

武汉大学
硕士学位论文
基于LIDAR数据和航空影像的城市房屋三维重建
姓名：张栋
申请学位级别：硕士
专业：地图学与地理信息系统
指导教师：张祖勋;张剑清
20050501

# 摘 要

随着三维地理信息以及虚拟现实应用的深入,传统的三维建模方法(如:工程测量,摄影测量...)由于其在工作效率以及数据精度方面的不足已经很难适应当前的需要。Lidar (Light Detect And Ranging) 技术是一种利用光束扫描来探识目标和测定距离的高科技集成系统。利用 Lidar 技术我们可以直接快速获得城区的数字表面模型(DSM)。该技术的出现为实现城市房屋的快速三维建模提供了另一种可选的途径。传统的航空影像是利用机载相机对目标进行航空摄影,根据相机的各项参数以及目标和相机的几何关系来获取目标的信息。

本论文对 Lidar 数据和航空影像的各自特点进行了分析和阐述。首先对 Lidar 数据的影像进行了阈值分割,将 lidar 影像中的地面部分去除掉。同时 Lidar 数据墙面点的存在会给轮廓提取和三维重建带来麻烦,因此也必须去除。由于我们所感兴趣的是 Lidar 影像中房屋顶面的数据快,所以一些高程值较大的非屋面点阵也必须去除。其次是对航空影像的处理,利用 canny 算子对航空影像做了边缘检测生成二值图像,再利用 hough 变换提取直线段。往往所提供的航空影像参数很难满足实际需要,有必要利用后方交会对方影像参数重新做解算,这样把 lidar 数据投射到航空影像上去的效果就比较好。实际上参数的解算过程就是 Lidar 数据和航空影像的配准过程。在配准的基础上,将分割好的 Lidar 点阵投射到航空影像上去。此时, Lidar 点阵应该位于房顶面轮廓的内部。在此基础上以 Lidar 数据块的轮廓点为基点搜索外围可能的房屋边缘线段,经过初选和筛选得到正确的轮廓线段。最后根据搜索的顺序来确定这些线段的拓扑关系建立房屋的轮廓。到这一步所建立的只是一个二维的房屋轮廓。三维模型的建立相对于上一步来说是一个相反搜索过程。对房屋轮廓上的每一个点依次搜索离它最近的 Lidar 点,并将该 Lidar 点的高程值赋给该房屋轮廓点。最后根据共线方程关系式可以计算得到每一个轮廓点的空间坐标值。

总的来说,本论文的思想是利用 Lidar 数据的高程信息和航空影像房屋的轮廓信息,二者相辅相成,取长补短。相对于只使用 lidar 数据或者只使用航空序列影像前方交会来建模具有一定的优势。

**关键词:** Lidar 三维重建 后方交会 城市三维可视化 阈值分割

# ABSTRACT

With the deeply application of 3-D GIS and virtual realism, conventional 3-D modeling methods such as engineering survey and photogrammetry were not seasoned with current require because of its'scarity in work efficiency and data precision. Lidar (Light Detect And Ranging) techonology is one kind of high technology integration system,which can explor objects and measure distance by the way of laser scanning.With this system wen can obtain urban data surface model easily. Another choiced way for urban house reconstruction was occurred when the technology was succeeded. Conventional aerial picture, which was obtained through aerial photoing, can get the information of objects according to parameter of camara and geometry ralation of the object and camera.

This paper demonstrates and analyzes Lidar data and aerial image. The first step is the region threshold segmentation of Lidar data and extraction of the edges of apparent buildings, wiping off groud area. At the same time, we must remove the wall dots that should not exist. We all should remove the dots that does ont belong to house area, because what we are interested in was the house area. Secondly we should process the aerial image. Using canny edge dector to do with aerial image and then we get the two-value picture. After then apply HOUGH transform to the picture to acquire the line information. In fact, it is very hard to avoid error during the course of aerial photo working, the offering data is not according with the realism data. It is necessary to compute the image parameter by the method of backward intersection. The project effect of the Lidar dots to the picture will be fine after parameter rectifying. The parameter computing is just one kind of data matching course in so many woeds. On the base of matching project the segmentated LIDAR data to the aerial image. Here the LIDAR data just lie within the contour of the house. Then search the line that extracted which was nearst to every contour dot. Lastly, ensure the topology relation of the searched lines and construct 2-D model. The 3-D constructing is contrary according to the last step. Get the dot that is the nearst to each contour dot and endow the contour dot with the lidar' height value. At last, each vector special coordinate value can be computed according to the co—linear equation.

In one word, ideas of this paper were to apply the height value of LIDAR data and the contour information of the house in the aerial. Both sides supplement each other. This way is superiory according to conventional photogrammetry methods.

**Key words:** Lidar, method of backward intersection , 3D visualization, reconstruction

## 郑 重 声 明

本人的学位论文是在导师指导下独立撰写并完成的，学位论文没有剽窃、抄袭、造假等违反学术道德、学术规范和侵权行为，本人愿意承担由此而产生的法律责任和法律后果，特此郑重声明。

学位论文作者（签名）：张梅

2005 年 5 月 13 日

# 引言

自从 1998 年美国前副总统戈尔提出了“数字地球”的概念，在全世界引起了强烈反响。数字地球既是地球科学技术与空间技术，信息科学技术等现代科学技术交融的前沿领域，更是科学技术与社会发展以及社会科学紧密结合的结晶。在数字地图的进程中，“数字城市”的建设如火如荼，如何快速构建三位城市模型正成为地球科学领域的一项重要工作内容。但由于三维城市模型的理论与技术远比二维模型复杂，对其研究整体上还处于初级阶段。

一方面，随着信息技术时代的到来，GPS 技术，惯性导航技术和激光测距技术等的发展。各种数据源日益多样化、丰富化；另一方面，目前快速精确地从原始数据获得建立三维地理信息数据库所需要得数据仍然是一件费时费力地工作。配合多数据源进行人工地物地三维模型的的重建不仅是地学领域也是计算机视觉界所关心的问题。

激光扫描测距是一种快速地直接获取表面模型的技术，直接使用激光扫描器来测量表面几何关系，高程信息，特别是在密集的城市区域，是获取高精度数字表面模型的新方法。精确的地形获取受到激光扫描仪横向分辨率的限制，通常的激光扫描仪每平方米只有一个采样点。然而，基于直升飞机的激光扫描仪达到每平方米 1 个甚至更多采样的高分率，已经用在建筑物场景的获取中。使用航空影像和激光扫描数据，屋面（通常也就是建筑物的结构）能进行自动或半自动的三维重建工作。

摄影测量经过一百多年的发展，到现在的数字摄影测量，是一个逐步自动化的过程。数字摄影测量是基于摄影测量的基本原理，应用计算机技术，从影像上提取所摄对象并用数字方式表达的几何与物理信息的摄影测量分支学科。从航空影像上获取建筑物的几何形状，位置，是摄影测量中的重要内容，在测绘地形图，提供基础地理信息数据，城市三维重建等方面都起着重要的作用。而且，从影像进行建筑物几何要素的自动提取与三维重建更是一个高度复杂的问题，是数字摄影测量系统真正全自动获取基础地理信息的瓶颈问题。使用单一的航空影像进行三位重建工作已经很难适应当前不断增长的数字地球项目的需要。同时，Lidar（激光测距）技术，雷达干涉测量等技术的涌现为数字摄影测量的方展注入了新的活力。

本项研究的目标是针对两种对地观测数据：激光扫描数据和航空影像，分析其各自的特点，阐述其在信息上互为补充，目标识别上互为促进的融合基础，基于激光扫描数据与航空影像，对明显房屋进行三维重建，并通过实验证明其可行性，同时实现其重建后结果的可视化工作。



# 第一章 绪论

“数字城市”是在信息技术的飞速发展带来城市产业结构和社会转型的背景下提出来的，作为当前城市信息化建设的中心内容之一，“数字城市”是以计算机技术、多媒体技术和大规模存储技术为基础，以宽带为纽带，综合运用3S 技术（RS 遥感、GIS 地理信息系统、GPS 全球定位系统）、人工智能技术、虚拟仿真技术等对城市进行多分辨率、多时相、多尺度和多种类的三维描述和分析；也就是利用信息技术手段，建立城市空间的基础信息数据库，对城市所有基础设施、地理信息和社会信息进行动态监测、组织管理和应用服务的多功能、智能化的技术系统。

高精度、高时效、低成本、信息共享是每一项遥感技术的发展目标，新一代激光雷达系统的出现，使得快速、高效地建立数字城市成为可能。

## §1.1 研究背景与意义

Lidar (Light Detecting And Ranging) 技术是一种利用光束来探测物体和测定距离的高科技集成系统，机载 GPS 提供 Lidar 系统的空间位置，惯性测量系统提供 Lidar 激光的方向，激光系统提供激光脉冲，计算机系统提供高速、大规模数据存储空间与处理能力，代表着当前数码测绘技术的前沿。

近年来，国内外学者对于 lidar 得应用做了大量的研究。其主要研究集中在：lidar 数据的矫正和匹配问题。基于近距离小功率 lidar 测距器的目标的表面重建研究，以及基于正射影像或遥感影像的房屋建模研究等等。

2001 年,Car Nardinocchi 在他的方法中首次提出了使用房屋模板来进行三维建模。在其方法中，定义了房屋中常出现的形状诸如长方体，菱形体，球体，Roof 状模板。同时对于每个模板设置了不同的参数，以便调整模板快的大小。整个建模的就是一个类似搭积木的过程。在此过程中，系统会自动选择适合的模板，同时适当修改模板参数来匹配分割后的 lidar 数据（分割后的数据）。直到最佳情况为止。该方法是一个比较理想化的方法。在实施过程中，其匹配算法是很难设计的，需要强大的人工智能算法来支持。

2003年，武汉大学的季铮实现了利用基于LIDAR数据与IKONOS遥感影像的房屋三维重建。利用从lidar上提取的直线作为影初始值来提取影像上的直线。在试验的过程中，对于lidar和影像的匹配，使用了射影几何学中的影射变换和基于遥感平行光成像原理的仿射变换几何模型纠正原理。

2004年美国purdue大学城市工程学院地理工程系的 Aparajithan Sampath和Jie Shan实现了直接基于lidar做房屋三维建模的应用。其主要思想是，首先分割出地面部分，只剩下屋面部分。再对屋面部分进行轮廓跟踪。得到一个比较粗糙的轮廓。在此基础上，利用相邻边垂直的条件对轮廓进行拟和。最后所得结果为一个比较规则的形状。但是这种方法有一个比较大的缺点，不能应用于不规则形状的房屋。

总的说来,目前基于lidar数据的目标提取研究难点在于目标的轮廓提取比较困难。这主要和所提供的数据精度和数据质量有关。

传统的三维模型的重建常常使用摄影测量的手段。利用连续像对。通过影像匹配,前方交会,内插从而得到目标的三维模型。但是,由于航拍得到的图像往往受到天气,大气折射的影响,结果往往不尽如人意。

通过分析比较Lidar数据和航空影像的各自特点以及相互的优缺点,提出了基于Lidar数据和航空影像的城市房屋的三位重建。利用这两种数据进行三维重建提取的目标轮廓远比单一Lidar数据提取更接近客观事实。相对于连续航空影像的目标三维重建,该方案优点在于目标高程值直接由Lidar数据获得,远比连续像对方交会计算得到的值精确。

Lidar数据和航空影像都具有获取速度快,低成本,精度高的特点。二者各有所长,互为补充。基于Lidar数据和航空影像的三维重建为数字城市,虚拟现实,三维GIS的原始数据获取提供了另一种可选的途径。

## § 1.2 本文研究的主要内容与方法

论文研究的目的是结合 Lidar 数据和航空影像信息上的互补性和纹理特征上各自的特点,将二者融合在统一的坐标空间中,同时在一定程度上重建出房屋的几何模型,实现三维可视化的景观图,并尽可能的以较高的自动化程度实现这一过程。

本论文以同一地区的 Lidar 数据和航空影像为研究对象,来探讨房屋几何重建和可视化的实现过程。研究方案如下:

### (1) Lidar 数据影像的处理

本论文研究的主要原始数据是原始 Lidar 数据和航空影像。为了更直观的表现 Lidar 数据中的信息,按照其高程值的变化做了灰度化预处理得到 8 位 256 色的灰度图。需要说明的是:在 Lidar 灰度图上每一个像素对应与原始 Lidar 数据中的一个点。像素点的灰度值与对应的 Lidar 点的高程值成正比。像素亮度越亮表明对应的 Lidar 点的高程值也越高,反之高程值越低。对于大块的城区 Lidar 影像,由于城市中的路面的高程值都比房屋来得低且路面的高程值相差不大具有一定的连续性,往往路面部分呈现较暗的连续带状。这就给路面的阈值分割带来了理论基础。预处理的最终目标是得到屋面的 Lidar 数据。在此基础上还必须使用去除小面积粒子的方法去除一些诸如电线杆,树木等非房屋部分。使用这样的方法从图像识别理解的角度讲就等于分割出房屋并确定出位置。而这对于航空影像来说恰恰是比较困难的地方。

### (2) Lidar 影像与航空影像的配准

Lidar 影像具有大地空间三维坐标,为了能建立 Lidar 数据和航空影像之间的投影关系,需通过空间后方交会解算出影像的外方位元素。这样才能使分割后的 Lidar 点阵投射到航空影像上的结果和航空影像中的房屋相匹配。对于匹配的控制点的选择是采取人工选定同名点。

### (3) 房屋轮廓的生成以及空间模型的建立

在上述过程的基础上,可以得到 Lidar 点阵在航空影像上的投影图。且这些 Lidar 点都位于影像上相应的房屋轮廓内部。利用这一点可由 Lidar 数据点阵确定出影像上房屋

的大体位置，以 Lidar 数据快轮廓为基础依次搜索影像上的线段，然后根据搜索的先后关系以及线段之间的拓扑关系组合成房屋的轮廓。然后再对轮廓上的每一个点搜索距离最近的 Lidar 点，将 Lidar 点的高程值赋给轮廓点，最后根据共线方程的关系式可直接计算出房屋轮廓点的空间三维坐标。依次对每个点做同样的计算就得到整个房屋的空间坐标。

