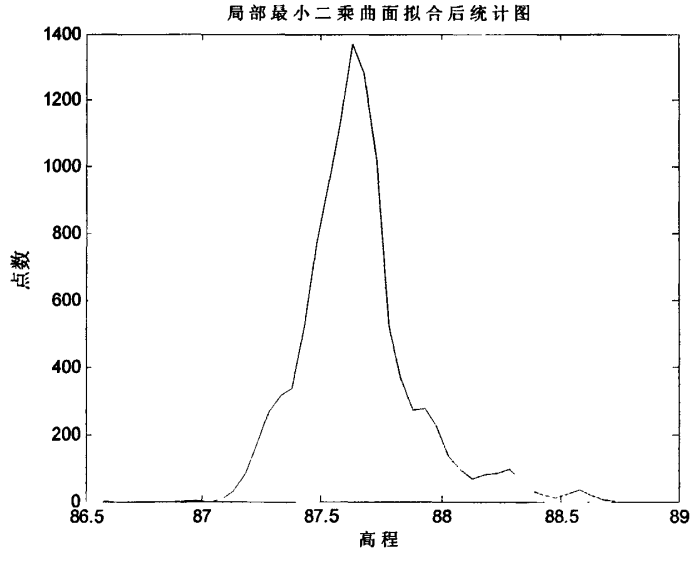


图 4.14 滤波后的点云数据统计图

通过统计图可以明显地看出来。图4.13为滤波前的点数数据分布图，对于这样一个

平坦的地区可以看到大部分的点都在高程比较低的区域，而那些高程大的而且点数少的点极有可能就是在建筑物或是树木上的地物点。图4.14 可以看到通过局部最小二乘曲面拟合滤波处理后，大部分的地物点都被滤除，滤波效果还是比较明显，图4.15是滤波后的侧视图。

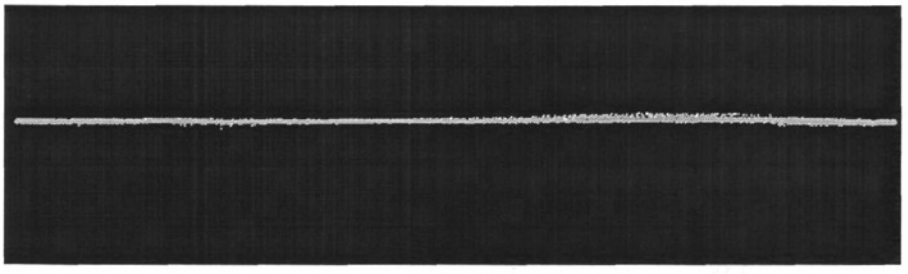


图 4.15 滤波后点云侧视图

以上用局部最小二乘曲面拟合滤波方法对点云数据I和点云数据II的实验分析，可以看出该方法，在点云数据滤波处理中，具有一定的去除地物点的能力，特别是在地形比较平坦的区域，能够将大部分的地物点滤掉。地物点包括很多，如行人、车辆以及其他一些人工设施，但在这里只考虑了除建筑物和树木。

在进行曲面拟合时，发现如下问题：在局部范围内（半径R的范围）这里是把所有点的高程观测值按等权进行计算。根据计算的残差，无论残差的大小，以残差的正负来判断是否为地面点，这里忽略了残差大小的统计信息，所以这就有可能将高于拟合面的地面点（如山脊）滤除掉，而把低于拟合面的地物点（低矮的植被等）保留下来。只能削减测区内的地物区域，并不能完全将地面地物分离出来，这是该方法的不足之处，仍需要加以改进。

4.4 移动窗口最小二乘曲面拟合法

移动窗口最小二乘曲面拟合在地形数据滤波中表现较好，具有适用于各种特征地形，运行稳健、分类精度高等特点，在地形起伏变化大的地区也可以得到良好的滤波效果，不足之处需要多次迭代。

Axelsson 等人提出了使用 TIN 作为参考 DTM 的移动窗口法，这里使用六个已知点解算出的二次曲面代替 TIN 作为拟合的局部参考 DTM。

4.4.1 算法原理

移动窗口最小二乘曲面拟合的核心思想是在一定范围内，使用拟合曲面作为参考DTM 对区域内的数据点进行判断。并通过实际数据点高程与参考 DTM 的比较，来实现滤波，保留阀值内的实际地形点，滤除大于阀值的地物点。移动窗口最小二乘曲面拟合的前提假设是：(1)、一定范围内高程最低点是地形点；(2)、地形激光点在一定范围内是符合二次曲面分布的，起伏不大，而其他地物如建筑物和树木则不在这个面上，并高于该曲面。在此假设下，使用一个窗口获取其范围内的六个最低点作为地形点并解算出对应的曲面方程作为参考 DTM。通过不断减小窗口的尺寸和高程的阀值，逐步提高滤波的精度和分辨率，通过多次滤波剔除地物点，最终获得全部是地形点的数据点集。

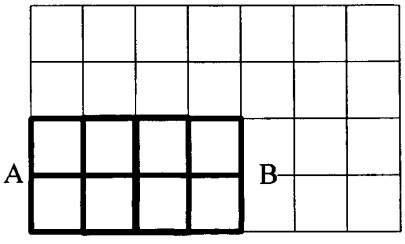


图 4.16 移动窗口的划分

移动窗口最小二乘曲面拟合需要将点云数据按照一定间隔进行格网划分，如图 4.16 所示，这里使用单元长宽都为 50m 的格网将所有数据进行分割定位。设定初始窗口的大小为 2×3 的格网（100m×150m），从第一个窗口的六个格网中分别找出每个格网中的最低点，并利用这六个点拟合二次曲面作为局部参考的 DTM，将该窗口（2×3 个格网）中的每个点云带入曲面方程，判断拟合值与实际值的差是否大于阀值，大于阀值的剔除，小于阀值的认为是地面点，予以保留。

判断完毕后，移动到下一个六个格网处重复上述的判断，按照顺序依次移动窗口，直到窗口到达最后六个格网单元结束。初次滤波后，得到初始的地形点集 Points1。对得到的点集 Points1 重复进行移动窗口最小二乘曲面拟合，此时缩小网格单元尺寸，减小高程阀值，得到新的地形点集 Points2。往返多次，最终可以得到较好的 DTM。

对于格网单元内没有点的处理：

可以想象，把一个格网平面覆盖在点云数据上，大多数的格网内是有数据的，而且点云的个数很多，但对于点云区域的边界或是由于建筑物的遮挡，或是水面的吸收，有些格网中没有点云数据，这会导致曲面拟合方程无法构建或是出错。此时需要设置一个

