武汉大学

硕士学位论文

LIDAR数据中多层次、多直角房屋的三维重建

姓名：阎平

申请学位级别：硕士

专业：摄影测量与遥感

指导教师：江万寿

20050501

摘 要

三维重建是测量的重要研究内容之一，传统的空间数据获取方式由于受到诸多限制而日益不能满足三维重建的需要，利用新的空间数据获取方式成为必然的选择。LIDAR(Light Detection And Ranging)数据凭借其内在优良的三维属性，在三维重建中扮演着日益重要的角色。

本文主要研究由 LIDAR 数据所生成的 DSM（数字表面模型）自动重建房屋。

在重建的过程中尽量考虑了房屋层次结构的特点，在对多层次，多直角房屋的重建上做出了一定贡献。房屋屋顶十分复杂，无法用一个通用的模型来描述所有形式的屋顶，本文主要重建最常见的两种屋顶形式：平顶和人字型屋顶。重建的房屋平面形状和屋顶形状都尽可能的符合实际情况。为了提高重建的效率与稳健性，本文将区域分割和等高线跟踪算法结合起来获取处理兴趣区域，使得处理局部化。

本文主要的研究内容和贡献如下：

1) 将等高线作为联系 DSM 和房屋模型的桥梁

等高线反映了房屋每一层次的高程信息，对不同层次的等高线进行处理使得对多层次房屋的重建成为可能；等高线跟踪同时获得了多层次房屋中每一层次的封闭轮廓，为重建提供了基本的处理单元；等高线是封闭的,既避免了对零散的边缘进行编组的难题，又获得一个封闭的兴趣区域。对该封闭区域进行统计分析，可以选择适当的重建模型，这解决了处理局部化这一关键问题，提高了重建的效率与稳健性。

2) 将最小二乘平差模型作为规格化房屋平面形状的工具

现实世界中的房屋是经过精心设计并建造的，绝大部分房屋的邻接墙面之间都满足直角正交的条件，房屋轮廓常表现为多直角形式。本文利用最小二乘平差模型，附加垂直、平行、独立点位等一些条件对获取的房屋各层次轮廓线进行平差，确定房屋角点的精确位置，以此完成多直角房屋的重建。

3) 将统计分析兴趣区域内的法向量的方向作为确定房屋类型并重建屋顶的手段

通过对区域内法向量的方向进行分析，自动判断屋顶的类型。若是人字型屋顶，利用分析所得的峰值方向提取人字型屋顶的两个坡面，通过坡面相交获取屋脊线，通过坡面和竖直墙面相交获取屋顶点和屋檐高，以完成屋顶重建。

4) 将三角网作为重建屋顶的工具

充分利用三角网对面片表现的优势，通过三角网的循环剖分获取屋顶的各个特征点（屋顶点，屋脊线上一些点），利用特征点构三角网，用三角面片来表示屋顶。

5) 使用一些实用、简单的测度作为区分房屋与“假”房屋的准则

仅由 LIDAR 数据中重建房屋可利用的推理线索主要是几何信息，一些“假”房屋区域（如：树木，车辆等）在 DSM 中由于高出地面也会被当作房屋被检测出来。在房屋重建过程中采取一些简单有效的准则：尺寸、形状、面积周长的比率、高度等可将房屋和其他“假”房屋区域分离开。

实验表明，本文阐述的方法对于从由 LIDAR 数据所生成 DSM 自动提取，重建多层次，多直角房屋是行之有效的。

关键词: LIDAR，三维重建，多层次，多直角，等高线跟踪，处理局部化，最小二乘平差

Abstract

3D-reconstructing is an important part of survey. In fact, traditional ways of acquiring the space data have lots of inherited shortcomings, so they can not adapt to the demand of 3D-reconstrucingt increasely. Finding a new method of acquiring space data is necessary. The data of LIDAR(Light Detect And Ranging),which has inborn 3D property, is making a more and more important pole in 3D-reconstruction.

In this paper, make a focus on reconstructing multi-orthogonal and hierarchical buildings from the DSM derived from LIDAR.

During the progress, hierarchy and structure of buildings are taken into account and some contribution are made on reconstructing the multi-orthogonal and hierarchical buildings. Because the roofs of buildings is very complex, they can not be described by a general model. nd the flat roof and gable roof are the most popular types ,which are the models adopted in this paper. In order to improve the efficiency and robustness of reconstructing, how to find proper way to deal with local data(finding of ROI) is important.

The contents and contribution of this paper just as followed:

1) **Regarding the contour as the bridge between DSM and the model of buildings**

In this paper, regard the contour as the bridge between DSM and the model of buildings, The contour ,which describe the figure of buildings in every hierarchy of buildings and afford the elements to reconstruct, indicates the altitude of buildings in every level ,so it is possible to reconstruct the multi-hierarchical buildings. For a complete buildings, contour is enclosed ,which avoid grouping the scatted edges and get an enclosed area of interest, so the problem of localization is resolved and improve the efficiency and robustness.

2) **Use the mode of LS as the tool for normalizing the shape of buildings' plane.**

In reality, the buildings are deliberately designed and built,so the adjacent angle of neighbour edges are orthogonal in many cases. In this paper, By means of the model of LS adjusting and additional conditions such verticality , parallelity and dependent point so on, adjust the figures of building at every level ,and exactly locate the corners of building,then accomplish reconstruction of orthogonal buildings.

3)**Chose the building's modle through analyzing the normal' direction in ROI**

Through the normal's direction, the model of building is automatically chosed . If it is gable , extract the two slopes according to the peak of directions; extract the ridge of house by intersecting slopes; acquire the height and vertexes of house by intersecting slope and vertical wall.

4) **Adopt TIN to reconstruct the roof**

Because TIN can perfectly describe patches, feature points(such as vertex, and some points of ridge) are extracted and used to construct TIN , then the roof is described by the patches.

5) **Make use of some simple measures for filter "false " buildings**

The clues in LIDAR are mainly geometric information .Some "false" buildings(such as trees and cars) may be regarded as buildings because they are above the ground. So some measures such as: size ,shape ,area ,ratio of area and circumference,elevation are adopted to filter the "false" buildings.

The experiment shows the method of automatically extracting multi-orthogonal and hierarchical houses from the DSM,which is depicted in this paper, is effective.

Key word: LIDAR，3D Reconstruction，Contour Tracing，ROI，Least Square Refine

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，否则,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）：阎平

2005年 5月 30日

第一章 绪论

§1.1 论文选题的意义

三维城市模型在城市设计、通讯产业、土地管理、交通、电力、城市管网、水利、消防等各行各业中的需求日益增长。传统的GIS由于缺乏高程信息，已经越来越不能满足应用的需要。因此，利用多种数据源，建立三维城市模型具有重要的现实意义。

城市房屋的三维重建与可视化是建立真实三维城市景观的重点和难点。城市三维重建需要大量的三维空间数据。数据的精度（accuracy）、细节（detail）和现势性与覆盖范围（up-to-dateness and coverage of the underlying databases）都是至关重要的。

从经济性、适用性出发，城市三维重建研究的主要目标是：花费最小的人力、物力获取足够细节和精度的三维模型。为此，寻求精确、快速、可靠的数据获取和处理技术一直是测绘等部门努力的方向。

最初，三维空间数据获取依靠人工地面测绘。这种方法获取的数据虽然精确，但其不足也是十分明显的（Claus Brenner，2002）。：

1）数据获取的自动化程度很低，数据获取的工作量极大。如一个德国城市模型的生产和维护单位获得了大约30.0km^{2}的城市建模任务，他们依靠人工来数字化每个点（房屋的少数点可采用摄影测量技术）。可以想象，获取这些数据不仅是一份庞杂的工程，而且其维护的费用将远远超过其他各项费用（据统计，这项费用将占到总费用的70%以上）；

2）缺乏自动化的系统来融合多源地球空间数据。三维空间的导航系统要求将二维道路网、数字地面模型和城市三维模型融合到一起。很难想象单个数据生产厂商可以获取和更新这么多的数据。因此，高自动化程度的数据融合处理系统成为行业必需。

数字摄影测量的发展为三维城市数据的获取提供了较为经济快捷的方法，它取代了大量的人工量测工作。目前，航空摄影测量已经成为获取三维空间数据的主要方式之一。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，使得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。因此，数字测图还是一件十分繁重的工作。

近十年来，为了弥补摄影测量方法的不足，人们开始研制主动信息获取技术。LIDAR作为一种主动式的信息获取技术，已经取得了很大的发展并日益得到重视。

LIDAR（Light Detection And Ranging）是激光技术、计算机技术、全球定位系统（GPS）和惯性导航系统（INS）迅速发展的集中体现。相对于传统的空间数据获取方式（如：人工量测和摄影测量）LIDAR 技术的优越性简要概括如下（张小红，2002）：

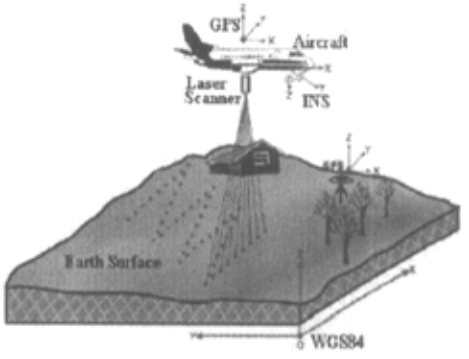


图 1.1.1 机载激光扫描系统

1) LIDAR 系统是一种主动式的测量系统；
2) 激光脉冲信号能部分地穿透植被，能快速、高精度和高空间分辨率地绘制森林或山区的真实地形图；
3) 不需要大量的地面控制点，且速度快，半天就能完成 1000km^2 区域的地形数据采集（Baltsavias，1999）；
4) 作业周期快，能适应三维数据的更新速度；
5) 时效性强，可以全天候提取测区的 DEM 数据；
6) 可以将信息获取、信息处理及应用技术纳入同一系统之中，更有利于提高自动化及高速化程度。
7) LIDAR 数据固有的三维属性避免了在数字摄影测量中采用影像匹配技术可能会产生的误匹配，生成的 DSM 更加精确可靠。
8) 由 LIDAR 数据快速生成 DSM，避免了数字摄影测量中影像匹配、前方交会、内插等步骤，具有实时应用的潜力。

LIDAR 以其快速、精确、直接获取三维信息的特点，在城市三维建模中扮演着日益重要的角色。研究并开发从 LIDAR 数据中自动重建城市三维模型的算法和软件系统，可以提高三维城市建模的效率，满足各行业对城市三维数据的需要。

1.2 国内外研究现状

相对于激光测距硬件技术的迅速发展，数据处理和应用的研究却相对滞后，这突出体现在目前国际上还没有一套系统完整和稳健的激光测距数据处理软件（张小红，2002）。

由 LIDAR 数据所生成的 DSM 中包含了大量关于房屋的三维信息，它们提供了许多可供推理的线索，为房屋的三维重建带来很大的便利。但是由于地物的多样性、复杂性，从 DSM 数据重建三维房屋仍然具有许多困难。主要表现为：(YongHu，2003)

1) 房屋通常是一些包括较为复杂的层次结构和高程变化，并且相对比较零散的部分；房屋的平面形状多变，屋顶形式也各式各样。如何重建房屋结构，比较真实的描述房屋形状是重建需要面对的主要问题之一。
2) 房屋可能位于任何位置，并可能会被其他一些在强度上有相似辐射特性的物体所包围，比如道路等；因为不规则的采样模式，数据的几何分辨率会受到限制；在一些植物密集的地区，一些较高的树木可能会遮挡部分房屋或者是屋顶。这些给房屋的识别带来很大困难。
3) 对于较大数据量的 LIDAR 数据，全局处理显然不太现实，需要将房屋分离开来，对每个独立的房屋区域进行分析、重建。如何将处理局部化，获取处理兴趣区域是一个大问题，也是处理成败的关键(C. Baillard ，1999)。

在过去的十年内，有的研究人员将 LIDAR 数据和其他数据源结合起来，充分利用其他数据源的数据特性和 LIDAR 数据本身的特点，采用各种方法来克服以上困难完成重建工作，并取得了一些成果。一些研究人员将重点放在利用仅由 LIDAR 数据所生成的 DSM 建模，这些方法主要是利用房屋的几何特性，一般将建模分成两步(YongHu，2003)：房屋的检测与重建。房屋的检测主要基于如下认识：房屋通常都比地表面要高，并且房屋有一定规则的形状，在检测的过程中使用一些具体的准则将房屋和其他地物分离。

George Vosselman 和 Sander Dijkman 结合城市的地面规划设计图和从机载激光扫描仪所获得到的点云来重建三维建筑物模型（George Vosselman，2001），其中屋顶的表面的高程和方向通过扩展到 3D 空间的 HOUGH 变换来较准确的获得。屋顶的轮廓线比较难以确定，因此采用城市地面规划设计图来获得精确的建筑物墙面的位置。通过将检测出来的屋顶的位置和墙面相交，就可以重建一些屋顶的边界。其他的边界通过相邻屋顶平面的相交和从点云中检测到的屋脊线来得到。采用规划设计图降低了处理的难度，基本上不需要考虑处理工作局部化的问题，因为规划图已经提供了关于独立的房屋的平面二维矢量的较精确描述，房屋的边界等都已经获得，回避了检测房屋区域的难题，但是这对数据的获取提出了更高的要求，对新建房屋也无法处理。

Hans-Gerd Maas 和 George Vosselman 使用 Delaunay 三角网从 LIDAR 数据的点云中重建房屋（George Vosselman，1999）。他们首先采用 HOUGH 变换提取房屋各平面，然后对各平面内的点做出 Delaunay 三角网，计算平面面积，当该面积大于某一阈值时才采纳此平面为真实的房屋平面，否则剔除此平面，从而提取出房屋的真实平面。在对平

面做出 Delaunay 三角网后，找到该平面的外边缘轮廓线的各边，然后再调整各边的端点，使直线拟合的残差最小，由此找到房屋的外边缘轮廓线。然后对每两个平面都进行相交运算，并找到相邻平面的交线段，由平面交线和外轮廓线构成房屋屋顶结构，重建出房屋。这是一种数据驱动的建模方式，对数据质量要求较高。另外，从全局数据中进行 HOUGH 变换提取房屋各平面耗费的时间和计算量是十分可观的，当数据量较大时，成功几乎不可想象。

Morgan 和 Tempeli，研究了从 LIDAR 数据生成的 DSM 中重建房屋的方法(Morgan，2000)。整个处理是从将激光扫描仪获得的不规则高程点内插成规则格网开始的。建筑物检测的主要方法是采用数学形态学的操作将房屋区域和地表面分开。为了获得建筑物的矢量描述方式，对于整块的屋顶表面通过将建筑物区域进一步分割成各个小区域来获得。建筑物的每个表面的三维几何特性通过基于最小二乘的平面拟合而获得。房屋的重建是基于屋顶平面之间的连接性来完成的。屋顶重建需要提取基本图元并进行平面的交会。在检测和提取的过程中都需要用到建筑物和地形的大量的先验知识，计算量极大，过程繁琐且稳健性较差。

日本东京大学土木工程系的郭滔博士将 IKONOS 影像和机载激光扫描数据结合起来进行大规模的城市三维建模（GuoTao，2003）。他将光谱信息和高程信息结合起来进行地物的分割，通过将从 IKONOS 影像和 DSM 中所获得的多重线索融合起来进行推理，采用一种分层的方式检测出建筑物潜在的包含区域，然后采用边缘提取，直线拟合，参数空间统计等手段以获取房屋的层次、主方向、尺寸、位置等信息，重建出多层次的建筑物模型。在该处理过程中，需要利用主方向来对提取出来的各边缘进行编组，以组成独立的房屋，只能重建屋顶为平顶的房屋。

加拿大Calgery大学的胡勇博士提出了一个数据驱动、自动重建建筑物的边界的流程（YongHu，2003）。重建的边界一般是矩形，正方形和规则多边形。他首先通过一个先验的高程值来二值化DSM，从而将高于地面的部分从DSM中分割出来，获取分割后的每个备选房屋区域的边界，然后通过对边界的形状通过一个度量来分类，从而检测出可靠的建筑物边界。其次，在对建筑物边界进行确认并进行精化后，采用约束搜索、增强的HOUGH变换和连续连接技术以得到建筑物边界，通过统计方法将建筑物屋顶分成平顶和非平顶。最后，通过一种可选的精化技术重建非平顶房屋并通过垂直墙面约束纠正房屋墙面。其重建的房屋一般为独立的单层次的简单房屋，对于多层次的房屋无能为力。

在国内，从 LIDAR 数据中进行三维重建的研究开展的稍迟一些，但近年来已经成为研究的热点，并且取得了一定的成就。

中国科学院遥感应用研究所的尤红建等人从国内自行研制的机载激光扫描仪所获

得的数据中，生成数字表面模型，并从中自动提取建筑物，取得了很多成果（尤红建，2001, 2002）。主要工作是：初步完成了直接应用激光采样点的原始三维位置来提取建筑物的方法，通过 DSM 影像的分割、边缘提取，边缘跟踪等步骤以准确提取建筑物的边缘轮廓线。应用多边形逼近、方位角分组、确定建筑物主方向、边缘线段的规格化等算法有效地对建筑物的粗略边缘线进行规格化处理，获得简单的直角规则建筑物。该方法没有考虑多层次，不规则的房屋，对屋顶的形状也几乎不予考虑。

武汉大学的张小红的博士论文（张小红，2002）较详细地研究了激光测距数据的分类和规则房屋提取的方法。分类算法充分利用激光测距数据的强度信息，融合高程和强度信息进行数据分类和分割，利用多次回波激光数据进行数据分类有效地将植被提取出来，为分割相互毗邻的房屋和树提供了一种有效的途径。文中提出了基于分类分割后的原始激光脚点数据提取规则房屋的方法。该方法主要针对规则房屋的重建，无需内插，房屋边界定位较为准确，但是尚未顾及不规则，多层次，多直角房屋的重建，并且对于数据质量要求较高。

武汉大学的季铮在其硕士论文中（季铮，2003），将 IKONOS 影像和 LIDAR 数据结合起来进行房屋的三维重建。在 LIDAR 数据中利用区域增长的方法确定出目标区域，使用链码跟踪获得区域的边界，并用多边形逼近的方法获得近似的矢量边界，对于简单矩形房屋利用直角关系进行边界规定化。利用该方法重建出来的房屋为简单规则的平顶房屋，对多直角，多层次的房屋没有进行过多考虑。

以上列举的研究往往仅对特定的数据和某些特定的地区适用，很多方法在重建的过程中结合了许多特定的先验知识，如：本地区的最低房屋高度，房屋主方向等。基本没有哪一种方法能将实际房屋的结构，层次，具体形状等全部兼顾，目前也还没有一种通用的方法适合于所有情况和所有地区的三维重建(YongHu，2003)。

§1.3 本文的研究路线及主要内容

正如上节所述，房屋的重建应当尽可能地考虑房屋的层次结构特点，并使其平面形状和屋顶形状更加符合实际情况；为了提高重建的效率与稳健性，需要寻找适当的方法使得处理局部化，兴趣区的获取是房屋重建的关键问题之一；在房屋的检测过程中也需要采取一定措施将房屋和其他非房屋区域分离开。以上种种要求，有些和数据的质量的联系极为密切，在重建过程中通过算法的设计可能无法面面俱到，但是它们应该成为一些基本准则，在设计算法时应尽量被考虑到。

本文的研究的目标为：仅从由 LIDAR 数据所生成的较高精度的 DSM 出发，尽可能的兼顾上述要求，自动重建出多层次多直角的房屋，房屋模型主要为平顶房屋与人字型

房屋。

§1.3.1 技术路线

本文的主要技术路线是将数据驱动与模型驱动的方法结合起来，从现实世界的本质出发，采用几何空间推理、影像理解、测量平差、参数估计等手段，重建有代表性的几种建筑物(主要包括多直角、多层次平顶房屋，人字型房屋)。具体策略如下：

- 处理工作的局部化是影响重建成败的关键问题之一。针对 DSM 中房屋轮廓的封闭性和凸出性，本文采用等高线跟踪的方法来获得处理的兴趣区域,同时获得多层次房屋每一层次的轮廓。
- 通过对兴趣区域内法向量的统计分析来确定房屋类型。
- 充分利用三角网对面片表现的优势，采用三角网的循环剖分简洁高效的重建屋顶。
- 通过采用最小二乘模型进行平差以确定多层次多直角房屋墙面的精确位置。

§1.3.2 本文的主要工作:

本文主要完成的工作及章节安排如下：

(1)DSM 数据的预处理，将在第二章中具体叙述

- DSM 数据的高分辨率内插
- DSM 数据的抑噪（平滑）
- 地形表面(DTM)的生成

(2)影像的分割

- 地表突出物与地表的分割。通过基于 MeanShift 的影像分割算法，对 DSM 影像进行分割。利用 DSM 中房屋区域在高程上存在的一致性，将高出地面的区域与地表分割开来，得到潜在房屋存在区域
- 房屋与其他地物的区分。如何自动将高出地面的房屋与其他地物分割开来，是研究中较为棘手的问题，也是影响成败的关键。寻找各种实用规则，将检测出来的其他地物与房屋分离开来