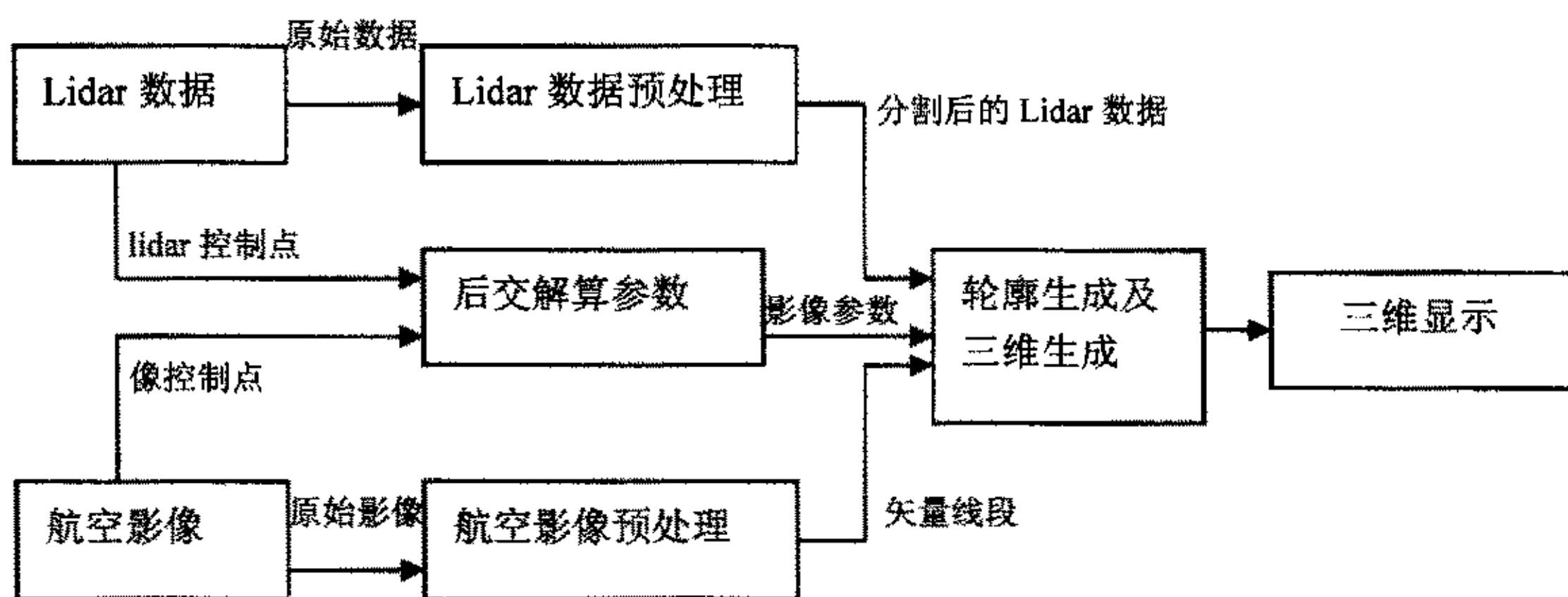


图 1-2-1 本文方案数据流程图

### § 1.3 本文的组织结构

本文分七章，各章的组织如下：

第一章 绪论，主要介绍本文的研究背景，意义和国内外研究现状。在此基础上提出了本文的研究内容和方法。

第二章 介绍了基于 Lidar 数据的预处理。主要是基于 Lidar 数据的房屋轮廓初步提取。采用了波峰法初步分割，标号法小面积粒子去除以及边缘检测的墙面点去除。

第三章 Lidar 数据和航空影像的匹配。讲述了单张相片后方交会的基本原理以及基于 Lidar 数据和航空影像的匹配问题。

第四章 航空影像的矢量化预处理。讨论了影像特征的提取，主要是针对房屋轮廓的线状目标。

第五章 轮廓提取及三维重建 在前三章 lidar 数据预处理，航空影像预处理以及二者匹配的基础上，提出了基于 Lidar 数据和航空影像的直线信息实现房屋轮廓的生成方法。最后讲述了轮廓三维坐标的计算方法和模型的生成。

第六章 试验结果与分析 通过选取几种典型房屋的数据进行三维建模试验。对本文的方案进行试验和分析。

第七章 总结了本文所做的工作，指出了本文方法的不足之处以今后进一步研究的方向。



## 第二章 基于 Lidar 数据预处理

### § 2.1 有关 Lidar 数据及其灰度影像的说明

**Lidar (Light Detecting And Ranging)** 技术是一种利用光束来探识物体和测定距离的高科技集成系统, 机载 GPS 提供 Lidar 系统的空间位置, 惯性测量系统提供 Lidar 激光的方向, 激光系统提供激光脉冲, 计算机系统提供高速、大规模数据存储空间与处理能力, 代表着当前数码测绘技术的前沿。

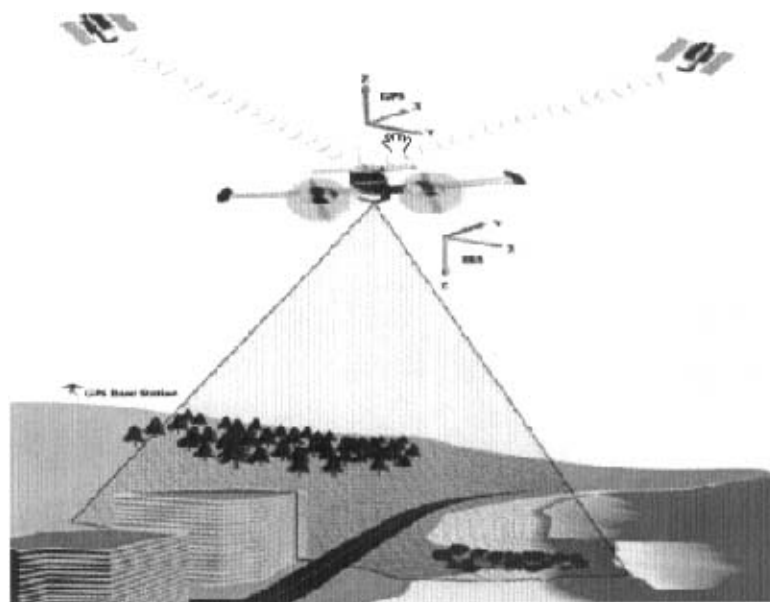


图 2-1-1 机载 Lidar 扫描模拟图

Lidar 在一次测量中给出传感器与待测量场景中的一个特定点间的距离以及相对的平面坐标。距离与能量从发射到从所测量的景物上反射回来的时间间隔成比例。这个流失的时间间隔事非常短的, 因此需要非常高的精度。因此, 通常使用发射和回收信号之间的相位差来确定被测目标的距离。Lidar 的优点是具有大的测距范围, 从十分之一毫米到几公里, 测量距离的精度一般在 0.01 毫米左右。其缺点在于物体表面与光束几乎相切时会有麻烦, 主要因为在这种情况下反射回传感器的能量太少。透明或半透明物体显然不能用激光测距来测量。

为了直观地表示出 Lidar 数据的内容信息, 将 Lidar 数据转化为灰度图。同时也为后面基于 Lidar 影像的图像处理做准备。具体做法是: 搜索所有的 Lidar 数据点, 得到高程的最大值  $Z_{\max}$  和最小值  $Z_{\min}$ 。由下列等式可计算得到每个 Lidar 数据点在 256 灰度图上的灰度值。

$$\text{Pixel}(i) = (z(i) - Z_{\min}) * (Z_{\max} - Z_{\min}) / 255 \text{-----} (\text{式 } 2.1.1)$$

其中 pixel(i) 表示灰度值, z(i) 表示该 Lidar 点的高程值。



图 2-1-2 航空影像

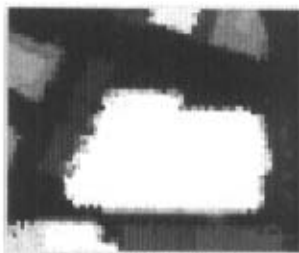


图 2-1-3 256 色 Lidar 灰度图

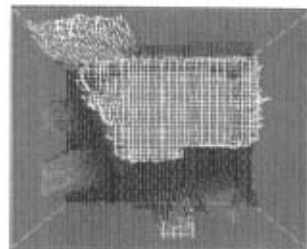


图 2-1-4 Lidar 数据格网

从图 2-1-3 可以看出 Lidar 图像上屋面部分较亮, 地面部分由于高程较低所以显得较暗。同一平面具有相近的高程, 在影像上反映相似的灰度, 即具有较好的区域连通性。

## § 2.2 图像分割相关理论

在对图像的研究和应用中, 人们往往仅对图像中的某些部分感兴趣。这些部分常称为目标或前景 (其他部分称为背景), 它们一般对应于图像中特定的, 具有独特性质的区域。为了辨识和分析目标, 需要将相关区域分离提取出来, 在此基础上才有可能对目标进一步利用, 如进行特征提取和测量。图像分割就是指把图像分成不同特性的区域并提取出感兴趣目标的技术和过程。这里特性可以是灰度, 颜色, 纹理等, 目标可以对应单个区域, 也可以对应于多个区域。

图像分割是由图像处理到图像分析的关键步骤, 也是一种基本的计算机视觉技术。图像的分割, 目标的分离, 特征的提取和参数的测量将原始图像转化为更抽象更紧凑的形式, 使得更高层的分析和理解成为可能。多年来已经提出了上千种各种类型的分割算法。

对于图像分割方法可以分为三组: 阈值化, 基于边缘的分割, 基于区域的分割。阈值化是最简单的分割处理。用一个被称为阈值的亮度常量来分割物体和背景。在整个图像上既可以施加单个阈值 (全局阈值), 也可以依赖图像部分而改变的阈值 (局部阈值)。一般使用阈值检测来自动确定阈值。如果事先知道分割后的图像的某种性质, 阈值的确定可以按照确保该性质得以满足的条件来选择。例如: 自适应法阈值分割, 波峰法分割等。基于边缘的分割依赖于由边缘检测找到的图像边缘, 这些边缘表示出图像在灰度, 色彩, 纹理等方面不连续的位置。常用的方法有边缘松弛法, Hough 变换等。基于区域分割的基本思想是将图像划分为最大一致性的分区。一致性的准则可以是基于灰度, 色彩, 纹理, 形状, 模型 (使用语义信息) 等为标准。选择出来的描述区域的性质, 对具体的区域增长分割的形式, 复杂度, 先验信息的数量有影像。常用算法有: 区域归并, 区域分裂, 分水岭分割等。

尽管图像分割算法有很多，人们还在不断的研究，由于尚无通用的分割理论，已提出的分割算法大都是针对具体问题的，并没有一种适合于所有图像的通用的分割算法。只有针对具体图像的空间域和变换域分布特点，选用合适的分割算法，同时对待具体模型采用具体的改进。

### § 2.3 基于 Lidar 影像的阈值分割

灰度级阈值化是比较简单的分割处理，很多物体或图像区域表征为不变的反射率或其表面光的吸收率可以确定一个亮度常量即阈值（threshold）来分割物体和背景。图像  $R$  的完全分割是区域  $R_1...R_s$  的有限集合，

$$R = \cup R_i \quad (i \in (1, s)) \quad R_i \cap R_j = \emptyset \quad i \neq j \quad \text{-----} \quad (\text{式 2.3.1})$$

完全分割可以在简单的场景中通过阈值化处理得到。阈值化是从输入图像  $f$  到输出图像  $g$  的如下变化：

$$g(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{当 } f(i, j) \geq T \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } f(i, j) < T \text{ 时} \end{cases} \quad \text{-----} \quad (\text{式 2.3.2})$$

其中  $T$  是阈值，对于物体的图像元素  $g(i, j) = 1$ ，对于背景的图像元素  $g(i, j) = 0$ （或反之亦然）。基于阈值分割的方法其关键在于阈值的检测确定。根据不同类型的图像可采用不同的方法来确定分割阈值。

城区 Lidar 灰度影像有其独特的特点。表现在：

- (1) 影像的灰度值和 Lidar 数的高程值成正比，高程值越高对应的像素灰度就越高。
- (2) 由于城区地面比较平坦，在影像上地面部分的灰度值变化不大，且像素的灰度值低于屋面部分。在影像的灰度直方图上，往往最高的波峰由地面部分 Lidar 点的像素形成。
- (3) 由于 Lidar 光束在较高房屋边缘常和墙面相切，导致屋面边缘数据不准确，因此在灰度影像上屋面边缘呈锯齿状。

#### §2.3.2 波峰法 Lidar 灰度图的阈值分割

鉴于城区 Lidar 影像的自身特点，本论文采用基于灰度直方图的波峰法来对 Lidar 影像进行阈值分割。将路面部分看作是图像的背景，其余部分看作是图像的前景。

阈值的确定可以通过灰度直方图的统计得到。首先，对 lidar 影像进行灰度统计，构成直方图。横坐标为灰度值，纵坐标为具有该灰度值的像点的个数。直方图通常是有关图像的唯一可得的全局信息。分析直方图的波形，求得两个最高波峰。然后在这两个波峰之间由低到高找到第一个波谷。该波谷的阈值即为分割阈值。

某些情况下会出现找出的两个波峰靠得很近，对应于现实的数据来说，这两部分都为地面部分。照此方法求得的阈值是错误的需加以条件约束。假设找到的两个波峰

A1 ,A2之间的距离为  $dis12 < n$  , (n 为预先设定最小距离，对于本论文的数据设为 15 最佳)。在非 A1A2 之间的范围内搜索最高的波峰 A3，并以 A3 替代 A1A2 中较低的波峰。然后再进行后续的阈值选择。

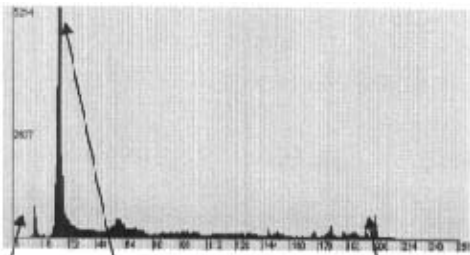


图 2-3-1 原始 Lidar 影像直方图

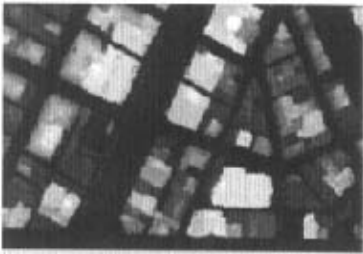


图 2-3-2 原始 Lidar 影像

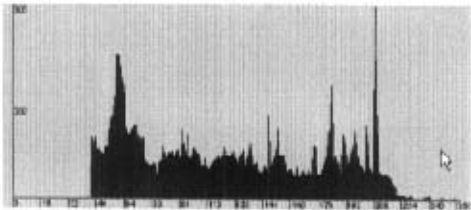


图 2-3-3 分割后 Lidar 影像的直方图



图 2-3-4 分割后的 Lidar 影像

从上图可以看出经过初步的阈值分割，路面部分已经基本被分割出去。此时图中只剩下屋面部分和一些树木，电线杆等小面积粒子。如果目标距离较近，会出现本来两个独立的房屋连成一块的现象，这个问题必须在后面的操作中得到解决。对于 Lidar 分割的最终要求是提取出独立的屋顶部分。这样 Lidar 像点投射到航空影像上才能和房屋轮廓吻合。

### §2.3.2 标号法小面积粒子的去除

从图 2-3-4 图像中可以看出，虽然地面部分已经去除，但仍有一些小面积的空洞。这主要是因为城区的一些电话杆，树木等造成的。特别是一些临近房屋的高大树木，实验证明这些点的存在会给后面部分的投影建模工作带来不小的麻烦。这些目标相对于我们感兴趣的房屋来说面积要小的多。可以使用标号法来对每个独立的目标进行面积测量，去除面积较小目标。

所谓标号法，就是图像中不同的物体都有唯一识别的号数。在同一物体当中，所有的像素点的标号都是一致的，而不同物体之间是完全不同的。在图像面积测量中，首先必须对图像进行分割。为了区分互不连通的图形以便分别计算其面积，需对图形进行标号操作。

对不同图像进行标号操作的方法由很多种，本文主要采用的是扫描标号法。



扫描标号法的算法如下：

(1) 首先进行从左到右，从上到下扫描。在同一行中不连通的行程（灰度级相同的点）标不同的号，不同的列标不同的号。

(2) 从左上到右下扫描，如果两个相邻的行中有相连通的行程则下行的号改为上行的号。

(3) 右下到左上扫描，如果两个相邻的行中有相连通的行程则上行的号改为下行的号。

(4) 再对标过的号进行排列。

通过对图像目标进行标号后，可以对不同的物体的面积进行测量。主要是对相同号的点进行累加，之后得到的物体的像素点的总和。总和再乘以系数将得到图像中物体相近的面积。如果对总和的大小进行限制就可以去除图像中的粒子。

由于该算法需对目标影像的像素分别进行从左到右，从左上到右下，右下到左上的三次扫描，同时还要不断的改变标号，因此运行的速度较慢。其最大的优点在于可以直接计算出每个像素块像点的个数。对于本论文  $1m \times 1m$  的 Lidar 影像来说统计出来的就是每一目标的实际面积。在实际的试验中设为 50(平方米)即可以达到去除小面积目标的要求。