虚拟的最低点，参与曲面方程的构建。

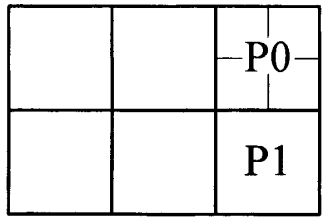


图 4.17 格网单元内没有点的处理

如图 4.17 所示，假设右下角格网单元内没有数据点，虚拟一个最低点为 P，则以该单元的中心坐标 P0 坐标（Xp0，Yp0）作为 P 的平面坐标，以上一个格网的最低点 P1 的高程 Zp1 作为该点的高程，最终虚拟点 P 的坐标为（Xp0，Yp0， Zp1），参与曲面方程解算。

若格网中有两个格网内没有点，则可以用上述的方法用其周围的一个点的高程作为一个虚拟点的高程，但是有的时候，格网单元内没有点的个数很可能大于两个，此时，要用其周围点的高程做虚拟高程，拟合的面可能会成为平面，与实际地形不符，所以，在这里当格网内无点个数大于两个的时候直接进行下一个格网的拟合。

4.4.2 算法实现

该算法的实现步骤是：1、通过上述的预处理对点云数据进行极大极小点云的剔除；

2、在 XY 平面内，找出 X、Y 坐标的最大最小值，然后将点云数据进行格网划分。以 2×3 个格网单元的窗口进行移动窗口最小二乘曲面拟合，得到初始地面点集 Point1。

3、缩小格网尺寸，减小高程阀值，对点集 Point1 重复进行移动窗口最小二乘曲面拟合，得到新的地形点集 Point2。

4、根据实际需要，多次重复迭代直到得到满意的结果。

4.4.3 注意问题

该方法与窗口大小的选取和滤波阀值的设定有关。窗口过小，会将大于窗口的建筑物顶保留下来，窗口过大则会将地表平滑，使微小的地形变化被忽略。阀值太大，会将一些植被点当作地面点而保留下来，阀值太小，又会将真实的较小的地形突变点去掉。所以，窗口大小的选取和滤波阀值的设定使滤波成功与否的关键，他们与实际地形地貌相关，不同的地形，如城市、平原、丘陵、山地应该设定不同的参数。

格网的设置，即要有一定的密度（即尺寸大小），保证获得充足的起始最低点来构成有效的地面模型用来判断；又要尺寸一定大，超过数据范围内最大的建筑物尺寸。城市地区一般地形比较平坦，建筑物的尺寸普遍较大，但其长度或宽度一般不会超过100m，所以可以将初次格网的单元尺寸设置的应该大于100m。如果建筑把整个格网单元都占满了，则获得的最低点实际是建筑物顶部点云数据，即便是这些数据中的最低点，它的高程值也是很大的，用此数据来拟合，则会导致拟合的DTM不准确。所以，只要保证格网单元的尺寸大于其格网覆盖区域中建筑物的最大尺寸，才能保证获得单元内的最低点是地面点。

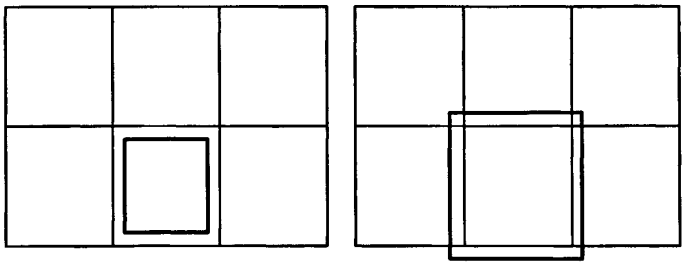


图4.18 格网单元尺寸设计

对于其他建筑物尺寸较小的区域，如郊区或是野外，则可以适当减小初始窗口的格网单元尺寸。

移动窗口最小二乘曲面拟合的高程阀值是和格网单元尺寸紧密关联的，当格网单元尺寸减小时，高程阀值也相应的减小。总的来说，初始格网单元尺寸和高程阀值对整个滤波的影像最大，需要慎重设置。由于是用于地形滤波，主要考虑最终数据不能包涵非地形数据，所以可以适当调整阀值，宁可将某些地形点分类到地物点中去，也不能将地物点分类到地形点中来，使最后得到的DTM产生粗差。