(3)房屋轮廓线的获取

- 房屋轮廓线的跟踪。顾及多层房屋结构，采用等高线跟踪的算法获取房屋各层轮廓线，并得到封闭的处理兴趣区域
- 轮廓线提取中噪声的去除

以上两部分内容将在第三章进行具体的阐述

(4)获取边缘，拟合直线段

- 轮廓线的分割
- 直线段拟合
- 直线段的分裂与合并

(5)房屋边缘的规格化

- 附加垂直平行条件的轮廓线平差

以上两部分内容将在第四章进行具体的阐述

(6)房屋屋顶的重建，该部分内容将在第五章中进行具体的阐述

- 重建模型的选择
- 平面的提取与拟合
- 屋脊线的获取
- 三角网循环剖分构建屋顶

(7)三维可视化

- 重建房屋的三维可视化

整个处理过程的框图如下所示：

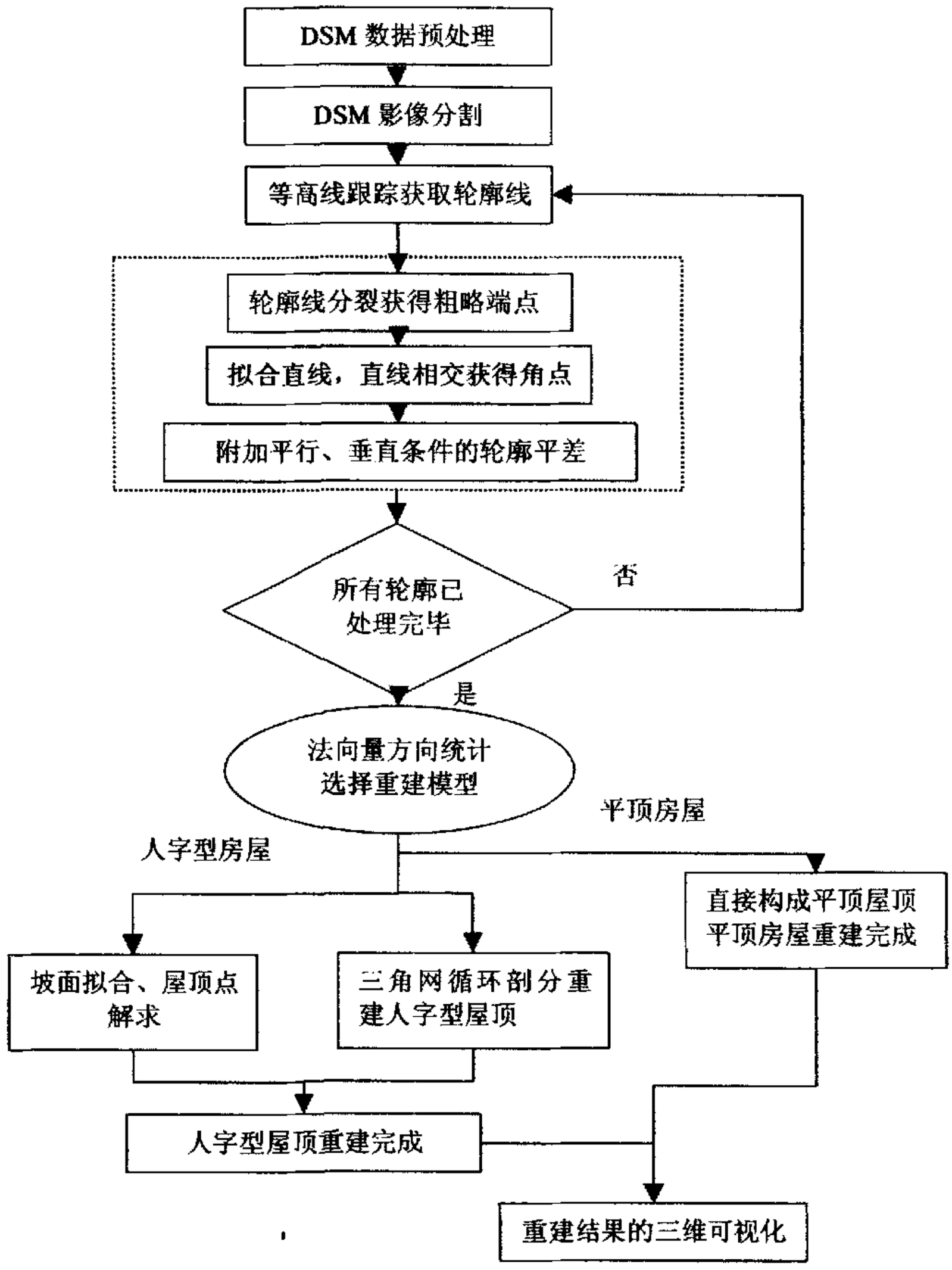


图 1.3.1 本文的处理流程图

第二章 DSM 数据预处理

由 LIDAR 数据生成的 DSM 由于存在噪声点及一些孤立的微小物体，例如：车辆、输电杆塔、孤立的树木等，使得物体表面杂乱无章，这给从而给目标的识别、提取带来了较大影响。对于参数估计，平面拟合而言，这可能影响拟合精度，增大估计的偏差，因此需要对 DSM 数据进行平滑。对于低空间分辨率的 DSM 而言，一些局部特征（如边缘直线）可能难以被正确地估计。提高 DSM 的空间分辨率，可以使得参数估计，平差处理等过程中得到的观测值更加地准确，从而提高重建结果的精细程度。从 DSM 中提取出地形表面是 LIADR 数据的主要应用之一。最初研发 LIDAR 系统的主要动机和重要应用就是获取森林地区 DTM/DEM，提取出地形表面后，可以将地面点从 DSM 中分离开，为房屋的识别提供了一种途径。因此，本文首先对 DSM 数据进行预处理，主要包括从对 DSM 数据进行平滑处理以抑止噪声、内插 DSM 生成较高分辨率的 DSM、从 DSM 中提取出地形表面。

§2.1 DSM 数据的平滑（滤波）

数据的平滑通常采用一些低通滤波器对数据进行滤波。常用的滤波算法有中值滤波、均值滤波、高斯滤波、SUSAN(Smoothing over Univalue Segment Assimilating Nucleus)（Stephen M，1997）滤波等。这些滤波方法对 DSM 进行整体平滑，并没有考虑保持物体的完整结构。

房屋的三维重建要求在平滑物体表面的同时保持房屋的完整结构。为此本文采用了一种改进型的 SUSAN 滤波器，即“中值 SUSAN 滤波器”【34】。 中值 SUSAN 滤波器使用非线性的滤波来定义影像的哪些部分是和每个独立的像素密切联系的；每个像素都有一个和它的亮度相似的局部的影像区域与之相联系。新的特征探测器会使得这个局部的区域最小并且在抑止噪声时使用这些区域作为滤波邻域。

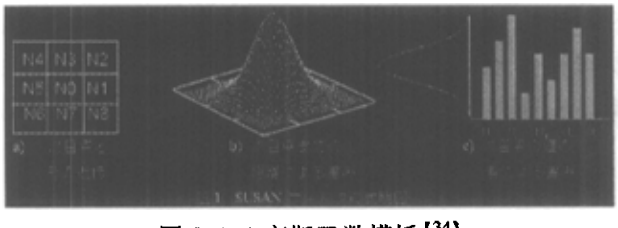


图 2. 1. 1 高斯函数模板[34]

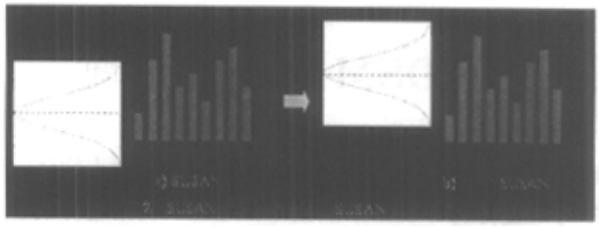


图 2.2.2 SUSAN 滤波与中值 SUSAN 滤波[34]

中值 SUSAN 滤波器的具体实现过程如下：

使用一个 S×S 的窗口，在原始影像上逐个像素做卷积。目标影像上对应像素的灰度值由下式计算而得：

$$g(i,j)=\frac{\sum_{k=-S}^{S}\sum_{l=-S}^{S}\exp(-\frac{k^2+l^2}{2\sigma^2})\exp(-\frac{(f(i-k,j-l)-f_m(i,j))^2}{2T^2})f(i-k,j-l)}{\sum_{k=-S}^{S}\sum_{l=-S}^{S}\exp(-\frac{k^2+l^2}{2\sigma^2})\exp(-\frac{(f(i-k,j-l)-f_m(i,j))^2}{2T^2})} \quad (2.1.1)$$

其中：$f_m(i,j)=median(f(i-k,j-l)),k=-S,.....,S;l=-S,.....,S$

f (i, j) 为原始影像上的像素值 ，

g (i, j) 与之对应的处理后的目标影像上的像素值，

S 是用于计算的窗口区域的尺寸，

T 为原始的 SUSAN 滤波器中的阈值，

f_m (i, j)是像素 f（i，j）S×S 邻域中的像素值的中值，

median 为中值滤波器。

此算法的目的是使用尽可能多的“合适”邻域来计算平均值，而不包括其他不相关区域，因此影像上房屋区域的结构将得以保留。

图 2.1.3 是原始的 DSM 影像数据，从透视图中可以看出，由于地面上的汽车，低矮灌木，房屋屋顶上的天线，烟囱等物及数据中本身的噪声的存在，会增加重建错误出现的几率。图 2.1.4 是对 DSM 数据进行 SUSAN 滤波以后的结果，从其透视图中可以看出，一些非房屋区域被平滑掉了，突出的天线等物也被滤除，但是房屋的整体结构也被平滑，遭到一定程度的破坏。图 2.1.5 是对 DSM 数据使用中值 SUSAN 滤波器滤波以后的结果，从透视图中可以看到，在一些噪声被滤除的同时，房屋结构得到了很好的保持。

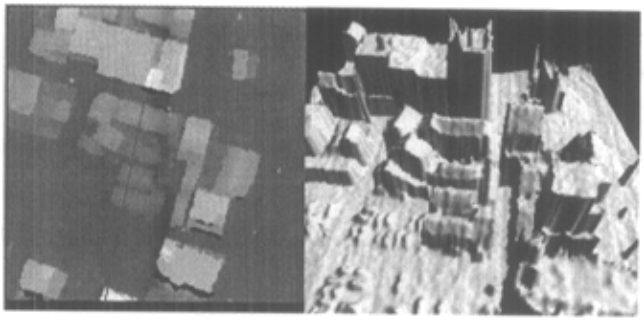


图 2.1.3 原始 DSM 影像及三维透视图

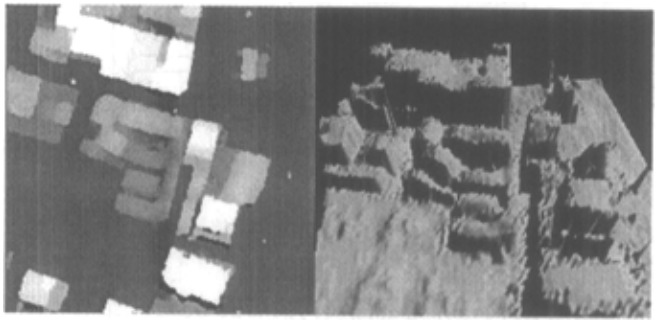


图 2.1.4 使用 SUSAN 滤波的 DSM 影像及三维透视图

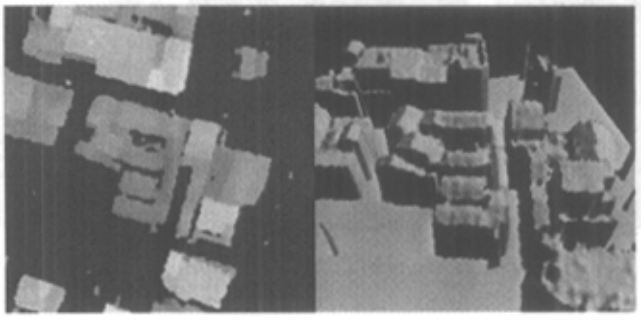


图 2.1.5 使用中值 SUSAN 滤波的 DSM 影像及三维透视图

§2.2 DSM 重采样提高分辨率

虽然 DSM 的空间分辨率从本质上说是由生成 DSM 的 LIDAR 数据中激光角点的密度所决定的，但是对于已经存在的 DSM，可以通过重采样来提高 DSM 格网点的密度以达到提高 DSM 空间分辨率的目的。

对于新的 DSM 中的不同位置的点，使用不同的点位对其进行内插。根据不同的点位，将主要处理步骤分为两步：

1. 目标 DSM 中的新格网点（2i，2j）的高程由原始 DSM 中的格网点（i，j）直接重采样而得，即将目标 DSM 中格网点（2i，2j）的高程值直接赋为原始 DSM 中格网点（i，j）的高程值。
2. 目标 DSM 中新的格网点 (2i+1,2j+1)的高程通过将上一节中的中值 SUSAN 滤波器作用于新格网点 (2i, 2j), (2i+2,2j), (2i, 2j+2), (2i+2,2j+2)而获得，经过第一步以后，(2i, 2j), (2i+2,2j), (2i, 2j+2), (2i+2,2j+2)点的高程已经被赋值。

新的格网点采样步骤如图 2. 2. 1 所示：

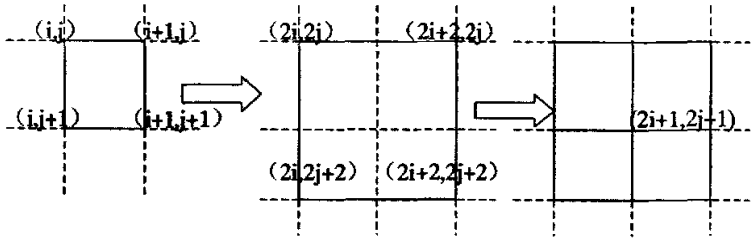


图 2. 2. 1 新的 DSM 格网点采样步骤

图 2.2.2 为原始 DSM 三维透视图及内插后的 DSM 三维透视图。

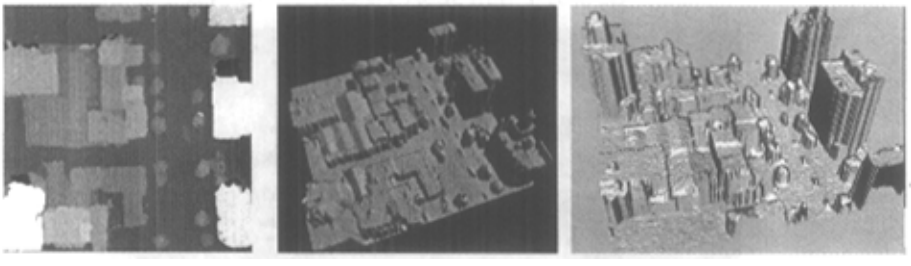


图 2. 2. 2 原始 DSM 影像，原始 DSM 三维透视图，内插后 DSM 三维透视图

§2. 3 从 DSM 数据中提取地形表面

一般来说，DSM 不仅包括了地形表面的高程信息，也包括一些非地形的物体，比如建筑物、树木、车辆和其他一些高出地面的目标。为了检测这些 3D 目标，地形起伏的影响应该被消除。通常可以使用一种数学形态学的滤镜来完成这种分割，以将地形表面与其他目标分离开来生成 DTM：$H = h \circ SE$ ，H 是地形表面的近似高程，h 是 DSM 的高程，SE 是结构元，o 为数学形态学操作。将结构元 SE 在整个 DSM 上移动执行开运算，在每一次移动中，开运算检测最低的像素和在结构元 SE 内的所有其他像素，按照

成为地形点的概率给这些被检测的像素赋权值，高程越低的点，权值将越大，通过将每一个点的高程和它的权值的乘积相加起来计算得到一个新的高程，并将这个新的高值赋给这个范围内的所有的点。执行开运算最主要的一点是确定结构元 SE 的尺寸。

一般而言，理想情况是根据 DSM 中地物的最大尺寸来选择 SE 的尺寸。但是存在的问题是当 SE 的尺寸变大了，所谓的“马赛克”效应将会增加，使得小的目标和细节被平滑掉了。一个较好的解决方案是使用一系列的从小到大的不同尺寸的结构元，这样可以补偿掉一些不必要的平滑。郭韬（GuoTao，2003）提出了一种方法：在对 DSM 进行开运算前先构造一个趋势面以降低盲目增加 SE 尺寸的必要性，并可以保持最多的细节。

另一种常见的方法是使用线性预测的方法从 LIDAR 数据中提取 DTM/DEM(Kraus and Pfeifer ,1998; Kraus and Pfeifer ,1997)，这是使用广泛、最为成功的一个算法。SCOP++软件包中有该算法的实现。这个算法在后来被学者多次改进；(Briese and Pfeifer, 2001)采用了由低精度到高精度的分层次处理方式；(Kraus and Pfeifer ,2001)对地形生成过程做了改进，通过模拟雨水在地面上流动分析出地形的顶点，通过消除顶点来获取更加平滑的地形。本文参照 SCOP++软件包中的 DTM 提取算法给出具体的实现：

首先选择 DSM 中的若干地面点构成一个粗糙的 DTM，具体的步骤是将 DTM 分成若干块，在每一块中选取高程值最低的点，使用这些点构成初始 DTM。然后计算出 DSM 中每个点的权值，权值的大小通过该点与上一步 DTM 面之间的距离而获得，权值大于一定限值的点被标记为地面点，否则被标记为非地面点。保留一定范围内的权值，不断地迭代计算，直到 DSM 中再找不到一点其权值大于一定限值时，所有的地面点都已经被标记，停止迭代得到最终结果。

图 2.3.1 是从多伦多市区的 DSM 中选出的一个实验区域，图 2.3.1（a）为该区域原始 DSM 的局部，图 2.2.8（b）为从中提取的地形表面。

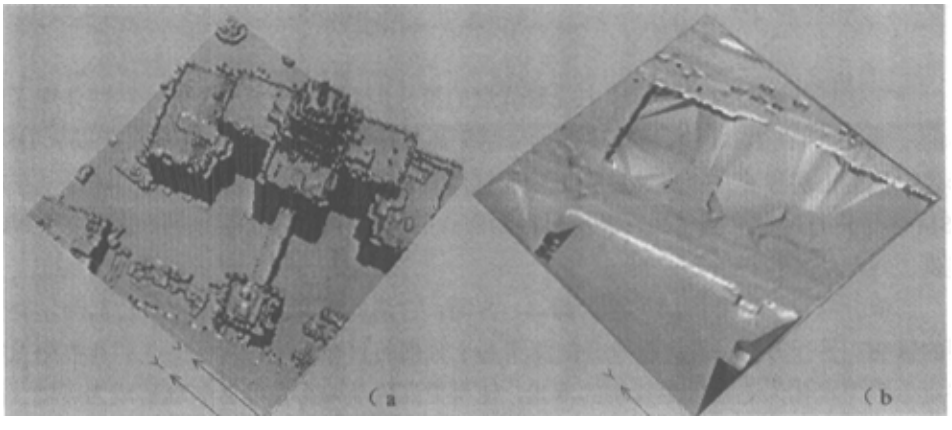


图 2.3.1 原始 DSM 与提取的地形表面

第三章 区域分割及轮廓获取

房屋在 DSM 中表现为高出地表面并呈一定规则形状的区域，它与周围区域有着较为明显的高差。从 DSM 中自动提取房屋的第一步是 DSM 分割，将 DSM 中存在房屋的不同区域分离开，获得独立的房屋存在区域。由于目前已经存在许多较为成熟的基于影像的分割算法，我们将 DSM 按照高程进行灰度量化，生成深度影像（ 本文称之为 DSM 影像），然后选择合适的影像分割算法对其进行分割。影像分割一般是基于区域灰度相似性的，对应到 DSM 中，分割后的同一区域在高程上表现为一致性，而不同的高程正体现了建筑物的层次信息，如果我们能够按照不同的高程获取房屋的轮廓线（即等高线），通过对不同高程所对应的等高线进行处理就可能完成多层次房屋的重建。另外，对于房屋的某一层次而言，等高线一定是封闭的，这就获得了一个完整的处理兴趣区域（ROI）。如前所述，获得处理的兴趣区域对于重建意义深远。兴趣区域可以减少或者避免编组的工作量，它可以减少可能的组合项，降低了错误发生的概率；通过对兴趣区域的处理能够选择一个合适的模型或者是对应的重建方法；能够通过对兴趣区域的信息进行量化以得到房屋模型化的描述(C. Baillard ,1999)。封闭的等高线也构成了房屋的完整轮廓线，直接对这个轮廓线进行处理，可以避免常见的一些处理方法中对提取出来的边缘进行编组的难题——编组的过程往往十分繁琐，也不能保证一定稳健。

基于以上考虑，本文将区域分割与等高线跟踪算法相结合，按照分割出的每个区域的平均高程跟踪轮廓线（等高线），将等高线作为联系 DSM 与房屋模型的桥梁。

§3.1 区域分割

通常影像特征提取是从影像中提取信息的第一步。区域作为一个特征往往体现了整体的一致性，而在 DSM 中，同一层次的房屋平面往往在高程上具有一致性，所以从 DSM 影像中检测出房屋存在区域的过程可以理解为将 DSM 影像进行区域分割的过程。在对 DSM 影像进行区域分割以后，就可以得到潜在的房屋存在区域,并为后面的更高线跟踪提供了跟踪的高程初值。

影像分割是影像分析的关键步骤。一方面，它是目标表达的基础，对特征测量有重要的影响。另一方面，因为影像分割及其基于分割的目标表达、特征提取和参数测量等将原始影像转化为更抽象更紧凑的形式，使得更高层次的影像分析和理解成为可能（贾云得，2000）。对影像的分割可基于相邻像素在像素方面的两个性质：不连续性和相似

性。区域内部的像素一般具有某种相似性，而在区域之间的边界上一般具有某种不连续性。分割算法据此分为利用区域间特性不连续性的基于边界的算法和利用区域内特性相似的基于区域的算法。另外，根据分割过程中处理策略的不同，分割算法又可分为并行算法和串行算法。

对于 DSM 影像而言，由于房屋在深度影像上表现为灰度相似的点的集合，一般采用基于区域灰度相似性的一些算法。常见的方法有区域生长、水线（Watershed）分割、基于四叉树或三角网的分裂合并算法（江万寿，2004）等。在本文中采用基于 MeanShift 的影像分割算法，对该方法的简单介绍如下。

§3.1.1 基于 MeanShift 的影像分割

均值平移（MeanShift）算法是一种有效的统计迭代算法（D. Comaniciu，1997，1999，2002, Yizong Cheng，1995），已经广泛应用于聚类分析、跟踪、影像分割、影像平滑、滤波、影像边缘提取和信息融合等方面。聚类分析的目的在于寻找到一个密度函数的局部极大值点， MeanShift 算法将每一个点“移动”到密度函数的局部极大值点。影像分割的过程可以看成一个聚类的过程，MeanShift 算法将相同区域内的所有点都快速收敛到聚类中心，如此就可以完成分割的过程。常见的 K 均值聚类在某种程度可以看作均值平移算法的特例。

§3.1.1.1 均值平移算法的基本概念

均值平移算法要用到卷积核及对卷积核进行一些基本操作。卷积核的定义如下：

用 X 表示一个 n 维欧氏空间 R^n 子空间，对于该空间的一个向量 x（$x \in X$），它的第 i 维分量用 x_i 表示，范数用 $\|x\|$ 表示，且 $\|x\|^2 = \sum_{i=1}^{n} |x_i|^2$。同理对于该空间的任意两个向量 x 和 y 的内积表示为 $< x, y >= \sum_{i=1}^{n} x_i y_i$，如果存在一个剖面函数 $K:[0,\infty] \to R$，那么定义一个从子空间 X 到空间 R 的映射函数 $K: X \to R$ 就被称为卷积核。常见的卷积核有平坦卷积核和高斯卷积核，它们的定义如式（3.1.1）与（3.1.2）：

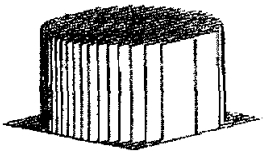
平坦卷积核：

$$F(x) = \begin{cases} 1 & \text{if} \|x\| \le 1 \\ 0 & \text{if} \|x\| > 1 \end{cases} \tag{3.1.1}$$