图 2-3-5 显示的是经过波峰法阈值分割后的 Lidar 影像，从图中可以看出仅使用阈值分割的方法能去除地面部分，但对于高于地面部分的树

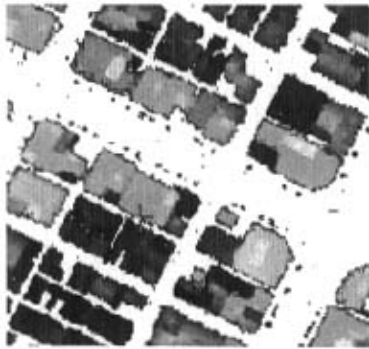


图 2-3-5 带有空洞的 Lidar 影像

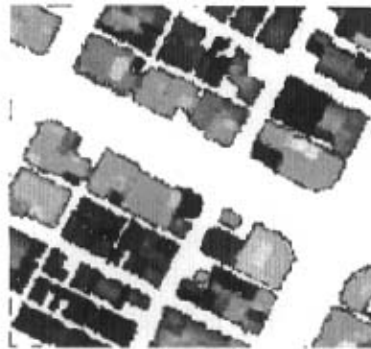


图 2-3-6 去除空洞后的 Lidar 影像

木则显得无能为力。图 2-3-6 是经过标号法小面积粒子去除后的 Lidar 影像图。那些由于和房屋靠得很近的树木，波峰法阈值分割后可能会出现和房屋连成一片。标号法在进行面积统计时，把连成一块的区域都误认为是同一部分。因此，会错误地把树木和房屋当作同一数据块来处理。对于这种情况 利用面积大小的信息显然是不能适用的。针对树木和房屋的数据特性可以从高程信息的变化来处理这个问题。

### §2.3.3 墙面点的去除

在进行实际的航空 Lidar 扫描的过程中很难做到激光束和地面完全垂直，当扫描到

房屋边缘时激光束难免会打到墙面上。在影像上屋面边缘会出现一些灰度介于屋面和地面的墙面点。图 2-3-7 和 2-3-8 分别是未去除墙面点的同一 Lidar 数据的三维点可视图和格网可视图。这些墙面点如果不去除，投射到影像上可能会与屋面点重合。在后面房屋矢量轮廓赋高程时容易错把墙面点当作屋面点，从而得到一个错误的高程值。所以墙面点是必须采用某种方法去除。

墙面点与屋面和地面都有一定的高度差，因此可以使用类似边缘检测的方法来检测出来。本论文采用的方法是对图像中每一个像素搜索其八邻域内的每一个像素，如果存在邻域像点高程值和中心像素高程值差的绝对值大于某个常量则去除该点，否则保留该点。设  $f(i, j)$  代表种子像点的高程值， $f(k, l)$  代表于种子像素 8-邻域像点的高程值。如果种子像点和 8-邻域像点的高程值满足下式保留像素，否则去除种子像素。

$$|f(k, l) - f(i, j)| \leq T \text{ ----- (式 2-3-3-1)}$$

其中  $T$  为常数，本文设为 3 米。凡是面与面的高程差大于或等于  $T$  都

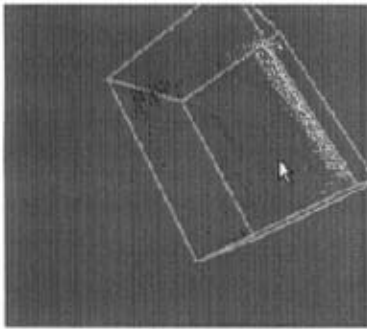


图 2-3-7 未去除墙面的三维 lidar 点

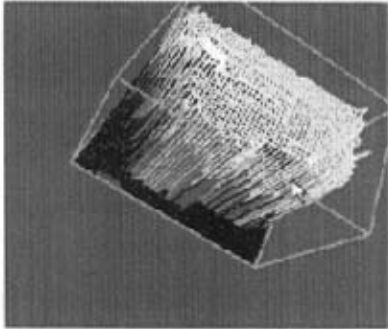


图 2-3-8 未去除墙面的三维 lidar 格网

能够利用不等式 2-3-3-1 检测出来。

需要补充说明的是：使用上述方法会造成屋面点的丢失。因为边缘点的 8 邻域点中必然有墙面点或者地面点且他们之间的高程值差定会大于规定限值，从而造成边缘的屋面点会被去除。因此必须补上这些点。其方法是对数据的点状云块进行轮廓跟踪提取外围轮廓，然后以每一个地面点（图 2-3-9 蓝青色部分）为种子点进行 8 邻域搜索，搜索到轮廓点就保留该种子点。对于轮廓跟踪在后面的模型三维重建部分详细介绍。

下图所示为去除墙面点后的效果图：

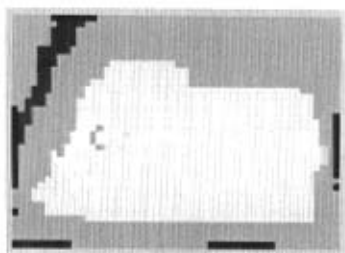


图 2-3-9 分割后 Lidar 影像

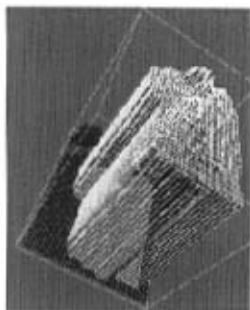


图 2-3-10 分割后的 Lidar 隔网

在图 2-3-9 中蓝青色的部分说明没有任何数据点，其余部分为屋面点。从图中可以看出屋面部分灰度比较均匀。且轮廓边缘已经和实际影像中的房屋轮廓相近。图 2-3-10 是 2-3-9 数据的三维格网效果图。通过和图 2-3-8 比较可以看出原来介于屋面和地面部分的墙面点已经完全去除了。房屋的边缘轮廓清晰可见且已经很接近真实房屋的轮廓。

## §2.4 边界跟踪

区域分割后所得结果是区域内的像素集合，各个区域用标记值区分，背景的标记为 0。为了描述各个目标区域，需要获得各个区域的边界，从而进一步对目标进行表达和分析。

边界表达就是基于这些边界点对边界进行表示。常用的表达形式有链码、边界段、多边形、标记等。本文采用的是最简单也是最常用的链码表达形式。

### 1. 链码

链码是对边界的一种编码表示方法，其特点是利用一系列具有特定长度和方向的相连的直线段来表示目标的边界。因为每个线段的长度固定而方向数目取为有限，所以只有边界的起点需用（绝对）坐标表示，其余点都可以只用连续方向来代表偏移量。采用链码表示只需要一个起点坐标和其余点的方向坐标，相对于坐标值表示可以大大减少边界表示所需的数据量。常用的有 4-方向链码和 8-方向链码。

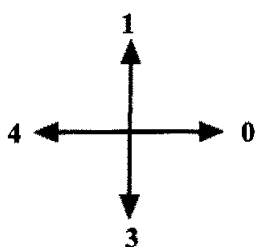
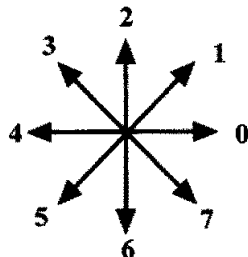


图 2-4-1 4-方向链码



8-方向链码

## 2. 链码跟踪算法

如果区域的边界未知,但区域本身已经定义那么使用轮廓跟踪边界可以唯一的被检测出来。轮廓跟踪和轮廓提取的目的都是获得图像的外部轮廓特征。在必要的情况下应用一定的方法表达轮廓的特征,为图像的形状分析做准备。

轮廓跟踪的基本方法是:现根据某些严格的“探测准则”找出目标物体轮廓上的像素。本文使用的是经过优化的探测算法,该算法不是对每一个边界像素周围的八个点进行判断,而是依据前一个边界点来确定后一个初始判断方向。

首先找到最左下方的边界点。以这个边界点起始,假设已经沿着顺时针方向环绕整个图像一圈找到了所有的边界点。由于边界是连续的,所以每一个边界点都可以用这个边界点对前一个边界点所张开的角度来表示。因此,可以使用下面的跟踪准则:从第一个边界点开始,定义初始搜索方向为沿左上方;如果左上方的点是黑点,则为边界点,否则搜索方向顺时针旋转 45 度。这样一直到找到第一个黑点为止。然后把这个黑点作为新的边界点,在此基础上逆时针旋转 90 度,继续用同样的方法搜索下一个黑点,直到返回最初的边界点为止。

在实施链码轮廓跟踪中的数据结构及其定义说明。

在本试验中,对于一个  $M \times N$  的二值图像,为了便于链码的移动操作和链码边界的表示,定义每一个网格的数据结构为

```
typedef struct gridpoint
{
    bool beareapoint;
    int lastdirection;
    int nextdirection;
    POINT position;
}
```

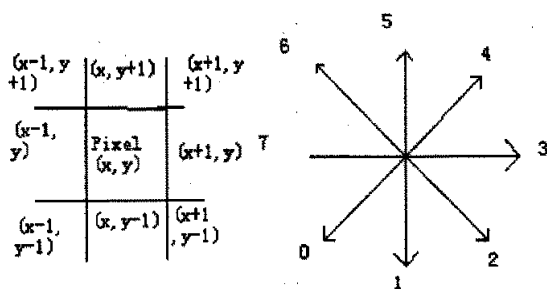


图 2-4-2 链码存储结构示意图

同时定义了一个方向数组:

$\text{Direction}[8][2] = \{ \{-1, 1\}, \{0, 1\}, \{1, 1\}, \{1, 0\}, \{1, -1\}, \{0, -1\}, \{-1, -1\}, \{-1, 0\} \}$

上图左边部分说明了像点  $(x, y)$  与其周围 8 邻近网格之间的位置关系。确定其  $i$  方向上的相邻网格的像点坐标直接由  $(x + \text{Direction}[i][0], y + \text{Direction}[i][1])$  可得。



上图右边部分说明了链码的方向约定，本论文采用的是 8 邻接链码，其转化关系直接对应于数组 Direction。

数据结构中的说明：

- (1) beareapoint 是布尔型分量，用来表示该点是否为目标区域点。为 TRUE 表示是的，反之表示不是的。
- (2) lastdirection 是整型分量，用来表示在边界中该网格的上一个点相对于该点的方向。Lastdirection 的范围为 0 到 8。
- (3) nextdirection 是整型分量，用来表示在边界中该网格的下一个点相对于该点的方向。范围同上
- (4) position 表示该点的二维像点坐标。
- (5) 另外说明的是：nextdirection 和 lastdirection 还有区分该点是不是位于链码上的作用。事先约定初始状态都为 8，表示都不位轮廓边界上。小于 8 则为轮廓的边界点。

下图所示为这一轮廓跟踪算法的示意图，其中箭头代表搜索方向。

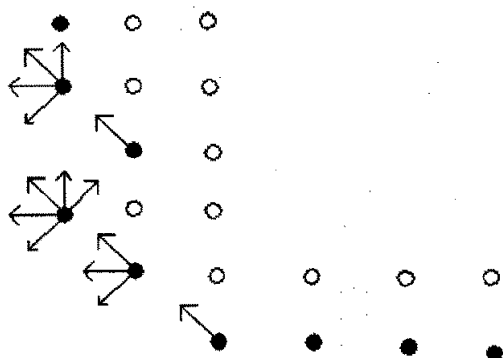


图 2-4-3 轮廓跟踪算法

上图所示的是轮廓跟踪算法的示意图，可以看出利用该算法需要不断的更改搜索方向，使用 Direction[8][2] 数组可以很方便的解决问题。设当前的搜索方向为  $i$ ，顺时针转  $n \times 45$  度，则  $(i - n) \bmod (8)$  就是旋转后的搜索方向，反之逆时针旋转  $n \times 45$  度，则  $(i + n) \bmod (8)$  为旋转后的方向。

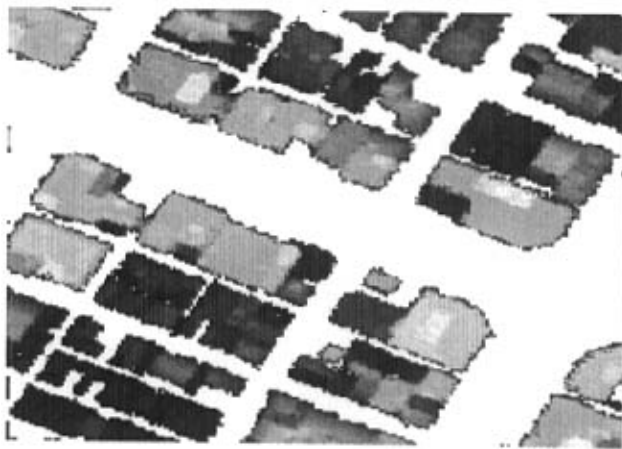


图 2-4-4 原始二值化 Lidar 影像

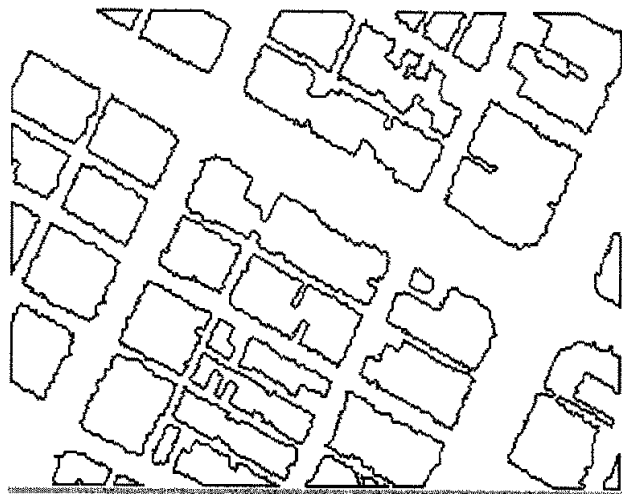


图 2-4-5 跟踪结果图

图 2-4-4 和图 2-4-5 分别是原始二值图和跟踪后的效果图。可以看出经过 8 邻域轮廓跟踪后，房屋的初步轮廓已经勾画出来。

本文链码跟踪算法有三个优点：

- 一，是初始状态简单，不存在通常的活动边界中存在的初始值问题，它的初始边界就是包括整个区域的链码边界。
- 二，由于不需要对每一个邻近像素做边界判断，大大提高了运算速度和效率。
- 三，是形成的边界是连续的单像素点集组成的闭合边界，不用再做细化、连接等相关操作。

总之，这里只利用了活动链码中简化的算法去实现简单轮廓的目的，活动链码还有很丰富的内容和应用空间，值得研究和探讨。

## 第三章 Lidar 数据和航空影像的配准

Lidar 影像的影像坐标与对应地区的 DSM 的平面坐标相对应。严格来说 Lidar 影像是正射影像,所有的投影光线相互平行并与投影面正交。航空像片是中心投影,所有的摄影光线均交于同一点。由于投影的差异,只有在地面水平(无高差)且相片也水平(即平行地面)时,这两种投影方无差异。

对于 Lidar 数据和航空影像的配准,由于两种影像的差异,不能采用平面几何纠正的方法。本文采用单张相片的空间后方交会的方法,人工选取三个以上的 Lidar 和航空影像上的同名点,解算出相片的外方位元素。

### §3.1 Lidar 数据和航空影像的对应

图像配准是图像分析和处理的基本问题。是遥感影像分析、遥感影像自动制图、三维重建等方面的关键技术之一。图像配准就是建立两幅图像之间的对应关系,确定相应几何变换,对两幅图像的同一目标进行匹配。配准方法通常可以分为两大类:基于区域(areabased)的方法和基于特征(featurebased)的方法。基于区域的方法将一幅图像上的小窗口内像素与另一个图像上同样尺寸窗口做统计比较。通常选用归一化的互相关作为测度,然后将满足条件的窗口中心作为控制点用于求解两幅图像之间的变换参数。基于特征的方法是根据两幅图像的相同特征的几何关系计算配准参数,因此这类方法首先要提取边缘、点、线、曲率、矩、面积等特征。