4.4.4 实验分析

所用数据仍然是点云数据I。第一次的滤波格网尺寸为15m，高程阀值为1.5m，滤波结果如图所示，

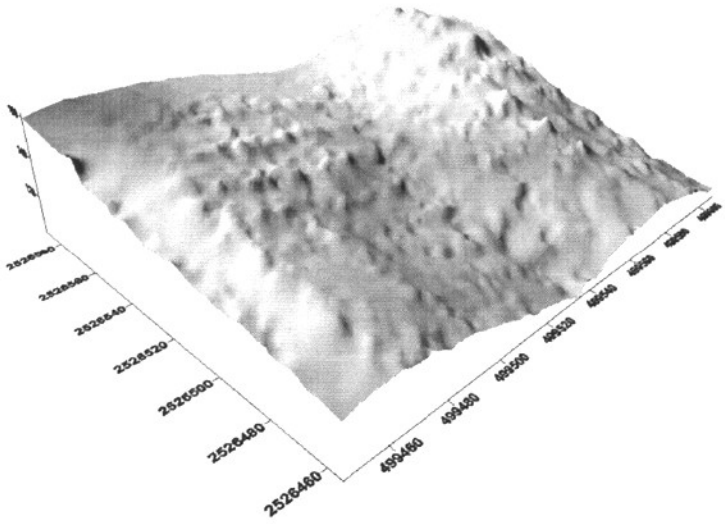


图 4.19 一次移动窗口最小二乘曲面拟合后

（格网尺寸 15m，高程阀值 1.5m，剩余 9248 个点）

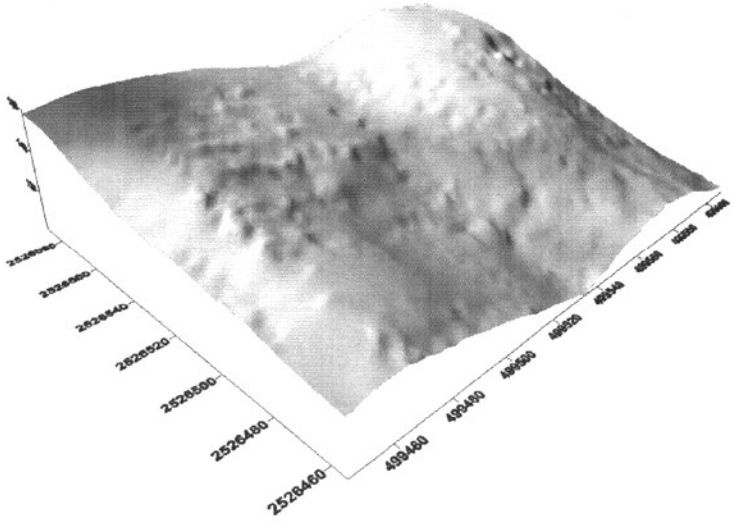


图 4.20 二次移动窗口最小二乘曲面拟合后

（格网尺寸 8m，高程阀值 0.1m，剩余 4251 个点）

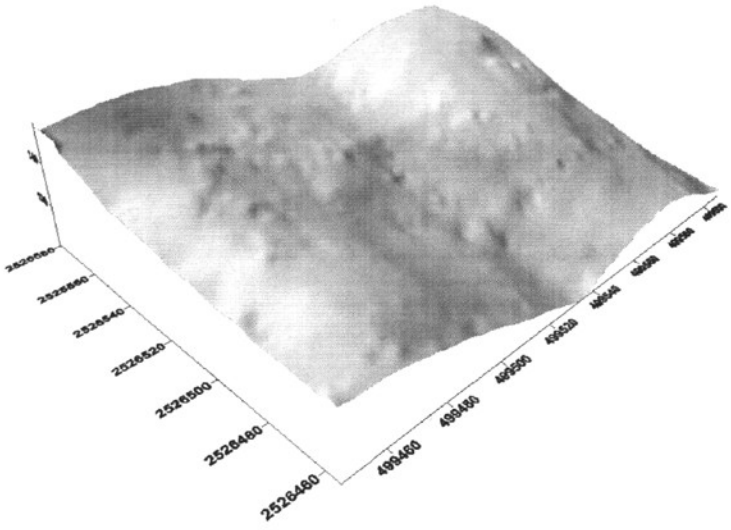


图 4.21 三次移动窗口最小二乘曲面拟合后

（格网尺寸 3m，高程阀值 0.05m，剩余 2239 个点）

通过三次的滤波后，基本上已经将所有地物点都滤除了，可能还存在个别点由于算法的缺陷没有剔除，但是地形被很好的保留下来了。

点云数据 III：对于有建筑物的城市郊区：点云总数 39204 个，覆盖面积 35558.243 平方米，点云的密度为 1.1 个/平方米，高程的极值分别为 60.34m，35.23m。数据如下所示：