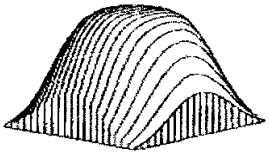
高斯卷积核：

$$G(x) = e^{-|x|^2} \tag{3.1.2}$$

图 3.1.1 所示 a 为平坦卷积核，b 为高斯卷积核。



a 平坦卷积核



b 高斯卷积核

图 3.1.1 卷积核示意图

用 X 表示一个 n 维欧氏空间 R^n 的子空间，令 S 表示一个有限数据集，且 $S \subset X$，K 表示卷积核，w 表示权重函数。以 X 中的任意一点 x 为中心，数据集 S 的样本均值（使用核函数 K）用式（3.1.3）表示：

$$m(x) = \frac{\sum_{s \in S} K(s-x)w(s)s}{\sum_{s \in S} K(s-x)w(s)} \tag{3.1.3}$$

那么 m(x) - x 就被称为**均值平移**（MeanShift）。如果用 m(x) 更新 x，并以新的 x 为中心重新计算均值，通过多次迭代，直到收敛，这个过程就称为**均值平移算法**。这一系列不断更新的 x 形成了一个通向聚类中心的路径（x->m(x)-> m(m(x))，…）。

§3.1.1.2 密度估计与 MeanShift 的关系

聚类实际上就是寻找一个密度估计函数的局部极大值点，核密度估计是应用最普遍的密度估计方法。假定密度估计采用的核函数 K 为多元正态核（这能满足大部分的应用），则著名的密度估计函数可由式（3.1.4）表示（D. Comaniciu, 2002）：

$$\tilde{f}_{h,K}(x) = \frac{c_{k,d}}{nh^d} \sum_{i=1}^{n} k\left(\left\| \frac{x - x_i}{h} \right\|^2 \right) \tag{3.1.4}$$

其中 $K(x) = (2\pi)^{-d/2} \exp\left(-\frac{1}{2}\|x\|^2\right) = (2\pi)^{-d/2} k\left(\|x\|^2\right)$，$k$ 是核函数 K 的剖面函数，d 为向量 x 的维数，h 是一个常数（带宽），$c_{k,d}$ 是一个与 k 与 d 有关的规范化常量。

求式（3.1.4）的梯度可得到密度函数的梯度估计，如式（3.1.5）：

$$\tilde{\nabla} f_{h,K}(x) = \nabla \tilde{f}_{h,K}(x) = \frac{2c_{k,d}}{nh^{d+2}} \sum_{i=1}^{n} (x - x_i) k'\left(\left\| \frac{x - x_i}{h} \right\|^2 \right) \tag{3.1.5}$$

定义如下函数：

$$g(x) = -k'(x) \tag{3.1.6}$$

如果将 g 作为剖面函数，则可以得到一个核函数：

$$G(x)=c_{g,d}\,g(\|x\|^2) \tag{3.1.7}$$

将 g 代入（3.1.5）可得：

$$\tilde{\nabla} f_{h,K}(x)=\tilde{f}_{h,G}(x)\frac{2c_{k,d}}{h^2 c_{g,d}}m_{h,G}(x) \tag{3.1.8}$$

其中：

$$m_{h,G}(x)=\frac{\sum_{i=1}^{n}x_i\,g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^{n}g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)}-x \tag{3.1.9}$$

显然，$m_{h,G}(x)$即为采用核 G 计算所得到的 MeanShift 向量（每个点等权）

由式（3.1.8）与式（3.1.9）可得：

$$m_{h,G}(x)=\frac{1}{2}h^2 c\frac{\tilde{\nabla} f_{h,K}(x)}{\tilde{f}_{h,G}(x)} \tag{3.1.10}$$

式（3.1.10）表明：在数据集中任一点使用高斯核 G 计算所得的 MeanShift 向量和由 G 的核影（Yizong Cheng，1995）K 得到的归一化的密度梯度估计是成比例关系的（归一化是通过除以在 x 上使用核 G 计算得到的密度估计得到的）。因此，MeanShift 向量总是指向密度增长最快的方向的（Yizong Cheng，1995）。这就意味着 MeanShift 算法的迭代过程就确定了一条通向一个密度估计函数上的局部极大值点的路径，而这个局部极大值点就成为一个最终的聚类中心。

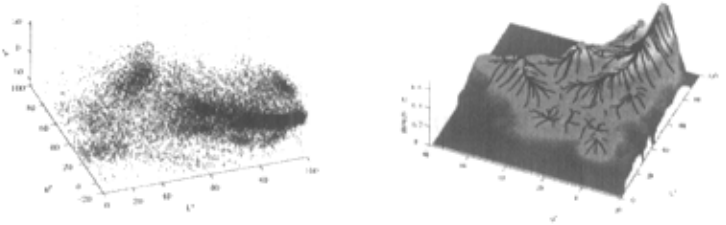
可以用图 3.1.2 来形象地说明均值平移聚类算法的处理过程。图 3.1.2（a）是一幅 400*276 像素大小的 RGB 彩色位图；然后将该图从 RGB 空间转换到 Lu*v*彩色空间，得到图 3.1.2（b）；然后再以 L，u*，v*三个分量构成的三维空间显示影像 3.1.2（b）的点密度分布图 3.1.2（c），最后采用均值平移聚类算法对图 3.1.2（c）的点进行聚类，得到聚类收敛示意图 3.1.2（d），其中图中的紫色点表示聚类后的聚类中心点，黑线表示聚类过程中，每个点向聚类中心收敛的路径。最终将 3.1.2（a）聚成 7 类。



a



b



c　　d

a：400*276 的彩色图；　　b：将图 a 转换到 Lu^*v^* 彩色空间；

c：相应的 Lu^*v^* 色彩空间的点密度分布图；　d：进行聚类时的收敛效果图

图 3.1.2 均值平移算法的收敛示意图

§3.1.1.3 基于 MeanShift 进行影像分割的步骤

设 x_i 和 z_i ，i = 1,....n，分别为输入的 d 维影像像素和在联合域中的点（将空间域 (x,y)和 L,U,V 色彩空间称为联合域）。$y_{i,j}$ 为第 j 次迭代计算出的样本均值(即 $m(x_i^j)$)。

(1). 将影像从 RGB 空间转换到 Lu^*v^* 彩色空间

(2). 使用一定的带宽构建空间域和色彩空间上的两个核函数 K_s,K_c，作为计算 MeanShift 向量的核函数

(3). 寻找每个象素的最终收敛位置(MeanShift 过程)

对每个象素依次进行如下操作：

●初始化：　$j=1$ 以及 $y_{i,1}=x_i$

●根据公式（3.1.3）计算 $y_{i,j+1}$ 直到收敛，此时 $y=y_{i,c}$

●设 $z_i=\{x_i^s, y_{i,c}^r\}$，其中 x_i^s 表示在空间域中的位置，　$y_{i,c}^r$ 对应 Lu^*v^* 空间中的信息。

(4). 划分类别

●在联合域中，将 z_i 彼此间的空间域距离小于 σ_s，Lu^*v^* 空间域距离小于 σ_r 的点形成集群 $\{C_p\}_{p=1,...m}$，集群个数为 p 个

●设定分割表，对于每个 $i=1,...,n$ 指定　$L_i=\{p|z_i \in c_p\}$，

●可选操作：将区域内点个数小于 M 的区域合并到包含它的区域中。

(5). 将影像从 Lu^*v^* 彩色空间转换到 RGB 空间，并输出。

§3.2 轮廓线的获取

房屋轮廓线的获取是从 DSM 中重建房屋最重要的一步，通常重建的基本处理单元就是构成房屋的轮廓线。获得了房屋各层次的轮廓，就可以重建房屋的各个结构，通过不同结构的组合就可以得到对房屋的完整描述。获取房屋轮廓线的方法主要有区域跟踪和边缘检测。

尤红建等人首先通过顾及影像均方差的自适应迭代阈值分割算法对 DSM 影像进行分割（尤红建，2001，2002），然后采用基于像素邻域的边界跟踪算法跟踪边界以获取房屋的轮廓线。由于该方法只是将一个个孤立的区域的边界点连接起来，即使是同一栋房屋，由于其不同的层次，不同的结构会被分割成不同的区域，因此所获得的轮廓线也无法反映完整的房屋信息，通常是一栋完整的房屋被分成各个零散的部分，被重建成不同的房屋。

郭韬将DSM和IKONOS影像结合起来进行房屋的三维重建（GuoTao，2003），通过边缘检测得到房屋的边缘,利用直线拟合以获得矢量化的边缘描述。然而提取出来的直线可能会是建筑物的边界，也可能是其他物体的边缘，比如噪声或者是树木等的边界。为了更进一步的将这些直线和建筑物边界区分开来需要进一步处理。处理的主要依据是根据建筑物之间存在几何约束，即相邻的建筑物的边缘一般是直线并构成正交的多边形。换句话说，如果一条直线段是建筑物的边界，它的方向一定是和建筑物的主方向是平行或者是垂直的。根据这个几何约束对直线进行编组，对直线进行编组的目的在于两个方面，一是尽量地消除不可靠的特征，另一个方面是为后期建筑物的确认提供支持。在这里阈值起到了重要的作用，太强的限制条件将减少细节，但是太松散的限制又会影响结构的组合。而且由于边缘提取本身的不完整，通过直线编组要构成完整房屋的轮廓也显的较为困难。

本文仅从 DSM 中提取并重建房屋，可供推理的线索较少，主要是利用几何信息（这里主要指的是高程信息）。主要依据是：房屋通常都比地表面要高，并且房屋有一定规则的形状(YongHu，2003)。高程作为一个几何不变量，有很好的统计特性，比较可靠，不同的高程值体现了房屋的不同层次，重建多层次房屋需要根据不同的高程值来获取房屋每一层次的轮廓线。另外使用分辨率较高的 DSM 还可以重建出房屋的屋顶。要重建屋顶面片，可以对房屋的每个层次区域内的高程值做统计分析，进而选择合适的模型进行重建。图 3.2.1 表示了通过对区域类的高程值做统计分析，以确定重建模型的过程。具体的处理过程将在第五章具体阐述。

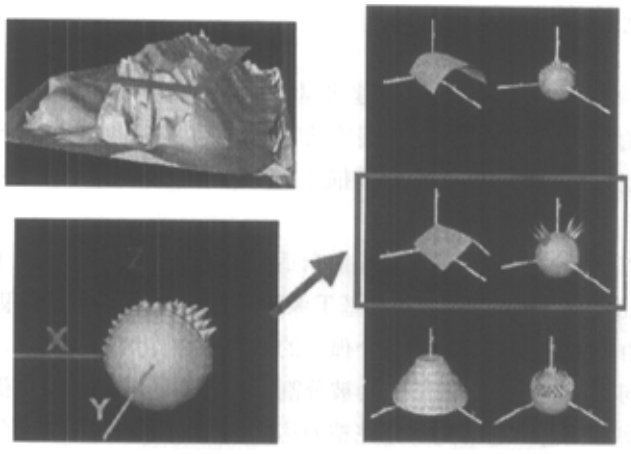


图 3.2.1 统计选择房屋类型示意图（引自 A.Hason, 2001）

等高线给我们提供了一个将 DSM 数据和多层次房屋模型联系起来的桥梁。首先等高线反映了房屋每一层次的高程信息，使得对多层次房屋的重建成为可能，等高线构成了每一层次的轮廓线，提供了重建的基本单元。对于一个完整的房屋层次而言，等高线是封闭的,既避免了对零散的边缘进行编组的难题，又获得一个封闭的兴趣区域，对此封闭区域进行统计分析，可以选择适当的模型，完成对屋顶的重建。

下面介绍等高线跟踪算法的具体实现。

§3.2.1 等高线跟踪

根据规则格网的 DSM 自动生成等高线首先利用 DSM 的矩形格网点的高程内插出格网边上的等高线点，然后将这些等高线点按顺序进行排列（等高线跟踪）。

在 DSM 格网边上内插并排列等高线点的方法很多，但总的说可以分成两种方式：一是对每条等高线边内插边排序；另一种方式是对同一高程的等高线先内插出所有等高线点，再逐一排列每条等高线的点。本文主要实现的是第一种方式(张祖勋,1996)。这是一种按逐条等高线的走向边搜索边插点的方法，因此等高线点内插及其排列是同时完成的，其主要过程如下：

1) 等高线高程的确定

DSM 分割完成后，计算每个区域的高程平均值 Z_R，并将其赋给区域中每个点。将不同区域的 Z_R 作为等高线的高程，以跟踪等高线。

2) 状态矩阵的计算

为了记录等高线通过 DSM 格网的情况，设置两个状态矩阵 $H^{(R)}$ 与 $V^{(R)}$：

$$H^{(R)}=\begin{bmatrix} h^R_{00} & h^R_{01} & \cdots & h^R_{0n} \\ h^R_{10} & h^R_{11} & \cdots & h^R_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ h^R_{m0} & h^R_{m1} & \cdots & h^R_{mn} \end{bmatrix}^T \qquad V^{(R)}=\begin{bmatrix} V^R_{00} & V^R_{01} & \cdots & V^R_{0n} \\ V^R_{10} & V^R_{11} & \cdots & V^R_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ V^R_{m0} & V^R_{m1} & \cdots & V^R_{mn} \end{bmatrix}^T$$

分别表示等高线穿过 DSM 格网水平边与竖直边的状态：

$$v^R_{i,j}=\begin{cases}1, & \text{格网点}(i,j)\text{的竖直边有高程为}Z_R\text{的等高线通过} \\ 0, & \text{格网点}(i,j)\text{的竖直边无高程为}Z_R\text{的等高线通过}\end{cases} \quad (3.2.1)$$

$$(i=0,1,\ldots..n;\ j=0,1,\ldots,m-1)$$

$$h^R_{i,j}=\begin{cases}1, & \text{格网点}(i,j)\text{的水平边有高程为}Z_R\text{的等高线通过} \\ 0, & \text{格网点}(i,j)\text{的水平边无高程为}Z_R\text{的等高线通过}\end{cases} \quad (3.2.2)$$

$$(i=0,1,\ldots..n;\ j=0,1,\ldots,m-1)$$

m+1 为 DSM 的行数，n+1 为 DSM 的列数。

由于格网（i,j）水平边有高程为 Z_R 的等高线通过的条件为：等高线高程介于 DSM 格网水平边两端点高程之间，即 $Z_{i,j}<Z_R<Z_{i+1,j}$ 或者 $Z_{i,j}>Z_R>Z_{i+1,j}$。这两个条件等价于：

$$(Z_{i,j}-Z_R)\ (Z_{i+1,j}-Z_R)<0 \quad (3.2.3)$$

同理，格网（i,j）竖直边有高程为 Z_R 的等高线通过的条件为：

$$(Z_{i,j}-Z_R)\ (Z_{i,j+1}-Z_R)<0 \quad (3.2.4)$$

则状态矩阵 $H^{(R)}$ 与 $V^{(R)}$ 的元素为

$$h^R_{i,j}=\begin{cases}1, & (Z_{i,j}-Z_R)\ (Z_{i+1,j}-Z_R)<0 \\ 0, & (Z_{i,j}-Z_R)\ (Z_{i+1,j}-Z_R)>0\end{cases} \quad (3.2.5)$$

$$(i=0,1,\ldots..n;\ j=0,1,\ldots,m-1)$$

$$v^R_{i,j}=\begin{cases}1, & (Z_{i,j}-Z_R)\ (Z_{i,j+1}-Z_R)<0 \\ 0, & (Z_{i,j}-Z_R)\ (Z_{i,j+1}-Z_R)>0\end{cases} \quad (3.2.6)$$

$$(i=0,1,\ldots..n;\ j=0,1,\ldots,m-1)$$

为了避免上述判别式出现为零的情况，可将所有关于等高线高程的格网点上的高程加（或减）上一个微小的数 $\varepsilon>0$：

若 $Z_{i,j}=Z_R$，则 $Z_{i,j}=Z_{i,j}+\varepsilon(i=0,1,\ldots,n;\ j=0,1,\ldots,n)$

3) 等高线跟踪的起点

在一般的 DSM 中，与边界相交的等高线为开曲线，而不与边界相交的等高线为闭曲线。通常是先跟踪开曲线，再处理闭曲线。不过，对于本文而言，目的主要是从 DSM

中提取建筑物，需要得到的是组成房屋的封闭轮廓线，因此只处理闭曲线。

对于每个封闭的区域，找的位于边缘的一点作为跟踪的起点。即在区域范围内，找到一点，该点对应的状态矩阵中的$v_{i,j}^{R}=1$或者是$h_{i,j}^{R}=1$。该闭曲线对应的矩阵元素仍然保留原值 1。

4) 内插等高线点

等高线的坐标采用线性内插。格网（i，j）水平边上等高线点坐标(x_p,y_p)为

$$\begin{cases} x_p = x_i + \dfrac{Z_R - Z_{i,j}}{Z_{i+1,j} - Z_{i,j}} \cdot \Delta x \\ y_p = y_j \end{cases} \tag{3.2.7}$$

其中 $x_i = x_0 + i \cdot \Delta x; y_i = y_0 + j \cdot \Delta y; (x_0, y_0)$为 DSM 起点坐标；$\Delta x, \Delta y$ 分别为 x 方向与 y 方向的 DSM 格网间隔。格网（i，j）竖直边上的等高线的坐标(x_q,y_q)为

$$\begin{cases} x_p = x_i \\ y_p = y_j + \dfrac{Z_R - Z_{i,j}}{Z_{i,j+1} - Z_{i,j}} \cdot \Delta y \end{cases} \tag{3.2.8}$$

5) 搜索下一个等高线点

在找到等高线起点以后，即可顺序跟踪搜索等高线点。为此将每一个 DSM 格网边进行编号为 1，2，3，4,如图 3.2.2 所示。则等高线的进入边号 IN 有 4 种可能。

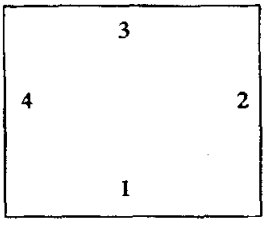


图 3.2.2 格网边编号

设进入边号为 1，即 IN=1，按固定的方向（顺时针或逆时针）搜索等高线穿过此格网的离去边号 OUT；如按逆时针方向搜索，则首先判断 2 号边，其次 3 号边，最后 4 号边，即：

当$v_{i+1,j}=1$时，OUT=2，并令$v_{i+1,j}=0$；

当$h_{i,j+1}=1$时，OUT=3,并令$h_{i,j+1}=0$；

当$v_{i,j}=1$时，OUT=4，并令$v_{i,j}=0$。

对于上述三种情况，下一格网的编号与进入编号分别为

当 OUT=2 时，下一格网为（i+1，j），IN=4；

当 OUT=3 时，下一格网为（i，j+1），IN=1；

当 OUT=4 时，下一格网为（i－1，j），IN=2；

同理可分析处理进入边号 IN=2，3，4 的情况。在搜索到下一个等高线点以后，即按式计算该点坐标。将每一搜索到的等高线点对应的状态矩阵元素置零是必要的，它表明该等高线点已经被处理过了。当状态矩阵 H（R）与 V(R)

变为零矩阵时，高程为 Z_R 的等高线就全部被搜索出来了。以上是格网中仅有高程为 Z_R 的一条等高线通过时的情况。若格网中有高程为 Z_R 的两条等高线通过，即该格网中 4 条格网边都有等高线穿过，这种特速的情况可以按上述统一的逆时针方向（或顺时针方向）搜索下一等高线点，也可以借助于格网中心点高程 Zc ：

$$Z_c = \frac{1}{4}\left(Z_{i,j} + Z_{i+1,j} + Z_{i,j+1} + Z_{i+1,j+1}\right) \qquad (3.2.9)$$

进行判断离去边。仍考虑该格网进入边号 IN=1 的情况，此时离开边号可能时 OUT=2 或者 OUT=4，而不可能为 3 号边，即 $OUT \neq 3$.

当$(Z_{i,j}-Z_R)$ $(Zc-Z_R)<0$ 时，离去边号 OUT=4；

当$(Z_{i+1,j}-Z_R)$ $(Zc-Z_R)<0$ 时，离去边号 OUT=2。

6) 等高线的终点

对于开曲线，当一个点是 DSM 边界上的点时，该点即为此等高线的终点。本文中所跟踪的仅为闭曲线，当一个点也是该等高线第一点时，该点即为其终点。由于在搜索闭曲线的起点时，保留对其对应的状态矩阵元素为 1，这就保证了能够搜索到闭曲线的终点。

§3.2.2 房屋轮廓线判断准则

采用以上所述的算法，依次跟踪每个区域所对应的轮廓线，就能得到房屋每个层次的轮廓线。在跟踪的过程中，有一些其他高出地面的目标，例如汽车，电线杆，独立的树木，成片的树林等，需要从 DSM 中滤除掉。在预处理的平滑过程中，已经处理掉一些此类目标。等高线跟踪以后进一步的使用一些判断准则来将房屋与其他目标区分开来。可以从房屋的几何信息出发，使用一定的几何规则进行判断。主要包括尺寸、形状、面积周长的比率、高度等。

1) 尺寸

在城区中，建筑物一般来说是有一定的尺寸的，相对于其他独立的高出地面的目标，房屋的尺寸一般是较大或者是中等规模。因此使用区域的尺寸作为一个重要的判断准则，

设定一个尺寸阈值，将尺寸较小的区域滤除掉。通常该阈值按照城区内最小的那些建筑物的尺寸来设置，这样可以把 DSM 中大量的孤立树木滤除。当然，一些特别小的房屋，也会被滤除掉。

2) 形状

现实中的建筑物都是经过精心设计并满足一定规则形状的。一般而言，相邻的墙面之间通常构成一个直角。实际上，直角结构或者是由直角结构组合而成的建筑物往往占据着城区建筑物的主要的部分。一些不满足直角结构的建筑物也可能可以被分解成为一些直角部分的集合。

后期的处理工作中，直角条件将作为一个重要的轮廓线约束参与平差。平差的中误差将作为衡量区域满足直角条件的的指标。通过形状约束可以将成片的树林等一些高出地面的非建筑物目标滤除掉。

3) 面积与周长的比率

区域轮廓的周长与区域面积的比值反映了该区域对应的房屋层次在整个房屋中所占的比重，比值越大说明比重越小，比值越小则比重越大。图 3.2.3 中的第 5 层（No.5）区域面积较大，该层次的轮廓线周长也较长，但是面积与周长的比率比较小，说明该层次在房屋中占的比重较大。设定一个比率阈值，可以将紧贴建筑物的树木滤除，同时也可能将房屋上的阳台，水箱等物一起滤除。

4) 高度

这是一个明显的几何规则，对于城区（尤其是一些繁华地段）的建筑物而言，建筑物一般是高大巍峨的。当区域内的平均高度小于一定的阈值时，该区域所对应的可能是汽车、花坛等其他目标，需要滤除，但同时也可能将居民区的一些低矮的房屋滤除掉。