由于 Lidar 灰度图和航空影像的本质特点不一样,很难利用基于区域的配准来寻找同名点。只能利用基于特征的方法根据相同的几何关系确定同名点。

在实际的机载 Lidar 扫描实践中,相片的摄影中心的位置是由机载 GPS 定位仪来记录。常规 GPS 的定位精度只有 20 米,误差较大。另外,由惯导所提供的航空影像三个角元素值也存在较大误差。基于以上的原因,利用提供的原始外方位元素参数很难满足建模的要求,必须进行后方交会,解算出尽可能接近实际值的参数。

由于 Lidar 影像和航空影像的不同特性,很难自动确定同名点。本文采用的是人工选定同名点。在后方交会的解算过程中,像方坐标和物方坐标的选择是首先解决的问题。

像方空间坐标系分为像平面坐标系,像空间坐标系和像空间辅助坐标系。像平面坐标系表示像点在像平面上的位置。像空间坐标系用以描述像点在像空间中的位置。像空间辅助坐标系是一种相对统一的坐标系,用以统一多张相片的空间坐标。像平面坐标系可以分为以像主点为原点的坐标系以及以像左上角为原点的坐标系(屏幕坐标)。一般普通航空影像采用的是以像主点为原点的像平面坐标系。



物方坐标系用来描述地面点在物方空间的位置，包括摄影测量坐标系，地面测量坐标系和地面摄影测量坐标系。本文物方坐标系采用的是和 Lidar 数据吻合的摄影测量坐标系。原始 Lidar 数据为一个一个的具有空间坐标的点。可以由这些点直接参与后方交会的计算。

其次所要解决的问题是 Lidar 灰度图和 Lidar 数据高程值之间的对应计算关系。在选取 Lidar 灰度图的像点时能直接得到的是该像点的灰度值。根据 Lidar 灰度图的成像原理可以得到像点灰度值和对应 Lidar 点高程值之间的关系。

$$Z_{i,j} = Pixel_{i,j} \times pixel\ interval + Z_{min} \text{ ———— (3-2-1 式)}$$

3-2-1 式中， $Pixel_{i,j}$  为  $i$  行  $j$  列的像点灰度值， $Z_{i,j}$  为要求的  $i$  行  $j$  列的像点对应 Lidar 点高程值。 $Pixel\ interval$  为该 lidar 灰度图的单位灰度值的高程差，表示为  $Pixel\ interval = \frac{(Z_{max} - Z_{min})}{255}$ ， $Z_{max}, Z_{min}$  分别为对应 Lidar 数据的最大和最小高程值。

在实际的操作中，所需要纠正的是容易引起误差的六个外方位元素，对于相机的内参认为是正确的不参与纠正。

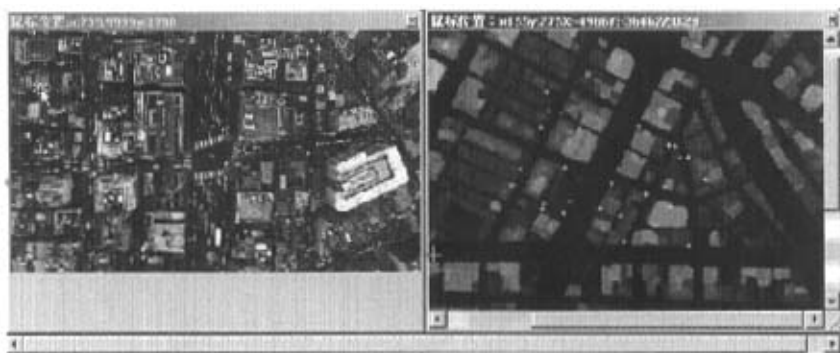


图 3-2-1 后方交会图示

图 3-2-1 所示的是后方交会的人工选取控制点示意图，左边的窗口是航空影像图，右边的窗口是 Lidar 灰度图，采用人工选取同名点，以 Lidar 点的三维坐标作为地面点坐标参与计算。

需要说明的是：

- (1) 控制点的选取要比较均匀，大都选择可识别的房屋角点。
- (2) Lidar 数据的房屋角点识别要比航空影像困难得多，为了尽可能减小误差



差，由 Lidar 灰度图的控制点二维像点坐标选取空间三位坐标时，不是直接根据 Lidar 数据和 Lidar 灰度影像的对应关系赋值，而是以该控制点为种子点搜索 8 邻域内的所有点中灰度值最亮的点，如果该点灰度值大于种子点，则将该点的空间坐标的高程值赋给种子点。种子的二维坐标仍使用其原来的值。这样做可以减小由错选墙面点带来的误差。

(3) 为了保证解算结果的可靠性，选取点数一般多于四个。

### §3.2 基于 Lidar 和航空影像的后交解算影像参数。

如果我们知道每张像片的六个外方位元素，就能恢复航拍相片和被摄地面之间的相互关系，重建地面的立体模型。利用立体模型提取目标的几何和物理信息。因此如何获取相片的外方位元素，一直是摄影测量工作者探讨的问题，其方法有：利用雷达，全球定位系统，惯性导航系统以及星象摄影机来获取相片的外方位元素，也可利用一定数量的控制点来求。利用航拍相片上三个以上的像点坐标和对应的地面点坐标，根据共线方程，反求相片的外方位元素，这种方法称为单张相片的空间后方交会。

进行空间后方交会运算，常用的一个基本公式是像点，投影中心和物点三点共线的共线方程式，即 (3-1-1 式)。式中  $x, y$  为地面点的像点坐标，通过摄影测量仪器测取得。 $X_a, Y_a, Z_a$  为地面点的地面测量坐标或地面摄影坐标，可用普通测量方法得到，或通过坐标变换取得。 $f$  为摄影主距，可从摄影机鉴定表中查取。

$$\left. \begin{aligned} x &= -f \frac{a_1(X_A - X_S) + b_1(Y_A - Y_S) + c_1(Z_A - Z_S)}{a_3(X_A - X_S) + b_3(Y_A - Y_S) + c_3(Z_A - Z_S)} \\ y &= -f \frac{a_2(X_A - X_S) + b_2(Y_A - Y_S) + c_2(Z_A - Z_S)}{a_3(X_A - X_S) + b_3(Y_A - Y_S) + c_3(Z_A - Z_S)} \end{aligned} \right\} \quad 3-2-1 \text{ 式}$$

对于每一个像点，其误差方程式可以表示为：

$$\begin{bmatrix} V_{i,x} \\ V_{i,y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{i,11} & a_{i,12} & a_{i,13} & a_{i,14} & a_{i,15} & a_{i,16} \\ a_{i,21} & a_{i,22} & a_{i,23} & a_{i,24} & a_{i,25} & a_{i,26} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_S \\ \Delta Y_S \\ \Delta Z_S \\ \Delta \varphi \\ \Delta \omega \\ \Delta \kappa \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_i - (x_i) \\ y_i - (y_i) \end{bmatrix} \quad 3-2-2 \text{ 式}$$

或矩阵表示为

$$V_i = A_i X - l$$

$A_i$  的计算公式为 3-2-3 式。其中，

$\bar{Z} = a_3(X_A - X_S) + b_3(Y_A - Y_S) + c_3(Z_A - Z_S)$ ,  $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$  为外方位元素组

成的旋转矩阵。具体见参考文献【5】。(x)和(y)为相应未知数近似值按共线方程(3-1)计算的前一次计算结果近似值。

根据最小二乘法间接平差原理,可列出法方程式:

$$A^T P A X = A^T P L$$

式中, P 为观测值的权矩阵,反映观测值的量测精度。对所有像点坐标的观测值,一般认为是等精度量测,则 P 为单位矩阵,由此得到未知数表达式:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T L \text{-----} (3-1-3)$$

从而求出外方位元素近似值的改正数  $dX_s, dY_s, dZ_s, d\phi, d\omega, d\kappa$ 。

整个解算的过程是通过逐渐趋近的方法,即用近似值与改正数的和作为新

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= \frac{1}{Z} [a_1 f + a_3 x - x] \\ a_{12} &= \frac{1}{Z} [b_1 f + b_3 x] \\ a_{13} &= \frac{1}{Z} [c_1 f + c_3 x] \\ a_{21} &= \frac{1}{Z} [a_2 f + a_3 y] \\ a_{22} &= \frac{1}{Z} [b_2 f + b_3 y] \\ a_{23} &= \frac{1}{Z} [c_2 f + c_3 y] \\ a_{14} &= y \sin \omega - \left\{ \frac{x}{f} [x \cos \kappa - y \sin \kappa] + f \cos \kappa \right\} \cos \omega \\ a_{15} &= -f \sin \kappa - \frac{x}{f} [x \sin \kappa + y \cos \kappa] \\ a_{16} &= y \\ a_{24} &= -x \sin \omega - \left\{ \frac{y}{f} [x \cos \kappa - y \sin \kappa] - f \sin \kappa \right\} \cos \omega \\ a_{25} &= -f \cos \kappa - \frac{y}{f} [x \sin \kappa + y \cos \kappa] \\ a_{26} &= -x \end{aligned} \right\} \text{3-2-3 式}$$

近似值,重复计算,直到改正数小于某一限值为止。具体计算的过程如下:

- (1) 选取航空影像和 Lidar 灰度图中的同名点,同时根据 Lidar 灰度图和 Lidar 数据之间的对应关系,得到同名点的空间三维坐标。
- (2) 读入影像参数,其中相片的焦距的单位由像控制点的单位来定。为了便于计算机计算,通常焦距  $f$  和像控制点一般都采用像素单位。这样省去了单位转

化带来的误差，同时提高了计算速度。在没有提供初始值时，可以选取三组控制点代入共线方程计算一组初始外方位元素。

- (3) 由三个角元素的初始值计算方向余弦值，组成  $R$  阵。
- (4) 利用未知数的近似值按共线方程计算控制点像点坐标得近似值  $(x)$ ,  $(y)$ 。
- (5) 逐点计算误差方程式的系数和常数项。计算法方程的系数矩阵  $A^T A$  与常数项  $A^T L$ 。
- (6) 根据法方程，按 3-1-3 式求得外方位元素的改正数，并与相近的近似值求和，得到外方位元素新的近似值。
- (7) 检查是否收敛，小于限差则中止计算，否则重复计算。直到收敛为止。

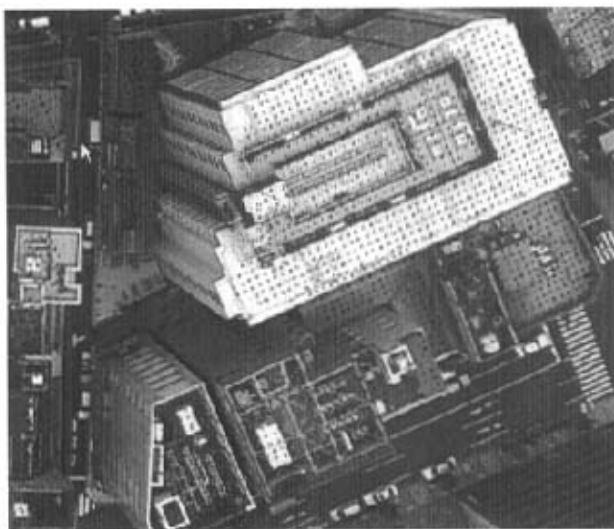


图 3-2-1 参数纠正后的 Lidar 数据在航空影像上的投影图

## 第四章 航空影像的矢量化预处理

相对于 Lidar 数据的影像图，航空影像图具有分辨率高，边缘纹理特征更明显，直线特征更清晰，一致性更好。直接从 Lidar 灰度图上提取的轮廓信息往往和实际相差甚远，因此本论文的房屋轮廓是根据共线方程关系将 Lidar 数据和航空影像信息结合起来按照一定的算法从航空影像中提取。在进行轮廓提取之前，必须对航空影像做矢量化预处理。

### §4.1 图像的边缘检测

图像的边缘对人的视觉有重要意义，人类视觉系统识别物体很大程度上依赖边缘。实验结果显示，当人看到一个亮度渐变的区域时，很难把该区域分成轮廓分明的不同部分。然而，如果遇到有亮度突变区域，人的视觉就立刻能感受到边缘的存在，即通过检测灰度的突变来识别边缘。两个具有不同灰度值的相邻区域之间存在边缘，边缘是灰度不连续的结果，这种不连续常可利用求导数方便地检测到。边缘特征不仅用于图像分割和纹理分析，也是三维目标提取的重要信息源和三维重建的目标特征基础。

边缘提取是图像分析的经典研究课题之一，目前的理论和方法仍在不断的改进和发展。在三维重建领域，基于边缘的图像分割用于三维目标识别和重建仍然是当前图像研究和遥感领域中的世界级难题，主要原因在于图像的边缘只是图像中像素的值有突变的地方，只具有二维信息；而现实中的物体是三维的，图像边缘与三维物体的边界并不是一一对应关系。由于从三维到二维的投影成像过程中不可避免的会丢失部分信息，边缘与物体间的边界并不等同，边缘指的是图像中像素的值有突变的地方，而物体间的边界指的是现实场景中的存在于物体之间的边界。有可能图像边缘并非边界，也有可能边界的地方并未表现出边缘信息。在边缘提取中加入高层语义信息成为目前研究者们尝试的热点

#### 4.1.1 梯度算子的理论基础

微机分中用导数描述连续函数的变化，图像函数依赖于两个变量，即图像平面坐标。因此，描述边缘的检测算子使用偏导数。图像函数的变化可以用指向图像函数最大增长方向的梯度表示。

梯度方向（与边缘方向垂直）上的边缘具有典型性。下图给出了几种标准的边缘剖面：

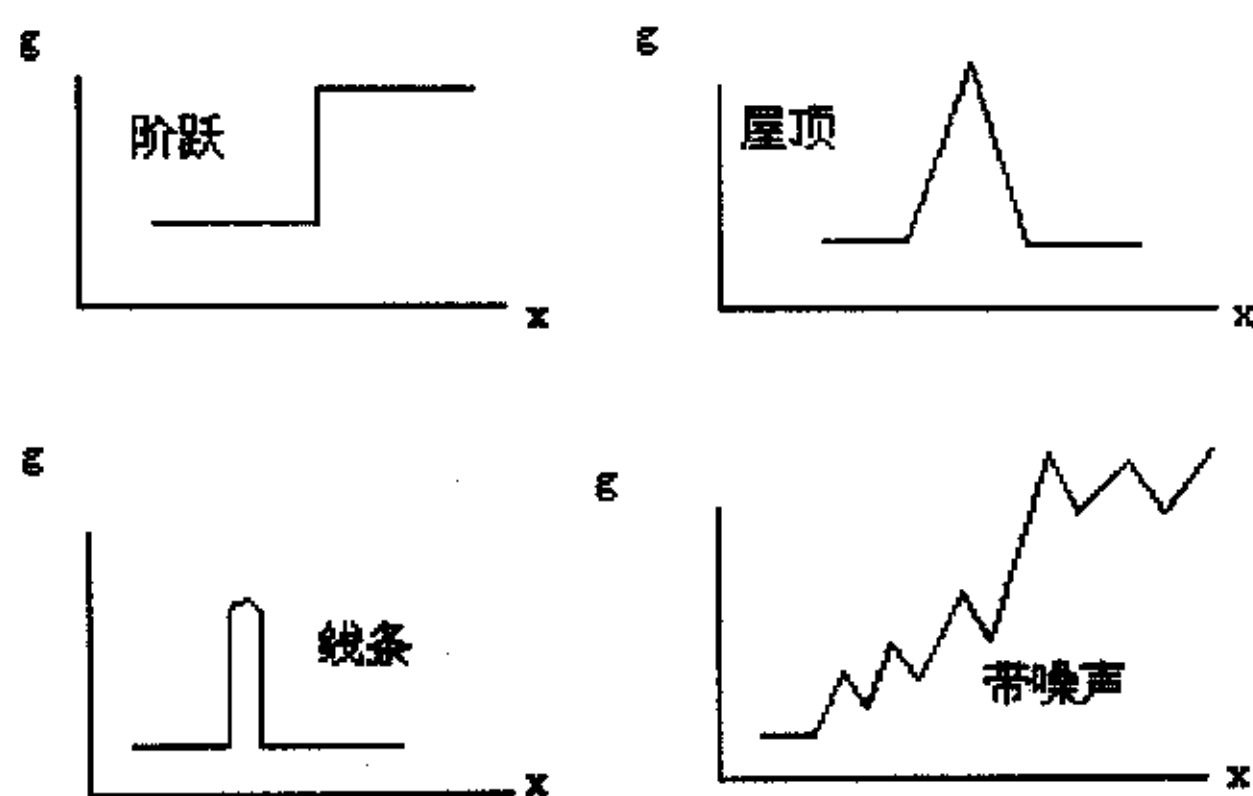


图4-1-1 典型的边缘剖面

边缘检测算子一般是根据某种类型的边缘剖面调制的。梯度的幅值 $|grad(x, y)|$ 和方向 $\phi$ 是按照如下公式计算的连续图像函数：

$$|gradg(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} \quad \text{----- (4-1-1式)}$$

$$\phi = \arg\left(\frac{\partial g}{\partial x}, \frac{\partial g}{\partial y}\right) \quad \text{----- (4-1-2式)}$$