图 4.22 原始的离散点云

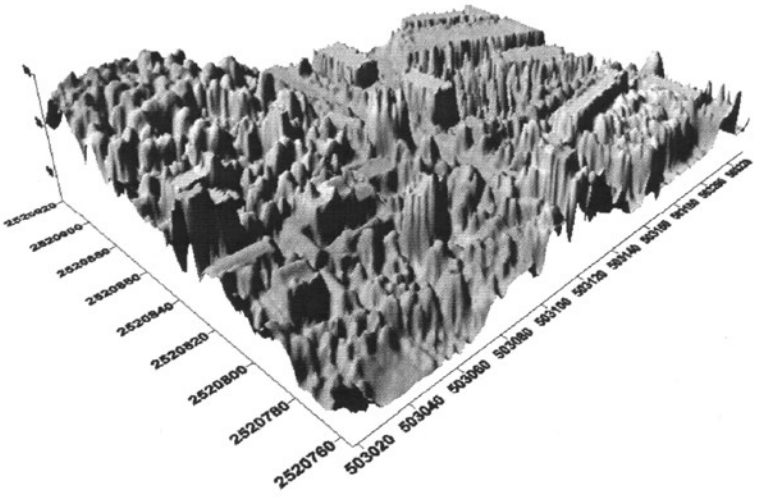


图 4.23 原始点云的 DSM 格网

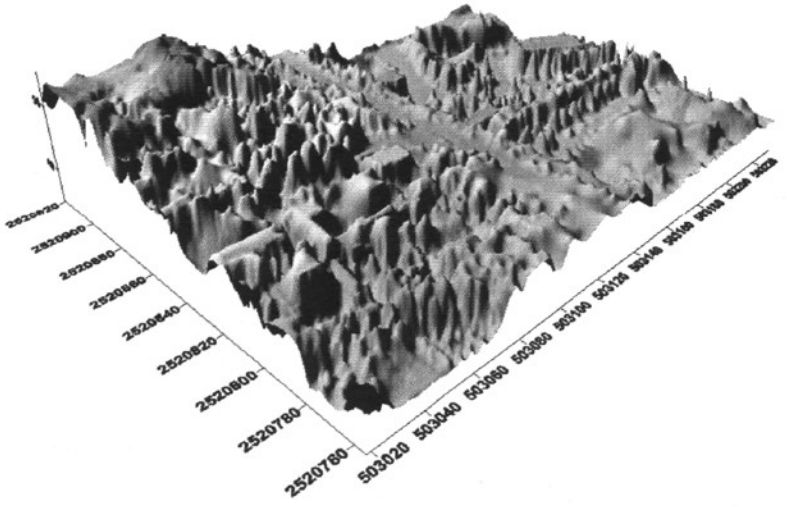


图 4.24 一次移动窗口最小二乘曲面拟合后 DSM 格网

（格网尺寸 40m，高程阀值 5m，剩余 21513 个点）

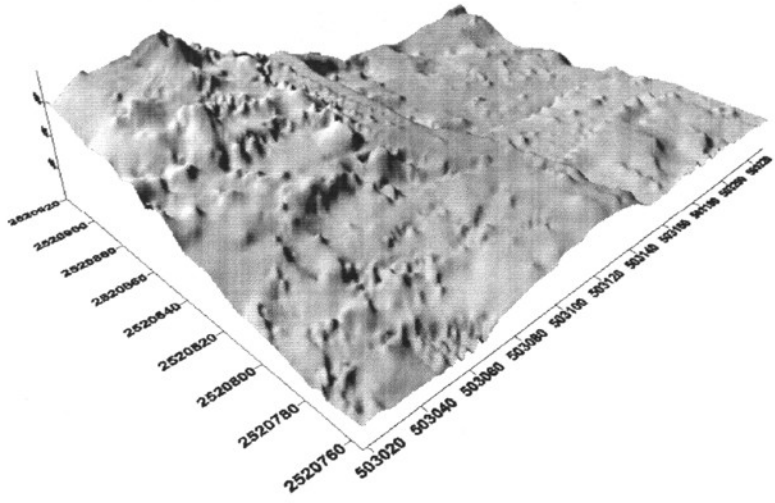


图 4.25 二次移动窗口最小二乘曲面拟合后 DSM 格网

（格网尺寸 15m，高程阀值 1m，剩余 9415 个点）

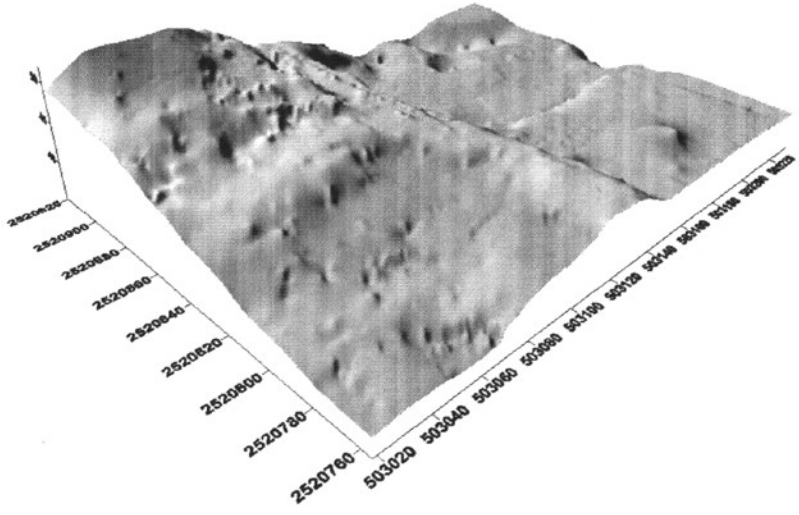


图 4.26 三次移动窗口最小二乘曲面拟合后 DSM 格网

（格网尺寸 8m，高程阀值 0.1m，剩余 5440 个点）

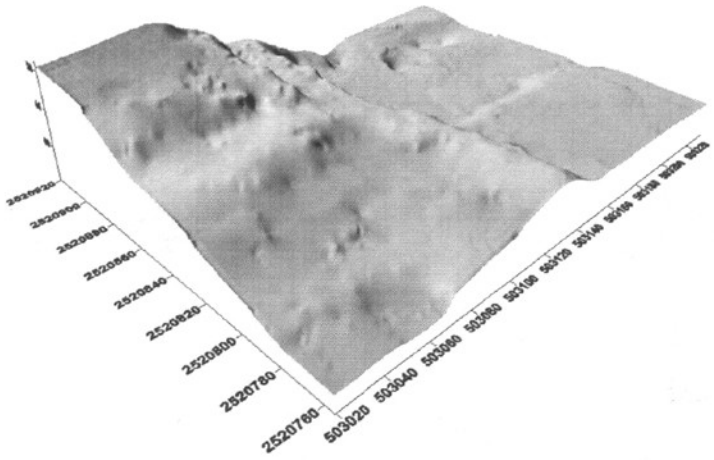


图 4.27 四次移动窗口最小二乘曲面拟合后的 DSM 格网

（格网尺寸 4m，高程阀值 0.05m，剩余 3669 个点）



图 4.28 四次移动窗口最小二乘曲面拟合后的点云数据

（格网尺寸 4m，高程阀值 0.05m，剩余 3669 个点）

从图 4.22 至图 4.28 中可以看出，建筑物和植被点等已经被滤除。效果还是比较明显的，图 4.27 中存在有凹凸不平的地方，说明算法还是不太完善。但是整个区域地形基本上已经表现出来了。

移动窗口最小二乘曲面拟合和上述的局部多项式最小二乘曲面拟合的拟合方法都是一样的，都是基于局部范围内的曲面拟合，不同的地方是局部多项式最小二乘曲面拟合中拟合的区域是一个半径为 R 的圆，并且将在这个圆内的所有点都参与到曲面的计算中，然后再根据点与曲面之间的残差的正负来判断是否为地面点，这存在如下问题，

首先，因为是把这个区域内的所有点都参与计算，计算量比较大；其次，不能保证拟合所用的点是地面点，这些点中有地物点也有地面点，以此拟合的面上有地物点也有地面点，所以它是一个扭曲的曲面，但对于地形比较平坦的地区，该方法有一定的合理性。但对于地形起伏的地区就不太合适，因为它不能有效的将地物点都滤除。而移动窗口最小二乘曲面拟合的区域是一个由六个小的格网组成的一个矩形区域，在这个矩形区域内找到每个格网中的最低点，总共有六个，这几个点认为是地面点，然后以这六个点来拟合一个面就可以视为地面，以此面判断是否为地物点或地面点，因为拟合的点少所以速度比较快，而且也能够保证判断的正确。通过上述的事例说明移动窗口最小二乘曲面拟合的滤波效果比局部多项式最小二乘曲面拟合滤波效果好。

4.5 基于坡度的伪扫描线滤波方法

4.5.1 算法原理

本文对“一维双向标明法”[30]稍作改进。不同之处在于，“一维双向标明法”主要是针对线扫描方式的，因为这种扫描方式的点云数据是按扫描的顺序存储的，每两个相邻点都是实际地表的相邻点，所有数据按存储顺序连线后的实际坐标位置是连续的呈“Z”字型的线条。“一维双向标明法”就是将 LIDAR 原始数据按扫描线的实际顺序拆分成一行行的线状数据进行滤波的。而有些数据因为扫描方式的不同不一定就是按线扫描方式的顺序存储的，所以在这里将 LIDAR 数据集看成由很多行数据组成，把一行看作一条伪扫描线，并加入距离限制，对这样一条伪扫描线从左右两个方向分别对数据进行过滤。

首先，将数据沿 Y 轴（或是 X 轴）划分为许多细条，每一个细条就可以看作是一条伪扫描线，然后对每一个细条内的数据用基于坡度的方法对数据进行滤波。假设伪扫描线的第一个点 P(0)是地面点，与其相邻的点假设为 P(1)，则 P(1)相对于 P(0)的坡度可以用公式

$$S_{i+1}=\frac{Z_{i+1}-Z_i}{\sqrt{\left(X_{i+1}-X_i\right)^2+\left(Y_{i+1}-Y_i\right)^2}} \tag{4.13}$$

计算得到，若坡度 S 大于给定的阀值 L，则表示 P(1)为地物点，若坡度 S 小于给定的阀值 L，先计算两点间的距离，若距离大于给定的阀值，则认为是地物点，否则为地面点。如果 P(1)为地面点，它右边相邻点 P(2)也用同样的方法进行地物点与地面点的判

断。如果 P(1)为地物点，当 P(2)点对于 P(1)的坡度大于等于一个给定阀值 l（$l \leq 0$）时，该点为地物点，当 P(2)点对于 P(1)的坡度小于 l 时，同时判断 P(2)与这一扫描线中距离 P(2)最近地面点的高程 h 的差小于预先给定的高程阀值 Limt_H，成立则为地面点，否则为地物点。将上述过程从右至左再执行一边，把两次都判断为地面点的公共部分作为该扫描线的地面数据，其他伪扫描线的过程与此类似。这样最终可以把地面点过滤出来。