简而言之，建筑物某一层次的模型可以简要的描述为：

满足足够的尺寸、有一定高度、满足直角约束的外轮廓线，在整个房屋区域内占有一定比重的规则几何体。

图3.2.3为某一房屋采用等高线跟踪算法获取各层次轮廓线的结果，共分为5层，每层的完整轮廓线都被正确获得。这为后期的处理提供了基本处理单元。

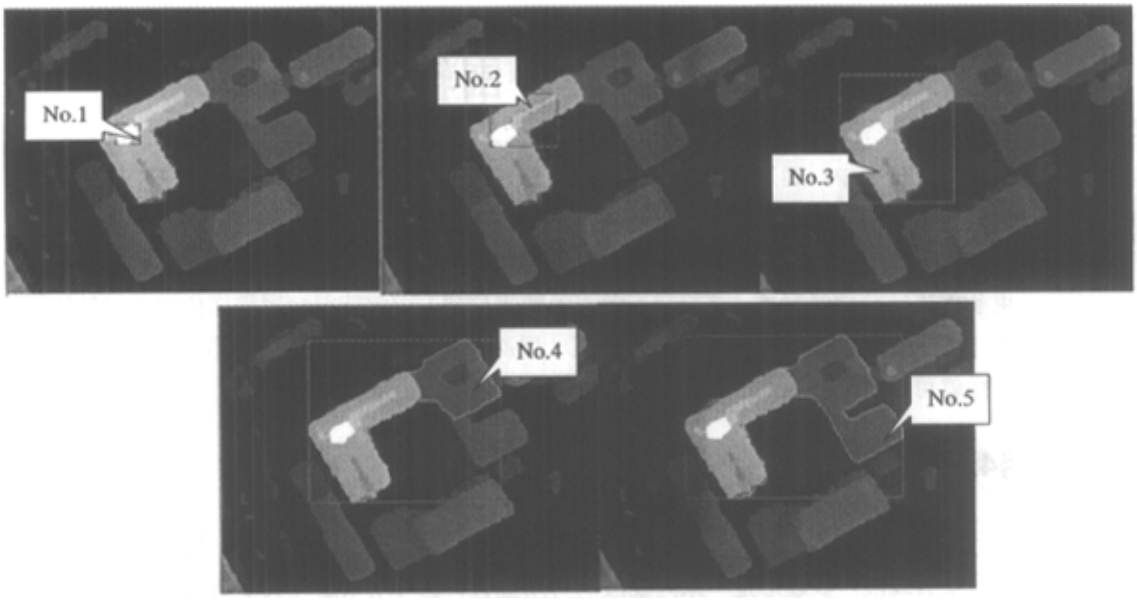


图 3.2.3 等高线跟踪后某一房屋各层次轮廓线

第四章 房屋外围轮廓的估计

在上一章中，通过区域分割和等高线跟踪相结合获得了 DSM 中房屋各层次的轮廓线。本章将轮廓线作为基本的处理单元，目的在于获得房屋矢量化的描述。首先将轮廓线进行分裂，获得拟合每条直线段的初始点集，拟合直线段后通过附加垂直、平行等约束条件进行轮廓线平差，获得房屋角点的精确位置，由此获得房屋平面位置的矢量化描述。由于每条轮廓线实际上就是房屋某一层次的等高线，该层次的高程值也可以获得，这样就可以获得房屋的三维矢量描述。

§4.1 轮廓线分割

为了获取房屋的直线边缘，可以将一条封闭的轮廓线分裂成数段，每一段内可以拟合一条直线段。多边形是一系列线段的封闭集合，它可用来逼近大多数实用的曲线到任意的精度。我们获得的轮廓线上的点集可以看成是一个有很多条边界的多边形，这个多边形的边数与边界点数相等。 而用多边形表达的目的是要用尽可能少的线段来代表边界并尽可能保持边界的基本形状，这样就可以用较少的数据和较简洁的形式来表达和描述边界。常用的多边形表达方式有以下 3 种（尤红建，2002）：

(1) 基于收缩的最小周长多边形法。

(2) 基于聚合的最小均方误差线段逼近法。

(3) 基于分裂的最小均方误差线段逼近法。

本文采用第 3 种方式，先连接边界上相距最远的 2 个点，即把边界分裂成两部分，然后根据一定准则进一步分解边界，构成新多边形去逼近，直到每个点到其所属的线段距离都小于某一限值。

具体算法如下：

(1) 在建筑物的轮廓线点集中找到相距最远的两个点作为初始特征点；

(2) 对两个特征点之间所有的点求出到当前这两个特征点连线的距离，并找到其中距离最大的点；

(3) 该距离的最大值和预先设定的阈值比较，如果大于阈值，则该点也作为特征点，并更新特征点集，否则寻找下两个特征点；

(4) 重复步骤 2)、3)，直到没有距离超过阈值的点为止。

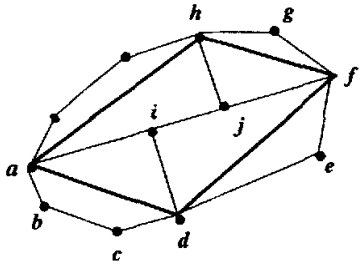


图 4.1.1 多边形逼近算法示意图

如图 4.1.1：原边界是由点 a, b, c, d, e, f, g, h 等表示的多边形。第一步先搜索出距起点 a 最远点 f，计算各点到 af 的距离，h，d 的距离超过限值，再次分解，以距离最大点 h，d 为分裂点，形成新的直线段，再次计算 b，c，e，g 等点与各相应直线距离，图中设均为超过限值，则多边形 $adfh$ 为所逼近的多边形。

通过多边形的逼近可以将轮廓线分裂成若干段，每段之间的点集将被用以拟合直线段。图 4.1.2 是两个房屋其中某层次的轮廓线分割结果，蓝色十字型点表示轮廓线分割后的各端点，实际处理时尽量将所有可能的端点都获取到，后期的处理过程中会合并掉一些“虚假”端点。

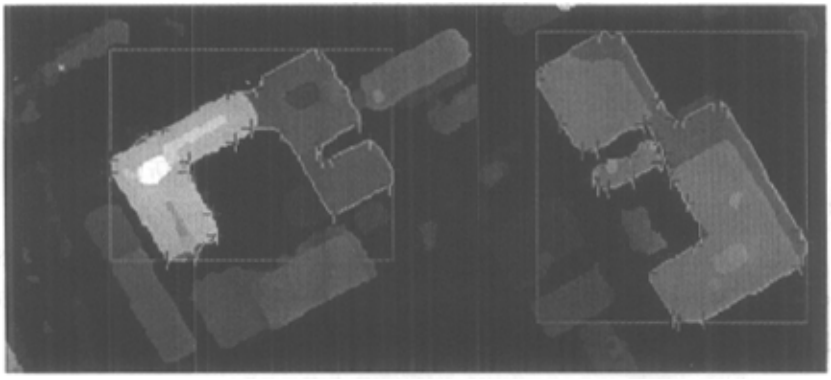


图 4.1.2 轮廓线分割结果

§4.2 直线段拟合

将等高线进行分裂以后，每一对邻接的特征点之间所有的点可以被用来拟合一条直线段。直线拟合的具体算法如下（程曦冉，2003）：

对于点集中的点 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3) \ldots\ldots (x_n, y_n)$。直线拟合的目的就是找到一条直线

y=ax+b

使得：

$$M = \sum_{i=1}^{n} [y_i - (ax_i + b)]^2 = \min \tag{4.2.1}$$

把 M 看成为自变量 a 和 b 的一个二元函数，那么问题可归结为求函数 M=M(a，b) 在哪一点处取得最小值，即求解如下方程组：

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial a} &= -2\sum_{i=1}^{n} [y_i - (at_i + b)] \times t_i = 0 \\ \frac{\partial M}{\partial b} &= -2\sum_{i=1}^{n} [y_i - (at_i + b)] = 0 \end{aligned} \tag{4.2.2}$$

通过该方程组解算出 a 和 b,得到直线方程:

$$a = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n} x_i y_i - \sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} y_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} x_i} \tag{4.2.3}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^2 \sum_{i=1}^{n} y_i - \sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} x_i y_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} x_i} \tag{4.2.4}$$

（n 为点集中点的个数）

实际的处理过程中，考虑到直线在接近 90 度时斜率 a 将趋于∞，所以将直线方程分为斜率大于 45 度和小于 45 度两种表达方式，即：

y=ax+b（直线与水平所交角绝对值≤45 度） (4.2.5a)

x=ay+b（直线与水平所交角绝对值 >45 度） (4.2.5b)

使用相邻的两个特征点$(x_s, y_s), (x_e, y_e)$进行判断来选择适当的直线表达方式：

当$|y_e - y_s| \le |x_e - x_s|$时，将位于$(x_s, y_s), (x_e, y_e)$之间所有的点用式（4.2.5a）拟合一条直线，

当$|y_e - y_s| > |x_e - x_s|$时，将位于$(x_s, y_s), (x_e, y_e)$之间所有的点用式（4.2.5b）拟合一条直线。

用以下数据结构来记录拟合出的直线段及拟合这条直线段的点集信息。

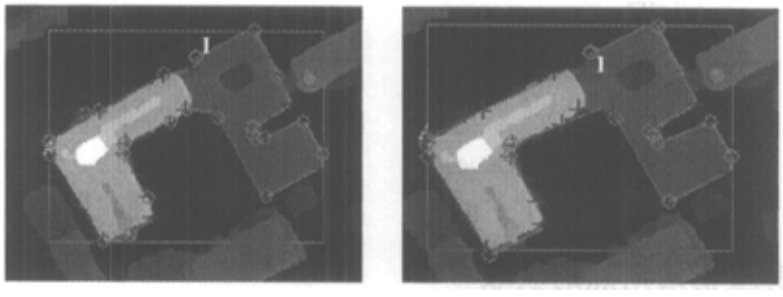
```
struct    edgeLine
{
    int nBegin;
    int ptnum;
```

```
    lineSEGMENT l;
};
struct    lineSEGMENT
{
    POINT2Df    p0;
    POINT2Df    p1;
    float mx;
};
struct POINT2Df
{
    float x,y;
};
```

拟合出每条直线段以后，将该直线段的两个的端点记录在 lineSEGMENT 结构的 p0，p1 中。拟合出来的直线段，可能会有相互邻接的数条方向比较近似，需要将它们合并成一条直线。具体做法如下：

1) 将第一条直线段设为起始直线段。
2) 顺序搜索并判断起始直线段后面的各条直线段和它之间的夹角，如果夹角小于一定的限值，继续搜索，直到找到一条直线段，其与起始直线段之间的夹角大于一定的限值就停止搜索，并记录末尾直线段。
3) 将起始直线段和末尾直线段之间所对应的轮廓线上的所有的点重新拟合一条新的直线。并将新的直线记录到房屋某一层次的边缘直线段数组中。
4) 将末尾直线段设为起始直线段。重复 2)，直到所有的直线段都已经搜索到为止。

图 4.2.1 是直线段合并的一个结果图，AB 之间本来有 4 条直线段，但是由于他们之间的方向基本一致，被合并成一条直线段。从图中可以看出，在 AB 之间的确只应该存在一条直线段。



4.2.1 直线段合并结果图

一条轮廓线分裂完毕后，对其分段拟合的流程如下：

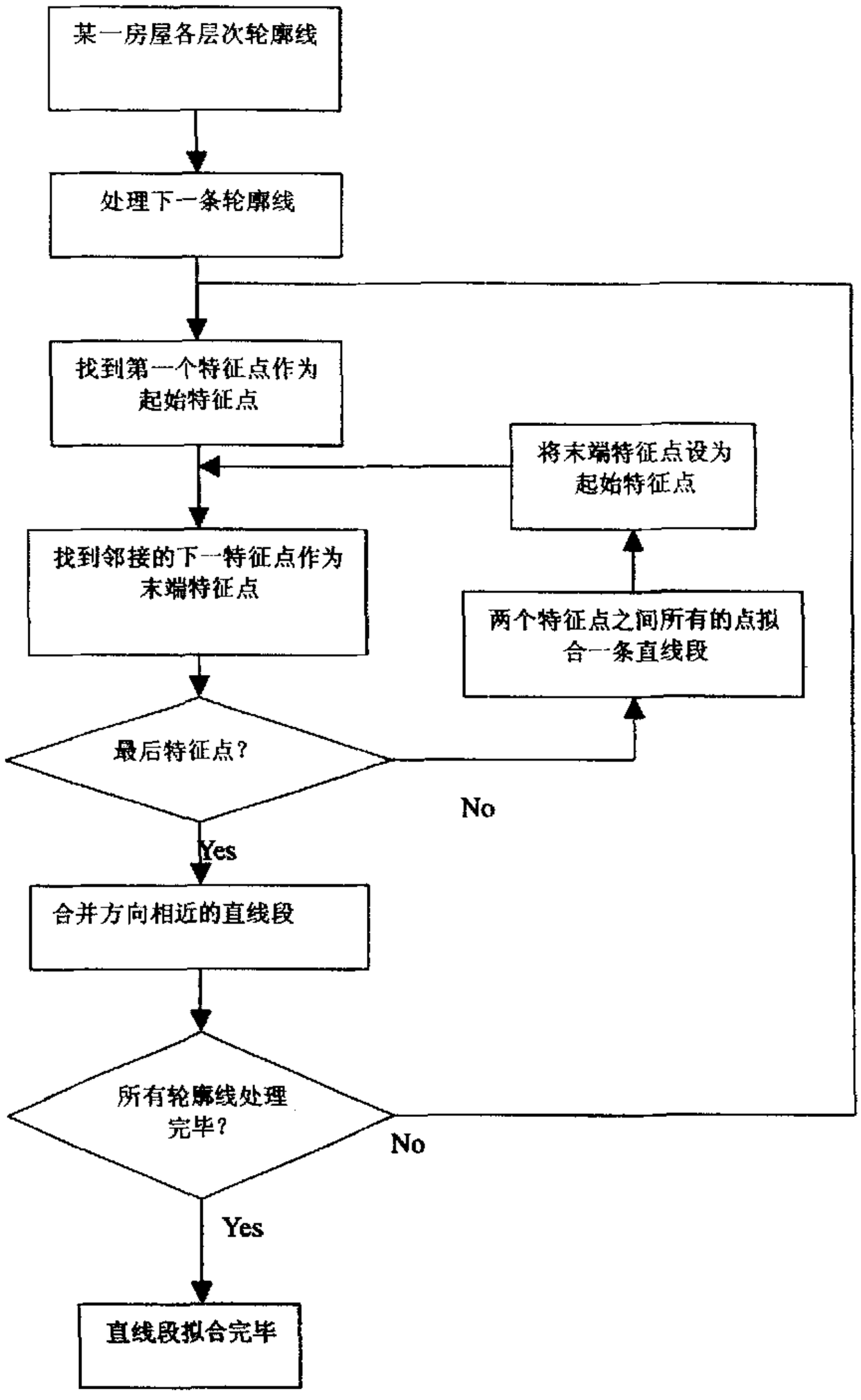


图 4.2.2 直线段拟合处理框图

§4.3 房屋初始角点的获取

直线拟合完毕以后，相邻的直线两两求交，获得房屋的粗略角点。求取直线交点的时候，必须满足以下条件：前一条直线的末端点应该和其相邻的后一条直线的起始端点

一致。最后一条直线的末端点就是第一条直线的起始端点。

§4.4 房屋轮廓平差

在现实世界中，房屋是经过人工精心设计并建造的，其平面形式几乎都是由规则多边形组成的，而且绝大部分房屋的墙面都是直角相交的。因此，在房屋的重建过程中，将相邻墙面直角相交作为一个重要的约束条件，采用最小二乘平差作为主要的工具得到满足各种约束条件的房屋轮廓，从而完成多直角房屋的三维重建。

§4.4.1 房屋轮廓平差模型及思路

自从十九世纪初高斯创立最小二乘法以来，它的理论日趋完善，应用领域越来越广。平差中描述所求量和已知之间关系的函数表达式称之为函数模型。函数模型依观测值和所选参数之间的关系可以分几种，可概括为：

$$\begin{aligned} \underset{c,1}{F}(\tilde{L},\tilde{X}) &= 0 \\ \underset{s,1}{\Phi}(\tilde{X}) &= 0 \end{aligned} \tag{4.4.1}$$

这一函数模型包括观测值误差方程和不含观测值的参数限制条件方程。其中$\tilde{L}$和$\tilde{X}$分别为观测值和参数向量，c 为条件式的个数，s 为不独立的参数的个数。在实际的平差过程中，需要将式（4.4.1）其按泰勒公式展开化为线性形式【43】:

$$A\Delta + B\tilde{x} - W = O \tag{4.4.2a}$$

$$C\tilde{x} - W_x = O \tag{4.4.2b}$$

式中$W = -F(L, X^0)$，$W_x = -\Phi(X^0)$

当以Δ和$\tilde{x}$的估值V和$\hat{x}$代入 （4,4,2)，则有：

$$AV + B\hat{x} - W = O \tag{4.4.3a}$$

$$C\hat{x} - W_x = O \tag{4.4.3b}$$

其随机模型为：

$$D = \delta_0^2 Q = \delta_0^2 P^{-1} \tag{4.4.4}$$

测量平差中，采用最小二乘原理对观测值和参数进行估计，所谓最小二乘原理，就是满足：

$$V^T PV = \min \tag{4.4.5}$$

其中 P 为观测量权阵。

最小二乘平差对观测值和参数的估计有很多优点：它只需要知道观测向量的先验性质如观测值权阵，对于平差问题可以求得一组具有多余观测值的线性方程的唯一最优解，方程的解算和结果精度（质量）的评定方法严密而成熟。

对于式（4.4.3）通过最小二乘原理能够得到一组V和$\hat{x}$的解。由此可以得到最后的平差值：

$$\hat{L} = L + V \tag{4.4.6a}$$

$$\hat{X} = X_0 + \hat{x} \tag{4.4.6b}$$

摄影测量中习惯采用间接法平差模型，此时（4.4.3a）转化为间接平差形式，而将约束条件（4.4.3b）作为带权的虚拟观测值加入平差模型。这时，（4.4.3a）（4.4.3b）变为：

$$V = B\hat{x} - W, P \tag{4.4.7a}$$

$$V_C = C\hat{x} - W_x, P_C \tag{4.4.7b}$$

房屋轮廓平差时，以房屋角点坐标为未知数，将点到直线的距离以及垂直、平行、独立点位等约束条件作为虚拟观测值列出虚拟观测方程，联合解求以得到满足各种约束条件房屋角点坐标。

§4.4.2 附加几何条件约束的房屋轮廓平差

对房屋轮廓线进行平差需要按照最小二乘原理，列出误差方程式，进行解算。

对于房屋的每一层次，通过直线拟合获得了一条轮廓线的分段矢量描述，并获得了粗略的角点位置。n 个角点位置由以下角点串记录：

$(X_0,Y_0),(X_1,Y_1),(X_2,Y_2),....(X_{n-1},Y_{n-1})$

其中$(X_0,Y_0),(X_1,Y_1)$是第一条直线的两个端点，$(X_1,Y_1),(X_2,Y_2)$ 是第二条直线的两个端点，$(X_2,Y_2),(X_3,Y_3)$是第三条直线的两个端点，……，$(X_{n-1},Y_{n-1}),(X_0,Y_0)$是最后一条直线的两个端点。

平差的目的在于调整这些角点的位置，使得由这些角点所构成的直线段在整体上和轮廓线拟合最佳，并满足直角、平行等几何约束条件。

一条轮廓线上所有的点使用一个数组 CArray<edgePOINT,edgePOINT> cntPts 顺序存放，对于每一对端点$(X_i,Y_i),(X_{i+1},Y_{i+1})$之间的直线，在 edgeLine 结构中记录了拟合该

条直线的轮廓线上的点集信息，nBegin 是拟合该条直线的点集在轮廓线点数组中的起始位置，ptnum 为连续的点的个数，lineSEGMENT 结构中的 l 用来记录拟合出的直线的两个端点。

例如：一条直线段，其 nBegin 为 i，ptnum 为 m，则这条直线段是用点数组中的点 cntPts[i]、cntPts[i+1]、……cntPts[i+m-1]拟合得到的。拟合好的直线段的两个端点记录在 lineSEGMENT 结构的 p0 与 p1 中。

平差计算中，对于每条直线段，观测值为拟合该条直线段的原始轮廓线上的点集。对每一对角点$(X_i,Y_i),(X_{i+1},Y_{i+1})$，点数组中记录的拟合该直线的点列为：

$(x_0,y_0)=cntPts[nBegin],(x_1,y_1)=cntPts[nBegin+1],(x_2,y_2)=cntPts[nBegin+2],$
$....(x_m,y_m)=cntPts[nBegin+ptnum-1]$

由$(X_i,Y_i),(X_{i+1},Y_{i+1})$所连接成的直线段的方程为：

$$(Y_{i+1}-Y_i)(x-X_i)-(X_{i+1}-X_i)(y-Y_i)=0 \tag{4.4.8}$$

则，任一点 $p(x', y')$ 到该直线段的距离为：

$$D=\frac{\left|(Y_{i+1}-Y_i)(x'-X_i)-(X_{i+1}-X_i)(y'-Y_i)\right|}{\sqrt{(X_{i+1}-X_i)^2+(Y_{i+1}-Y_i)^2}}=0 \tag{4.4.9}$$

将点到直线段的距离视为虚拟观测值，未知数为每个角点的坐标改正值。将方程线性化（使用泰勒公式展开，并仅保留一次项），对拟合该条直线段的所有点列出如下的误差方程式：

$$\begin{aligned}
v_0 &= (y_0-Y_{i+1})dX_i/d+(X_{i+1}-x_0)dY_i/d-(y_0-Y_i)dX_{i+1}/d+(x_0-X_i)dY_{i+1}/d-l_0/d\\
v_1 &= (y_1-Y_{i+1})dX_i/d+(X_{i+1}-x_1)dY_i/d-(y_1-Y_i)dX_{i+1}/d+(x_1-X_i)dY_{i+1}/d-l_1/d\\
v_2 &= (y_2-Y_{i+1})dX_i/d+(X_{i+1}-x_2)dY_i/d-(y_2-Y_i)dX_{i+1}/d+(x_2-X_i)dY_{i+1}/d-l_2/d \qquad (4.4.10)\\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\\
v_m &= (y_m-Y_{i+1})dX_i/d+(X_{i+1}-x_m)dY_i/d-(y_m-Y_i)dX_{i+1}/d+(x_m-X_i)dY_{i+1}/d-l_m/d
\end{aligned}$$

其中

$$d=\sqrt{(X_i-X_{i+1})^2+(Y_i-Y_{i+1})^2}$$

$$l_k=(X_{i+1}-X_i)(y_k-Y_i)-(Y_{i+1}-Y_i)(x_k-X_i)$$

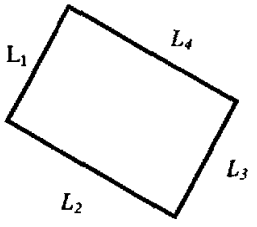
m 为拟合该条直线的点的个数。

按照上述误差方程形式，对每条直线段的两个角点列出误差方程：

如前所言：由于现实世界中，绝大部分建筑物相邻的墙面具有直角相交的特点。拟合得到相邻墙面的直线段之间只是反映了房屋的大致形状，并不符合建筑物平面规则形状的特点，因此附加平行和垂直条件一起联合平差，可使得边缘直线段满足相互垂直的条件。