其中 $\arg(x, y)$ 是从 $x$ 轴到点 $(x, y)$ 的角度（单位是弧度）。

数字图像本质上是离散的，因此含有导数的4-1-1和4-1-2式必须用差分来近似。图像 $g$ 在纵向（固定的 $i$ ）和横向（固定 $j$ ）的一阶差分由下式给出：

$$\Delta_i g(i, j) = g(i, j) - g(i - n, j)$$

$$\Delta_j g(i, j) = g(i, j) - g(i, j - n)$$

其中 $n$ 是小整数，通常取1。数值 $n$ 的选择既要足够小以便较好地近似导数，又要足够大以便忽略图像函数不重要的变化。二阶导数信息是一阶导数变化的标志，有些情况中，如灰度变化均匀的图像，只利用一阶导数可能找不到边界，此时二阶导数就能提供很有用的信息。实际的图像处理中，二阶导数信息也是经常用到的。二阶导数信息在数字图像处理领域一般是基于公式：

$$\nabla^2 g(x, y) = \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial y^2}$$

二阶导数信息是一阶导数变化的标志，有些情况中，如灰度变化均匀的图像，只利用一阶导数可能找不到边界，此时二阶导数就能提供很有用的信息。一般来讲在实际的图像处理中，因为图像噪声的影响，三阶以上的导数信息往往失去了应用价值，所以实际中的图像分割，往往只用到二阶导数。二阶导数还可以说明灰度突变的类型。

梯度算子作为边缘性的度量可以分为三类：

1. 使用差分近似图像函数导数算子。只需要一个卷积掩模来计算。
2. 基于图像函数二阶导数过零点的算子。（比如，Marr-Hildreth 或 Canny 边缘检测算子）。
3. 试图将图像函数与边缘的参数模型相匹配的算子，

#### 4. 1. 2 常用边缘检测算子

##### Robert 算子

Robert 算子是最古老的的算子之一，它是利用局部差分算子来寻找边缘。由于它只使用当前像素的  $2 \times 2$  邻域。它的卷积掩模是：

$$h_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad h_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

因此边缘的幅值计算如下：

$$|g(i, j) - g(i+1, j+1)| + |g(i, j+1) - g(i+1, j)|$$

Robert 算子的主要缺点是对噪声的高度敏感性，原因在于使用了很少几个像素来近似梯度。

##### Prewitt 算子

Prewitt 近似一阶导数。对于  $3 \times 3$  的掩模，在 8 个可能方向上估计梯度，具有最大幅值的卷积给出梯度方向。 $3 \times 3$  的算子模板如下：

$$h_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad h_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad h_3 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

##### Sobel 算子

$$h_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad h_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad h_3 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Sobel 算子通常用于水平和垂直边缘的一个简单检测算子，这时使用  $h_1$  和  $h_3$ 。如果  $h_1$  的响应是  $y$ ， $h_3$  的响应是  $x$ ，则我们可以根据下式得出强度：

$$\sqrt{x^2 + y^2} \quad \text{或} \quad |x| + |y|$$

且方向是  $\tan^{-1}(\frac{y}{x})$ 。

##### Laplace 算子

Laplace 算子  $\nabla^2$  是近似值给出梯度幅值的二阶导数的流行方法。通常用卷积和来近似。通常使用  $3 \times 3$  的掩模  $h$ ，对于 4-邻接和 8-邻接的邻域分别定义为：



$$h = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad h = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Laplace 算子有一个缺点是它对图像的某些边缘产生双重响应。

### Canny 算子

Canny 推导了最优边缘检测算子，他考核边缘检测算子的三个标准是：

- ① 检测标准：不丢失重要的边缘，不应有虚假的边缘。
- ② 定位标准：实际边缘与检测到的边缘之间的偏差最小。
- ③ 抑制虚假边缘：将多个响应降低为单个边缘响应。

Canny 算子的方向性使得它的边缘检测和定位优于其它算子，具有更好的边缘强度估计，能产生梯度方向和强度两个信息。由于Canny算子的优越性能，本文利用其对航空影像进行边缘检测。其原理在下面一节介绍。

## §4.2 Canny 边缘检测

Canny与1986 年提出了基于最优化算法的边缘检测算子，具有很好的信噪比和检测精度，因此被广泛应用。Canny推导出新的检测算子是基于如下的几个概念：

- (1) 边缘检测是针对1D信号和前两个最优标准表达的，用微积分可以得到完整的解。
- (2) 如果加上第三个标准（多个响应），需要通过数值优化的办法得到最优解。该最优滤波器可以有效地近似为标准差为 $\sigma$ 的高斯平滑滤波器的一阶微分。
- (3) 然后将边缘检测算子推广到二维情况。阶跃边缘由位置，方向和可能的幅度来确定。将图像与一对称的2D高斯做卷积后再沿梯度方向（与边缘方向垂直）微分，就构成了一个简单而有效的方向算子。

数学推导如下：

设二维高斯函数如下式所示：

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(x^2 + y^2)\right)$$

其某一方向 $\vec{n}$ 上 $G(x, y, \sigma)$ 的一阶方向导数为：

$$G_n = \frac{\partial G}{\partial n} = \vec{n} \nabla G$$

式中 $\vec{n} = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix}^T$ ,  $\nabla G = \begin{bmatrix} \frac{\partial G}{\partial x} \\ \frac{\partial G}{\partial y} \end{bmatrix}$ ,  $\vec{n}$  是方向矢量， $\nabla G$  是梯度矢量，将图像 $f(x, y)$ 与 $G_n$ 做

卷积，同时改变  $\vec{n}$  的方向， $G_n * f(x, y)$  取得最大值时的  $\vec{n}$ （即  $\frac{\partial(G_n * f(x, y))}{\partial \theta} = 0$  时对应的方向）就是正交于检测边缘的方向。由下列等式：

$$\frac{\partial(G_n * f(x, y))}{\partial \theta} = \frac{\partial \left[ (\cos \theta \cdot \frac{\partial G}{\partial x}) * f(x, y) + (\sin \theta \cdot \frac{\partial G}{\partial y}) * f(x, y) \right]}{\partial \theta} = 0$$

可得：

$$\tan \theta = \frac{\frac{\partial G}{\partial y} * f(x, y)}{\frac{\partial G}{\partial x} * f(x, y)} \quad \cos \theta = \frac{\frac{\partial G}{\partial x} * f(x, y)}{|\nabla G * f(x, y)|}$$

$$\sin \theta = \frac{\frac{\partial G}{\partial y} * f(x, y)}{|\nabla G * f(x, y)|}$$

因此，对应于  $\frac{\partial(G_n * f(x, y))}{\partial \theta} = 0$  的方向  $\vec{n}$  为下列等式所示：

$$\vec{n} = \frac{\nabla G * f(x, y)}{|\nabla G * f(x, y)|}$$

在该方向上  $G_n * f(x, y)$  有最大输出响应，决定了边缘强度

$$|\nabla G(x, y) * f(x, y)| = \left| \cos \theta \left( \frac{\partial G(x, y)}{\partial x} \right) * f(x, y) + \sin \theta \left( \frac{\partial G(x, y)}{\partial y} \right) * f(x, y) \right|$$

在实际运算中将原始二维卷积模板分解为两个一维的行列滤波器  $\frac{\partial G(x, y)}{\partial x}$  和  $\frac{\partial G(x, y)}{\partial y}$

来提高速度，然后把两个一维模板分别与  $f(x, y)$  进行卷积，得到：

$$E_x = \frac{\partial G(x, y)}{\partial x} * f(x, y) \quad E_y = \frac{\partial G(x, y)}{\partial y} * f(x, y)$$

则边缘强度可以表示为： $A(i, j) = \sqrt{E_x^2(i, j) + E_y^2(i, j)}$

垂直边缘的方向可以表示为： $\alpha(i, j) = \frac{E_x(i, j)}{E_y(i, j)}$

Canny 定义边缘点为该卷积在边缘梯度方向上区域最大值的点，检测步骤如下：

- (1) 用高斯滤波器对图像滤波，去除图像中的噪声。
  - (2) 用高斯算子的一阶微分对图像进行滤波，得到每个像素梯度的大小 $|G|$ 和方向 $\theta$ 。
  - (4) 进行“非极大值抑制”找到边缘的位置。非极大值抑制是指在与边缘垂直的方向上寻找局部最大值。
  - (5) 计算边缘强度。
  - (6) 对边缘图像做滞后阈值化处理，消除虚假响应。
- Canny检测算子构成了边缘检测技术的一种复杂但却是主要的贡献。其检验效果如下图所示。

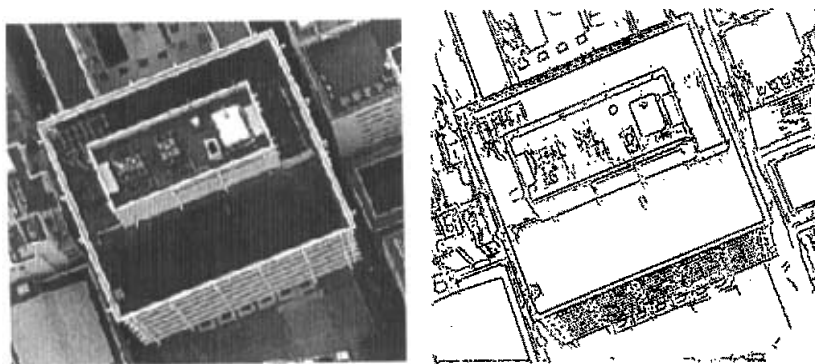


图4. 2. 1 Canny检测效果图  $\sigma = 5$

### §4.3 哈夫变换提取直线段

Hough 变换是于1962 年首次提出的,Duda 和Hart 于1972 年首次用该方法提取直线。Hough 变换的基本原理是将影像空间中构成曲线(包括直线) 的点变换到参数空间中, 通过检测参数空间中的极值点确定出该曲线的描述参数, 从而得到该曲线(或直线) 的方程。在预先知道形状的条件下, 利用霍夫变换可以方便的得到边界曲线而将不连续的边缘像素点来连接起来。霍夫变换的主要优点是受噪声和曲线间断的影响较小。利用霍夫变换还可以直接分割出某些已知形状的目标, 并可能确定到边界到亚像素精度。

例如, 对于过影像空间中点 $P(x_0, y_0)$ 的所有直线如图4-3-1, hough变换可将其映射到参数空间 $(\rho, \theta)$ 中的一条近似正弦的曲线上如图4-3-2。

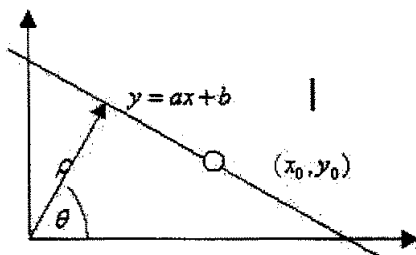


图4-3-1 影像空间中的直线

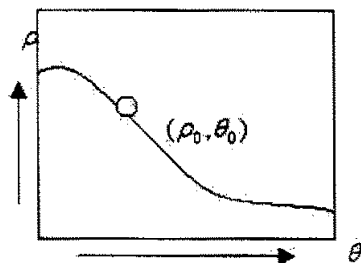


图4-3-2 映射到参数空间的轨迹

由于影像空间内的一条直线由一对参数 $(\rho, \theta)$ 唯一确定, 因而该直线上的各点变换到参数空间内的各近似正弦曲线必然都将经过点 $(\rho_0, \theta_0)$ , 在参数空间检测出经过次数最多的点, 也就确定了直线的参数。

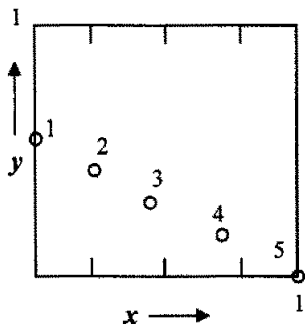


图4-3-3 影像空间中的点

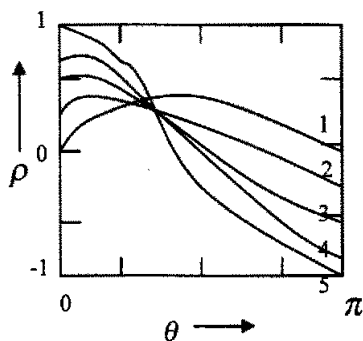


图4-3-4 映射到参数空间的轨迹

影像空间中直线 $y = ax + b$ 可以用唯一一对 $(\rho, \theta)$ 与它相对应, 对应关系描述为

$$\left. \begin{aligned} \theta &= -\arctan a \\ \rho &= \frac{-b}{\sqrt{1+a^2}} \end{aligned} \right\} \text{----- (1式)}$$

其中,  $\rho$  定义了从原点到直线的垂直向量。 $\theta$  表示该垂直向量与  $x$  轴的夹角。

以参数  $\rho$  和  $\theta$  定义了参数空间后, 影像空间 $(x, y)$ 上的任意一条直线对应了该空间的一个点。过影像空间 $(x, y)$ 中一点 $(x_0, y_0)$ 的所有直线在 $(\rho, \theta)$ 参数空间的轨迹为

$$\rho = y_0 \sin \theta + x_0 \cos \theta \quad \text{----- (2式)}$$

这是一条近似正弦曲线。

为了确定一组点所构成的直线方程, 可以先将参数空间 $(\rho, \theta)$ 量化, 然后将 $\theta$ 的量化值和每一对 $(x_i, y_i)$ 代入上式, 计算出各个 $\rho_k$ 值,  $(\rho_k, \theta_k)$ 对应于参数空间的哪个位置,

便将该位置的计数器累加1。当所有的 $(x_i, y_i)$ 点变换完毕，就对各个计数器进行检测，具有最大值得计数器对应的 $(\rho_k, \theta_k)$ 即是所求解的直线参数，再将 $(\rho_k, \theta_k)$ 代入1式反解 $b, a$ ，即得到直线方程。

在实际的应用中需主意量化的大小，如果 $\rho$ 和 $\theta$ 量化得过粗，则参数空间的凝聚效果较差，找不出直线的准确的 $r$ 和 $\theta$ 值。如果量化得过细，那么计算量将增大，因此必须兼顾这两方面，取合适的量化值。

最终目标是提取出一根一根独立的线段，因此必须在已知直线方程的条件下跟踪出完整的直线段出来。设图像宽度为width，高度为height。将 $x(x \in (0, width))$ 带入