4.5.2 算法实现

该算法的实现步骤是：1、首先经过预处理剔出点云数据中极大极小点云；

2、在 XY 平面内，找出 Y 坐标（或 X 坐标）的最大最小值，然后给定一个步长 step，该步长就是每个伪扫描线的宽度，一般设置的比较小，在这里设置为 30cm。将所有在该扫描线内的点沿 X 坐标（或 Y 坐标）从小到大排序，则相邻的坐标就是伪扫描线内的相邻点。

3、从左到右进行坡度滤波。

4、从右到左进行坡度滤波，然后找出前后两次滤波都判断为地面的公共点。

4.5.3 实验分析

实验数据仍然是点云数据 I，用伪扫描线滤波处理后的数据如图所示：

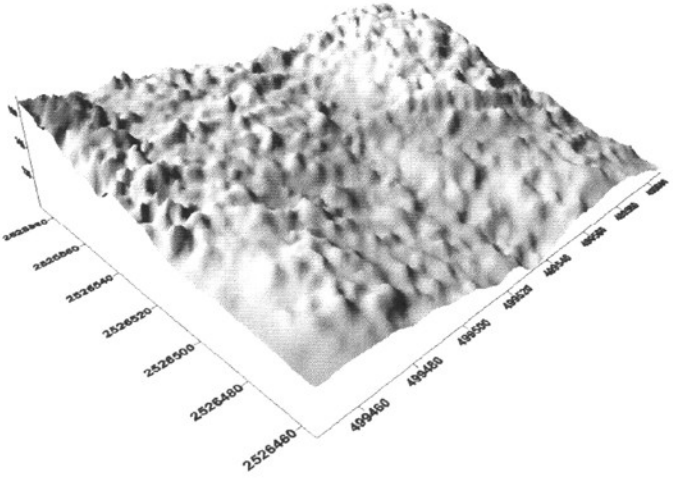


图 4.29 一次伪扫描线滤波处理

（距离限制 10m，坡度阀值 0.5m，高程阀值 1m，点数 9323 个）

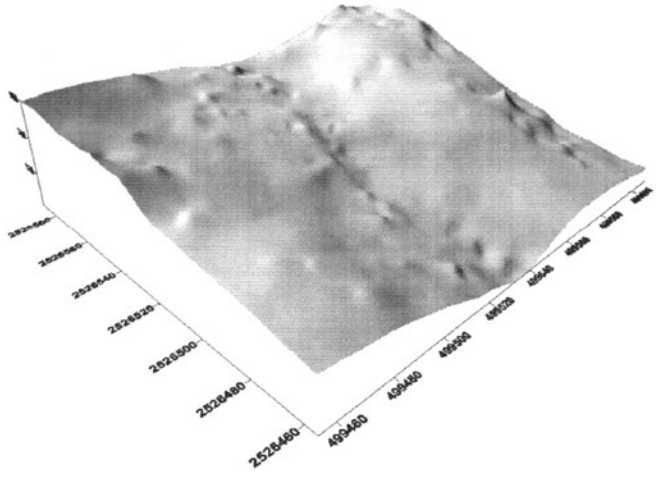


图 4.30 二次伪扫描线滤波处理

（距离限制 5m，坡度阀值 0.2m，高程阀值 0.3m，点数 1430 个）

从图 4.29、图 4.30 可以看到基于坡度的伪扫描线方法能够快速的将地物点分离出去，这里只进行了两次滤波过程，就可以将地形大致表示出来。但还是有个别突起的地方，没有完全的过滤干净。

4.5.4 存在问题

基于坡度的伪扫描线方法比较容易实现，而且扫描的速度较快，但也存在一些问题：

1、滤波的效果主要取决于所设置的距离限制、坡度阀值和高程阀值，阀值设置的不同，滤波效果也不同。

2、由于没有考虑其他方向的坡度信息，所以同一地形在相邻的两条伪扫描线间不吻合。

4.6 评价指标

4.6.1 定性评价

对于地形滤波算法的评价指标，分为定性和定量两种。定性评价即分析得出算法效果好、一般、差等几个不同的层次，用于与其他算法间的横向比较。定量评价即利用数据进行分析得出结论。

对点云数据 I 用上述不同滤波算法进行处理，通过处理后的 DSM 格网，我们可以

看出，对于该区域，移动窗口最小二乘曲面拟合的方法滤波效果较好，局部多项式最小二乘拟合的方法滤波效果较差，基于坡度的伪扫描线方法滤波效果一般。但对于其他地形的区域，在这里没有进行比较。

4.6.2 定量评价

对于定量的评价，本文采用 George Sithole 等人提出的三个评价指标：假定：a 表示参考数据中地面点的总数；b 表示参考数据中非地面点总数；c 表示被误分为非地面点的地面点的总数；d 表示被误分类为地面点的非地面点的总数。定义三个评价指标：一类误差：$100\times\frac{c}{a}\%$；二类误差：$100\times\frac{d}{b}\%$；总的误差：$100\times\frac{c+d}{a+b}\%$。

在大多数情况下地形都是比较复杂，为了得到高精度的 DTM，通常需要选择较小的一类误差但也不能忽略二类误差。总误差是衡量两类错误总数的指标，因此，在任何情况下，总误差越小表明滤波越准确。

以下是对上述三种滤波方法的定量评价：

这里用点云数据处理软件 TerraScan 对点云数据 I 处理后得到该地区的地面点个数为 2362，地物点个数为 39690，依此作为实际的地物地面点数。

表 4.1 局部多项式最小二乘拟合方法结果

a	b	c	d	评价指标		
				一类误差	二类误差	总误差
9526	33526	58	7222	0.61%	21.54%	17.31%

表 4.2 移动窗口最小二乘拟合方法结果

a	b	c	d	评价指标		
				一类误差	二类误差	总误差
2239	39813	1057	934	47.21%	2.35%	4.73%

表 4.3 基于坡度的伪扫描线滤波方法结果

a	b	c	d	评价指标		
				一类误差	二类误差	总误差
9323	33729	645	7606	6.92%	22.55%	19.62%

对该植被比较密集的区域对上述三种滤波方法定量评价：从一类误差的比较中可以

看出局部多项式最小二乘拟合方法一类误差最小，这说明在滤波后被误分为地物点的地面点较少，移动窗口最小二乘拟合方法滤波后被误分为地物点的地面点最多，说明该算法在这里将很多的地形点都去除了；从二类误差的比较中可以看出，移动窗口最小二乘拟合方法的二类误差最小，说明在滤波的过程中将大部分的地物点都滤去除了，不过它的一类误差很大，是牺牲部分地面点来换取较小的地物误分。局部多项式最小二乘拟合方法和基于坡度的伪扫描线滤波方法的二类误差差不多，不过在速度方面，后者的速度要快很多，基于坡度的伪扫描线滤波方法只需过滤一次就能达到局部多项式最小二乘拟合方法多次滤波相当的水平。从总误差来看，移动窗口最小二乘拟合方法的总误差比其他两个滤波方法都小，局部多项式最小二乘拟合方法次之，基于坡度的伪扫描线滤波方法最大，这里首先肯定了移动窗口最小二乘拟合方法，但是后两者间的比较，因为基于坡的伪扫描线方法的速度较快，在这组数据中，本人认为基于坡度的伪扫描线滤波方法稍好些。

