

# 基于机载激光雷达数据的简单规则 建筑物模型重建

梁欣廉 张继贤 李海涛

(中国测绘科学研究院, 北京 100039)

**摘要** 机载激光雷达数据具有直接描述对象几何特征、便于表达空间不连续变化等优势,是建筑物重建的主要数据源之一。为实现基于激光雷达点云数据的模型自动重建和解决现有方法存在的问题,提出了一种基于特征线提取、面向简单规则建筑物的重建方法。该方法以投影为基础,以平高分解为手段,通过在多个投影平面内逐步确定平面、高程信息实现特征线提取及模型重建。实验表明,该方法能够避免现有方法遇到的若干困难,有效重建简单规则建筑物模型。

**关键词** 机载激光雷达 平面/人字形/三角形屋顶 投影 平高分解 模型重建

**中图分类号**: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)04-0641-07

## Regular Building Model Reconstruction from Airborne Laser Scanning Data

LIANG Xin-lian, ZHANG Ji-xian, LI Hai-tao

(Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039)

**Abstract** Regular building model, characterized by rectangular outline and flat/slope/gable roof, is a general construction style, widely existing as either independent building or components of complex one. This study proposed an algorithm for building model reconstruction from airborne laser scanning data, based on feature line detection and separation of planimetric and height computations. The workflow is composed of five steps. First, ridge direction is detected in a series of horizontal plans between eaves and ridge of different heights. Second, points on the ridgeline are identified in a set of vertical sections, perpendicular to the ridgeline and within building extent. Third, planimetric parameters of feature lines are detected according to points located on them. Forth, height information is determined in vertical sections that go through each line. At last, 8/10 coordinates are determined and a building model is established.

**Keywords** airborne laser scanning/LIDAR, flat/slope/gable roof, projection, separation of planimetric and height computation, building model reconstruction

## 1 引言

建筑物3维信息自动提取是摄影测量、计算机视觉领域研究的重点和难点问题。传统的建筑物3维信息提取技术主要以光学数据为处理对象;随着(机

载)激光雷达技术的成熟和广泛应用,基于点云数据的建筑物模型重建技术正显示出越来越重要的价值。

激光雷达(light detect and ranging, LIDAR),即激光扫描(laser scanning),数据是分布于对象表面的3维点坐标,其数据集(点云)是对象的数字表面模型。与航空摄影测量技术相比,机载激光雷达在

**基金项目**: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2006CB701303, 2002CCA04700); 国家高技术发展研究计划“863”项目(2003AA135010); 地理空间信息工程国家测绘局重点实验室开放研究课题(200601)

**收稿日期**: 2005-08-19; **改回日期**: 2006-02-09

**第一作者简介**: 梁欣廉(1980~), 男。2005年获中国测绘科学研究院摄影测量与遥感专业硕士学位。主要研究方向为机载激光雷达数据处理与应用研究。E-mail: liangxl@cas.m. ac. cn

表现对象几何特征上更加直接,在描述不连续变化上更具优势且自动化程度更高<sup>[1]</sup>,被认为有望解决传统技术遇到的某些瓶颈问题(如阴影、遮挡等)并推动相关技术发展。基于激光雷达数据的建筑物模型重建方法是当前研究的热点问题,有些方法已能重建出复杂建筑物或细节信息(如阁楼、烟囱等),但距离实用化还有一段距离。

建筑物 3 维重建所采用的策略大体可分为两类:(1) 直接提取特征线、面,经组合得到模型<sup>[2-8]</sup>;(2) 分解复杂对象,重建简单建筑物单元,经布尔运算获得最终模型<sup>[9,10]</sup>。其中,特征线、面提取是两类方法的基础,依据实现思想的不同,可以划分为以下两类:

(1) 先提取特征面,再利用面相交得到特征线<sup>[2,4,5,8]</sup>。这种方法通过判断点属性(相邻点形成平面的参数<sup>[3,4]</sup>)是否相同实现,具有思路简单的特点,但计算比较复杂,因确定平面参数需采用迭代、3 维 Hough 变换等手段。