首先需要得到每条直线段之间的相互关系。对拟合出来的各条直线段，用一个关系图记录各条直线之间的相互关系。如果两条直线之间的夹角小于一定限值，将两条直线的关系定为平行；如果两条直线之间的夹角与 90 度的差值小于一定的限值，将两条直线的关系定为垂直。

例如：如果将垂直关系用 P 表示，平行关系用 L 表示，其他关系用 N 表示，则关系图图 4.4.1(b) 记录了图 4.4.1(a)中多边形 4 条直线之间的相互关系。实际程序设计时关系图通过一个二维数组来实现。



(a)

	L_1	L_2	L_3	L_4
L_1	N	P	L	P
L_2	P	N	P	L
L_3	L	P	N	P
L_4	P	L	P	N

(b)

图 4.4.1 一个多边形及其关系图

如果一条直线由 $(X_i,Y_i),(X_{i+1},Y_{i+1})$ 两个角点连接而成，另一条直线由 $(X_j,Y_j),(X_{j+1},Y_{j+1})$ 两个角点连接而成，则这一对直线可能满足垂直条件或平行条件。

1) 垂直条件约束

若这两条直线之间满足垂直关系，则构成直线的角点之间满足以下关系：

$\frac{Y_{i+1}-Y_i}{X_{i+1}-X_i}\cdot\frac{Y_{j+1}-Y_j}{X_{j+1}-X_j}=-1$,展开该式得：

$$(Y_{i+1}-Y_i)(Y_{j+1}-Y_j)+(X_{i+1}-X_i)(X_{j+1}-X_j)=0 \qquad (4.4.11)$$

将 $Q=(Y_{i+1}-Y_i)(Y_{j+1}-Y_j)+(X_{i+1}-X_i)(X_{j+1}-X_j)=0$ 作为虚拟观测值，以角点坐标的改正值为未知数，将方程用泰勒公式展开，只保留一次项，得到方程的线性化形式，列出误差方程

$$\begin{aligned} v_Q = &-(X_{j+1}-X_j)dX_i-(Y_{j+1}-Y_j)dY_i+(X_{j+1}-X_j)dX_{i+1}+(Y_{j+1}-Y_j)dY_{j+1}\\ &-(X_{i+1}-X_i)dX_j-(Y_{i+1}-Y_i)dY_j+(X_{i+1}-X_i)dX_{j+1}+(Y_{i+1}-Y_i)dY_{j+1}-l \end{aligned} \qquad (4.4.12)$$

其中 $l=-(Y_{i+1}-Y_i)(Y_{j+1}-Y_j)-(X_{i+1}-X_i)(X_{j+1}-X_j)$

搜索关系图，对每对满足垂直关系的直线段的角点列出以上形式的附加误差方程。

2) 平行条件约束

若两条直线之间满足平行关系，则构成直线的角点满足以下关系：

$\frac{Y_{i+1}-Y_i}{X_{i+1}-X_i}=\frac{Y_{j+1}-Y_j}{X_{j+1}-X_j}$,展开该式得：

$$(Y_{i+1}-Y_i)(Y_{j+1}-Y_j)-(X_{i+1}-X_i)(X_{j+1}-X_j)=0 \tag{4.4.13}$$

将$Q=(Y_{i+1}-Y_i)(Y_{j+1}-Y_j)-(X_{i+1}-X_i)(X_{j+1}-X_j)$作为虚拟观测值，以角点坐标的改正值为未知数，将方程用泰勒公式展开，只保留一次项，得到方程的线性化形式，列出误差方程

$$\begin{aligned}v_Q=&-(Y_{j+1}-Y_j)dX_i+(X_{j+1}-X_j)dY_i+(Y_{j+1}-Y_j)dX_{i+1}-(X_{j+1}-X_j)dY_{i+1}\\&+(Y_{i+1}-Y_i)dX_j-(X_{i+1}-X_i)dY_j-(Y_{i+1}-Y_i)dX_{j+1}+(X_{i+1}-X_i)dY_{j+1}-l\end{aligned} \tag{4.4.14}$$

其中 $l=-(Y_{i+1}-Y_i)(Y_{j+1}-Y_j)+(X_{i+1}-X_i)(X_{j+1}-X_j)$

搜索关系图，对每对满足平行关系的直线段列出以上形式的附加误差方程。

列误差方程的时候，对于该方程在所有误差方程中的权值可以根据需要设置，因为垂直条件是一个很重要的约束，可以将满足垂直条件的误差方程的权值设的大一些。

3) 独立点位约束

另外，认为初始的角点位置应该比较接近正确的角点的位置，角点位置的调整不能离初始角点位置相差太远，因此将角点位置作为一个独立的观测值，对每个角点列出一个约束方程式。

$$\begin{cases}v_{X_0}=dX_0-(X_0^0-X_0)\\v_{Y_0}=dY_0-(Y_0^0-Y_0)\\v_{X_1}=dX_1-(X_1^0-X_1)\\v_{Y_1}=dY_1-(Y_1^0-Y_1)\\\quad\cdots\cdots\\v_{X_n}=dX_n-(X_n^0-X_n)\\v_{Y_n}=dY_n-(Y_n^0-Y_n)\end{cases} \tag{4.4.15}$$

其中，$X_0,Y_0,X_1,Y_1.....X_n,Y_n$是迭代求解时，每次求得的新的角点位置，$X_0^0,Y_0^0,X_1^0,Y_1^0.....X_n^0,Y_n^0$是初始的角点位置。将此类方程的权值可以设的高一些。

联立（4.4.10），（4.4.12），（4.4.14），（4.4.15）四类方程。得到如下形式的误差方程：

$$V=AX-L,P \tag{4.4.16}$$

其中，A 为系数矩阵，X 为未知数阵$(dX_0,dY_0,dX_1,dY_1.....dX_n,dY_n)^T$，L 为常数项阵。

其相应的法方程式为：

$$A^TPAX-A^TPL=0 \tag{4.4.17}$$

法方程的解为：

$$X = (A^{\mathrm{T}}PA)^{-1}A^{T}PL \tag{4.4.18}$$

按照式（4.4.9）可以得出各角点坐标的改正值，从而得到最终的角点坐标。

求解的过程是一个逐步趋近的过程，其具体的计算框图如下：

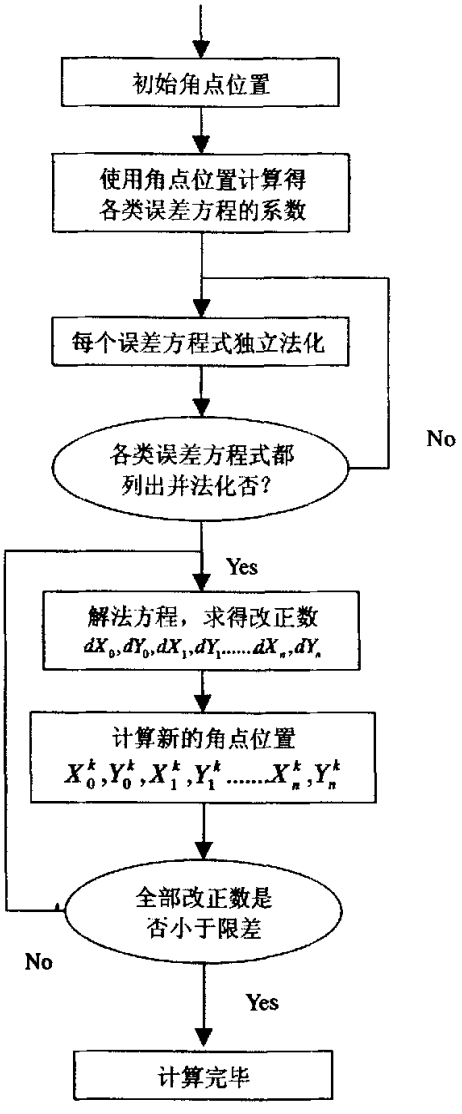


图 4.4.2 直线轮廓平差处理框图

经过平差处理以后，组成房屋单层次的各条直线段满足直角相交的约束条件，并且在整体上和轮廓线上的点拟合最优。

平差处理以后的直线，也可能出现两条直线的方向过于接近的情况，这极可能是同一条直线被打断了，因此也需要进行直线的合并。具体的处理方式如下：

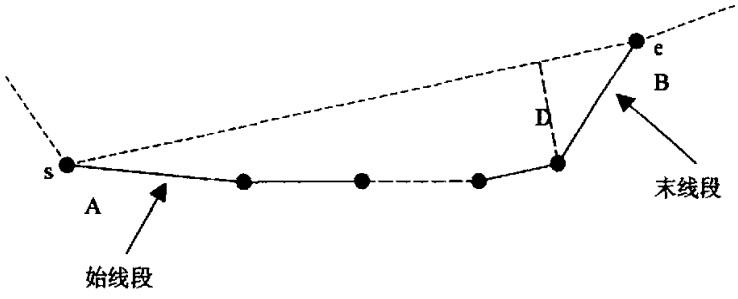


图 4.4.3 平差后直线段合并示意图

1）将第一条直线段设为始线段

2）依次搜索始线段（图 4.4.3 中 A）以后的各条直线段，将当前搜索到的直线段设为末线段（图 4.4.3 中 B），计算末线段的起点到始线段的起点和末线段的终点连接而成的线段（图 4.4.3 中线段 se）的距离 D，如果末线段已经是最后一条直线段，直接合并始线段和末线段之间的所有直线段。转第 4）步

3）如果 D 大于一定的限值，搜索结束，将始线段和末线段之间的所有线段合并成一条直线段，该线段的起点为始线段的起点，该线段的终点为末线段的起点。并将末线段设为始线段，转第 2）步

如果 D 小于一定的限值，继续搜索下一条直线段转第 2）步

4）所有直线段都已经搜索过，算法结束。

图 4.4.4 表示了某房屋轮廓线平差前与平差后的对比。图 4.4.4(a) 是所有层次的轮廓线拟合出的直线段，图 4.4.4(b) 是所有层次的轮廓线拟合出的直线段平差后的结果，图 4.4.4(c) 是其中某一层次的轮廓线拟合出来的直线段，图 4.4.4(d) 是对该层次的边缘直线段平差后的结果。从图中可以明显看出经过轮廓平差以后的直线段在整体上比较符合房屋轮廓，并且各相邻的墙面之间都基本上满足直角正交关系。

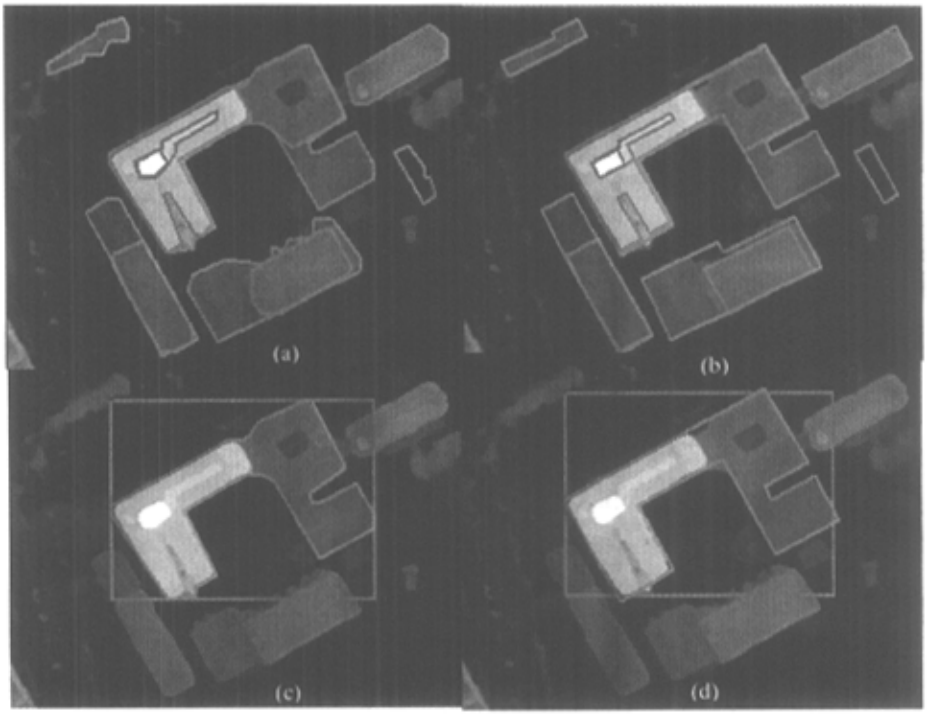


图 4.4.4 轮廓线平差前与平差后对比图

§4.4.3 拟合残差与“假”房屋滤除

提取房屋时，将区域分割以后高出地面的部分作为潜在的房屋存在区域。这存在一些问题，其他一些“假”房屋例如一小片树林会被当作一个房屋存在区域，并被重建成房屋。这需要将房屋和这些“假”房屋区域分离开来，通过上一章中所述的一些准则：尺寸、形状、面积周长的比率、高度等，可以在一定程度上解决这个问题。前文提及过使用轮廓线平差以后的中误差来衡量轮廓线所围成的区域形成规则直角区域的程度。平差后中误差过大，从一定程度上说明了该轮廓线与我们所期望的规则形状相差较大，即它可能根本就不满足规则直角条件的约束，可以将其作为“假”房屋区域滤除掉。

对于每一条直线上的每个点，平差后每点的残差为（这里以第 i 条直线上第 j 点的残差为例）

$$v_{ij}=(y_{ij}-Y_{i+1})dX_i/d+(X_{i+1}-x_{ij})dY_i/d-(y_{ij}-Y_i)dX_{i+1}/d+(x_{ij}-X_i)dY_{i+1}/d-l/d \qquad (4.4.19)$$

其中 $d=\sqrt{(X_i-X_{i+1})^2+(Y_i-Y_{i+1})^2}$，$l=(X_{i+1}-X_i)(y_{ij}-Y_i)-(Y_{i+1}-Y_i)(x_{ij}-X_i)$

则中误差的按如下公式计算：

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{nl}\sum_{j=0}^{m_i}v_{ij}}{\sum_{i=0}^{nl}m_i-1}} \tag{4.4.20}$$

其中，nl为所有直线段的数目，m_i是用于拟合每条直线段的点的数目。

图 4.4.5(a)是一片地区内等高线跟踪获取的各房屋轮廓线。从中选了几个代表区域，表 4.4.1 列出了它们所对应的边缘直线段平差后的中误差。1 和 5 号区域的中误差过大，说明其轮廓线形状和理想的规则形状之间差异较大，则该区域成为“假”房屋区域的可能性极大，直接将其滤除掉（图 4.4.5(b)中用黄线绘制）。

区域号	平差后的中误差
1	1．625504m
2	0．614560m
3	0．604901m
4	0．855113m
5	1．629083m

表 4.4.1 轮廓平差后的中误差

人工可以识别 1 和 5 号区域确实不是房屋存在区域。1 号区域是一片小树林，5 号区域似乎是环绕在房屋周围的一些土堆。

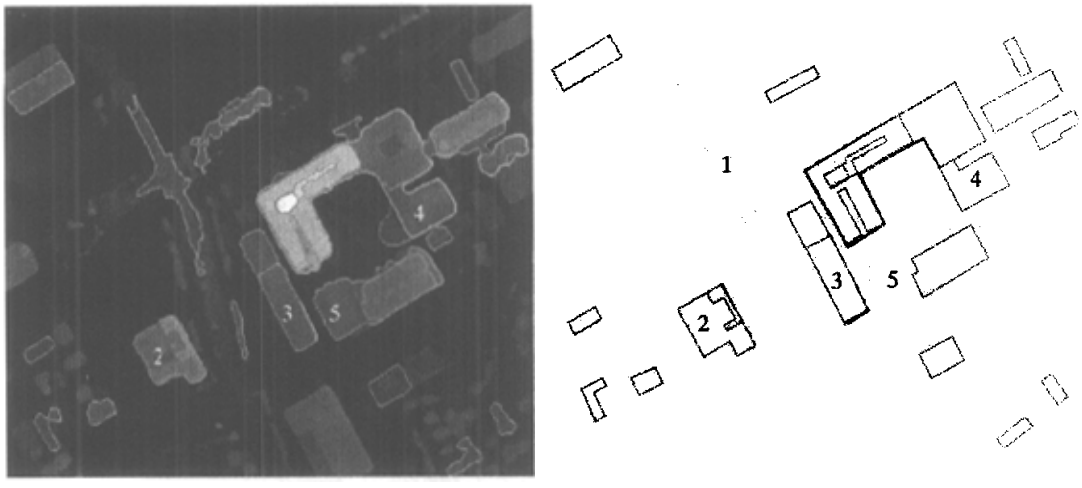


图 4.4.5 利用中误差剔除“假”房屋（阈值设为 1.5m）

第五章 模型的选择及人字型房屋的重建

进行轮廓平差获得满足各种约束条件的房屋角点以后，可以统计由平差后的轮廓线围成的多边形区域内的法向量方向来确定房屋类型。使用等高线跟踪获取房屋轮廓线的优点在统计时得到了充分的体现：由于等高线一定封闭（开曲线位于影像边界处，不予考虑），可以保证构成封闭的多边形区域，这使得统计工作得以局部化，统计工作量小而且稳健。

本文主要处理的是多层次多直角的平顶房屋和人字型房屋。通过前面的处理，已经可以获得房屋各层次的平面描述。如果是平顶房屋，通过平面描述和轮廓线的高程信息就可以完成重建工作，如果是人字型房屋，还需要进一步重建屋顶。

§5.1 模型的选择

通过前面的处理，得到了房屋各层次的矢量描述，它们是由一系列的直线段所围成的封闭多边形。如图 5.1.1 所示：

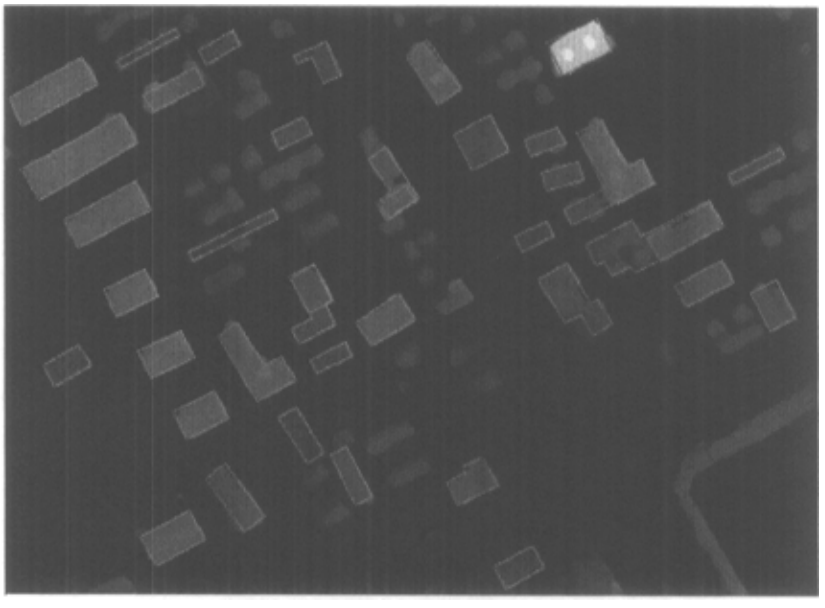


图 5.1.1 各房屋的平面矢量形式

对于每个封闭的多边形，可以通过统计每个封闭多边形内的法向量方向来确定房屋类型并选择重建模型。

§5.1.1 法向量的估计

采用扫描线填充算法寻找一个多边形所包含的所有的点，并估计每一点的法向量。估计时通过一个点上下、左右四个点来计算该点的法向量，由其左边的点和上下两点构成一个三角面，计算该三角面的法向量P_1,由其右边的点和上下两点构成另一个三角面，计算该三角面的法向量P_2，将P_1和P_2的平均值作为该点的法向量，这样可以在一定程度上防止噪声点的干扰。具体计算(i,j)点法向量的方法如下：图 5.1.2 表示了各点之间的关系。

通过（i，j−1）、（i−1，j）点的三维坐标计算出矢量 V1

通过（i，j+1）、（i−1，j）点的三维坐标计算出矢量 V2

通过向量积$V_1 \times V_2$求得法向量P_1，

通过（i，j−1）、（i+1，j）点的三维坐标计算出矢量 V3

通过（i，j+1）、（i+1，j）点的三维坐标计算出矢量 V4

通过向量积$V_3 \times V_4$求得法向量P_2，

将P_1和P_2在各个分量上求取平均值得到的矢量P作为(i,j)点的法向量。

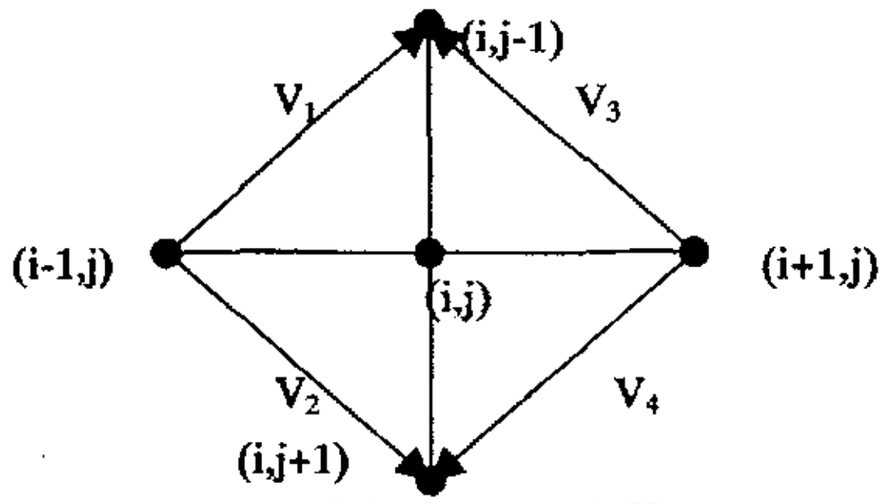


图 5.1.2 法向量计算示意图

§5.1.2 法向量分析判断房屋类型的原理及实现

使用法向量判断房屋类型的步骤是：首先将计算出的法向量归一化（使向量的模为1）。使用两个角度就可以表示一个法向量的方向。如图 5.1.3 所示：$\vec{V}$为一个归一化的法向量，φ表示该向量在平面 XOY 上的投影与 X 轴之间的夹角，ω 表示该向量与平面 XOY 的夹角（$\varphi \in [0,360], \omega \in [0,90]$，量化级别为 1 度）。通过$\varphi$、$\omega$就可以唯一确定一个法向量的方向，以下用 D（$\varphi$，$\omega$）表示由$\varphi$、$\omega$所决定的法向量方向。如图 5.1.4 所示，显然，对于人字型房屋的屋顶，区域内的法向量方向主要集中在两个方向上，而且这两个方向基本关于屋脊线对称，且与 Z 轴的夹角较大。而平顶房屋的屋顶区域中的