$y = ax + b$ 解得 $y(y \in (0, height))$ 。此时解得的 $y$ 一般不是整数。搜索距离 $(x, y)$ 最近的四个像点，如果其中有非零像素，则认为该点在直线端上，反之认为该点不属于直线段。依次由0到width代入 $x$ 做同样的操作。依次记录下临界点并按照 $(0...n)$ 编号。按照编号由小到大的顺序各线段端点为相邻偶数和奇数号的邻界点。

下图是利用hough变换提取直线段的结果。红色的部分为提取的直线段。



图4—3—5 hough直线段提取后效果图

## 第五章 轮廓提取及其三维重建

简单房屋的边缘基本上都为直线段,因此在简单房屋得提取中直线特征是非常重要的线索。本文以 Lidar 数据快的轮廓为基础搜索由 hough 变化求得的直线段,根据一定算法规则来生成房屋的轮廓。然后再利用求得的轮廓点搜索 Lidar 点反求出房屋轮廓的三维坐标。

### §5.1 房屋轮廓的生成

Hough 变换提取的是航空影像上一个个独立的直线段,这些直线段可以作为轮廓生成的候选直线段。将 Lidar 数据(包括 Lidar 数据快的轮廓)根据共线方程的关系投影到航空影像上。然后确定搜索直线的范围,在房屋内部的直线不能作为候选直线。因此首要步骤必须根据线段和多边形的关系来找出内部直线。并将这些线段去除。

#### 5.1.1 直线位置的判断

本文直线位置的判断主要是指 hough 变换提取的直线相对于投射到航空影像得 Lidar 数据块轮廓得位置。其目的主要是找出位于轮廓内得直线段并将其去除。线与多边形的关系可以转化为点与多边形的关系。任一直线,只要其有一端点在多边形内部,就可认为该线段与多边形相交或位于多边形内部。

点在多边形内部的判别最直接的方法是射线法,即从需判别的点开始画一任一方向的直线(该直线可以是铅直线或平行线),然后计算它所通过多边形的交点,当交点个数是奇数时,该点在多边形内部,若是偶数,表明它在多边形外。但在特殊情况下射线法会失效。当射线通过多边形的拐点或某一条边时,这时安统计通过多边形边界交点的奇偶数会产生错误的结果。如下图所示:

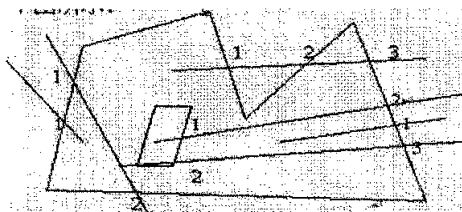


图 5-1-1 点在多边形的判断

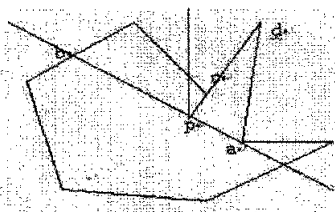


图 5-1-2 特殊情况下射线法失效

本文采用的是弧长法来判断点与多边形的关系。这种方法要求多边形由有向边组成。即规定沿多边形各边的走向其左侧(或右侧)为多边形内部,方法是以被测点为圆心作单位圆,将全部有向边向单位圆作径向投影,并计算其在单位圆上弧长的代数和。相当于计算该点到多边形上所有顶点的夹角和。若代数和为 0 或小于  $360^\circ$ ,则被测点在多边形之外,若代数和为  $360^\circ$ ,则被测点在多边形之内。

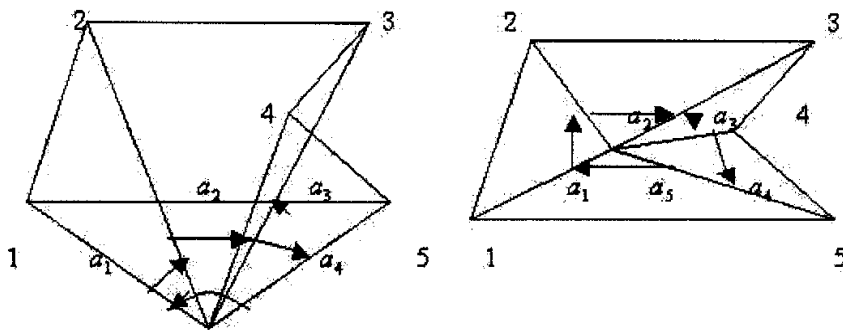


图 5-1-3 弧长法判断点在多边形内部。

### 5.1.2 轮廓边缘直线段的选取

在 Lidar 轮廓直线段的选取过程中，那些位于 Lidar 块内部的直线段不作为候选直线。在本文的方案中，轮廓线段的选取分为两步：初选和筛选。

（一）初选。直线段提取所能得到的是图像上比较明显的矢量直线段，单纯利用航空影像信息是很难从中识别出房屋的轮廓信息以及轮廓信息的拓扑关系。Lidar 数据所擅长的是确定房屋的大体位置以及房屋的大体轮廓。

在 Lidar 数据和航空影像配准的情况下，可由 Lidar 数据得到房屋的精细轮廓。由于 Lidar 数据点阵在航空影像上的投影位于其对应的房屋的轮廓内侧，往往 Lidar 数据块轮廓外侧距离最近的线段为真实房屋的线段。

由第二章第四节边界跟踪可以得到 Lidar 数据块的初步轮廓，且统一为顺时针方向链码。链码轮廓的每一个点的实际坐标值可由链码起始值以及该点的方向计算得到。由下列公式计算每一个 Lidar 轮廓点与直线段之间的距离，（计算单位都为像素级）

$$ax + by + c = 0 \text{ --- (1)}$$

$$Dis = \frac{|ax_p + by_p + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \text{ --- (2)}$$

求得距离最近的那条线段并作为初选线段。同时搜索距离每个 Lidar 轮廓点最近的直线端点，将该端点所属的直线段也作为初选直线段。对每个初选直线段标上与对应 Lidar 数据块相同的标号。

（二）筛选。实际应用中，通过直线和 Lidar 之间的距离最近关系所确定的初选直线能确保所有轮廓线都被选中，但不能确保选中的都是轮廓线。实践证明，墙面轮廓线以及较明显窗户线段很容易误选，另外一些介于 Lidar 轮廓与实际房屋轮廓之间的干扰线段也容易误选。

基于以上原因，必需添加约束条件来去除这些错误线段。对每个初选线段搜索相同标号的 Lidar 数据块中和两端点距离最近的两个点  $A_i, B_i$ 。以 Lidar 轮廓中  $A_i, B_i$  之间部分作为该直线段的区间。在此基础上添加下列约束条件。



约束条件 (1): 比较所有线段区间的范围, 如果某一区间完全位于另一区间之内, 则去除该区间所对应的直线。

约束条件 (2): 对于那些存在区间相交的直线, 则比较它们的与对应区间 Lidar 轮廓点的平均距离。去除平局距离较大的那根直线段。平均距离是指区间轮廓内所有 Lidar 点与对应直线段距离和的平均值。

对剩余的直线段再计算其与 Lidar 轮廓区间的平均距离, 如果大于限值, 则去除, 反之保留。

在此基础上沿 Lidar 轮廓顺时针方向将直线段压入堆栈, 为轮廓的生成做准备。

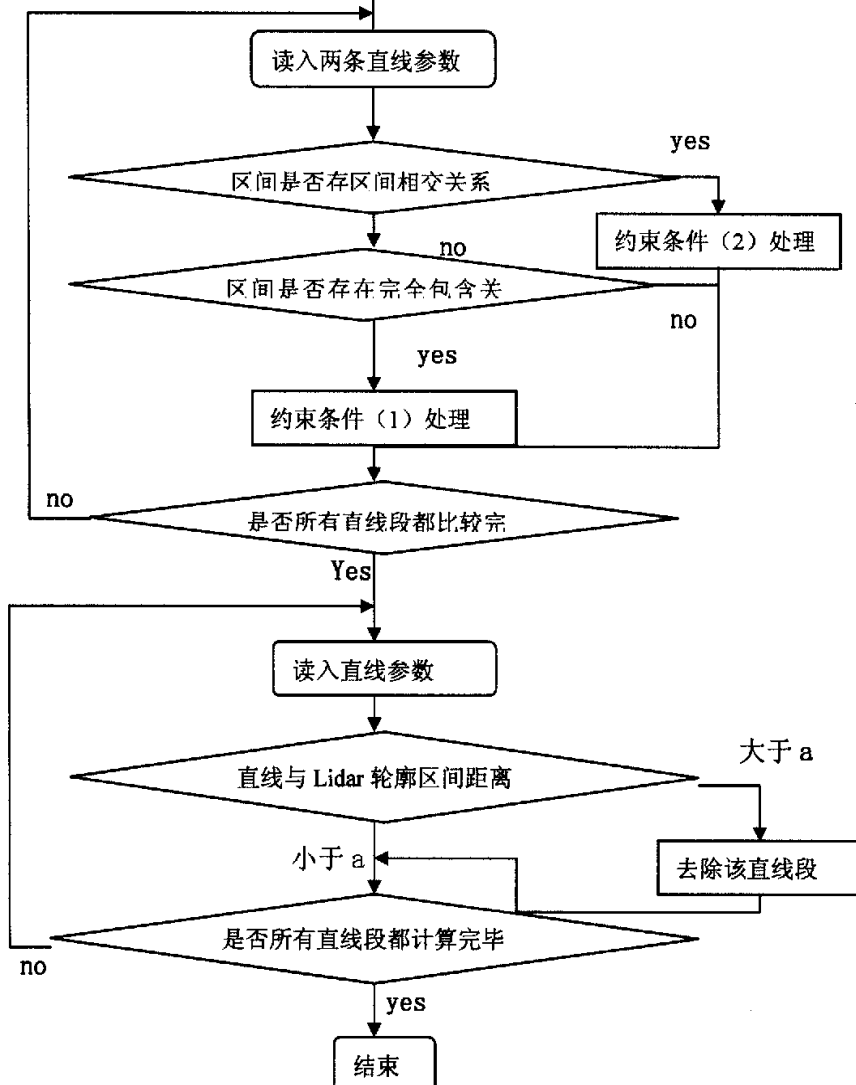


图 5-1-4 轮廓筛选流程图 (a 为限值)

### 5. 1. 3 轮廓的生成

经过初选和筛选, 去除了一些虚假的房屋轮廓线段。剩余直线大体和 Lidar 轮廓成平行状。可以根据相邻线段的倾角关系来确定轮廓生成法则。

出栈操作：每次从堆栈中取出一根直线，比较相邻两根直线的 $(\rho, \theta)$ 值。如果 $\theta$ 值相近，则比较 $\rho$ 值。 $\rho$ 值也相近则认为这是一条直线，合并两根线段为一根线。 $\rho$ 值不相近则认为是平行线，

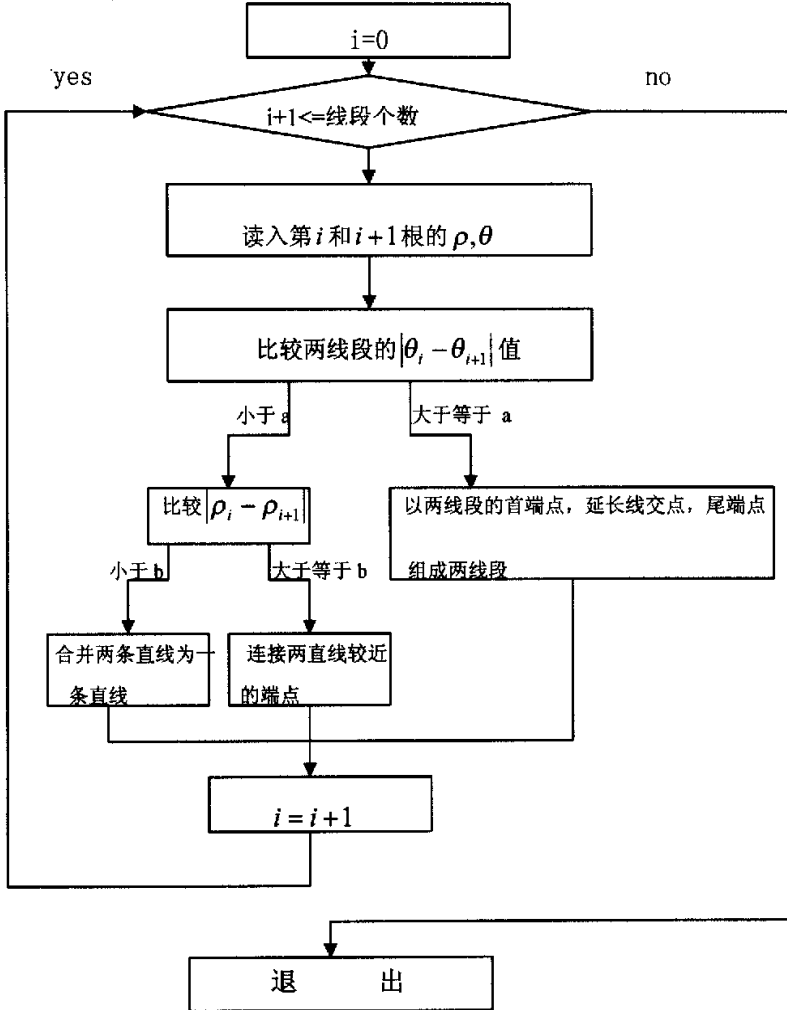


图 5-1-5 轮廓生成算法流程图（a, b 为常数）

将两根线段相连。如果 $\theta$ 值不相近则，则求出两线段的交点，以第一个线段的首顶点，交点，第二根线段的尾节点组成两根相连的线段。在这种情况下无需比较 $\rho$ 值。算法流程图见图 5-1-5。在图中 a, b 为常数。用来限定直线之间的关系。如此反复操作，直到栈空时，将栈底直线和栈顶直线做同样的计算。

从下图的检测效果来看，基本上已经能够提取出房屋的轮廓了，提取的效果取决于图像边缘检测的质量和 Lidar 数据快提取的质量。

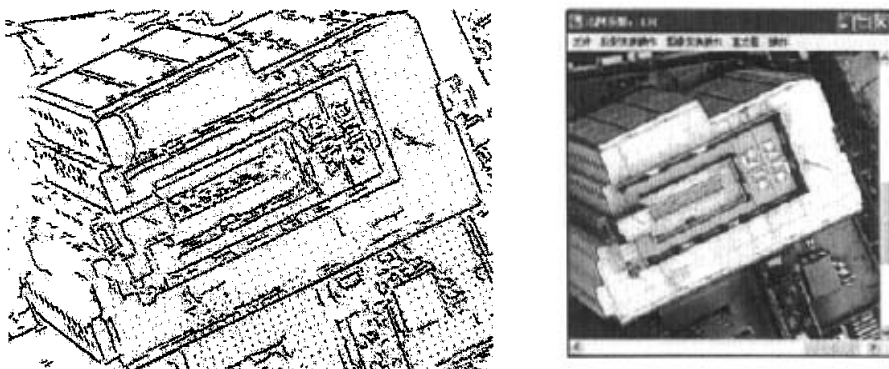


图 5-1-6 轮廓生成示意图。

在上图中左图像是 Lidar 数据点阵投影在航空影像上,红色的线段为根据 Lidar 数据点阵搜索到的直线段,右图是根据上述算法生成的房屋轮廓图(红线段)。从图上可以看出,最后的结果已基本符合房屋原型。

上述步骤处理得到的是房屋的中心投影的轮廓。若已知轮廓点的高程值,则可根据共线方程关系式解算出空间三维坐标。

## §5.2 三维模型的生成

三维重建是一个从二维到三维的计算过程,最终目的是得到房屋轮廓点在空间坐标值。进而构成目标的三维轮廓。

通常在正射影像平面轮廓已经具备的情况下,基于 Lidar 的三维重建显得很容易。在轮廓和 Lidar 数据配准的情况下,直接将 lidar 轮廓高程值赋给轮廓就行。基于 Lidar 数据和遥感影像或者矢量地图都是采用这种直接赋值的方法求得三维坐标。而本文在上一节的基础上求得的是在航空影像上的房屋轮廓,不能采用上述方法直接赋值,需根据共线方程来确定轮廓和 Lidar 数据之间的关系。