(2) 先提取特征线,再通过组合得到特征面。这种方法实现起来有一定困难,因为较光学图像而言,这种方法从点云数据中提取特征线更困难,但其具有运算简单的优势,而且通过特定方法可以取得良好效果,如文献[6]提出的在特定投影平面上寻找特征线的方法。但是,该方法中还存在几个问题,如投影数据细化、激光脚点分布统计及投影点阈值选取等。此外,数据集旋转不仅会增加计算量,还可能对结果精度造成影响。

本文以分解/组合思路为基础,以经分解得到的独立规则建筑物单元(具有矩形外边界和平面、人字形屋顶)为处理对象,以特征线提取为手段,提出了一种基于投影的特征线平高分解方法。实验表明,该方法能避免现有方法中遇到的问题,有效重建简单规则建筑物,得到供组合使用的模型。实验中,以独立规则建筑物来模拟经分解得到的建筑物单元。

## 2 原理与方法

### 2.1 建筑物(单元)模型

作为一种基本建筑模式,具有矩形边界、平面/人字形屋顶的建筑物广泛存在于日常生活。除独立存在外,该模式还是许多复杂建筑物的组成部分。描述这类建筑物模型可采用不同方式,以下采用参数模型,即使用数量有限的可变参数描述结构固定的对象<sup>[11]</sup>。

为重建建筑 3 维模型,首先根据常识建立以下约束:(1) 建筑物表面为平面;(2) 墙面竖直且与屋檐相接;(3) 屋脊(主轴)、屋檐水平,且相互平行。根据以上相对宽松的约束条件,以下方法可用于处理很多不对称的情况,如屋脊线不在建筑物中心、屋顶平面倾斜程度不同、两屋檐线高度不同等。

通常,具有矩形边界、平面/人字形屋顶的建筑物模型可分解为长方体与三棱柱的组合体(当两屋檐高度不同时,模型可被分解为长方体与两个三棱柱的组合体)。建筑物模型共有 14 个顶点。根据约束条件,10 个顶点即可表达,即长方体的 8 个顶点和屋脊线的 2 个端点。考虑到屋脊、屋檐与地面平行的条件,10 个顶点的 30 个坐标可以进一步简化为 24 个,即 20 个平面坐标和 4 个高度值(地面高度、屋檐与屋脊相对地面的高度)。

屋顶为平面的建筑物模型可以作为人字形屋顶模型的一部分,只需 8 个顶点的 16 个平面坐标和 3 个高度值即可表达,下文不单独描述其提取过程。

### 2.2 基于投影的特征线平高分解方法

特征线平高分解方法是通过在不同水平、竖直投影面中分别提取平面、高度信息来实现特征线的提取。下面以屋脊线提取为例来说明特征线的提取:(1) 在与地面平行的投影面中估计屋脊方向;(2) 在垂直屋脊线的竖直投影面中提取投影点位置,进而提取直线平面位置;(3) 在过屋脊线的竖直投影面中提取高度值。以下结合实验具体说明。其中,直线采用参数方程表达,参数方程如式(1)所示。式(1)中, $\rho$  为原点与直线垂距; $\theta$  为原点到直线垂线从  $X$  轴起算的角度; $X$ 、 $Y$  为平面直角坐标。

$$\rho = X \cos \theta + Y \sin \theta \quad (1)$$

#### 2.2.1 屋脊方向提取

在人字形屋顶建筑物模型中,屋脊(主轴)方向具有特别重要的意义:模型中其他特征线都与之平行或垂直;准确获取该方向有助于减小计算量并提高特征提取的准确性。文献[6]指出:主轴方向在屋脊线和不同高度的截面中都有所体现。根据这个思想,首先在与地面平行的投影面中估计屋脊方向,步骤如下:

(1) 确定水平投影面(方法参考 3.2.2 节);  
(2) 在投影面上提取直线(一般的,直线数量为 2);  
(3) 重复上述过程直至获取足够的方向信息,文中标准为获得大约 6 条平行的直线;(4) 取方向均值作为屋脊线角度。