法向量方向主要集中在一个方向上，且基本垂直于 XOY 平面。通过对区域内法向量方向的分析就可以基本确定房屋类型以选择重建模型。

根据两种房屋屋顶的法向量分布特点，我们通过一个二维直方图来统计多边形区域中的法向量方向的分布情况以确定屋顶类型，其基本实现方式与使用 HOUGH 变换检测直线的方式比较相似。该过程具体实现时用一个二维数组 VD[90][360]来记录各个方向的法向量出现的次数，这个二维数组实际是一个累加器，初始时这个累加器中所有的元素值为 0。依次处理多边形区域内各点的法向量，首先将法向量表示成两个角度的形式，如果某点的法向量方向为 D（$\varphi 1$，$\omega 1$），则将累加器中相应的项 VD[$\omega 1$][$\varphi 1$]中记录的累计数增加 1。当多边形区域内所有点都被处理完以后，VD 中就记录了该区域中各法向量方向出现的次数。找出 VD 中的法向量方向出现次数的峰值，判断该峰值所对应的方向，如果 D（φ_p，ω_p）与 Z 轴之间的夹角比较大（基本不可能与 XOY 平面垂直）。则寻找到该方向的对称方向 D（φ_s，ω_s），所谓对称，即 $\omega_s = \omega_p + 180$ 或者 $\omega_s = \omega_p - 180$，且 $\varphi_s = \varphi_p$。搜索累加器中 D（φ_s，ω_s）对应的方向的附近区域，如果能发现另一个局部峰值，则可以认为该多边形区域内包含的房屋为人字型房屋，需要重建人字型屋顶，否则认为该多边形区域内包含的房屋为平顶房屋，按照平顶房屋模型来重建房屋。

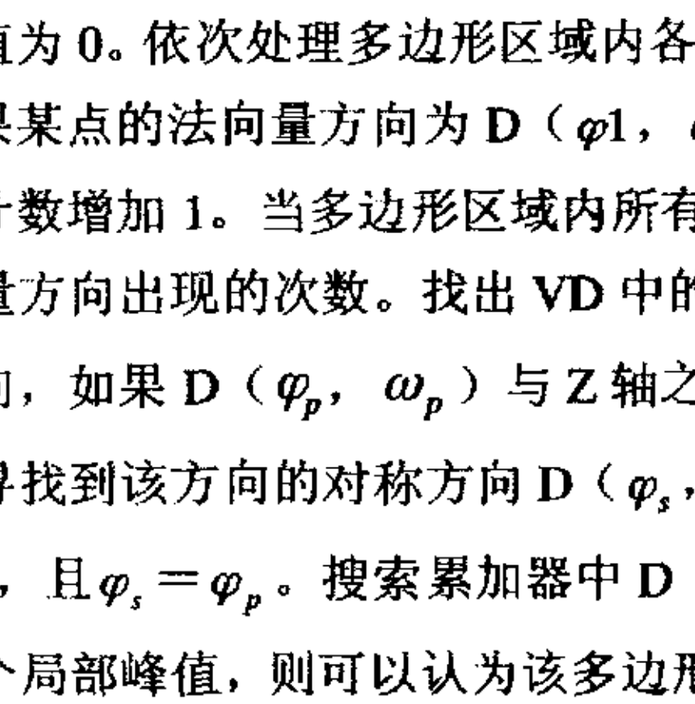


图 5.1.3 法向量方向示意图

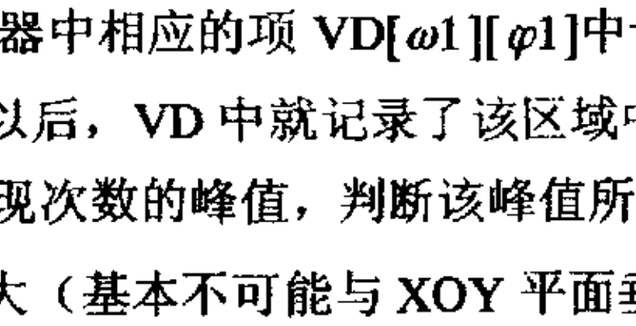


图 5.1.4 人字型与平顶房屋法向量方向分布示意图

§5.2 人字型房屋的三维重建

人字型房屋与平顶房屋角点的平面形式基本一致，但人字型房屋需要进一步重建屋顶。重建人字型屋顶通常采用数据驱动（Data Driven）和模型驱动(Model Driven) 的方式(YongHu,2003)。

现今的激光扫描系统的激光脚点密度越来越高，房屋各面的特征信息表现的更为详

细，各面之间的拓扑关系也更为明显，数据驱动的方法就是据此直接计算出房屋的特征信息。数据驱动的方法常见的有两种，一种是不变矩（Invariant Moments）的方法，其本质是模式识别；另一种是基于房屋真实平面的提取和相交来重建房屋。

模型驱动的方法是假设基本的立体图元（如长方体、棱柱等）可以拟合房屋点云的一个部分或某些部分的组合，而这些部分（segment）是对房屋地面轮廓的划分而得到的。如：可以使用 CSG（Constructive Solid Geometry）来描述房屋，那么一个房屋可以看成是一棵 CSG 树，其枝叶是组成这个房屋的立体图元，而内部节点是一些诸如相交、求差和求并的运算。

本文采用两种方法来重建屋顶，一种方法是根据现有激光数据角点密度较高的特点，采用三角网循环剖分来重建屋顶，这是一种纯数据驱动的方法；第二种方法在多边形的封闭区域内提取并拟合平面，通过平面相交等方式来重建屋顶，这是一种数据驱动和模型驱动相结合的方法。

§5.2.1 三角网循环剖分重建屋顶

关于三角网的详细介绍及改进见参考文献【1】。

利用三角网来重建屋顶的基本思路是：

将屋顶的各个特征点作为三角网中的特征点，由这些特征点构成得三角网形成一系列的三角面片，将这些面片组合起来就可以完成对屋顶的描述。一般人字型房屋屋顶的特征点主要有屋檐的角点，屋脊的端点和屋脊上的若干点。根据一个较基本的常识来寻找特征点，即特征点一般为屋顶上几个平面的交点，一个特征点到和它相邻一些特征点所构成的平面的距离一般是一个拐点值，即局部区域内的最大值。

具体算法如下：

对于确定的某个多边形所围成的区域，以初始的多边形角点作为特征点构建一个初始的三角网。对三角网中每个三角形进行如下操作：

1) 在每个三角形的平面区域中，计算区域内每个点到三角形所在的空间平面的距离 D；图 5.2.1 中 V_1,V_2,V_3 为三角网中的一个三角形的 3 个顶点，P 为区域内任意点，通过 V_1,V_2,V_3 计算一个平面的各个参数，再计算 P 到该平面的距离。

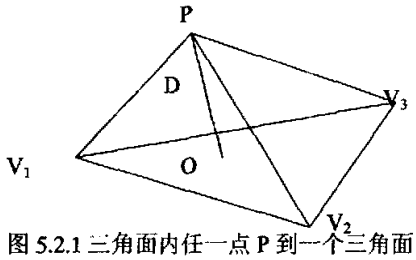


图 5.2.1 三角面内任一点 P 到一个三角面的距离

2) 找到最大的距离 D 所对应的点，判断该最大距离 D 是否大于限值，如果大于一定的限值，将其所对应的点插入到当前处理的三角形中作为特征点，否则该三角形中不插入该点；

3) 在每个三角形中重复 1），2）的操作直到所有的三角形中都无法插入点为止。

通过以上操作，将屋顶的特征点插入到三角网中。

需要注意的是在处理的过程中，每插入一个点，整个三角网会重构。可以在重构三角网以前，先记录下所要插入的所有的点，当三角网中所有的三角形都判断完以后，再将记录下来的点插入三角网重新构网，然后再继续上面的操作。理想情况下，最后一次所构的三角网中的节点都为屋顶特征点。

对于三角形的屋顶而言，理想的情况下插入三角网内的点处于屋脊线上——包括屋脊线的两个端点和屋脊线上的若干点。

图 5.2.2 为对一房屋采用三角网循环剖分重建屋顶的示意图。1，2，3 号点依次被插入到三角网中。图 5.2.2(b)为初始三角网，图 5.2.2(c)为第一次重构时形成的三角网，图 5.2.2(d)为第二次重构时形成的三角网。插入的点全都位于屋脊线上，其中 2，3 号点分别为屋脊线的两个端点。当处理完毕以后屋顶由 8 块面片组合而成。图 5.2.2(f)是重建后房屋的三维透视图,屋顶各坡面之间的交线用白线标识。

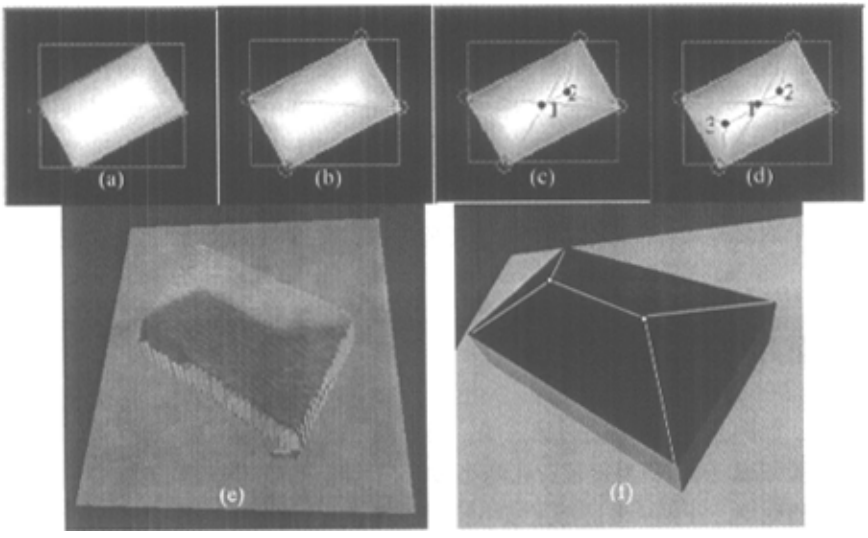


图 5.2.2 房屋一的三角网循环剖分重建屋顶特征点的插入顺序及重建结果

图 5.2.3 为对另一房屋采用三角网循环剖分重建屋顶的示意图。1，2，3,4 号点依次被插入到三角网中。图 5.2.3(b)为初始三角网，图 5.2.3(c)为第一次重构时形成的三角网，图 5.2.3(d)为第二次重构时形成的三角网。插入的点全都位于屋脊线上，其中 3，4 号点分别为屋脊线的两个端点，1，2 号点位于屋脊线上。当处理完毕以后屋顶由 10 块面片组合而成。图 5.2.3(f)是重建后房屋的三维透视图,屋顶各坡面之间的交线用白线标识。

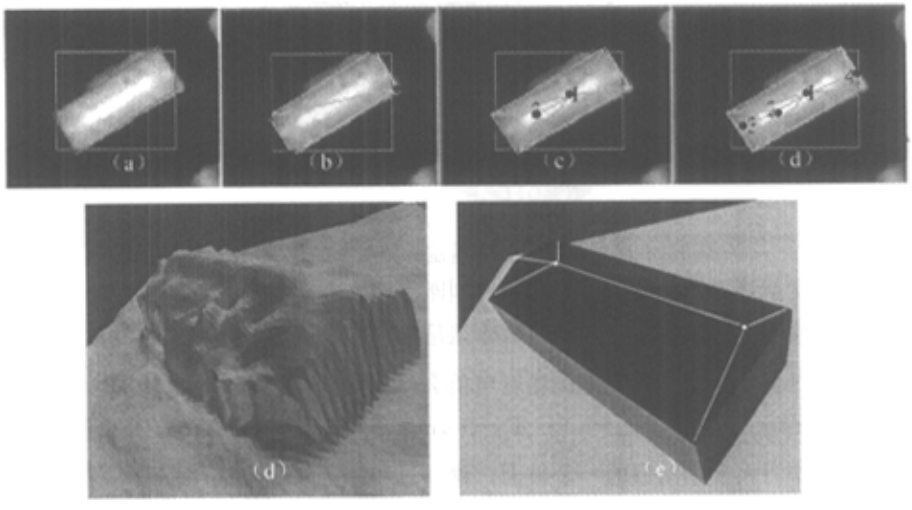


图 5.2.3 房屋二的三角网循环剖分重建屋顶特征点的插入顺序及重建结果

由于此方法为纯数据驱动方式，原理简单，算法效率高，但是其重建质量取决于数

据质量。对于精度较高的数据该方法重建效果良好，但是当数据中存在较多噪声点时，该方法的稳健性不是很好。例如，会有一些噪声点被当作特征点内插到三角网中，使得最后得到的三角面片不能真实反应屋顶形状。图 5.2.2 中的数据质量明显好于图 5.2.3 中的数据质量，从重建结果看，图 5.2.2(e)的效果也比图 5.2.3(e)好很多。

考虑到相同面片内的点在法向量方向上的统计规律应该具有一致性，直接先检测出兴趣区域中的面片来，再通过面片的相交来得到屋脊线，从而完成屋顶重建也是一种选择。

§5.2.2 面片拟合重建屋顶

对于一个多边形所围成的封闭区域，因为采用的是人字型的房屋模型，所以已经存在一些先验知识:例如认为屋顶存在两个坡面，并且这两个坡面的方向是对称的等。根据这些先验知识，首先从多边形区域中检测出组成各面片的点来，再用这些点拟合平面得到房屋的各个坡面，通过坡面相交以获得人字型房屋的屋脊线，通过屋脊线与竖直墙面的相交得到屋脊线的两个端点。如图：当有了屋檐的四个角点（V1,V2,V3,V4）坐标，屋脊线的两个端点(R1,R2)坐标及房屋的屋檐高(H)这 7 个参数以后（如图 5.2.4 所示），就可以确定一个规则四边形的人字型房屋。

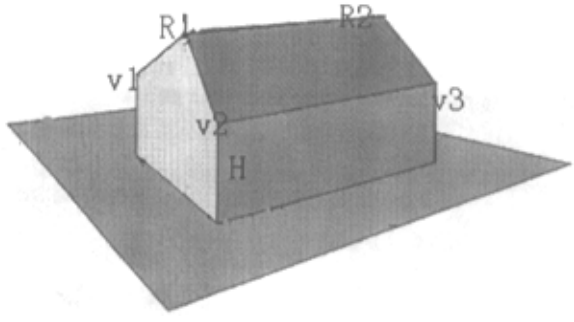


图 5.2.4 简单人字型房屋重建所需 7 个参数

由前文所述之模型选择的方法，当判断房屋为人字型房屋时，我们已经得到了一个法向量方向 D（φ_p，ω_p），很显然这应该是人字型房屋其中一个坡面的法向量方向，考虑到统计时量化的级别和数据的精度可能会产生的一些影响，将多边形区域内所有法向量方向满足:$\varphi_p-5\le\varphi\le\varphi_p+5$ ，$\omega_p-5\le\omega\le\omega_p+5$ 的点记录下来，使用它们来拟合一个平面，作为人字型房屋的一个坡面，这个过程相当于从点集中提取一个平面的过程。同样的，找到和 D（φ_p，ω_p）对称的方向 D（φ_s，ω_s），将多边形区域内所有法向量方向满足:$\varphi_s-5\le\varphi\le\varphi_s+5$ ，$\omega_s-5\le\omega\le\omega_s+5$ 的点记录下来，使用它们来拟合另一

个平面，作为人字型房屋的另一个坡面。

平面拟合时使用如下的方程形式：

$$Z = aX + bY + c \tag{5.2.1}$$

拟合时也采用最小二乘平差模型。将点到平面的距离作为虚拟观测值，以平面方程的系数的改正值为未知数，系数的初始值由已经得到的法向量方向(D(φ_p，ω_p),D(φ_s，ω_s))换算得到。

点到平面的距离如下式：

$$Q = \frac{|aX + bY + c - Z|}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}} \tag{5.2.2}$$

将其用泰勒公式展开，仅保留一次项，对点集中每一个点

$(X_0,Y_0,Z_0),(X_1,Y_1,Z_1),(X_2,Y_2,Z_2),.....(X_n,Y_n,Z_n)$列出误差方程式：

$$\begin{cases} v_{Q_0} = X_0 da/d_0 + Y_0 db/d_0 + c - L_0 \\ v_{Q_1} = X_1 da/d_1 + Y_1 db/d_1 + c - L_1 \\ \qquad\qquad ..... \\ v_{Q_n} = X_n da/d_n + Y_n db/d_n + c - L_n \end{cases} \tag{5.2.3}$$

其中 $d_i = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}$，$L_i = \frac{-a \times X_i - b \times Y_i + Z_i - c}{d_i}$

逐点法化得到法方程形式：$A^T PAX - A^T PL = 0$，求解系数改正量。整个求解的过程是一个迭代的过程，直到改正量的最大值小于限值时迭代停止。

当提取并拟合得到人字型房屋的坡面以后，求出这两个平面的交线，屋脊线正位于此直线上。将该直线与边缘直线段所围成的多边形相交，得到两个交点，作为屋脊线的两个端点。将两个坡面与各个墙面相交，可以得到屋檐的高度（本文中取平均值作为屋檐高度）。

此方法为模型驱动与数据驱动相结合的方式，主要是根据相同面片内点的统计规律应该具有一致性。该方法只要大部分点满足一致性就可以得到较正确的结果，因而有较好的抗噪性，比较稳健，但是因为事先需使用一个模型作为参照，通用性不强。

对前一节中的两个实验房屋采用面片拟合的方法重建屋顶。

图 5.2.5 是对第一个房屋采用面片拟合重建的结果，图 5.2.5(a)是轮廓线平差后获得的边缘直线段，它们构成房屋完整的轮廓，为做统计提供了兴趣区域。图 5.2.5(b)中 1 所对应的黑色表示用来拟合人字型房屋一个坡面的点集，2 表示用来拟合和其对称的另一个坡面的点集。图 5.2.5(c)中 ab 是两个坡面相交获取的屋脊线，图 5.2.5(e)是重建结果的三维透视图，屋顶各坡面之间的交线用白线标识,从中可以看出重建效果良好。

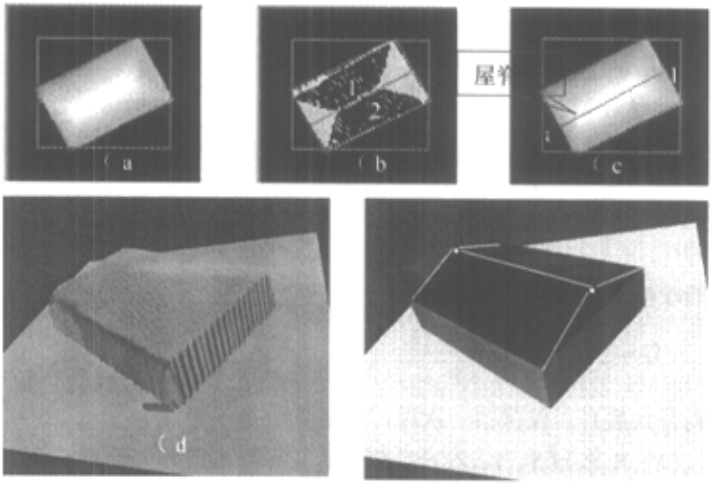


图 5.2.5 房屋一面片拟合重建屋顶结果

图 5.2.6 是对第二个房屋采用面片拟合重建的结果。图 5.2.5(b)中 1 所对应的黑色表示用来拟合人字型房屋一个坡面的点集，2 表示用来拟合和其对称的另一个坡面的点集。图 5.2.6(c)中 ab 是两个坡面相交获取的屋脊线。图 5.2.6(e)是重建结果的三维透视图，屋顶各坡面之间的交线用白线标识。由于数据质量的问题，采用面片拟合重建屋顶显然比三角网循环剖分要稳健，从图 5.2.6(e)可以看出，它比采用三角网循环剖分重建的结果要好一些。

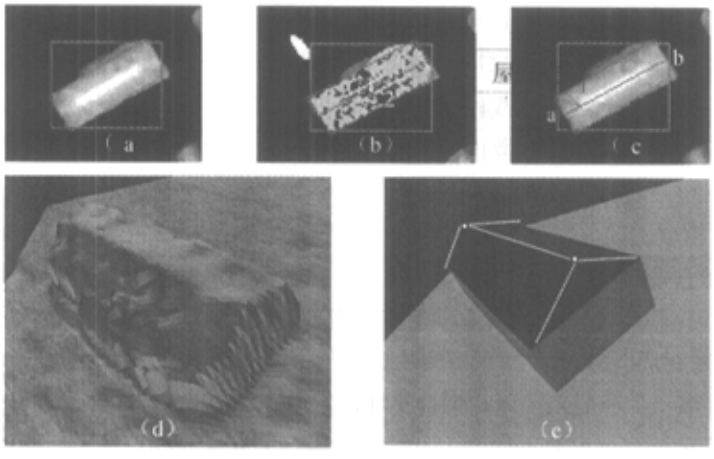


图 5.2.6 房屋二面片拟合重建屋顶结果

第六章 总体实验与分析

§6.1 实验资料与实验平台

本文采用的实验数据是由 LIDAR 数据生成的 DSM，原始数据为 ASCII 文本文件。文件格式如下所示：

```
ncols          627
nrows          445
xllcorner      25059.25
yllcorner      8814.75
cellsize       0.50
NODATA_value   -9999.00
25.16   25.14   25.13   25.13   25.13   25.13   25.13   25.13   25.11
25.09   25.07   25.04   25.02   25.00   24.99   24.99   24.98   24.99
25.00   25.01   25.03   25.04   ……
```

其中，ncols 为 DSM 格网的列数，nrows 为 DSM 格网的行数，xllcorner，yllcorner 为 DSM 左上点的平面坐标，cellsize 为格网间距，即分辨率，NODATA value 为用于填充无高程数据点的值，其后跟随的为顺序存放的各格网点的高程值。

为了能够给人以直观的显示，将 DSM 按照高程进行灰度量化，转化成灰度影像，在本文中，将此影像称为 DSM 影像。如图 6.1.1 所示。

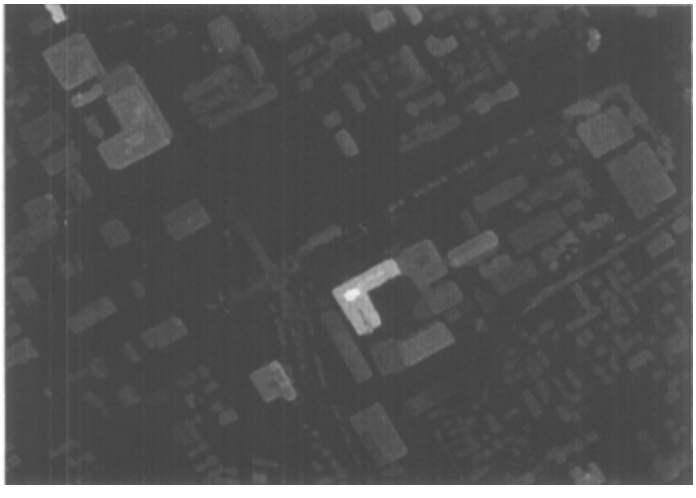


图 6.1.1 日本东京筑波地区(局部)DSM 影像

图 6.1.2 为从 LIDAR 数据中重建多层次多直角房屋的实验平台 DSMTOMODEL 的界面。该实验平台主要实现了以下功能：

- DSM 数据的装载，直接由 ASCII 码文件按照高程进行量化生成 DSM 影像。
- DSM 影像的预处理，包括 DSM 数据的平滑(使用中值 SUSAN 滤波器)、DSM 重采样、从 DSM 数据中提取地形表面等工作。
- 基于 MeanShift 的影像分割，等高线跟踪获得层次轮廓线，分段直线拟合，附加约束条件的轮廓平差。
- 法向量分析选择房屋模型，三角网循环剖分重建人字型房屋，面片拟合重建人字型房屋。
- 实现了数据的基本浏览功能：放大，缩小，漫游；同时提供了三维显示模块，用以实时浏览原始 DSM 和重建结果的三维透视图，并可以进行旋转，放缩，鼠标漫游等操作。