由中心投影图的轮廓(像点坐标)计算得到空间三维坐标,一种方法是已知点的空间平面坐标,求点的高程值。另一种方法是已知点的高程值,求点的空间平面坐标。第一种方法在实际应用中需要利用迭代的方法,预先设定一个高程值,代入共线方程求得空间二维坐标,将 Lidar 数据中该点的高度值作为新的高程值继续代入共线方程计算,如此反复计算,直到求得的高程值变化很小时(收敛于某个值)就认为此时求得点就是最终结果。该方法对于连续的地形(例如:山地,马路地形)比较合适,对于城市地型由于地形落差很大,很有可能在迭代计算的时候求出的值并不收敛。另外,初始高程值的选择也直接决定计算结果的质量。对于第二种方法,只要能给出正确的高程值就能计算出结果,而且本方法不需要迭代计算,效率远高于第一种方法。

考虑到两种方法的特点,本文采用的是第二种方法。已知相片的六个外方位元素(后交解得)和相机的内方位元素(已知),轮廓坐标作为像点坐标(5.1 节计算得到)。根据共线方程关系式,代入 Z 值,由两个方程分别计算得到 X,Y。和上一节轮廓生成相反,此处是由轮廓点搜索 Lidar 点。

具体步骤如下：

- (1) 将分割后的 Lidar 数据块投射到航空影像上，同时也将已提取的房屋轮廓投射到航空影像上。
- (2) 求出对应房屋数据块中离每个房屋轮廓点距离最近的 Lidar 点，并将该 Lidar 点的高程值赋给对应的轮廓点。
- (3) 求得每个轮廓点的高程值后，将该每个点的像点坐标，高程值带入共线方程式，求出三维平面坐标。

如下图所示为建模示意图。

图 5—2—1 为投射到航空影像上后点搜索示意图，红色的点为 Lidar 点，红色的直线段为已知轮廓。难会出现投影后，不同的 Lidar 数据块出现重叠，交叉的现象，因此同一房屋的 Lidar 数据块和轮廓点都打上同样的 ID 号。搜索时只搜索具有相同 ID 号的 Lidar 点。图 5—2—2 为生成的三维模型在 opengl 环境下的轮廓图。图 5—2—3 在 opengl 环境下的可视化效果图。

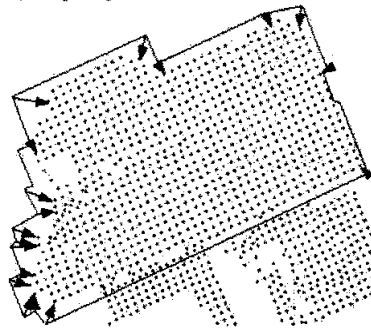


图 5—2—1 点搜索示意图

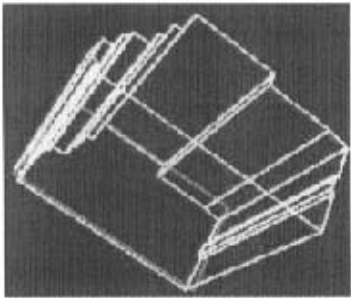


图 5—2—2 三维模型

- (4) 对同一轮廓上的点取其所有点高程的平均值。

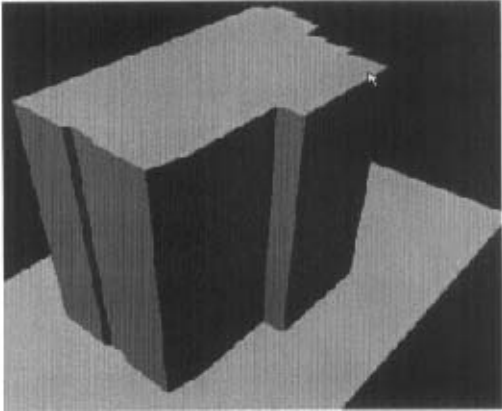


图 5—2—3 三维可视化效果图

利用本文方案实现基于航空影像和 Lidar 数据的三维重建相对于基于遥感影像和 lidar 数据的三维重建具有如下优势（为了叙述方便拟定基于遥感影像方案为方案 1，本文方案为方案 2）：

1. 在 Lidar 房屋分割方面：方案 1 使用的是区域增长，该方法难点在于初始种子

点得确定，且对于大片地区的房屋分割难度更大。方案 2 采用波峰法阈值分割 + 小面积粒子提取 + 边缘检测进行房屋分割。本方法无需确定初始种子点，能最大限度的去除非屋面点。且对于大块城区，本方案更有优势。

2. 在矢量生成方面，方案 1 采用的是对 Lidar 轮廓使用多边形逼近生成矢量。方案 2 是以初始轮廓为基础从航空影像中搜索出边缘轮廓，然后按照一定的规则组合成房屋轮廓。对于形状较复杂的目标，方案 2 效果更理想。
3. 三维重建方面，方案 1 是在遥感影像和 lidar 数据配准的情况下由 Lidar 点得到。。由于 Lidar 数据的屋面边缘数据较容易出错，直接基于 lidar 数据取轮廓高程值存在很大的不确定性。方案 2 是由共线方程关系式计算得到，结果准确可靠。

# 第六章 试验结果与分析

本试验利用同一地区的 Lidar 数据和航空影像,实现该地区明显房屋的三维重建。  
在 Visual C++ 6.0 编译环境下编制程序以检验该方案的可行性。

程序的设计分为三个模块:

## 1. 参数纠正模块

以同一地区的 Lidar 影像(数据)和航空影像为一个配准模型,这里 Lidar 影像存储文件为 8 位 256 色灰度图。航空影像为影像为 24 位的 bmp 或 jpeg 格式图像文件。

这个模块主要包括:同名控制点的选取,外方位元素的后交纠正。

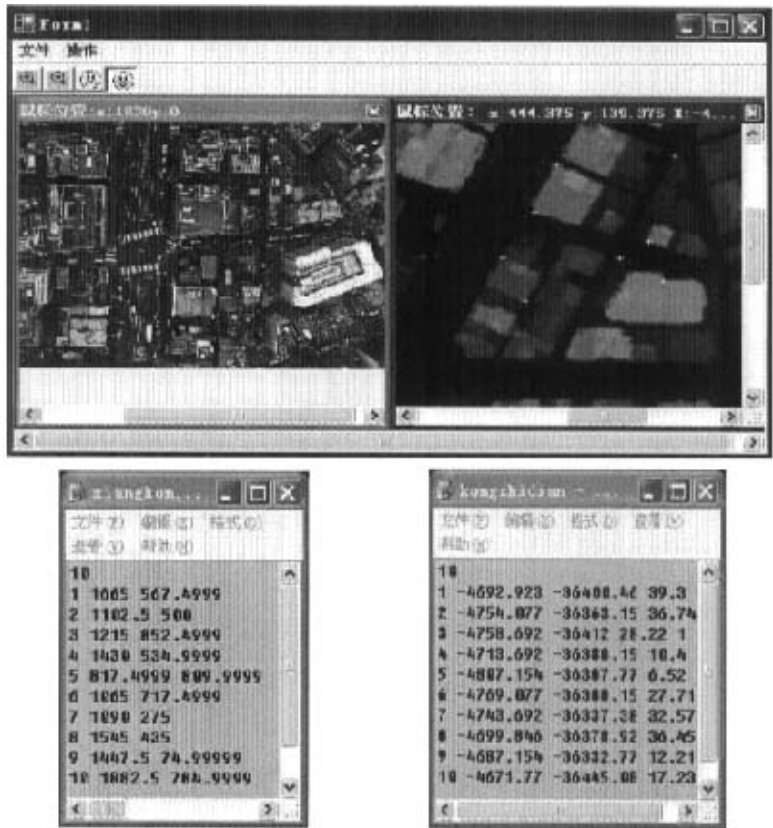


图 6-1 参数纠正模块中控制点的选取(像点单位为像素,控制点单位为米)

在控制点的选取过程中,从影像中选取的是控制点的像点坐标,以屏幕左上角为圆点的屏幕坐标。在 Lidar 灰度图中选取的是控制点的空间坐标值。

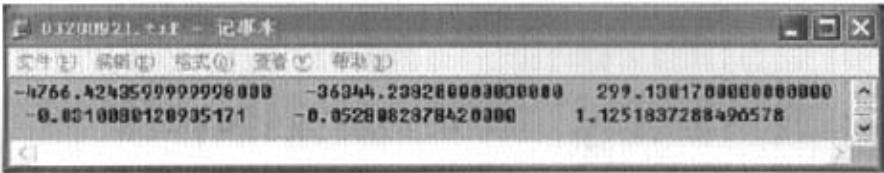


图 6-2 初始外方位元素

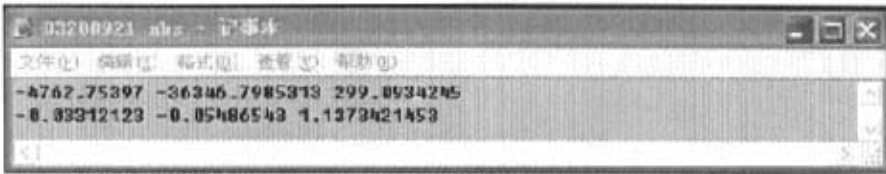


图 6-3 纠正后的外方位元素

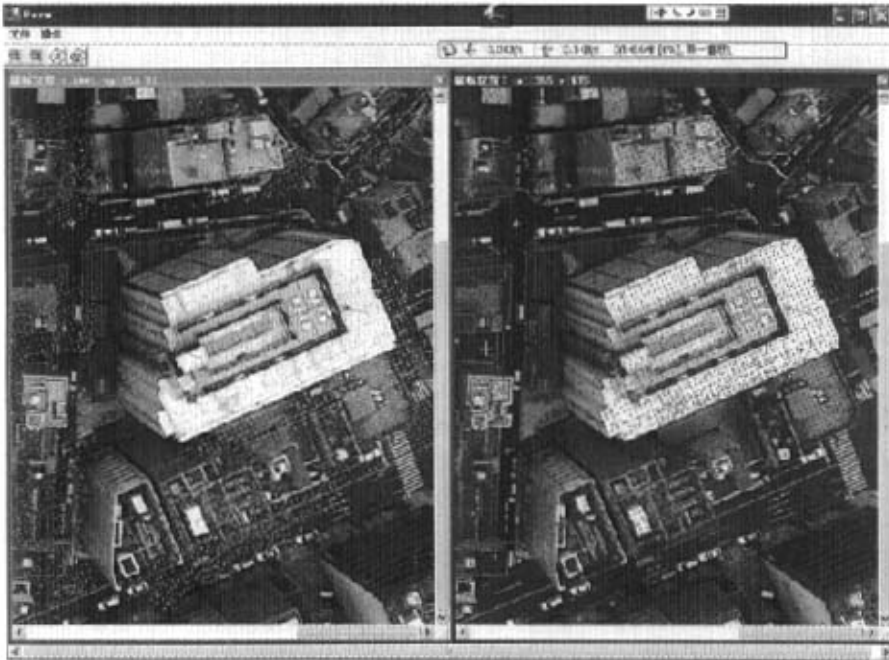


图 6-4 纠正前后的投影比较

在上图中左边图像为 Lidar 数据在初始参数条件下的投影效果图，图中黄色的点为 Lidar 点。右图为同一 Lidar 数据在纠正后参数条件下在同一航空影像上的投影效果图。红色的点为 Lidar 点。

## 2. 数据预处理以及轮廓生成模块。

该模块以同一地区的 Lidar 数据和航空影像（包括纠正后的影像参数）为重建模型。包括：Lidar 影像（数据）的预处理，航空影像的预处理，轮廓的生成以及三维模型的生成。