图 1 显示了 3 个投影面上的数据点和过数据点的直线,分别由红点和蓝线(黑白图中显示为黑色

线)表示(下同), $H$  为投影面高度。其中,直线角度  $\theta$  取值分别为  $61^\circ$  和  $62^\circ$ 。

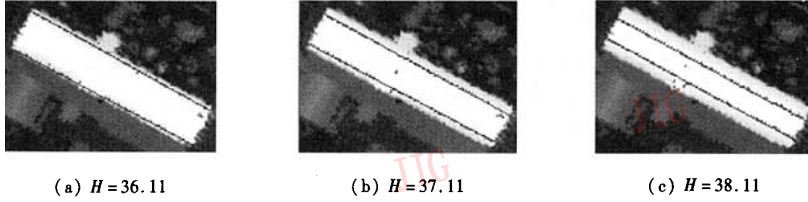


图 1 投影面上的数据点和相应直线

Fig. 1 Points and lines on horizontal projections with different heights

### 2.2.2 屋檐顶点平面坐标提取

对经分解得到的建筑物单元而言,由于其平面位置(建筑物单元在  $XY$  平面上投影范围)已知,因此,结合主轴方向,通过简单处理即可提取建筑物边界及屋檐顶点平面坐标。过程如下:(1) 在与主轴平行和垂直的两个方向上分别提取直线;(2) 由直线交点得

到屋檐顶点平面坐标(如图 2(c)所示)。根据约束条件,长方体底面、顶面角点具有相同平面坐标。

实验中采用独立建筑物模拟分解得到的建筑物单元,需要首先确定建筑物投影范围:利用高度信息对原始数据进行分割,以分割结果作为建筑物在  $XY$  平面上的投影区域(如图 2(b)所示)。



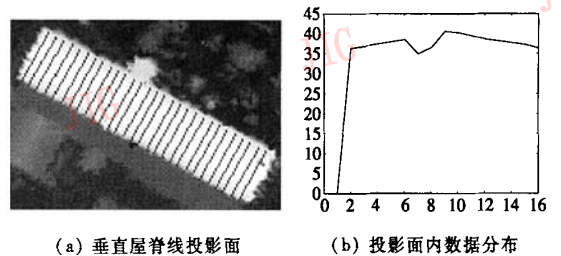
图 2 屋檐顶点平面坐标提取

Fig. 2 Building outlines and vertexes' planar coordinates

### 2.2.3 屋脊线平面位置提取

如前所述,在旋转数据集内确定屋脊线的方法存在 3 个问题。为避免类似问题并有效提取特征线,采用建立投影面、提取特征点的方法确定屋脊线平面位置。

提取屋脊线时,首先,建立一系列垂直于屋脊线的竖直投影面;其次,在每个平面上确定屋脊线投影点;最后,以投影点位置为基础提取屋脊线平面位置。图 3(a)显示了建筑物范围内投影面平面位置;图 3(b)为一个投影面内的数据分布情况:横坐标表示数据点在投影面内平面位置、纵坐标表示数据点高度值(下同)。



(a) 垂直屋脊线投影面 (b) 投影面内数据分布

图 3 垂直屋脊线竖直投影面和投影面内数据分布

Fig. 3 Projections perpendicular to ridgeline and footprints on one plane

通常,屋脊线投影点与投影面内最高点一一对应。图 4(a)、图 4(b)分别显示了投影面内最高点平面位置和依据这些点提取的屋脊线位置。但是,由于存在异常情况(阁楼、粗差等),这种对应关系并非严格,因此,有必要采用更加稳妥的方法提取屋

脊线投影点。其中,一种可行的方法是在投影面内提取屋顶平面的投影直线,以直线交点作为屋脊线投影点。图 4(c)、图 4(d)分别显示了通过直线求得屋脊线投影点及相应屋脊线位置。应用中,这两种方法可单独使用,也可结合使用,相关讨论请参见 3.2.2 节。