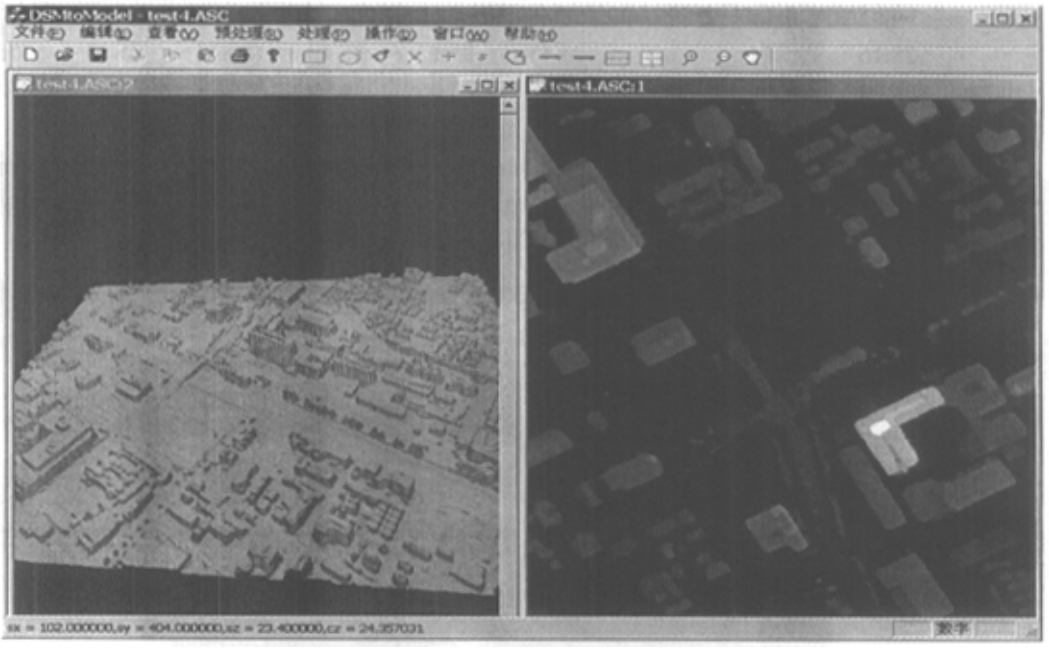


图 6.1.2 实验平台 DSMTOMODEL 的界面

§6.2 影像分割实验

图 6.2.1 为对其采用基于 MeanShift 的影像分割算法对图 6.1.1 进行分割的结果，从中可以看到，影像分割效果良好，基本上各房屋区域都被分离开了，为后期处理带来很

大的便利。

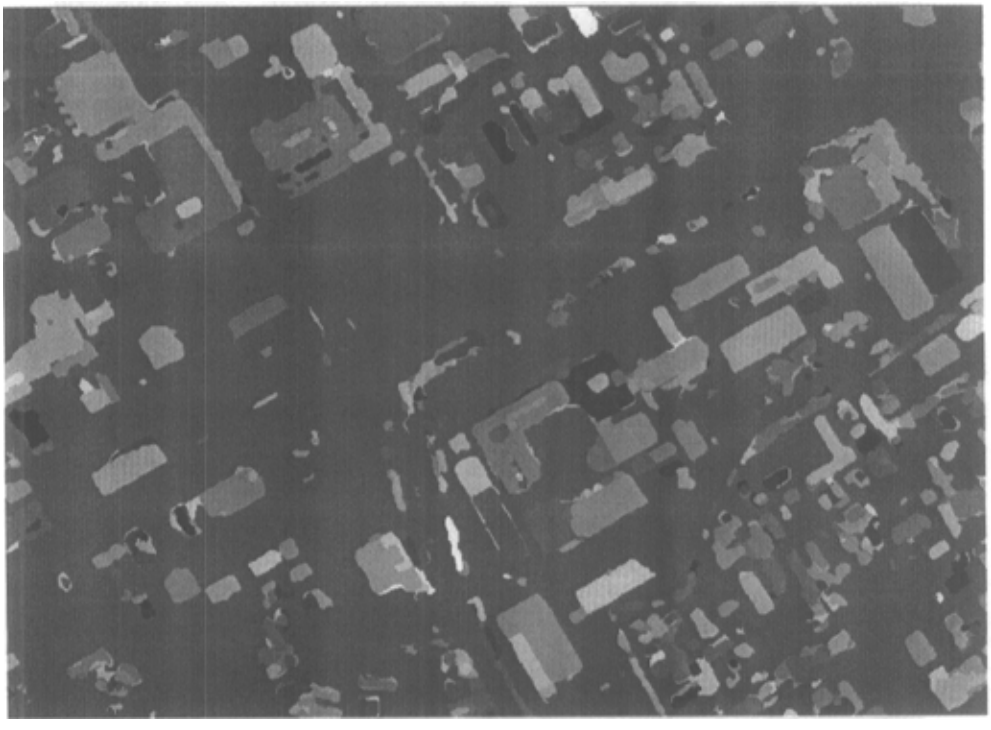


图 6.2.1 基于 MeanShift 的影像分割结果

§6.3 等高线跟踪及判断准则的实验

图 6.3.1（a）为对分割后的 DSM 影像进行等高线跟踪的结果。该结果不仅得到了房屋各层次的轮廓线，而且得到了其他一些“假”房屋区域（如：树木，汽车等）的轮廓。根据第三章中所述的一些判断准则过滤掉这些“假”房屋区域，结果如图 6.3.1（b）所示。从图中可以看出虽然有一些尺寸过小的房屋也同时被滤除掉了，但是主要房屋区域都得以保存，独立的树木，车辆等都被滤除掉了。

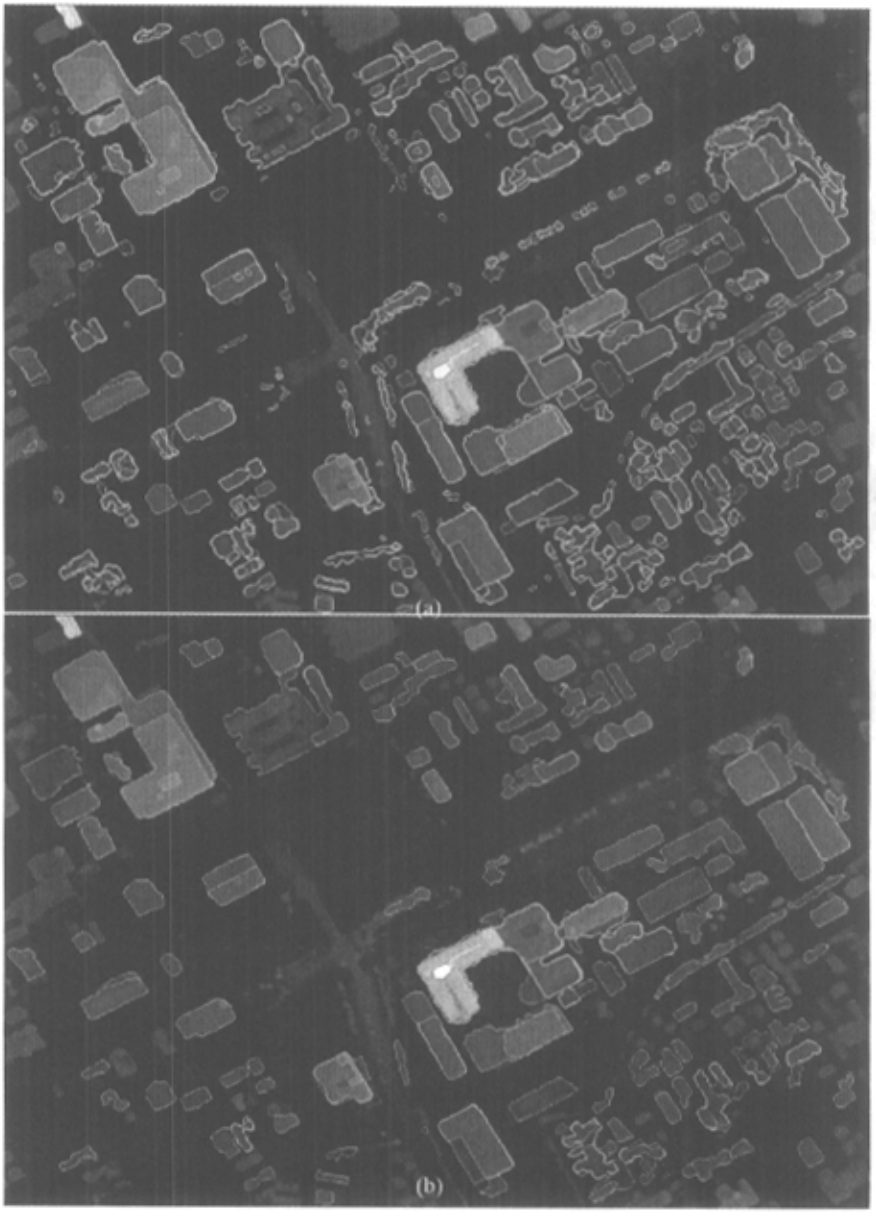


图 6.3.1 等高线跟踪获取轮廓线及滤除部分“假”房屋的结果

§6.4 多直角多层次房屋自动重建实验

实验 1：

这是一栋较低复杂度的多层次，多直角房屋，由区域分割和等高线跟踪得到房屋的各个层次，分成五层。图 6.4.1(a)为原始 DSM 影像，重建后房屋平面轮廓直线段与 DSM 影像的叠合如图 6.4.1(b)所示。从中可以看到，各相邻墙面之间的垂直关系都得到了满足。从重建结果的三维透视图 6.4.1(d)上可以看到各层次的重建效果，比较令人满意。各层次轮廓平差以后的中误差如表 6.4.1 所示。

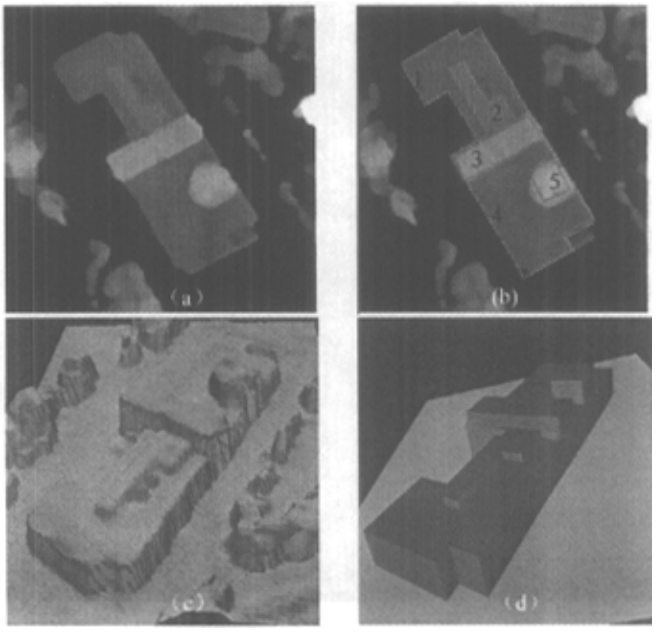


图 6.4.1 房屋一的三维重建

层次	中误差
1	0．625325m
2	0．589100m
3	0．606196m
4	0．621134m
5	0．969243m

表 6.4.1 房屋一各层次轮廓平差后的中误差列表

实验 2：

这也是一栋较低复杂度的多层次，多直角房屋，其中直角较多，并且房屋结构也稍显复杂，主要是房屋的附属部分比较多。由区域分割和等高线跟踪得到房屋的各个层次，共五层。重建后房屋平面轮廓直线段与 DSM 影像的叠合如图 6.4.2(b)所示。各层次轮廓平差以后的中误差如表 6.4.2 所示。从整体上看，房屋的各个层次都被正确重建并且墙面之间的直角正交关系得到了很好的满足，有些轮廓直线段由于直角约束条件太强被打断成两条相互垂直的直线,如图 6.4.2(b)中 AB 之间的直线段属于此种情况

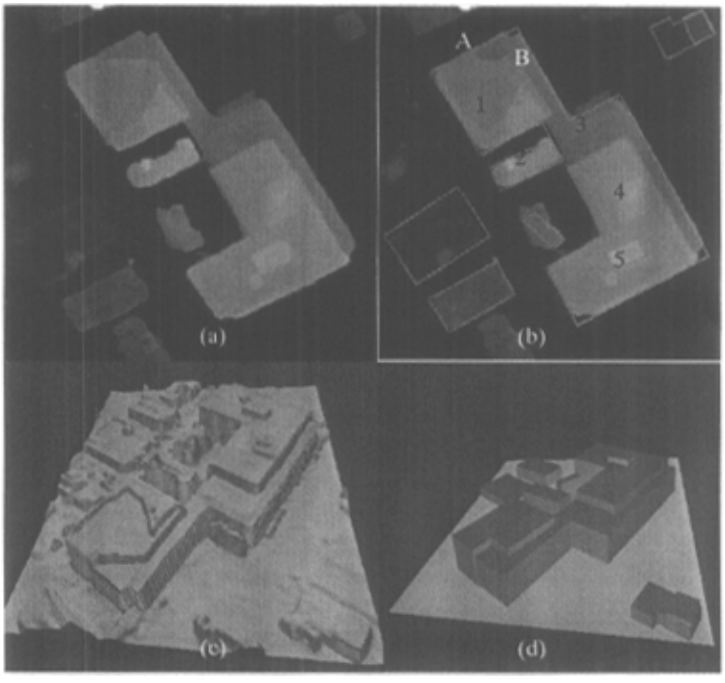


图 6.4.2 房屋二的三维重建

层次	中误差
1	1．356272m
2	0．891707m
3	1．002221m
4	0．689422m
5	0．482414m

表 6.4.2 房屋二各层次轮廓平差后的中误差列表

实验 3：

这是一栋中等复杂度的多层次，多直角房屋，房屋轮廓直线段构成的多边形有凹多

边形，而且其中一些连接边极短，一般的边缘提取很可能无法提取出这些边缘。由区域分割和等高线跟踪得到房屋的各个层次。拟合直线并进行轮廓平差后，将轮廓直线段与原始 DSM 影像叠加。从图 6.4.3(b)中可以看到，各相邻墙面之间的垂直关系都得到了较好的满足。从结果的三维透视图可以看到，各层次都被重建出来，屋顶上的水箱或者阁楼等物也没有漏过。各层次轮廓线平差以后的中误差如表 6.4.3 所示。

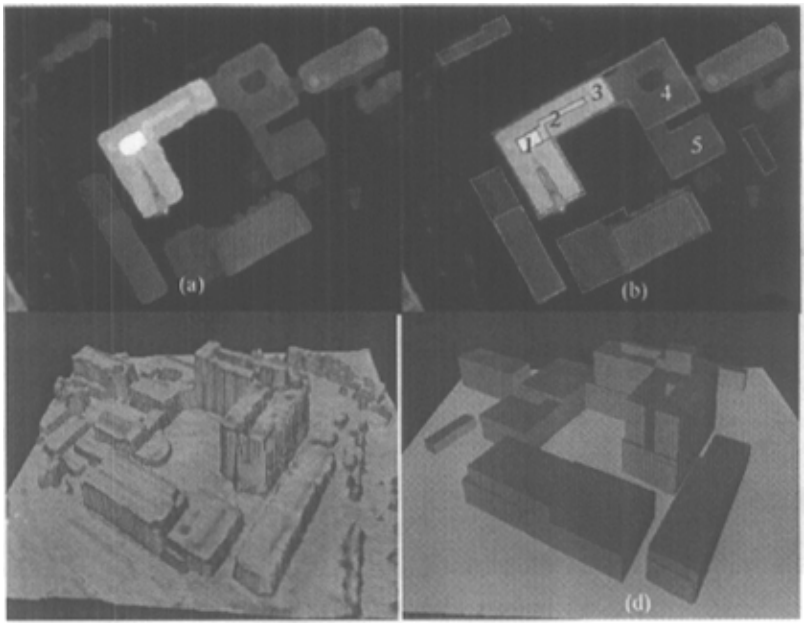


图 6.4.3 房屋三的三维重建

层次	中误差
1	0. 805003m
2	0. 665862m
3	0. 807166m
4	1. 031273m
5	0. 879030m

表 6.4.3 房屋三各层次轮廓平差后的中误差列表

实验 4

这是一栋较复杂的多层次，多直角房屋，房屋层次较多，直角很多，房屋结构比较复杂，即使是人工也较难辨别出其组合结构。采用本文所述方法对其进行重建，有些层次因为轮廓线平差后的中误差较大，会被剔除（如图 6.4.4(b)中编号为 7，8，9 的层次）在平面结果图中用蓝色线绘制，其中有一块树木区域，由于其形状与规则多边形不符，

轮廓线平差后中误差较大，被判断为“假”房屋区域而被剔除（图中用“树木”标识）。从重建的结果看，房屋的主要部分基本都被正确重建，并且房屋的墙面之间的直角正交关系都得到了满足。各层次轮廓线平差以后的中误差如表 6.4.4 所示。

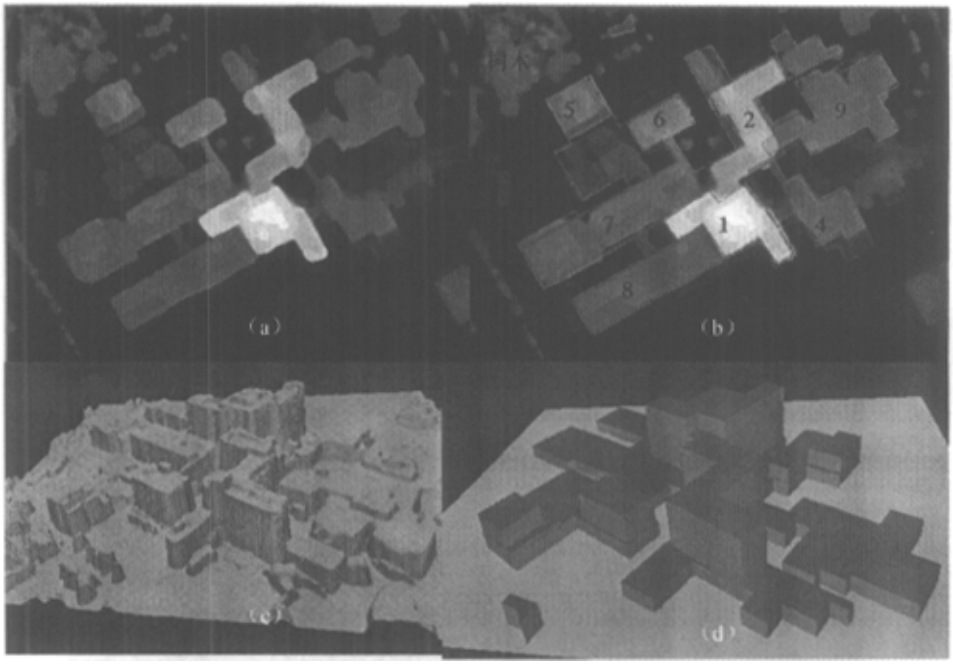


图 6.4.4 房屋四的三维重建

多层次房屋各层次轮廓平差后的中误差	
层次	中误差
1	1．288647m
2	1．465544m
3	1．228213m
4	1．314591m
5	0．743102m
6	0．764705m
7	1．653851m
8	1．768432m
9	1．985321m

表 6.4.4 房屋四各层次轮廓平差后的中误差列表

§6.5 房屋模型选择及人字型屋顶重建实验

对每个多边形区域进行法向量分析，判断房屋类型，然后选择模型。如在图 6.5.1 中，经过法向量分析，得出 1，2，3，4，5，6，7 栋房屋为人字型房屋，需要重建屋顶。

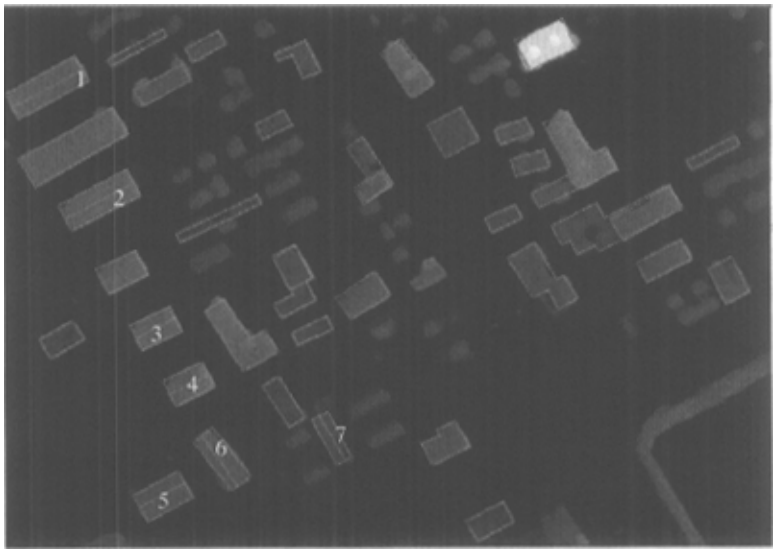


图 6.5.1 通过法向量分析选择重建房屋模型

自动判断房屋模型进行重建的结果如图 6.5.2：其中人字型房屋的屋顶用蓝色绘制，平顶房屋的屋顶用红色绘制。其中 1，2，3，4，5，6，7 栋房屋为人字型房屋，并重建出了屋顶，图 6.5.3 为重建的一些人字型屋顶的局部细节图。