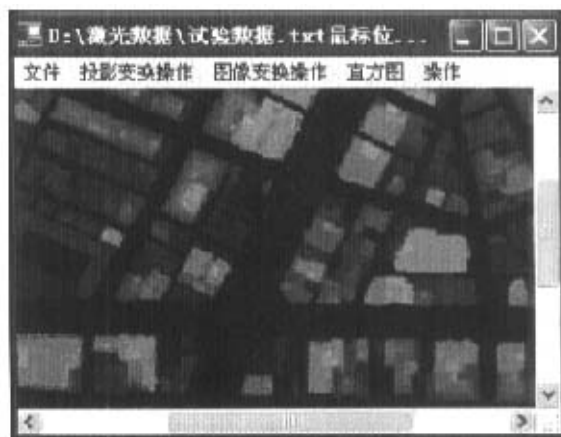


图 6—5 原始 LIDAR 数据



图 6—6 双峰法初始分割+标号法小面积去除

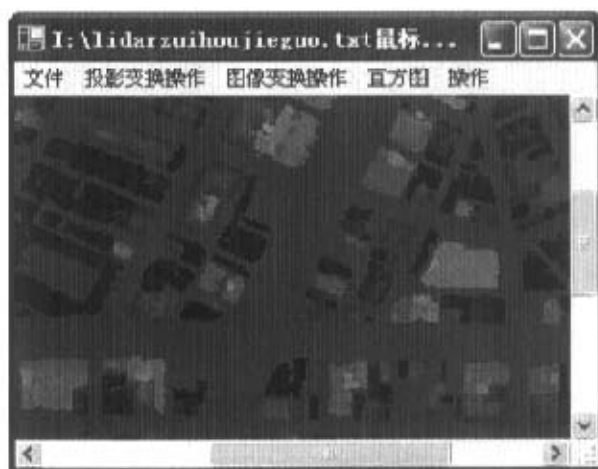


图 6—7 去除墙面点后的灰度图



图 6-8 房屋轮廓的生成

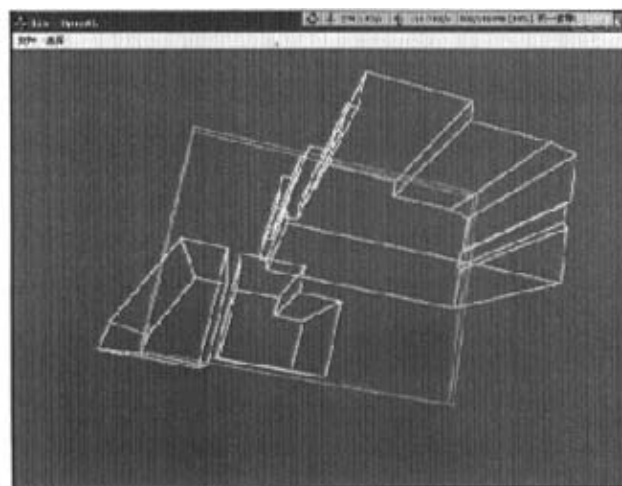


图 6-9 生成三维轮廓

### 3. 三维显示模块

利用 VC++6.0 编译器基于 Opengl 环境实现对城区已重建的房屋三维模型的三维显示, 并实现平移、旋转基本浏览功能。

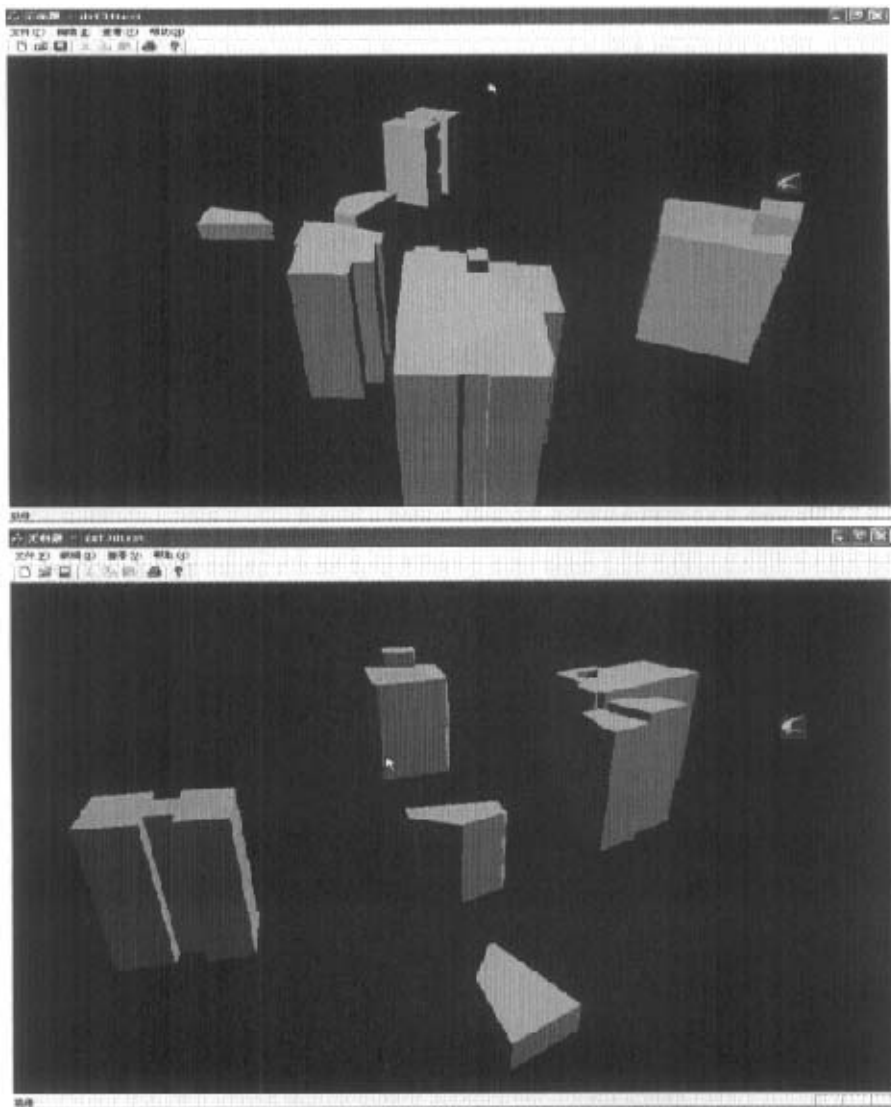
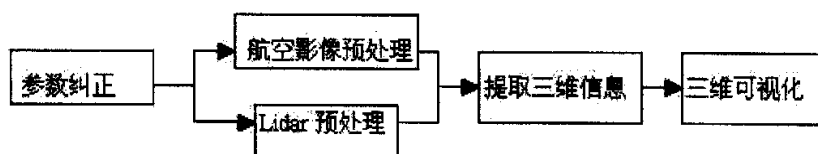


图 6-10 三维可视化模块的三维显示

首先以同一地区对应的 Lidar 数据(影像)和航空影像作为纠正配准的模型, 选取控制点, 利用后方交会的原理计算出较准确的影像参数。再对 Lidar 影像和航空影像分别做预处理。再以预处理后的 Lidar 和航空影像以及纠正后的参数作为重建模型, 进行重建提取矢量信息, 并实现三维可视化。



### 模型 1: (简单矩形组成的房屋)

首先解算出影像的外方位元素，然后再提取出 Lidar 数据中屋面点阵，并跟踪出点阵的轮廓。对航空影像利用边缘检测，hough 变换提取出直线信息。然后将 Lidar 点阵投射到航空影像上，根据初始轮廓选取矢量直线。对于简单的矩形房屋，将各线段两两相交的交点作为轮廓点。最后将离轮廓点最近的 Lidar 点的高程值赋给轮廓点。从而解算出空间三维坐标。



图 6-11 模型原始数据

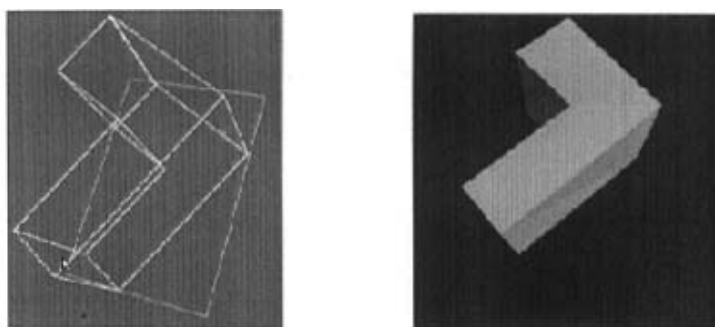


图 6-12 重建出的简单矩形房屋模型

### 模型 2: (不规则多边形房屋)

相对于简单矩形房屋来说，重建不规则多边形房屋不同点在于模型轮廓的生成。在整个过程中需要考虑相邻两条直线之间的关系。如果平行，则比较两直线的  $\rho$  值。如果  $\rho$  值也相等，则将两条线段合并为一条。 $\rho$  不等则将两条线段首位相连。如果相邻线段不平行，延长线段求交点。



图 6-13 模型原始数据

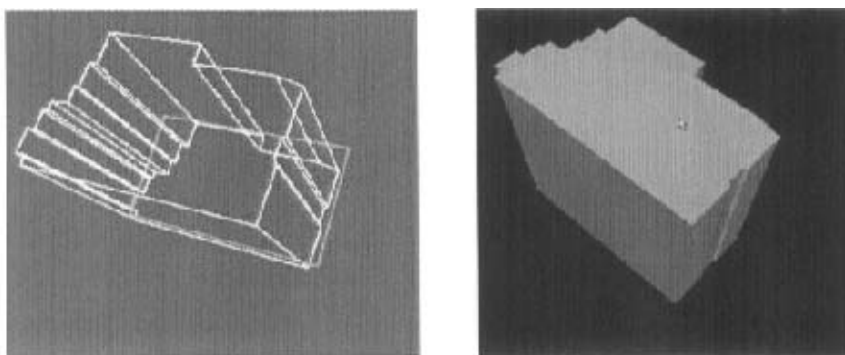


图 6-14 重建出的不规则多边形房屋

### 模型 3: (多层次房屋)

多层次房屋的重建思想在于: 将一个完整的房屋按结构层次分解为几个部分。其成败的关键在于 Lidar 数据的提取, 能否将不同层次的 Lidar 点分离为独立的部分。然后对每一小块的 Lidar 数据按照模型 1 或模型 2 的方法来单独处理。最后将得到的结果合成一个完整的房屋。



图 6-15 模型原始数据

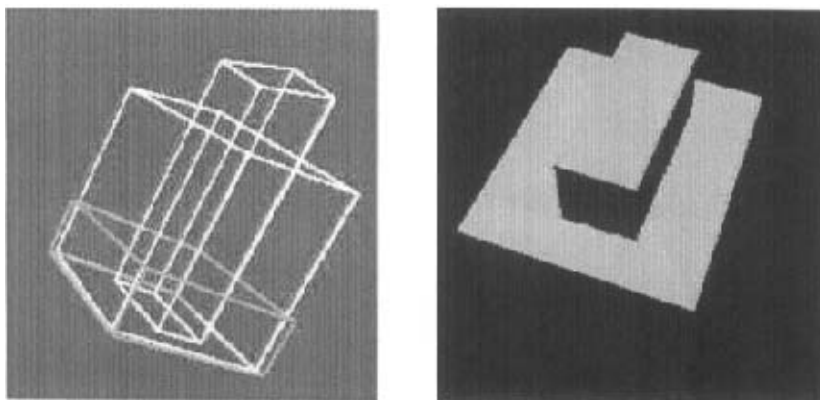


图 6-16 重建出的多层次房屋

# 第七章 结论

## §6.1 研究内容与创新

本文介绍了以 Lidar 数据和航空影像的特性，结合图像处理和图形学等相关知识讨论了利用这两种数据对城市中的明显房屋进行三维重建的问题，经过实验验证，得出如下结论：

1. 鉴于 Lidar 数据的复杂性，本文提出了使用波峰法+小面积粒子去除+边缘检测对 Lidar 数据进行分割处理，能够有效地分割出独立的房屋数据块。同时去除了非 Lidar 屋面点，最大限度的保留了房屋屋面点。
2. Lidar 影像和航空影像的配准。以 Lidar 灰度图和航空影像的同名特征点作为控制点，采用单片后交模型实施航空影像参数的解算。从而实现 Lidar 数据和航空影像的配准。实践证明，该方法简单易行，能够满足空间建模的需要。
3. 以 Lidar 数据块初始轮廓为基础搜索房屋边缘轮廓线，按照相邻直线的关系自动生成房屋矢量轮廓。在此基础上，通过反向搜索轮廓点的高程值，从而解算得到三维坐标。

## §6.2 进一步工作展望

本文对利用 Lidar 数据和航空影像重建城市中的明显房屋做了尝试性的试验。取得了一些理想的实验结果。但由于房屋的多样性，复杂性，仍有一些问题存在，有待于解决。

1. 本文研究的主要对象是较常见平面房屋，对于球面，人字型等非平面的房屋，本方案很难适用。
2. 由于影像特征提取的不确定很大，会出现某些房屋提取失败的情况。这主要是因为：1，房屋纹理过于复杂，干扰信息过多，容易错选轮廓直线。2，Lidar 数据精度不够，提取出的房屋初步轮廓和影像的实际轮廓相去甚远。3，航空影像是中心投影，某些屋面会被别的房屋部分遮挡，不能提取出全部的轮廓，致使结果出错。
3. Lidar 数据是靠光束发射返回的时间差来采集 DSM 信息的，某些玻璃顶房屋的 Lidar 数据点的高程值比实际情况要低，在影像上显示为黑白相间的点。在这种情况下很难提取出房屋的轮廓，即使提取出完整的房屋轮廓，计算出的模型坐标也是错误的。

本文提出的策略和算法适用于城区较明显的平面房屋，由于实际情况的复杂多变性，某些方面有待于在今后进一步完善：

1. 本文方案中的 Lidar 影像特征提取是采用的单阈值分割。在地势较平坦的城区，单阈值分割可以胜任。但对于地面起伏较大的城区，单阈值分割很难满足要求。



在今后的研究中，可以采用先初步分割，使各个房屋独立开来。然后对每个区域采用不同的阈值分割。理论上来说，这样做效果要好于单阈值分割。

2. 参数解算的控制点是人工选取的。为了尽可能提高计算结果的精度以及实现自动化。可以使用基于直线段的参数解算。分别在 Lidar 影像和航空影像提取直线端，在初始影像参数条件下，由 Lidar 直线段在航空影像上的投影寻找同名直线，以 Lidar 线段端点和搜索到的同名直线段端点作为控制点和像控制点参与解算。然后在用解算后的参数作为初始参数重新参与计算。如此反复，直到参数变化小于某一残差为止。

3. 单张航空影像所能提供的轮廓信息有限，在轮廓提取的处理中可以使用序列影像同时处理，确保结果的正确性，可靠性。

## 参考文献

- [1] 张剑清、张祖勋编著. 数字摄影测量学. 武汉测绘科技大学出版社 1994
- [2] 章毓晋著. 图像分割. 科学出版社 2001
- [3] 宁津生 陈俊勇 李德仁 刘经南 张祖勋 编著 测绘学概论. 武汉大学出版社 2004
- [4] 龚健雅 编著 地理信息系统基础 科学出版社 2002
- [5] 李德仁 周月琴 金为铄 著 摄影测量与遥感概论 测绘出版社 2001
- [6] Milan Sonka 著 艾海舟 武勃译 图像处理分析与机器视觉 人民邮电出版社 2003
- [7] 陈建春编 Visual C++开发GIS系统(第二版) 电子工业出版社 2004
- [8] 李兰友 王学彬 编著 C#图像处理程序设计实例 国防工业出版社 2003
- [9] 何斌 马天予 王运坚 朱红莲 编著 Visual C++数字图像处理(第二版) 人民邮电出版社 2002
- [10] 孙家广 等编著 计算机图形学 清华大学出版社 2002
- [11] 王润生编著. 图象理解. 国防科技大学出版社 1994
- [12] 王清辉 王彪 编著 Visual C++CAD应用程序开发技术 机械工业出版社 2003
- [13] 金为铄 杨先宏 邵鸿潮 崔仁谕 编著 摄影测量学 武汉测绘科技大学出版社 1999
- [14] 郑南宁. 计算机视觉与模式识别. 1998, 国防工业出版社
- [15] 龚健雅, 夏宗国. 矢量与栅格集成的三维数据模型. 武汉测绘科技大学学报, 1997, 22(1):7-15.
- [16] 胡翔云, 张祖勋, 张剑清. 航空影像上线状地物的半自动提取. 中国图象图形学报, 2002, 7(2):137-140.
- [17] 李青元. 三维矢量结构GIS拓扑关系研究. 中国矿业大学博士论文, 1996.
- [18] 李志林, 朱庆. 数字高程模型. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2000
- [19] 孙敏, 陈军. 基于几何元素的三维景观实体建模研究. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(3):233-237.
- [20] 张祖勋, 吴军, 张剑清. 建筑场景三维重建中影像方位元素的获取方法. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(3):265-300.
- [21] 张祖勋, 张剑清, 张世兴. 单像房屋三维重建. 2000 年两岸自动化数字工程测量研讨会论文集, 2001:112-118.
- [22] A. Lin and R. Nevatia. Building Detection and Description from a Single Intensity Image. Computer Vision and Image Understanding, 1998. 72, no. 2, pp. 101-121, Nov. 1998.
- [23] Ildiko SUVEG, George VOSELMAN, al. 3D RECONSTRUCTION OF BUILDING MODELS, IAPRS, Vol, XXXIII, Amsterdam, 2000.
- [24] Aparajithan Sampath, Jie Shan, al. URBAN MODELING ON SEGMENTATION AND REGULARIZATION OF AIRBORNE LIDAR POINT CLOUDS, Istanbul ISPRS 2004, Commission III, WG III/3.
- [25] Dengfei Zhang, Zuxun Construction 3D Urban Model From LIDAR and Image Sequence 2004 XXth ISPRS Congress, 12-23 July 2004 Istanbul, Turkey.

[26]A. Almansa, F. CA0. Interpolation of Digital Elevation Models Using AMLE and Related Methods. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(2).

[27]A Gruen, Xinhua Wang. CC-Modeler: A Topology Generator for 3D City Models. ISPRS Journal ofPhotogrammetry and Remote Sensing, 1998, 53(5).

# 致 谢

在论文完成之际，我衷心感谢我的导师张祖勋教授、张剑清教授三年来对我学业上的教导和生活上的关怀。导师以丰富的学科知识和严谨认真的科学研究态度，带领我走入了摄影测量与遥感这一神奇而富有挑战的领域。导师开阔的思路和虚怀若谷的品格都将使我终生受益。在我的论文选题和研究过程中，导师付出了艰辛的努力，给予我悉心的指导和教诲。导师渊博的知识和严谨治学的态度永远是我学习的榜样。这三年学习经历将是我一生中享用不尽的宝贵财富。

在这里，还要感谢博士生邓非师兄，感谢他这两年来对我的帮助和支持。同时也要感谢实验室宋慰林老师，刘明老师，是他们为我提供了宽松的学习环境。感谢学友王文龙，刘智华，胡祺，雷迪，管海燕，这三年以来我们互相学习，互相帮助，共同进步。感谢室友马江风，周亚林，胡克伟，共同度过了美好充实的学习时光。

感谢实验室师长、学友们的帮助与鼓励，使我在这里度过了一段非常愉快的时光，同时感谢所有关心和帮助过我的老师、同学、朋友。

最后，衷心感谢我的亲人们对我长期以来的关心和支持。他们的理解和祝福是我不断前进的恒久动力。

张栋

二〇〇五年四月