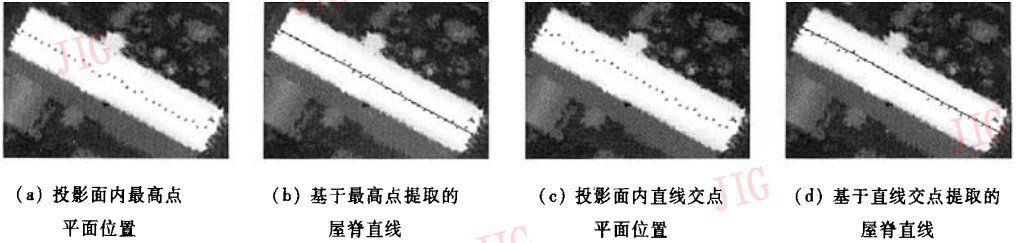


图 4 投影面上最高点、直线交点位置及对应特征线

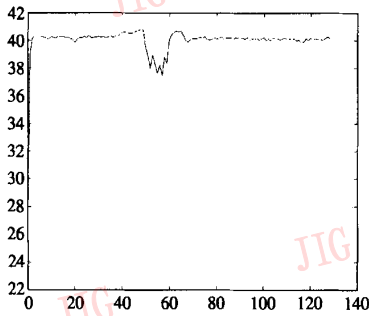
Fig. 4 Ridge points, acmes (a) and intersections (c), and corresponding ridgelines

### 2.2.4 高度信息提取

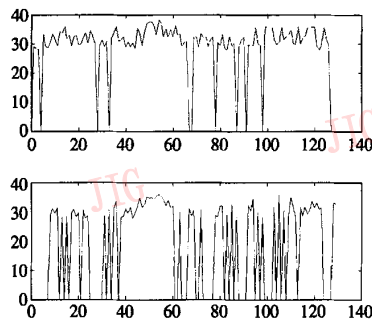
高度信息提取是在过特征线的竖直投影面内进行的:分析投影面内数据(高度值)分布,取主要类别对应的高度作为特征线高度值。由于所有处理都在 1 维空间中进行(仅考虑高度值),因此计算得到大大简化。图 5(a)、图 5(b)分别显示了过屋脊、屋

檐投影面内高度值分布。

通常,两个屋檐的高度估计值会存在一定差异。考虑到多数情况下建筑物屋檐等高的情况,可对屋檐高度值做如下调整:当两屋檐高差较小时,认为两者高度相等,取均值作为屋檐高度;当高差较大时,说明存在不同的高度,保留提取的高度值。



(a) 过屋脊线竖直投影面上的激光脚点



(b) 过屋檐竖直投影面上的激光脚点

图 5 投影面(过屋脊和屋檐)上点的取值

Fig. 5 Footprints on vertical projections, through the ridgeline (a) and the eaves (b)

### 2.2.5 屋脊线顶点平面位置提取

在提取屋脊线顶点平面位置时,对存在和不存在三角形屋顶(gable roof)的建筑物需采取不同的处理步骤。

首先依据以下步骤判断是否存在三角形屋顶:  
 (1) 根据高度信息提取位于屋脊线上的数据点;  
 (2) 根据特征点平面位置分布确定屋脊线顶点初始位置;  
 (3) 通过两顶点与(垂直屋脊线)建筑物边界距离判断是否存在三角形屋顶,当该距离较大时,则认为存在。

在不存在三角形屋顶的情况下,屋脊顶点平面位置可通过屋脊线与建筑物边界交点得到;当存在屋顶时,需判断两顶点是否对称:如对称,则调整顶点位置;如不对称,则保留原始位置。

至此,人字形屋顶 10 个特征点的 3 维坐标已经确定。通过人工判读可知,这些信息与实际情况相符。

### 2.2.6 建立 3 维模型

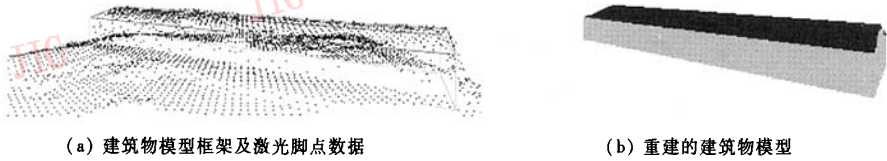
图 6 显示了建筑物 3 维模型。其中,图 6(a)为建筑物模型框架和激光脚点在 3 维空间中的分布;图 6(b)为重建的建筑物 3 维模型。