这里只是对该特定区域，通过定量分析对上述三种滤波方法进行评价，但是总的来说，这几种方法还是不能完全将地面地物分离开来，还需要进一步的改进。

4.7 点云数据的地物提取的方法探讨

为了进一步的应用 LIDAR 数据，需要将属于建筑、植被等不同类型物体的 LIDAR 点云，从原始的点云中进行探测和分类提取，这是 LIDAR 数据处理的重要一步，也是进行 LIDAR 数据应用及建筑物和树木的三维重建的基础。目前，地物提取分割算法大部分是基于 LIDAR 数据插值后的栅格 DSM 进行的，对原始激光点云直接处理的较少。地物提取方法如下：

4.7.1 基于激光测距点云的建筑物自动提取

奥地利维也纳大学的 Franz Rottensteiner 等人提出了直接从 LIDAR 数据生成点云来自动提取建筑物，采用基于不均匀误差分布函数的分层鲁棒内插算法，就能把地面上的激光点与屋顶及其它物体上的激光点分开，从而计算出 DTM ，通过分析激光点与 DSM 和 DTM 的高度差值再将建筑物上的点与其他点分离出来，从而得到建筑物的模板，最后在候选的区域中采用基于曲率的分割技术自上而下地建立多面体建筑物模型。

4.7.2 基于两次回波信息的渐进滤波提取建筑物

美国普渡大学 Alharthy 等人对具有两次反射距离的纯激光测距点提取建筑物进行了研究，设计了通过渐进滤波方法进行建筑物三维信息的提取。从空中发射的激光光束(一般光斑在地面的直径可达 15～30cm) 在地面遇到树木等具有穿透物体时会产生两次反射回波，从而得两个激光距离，而不能穿透的物体只有一个距离。建筑物边缘也具有两次回波的效应，而且一般建筑物的两次回波距离相差比较大。对于两次回波数据通过滤波可以去除大部分噪声数据，得到主要包含建筑物的区域，但还没有去除一些特殊的噪声，比如浓密树木区的中心地带及其边缘区。为此他们提出了根据局部方差的统计与分析来去除夹杂在建筑物中的树木等噪声。从原始激光数据中去除各种建筑物和杂物就可以得到裸地面的数字高程模型 DEM ，由经过滤波的 DSM 和 DEM 就可以提取地面上的物体，再根据建筑物高度和大小确定合适的阈值来去除一些非穿透物体(如汽车) ，从而得到初始的建筑物形状。但还必须根据一些几何约束进行规则化，即可以得到三维建筑物信息。

4.7.3 聚类方法提取地物

聚类方法，是按照一定标准来鉴别实体或现象间的接近程度，并将相接近的归为一类的数学算法。其假设前提是：属于同一个物体的数据点由于具有某种共同特征或属性。算法的一般流程是，首先找出种子区域，然后以种子区域开始进行聚类，目前主要是区域增长法，即将相邻的属性特征相同的点不断加入到种子区域中，直到没有新的点再加入，这样一个区域就通过聚类得到了，其他的区域也依照此法依次生成。

分割算法的概念和聚类类似主要是在图像处理中应用，是计算图像分析和处理的关键技术之一。其目的是将图像中有意义的特征或需要应用的特征提取出来。图像分割所遵循的基本原则是，使区域内部所考虑的特征或属性是相同或是相似的。而这些特征或属性在不同的区域中则不同，存在差异。经典的图像分条的方法有基于灰度直方图的阀值化方法、区域增长方法和边缘检测方法。其中阀值化方法因其简单、计算量小、性能较稳定而成为图像分割中应用最广泛的分割技术。近年来，随着各学科新理论和方法的提出，人们也提出了许多结合特定理论、方法和工具的分割技术，如基于数学形态学的分割技术、借助统计模式识别方法的分割技术、基于分形的图像分割技术和利用神经网络的分割技术等。

4.7.4 等高线分割法

LIDAR激光点云数据可以插值生成DSM，也可以生成表面等高线。如下图：



图4.31 建筑物区域等高线

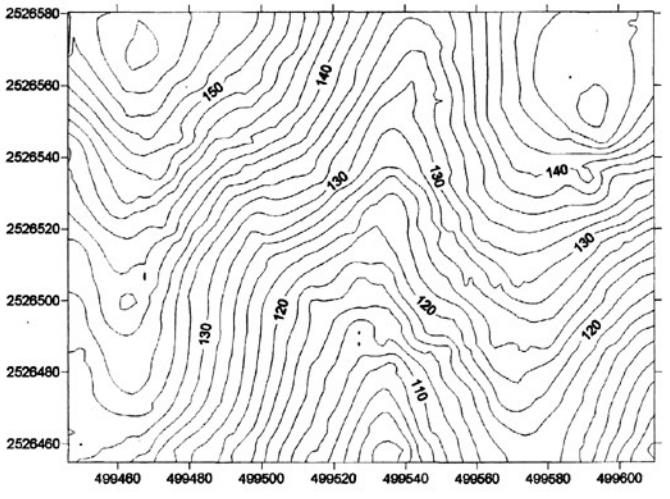


图4.32 地形区域

如图4.32由LIDAR点云插值生成等高线实例所示，由于建筑在轮廓外墙处，等高线具有叠加的特点，且在其覆盖范围内等高线长度和内部面积不随高度增长而减小，这一特性是平滑的地形等高线所没有的，利用该特性可以将建筑物从LIDAR点云数据中提取出来。