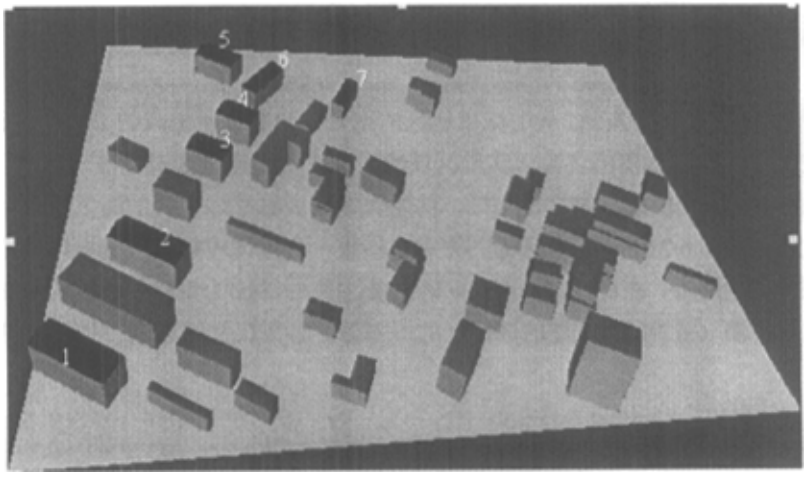


图 6.5.2 自动判断房屋模型并重建屋顶的结果

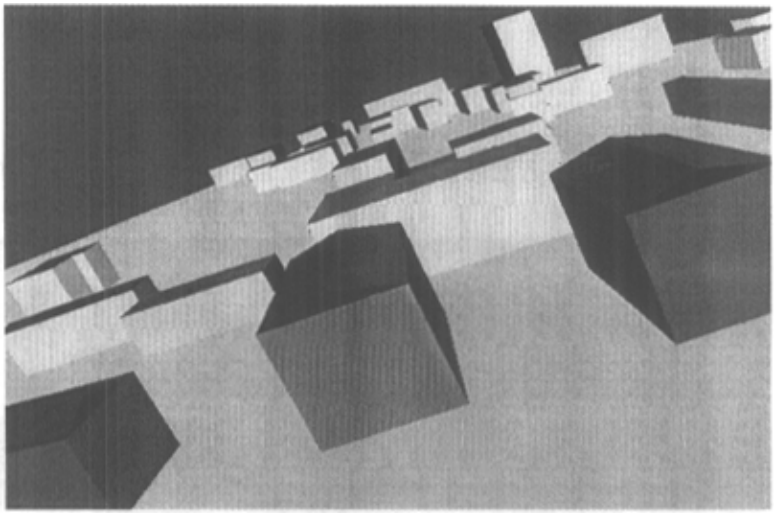


图 6.5.3 重建的人字型房屋屋顶的细节图

图 6.5.4 是将两栋人字型房屋通过面片拟合重建屋顶后的平面矢量结果套合在 DSM 影像上的效果图。从中可以看出，屋脊线得到正确的重建，与在 DSM 影像上所反映出的屋脊线是一致的。

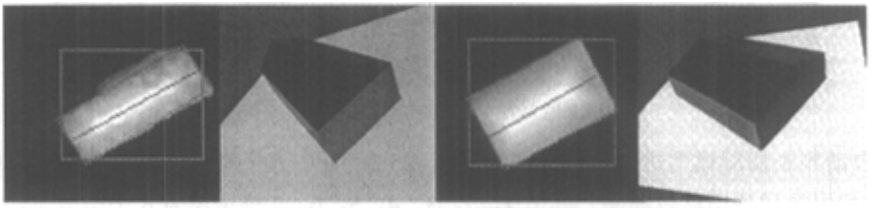


图 6.5.4 重建的人字型房屋屋顶的细节图

§6.6 城市三维重建实验

采用上文中所述的方法，从由城市地区的激光扫描数据所生成的 DSM 中提取并重建房屋进行三维城市重建的实验。实验区域为日本东京银座地区及筑波地区。图 6.6.1 是银座地区 DSM 影像及三维重建结果，房屋大多高大巍峨，主要的街区景观都得到了较好的重建。图 6.6.2 为筑波地区的三维重建结果，房屋比较低矮，分布比较零散，其中有一栋人字型房屋，在图中以 gable 标记出来。图 6.6.3(a)为重建的街区的一部分，效果比较理想。图 6.6.3(b)为重建的居民区的一部分，各居民楼的朝向，排列等都得到了较好的反映。

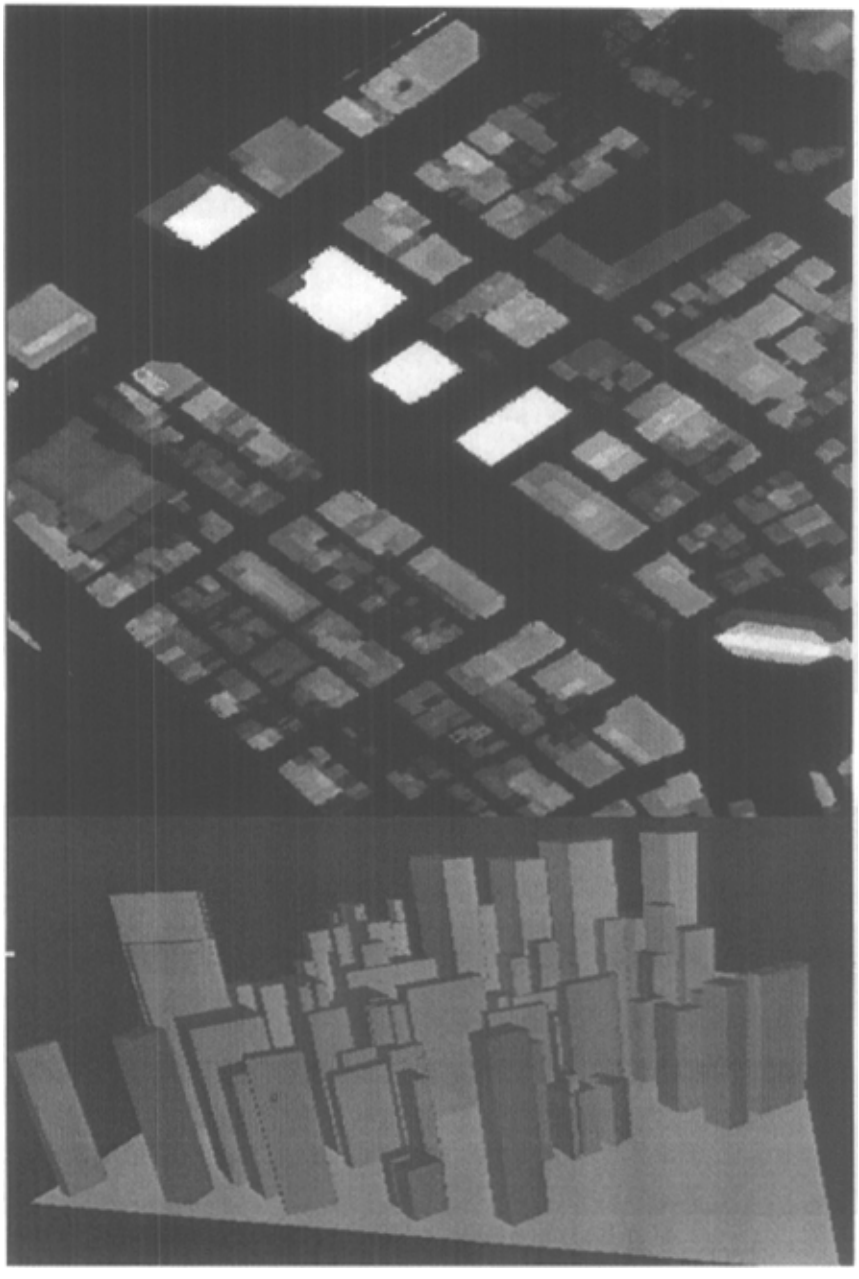


图 6.6.1 银座地区 DSM 影像及三维重建结果

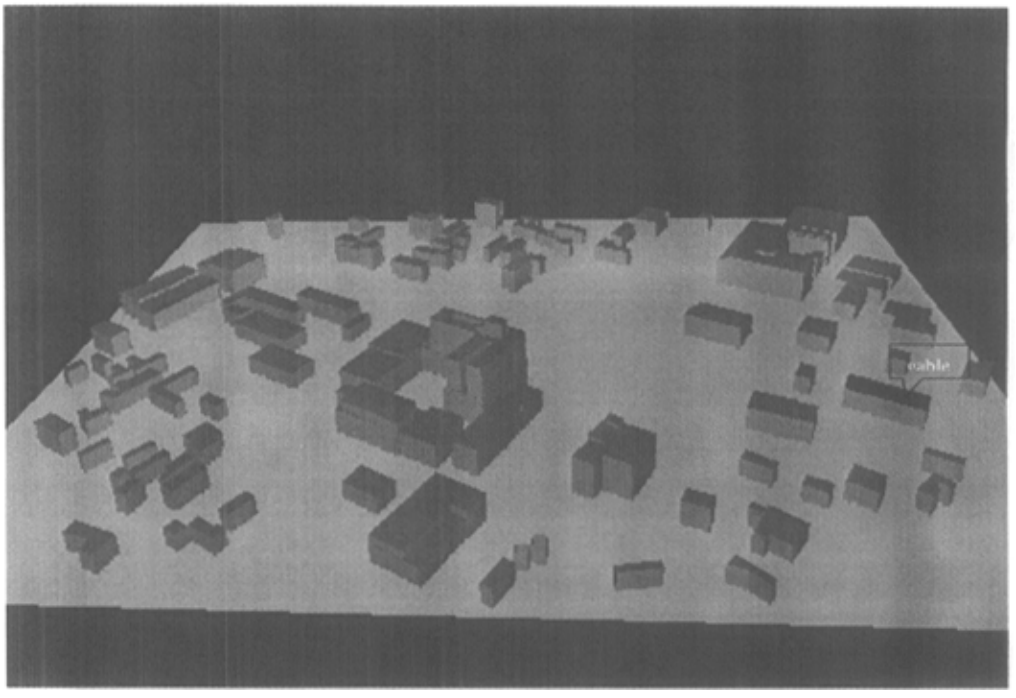


图 6.6.2 筑波地区三维重建结果，其 DSM 影像如图 6.2.1 所示

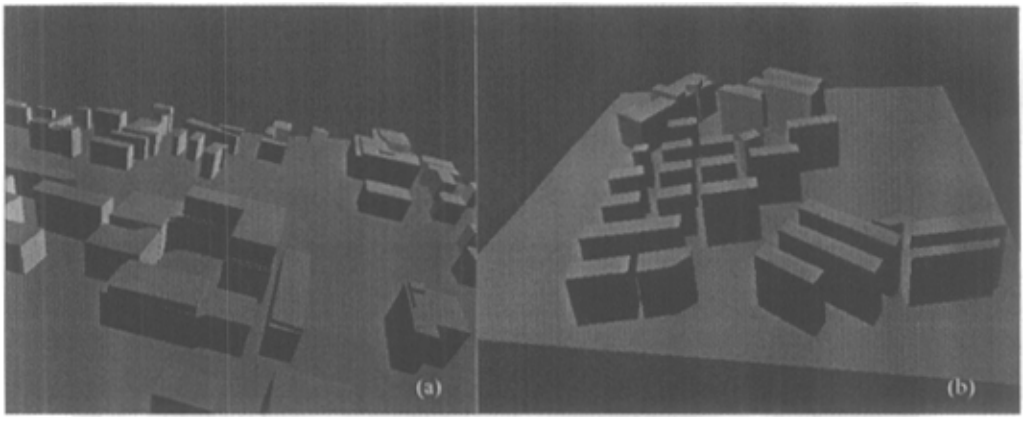


图 6.6.3 重建的街区与居民住宅区效果图

第七章 结论与展望

本文从 LIDAR 数据的特点出发，采用简单、可靠的一些基本原理和准则来完成从由 LIDAR 数据所生成的 DSM 中重建出多层次多直角的房屋。使用的主要方法有：几何空间推理，图像处理，最小二乘平差等。重建的过程中尽量顾及了房屋的层次结构特点，使其平面形状和屋顶形状更加符合实际情况。采取了简单有效的方法使得处理局部化，获取处理兴趣区域。在房屋的检测过程中采取一些有效措施将房屋和其他非房屋区域分离开。

本文采取了一些新的思路与方法以满足上述一些基本准则，主要包括以下内容：

- 针对处理局部化这个关键问题，本文采用等高线跟踪的方法来获得处理的兴趣区域使得处理局部化并同时获得多层次房屋每一层次的封闭边缘，使用等高线作为联系 DSM 与房屋模型的桥梁。
- 通过采用最小二乘模型进行轮廓平差以确定多层次多直角房屋满足各种约束条件的角点坐标。
- 利用轮廓平差以后的中误差作为度量来衡量轮廓线与直角规则形状的差异程度，用来滤除一些“假”房屋区域。
- 通过对兴趣区域的法向量的方向进行统计分析来确定房屋类型并重建屋顶。
- 充分利用三角网对面片表现的优势，采用三角网的循环剖分简洁高效的重建屋顶。

由于仅从 DSM 中重建房屋可以利用的推理线索有限，加之 DSM 数据中房屋本身的复杂性，本文所阐述的方法也无法解决在重建中所面对的所有问题。比如：本文尚未建立房屋各个层次之间的拓扑关系，无法满足进一步的分析应用的需要。现阶段的研究一般都是针对具体的应用使用具体的处理方法，尚无一种方法能够完全解决所有问题。随着激光测距技术的不断进步与发展，获取的空间数据会越来越精确，在可以预见的将来，新的理论与新的处理方法也将不断涌现，总的发展趋势为：

- 将 LIDAR 数据和其他数据源所获得的数据结合起来进行集成处理，综合各种数据自身的优势，以获取更多的线索进行重建。
- 对重建模型的描述日趋多样化，从一般较为简单的人字型房屋模型和平顶房屋模型向其他更为复杂的模型发展，如：各种曲线型及多重结构的组合模型等。总之建筑物模型由简单到复杂，由特殊到一般，由固定到灵活组合，能够更好的符合实际的建筑物情况。

- 目标知识，几何空间推理的利用更加的全面与深入。从独立的点、线、面发展到建立它们之间的拓扑关系，使用一些新的概念以描述人工地物的三维拓扑。通过三维拓扑获取更多的推理线索，将孤立的结构相互联系起来，以望获得较精确的房屋完整结构描述。
- 处理方法从对特殊情况的处理向通用方式发展，处理的方式更加的自动化、智能化与实用化，为一套系统完整、自动化程度高、稳健的 LIDAR 数据处理软件的出现奠定基础。

参考文献

【1】. 江万寿，2004.航空影像多视匹配与规则建筑物的自动提取方法研究.[博士学位论文]，武汉大学.

【2】. 张小红，2002. 机载激光扫描测高数据滤波及地物提取.[博士学位论文]，武汉大学.

【3】. 程曦冉，2003.多直角多层次房屋半自动提取.[硕士学位论文]，武汉大学.

【4】. 季铮，2003. 基于 LIDAR 数据与 IKONOS 影像的房屋三维重建.[硕士学位论文]，武汉大学.

【5】. 尤红建，2001，基于三维遥感数据的快速处理与建筑物提取.【博士学位论文】，中国科学院遥感应用研究所.

【6】. GuoTao, 2003,3D City Modeling Using High-resolution Satellite Image and Airborne Laser Scanning Data.[博士学位论文]，东京大学.

【7】. YongHu,2003,Automated Extraction of Digital Terrain Models ,Roads and Buildings Using Airborne Lidar Data. [博士学位论文]，卡尔加里大学.

【8】. 尤红建，苏林，李树楷.利用机载三维成像仪的 DSM 数据自动提取建筑物.武汉大学学报信息科学版，vol.27,No.4,2002.

【9】. Haala, N. and C. Brenner, 1997: Generation of 3D city models from airborne laser scanning data. Proceedings EARSEL workshop on LIDAR remote sensing on land and sea, pp. 105—112, Tallin, Estonia.

【10】. Claus Brenner. Building Reconstruction from Laser Scanning and Image. Proc. ITC Workshop on Data Quality in Earth Observation Techniques, Enschede, The Netherlands, November 2003.

【11】. E.Ahokas, H.Kaaartinen, J.Hyyppa. A Quality Assessment of Airborne Laser Scanner Data. ISSN 1682-1750 VOLUME XXXIV, PART 3/W13. 2003.

【12】. George Vosselman, Sander Dijkman. 3D Building Model Reconstruction from Point Clouds and Ground Plans. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXIV-3/W4:37-43, 2001.

【13】. George Vosselman. Fusion of Laser Scanning Data, Maps, and Aerial Photographs for Building Reconstruction. 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium and the 24th Canadian Symposium on Remote Sensing, Theme: Remote Sensing: Integrating Our View of the Planet IGARSS, Toronto, June 24 - 28, 2002.

【14】. Hans-Gerd Maas, George Vosselman. Two algorithms for extracting building models from raw

laser altimetry data. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 153-163. 1999.

【15】. George Vesselman. Building Reconstruction Using Planar Faces in very High Density Height Data. International Archives of Photogrametry and Remote Sensing, Vol32, Part3-2W5, 87-92. 1999.

【16】. F. Rottensteiner*, Ch. Briese. A New Method For Building Extraction In Urban Areas From High-Resolution Lidar Data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing", Volume XXXIV / 3A (2002), ISSN 1682-1750; 295 - 301.

【17】. Morgan M. and Tempeli K. (2000). Automatic BuildingExtraction from Airborne Laser Scanning Data. Proceeding of the 19th ISPRS Congress, Book 3B, pages: 616-623, Amsterdam.

【18】. Zhao B. and Trinder J. (2000). Integrated Approach Based Automatic Building Extraction. Proceeding of the 19th ISPRS Congress, Book 3B, pages: 1026-1032, Amsterdam.

【19】. C. Baillard¤. 3-D Reconstruction of Urban Scenes from Aerial Stereo Imagery:A Focusing Strategy. Computer Vision and Image Understanding Vol. 76, No. 3, December, pp. 244–258, 1999.

【20】. Baltsavias E P : A comparison between photogrammetry and laser scanning. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. 1999, 54(2/3): 83-94.

【21】. Hyyppã J, et al. : Algorithms and Methods of Airborne Laser Scanning for Forest Measurement. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. 2004, 36(Part8/W2): 82-89

【22】. Christian Frueh, Avideh Zakhor. Constructing 3D City Models by Merging Ground-Based and Airborne Views. 2003 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '03) - Volume II.

【23】. Hans-Gerd Maas, George Vosselman. Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 153-163. 1999.

【24】. Uwe Weidner, Wolfgang Forstner. Towards Automatic Building Extraction from High Resolution digital Elevation Models. ISPRS, 50(4), 38-49. 1995.

【25】. Uwe Weidner. Digital Surface Models for Building Extraction. in: A. Grün (Ed.): Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II), 1997.

【26】. Suya You, Jinhui'Hu, Ulrich Neumann, Pamela Fox. Urban SiteModeling From LiDAR. The Computer Graphics and Immersive Technologies (CGIT) laboratory. 2003.

【27】. Tao, V., Wang, Y., Mercer, B., Zhang, Y., 2001. Automatic reconstruction of bald digital terrain models from digital surface models generated from an airborne SAR system, International Symposium on Mobile Mapping Technology, 3-5 January, Cairo, 11 p.

【28】. Tao, V., Hu, Y., 2001. A review of post-processing algorithms for airborne LIDAR data, ASPRS Annual Conference, 23-27 April, St. Louis, 12 p.

【29】. Kraus, K. and N. Pfeifer. 1997. A new method for surface reconstruction from laser scanner data. IAPRS 32:80-86.

【30】. Kraus, K. and N. Pfeifer. 1998. Determination of terrain models in wooded areas with ALS data. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 53:193-203.

【31】. Briese, C. and N. Pfeifer. Airborne laser scanning and derivation of digital terrain models. Grun and Kahmen. 5th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques. 80-87. 2001. Ref Type: Conference Proceeding

【32】. Kraus, K. and N. Pfeifer. 2001. Advanced DTM generation from LIDAR data. IAPRS 34-3/W4:23-30.

【33】. Stephen M, Smith J. Michael Brady. SUSAN-A New Approach to Low Level Image Processing. International Journal of Computer Vision ,1997.23(1):45~78

【34】. http://www.gisdevelopment.net/application/urban/products/urbanp0007pf.htm

【35】. 李乡儒，吴福朝，胡占义.均值漂移算法的收敛性.软件学报，vol.16,No.3,2005.

【36】. D. Comaniciu, P. Meer. Mean Shift ： A Robust Approach Toward Feature Space Analysis.IEEE TRANSACTION ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE, VOL.23,NO.5.MAY 2002

【37】. D. Comaniciu, P. Meer. Mean shift analysis and applications. 7th International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Greece, September 1999, 1197-1203

【38】. D. Comaniciu, P. Meer. Robust analysis of feature spaces :Color image segmentation. 1997 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Juan, Puerto Rico, June 1997, 750-755

【39】. Yizong Cheng.Mean shift, mode seeking, and clustering.Pattern Analysis and Machine Intelligence, lEEE Transactions on Volume 17, Issue 8, Aug. 1995 Page(s):790 - 799.

【40】. 李德仁,金为铣,尤兼善,朱宜萱,基础摄影测量学,测绘出版社,1995.

【41】. 张祖勋,张剑清,数字摄影测量学,武汉测绘科技出版社,1996 年 11 月.

【42】. 武汉大学测量平差教研室. 测量平差基础. 测绘出版社. 北京. 1996.

【43】. 李德仁,郑肇葆,解析摄影测量学,测绘出版社,1992 年 10 月.

【44】. 崔屹,影像处理宇分析数学形态学方法及应用,科学出版社,2000 年 4 月.

【45】. 贾云得，机器视觉,科学出版社,2000 年 4 月.

后记

“饮其流者怀其源，学有成时念吾师”，在论文完成之际，让我倍受感动的是学习和做论文过程中获得来自各方面的指导和帮助，这些宝贵的支持给予我完成学业的启迪、鼓励和鞭策，在此谨向他们表达我深切的谢意。

首先，深深感谢导师江万寿副研究员在我硕士学习期间，对我在学习上的悉心指导与帮助，在生活上的关心与照顾。江老师学识渊博，思维开阔，敢于创新，也鼓励创新；在尘世浮华中，江老师能够静下心来做自己喜欢的研究，尤显珍贵。从江老师那里我学习到的不仅仅是一些知识，更重要的是学习到了思考的方法、做事的方式以及做人的态度，这深深的影响了我，让我对以后的道路充满信心。江老师不仅是良师亦是益友，在此向老师致以崇高的敬意和衷心的感谢。

感谢张剑清教授，潘励老师，刘亚文老师在论文上给予的指导。

感谢学友王志和、陈功、程琦、季顺平、刘利力、谢酬、程莹、徐丽华、谢俊峰等，在我最困难的时候，他们的鼓励与帮助是我坚持与前进的动力。感谢艾烨同学在论文写作过程中的鼓励和督促。

感谢师兄张过博士，黄先锋博士，与他们的交流让我获益甚多。感谢中国测绘科学院的梁欣廉和南京大学国际地球系统科学研究所的李艳老师在论文完成的过程中提供的各种帮助。

感谢我的父母和妹妹，他们对我的关怀与照顾是我今生最大的幸福。

阎平

二零零五年五月