## 3 实验与分析

### 3.1 实验

实验 1,步骤如下:

(1) 提取屋脊线方向,即主轴方向(如图 7(a)所示);

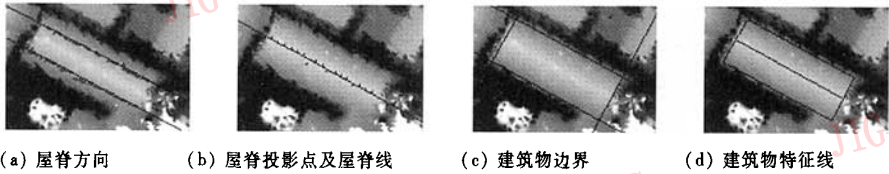


(a) 建筑物模型框架及激光脚点数据

(b) 重建的建筑物模型

图6 建筑物模型

Fig. 6 Building model



(a) 屋脊方向

(b) 屋脊投影点及屋脊线

(c) 建筑物边界

(d) 建筑物特征线

图7 特征点、线位置

Fig. 7 Feature lines and vertexes

- (2) 提取屋脊线平面位置(如图7(b)所示);
- (3) 提取外边界和求屋檐顶点(如图7(c)所示);

- (4) 提取顶点平面坐标(如图7(d)所示)及特征线高度值;
- (5) 建立建筑物模型(如图8所示)。



(a) 重建的建筑物结构



(b) 重建的建筑物模型

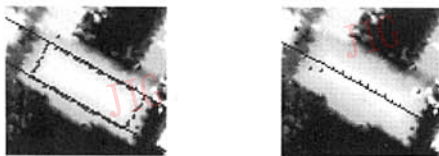
图8 建筑物模型

Fig. 8 Building model

实验2,步骤如下:

- (1) 提取屋脊线方向(如图9(a)所示);
- (2) 提取屋脊线平面位置(如图9(b)所示);

- (3) 提取建筑物外边界和求屋檐顶点(如图9(c)所示);
- (4) 提取顶点平面坐标(如图9(d)所示)及特征线高度信息;
- (5) 建立建筑物模型(如图10所示)。



(a) 屋脊方向

(b) 屋脊投影点及屋脊线

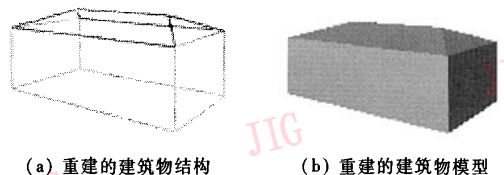


(c) 建筑物边界

(d) 建筑物特征线

图9 特征点、线位置

Fig. 9 Feature lines and vertexes



(a) 重建的建筑物结构

(b) 重建的建筑物模型

图10 建筑物模型

Fig. 10 Building model

### 3.2 讨论

#### 3.2.1 屋脊线投影点提取的两种方式

提取屋脊线投影点的两种方式各有特点:

在投影面内寻找最高点作为屋脊线投影点的方式简便、易行,在屋顶形状规则、没有数据异常的情况下十分有效。但是,当存在阁楼、粗差等影响因素时,它又是抗干扰能力最差的方法,因高度异常值可能对直线位置提取造成明显影响。

在投影面内提取直线交点作为屋脊线投影点的方式具有较强的抗干扰能力;当存在某些异常值时,提取的屋顶面投影直线可能存在偏差,但一般不会很大;相应的,屋脊线投影点也不会明显偏移位置。该方法虽较前一种方法计算量大,但通过确定投影线参数初值(在与屋脊线垂直的竖直投影面内),可有效减少 Hough 变换计算量,并可进一步提高抗干扰能力。