4.7.5 融合其他数据的地物提取

除结合LIDAR自身获取的反射强度数据，目前融合其他数据主要是高分辨率的光学影像，进行LIDAR数据的地物分类提取，目前已经有许多方法，也是LIDAR数据处理的发展方向之一。对高分辨率影像的地物识别与提取，是摄影测量与遥感的主要工作之一，相关研究很丰富，其具有地物属性识别容易，但高度信息提取困难的特点，而LIDAR数据正好与之互补，在光谱信息难以判断地物时，LIDAR的高度数据也可作为辅助数据参与判断，LIDAR数据难以提取地物轮廓时，影像数据可以作为参考。因此，结合两种不同数据的融合技术是发展的必然。除高分辨率的光学影像外，还可以融合如电子地图、GIS数据、反射强度、高光谱影像等数据进行地形的判别与提取。

第五章 结论与问题

5.1 结论

机载 LIDAR 技术在三维地球空间信息的实时获取方面产生了突破性的发展，为获取高时空分辨率地球空间信息提供了一种全新的技术手段。本文对机载 LIDAR 技术的优势及国内外研究现状、系统工作原理和组成做了详细论述；从不同方面对 LIDAR 技术与航空摄影测量进行了比较，体现了 LIDAR 技术的优越性；然后详细介绍了机载 LIDAR 的主要应用领域。在点云数据处理方面，对数据处理的流程，点云数据的特点以及点云数据的组织等作了详细分析和探讨；在点云数据滤波处理中，对现有各种滤波算法进行了综合评价，指出了现有方法得不足，在此基础上分别用局部多项式最小二乘曲面拟合、移动窗口最小二乘曲面拟合和基于坡度的伪扫描线三种不同的滤波方法对点云数据进行了滤波处理，并对滤波结果进行定性和定量的评价，三种滤波方法在一定程度上都能够对原始离散点云数据进行地物点去除的滤波处理，并得出如下结论：

1、 局部最小二乘曲面拟合在平坦的地区，能达到较好的滤波效果。在起伏比较大的时候，特别是在有凹地的地区不能很好的进行滤波分类。通过定量评价，该方法在滤波过程中地面点的误分率较小，地物点的误分率较大；拟合中需要计算两点间的距离来判断点是否在一个给定的局部范围（半径为 R 的圆）内，这个过程要计算圆心与所有点的距离，计算量大，因此滤波速度较慢。

2、 移动窗口最小二乘曲面拟合滤波地物点误分率相对较小的，不过这是以牺牲部分地面点为代价的。

3、 基于坡度的伪扫描线滤波方法具有较快的滤波速度，但是滤波效果受坡度阀值，距离阀值及高差阀值的影响比较大。

总的来说移动窗口最小二乘曲面拟合的滤波方法在处理过程中具有相对较好的滤波效果，基于坡度的伪扫描线滤波具有较快的运行速度。不过，上述滤波方法都需要迭代运算，每次迭代都需重新设定阀值，不利于自动化的处理。本文以 Matlab7.0 为工具，实现以上三种滤波算法，图像显示使用的是 Golden Surfer 软件。

5.2 问题

当然，应该看到还有许多需要研究解决的问题：

1、激光扫描系统硬件的高速发展对软件的智能化处理提出了更高的要求。例如，通过对更为复杂的目标建模来获取更加完整的信息，如地貌结构、景观建模、城市建模、环境动态变化监测等等。然而，地物的自动提取虽然经过了二十多年的研究，已经取得了很大的进展，但是仍然没有一套能够对各种场景自动重建的完整系统，尤其对建筑物类型和形状比较复杂的城市地区更是如此。

2、关于在不同传感器图像与数据之间的配准技术。尽管国内外目前在遥感影像的配准方面已开展了许多研究工作，而且形成了一些软件系统，但这些研究大多是针对影像分辨率、波段、景物特征等一致或比较接近的情况，或采用人机交互的方法在待配准的影像间选择控制点。而对于多源空间遥感信息，特别是当它们来自性质完全不同的传感器，或其波段、分辨率具有很大差别甚至完全不同时，它们之间的配准问题还没有解决，更没有达到快速、具有较高自动化的程度，无法满足处理大规模影像数据的需求。

3、激光扫描与摄影测量作为数据获取的两种手段，各具优势，综合这两种技术可以更为有效地实现信息利用。例如，如果能够在现有的摄影测量技术较为成熟的软件包中加入激光点云数据，然后，通过精确、稳定的配准算法综合利用两者提供的信息，应当可以作为地物自动分类与提取的一条有效途径。

4、在局部多项式最小二乘曲面拟合滤波中，如何有效地利用残差信息来对滤波方法进行改进；在移动窗口最小二乘曲面拟合滤波中，阀值参数能否自适应，如何减少其迭代的次数而不影响滤波效果；在基于坡度的伪扫描线滤波中，如何解决同一地形在两相邻扫描线的不吻合。这些都是在论文中尚未解决的问题，有待今后进一步的研究。同时思考对滤波结果进行定量评价时，是否应该有一个统一的标准等。

由于时间和条件的限制，目前论文研究还不够深入，较为肤浅，离实际需要还有一定的距离，有待进一步的完善。

致 谢

转眼间，我已在长安大学度过了七个年头。从本科到研究生，七年的光阴让我成长。读取研究生，也让我的人生有了不同的轨迹。在论文完成之际，我也深深地感谢每一位给予我指导及帮助的老师和同学。同时也向参加论文审阅和答辩的专家和老师致以诚挚的敬意和衷心的感谢。

在这宝贵的研究生生活中，首先我要感谢我的导师——田永瑞副教授。“授人以鱼，不如授之以渔”，田老师正是这样以言传身教来教导我们。本研究及学位论文就是在导师田永瑞副教授的亲切关怀和悉心指导下完成的。两年多来，田老师不仅在学业上给我以精心指导，同时还在思想、生活上给我以无微不至的关怀，在此谨向田老师致以诚挚的谢意和崇高的敬意。

感谢导师田永瑞副教授、王守彬教授级高工在论文的选题，数据资料收集过程中给我的莫大帮助。还要衷心感谢张勤教授、隋立春教授、武晓忠老师，感谢各位老师给了我诸多教诲和帮助。

感谢师兄高西峰、史友峰的帮助和指导，让我提高了学习的效率和知识的吸收速度。感谢李晓蕾、卢燕、卢晓鹏、高志国等同门在论文写作过程中对我的帮助和鼓励，和他们的交流给了我很多启示。感谢王新志、李飞、牟洪洲、黄观文、瞿伟、杨成生、朱武、杨学超、曾安敏、张显云、赵大江、乔峰、石震、谢文军等同学对我学习及生活上的帮助。感谢武汉中咨测设技术有限公司的刘晓东工程、栗江工程师、张鑫等工程师。谢谢你们在我实习期间给我的帮助和支持。这次毕业论文能够得以顺利完成，是所有曾经指导过我的老师，帮助过我的同学，一直支持着我的家人对我的教诲、帮助和鼓励的结果。我要在这里对他们表示深深的谢意！感谢女友李蓓在论文过程中给我的鼓励和支持。