考虑两种方法的优劣势,可以将它们结合使用:在不同投影面上采用不同提取方法。例如,在奇数

投影平面上取直线交点,在偶数投影平面上取最高点。这样,在保证准确性的同时,可以适当降低计算复杂度。

图 11 比较了上述 3 种方法提取屋脊线投影点的性能。其中,图 11(a)中直线表示建筑物范围内两个投影面的位置;图 11(b)、图 11(c)为投影面 1、2 内高度数据分布。图 11(b)表明,在存在数据异常情况下,最高点与屋脊线投影点间不存在对应关系。图 11(d)、图 11(e)分别显示了投影面上最高点和直线交点的位置,图 11(f)为最高点和直线交点相间排列的情况。其中,矩形框区域为建筑物屋顶形态存在异常的部分。从点的平面位置可知,当建筑物形态存在异常情况时,以直线交点为屋脊线投影点的效果较好。

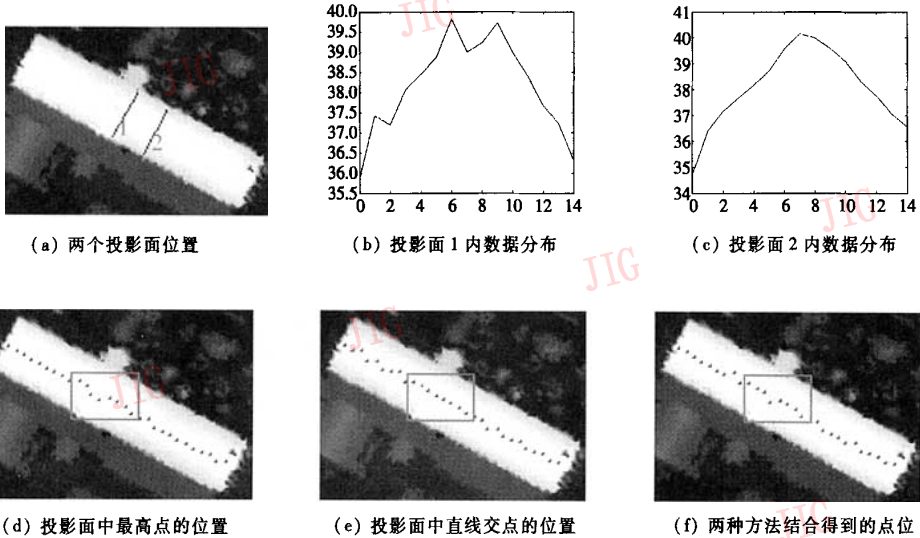


图 11 3 种屋脊线投影点提取方法的比较

Fig. 11 Comparison of three methods to determine points on ridge line

### 3.2.2 提取屋脊方向时使用的高度值

对获取屋脊方向而言,高度取值是一个关键参数,因不恰当的取值可能导致所提取直线并无实际意义。为避免这种影响,可以通过判断所提取的直线是否平行来间接判断高度取值是否合理。

另一种方式是判断直线方向是否与估计值吻合:首先估计屋脊线的可能走向,再判断提取方向是否与之类似;如不类似,则重新选择高度。

屋脊线方向可通过梯度方向累计直方图估计,即判断屋脊线方向是否与直方图峰值平行或垂直。图 12(a)、图 12(b)分别显示了激光雷达数据及其梯度方向直方图。图 12(a)中直线走向对应 5 个主

要梯度方向。图 12(b)为激光雷达数据梯度方向直方图,横坐标为梯度方向、纵坐标为梯度方向累计值(下同)。

由于激光雷达数据自身的特点,边缘梯度方向比较杂乱,占主导地位的方向不明显。这表现在以下两个方面:(1) 主要峰值对应相似的角度;(2) 主要峰值对应相似的累计值。如图 12(b)所示。

相比之下,从光学图像中提取的主方向更便于使用。图 12(c)显示了从光学图像中获取的两个主方向,两者之差恰为 90°;图 12(d)为光学图像梯度方向直方图。这恰说明多源数据综合分析所具有的价值,进一步的工作应重视这方面的研究。

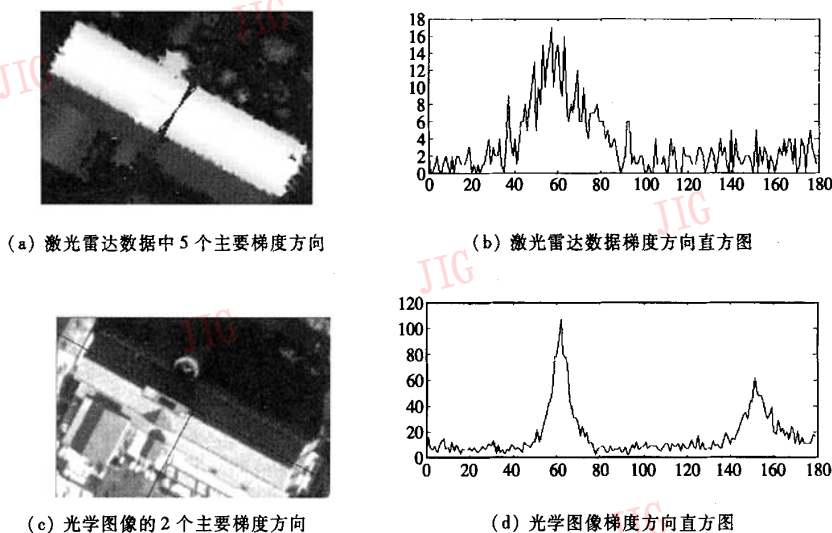


图12 激光雷达、光学数据中的主要方向和梯度直方图

Fig.12 Comparison of dominating gradients between range and optical data

如何直接获得(适当)高度取值是下一步需要解决的问题。分析激光脚点高度取值直方图可能会有帮助,但相应的直方图似乎并不具有明显特征。

## 4 结论

本文提出了一种重建简单规则建筑物模型的方法。该方法利用投影思想,避免了类似特征线提取方法遇到的问题;并以平高分解方法为手段,简化了运算。实验表明,该方法能有效重建简单规则建筑物;可以作为一种通用方法在重建系统中使用(负责重建经分解得到的建筑物单元)。

### 参考文献(References)

- LIANG Xin-lian, ZHANG Ji-xian, LI Hai-tao, et al. The characteristics of LIDAR data [J]. Remote Sensing Information, 2005, (3): 71 ~ 76. [梁欣廉,张继贤,李海涛等. 激光雷达数据特点[J]. 遥感信息, 2005, (3): 71 ~ 76.]
- Finli S. Surface clustering from airborne laser scanning data [J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 2002, 34(3A): 119 ~ 124.
- Haala N, Brenner C. Generation of 3D city models from airborne laser scanning data [A]. In: Proceedings of EARSEL Workshop on LIDAR Remote Sensing on Land and Sea [C], Tallinn, Estonia, 1997: 105 ~ 122.
- Hofmann A D. Analysis of Tin-structure parameter spaces in airborne laser scanner data for 3-D building model generation [J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 2004, 35(B3): 302 ~ 307.
- Maas H G, Vosselman G. Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 1999, 54(2/3): 153 ~ 163.
- Schwalbe E. 3-D building model generation from airborne laserscanning data by Straight line detection in specific orthogonal projections [J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 2004, 35(3B): 249 ~ 254.
- Vosselman G. Building reconstruction using planar faces in very high density height data [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 32(3/2): 87 ~ 92.
- YOU Hong-jian, SU Lin, LI Shu-kai. Automatic extraction of buildings from DSM acquired by airborne three-dimensional imager [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(4): 408 ~ 413. [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 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(4): 408 ~ 413.]
- Suveg I, Vosselman G. 3D reconstruction of building models [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(B2): 538 ~ 545.
- Wang S D, Tseng Y H. Semi-automated CSG model-based building extraction from photogrammetric images [J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 2004, 35(B3): 440 ~ 445.
- Förstner W. 3D-City models: automatic and semiautomatic acquisition methods [A]. In: Photogrammetric Week [C], Stuttgart, German, 1999.