感谢所有关心和支持我的人，他们给了我宽容的求学环境。求索之道，永无止境。我会继续努力，不断提高自己、完善自己，用更好的成绩来报答所有关心我的人

参考文献

[1] Krabill W B,Collins J G,Link L E, et al. Airborne Lase Topographic Mapping Results. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing , 1984,50(6):685~694。

[2] 张小红、刘经南。机载激光扫描测高数据滤波[J].测绘科学，2004，29(6):50-53。

[3] Baltsavias E P. Airborne Laser Scanning: Existing Systems and Firms and Other Resources . ISPRS Journal Photogrammetry and Remote Sensing,1999,54(2/3) 164~198。

[4] 李树楷,薛永祺.高效三维遥感集成技术系统[M]. 北京科学出版社,2000。

[5] 李清泉,李必军,陈 静.激光雷达测量技术及其应用研究[J]. 武汉测绘科技大学学报,2000,25(5):387~392。

[6] 张小红 机载激光扫描测高数据滤波及地物提取[D]. 武汉大学，2002。

[7] 梁欣廉，机载激光雷达数据滤波及建筑物模型重建[D]。中国测绘科学研究院，2005。

[8] 尤红建等，基于机载激光扫描数据提取建筑的研究现状[J]。测绘科学，2005，30(5)：114-116。

[9] 尤红建等，利用机载激光三维成像仪的DSM数据自动提取建筑物[J]，武汉大学学报-信息科学版，2002，27（4）：408-413。

[10] 高智等，基于激光雷达数据的三维模型重建[J]。仪器仪表学报，2004，25(4)495-499。

[11] 阎平、江万寿，DSM数据中多层次、多直角房屋的三维重建[J]，武汉大学学报-信息科学版，2006，31（6）：492-495。

[12] Hug, C.Urban topography survey with scanning laser altitude and reflectance sensor (SCALARS). The Second International Airborne Remote Sensing Conf. and Exhibition. San Francisco.California.Vol..I.1996.pp.429~438.

[13] 刘经南，张小红，激光扫描测高技术的发展与现状[J]。武汉大学学报-信息科学版，2003，28（2）132-137。

[14] 邓非，LIDAR数据与数字影像的配准和地物提取研究[D]. 武汉大学, 2006。

[15] 舒宁，激光成像[M]，武汉大学出版社，2005。

[16] 李学友，IMU/DGPS 辅助航空摄影测量原理、方法及实践[D]. 解放军信息工程大学.2005.10。

[17] Samberg. A. Hyyppa. J. Ruppert. Ghyyppa. H. Ziegler. M. Schardt. M. Soininen. A. An evaluation of the laser scanner data in the forest area. In Proceedings of SPIE. Laser Radar Technology and Applications IV, SPIE,1999;579~581.

[18] Baltsavias, E.P. Airborne laser scanning : basic relation sand formulas .ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.,1999a,54 (2-3):199-214.

[19] Baltsavias, E.P. A comparison between photogrammetry and laser scanning. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.1999b,54 (2-3):83 -94

[20] Kraus, K., Pfeifer, N. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1998. 53(4):193-203.

[21] Vosselman, G. Slope based filtering of laser altimetry data. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B3, Amsterdam, 2000,pp: 935 – 942。

[22] Kilian, J., Haala, N., Englich, M. Capture and evaluation of airborne laser scanner data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, Part B3, Vienna. 1996,383-388,。

[23] Axelsson，P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing,2000,33(B4/1):110-117.

[24] Sohn, G. and Dowman, L. Terrain Surface Reconstruction by Use of Tetrahedron Model With the MDL Criterion . http://www.isprs.org/commission3/proceedings02/papers/paper/137.pdf.

[25] Yong Hu. Automated Extraction of Digital Terrain Models, Road Networks an Buildings Using Airborne Lidar Data [D].Calgary University,2003。

[26] Sithole, G. and Vosselman, G. Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter[J]. International Archives of Photogrametry and Remote Sensing,2001,34(3/W4):203-210.

[27] Nardinocchi C., Forlani G. and Zingaretti,P. Classification and filering of laser data[A]. Proceeding of the ISPRS working group III/3 workshop "3-D reconstrunction from airborne laser scanner and InSAR data"[C].Dresden, Germany,2003.

[28] Jacobsen,K. and Lohmann, P. Segmented filtering of laser scanner DSMs[A]. Proceedings of the ISPRS working group III/3 workshop "3-D reconstrunction from airborne laser scanner and InSAR data"[C].Dresden, Germany, 2003.

[29] Schiewe J. Regin-based information extraction from laser scanning data and optical imagery[A]. Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laser Scanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Terrain Models[C]. Stockholm , Sweden.2001.

[30] Jie Shan & Aparajithan Sampath. Urban DEM Generation from Raw LIDAR Data: A Labeling Algorithm and its Performance [J]. Photogrammetry Engineering & Remote Sensing, 2005,71(2):217-226.

[31] 李德仁，摄影测量与遥感的现状与发展趋势[J]。武汉测绘科技大学学报，2000，25（1）：1-6。

[32] 李树楷、薛永祺，机载扫描式激光测距-多光谱成像制图系统[J]。武汉测绘科技大学学报，1998.12，23（4），340-344。

[33] 张小红 耿江辉，用不变矩从机载激光扫描测高点云数据中重建规则房屋[J]。2006.2，31（2），168-171。

[34] 吴芬芳，基于车载激光扫描数据的建筑物特征提取研究。武汉大学，2005。

[35] 沈蔚，基于LIDAR数据的地形、地物提取与三维模型重建——以马来西亚吉隆坡中心区为例[D]。北京师范大学，2007。

[36] Duane Hanselman, Bruce Littlefield. 精通 Matlab7[M], 朱仁峰译. 北京：清华大学出版社, 2006

[37] 王正林, 刘明. 精通 Matlab7[M], 北京：电子工业出版社, 2006

[38] 飞思科技产品研发中心. Matlab7 基础与提高[M], 北京：电子工业出版社, 2005

[39] 李树楷,刘少创,机载/车载激光扫描测距/成像制图系统的新进展[J]。中国图像图形学报，1999.02，4（A），89-94。

[40] 郭冠军，李树楷，机载激光雷达测距性能研究[J]。光电子激光，2001.6，12（6），592-595。

[41] 尤红建，江月松，李树楷，机载遥感直接对地定位的误差分析和精度估计[J]。测绘学报，1998.2，27（1），86-91。